



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

**Βέλτιστος Προγραμματισμός Χειρισμών
Αποθηκευτικών Μέσων Ιόντων Λιθίου με
Ελαχιστοποίηση της Γήρανσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Δαμιανάκος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



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

**Βέλτιστος Προγραμματισμός Χειρισμών
Αποθηκευτικών Μέσων Ιόντων Λιθίου με
Ελαχιστοποίηση της Γήρανσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Δαμιανάκος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την Τρίτη, 30 Οκτωβρίου 2018.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

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

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

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

(Υπογραφή)

.....

Δαμιανάκος Γεώργιος

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

Copyright© Δαμιανάκος Γεώργιος, 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 το συγγραφέα.

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

Περίληψη

Στις μέρες μας με την αυξανόμενη χρήση καινοτόμων τεχνολογιών, η μεταστροφή από τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις ανανεώσιμες πηγές γίνεται όλο και πιο έντονη. Στον διεθνή χάρτη παραγωγής ενέργειας οι ΑΠΕ, καταλαμβάνουν όλο και μεγαλύτερο ποσοστό επί του συνόλου παραγωγής. Η ροπή αυτή, έχει αναδείξει προβλήματα στην αποθήκευση που είχαν προβλεφθεί στο παρελθόν, μα τώρα κρίνεται πιο αναγκαίο από ποτέ να μελετηθούν και να αντιμετωπισθούν. Η μπαταρία ως αποθηκευτικό μέσο, παρουσιάζει περίπλοκες ιδιαιτερότητες που λόγω των υλικών και της αλληλεπίδρασής τους, καθιστούν την ελαχιστοποίηση της γήρανσής της μια πραγματική πρόκληση για τους μελετητές. Με την εισαγωγή των κυψελών ιόντων λιθίου πλέον και για βιομηχανική χρήση, η ανάγκη για την βελτιστοποίηση της απόδοσης και της ζωής του μέσου κρίνεται ζωτικής σημασίας.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια απόπειρα αποτύπωσης βέλτιστων στρατηγικών φορτίσεων κι εκφορτίσεων μπαταριών λιθίου λαμβάνοντας υπόψιν τους μηχανισμούς γήρανσης τους. Για την επίτευξη του στόχου της εργασίας γίνεται μελέτη της ηλεκτροχημικής σύστασης της μπαταρίας ιόντων λιθίου, των παραγόντων που επηρεάζουν την υγεία και την απόδοσή τους και βιβλιογραφική ανασκόπηση κάποιων διαθέσιμων μοντέλων ερμηνείας τους. Επιλέγεται μοντέλο κατάλληλο για την περιγραφή των μπαταριών λιθίου το οποίο τροποποιείται με την χρήση του Ki.Ba.M ώστε να λαμβάνει υπόψιν τους μηχανισμούς γήρανσης. Για την αντιστοίχιση των μεγεθών λειτουργίας της μπαταρίας σε μεγέθη της φθοράς γίνεται χρήση των χαρτών γήρανσης.

Έτσι δημιουργείται αλγόριθμος ελαχιστοποίησης της γήρανσης με την χρήση μοντελοποίησης της μπαταρίας και χάρτη γήρανσης. Η υλοποίηση γίνεται στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB με τα ανάλογα εργαλεία. Στόχος του η ελαχιστοποίηση γήρανσης της μπαταρίας εγκατεστημένης σε απλό δίκτυο με την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου συγκρίνονται με τις τιμές που προκύπτουν για την λειτουργία με περιορισμό της στάθμης φόρτισης και για την λειτουργία άνευ περιορισμών, ενώ διενεργείται και ανάλυση ευαισθησίας στον αλγόριθμο γήρανσης.

Στην συνέχεια αναπτύσσεται αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου σε δίκτυο, για την ομαλή και πληρέστερη ενσωμάτωση του αλγορίθμου γήρανσης στα δίκτυα. Η ακρίβεια του αλγορίθμου OPF, διερευνάται με σύγκριση των αποτελεσμάτων από το εργαλείο MATPOWER για δίκτυα 6 και 33 ζυγών. Αφού διαπιστώνεται η αποδοτικότητά του, μετατρέπεται ώστε να χρησιμοποιηθεί σε βελτιστοποίηση πολλαπλών περιόδων.

Τελικά με χρήση του συνδυασμένου αλγορίθμου OPF και ελαχιστοποίησης της γήρανσης παρουσιάζεται η συμπεριφορά και η γήρανση της μπαταρίας στα δίκτυα των 6 και 33 ζυγών και γίνεται σύγκριση με την πολιτική χειρισμών της μη χρήση του αλγορίθμου.

Λέξεις Κλειδιά

Μπαταρία ιόντων λιθίου, γήρανση μπαταρίας, απώλεια χωρητικότητας, μοντελοποίηση μπαταρίας, Ki.Ba.M, στρατηγικές φόρτισης, χάρτης γήρανσης, βέλτιστη ροή φορτίου, γραμμικοποίηση Taylor, κριτήριο End of Life

Abstract

In today's era, industry's proclivity to transform the energy production from conventional renewable energy sources is greater than ever. Changes in global energy production map show that renewable energy resources are gaining reputation against traditional fossil fuels, becoming a standard in certain applications. Growing demand for clean and abundant energy form a new energy footprint. This trend highlights risks that question storage units' length of life and performance. These problems are known from the past decades, and had been accurately predicted, but now has become the time, for them to be precisely studied in order to be well considered. The necessity of energy storage has always been a drawback and it's often a costly part for the system. Battery as a storage unit, suffers from complicated specificities, due to its composites' and their interaction. Due to abnormalities, performance and expedient length of life might be highly affected by battery degradation. With recent introduction of the normalized use of Lithium-Ion battery cells in industrial application, the necessity of the optimization of their performance and the extension of the end of life of the storage unit has become essential.

This dissertation, aims at the determination of optimized battery charging and discharging strategies taking in account the aging mechanisms and degradation processes. To accomplish this, the electrochemical composition and function of the Li-ion battery has been studied, along with the factors that affect health and performance. A literature review has been carried out on several battery models in order to proceed to the selection of the most proper one. The selected model is accurate for lithium type batteries and it is being extended with Ki.Ba.M to capture the degradation processes of a battery. Finally, introducing degradation maps allows the association of individual controls with battery degradation

A degradation minimization algorithm is created with the integration of battery modeling and degradation maps. It is implemented with Matlab programming environment and other tools. Its objective is to minimize the degradation of the battery placed in a simplified system while simultaneously minimizing the cost of energy production. The degradation results are compared with a SOC constrained a non SOC constrained strategy, while a sensitivity analysis of the degradation algorithm is carried out.

In addition, an optimal power flow algorithm is created for the efficient integration of the degradation algorithm in a power systems' control scheme. Efficiency of the created algorithm is measured by calculating the error of the results of its application on a 6-bus and 33-bus system, compared with those of MATPOWER tool. Afterward the algorithm is being edited in order to be used in a multi period optimization.

Finally, combining the two algorithms created, OPF and minimization of battery degradation, degradation of batteries placed in the 6-bus and 33-bus systems is calculated and compared to the results from not using the proposed degradation algorithm.

Keywords

Lithium-Ion battery, battery degradation, capacity fade, battery modelling, Ki.Ba.M. , charging strategies, degradation maps, optimal power flow, Taylor linearization, End of Life criterion

Ευχαριστίες

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και να αποκομίσω ιδιαίτερα σημαντικές γνώσεις επάνω σε αυτό.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον ερευνητή κ. Ιάσονα Κουβελιώτη Λυσικάτο, που καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου παρείχε καθοδήγηση, συμβουλές και πρόσβαση σε γνώση, συνδράμοντας έτσι σημαντικά σε αυτήν. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον ερευνητή κ. Αλέξη Ρήγα, για την δική του συνεισφορά επάνω στο θέμα.

Ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου, τον καθένα ξεχωριστά για τις απεριόριστες συμβουλές και γνώσεις που αποκόμισα από αυτούς και τις αξέχαστες στιγμές που πέρασα μαζί τους, τους εύχομαι να κυνηγήσουν ό,τι ονειρεύονταν στα φοιτητικά τους χρόνια.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου που μου παρείχαν την ευχέρεια να ξεκινήσω τις σπουδές μου σε μια επισφαλή οικονομικά εποχή.

Την εργασία αυτή θα ήθελα να την αφιερώσω στην οικογένειά μου, συγγενική ή μη.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ.....	6
ABSTRACT	7
KEYWORDS.....	8
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ, ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, Η ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	13
1.1 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	14
1.1.1 Δομή της εργασίας.....	14
1.1.2 Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν.....	15
1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	17
1.2.1 Εισαγωγή.....	17
1.2.2 Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας	18
1.2.3 Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	19
1.2.4 Σύστημα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας	20
1.2.5 Σύστημα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	21
1.2.5.1 Η αναγκαιότητα των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στο ΣΗΕ	22
1.2.5.2 Διάκριση συστημάτων αποθήκευσης	24
1.3 Η ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	25
1.3.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη.....	26
1.3.2 Τύποι μπαταριών.....	28
1.3.3 Η μπαταρία ιόντων Λιθίου.....	30
1.3.3.1 Σύσταση της μπαταρίας Ιόντων Λιθίου.....	30
1.3.3.2 Η λειτουργία της μπαταρίας Ιόντων Λιθίου.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΛΙΘΙΟΥ.....	34
2.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ.....	35
2.1.1 Επισκόπηση Μοντέλων.....	35
2.1.2 Επιλογή Μοντέλου Μπαταρίας	40
2.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΜΠΑΤΑΡΙΑ.....	41
2.1.1 Η χημική φθορά.....	41
2.1.2 Μηχανική Φθορά.....	42
2.1.3 Η φθορά στα μέρη της μπαταρίας.....	42
2.1.3.1 Φθορά στην Άνοδο:	42
2.1.3.2 Φθορά στην κάθοδο	44
2.1.3.3 Φθορά στον διαχωριστή:.....	46
2.1.3.4 Φθορά του συλλέκτη Ρεύματος σε άνοδο και κάθοδο:.....	47
2.1.4 Η γήρανση και η φθορά της μπαταρίας σαν σύστημα	47
2.1.5 Παράγοντες καταπόνησης και φθοράς.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ..	53
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	54
3.1.1 Προσέγγιση του Προβλήματος	54
3.2 ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ.....	55
3.2.1 Μελέτη ταχέων Αντιδράσεων και Κατασκευή του μοντέλου μπαταρίας.....	55
3.2.1.1 Η επέκταση με χρήση του KiBaM.....	56

3.2.1.2	Γραμμικοποίηση του μικτού Μοντέλου 2:.....	57
3.2.1.3	Μελέτη αξιοπιστίας μοντέλου	59
3.2.1.4	Περιορισμός του σφάλματος V_t με εμπειρικό τύπο	61
3.2.2	Μελέτη αργών αντιδράσεων	62
3.3	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΧΑΡΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗΣ	63
3.3.1	Κατασκευή Χάρτη Γήρανσης	64
3.3.2	Επέκταση Χάρτη Γήρανσης με μοντέλα ημερολογιακής γήρανσης και δεδομένα κατασκευαστή.....	65
3.3.3	Τροποποίηση Χάρτη για μπαταρία κάθε μεγέθους.....	67
3.3.4	Γραμμικοποίηση Χάρτη Γήρανσης	68
3.3.5	Σχηματοποίηση και Απεικόνιση Χάρτη Γήρανσης.....	68
3.4	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ	70
3.4	ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ	72
3.4.1	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων για λειτουργία χωρίς την χρήση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης	73
Λειτουργία χωρίς περιορισμούς SoC:	74	
Λειτουργία με περιορισμό SoC:	84	
3.4.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων για την περίπτωση του περιορισμού της SoC και της περίπτωσης άνευ περιορισμών:	92
3.4.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων για την χρήση του αλγόριθμου ελαχιστοποίησης της γήρανσης:.....	97
3.4.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις παραπάνω πολιτικές χειρισμών των μπαταριών.....	102
3.4.6	Ανάλυση ευαισθησίας της ελαχιστοποίησης της γήρανσης στον συντελεστή α της βελτιστοποίησης:.....	110
3.4.7	Διερεύνηση του αλγόριθμου για την εφαρμογή του σε μικρότερο χρονικό ορίζοντα	115
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ		119
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	120
4.1.1	Ανάλυση και μελέτη Βέλτιστης Ροής Ισχύος.....	120
4.2	Η ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ OPF ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	121
4.2.1	Μαθηματική Μοντελοποίηση του OPF:.....	121
4.2.1.1	Στοιχεία Δικτύου:	121
4.2.2	Κατάστρωση των εξισώσεων ροής φορτίου	123
4.3	ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ OPF ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	126
4.3.1	Γραμμικοποίηση με χρήση αναπτύγματος Taylor (TLS).....	127
4.3.3	Κατάστρωση Γραμμικοποιημένων Εξισώσεων Ροής Φορτίου.....	129
4.4	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	129
4.5	ΜΕΛΕΤΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	130
4.5.1	Case study - Δίκτυο 6 ζυγών.....	130
4.5.2	Case study - Δίκτυο 33 ζυγών.....	136
4.6	ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	142
4.6.1	Διαμόρφωση Αλγορίθμου OPF για την επίλυση του Multi Period προβλήματος.....	142
4.6.2	Εκτέλεση αλγορίθμου OPF για τα 2 Case Studies	143
4.6.2.1	Εκτέλεση αλγορίθμου OPF για το Σ.Η.Ε 6 ζυγών.....	144
4.6.2.2	Εκτέλεση αλγορίθμου OPF για το Σ.Η.Ε 33 ζυγών.....	147
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Η ΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.....		153
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	154
5.2	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	154
5.3	ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	155

5.3.1 Εφαρμογή στο δίκτυο 6 ζυγών.....	156
5.3.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής στο ΣΗΕ 6 ζυγών, με τα αποτελέσματα λειτουργίας χωρίς συνυπολογισμό της γήρανσης.	160
5.3.3 Εφαρμογή στο δίκτυο 33 ζυγών.....	162
5.3.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής στο ΣΗΕ 33 ζυγών, με τα αποτελέσματα λειτουργίας χωρίς συνυπολογισμό της γήρανσης.	165
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	168
6.1 ΣΥΝΟΨΗ.....	169
6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	170
6.3 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	172
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	173
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	177

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή, Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, η Μπαταρία ως Σύστημα Αποθήκευσης

1.1 Δομή της διπλωματικής εργασίας

1.1.1 Δομή της εργασίας

Παρακάτω παρατίθεται η ροή των κεφαλαίων της διπλωματικής, μαζί με μια σύντομη περιγραφή του περιεχομένου του καθενός:

Κεφάλαιο 1:

Γίνεται παρουσίαση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των αλγορίθμων βέλτιστης στρατηγικής και ροής φορτίου, των πρόσθετων εργαλείων και των προγραμματιστικών επιλυτών (solvers). Εισαγωγικά στοιχεία και σύντομη εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και στα συστήματα αποθήκευσής της, στην σύσταση της μπαταρίας, την λειτουργία της, τους μηχανισμούς και τα οφέλη που προκύπτουν από την χρήση της. Σύντομη αναφορά στους τύπους της μπαταρίας και εστίαση στις μπαταρίες Li-ion.

Κεφάλαιο 2:

Βιβλιογραφική ανασκόπηση των υπάρχοντων μοντέλων περιγραφής μπαταριών. Ακολουθεί η επιλογή και σχολιασμός του καταλληλότερου για το είδος της μπαταρίας και της εφαρμογής που διερευνάται στην εργασία. Γίνεται επίσης εκτενής περιγραφή στα φαινόμενα γήρανσης και φθοράς στις μπαταρίες λιθίου, με επεξήγηση των μηχανισμών φθοράς και εντοπισμό των παραγόντων που τους επηρεάζουν. Αντιστοίχιση των τελευταίων με επιπτώσεις στην μπαταρία.

Κεφάλαιο 3:

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρόβλημα βέλτιστης στρατηγικής φόρτισης κι εκφόρτισης των μπαταριών ιόντων λιθίου. Υλοποιείται μεθοδολογία για την ελαχιστοποίηση της γήρανσης. Αναλύεται η μαθηματική περιγραφή του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του αλγορίθμου και παρουσιάζονται οι τροποποιήσεις που γίνονται για την αποδοτικότητά του. Περιγράφεται η δημιουργία των χαρτών γήρανσης των μπαταριών για την έκφραση των επιπτώσεων της φθοράς της μπαταρίας στα χαρακτηριστικά τους και αναπτύσσεται αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από την εφαρμογή τους, ενώ πιστοποιείται η αξιοπιστία του κάνοντας σύγκριση των στρατηγικών χειρισμών των φορτίσεων κι εκφορτίσεων των μπαταριών. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα από την απεριόριστη χρήση της μπαταρίας βάσει των αναγκών του δικτύου με την περίπτωση του ποσοτικού περιορισμού μεγεθών (στάθμη φόρτισης) και αυτήν της βέλτιστης στρατηγικής με την χρήση του προαναφερθέντα αλγορίθμου, σε χρονικό ορίζοντα 180 ημερών. Στο τέλος πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας του αλγορίθμου και διερεύνηση προσαρμογής του σε εφαρμογές μικρότερου χρονικού ορίζοντα.

Κεφάλαιο 4:

Γίνεται περιγραφή του προβλήματος ροής φορτίου και μετατροπή του σε γραμμικοποιημένο μέσω σειρών Taylor. Αναπτύσσεται αλγόριθμος για την

βελτιστοποίηση της ροής ισχύος. Τα αριθμητικά αποτελέσματα από την εφαρμογή του συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν από την εκτέλεση κατάλληλης συνάρτησης του εργαλείου MATPOWER. Στην συνέχεια ο αλγόριθμος επεκτείνεται για βελτιστοποίηση σε πολλαπλές περιόδους με χρονικό ορίζοντα 180 ημερών και παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από την εφαρμογή τους.

Κεφάλαιο 5:

Αναπτύσσεται αλγόριθμος συνδυάζοντας τον αλγόριθμο της βέλτιστης ροής φορτίου και της ελαχιστοποίησης της γήρανσης των μπαταριών. Στην συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα για 180 ημέρες.

Κεφάλαιο 6:

Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη της διπλωματικής εργασίας, εξάγονται τα συμπεράσματα και γίνεται ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Επίσης παρουσιάζονται κάποιες πιθανές επεκτάσεις. Στο τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία της παρούσας διπλωματικής και το Παράρτημα.

1.1.2 Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας (υπολογισμοί, απεικόνιση κλπ) χρησιμοποιήθηκαν κάποια εργαλεία και προγράμματα Η/Υ. Μια σύντομη αναφορά σε αυτά γίνεται παρακάτω:

Matlab:

Για την αριθμητική εφαρμογή των βελτιστοποιήσεων των Κεφαλαίων 3 , 4 , 5 χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab [1]. Πρόκειται στην ουσία για μια προγραμματιστική πλατφόρμα που σχεδιάστηκε για επιστήμονες και μηχανικούς. Πυρήνας του Matlab αποτελεί η προγραμματιστική γλώσσα Matlab, η οποία είναι μια γλώσσα βασισμένη σε πίνακες, επιτρέποντας την πιο φυσική έκφραση των υπολογιστικών μαθηματικών. Μέσω του Matlab μπορεί να γίνει ανάλυση δεδομένων, ανάπτυξη αλγορίθμων, δημιουργία μοντέλων και εφαρμογών. Η γλώσσα, οι εφαρμογές και οι ενσωματωμένες συναρτήσεις δίνουν την δυνατότητα για μια πολύπλευρη προσέγγιση της λύσης των προβλημάτων. Οι εφαρμογές που χρησιμοποιείται το Matlab, είναι αναρίθμητες και περιλαμβάνουν deep & machine learning, συστήματα ελέγχου, επεξεργασία σημάτων, επικοινωνίες, επεξεργασία εικόνας και βίντεο, έλεγχο και μετρήσεις, υπολογιστική λογιστική και βιολογία.

Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση Matlab 2016b με άδεια από τον κεντρικό εξυπηρετητή αδειών licenses.central.ntua.gr του Κέντρου Ηλεκτρονικών Υπολογιστών [2].

Matpower:

Για τα δεδομένα των Σ.Η.Ε που χρησιμοποιήθηκαν στα κεφάλαια 3, 4, 5 καθώς και για την πιστοποίηση της απόδοσης του αλγορίθμου βέλτιστης ροής ισχύος χρησιμοποιήθηκε το πακέτο αρχείων Matpower [3]. Πρόκειται για ένα πακέτο αρχείων .M της προγραμματιστικής γλώσσας Matlab ανοιχτού κώδικα που διατίθενται δωρεάν. Αναπτύχθηκε από Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sánchez και άλλους, αρχικά ως κομμάτι του εγχειρήματος PowerWeb που πλέον έχει διακοπεί [4].

Χρησιμοποιείται για την επίλυση και προσομοίωση προβλημάτων όπως αυτά της ροής ισχύος (Power Flow – PF) , συνεχούς ροής ισχύος (Continuous PF – CPF) , βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal PF – OPF) και άλλων [5]. Είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης εύκολο στην χρήση και την επεξεργασία του, ενώ οι κώδικες που χρησιμοποιεί είναι απλοί και αποδοτικοί.

Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση Matpower 6.0 υπό την άδεια ανοιχτού κώδικα 3-Clause BSD License [6].

Yalmip:

Ενώ το προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab αρκεί για την κατάστρωση των εξισώσεων των μοντέλων που αναπτύσσονται, η επίλυση τους ως προς την βέλτιστη λύση είναι δυνατή μέσω της εργαλειοθήκης Yalmip [7] . Πρόκειται για μια δωρεάν συλλογή εργαλείων για την γλώσσα Matlab, που δημιουργήθηκε από τον Johan Löfberg, και χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση και επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης σε συστήματα και στην θεωρία ελέγχου. Υποστηρίζει βελτιστοποίηση αρκετών κλάσεων (linear, integer, mixed integer linear, quadratic, second order cone) [8] . Ενσωματώνει διάφορους επιλυτές, όμως ανάλογα την φύση του προβλήματος ο χρήστης μπορεί να εισάγει έναν επιλυτή της επιλογής του.

Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση R20180413 υπό ελεύθερη άδεια.

Gurobi:

Για την επίλυση με την χρήση των παραπάνω εργαλείων χρησιμοποιήθηκε ο επιλυτής Gurobi [9]. Πρόκειται για έναν επιλυτή μαθηματικού προγραμματισμού που χρησιμοποιείται στην λύση διαφόρων τύπων προβλημάτων (LP, QP, MILP,MIQP κ.α.). Έχει αναπτυχθεί σε πλήρη ενσωμάτωση με τα νέα υλικά που χρησιμοποιούνται στους Η/Υ, ώστε να εκμεταλλεύεται τις νέες αρχιτεκτονικές ενώ συνεχώς εμπλουτίζεται με νέους αποδοτικότερους αλγορίθμους.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση Gurobi-8.0.1 υπό δωρεάν ακαδημαϊκή άδεια, που συνδέεται στα ακαδημαϊκά στοιχεία του φοιτητή.

STAC:

Για την απεικόνιση των δικτύων χρησιμοποιήθηκε το online εργαλείο STAC (Steady State AC Network Visualization) [10]. Πρόκειται για ένα εργαλείο απεικόνισης των δικτύων που περιγράφονται από τα αρχεία του Matpower.

Hardware και λοιπά εργαλεία:

Το πλήθος των διαδικασιών βελτιστοποίησης και η χρήση των παραπάνω έγινε σε υπολογιστική πλατφόρμα με χαρακτηριστικά:

CPU: i5 Intel Core i5 3320M @ 2.60GHz (Ivy Bridge)

RAM: 8,00GB @ 798MHz.

Άλλα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο επεξεργαστής κειμένου Microsoft Word, για την συγγραφή της Διπλωματικής Εργασίας, το υπολογιστικό

φύλλο Microsoft Excel, για την τήρηση αρχείου δεδομένων και το λογισμικό ανοιχτού κώδικα Draw.io [11] για την σχεδίαση διαγραμμάτων.

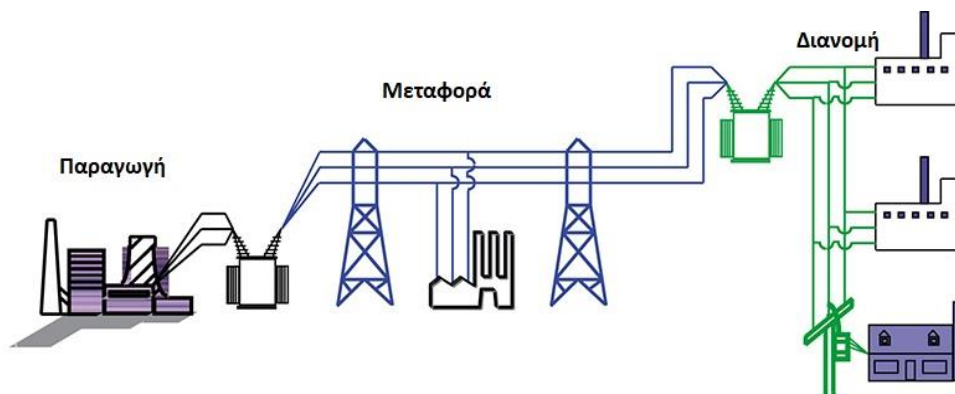
1.2 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.2.1 Εισαγωγή

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) ποικίλλουν όχι μόνο σε μέγεθος αλλά και σε επιμέρους τμήματα που τα απαρτίζουν. Σ.Η.Ε ονομάζεται το σύνολο των επιμέρους τμημάτων εξοπλισμού κι εγκαταστάσεων για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Μόνιμη επιδίωξη και σημαντική προϋπόθεση καλής λειτουργίας ενός Σ.Η.Ε είναι η ικανοποίηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του κόστους, και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Καλείται έτσι να προσφέρει ηλεκτρικό ρεύμα σταθερής συχνότητας και τάσης αλλά και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Παρόλες τις διαφορές το μεγαλύτερο ποσοστό των Σ.Η.Ε έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά, όπως η συχνότητα, οι τρεις φάσεις κατά την μεταφορά μέσης τάσης και τα πρότυπα των γραμμών διανομής χαμηλής τάσης, η χρήση ή όχι ουδέτερου αγωγού. Για την τροφοδότηση των καταναλωτών, ένα σύστημα στην μέχρι τώρα ανάλυση, χωρίζεται σε τρία επιμέρους υποσυστήματα: το σύστημα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής. Καλύπτεται έτσι η διαδρομή της ηλεκτρικής ενέργειας, από το σημείο της παραγωγής έως τον τελικό καταναλωτή. Οι βιομηχανικοί καταναλωτές συνδέονται κατά κύριο λόγο στην Υψηλή και Μέση Τάση (ΥΤ και ΜΤ) , ενώ στην Χαμηλή Τάση (ΧΤ) συνδέονται κυρίως οι οικιακοί καταναλωτές.

Η ισχύς ενός Σ.Η.Ε που πρέπει να είναι διαθέσιμη προς τους καταναλωτές κάθε στιγμή καθορίζεται από την συνολική μέγιστη ζήτηση αφού δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης για μεγάλο χρονικό διάστημα με διαστάσεις και χαρακτηριστικά που ικανοποιούν να ικανοποιούν την συνολική ζήτηση [12].



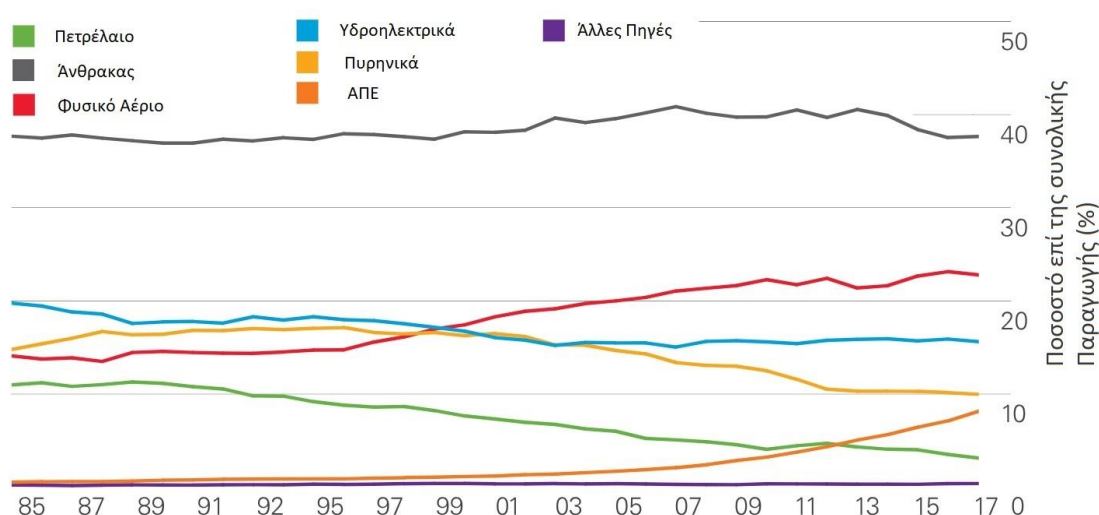
Σχήμα 1.1: Αποτύπωση των 3 υποσυστημάτων ενός Σ.Η.Ε [13]

Τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε), σε απομονωμένα κιάλας συστήματα, άρχισε να σχηματίζεται, να μελετάται και να

προσαρμόζεται το σύστημα αποθήκευσης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, είτε πρόκειται για κάποιο απομονωμένο σύστημα ή για διασυνδεδεμένο δίκτυο. Έτσι τα Σ.Η.Ε υποδιαιρούνται σε τέσσερα πλέον υποσυστήματα και η αποθήκευση ενέργειας γίνεται πλέον ένα από τα πιο βασικά κομμάτια της παραγωγής, διανομής, μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και της διαχείρισης της κατανάλωσης.

1.2.2 Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται η μετατροπή μιας πρωτογενούς μορφής ενέργειας. Αυτή η διαδικασία μπορεί να μην είναι άμεση και συνήθως περιλαμβάνει τρία ή και παραπάνω στάδια. Σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως η μετατροπή της πρωτογενούς ενέργειας σε μηχανική και στην συνέχεια σε ηλεκτρική. Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων, από την εκμετάλλευση της υδραυλικής ενέργειας του νερού και τα τελευταία χρόνια από την αιολική και ηλιακή ενέργεια και άλλες πηγές ενέργειας όπως τα θαλάσσια κύματα, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία και η βιομάζα.



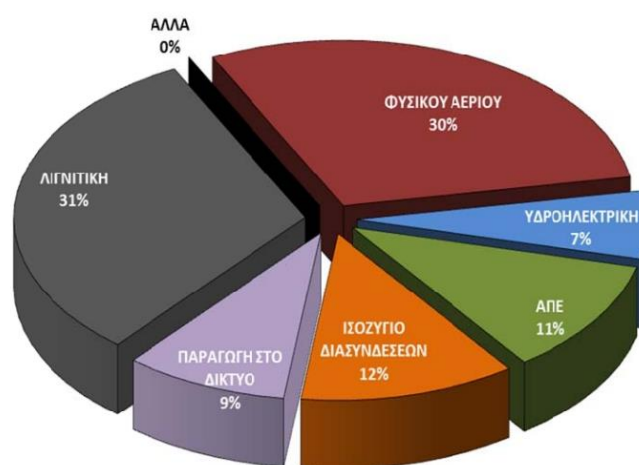
Γράφημα 1.1: Διεθνής ποσοστιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά έτος για κάθε πηγή πρωτογενούς μορφής ενέργειας [14]

Οι σταθμοί παραγωγής χωρίζονται ανάλογα τον τύπο της διαδικασίας εκμετάλλευσης της ενέργειας και την μορφή της ίδιας της πρωτογενούς ενέργειας. Μερικοί από αυτούς είναι:

- Ατμοηλεκτρικοί όπου γίνεται χρήση ατμοπαραγωγών και ατμοστροβίλων που κινούν ηλεκτρογεννήτρια.
- Ντιζελοηλεκτρικοί και αεριοστροβιλικοί όπου γίνεται χρήση ΜΕΚ και αεριοστροβίλων για την τροφοδότηση της γεννήτριας.
- Πυρηνικοί όπου γίνεται κι εδώ χρήση ατμοστροβίλων όμως η παραγωγή του ατμού γίνεται με ή μέσω των πυρηνικών αντιδραστήρων.

- Υδροηλεκτρικοί όπου η γεννήτρια τροφοδοτείται απευθείας από τον υδροστρόβιλο που κινείται με την εκμετάλλευση της ροής του νερού.
- Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί/ Πάρκα όπου εγκαθίστανται συστοιχίες φωτοβολταϊκών στοιχείων για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική με την βοήθεια κατάλληλων διατάξεων
- Αιολικά πάρκα όπου η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται με την εγκατάσταση αννεμογεννητριών.

Στην Ελλάδα η παραγωγή της ενέργειας βασίζεται κυρίως στον λιγνίτη και το φυσικό αέριο με την διεύδυση των ΑΠΕ να αυξάνεται συνεχώς.



Γράφημα 1.2: Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή στην Ελλάδα για το 2017 [15]

1.2.3 Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας εννοείται το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής έως τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν τα κέντρα κατανάλωσης κι απ' όπου ξεκινά το δίκτυο διανομής [12]. Τροφοδοτούν επίσης βιομηχανικούς πελάτες οι οποίοι κατασκευάζουν δικό τους υποσταθμό και δίκτυο διανομής χαμηλής και μέσης τάσης.

Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού των διάφορων επιπέδων τάσεως που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μεταφοράς. Το σύστημα μεταφοράς θα πρέπει να παρέχει σταθερή τάση και οι τάσεις των τριών φάσεων να είναι συμμετρικές. Η κυματομορφή της τάσης πρέπει να έχει ημιτονοειδή μορφή και η συχνότητα να είναι σταθερή. Τέλος η αποδοτικότητα θα πρέπει να πλησιάζει την τιμή η οποία να συνεπάγεται ελάχιστο ετήσιο κόστος μεταφοράς.

Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή και υπερυψηλή τάση, διότι αυτό συνεπάγεται, μικρότερες εντάσεις ρεύματος, μικρότερης διατομής αγωγούς και μικρότερες απώλειες ενέργειας και συνεπώς οικονομικότερη λειτουργία. Ανάλογα της απόστασης και της ισχύος που μεταφέρεται χρησιμοποιούνται διάφορες στάθμες τάσεις οι οποίες φαίνονται παρακάτω:

- Εξαιρετικά Υψηλή Τάση – ΕΥΤ: Οι τάσεις πάνω από τα 500kV
- Υπερύψηλη Τάση – ΥΥΤ: Οι τάσεις μέχρι τα 500kV
- Υψηλή τάση – ΥΤ : Οι τάσεις μέχρι τα 220kV

Τα δίκτυα μεταφοράς έχουν κυκλική ή διαμήκη μορφή ανάλογα με τη σχετική θέση των σταθμών παραγωγής ως προς τα κέντρα κατανάλωσης, ενώ η διάταξη τους είναι βροχοειδής [12].

Αρμόδιος φορέας για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα είναι ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ). Την κύρια γραμμή μεταφοράς στην χώρα αποτελούν τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400kV, που συνδέουν το κέντρο παραγωγής της Δυτικής Μακεδονίας [16].

Το Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς διαθέτει επιπλέον γραμμές των 400kV, εναέριας, υπόγειας γραμμές και υποβρύχια καλώδια των 150kV που συνδέουν την Άνδρο και τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας, Κέρκυρα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθο με το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, καθώς και μία υποβρύχια διασύνδεση της Κέρκυρας με τη Ηγουμενίτσα στα 66kV. Κατά τον Μάρτιο του 2018 το Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς αποτελείτο από 11.513 χιλιόμετρα γραμμών μεταφοράς [15].

ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (km)					
ΤΥΠΟΣ	400 kV	Σ.Ρ. 400 kV	150 kV	66 kV	ΣΥΝΟΛΟ
ΕΝΑΕΡΙΕΣ	2.756,42	106,95	8.157,05	39,05	11.059,46
ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ			227,57	15,00	242,57
ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ (με Υ/Γ τμήμα)			16,55		16,55
ΥΠΟΓΕΙΕΣ	31,35		163,84		195,19
ΣΥΝΟΛΟ	2.787,76	106,95	8.565,01	54,05	11.513,76

Πίνακας 1.1: Οι γραμμές μεταφοράς στο Ελληνικό Δίκτυο Μεταφοράς [15]

Σημαντική είναι επίσης και η αναφορά στους εγκατεστημένους μετασχηματιστές εντός του συστήματος μεταφοράς οι οποίοι για το ελληνικό δίκτυο μεταφοράς ανέρχονται σε 63 στον αριθμό και 16.767 MVA σε συνολική Ισχύ [15].

1.2.4 Σύστημα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Με τον όρο διανομή ηλεκτρικής ενέργειας εννοούμε το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων αυτή φτάνει στους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς [12].

Τα δίκτυα διανομής φτάνουν μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης ενέργειας στον καταναλωτή. Μετά τον μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση, που περιλαμβάνει το εσωτερικό δίκτυο διανομής και τις συσκευές κατανάλωσης.

Τα τελευταία χρόνια, ο όρος σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής και τις εσωτερικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, καλύπτει δηλαδή όλο το φάσμα της διανομής και της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι απώλειες στο σύστημα της διανομής υπολογίζονται περίπου διπλάσιες σε σχέση με αυτές στο σύστημα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η κατασκευαστική διαμόρφωση των δικτύων διανομής συνδέεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δόμησης των πόλεων και γενικότερα με τον τρόπο χωροταξικής διαμόρφωσης κάθε χώρας. Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται, ανάλογα με την τάση:

- Υψηλής Τάσης – ΥΤ: 60-150kV
- Μέσης Τάσης – ΜΤ: 1-60kV
- Χαμηλής Τάσης – ΧΤ : 100-1000V

Επιπλέον, διακρίνονται βάσει της κατασκευής τους σε εναέρια και υπόγεια (χερσαία ή υποθαλάσσια).

Η μορφή των δικτύων διανομής είναι κατά κανόνα ακτινική και πιο σπάνια βροχοειδής [12]. Στα ακτινικά δίκτυα διανομής όλα τα φορτία του δικτύου τροφοδοτούνται μόνο από το ένα άκρο τους. Οι κλάδοι του δικτύου δε συνδέονται μεταξύ τους αλλά διαδίδονται ακτινικά από την κεντρική τροφοδοσία προς τα φορτία.

Η διάκριση μεταξύ Δικτύου Διανομής και Μεταφοράς τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και πιο αόριστη. Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης και η παράλληλη εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στην χρήση όλο και υψηλότερων τάσεων στα δίκτυα διανομής και μεταφοράς με αποτέλεσμα τα παραπάνω να συγχωνεύονται. Απαντώνται περιπτώσεις όπου δίκτυα που παλαιότερα έπαιζαν τον ρόλο της μεταφοράς πλέον να χαρακτηρίζονται ως δίκτυα υπομεταφοράς αποτελώντας συστατικό στοιχείο του δικτύου διανομής.

Στην Ελλάδα Το Δίκτυο Διανομής, περιλαμβάνει [17]:

- το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (20kV) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής.
- το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (220/380V) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές

1.2.5 Σύστημα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, ονομάζεται το σύνολο των διατάξεων που επιτρέπουν την αποθήκευσή της με σκοπό την μεταγενέστερη διάθεσή της προς κατανάλωση. Ένα σύστημα αποθήκευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικούς σκοπούς (κάλυψη μέγιστης, ζήτησης, εξυπηρέτηση κ.α.) και ανάλογα τις απαιτήσεις του εκάστοτε Σ.Η.Ε.

Η άμεση διάθεση ενέργειας βρίσκει πολλές εφαρμογές στην κάλυψη των αναγκών ενός ΣΗΕ. Η χρονική διακύμανση του φορτίου είναι σχετικά προβλέψιμη ώστε να προσαρμόζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Για τεχνικούς λόγους και σε περιόδους

χαμηλού φορτίου, οι μεγάλοι θερμικοί σταθμοί δεν μπορούν να μειώσουν την παραγωγή τους κάτω από ένα τεχνικό ελάχιστο όριο οπότε τις χρονικές αυτές περιόδους φαίνεται να περισσεύει ισχύς στο δίκτυο που θα μπορούσε να αποθηκευτεί. Το ίδιο ισχύει και για την ενέργεια που προέρχεται από τα Αιολικά Πάρκα.

Σημαντική επίσης, είναι η συνεισφορά της αποθηκευμένης ενέργειας στην κάλυψη των αιχμών της ζήτησης, αφού η περίσσεια ενέργεια που παράγεται, αποθηκεύεται και αξιοποιείται σε δεύτερο χρόνο, πετυχαίνοντας έτσι την μείωση του κόστους των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, οι οποίες δεν χρειάζεται να επιβαρύνονται λειτουργώντας στο ανώτατο όριό τους.

Η αποθηκευμένη ενέργεια συμβάλλει στην βελτίωση της ποιότητας της παραγωγής, ενώ αυξάνει την αξιοπιστία ενός συστήματος, εξοικονομώντας καύσιμα και πετυχαίνοντας αδιάλειπτη συμφωνία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Η αποθήκευση ακόμη, ικανοποιεί αποτελεσματικότερα τους καταναλωτές που απαιτούν αδιάκοπη παροχή ισχύος, ενώ συμβάλλει στον εξευγενισμό της ηλεκτρικής ενέργειας από οικολογική σκοπιά.

Απολύτως σημαντική είναι η αξιοποίηση μέσω αποθήκευσης ενέργειας για τις ΑΠΕ.

1.2.5.1 Η αναγκαιότητα των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στο ΣΗΕ

Η αποθήκευση είναι ένα βασικό στοιχείο των δικτύων, των καινοτομιών των μικροδικτύων και των smart grids και ζωτικής σημασίας για απομακρυσμένα υβριδικά συστήματα και behind the meter εφαρμογών. Επίσης, τα off grid συστήματα και οι εγκαταστάσεις τηλεπικοινωνιών βασίζονται στην αποθήκευση ενέργειας.

Η τάση πλέον για αποκεντρωμένη on-site αποθήκευση στην πλευρά της παραγωγής αλλά και της κατανάλωσης έχει ωριμάσει. Η βιομηχανία ανταπεξέρχεται σε αυτήν, με λύσεις μικρού και μεσαίου μεγέθους αποθηκευτικά, παρέχοντας και έξυπνα συστήματα διαχείρισης, στην παραγωγή, την μεταφορά, την διανομή, την κατανάλωση.

Τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με Α.Π.Ε χρησιμοποιούνται με αυξανόμενους ρυθμούς. Όσο τα αποθέματα παραδοσιακών ορυκτών καυσίμων λιγοστεύουν και η πρόσβαση σε αυτά δυσχεραίνεται, η αναγκαιότητα σπανιότερης χρήσης τους, όπως η εύρεσης νέων τρόπων παραγωγής γίνεται όλο και πιο επιτακτική. Ταυτόχρονα τα καταστρεπτικά αποτελέσματα των συμβατικών τρόπων παραγωγής ενέργειας στο παγκόσμιο οικοσύστημα και περιβάλλον, καθιστούν την στροφή σε καθαρότερες μορφές ενέργειας απολύτως αναγκαία.

Έτσι η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την ετερόχρονη κατανάλωσή της προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα τόσο στην Κεντρική όσο και την αποκεντρωμένη παραγωγή, αλλά και στο επίπεδο της μεταφοράς, διανομής και κατανάλωσης.

Στον τομέα της παραγωγής, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας χρησιμοποιούνται:

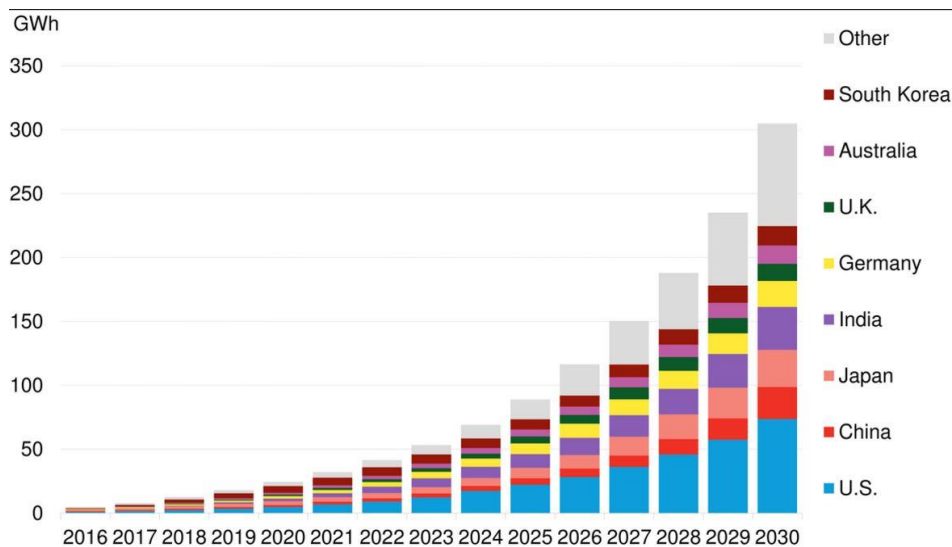
- Ως μονάδες ταχείας εφεδρείας, για την άμεση εξυπηρέτηση της κατανάλωσης, ακόμη και στην ακραία περίπτωση διακοπής λειτουργίας μιας εκ των μονάδων παραγωγής
- Ως μονάδες υπεύθυνες για τον έλεγχο της συχνότητας και τον έλεγχο μεταφοράς ισχύος εντός περιοχής του δικτύου
- Ως μονάδες αρμόδιες για την αποθήκευση χαμηλού κόστους ποσοτήτων ενέργειας - νυχτερινά τιμολόγια, υψηλή παραγωγή ΑΠΕ- και απόδοσης των σε περιόδους αιχμής.
- Για διαρκή Εξυπηρέτηση Ζήτησης σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η σύνδεση με υπάρχοντα δίκτυα κρίνεται ανέφικτη, λόγω μεγάλης απόστασης και κόστους διασύνδεσης.
- Αντιμετώπιση της Στοχαστικής Φύσης των Α.Π.Ε, εξομάλυνση των ανισοροπιών κι εκμηδένιση της πιθανότητας μη εξυπηρέτησης του φορτίου.

Στον τομέα της μεταφοράς – διανομής, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας εξυπηρετούν:

- Στο συγχρονισμό όλων των τμημάτων που συνθέτουν μια γραμμή μεταφοράς, για την αποφυγή προβληματικής λειτουργίας του συστήματος,
- Στον έλεγχο της μεταφερόμενης τάσης με σκοπό τη διατήρηση της τελευταίας εντός επιθυμητών ορίων
- Στην αποφυγή προσαρμογής του δικτύου με την δημιουργία νέων γραμμών μεταφοράς και εγκατάσταση νέων μετασχηματιστών εφόσον η υπάρχουσα παραγωγή δύναται να καλύψει τις απαιτήσεις ηλεκτρικής κατανάλωσης.

Σε επίπεδο τελικού καταναλωτή, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας εξυπηρετούν:

- Στη διαχείριση ενέργειας παραγόμενης από ανανεώσιμες πηγές, με πρωταρχικό στόχο την κατά το δυνατόν παρακολούθηση του προφίλ ζήτησης (stand-alone)
- Στη σταδιακή υποβάθμιση του μέγιστου εμφανιζόμενου φορτίου κατανάλωσης με απώτερο σκοπό την αντιμετώπιση της αντίστοιχης χρέωσης στα τιμολόγια των παραγωγών (peak shaving)
- Στη βελτίωση της ποιότητας του παρεχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, αντιμετωπίζοντας απότομες και έντονες αυξομειώσεις της ηλεκτρικής τάσης καθώς και στην ενίσχυση της αξιοπιστίας παροχής ηλεκτρικού ρεύματος [18]



Γράφημα 1.3: Χωρητικότητα εγκατεστημένων αποθηκευτικών μέσων σε παγκόσμιο επίπεδο (2016-2018) και πρόβλεψη νέων εγκαταστάσεων , Bloomberg[19]

Βλέπει κανείς ότι η έννοια και η τεχνολογία της αποθήκευσης της ενέργειας εισάγεται έτσι ώστε να αυξηθεί η αξιοπιστία της παραγωγής. Αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για να γίνει δυνατή η αξιοποίηση των περισσότερων ΑΠΕ και, ιδιαίτερα, της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας. Από την άλλη τα αυτόνομα συστήματα ΑΠΕ μπορούν να λειτουργήσουν μόνο με αξιόπιστα συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας, αλλά και να επιτευχθεί η ενσωμάτωση της ηλεκτρικής ισχύος από τις ΑΠΕ στο δίκτυο σε μεγάλη κλίμακα, ενώ παράλληλα αποτελούν το κλειδί για την περαιτέρω διείσδυση των ΑΠΕ στα δίκτυα.

Καταλήγοντας είναι βέβαιο ότι η καλή λειτουργία δικτύων διεσπαρμένης παραγωγής του μέλλοντος θα βασίζεται σε οικονομικά αποδοτικά αποθηκευτικά μέσα.

1.2.5.2 Διάκριση Συστημάτων αποθήκευσης

Λόγω του φάσματος, εφαρμογών και υλικών των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η κατηγοριοποίησή τους μπορεί να γίνει με αρκετά κριτήρια. Για την κάλυψη του περιεχομένου της παρούσας διπλωματικής, τα μέσα αποθήκευσης μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα τον σκοπό της εφαρμογής στην οποία χρησιμοποιούνται, στην προκειμένη την αξιοποίηση ηλεκτρικής ενέργειας σε μεταγενέστερο χρόνο [20].

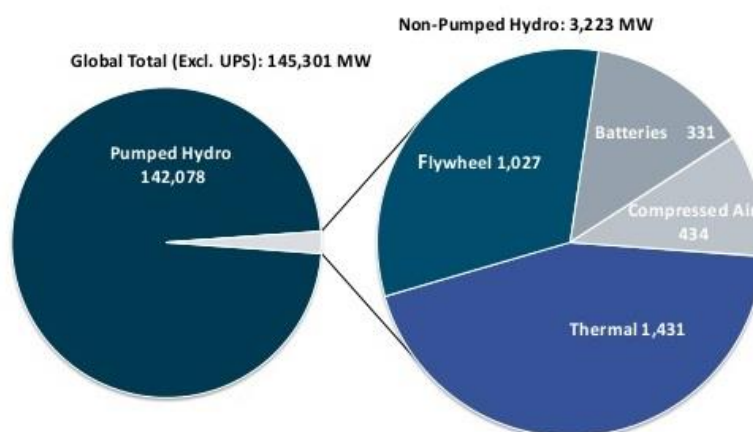
Έτσι για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας τα συστήματα αποθήκευσης χωρίζονται βάσει της μορφής της ενέργειας που χρησιμοποιεί το μέσο για τους κύκλους μετατροπής της ηλεκτρικής, κάτι που παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στα χαρακτηριστικά τους. Πολλές είναι δε μορφές ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση ηλεκτρικής. Κάποιες από αυτές είναι:

- η δυναμική, με εφαρμογές άντλησης νερού (αντλησιοταμίευση), συμπιεσμένου αέρα ή ελασμάτων

- η κινητική με σφονδύλους/flywheels
- η ηλεκτρομαγνητική με χρήση υπεραγωγίων πηνίων και super-capacitors.
- Η θερμική, με εφαρμογές αποθήκευσης θερμοσμένου μέσου (νερό ή άμμος)

Ανάλογα την εφαρμογή γίνεται και η αντίστοιχη επιλογή τεχνολογίας. Η βέλτιστη μέθοδος αποθήκευσης της ενέργειας για κάθε περίπτωση εξαρτάται από την ποσότητα της ενέργειας που πρέπει να αποθηκευτεί (ενεργειακή πυκνότητα του υλικού), τη χρονική διάρκεια αποθήκευσης, τη μορφή της ενέργειας που απαιτείται για αποθήκευση και την απόδοση με την οποία ανακτάται η ενέργεια.

Στην παρούσα εργασία εστιάζουμε στην μετατροπή σε χημική ενέργεια και συγκεκριμένα σε ηλεκτροχημικές ενεργειακές πηγές, συσσωρευτές ή μπαταρίες [21]. Η μπαταρία είναι μια χημική πηγή ρεύματος που επιτρέπει την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Σημαντικό επίτευγμα είναι η δυνατότητα πλέον, κατασκευής μπαταριών με δυνατή την επαναφόρτισή τους. Υπάρχουν πάρα πολλά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μπαταριών και αυτά προκαθορίζονται και τροποποιούνται ανάλογα τα επιθυμητά αποτελέσματα. Οι ιδιότητες μιας μπαταρίας, η σύστασή της και τα ονομαστικά της μεγέθη διαφέρουν ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Η αναγκαιότητα δε, της χρήσης των μπαταριών, υποχρεώνει πλέον σε έξυπνες λύσεις σ' ό,τι αφορά την επιλογή των υλικών, τον σχηματισμό των διατάξεων και των στρατηγικών φορτίσεων των συστημάτων. Η σύσταση και η λειτουργία της θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα.



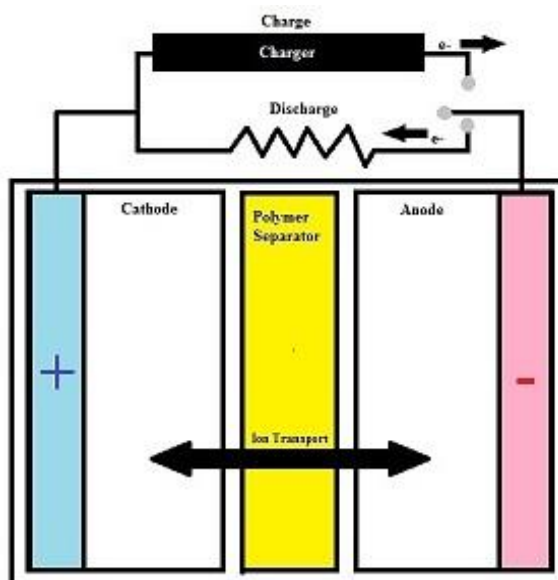
Γράφημα 1.4: Εγκατεστημένα αποθηκευτικά μέσα ανά μορφή αποθηκευμένης ενέργειας, διεθνώς για το 2014 [22]

1.3 Η σύσταση της μπαταρίας

Η μπαταρία όπως προαναφέρθηκε είναι μια διάταξη υλικών που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική κατά την περίοδο φόρτισης και την χημική σε ηλεκτρική κατά την περίοδο εκφόρτισης. Μια μπαταρία αποτελείται από ένα ή και περισσότερα στοιχεία, συνδεδεμένα παράλληλα, σε σειρά ή και σε μικτή σύνδεση ανάλογα τις απαιτήσεις και την επιθυμητή τάση εξόδου και την συνολική χωρητικότητα [23].

Κάθε σχεδόν μπαταρία αποτελείται από τέσσερα συστατικά μέρη: την άνοδο (αρνητικός ακροδέκτης), την κάθοδο (θετικός ακροδέκτης), τον διαχωριστή και τον ηλεκτρολύτη. Η άνοδος παρέχει τα ηλεκτρόνια στο φορτίο και οξειδώνεται κατά την

ηλεκτροχημική αντίδραση. Η κάθοδος δέχεται τα ηλεκτρόνια και ανάγεται κατά την διάρκεια της αντίδρασης. Ο ηλεκτρολύτης είναι το μέσο για την μεταφορά των ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο της μπαταρίας, ενώ ο διαχωριστής ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο χρησιμοποιείται για την ηλεκτρική μόνωση των μερών αυτών [24]. Τα ίδια μέρη απαντούμε και στις μπαταρίες ιόντων λιθίου που εξετάζονται στο παρόν.



Σχήμα 1.2: Απλοποιημένο Μοντέλο λειτουργίας της μπαταρίας [25]

1.3.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη

Πριν την περαιτέρω εμβάθυνση στους τύπους, την λειτουργία και τους μηχανισμούς των μπαταριών, γίνεται μια μικρή αναφορά στα ονομαστικά και μέγιστα μεγέθη, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των μπαταριών και ορίζονται μεταβλητές για τον χαρακτηρισμό των καταστάσεων λειτουργίας έτσι ώστε να παρέχεται πλήρης πληροφορία για τα θέματα που αναπτύσσονται στην παρούσα μελέτη [26]:

Στοιχείο Cell: Ως στοιχείο της μπαταρίας ορίζεται η επιμέρους διάταξη που όπως ειπώθηκε, σε σύνδεσή της με άλλα στοιχεία σχηματίζει την μπαταρία.

Ονομαστική χωρητικότητα: Ως χωρητικότητα ή ονομαστική χωρητικότητα ορίζεται η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε μια μπαταρία. Αυτή συχνά εκφράζεται σε Ah. 1 Ah, σημαίνει πως η μπαταρία μπορεί να αποδώσει 1 A έντασης ρεύματος για 1 ώρα ή (θεωρητικά) 0.1A για 10 ώρες. Στο πεδίο της ισχύος μπορεί να εκφραστεί ως η ονομαστική τάση της μπαταρίας επί την ένταση ρεύματος που μπορεί να αποδώσει η μπαταρία σε μια μονάδα χρόνου. Έτσι για την χρονική τιμή της 1 ώρας, η χωρητικότητα της μπαταρίας μπορεί να εκφραστεί σε Wh.

C_{rate} : Ο ρυθμός C ή C_{RATE} ορίζεται ώστε το ρεύμα εκφόρτισης να κανονικοποιείται από την συνολική χωρητικότητα. Πρόκειται περί της μέτρησης του ρυθμού με τον οποίο η μπαταρία εκφορτίζεται σε σχέση με την μέγιστη χωρητικότητά της. Για παράδειγμα για μια μπαταρία , $C_{RATE}=1$ σημαίνει πως η μπαταρία θα εκφορτιστεί πλήρως σε 1 ώρα. Για μια μπαταρία με χωρητικότητα 100Ah, ο προηγούμενος ρυθμός

ορίζει ρεύμα εκφόρτισης ίσο με 100A. $C_{RATE}=5$ για την ίδια μπαταρία θα σήμαινε ρεύμα εκφορτώσεως ίσο με 500A.

E_{rate} : Ο ρυθμός E ή E_{RATE} , ορίζεται έτσι ώστε να κανονικοποιείται η ισχύς εκφόρτισης με την συνολική χωρητικότητα. $E_{RATE}=1$ για μια μπαταρία θα σήμαινε, πως η ισχύς εκφόρτισης είναι ικανή να εκφορτίσει την μπαταρία σε 1 ώρα.

State of Charge: State of Charge, Στάθμη φόρτισης ή SoC, ορίζεται το ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας σε σχέση με την συνολική χωρητικότητα.

Depth of Discharge: Depth of Discharge, Βάθος εκφόρτισης ή DoD ορίζεται το ποσοστό της εκφόρτισης σε σχέση με την μέγιστη χωρητικότητα. Μια εκφόρτιση μεγαλύτερη του DoD=80% θεωρείται βαθιά εκφόρτιση.

Τάση ακροδεκτών ή terminal: Ονομάζεται η τάση μεταξύ των ακροδεκτών του συστήματος των μπαταριών με φορτίο. Η τάση ακροδεκτών μπορεί να διαφέρει με διαφορετική SoC και ρεύματα φόρτισης/εκφόρτισης.

Τάση ανοιχτοκυκλώματος: Ορίζεται τάση μεταξύ των ακροδεκτών της μπαταρίας χωρίς την ύπαρξη φορτίου. Η τάση ανοιχτοκυκλώματος μπορεί να αλλάξει σε πολύ μικρό βαθμό σε διαφορετικές στάθμες φόρτισης. Γενικά θεωρείται σταθερή και ίση με την ονομαστική εκτός από ειδικές μελέτες.

Εσωτερική Αντίσταση: Είναι η αντίσταση που εμφανίζεται μέσα στην μπαταρία, διαφέρει για τις λειτουργίες φόρτισης κι εκφόρτισης, ενώ εξαρτάται από το SoC. Όσο αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση η απόδοση και η θερμική σταθερότητα της μπαταρίας μειώνεται αφού περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα.

Ονομαστική τάση: Είναι η τάση αναφοράς ακροδεκτών της μπαταρίας.

Τάση Αποκοπής: Ονομάζεται η ελάχιστη αποδεκτή τιμή τάσης λειτουργίας. Αυτή η τιμή συνήθως ορίζει και την «άδεια» μπαταρία ή την μηδενική στάθμη φόρτισης.

Ονομαστική Χωρητικότητα και Διαθέσιμη Χωρητικότητα: Η συνολική χωρητικότητα ηλεκτρικής ενέργειας μεταφρασμένη, σε Ah, που είναι διαθέσιμη, όταν η μπαταρία εκφορτίζεται σε συγκεκριμένο C_{RATE} , από την μέγιστη στάθμη φόρτισης στην μηδενική. Η διαθέσιμη χωρητικότητα που είναι προφανώς μικρότερη από την ονομαστική, υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το ρεύμα εκφόρτισης με τον αντίστοιχο χρόνο εκφόρτισης και μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού C.

Διαθέσιμη Ενέργεια: Η «χωρητικότητα» σε ενέργεια της μπαταρίας, οι συνολικές δηλαδή Watt-Hours (Wh) όταν η μπαταρία εκφορτίζεται υπό συγκεκριμένο ρεύμα (ρυθμός C) από την μέγιστη στάθμη φόρτισης ως την μηδενική Η διαθέσιμη ενέργεια υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την ισχύ εκφόρτισης με τον αντίστοιχο χρόνο εκφόρτισης. Όπως και η χωρητικότητα, η ενέργεια μειώνεται με την αύξηση του C_{RATE} .

Κύκλος Ζωής: Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης που γίνονται σε μια μπαταρία μέχρι το σημείο που δεν μπορεί πλέον να πληροί τις προδιαγραφές της υλοποίησής της, για συγκεκριμένο DoD και συνθήκες λειτουργίας ή ο συνολικός ωφέλιμος χρόνος ζωής της μπαταρίας. Ο πραγματικός κύκλος ζωής της μπαταρίας μπορεί να επηρεαστεί από τον ρυθμό και το βάθος των κύκλων και όπως είναι φυσικό από συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Ο κύκλος ζωής μειώνεται όσο αυξάνονται τα βάθη εκφορτίσεως κατά τους αντίστοιχους κύκλους.

End Of Life (κριτήριο EoL): Ποσοστιαίο μέγεθος που ορίζει την αναμενόμενη εναπομένουσα χωρητικότητα στο τέλος του Κύκλου Ζωής της μπαταρίας ή μέγεθος με χρονικές τιμές, του οποίου ο δείκτης υποδηλώνει τον αναμενόμενο χρόνο ζωής έως η μπαταρία να υποστεί απώλεια χωρητικότητας ίση με τιμή του δείκτη της μεταβλητής.

Πχ, η $EoL_{0.2}$ ή $EoL_{20\%}$ υποδηλώνει ότι κατά το τέλος της ωφέλιμης ζωής της μπαταρίας αυτή θα καταλήξει με το 80% της αρχικής της χωρητικότητας.

Ειδική Ενέργεια ή Ενεργειακή Πυκνότητα: Ονομάζεται η ονομαστική ενέργεια της μπαταρίας κανονικοποιημένη από την μάζα της (Wh/kg) , συχνά αναφερόμενη και ως βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα. Η ειδική ενέργεια είναι ένα χαρακτηριστικό που διαμορφώνεται από την ίδια την χημική σύσταση της μπαταρίας αλλά και τις μεθόδους συσκευασίας της. Συχνά γίνεται διάκριση του μεγέθους πυκνότητας σε σχέση με το μέγεθος που την κανονικοποιεί (όγκος ή μάζα). Στην βιβλιογραφία μπορεί το μέγεθος Watts Hours/Liters, να αναφέρεται ως ενεργειακή πυκνότητα ή ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας. Αυτή μπορεί να οριστεί ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Ειδική Ισχύς ή Πυκνότητα Ισχύος: Ονομάζεται η ονομαστική ισχύς της μπαταρίας κανονικοποιημένη από την μάζα της (W/kg). Όπως και με την πυκνότητα ενέργειας, συχνά το μέγεθος (Watts / Liters) μπορεί να αναφέρεται ως πυκνότητα ισχύος. Μπορεί επίσης να οριστεί ανάλογα της ανάγκες της εφαρμογής.

Μέγιστο συνεχές ρεύμα εκφορτίσεως: Ονομάζεται το μέγιστο ρεύμα με το οποίο η μπαταρία μπορεί να εκφορτίζεται συνεχόμενα. Πρόκειται περί αναγραφόμενου κατασκευαστικού μεγέθους, το οποίο περιορίζει τους υπερβολικούς ρυθμούς εκφόρτισης, προλαμβάνοντας έτσι την μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας με μεγαλύτερο ρυθμό από τον ονομαστικό.

Τάση Φόρτισης: Η τάση που φορτίζεται η μπαταρία όταν φορτίζεται ως το μέγιστο SoC.

Τάση Float ή διατήρησης: Η τάση που διατηρείται στην μπαταρία όταν φορτίζεται πάνω από το μέγιστο επιτροπόμενο SoC , για να μπορέσει να διατηρήσει την στάθμη φόρτισης αντισταθμίζοντας την πιθανή αυτοκεφόρτιση.

Ρεύμα φόρτισης: Το ιδανικό ρεύμα φόρτισης για την φόρτιση της μπαταρίας με συνεχή ρυθμό έως το 70% SoC περίπου.

Μέγιστη Εσωτερική Αντίσταση: Η μέγιστη επιτρεπόμενη εσωτερική αντίσταση που έχει ορισθεί από τον κατασκευαστή, για την αποφυγή φαινομένων φθοράς.

1.3.2 Τύποι μπαταριών

Αυτήν την στιγμή υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι μπαταριών που χρησιμοποιούνται σε πολύ μεγάλο βαθμό και σε πλήθος εφαρμογών σήμερα. Αυτοί είναι, οι μπαταρίες μολύβδου - οξέως, νικελίου και λιθίου.

Οι μπαταρίες μολύβδου - οξέως είναι οι παλαιότερες σε χρήση μπαταρίες επαναφορτιζόμενου τύπου και βασίζονται πάνω σε χημικές αντιδράσεις που περιλαμβάνουν διοξείδιο του μολύβδου (χρησιμοποιείται για τον σχηματισμό της καθόδου), μόλυβδο (ο οποίος σχηματίζει την άνοδο) και θειικό οξύ που χρησιμοποιείται σαν ηλεκτρολύτης. Οι εν λόγω μπαταρίες λειτουργούν με ονομαστική τάση 2V και η συνηθισμένη πυκνότητα ενέργειας του είναι γύρω στις 30 Wh/kg, με την πυκνότητα ισχύος να φθάνει τα 180 W/kg, ενώ η ενεργειακή τους απόδοση κυμαίνεται από 85% έως 90%. Ο συγκεκριμένες μπαταρίες, είναι πολύ εύκολο να τοποθετηθούν, ενώ η σχετικά απλή διαδικασία συντήρησής τους τις καθιστά ιδιαίτερα οικονομικές. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης τους είναι περίπου 2% της ονομαστικής τους χωρητικότητας για κάθε μήνα (σε συνθήκες ρύθμισης της θερμοκρασίας στους 25°C) . Ωστόσο το

κύριο μειονέκτημα στις υλοποιήσεις μολύβδου οξέως είναι οι χαμηλή αναμενόμενη ζωή της μπαταρίας που κυμαίνεται από 5 έως 15 χρόνια. Η εκτίμηση αυτή μπορεί να είναι ακόμη πιο δυσμενής εάν γίνονται βαθείς εκφορτίσεις και μη επιτήρηση της θερμοκρασίας λειτουργίας.

Οι μπαταρίες που κατασκευάζονται βασισμένες στο νικέλιο είναι κατά κύριο λόγο μπαταρίες νικελίου – καδμίου (NiCd) , νικελίου - ψευδαργύρου (NiZn) ή νικελίου - μετάλλου (NiMH) . Και οι τρεις αυτοί τύποι χρησιμοποιούν το ίδιο υλικό για θετικό ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη ο οποίος είναι το υδροξείδιο του νικελίου και ένα υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου. Η άνοδος, στις μπαταρίες νικελίου καδμίου κατασκευάζεται από υδροξείδιο του καδμίου, στις νικελίου μέταλλου κάποιο κράμα ενώ στις μπαταρίες νικελίου ψευδαργύρου χρησιμοποιείται υδροξείδιο του ψευδαργύρου. Η ονομαστική τάση των μπαταριών είναι 1.2V ή 1.65 ανάλογα την υλοποίηση, ενώ η συνήθης ενεργειακή πυκνότητα είναι υψηλότερη από τις μπαταρίες μολύβδου και κυμαίνεται μεταξύ 50 και 80 Wh/kg ανάλογα το υλικό σε χρήση. Επίσης, η αναμενόμενη διάρκεια ζωής είναι αυξημένη σε σχέση με τον προηγούμενο τύπο. Παρ' όλα αυτά οι μπαταρίες αυτές απαιτούν υψηλό κόστος παραγωγής, ενώ τα ποσοστά αυτό εκφόρτισης φτάνουν και το 10% της ονομαστικής τους χωρητικότητας, πράγμα που τις καθιστά κατώτερες ποιοτικά από τις μπαταρίες μολύβδου σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

Ο τρίτος τύπος μπαταριών που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία της αποθήκευσης ενέργειας είναι οι μπαταρίες λιθίου. Σε αντίθεση της προηγούμενης δεκαετίας και ως απόρροια της δραματικής μείωσης του κόστους παραγωγής τους, οι μπαταρίες λιθίου πλέον χρησιμοποιούνται και σε βιομηχανικές εφαρμογές, ενώ έχουν προ καιρού καταλάβει μεγάλα ποσοστά χρήσης στον οικιακό τομέα έναντι των άλλων τεχνολογιών. Τα πλεονεκτήματά τους, επικεντρώνονται στην υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και απόδοση, στα χαμηλά ποσοστά αυτοεκφόρτισης και την ελάχιστη συντήρηση που απαιτείται για την καλή λειτουργία τους. Δύο είναι οι βασικές κατηγορίες μπαταριών λιθίου: οι μπαταρίες Ιόντων-λιθίου (Li-ion) και αυτές των πολυμερών λιθίου (Li-poly) . Οι Li-ion μπαταρίες έχουν ονομαστική τάση 3.7V , ενεργειακή πυκνότητα μεταξύ 80 και 150 Wh/kg ενώ οι Li-polymer από 100 έως 150 Wh/kg . Η ενεργειακή απόδοση των μπαταριών λιθίου συχνά αγγίζει το 100% ενώ η πυκνότητα ισχύος είναι αρκετά υψηλή για τις μπαταρίες ιόντων φτάνοντας και τα 2000 W/kg ενώ για τις li-poly περιορίζεται στα 250 w/kg. Το ποσοστό αυτοεκφόρτισης μεγιστοποιείται στο 5% ενώ η αναμενόμενη διάρκεια ζωής αγγίζει τους 1500 κύκλους. Μεγάλο μειονέκτημα της τεχνολογίας ιόντων είναι η φθορά που επηρεάζει καταλυτικά την διάρκεια ζωής και την απόδοση της μπαταρίας. Η επίδραση της γήρανσης είναι επίσης φοβερά καταστρεπτική για την υγεία της μπαταρίας. Λόγω κατασκευής οι μπαταρίες Li-Ion είναι αρκετά ευαίσθητες στους χειρισμούς και απαιτούν κύκλωμα προστασίας για την ασφαλή λειτουργία τους. Η χρήση τέτοιων κυκλωμάτων, η ρύθμιση της θερμοκρασίας αλλά και η αποδοτική στρατηγική χειρισμών των μπαταριών κρίνονται ζωτικοί ώστε ένα σύστημα που χρησιμοποιεί μπαταρίες Ιόντων να είναι αποδοτικό και οικονομικά επικερδές σε βάθος χρόνου.

Εκτός από τις τρεις βασικές κατηγορίες που αναφέρθηκαν στα παραπάνω, υπάρχουν κι άλλες τεχνολογίες που δεν έχουν τύχει ανάλογης διεξόδου στην αγορά και την βιομηχανία λόγω τεχνικών περιορισμών και ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζουν στην παραγωγή, την χρήση και την συντήρησή τους. Κάποιες από αυτές είναι : οι μπαταρίες νατρίου θείου, η μπαταρία μετάλλου-αέρα, το σύστημα Redox και

οι μπαταρίες ψευδαργύρου βρωμίου. Έντονη είναι και η πραγματοποίηση συνεχούς έρευνας για εφεύρεση νέων συσσωρευτών όπως οι μπαταρίες που περιλαμβάνουν νανοϋλικά, μπαταρίες ιόντων νατρίου ή ιόντων λιθίου σε στέρεα κατάσταση.

Από τους τύπους μπαταριών που αναφέρθηκαν, αυτοί των νικελίου και καδμίου είναι οι περισσότερο αναπτυγμένοι τεχνολογικά [27]. Η ευκολία χρήσης των μπαταριών μολύβδου, όπως επίσης και το πολύ χαμηλό κόστος κατασκευής τους της καθιστά την επικρατέστερη επιλογή. Το κόστος παραγωγής ανάμεσα στους διάφορους τύπων μπαταριών είναι κάτι που αλλάζει δυναμικά κι ένα από τα στοιχεία που θα καθορίσει την χρήση των μπαταριών ιόντων λιθίου σε μεγάλη κλίμακα. Η αναζήτηση νέων υλικών για την οικονομικότερη παραγωγή αποθηκευτικών μέσων ενέργειας είναι μια διαδικασία που αφουγκράζεται συνεχώς την βιομηχανία παραγωγής ενέργειας αφού αποθήκευση και παραγωγή ενέργειας είναι πλέον συνυφασμένες. Μια τέτοια διαδικασία δεν σταματά ποτέ.

1.3.3 Η μπαταρία ιόντων Λιθίου

1.3.3.1 Σύσταση της μπαταρίας Ιόντων Λιθίου

Η μπαταρία Li-ion είναι κατασκευασμένη από δύο βασικά στοιχεία (Cells) Ιόντων Λιθίου σε παράλληλη σύνδεση (για την αύξηση της έντασης του ρεύματος), ή σε σύνδεση σε σειρά (για την αύξηση του δυναμικού της τάσης) ή κάποια άλλη μικτή σύνδεση. Σε μια συστοιχία μπαταριών μπορούν να περιληφθούν πολλά, συνήθως, πανομοιότυπα στοιχεία.

Συνήθως μια μπαταρία Li-ion αποτελείται από το θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος), το αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος), τα οποία συνδέονται με έναν ηλεκτρολύτη που περιέχει ιόντα λιθίου. Η σύσταση του ηλεκτρολύτη μπορεί να είναι υγρή, στέρεα (κεραμικός) ή σε μορφή τζελ. Πιο αναλυτικά:

Ηλεκτρόδια:

Είναι ηλεκτρικά απομονωμένα από τον διαχωριστή (separator), συνήθως αυτός είναι μια πολυμερής μεμβράνη με μικροπόρους, που επιτρέπει την διέλευση ιόντων λιθίου αλλά όχι αυτήν των ηλεκτρονίων. Πρόκειται για σύνθετες δομές που αποτελούνται από ενεργά υλικά (active materials), πρόσθετα (additives) και binders. Τα ενεργά υλικά είναι συνήθως οξείδια μετάλλου για τις καθόδους και διάφοροι τύποι άνθρακα για τις ανόδους. Ο κύριος ρόλος των ενεργών υλικών είναι να αποθηκεύουν το λίθιο με ασφάλεια για εκτενείς περιόδους. Τα πρόσθετα είναι συνήθως υλικά από άνθρακα και αυξάνουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτροδίου. Ο κύριος ρόλος των binders είναι να κρατούν τα ενεργά υλικά σε φυσική επαφή μεταξύ τους αλλά και με τον συλλέκτη ρεύματος.

Άνοδος:

Το αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) της μπαταρίας περιέχει μια ένωση παρεμβολής λιθίου καλυμμένη κάτω από ένα λεπτό στρώμα επάνω στον χάλκινο (Cu) συλλέκτη ρεύματος. Ομοιόμορφες και λεπτές επιστρώσεις των ενεργών υλικών είναι αναγκαίες

ώστε τα κελιά της μπαταρίας να χρησιμοποιούν τους οργανικούς ηλεκτρολύτες. Οπότε η διεργασία κατασκευής (μίξη και επίστρωση) των υλικών της ανόδου είναι εξειδικευμένη γιατί η ποικιλομορφία στην κατασκευή μπορεί να έχει σοβαρότατες επιδράσεις στην ικανότητα φόρτισης κι εκφόρτισης, την χωρητικότητα των κελιών και γενικά στην συμπεριφορά γήρανσης της μπαταρίας. Ελαττώματα κατά την επίστρωση στο αρνητικό ηλεκτρόδιο μπορούν να συμβάλλουν στην θερμική εκροή (thermal runaway) και στην ολική βλάβη του κελιού. [28]

Η χρήση λιθίου στην άνοδο είναι ιδανική για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου όμως ελαττώματα όπως το plating, που οδηγεί σε κίνδυνο για εσωτερικά βραχυκυκλώματα, αναγκάζει σε χρήση ανθρακωδών υλικών. Ο γραφίτης είναι το πιο διαδομένο λόγω επίτευξης καλών ρυθμών φόρτισης/εκφόρτισης. Παρόλα αυτά η απόδοσή του είναι περιορισμένη λόγω του σχηματισμού στέρεης ηλεκτρολυτικής διεπιφάνειας (SEI).

Κάθοδος:

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως, περιλαμβάνουν οξείδια όπως LiMO_2 , LiM_2O_4 και LiMPO_4 LiCoO_2 . Άλλα υλικά όπως LiMn_2O_4 , LiFePO_4 $\text{LiMn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_2$ αποφεύγονται λόγω περιορισμών σε ότι αφορά την σταθερότητα και την δυνατότητα αποθήκευσης. Η πιο πρόσφατη επιλογή σ'ότι αφορά το υλικό της καθόδου είναι το LiFePO_4 , μιας κι ενώ λειτουργεί σε μικρότερη τάση από το Li/Li^+ , παρουσιάζει μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, συνοδευόμενη από την ανάλογη δομική ευστάθεια.

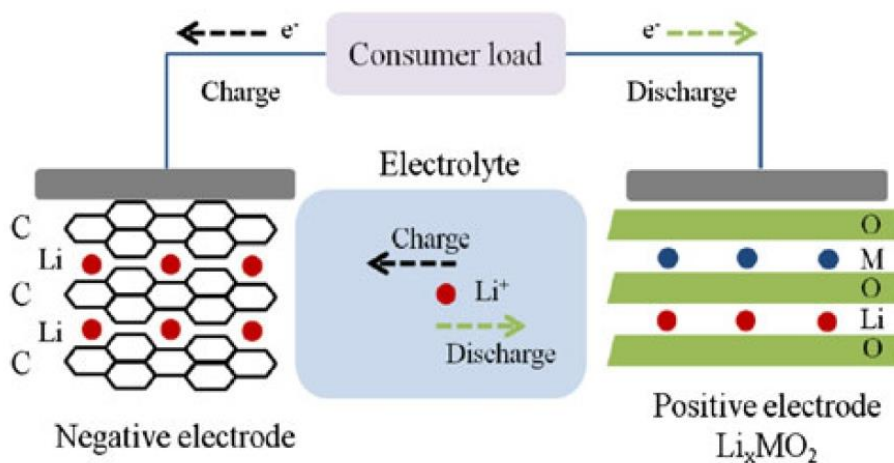
Ηλεκτρολύτης:

Συνήθως αποτελείται από ένα ή παραπάνω υγρούς διαλύτες μαζί με άλατα λιθίου. Το πιο κοινό άλας που χρησιμοποιείται είναι το LiPF_6 . Οι περισσότεροι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται σήμερα στις μπαταρίες λιθίου είναι άνυδροι (non aqueous). Η επιλογή του ηλεκτρολύτη γίνεται αναλόγως την εφαρμογή για την οποία θα χρησιμοποιηθεί η μπαταρία. Χαρακτηριστική είναι η σύνδεση των μεγεθών του ιξώδους του ηλεκτρολύτη με την θερμοκρασία που επικρατεί γύρω από την εγκατάσταση των μπαταριών. Οι κατασκευαστές συνήθως χρησιμοποιούν διάφορα πρόσθετα για να αυξήσουν την απόδοση των μπαταριών [29]. Τα πρόσθετα μπορούν να διευκολύνουν την δημιουργία SEI στον γραφίτη και κατά τους εκτεταμένους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης κάνουν το LiPF_6 να παρουσιάζει αυξημένη θερμική ευστάθεια ενάντια στους οργανικούς διαλύτες, ενώ προστατεύουν τα θετικά υλικά από την διάλυση και αυξάνουν τις ιδιότητες του ηλεκτρολύτη συμπεριλαμβανομένων του ιξώδους, της ιοντικής αγωγιμότητας και την διαβροχή του διαχωριστή από πολυεφίνη.

Διαχωριστής:

Πρόκειται για μια πορώδη μεμβράνη που τοποθετείται ανάμεσα στα θετικά και αρνητικά ηλεκτρόδια. Η κύρια λειτουργία του διαχωριστή είναι να απομονώνει φυσικά και ηλεκτρικά την άνοδο από την κάθοδο. Ταυτόχρονα οι πόροι (οπές) του, επιτρέπουν την μεταφορά ιόντων λιθίου με διάχυση κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση.

Η αλληλεπίδραση των κύριων αυτών τμημάτων καθορίζει και την λειτουργία της μπαταρίας [28,30]. Το βασικό κατασκευαστικό design της μπαταρίας λιθίου είναι της ίδιας φιλοσοφίας με αυτό από την πρώτη της εμπορική εφαρμογή δύο δεκαετίες νωρίτερα [31].



Σχήμα 1.3: Η βασική σύσταση και λειτουργία της μπαταρίας ιόντων λιθίου

1.3.3.2 Η λειτουργία της μπαταρίας Ιόντων Λιθίου

Κατά την φάση της φόρτισης, τα δύο ηλεκτρόδια είναι συνδεδεμένα εξωτερικά με μια πηγή τάσης. Τα ηλεκτρόνια ελευθερώνονται στην κάθοδο και κινούνται εξωτερικά της μπαταρίας προς την άνοδο. Ταυτόχρονα τα Ιόντα λιθίου κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση, εσωτερικά της μπαταρίας, από την κάθοδο στην άνοδο μέσω του ηλεκτρολύτη. Με αυτόν τον τρόπο η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε χημική στα υλικά της ανόδου και της καθόδου με διαφορετικά χημικά δυναμικά. Η αντίθετη διαδικασία συμβαίνει κατά την φάση της εκφόρτισης: Τα ηλεκτρόνια κινούνται από την άνοδο προς την κάθοδο μέσω ενός εξωτερικού φορτίου που επιβάλλεται στην μπαταρία, ενώ τα Ιόντα λιθίου κινούνται στην ίδια διεύθυνση μέσω του ηλεκτρολύτη ηλεκτρόνια μεταφέρονται από την άνοδο στην κάθοδο. Αυτό προκαλεί την εξισορρόπηση της διαφοράς δυναμικού. Αυτή η διαδικασία είναι αναστρέψιμη και μπορεί να γίνει σε μεγάλο αριθμό (κύκλοι λειτουργίας).

Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην μπαταρία μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την ισχύ εκφόρτισης με τον χρόνο εκφόρτισης. Η τάση της μπαταρίας δεν εξαρτάται μόνο από την διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων αλλά και από την δυναμική της αντίδρασης και την σύνθετη αντίσταση της μπαταρίας. Αύξηση της αντίστασης συνεισφέρει σε αυξημένα επίπεδα τάσης κατά την φόρτιση και σε μειωμένα επίπεδα τάσης κατά την εκφόρτιση, τα οποία καταλήγουν σε απώλεια ισχύος της μπαταρίας και την μείωση της αποδοτικότητας στην μετατροπή ενέργειας.

Ο κύκλος ζωής της μπαταρίας εξαρτάται κυρίως από την αύξηση της σύνθετης αντίστασης και την απώλεια χωρητικότητας. Καθώς περνά ο χρόνος και μετά από αρκετές φορτίσεις/εκφορτίσεις της μπαταρίας η χωρητικότητα ενέργειας της

μπαταρίας σταδιακά μειώνεται. Η μείωση αυτή εξαρτάται σε διάφορες παραμέτρους όπως ο ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης (C_{rate}) και ο αριθμός των κύκλων, στους μηχανισμούς φθοράς και γήρανσης, και σε παράγοντες που τους επιταχύνουν. Η κατάσταση και οι συνθήκες της λειτουργίας της μπαταρίας σ' ότι αφορά τα ρεύματα φόρτισης/εκφόρτισης, την επιβαλλόμενη τάση, την θερμοκρασία λειτουργίας και περιβάλλοντος κ.α., παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στην απώλεια χωρητικότητας της μπαταρίας και την γήρανσή της. Οι μηχανισμοί που συμμετέχουν θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 2: Η Μοντελοποίηση της Μπαταρίας και το φαινόμενο της γήρανσης στην μπαταρία λιθίου

2.1 Μοντελοποίηση της μπαταρίας

Η αναμενόμενη ζωή μιας μπαταρίας εξαρτάται εκ φύσεως από το ρυθμό με τον οποίο αυτή φορτίζεται ή εκφορτίζεται. Επιπρόσθετα, εξαρτάται από το μοτίβο των χειρισμών που επιβάλλονται κατά την λειτουργία της αλλά και των συνθηκών που επικρατούν (θερμοκρασία / υγρασία). Τα μεγέθη που επηρεάζουν την υγεία της μπαταρίας κατά την λειτουργία της, σχετίζονται με δομές, την σύσταση, τα υλικά της μπαταρίας και την μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Οι ηλεκτροχημικές αυτές διαδικασίες και αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι δύσκολο να ερμηνευθούν και να ενσωματωθούν σε επίπεδο ελέγχου ενός δικτύου.

Γι' αυτόν λόγο είναι αναγκαία η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων που όχι μόνο περιγράφουν την μπαταρία με ακρίβεια αλλά είναι ικανά να αξιολογήσουν τις μεταβλητές που ευθύνονται για την φθορά της μπαταρίας. Η ύπαρξη μοντέλων περιγραφής της συμπεριφοράς της μπαταρίας είναι πολύ σημαντική για την αποφυγή διεξαγωγής πειραματικών διαδικασιών, την ταχύτατη μελέτη συμπεριφοράς σε ακραίες συνθήκες, την εκτίμηση νέων εφαρμογών, την ανάπτυξη ποιοτικών και αποδοτικών συστημάτων διαχείρισης, την βελτιστοποίηση των νέων τεχνολογιών μπαταριών και την συνεκτίμηση της γήρανσης που προκαλείται από τους χειρισμούς.

Ανά τα χρόνια έχουν δημιουργηθεί αρκετά μαθηματικά μοντέλα μπαταρίας που ανταποκρίνονται στις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής τους [32].

2.1.1 Επισκόπηση Μοντέλων

Για την ακριβή περιγραφή των διαφόρων τύπων μπαταριών, τα μοντέλα λειτουργίας διαφοροποιούνται ανάλογα με τα υλικά και την κατασκευή της μπαταρίας, τα προς μέτρηση μεγέθη και την ευαισθησία του μοντέλου σε αυτά, τους διαθέσιμους πόρους για την υλοποίησή τους καθώς και τον τρόπο με τον οποίο αυτά δημιουργούνται. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια από τα μοντέλα που είναι διαθέσιμα στην βιβλιογραφία:

Ηλεκτροχημικά Μοντέλα:

Βασίζονται στις ηλεκτροχημικές διαδικασίες που συμβαίνουν σε μία μπαταρία. Τα μοντέλα αυτά καταφέρνουν να περιγράψουν τους μηχανισμούς αυτούς με μεγάλη ακρίβεια. Η ακρίβειά τους όμως αυτή τα καθιστά περίπλοκα και δύσκολα ως προς την παραμετροποίησή τους.

Οι Doyle, Fuller και Newman ανέπτυξαν ένα ηλεκτροχημικό μοντέλο για μπαταρίες λιθίου το οποίο αποτελείται από έξι συζευγμένες μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις. Η επίλυση των εξισώσεων αυτών οδηγεί στην εύρεση της τάσεως και της έντασης του ρεύματος της μπαταρίας συναρτήσει του χρόνου, ενώ διάφορων ηλεκτροχημικών μεγεθών συναρτήσει του χρόνου και της θέσης εντός του στοιχείου της μπαταρίας.

Το μοντέλο αυτό ονομάζεται Dualfoil [33, 34, 35], ενώ έχει αναπτυχθεί στην προγραμματιστική γλώσσα Fortran. Έχει την δυνατότητα να υπολογίζει όλες τις μεταβλητές που αφορούν την μπαταρία για όλο τον χρονικό ορίζοντα που

επιβάλλεται το φορτίο ορισμένο από τον χρήστη. Εκτός από το προφίλ χειρισμών, ο χρήστης πρέπει να καταχωρήσει πάνω από 50 παραμέτρους σχετικές με την μπαταρία. Ενώ οι απαιτήσεις σε γνώση των τεχνικών στοιχείων που αφορούν μεμονωμένα στοιχεία είναι μεγάλες, το μοντέλο αυτό παρουσιάζει πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια. Μάλιστα οι προβλέψεις απέχουν ελάχιστα από τις πραγματικές τιμές που συχνά χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση της ακρίβειας άλλων μοντέλων μπαταριών έναντι των πειραματικών διαδικασιών.

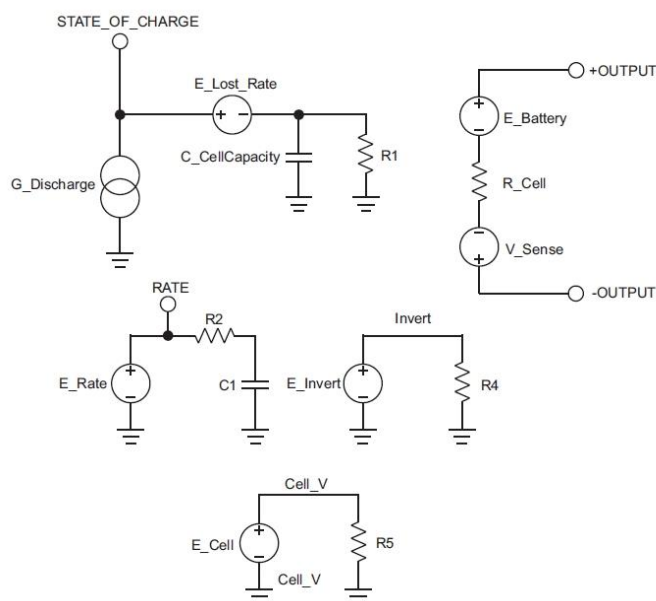
Μοντέλα Ισοδύναμου Ηλεκτρικού Κυκλώματος:

Στα μοντέλα ηλεκτρικού κυκλώματος, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας μοντελοποιούνται από ισοδύναμα κυκλώματα που περιλαμβάνουν πηγές τάσης, πίνακες εύρεσης τιμών και γραμμικά στοιχεία όπως αντιστάσεις και πυκνωτές.

Αν και για διαφορετικές τεχνολογίες τα διάφορα μοντέλα παρουσιάζουν ομοιότητα στον πυρήνα τους [36]:

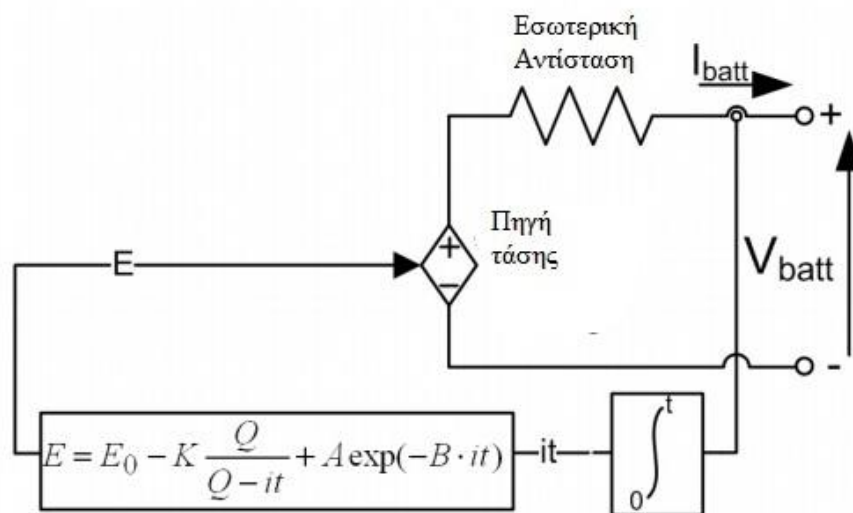
- Ένας πυκνωτής ισοδυναμεί με την χωρητικότητα της μπαταρίας
- Η απώλεια χωρητικότητας βρίσκεται με την χρήση ενός συντελεστή του ρυθμού εκφόρτισης
- Περιλαμβάνουν κύκλωμα για την εκφόρτιση της μπαταρίας
- Πίνακα εύρεσης τιμών για την αντιστοιχία των μεγεθών της τάσης και της στάθμης φόρτισης
- Μία αντίσταση ισοδυναμεί με την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας

Ενώ τα εν λόγω μοντέλα είναι απλούστερα από τα ηλεκτροχημικά και κοστίζουν λιγότερο σε υπολογισμούς, είναι αρκετά περίπλοκα ως προς την προσαρμογή τους στην κάθε περίπτωση μπαταρίας. Ειδικά οι πίνακες look up των ζευγών Τάσης – SOC απαιτούν πλήθος πειραματικών στοιχείων. Επιπλέον τα μοντέλα παρουσιάζουν σφάλματα της τάξεως του 12% [37].



Σχήμα 2.1: Ο πυρήνας των μοντέλων ισοδύναμου κυκλώματος [32]

Ένα μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία και ανήκει στην παραπάνω κατηγορία είναι αυτό που αναπτύσσεται στο [38]. Στο μοντέλο χρησιμοποιείται ένα μη γραμμικό ισοδύναμο κύκλωμα. Η εσωτερική αντίσταση θεωρείται σταθερή κατά τους κύκλους φόρτισης εκφόρτισης, η θερμοκρασία δεν επηρεάζει το μοντέλο, ενώ δεν περιγράφεται το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης. Το μοντέλο αν και ελλιπές, αποτελεί μια καλή αφετηρία επεξεργασίας για την ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου προσαρμοσμένο στη μελέτη της φθοράς της μπαταρίας. Η μαθηματική αποτύπωση του μοντέλου δίνεται στο κεφάλαιο 3.

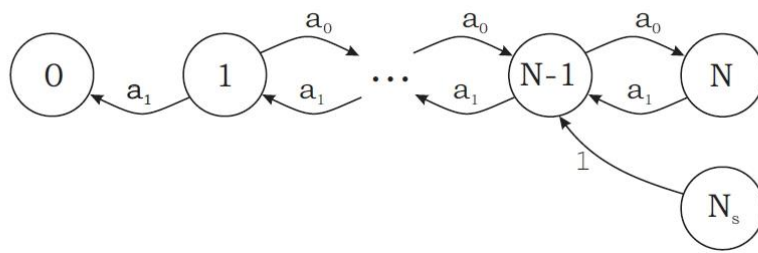


Σχήμα 2.2: Το μη γραμμικό μοντέλο του [38]

Όπου $\int idt$ η πραγματική φόρτιση της μπαταρίας (Ah)
 A : το πλάτος της εκθετικής ζώνης (V), B : χρονικά αναλλοίωτη μεταβλητή (Ah^{-1}), V_{batt} : Η τάση της μπαταρίας, R : η εσωτερική αντίσταση, I : το ρεύμα μπαταρίας, E : η τάση ανοιχτοκυκλώματος, Q : η χωρητικότητα της μπαταρίας

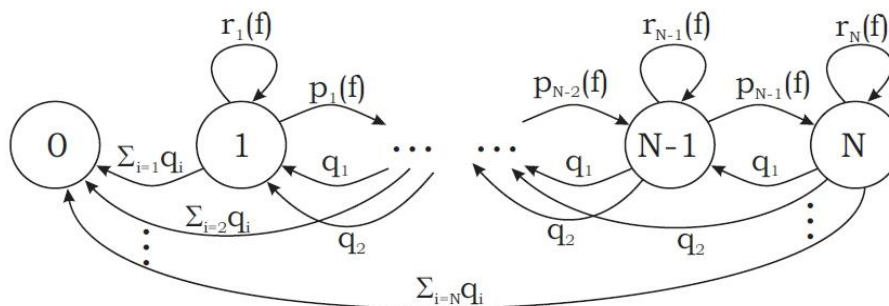
Στοχαστικά Μοντέλα:

Πρόκειται περί πιο αφαιρετικών μοντέλων σε σχέση με τα προηγούμενα. Αρχικά βασίστηκαν σε αλυσίδες Markov διακριτού χρόνου [39-42]. Στο [39] περιγράφεται ένα μοντέλο μπαταρίας συσκευής, όπου η μπαταρία περιγράφεται με $N+1$ καταστάσεις αριθμημένες από το 0 έως το N . Ο αριθμός της κατάστασης αντιστοιχεί στις διαθέσιμες μονάδες φόρτισης της μπαταρίας. Κάθε μονάδα φόρτισης αντιστοιχεί στο ποσό της ενέργειας που απαιτείται για κάθε μία διακριτή διαδικασία της συσκευής. Σε αυτό το μοντέλο, κάθε χρονικό βήμα, μια μονάδα φόρτισης καταναλώνεται με πιθανότητα q ή ανακτάται με πιθανότητα $1 - q$. Η μπαταρία θεωρείται πλέον άδεια όταν επέλθει η κατάσταση 0 ή οι μονάδες φόρτισης φτάσουν τις T , όπου T η θεωρητική χωρητικότητα της μπαταρίας.



Σχήμα 2.3: Το μοντέλο που παρουσιάστηκε στο [39]

Για την επέκταση του μοντέλου, η πιθανότητα ανάκτησης μιας μονάδας εξαρτάται από την κατάσταση. Όταν λιγότερες μονάδες είναι διαθέσιμες, η πιθανότητα για ανάκτηση είναι μικρότερη. Επιπρόσθετα, ορίζεται η συνάρτηση φάσης f . Η f αποτελεί μια συνάρτηση του αριθμού των μονάδων φόρτισης που έχουν καταναλωθεί. Όταν έχουν καταναλώνονται μονάδες, ο αριθμός φάσης αυξάνεται και προκαλεί μείωση στην πιθανότητα ανάκτησης μιας μονάδας φόρτισης. Επίσης καθίσταται δυνατή η κατανάλωση παραπάνω από μίας μονάδας φόρτισης σε κάθε βήμα, περιορίζοντας τις αριθμητικά $M \leq N$. Για την πληρότητα του μοντέλου, εισάγεται και η μη μηδενική πιθανότητα του να μείνει το σύστημα στην ίδια κατάσταση. Έτσι το απλό μοντέλο του Σχήματος 2.3 παίρνει την μορφή:



Σχήμα 2.4: Η επέκταση του μοντέλου με χρήση των αλυσίδων Markov [42]

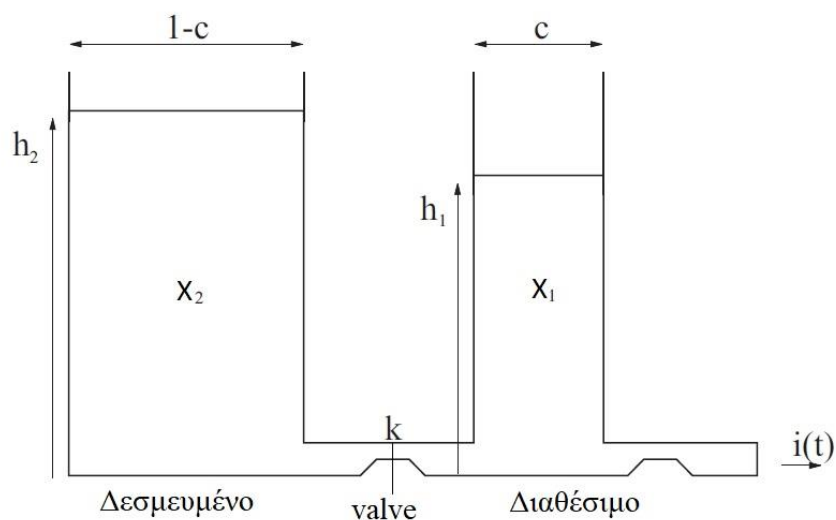
Στο [42] γίνεται χρήση του μοντέλου για την περιγραφή της μπαταρίας λιθίου, η ακρίβειά του πιστοποιείται με το μοντέλο Dualfoil με μέση απόκλιση 1% και μέγιστη 4% καθιστώντας το, ένα πολύ ακριβές μοντέλο με μικρό σφάλμα. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα παραμένουν ποιοτικά και δεν είναι ξεκάθαρο πως συμπεριφέρεται το μοντέλο ποσοτικά με εφαρμογή σε μπαταρία υπό συνεχή λειτουργία.

Αναλυτικά Μοντέλα:

Ένα μοντέλο που έχει συνεισφέρει αρκετά στο πεδίο της ερμηνείας της συμπεριφοράς είναι το Μοντέλο Κινητικής Μπαταρίας (Kinetic Battery Model – KiBaM) [43-45]. Ονομάζεται Kinetic γιατί στηρίζεται στις διαδικασίες της κινητικής της αντίδρασης [32]. Η φόρτιση της μπαταρίας διανέμεται σε δύο “πηγάδια”: Το πρώτο

αποτελεί το (διαθέσιμο) πηγάδι διαθέσιμης χημικής ενέργειας, έτοιμης να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενώ το δεύτερο (δεσμευμένο) πηγάδι, είναι δεσμευμένου περιεχόμενου. Ένα κλάσμα c_w της συνολικής χωρητικότητας αντιστοιχίζεται στο πρώτο πηγάδι ενώ η υπόλοιπη $1 - c_w$ στο δεύτερο, που αντιπροσωπεύει τα πλάτη των αντίστοιχων πηγαδιών. Η διαθέσιμη φόρτιση τροφοδοτεί με ηλεκτρόνια το φορτίο που επιβάλλεται, ενώ το δεσμευμένο πηγάδι τροφοδοτεί με ηλεκτρόνια μόνο το διαθέσιμο και η ενέργειά του δεν καταναλώνεται στο φορτίο. Η ηλεκτρική ενέργεια ρέει ανάμεσα στα δύο πηγάδια μέσα από μία “βαλβίδα” με σταθερή αγωγιμότητα k . Η στάθμη φόρτισης αποτελείται πλέον από το άθροισμα της φόρτισης του διαθέσιμου και του δεσμευμένου πηγαδιού $SoC = X_1 + X_2$. Ο ρυθμός με τον οποίο η ηλεκτρική ενέργεια ρέει, εξαρτάται στην μεταβλητή διαφορά ύψους $\Delta h = h_1 - h_2$ ανάμεσα στα δύο πηγάδια. Η μεταβολή της διαφοράς αυτή περιγράφεται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις επιλύονται με διαδοχικούς μετασχηματισμούς Laplace και Συντεταγμένων.

Οι εξισώσεις που απορρέουν περιγράφουν με ιδιαίτερη ακρίβεια την συμπεριφορά της μπαταρίας όμως απαιτείται σχετική τροποποίηση για την περίπτωση των μπαταριών λιθίου.

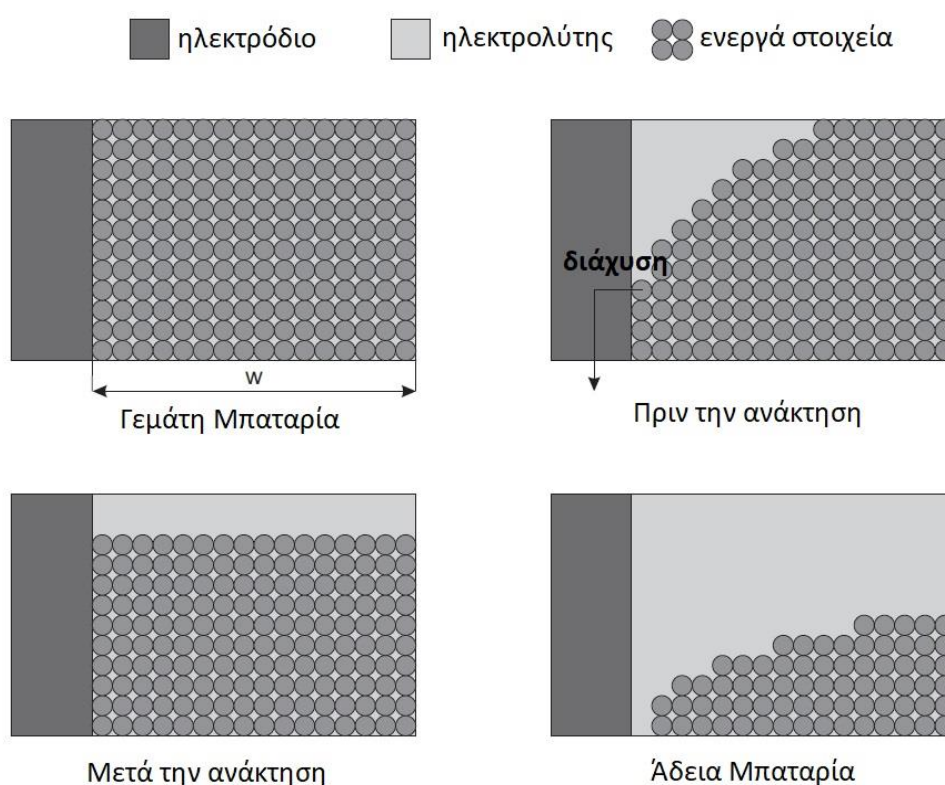


Σχήμα 2.5: Η μοντελοποίηση KiBaM

Ένα άλλο αναλυτικό μοντέλο έχει αναπτυχθεί από τους Rakhmatov και Vrudhika. Το μοντέλο ονομάστηκε μοντέλο διάχυσης, καθώς βασίζεται στην διάχυση των ιόντων στον ηλεκτρολύτη [46-48]. Περιγράφει την εξέλιξη της συγκέντρωσης των ενεργών υλικών στον ηλεκτρολύτη και εκτιμά τον αναμενόμενο χρόνο ζωής της μπαταρίας σε δεδομένο φορτίο. Οι χημικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια θεωρούνται πανομοιότυπες, ενώ η μπαταρία θεωρείται συμμετρική σε σχέση με αυτά και μόνο το ένα από τα δύο λαμβάνονται υπόψιν.

Αρχικά, για την γεμάτη μπαταρία, η συγκέντρωση ενεργών υλικών είναι σταθερή για το πλήρες πλάτος w του ηλεκτρολύτη. Όταν εφαρμοσθεί φορτίο στην μπαταρία, η

ηλεκτροχημική αντίδραση οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης των υλικών γύρω από την δίοδο. Έτσι δημιουργείται μια μειούμενη δομή κατά μήκος του ηλεκτρολύτη έως το ηλεκτρόδιο. Αυτή η δομή κάνει τα ενεργά στοιχεία να διαχέονται προς τον ηλεκτρολύτη. Όταν αποσυνδεθεί το φορτίο, η συγκέντρωση των ενεργών στοιχείων στο ηλεκτρόδιο αυξάνεται ξανά (ανάκτηση) λόγω της διάχυσης κι εν τέλει τα στοιχεία διανέμονται πάνω στον ηλεκτρολύτη ξανά. Μετά από αυτήν την διαδικασία η συγκέντρωση θα είναι μικρότερη απ' ότι στην γεμάτη μπαταρία. Τελικά, όταν η συγκέντρωση στο ηλεκτρόδιο πέσει κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή, η χημική αντίδραση δεν μπορεί πλέον να διατηρηθεί και η μπαταρία θεωρείται άδεια. Η διαδικασία αυτή, περιγράφεται σχηματικά στο Σχήμα 2.5:



Σχήμα 2.6: Το μοντέλο διάχυσης [32]

2.1.2 Επιλογή Μοντέλου Μπαταρίας

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη της γήρανσης της μπαταρίας ιόντων λιθίου κατά την λειτουργία της σε ένα δίκτυο χαμηλής τάσης. Για την μοντελοποίηση της μπαταρίας λιθίου αρχικά επιλέγεται ένα μοντέλο που να είναι κατάλληλο για το συγκεκριμένο υλικό. Το μοντέλο που επιλέγεται είναι αυτό που παρουσιάζεται στο [38] και περιγράφεται στην 2.1.1 . Πρόκειται για μοντέλο ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος με αξιόπιστη εφαρμογή στις μπαταρίες ιόντων λιθίου, χωρίς να συνυπολογίζει την μεταβολή της χωρητικότητας της ενέργειας σε σχέση με το C_{rate} και

το ρεύμα της μπαταρίας. Για τις απαιτήσεις της εργασίας, το μοντέλο ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος εμπλουτίζεται με τις συστηματοποιημένες εξισώσεις του μοντέλου Ki.Ba.M, προκύπτει έτσι ένα αξιόπιστο μοντέλο λειτουργίας της μπαταρίας λιθίου με πρόβλεψη των μεγεθών που επηρεάζουν την γήρανση. Η διαδικασία κατάστρωσης του τελικού μοντέλου γίνεται στην ενότητα 3.2.1 .

2.2 Το φαινόμενο της Γήρανσης στην μπαταρία

Γήρανση ορίζεται ως η μείωση σε επιδόσεις, χρόνο ζωής και αξιοπιστία ενός συστήματος. Στην μπαταρία, επειδή αποτελείται από μια σειρά διασυνδεδεμένων τμημάτων και υλικών που υφίστανται γήρανση, η υποβάθμιση της απόδοσης που υφίσταται κάθε τμήμα λόγω γήρανσης συνεισφέρει, τελικά, στην συνολική υποβάθμιση της απόδοσης του συνολικού συστήματος, δηλαδή την μπαταρία. Ακριβώς λόγω της φύσης και της διασύνδεσης των υλικών, οι μηχανισμοί γήρανσης, ακόμα και οι πιο βασικοί, είναι αρκετά περίπλοκοι και δύσκολο να αναλυθούν. Γενικά, γίνεται κατηγοριοποίησή τους σε δύο υποκατηγορίες. Τους μηχανισμούς χημικής φθοράς και αυτούς της μηχανικής.

Οι πιο κοινές επιπτώσεις εξαιτίας της φθοράς της μπαταρίας είναι η απώλεια ενεργού λιθίου (cyclable ή mobile) , δημιουργία στρώσεων φιλμ, η αποσύνθεση των ηλεκτρολυτών, αλλοίωση των ενεργών υλικών, απώλεια επαφής, αλλοίωση των δομών.

2.1.1 Η χημική φθορά

Οι μηχανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν την αποσύνθεση και αναγωγή του ηλεκτρολύτη, την δημιουργία SEI, την αποσύνθεση των binder, διάλυση ενεργών υλικών, την χημική παρεμβολή διαλύτη, ανάπτυξη αερίων και την απώλεια λιθίου [50] . Ο ηλεκτρολύτης μπορεί να αναχθεί λόγω του αρνητικού ηλεκτροδίου κατά την ύπαρξη χαμηλού δυναμικού και να οξειδωθεί από την κάθοδο σε υψηλά δυναμικά. Οι προσμίξεις στον ηλεκτρολύτη μπορούν να λειτουργήσουν σαν καταλύτες σε παράπλευρες αντιδράσεις [51,52]. Η δυναμική των αντιδράσεων αυτών βασίζεται κυρίως στην θερμοκρασία και την τάση του κελιού. Είναι κοινή παραδοχή ότι η φθορά στα περισσότερα υλικά επιταχύνεται από τις υψηλές θερμοκρασίες. Οι παράπλευρες αντιδράσεις, προκαλούν μερικές αλλαγές στα υλικά των ηλεκτροδίων. Η οξείδωση και η αναγωγή ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη, συνεισφέρει στην δημιουργία στρώματος στην επιφάνεια και κατ' επέκτασιν στην αύξηση της σύνθετης αντίστασης του κελιού και την απώλεια της χωρητικότητας.

Γενικά, η μακρόχρονη χημική φθορά των υλικών της μπαταρίας μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ηλεκτρική απόδοσή της, το κύκλο ζωής της και την ασφάλεια της με την αύξηση της εσωτερικής ηλεκτρικής αντίστασης ή και τελικά την ασυνέχεια, με προϊόντα διάβρωσης που προσπίπτουν στα ενεργά υλικά, ή την δημιουργία ρίπων που αλληλοεπιδρούν με τα ενεργά υλικά και με την απώλεια ηλεκτρολύτη. Κατά τους

κύκλους λειτουργίας παρατηρούνται απώλειες χωρητικότητας, αύξηση της σύνθετης αντίστασης που συνδέεται άμεσα με την απώλεια ισχύος και υπερτάσεις που επηρεάζουν το προφίλ δυναμικού των καμπυλών φόρτισης/εκφόρτισης.

2.1.2 Μηχανική Φθορά

Οι παράπλευρες χημικές αντιδράσεις που αναφέρονται παραπάνω δεν είναι η μόνη αιτία φθορά της μπαταρίας. Η εισαγωγή και η εξαγωγή ιόντων επιφέρουν επίσης, αύξηση ή μείωση του όγκου των ηλεκτροδίων. Αυτή η διαδικασία πολλές φορές γίνεται και ανομοιογενώς. Οι μηχανισμοί μηχανικής φθοράς ενδιαφέρουν κυρίως σ' ό,τι αφορά την αλλαγή του όγκου και κατ' επέκταση την καταπόνηση που επιφέρεται στα ενεργά υλικά της ανόδου και της καθόδου κατά την διεμβολή των ιόντων. Ως αποτέλεσμα της έντονης καταπόνησης, τα ενεργά συστατικά μπορεί να υφίστανται ρωγμές, απώλεια της επαφής αναμεταξύ τους, ή από τον συλλέκτη ρεύματος όπως επίσης και απομόνωση [50, 53, 54] .

Επίσης η καταπόνηση κατά τους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης επιφέρει αλλαγές στην δομή των πόρων στον διαχωριστή και οδηγεί σε χαμηλότερη κινητικότητα ιόντων λιθίου. [50,55] . Όπως και η χημική φθορά, έτσι και η μηχανική επηρεάζεται από την ημερολογιακή γήρανση, έχοντας επίπτωση στις δομές της ανόδου και της καθόδου όπως επίσης και στις μηχανικές ιδιότητες άλλων συστατικών μερών της μπαταρίας, πχ σκληρότητα και ελαστικότητα της καθόδου [50].

2.1.3 Η φθορά στα μέρη της μπαταρίας

Παρακάτω αναλύονται οι μηχανισμοί φθοράς ανάλογα με το μέρος της μπαταρίας που επηρεάζουν ή εμφανίζονται:

2.1.3.1 Φθορά στην Άνοδο:

Η φθορά που προκαλείται από το χρόνο και την χρήση μπορεί να οδηγήσει ή να έχει προκληθεί από αλλαγές στην διεπιφάνεια του ηλεκτροδίου/ηλεκτρολύτη ή στον ίδιο τον ηλεκτρολύτη, του ενεργού υλικού και του σύνθετου ηλεκτροδίου (συλλέκτης ρεύματος, ενεργά υλικά, αγώγιμα πρόσθετα κλπ). Οι αλλαγές στην διεπιφάνεια ηλεκτροδίου/ηλεκτρολύτη θεωρούνται η βασικότερη αιτία φθοράς της ανόδου [56, 57].

Οι κυρίαρχοι μηχανισμοί φθοράς στις ανόδους παρουσιάζονται παρακάτω :

Solid Electrolyte Interphase – S.E.I:

Η παράπλευρη χημική αντίδραση ανάμεσα στην επιφάνεια του ηλεκτρολύτη και της ανόδου, οδηγεί στην αποσύνθεση του ηλεκτρολύτη όπως επίσης και στην κατανάλωση ιόντων λιθίου [58]. Τα προϊόντα της αποσύνθεσης εναποτίθενται πάνω

στην επιφάνεια της ανόδου σχηματίζοντας ένα φιλμ ή στρώμα το οποίο καλείται διεπιφάνεια στέρεου ηλεκτρολύτη (SEI).

Η δημιουργία διεπιφάνειας στερεού ηλεκτρολύτη (SEI) και η αύξησή της οδηγούν σε κατανάλωση ενεργού λιθίου και κατ' επέκταση σε αύξηση της σύνθετης αντίστασης της ανόδου. Μπορεί τελικά να οδηγήσει στην ολική απώλεια της επαφής της ανόδου. Αυτό συνεισφέρει στην απώλεια χωρητικότητας και ισχύος της μπαταρίας [60,61]. Η απώλεια επαφής (μηχανική ή ηλεκτρονική) σε ένα σύνθετο ηλεκτρόδιο οδηγεί σε υψηλότερη σύνθετη αντίσταση των κελιών [56,61]. Μια αναπόφευκτη αιτία απώλειας επαφής είναι οι αλλαγές του όγκου των ενεργών υλικών της ανόδου, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε μηχανική αποσύνθεση στο ηλεκτρόδιο. Συνήθως ο σχηματισμός SEI, συμβαίνει κυρίως κατά το ξεκίνημα των κύκλων φόρτισης. Η άνοδος μπαταρίας λειτουργεί σε τάσεις δυναμικού που βρίσκονται εκτός του εύρους ηλεκτροχημικής σταθερότητας των ηλεκτρολυτών. Έτσι η αναγωγική αποσύνθεση του ηλεκτρολύτη, συνοδευόμενη από την μη αναστρέψιμη κατανάλωση ιόντων λιθίου συμβαίνει στην διεπιφάνεια ηλεκτροδίου/ηλεκτρολύτη όταν το ηλεκτρόδιο είναι σε "φορτισμένη" κατάσταση, έχει δηλαδή αποθηκευμένα ιόντα λιθίου σε διαφορετικό χημικό δυναμικό από αυτό της καθόδου. Τα προϊόντα της αποσύνθεσης διαμορφώνουν προστατευτικά στρώματα που καλύπτουν την επιφάνεια του ηλεκτροδίου.

Η ανάπτυξη του SEI, συνεχίζεται κατά τις φορτίσεις/εκφορτίσεις με μειωμένο ρυθμό από τον αρχικό αφού η αντίδραση της αποσύνθεσης ή η διάχυση των μορίων του διαλύτη μπορούν να περιορίσουν τον ρυθμό ανάπτυξης του SEI [62]. Η συνεχής αύξηση του SEI και η εναπόθεση προϊόντων αποσύνθεσης ηλεκτρολύτη μπορούν να επηρεάσουν το μέγεθος και την δομή των πόρων, την διαβροχή του ηλεκτρολύτη, την αντίσταση των επαφών του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου ακόμα και την πυκνότητα των πόρων του διαχωριστή. [63] Η αύξηση του SEI ευνοείται όπως ειπώθηκε και παραπάνω, από τις υψηλές θερμοκρασίες και σε χαμηλά δυναμικά ανόδου.

Παράλληλα με την ανάπτυξη του SEI, συμβαίνει διάβρωση του λιθίου στον ενεργό άνθρακα της ανόδου, οδηγώντας σε αυτο-εκφόρτιση (self discharge) και μείωση της χωρητικότητας (capacity fade) εξαιτίας της απώλειας λιθίου.

Lithium Plating (Επίστρωση/Επιμετάλλωση Λιθίου):

Πρόκειται για μια διαδικασία που περιγράφεται ως η καθίζηση του λιθίου, η οποία συμβαίνει στην επιφάνεια της ανόδου όταν το δυναμικό ανόδου ξεπεράσει την τάση κατωφλίου [56,58,63]. Επιπρόσθετα, εκτός από την κατανάλωση ενεργού λιθίου που οδηγεί στην απώλεια χωρητικότητας, η δημιουργία δενδριτών κατά το lithium plating μπορεί να επιφέρει ρήξη στον διαχωριστή κι επομένως βραχυκύκλωμα που πρόκειται αυτομάτως για ακαριαία ολική βλάβη της μπαταρίας.

Στην περίπτωση ανθρακούχων ηλεκτροδίων, το lithium plating συμβαίνει όταν ο ρυθμός διεμβολής των ιόντων λιθίου στο ηλεκτρόδιο είναι πολύ μικρός ή η μεταφορά ιόντων στην επιφάνειά του ηλεκτροδίου είναι πολύ υψηλή. Σε θερμοκρασία δωματίου, η διάχυση ιόντων λιθίου στο ηλεκτρόδιο είναι αργή, απαιτώντας υψηλό δυναμικό για να διατηρήσει το συνολικό ρεύμα, κάτι που προκαλεί lithium plating.

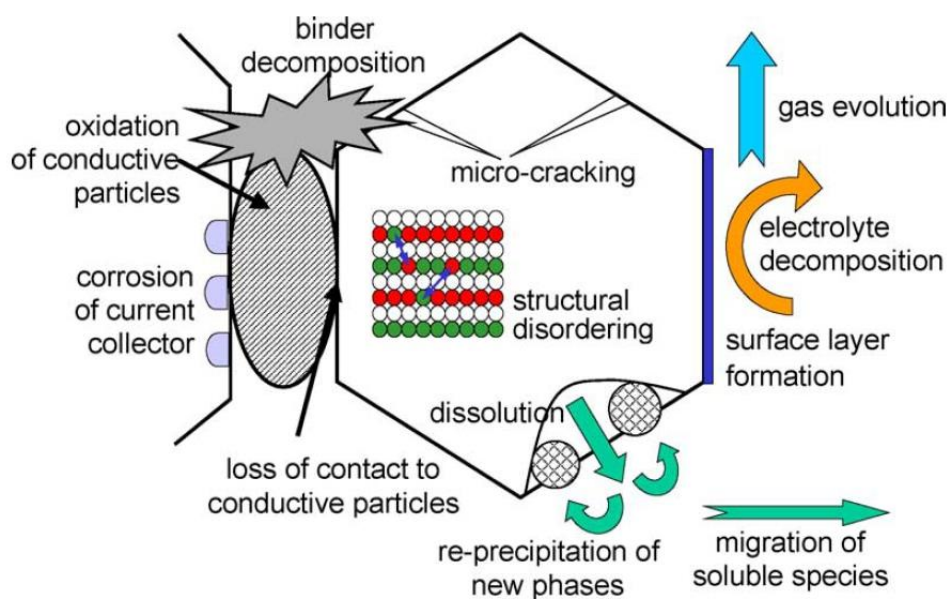
Επιπρόσθετα lithium plating μπορεί να προκληθεί από μη εξισορροπημένα κελιά (πλεονάζον υλικό καθόδου για παράδειγμα) [64] , τοπική πόλωση ηλεκτροδίου και γεωμετρικές ατέλειες [58,52,62,65] .

Συνοψίζοντας σε χαμηλές θερμοκρασίες, σε πολύ υψηλούς ή πολύ αργούς ρυθμούς φόρτισης/εκφόρτισης μπορεί να συμβεί lithium plating.

Αλλαγές το ενεργό υλικό:

Συνήθως στο ενεργό υλικό, τα αποτελέσματα της γήρανσης είναι μικρής σημασίας. Οι αλλαγές του όγκου λόγω της μεταφοράς λιθίου δεν είναι σημαντική [65]. Δομικές αλλαγές μπορεί να οδηγήσουν σε μηχανική καταπόνηση που θα επηρεάσει κυρίως τα ήδη υπάρχοντα κατασκευαστικά ελαττώματα, επηρεάζοντας κυρίως δεσμούς άνθρακα. Επίσης ρωγμές των συστατικών γραφίτη ή ο εκφυλισμός του, η αναγωγή του ή η δημιουργία αερίων στον γραφίτη μπορούν να συντελέσουν στην επιτάχυνση της φθορά του ηλεκτροδίου [66].

J. Vetter et al. / Journal of Power Sources 147 (2005) 269–281



Σχήμα 2.6: Μηχανισμοί φθοράς στην άνοδο [56]

2.1.3.2 Φθορά στην κάθοδο

Οι μηχανισμοί γήρανσης και τα μέτρα αντιστάθμισής τους στις καθόδους οξειδίου του λιθίου είναι ακόμη υπό μελέτη και δεν έχουν ερευνηθεί πλήρως. Οι κυριότερες αιτίες, όπως αυτές εντοπίζονται στην βιβλιογραφία, που προκαλούν φθορά στην κάθοδο και κατ' επέκταση μείωση της ζωής μιας μπαταρίας είναι [47, 56]:

η γήρανση του ενεργού υλικού, οι αλλαγές ή η φθορά στα ηλεκτρόδια και στα μέρη τους, όπως οι binders, τα αγώγιμα μέρη, η διάβρωση του συλλέκτη ρεύματος, η οξειδωση του ηλεκτρολύτη και η δημιουργία στρώματος στην επιφάνειά τους, η αλληλεπίδραση με προϊόντα φθοράς με την άνοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο).

Τα παραπάνω δεν μπορούν να απομονωθούν και να μελετηθούν ξεχωριστά καθώς επηρεάζονται από τους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης και τις συνθήκες αποθήκευσης.

Γενικά η απώλεια χωρητικότητας φόρτισης σχετίζεται με τρεις διαδικασίες: δομικές αλλαγές κατά τους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης, χημική αποσύνθεση, τροποποίηση του στρώματος επιφάνειας [47].

Αντίστοιχα με την άνοδο, η φθορά στα θετικά ενεργά υλικά εξαρτάται και από την στάθμη φόρτισης και τις συνθήκες φόρτισης/εκφόρτισης (cycling). Η μεταφορά των Ιόντων Λιθίου στο οξείδιο του μετάλλου που συμβαίνει στην κάθοδο, οδηγεί σε αλλαγή του μοριακού όγκου των υλικών κι έτσι τα θετικά ενεργά υλικά και το ηλεκτρόδιο υφίστανται μηχανική καταπόνηση [47]. Ακόμη, μπορεί να συμβεί μετατροπή της φάσης προκαλώντας παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος. Κάτι τέτοιο οδηγεί τελικά σε περαιτέρω μηχανικές καταπονήσεις των υλικών.

(Οι κοινές με την άνοδο διαδικασίες σχηματισμού SEI και Lithium Plating δεν θα αναλυθούν παρακάτω).

Δομικές αλλαγές και μηχανική καταπόνηση:

Η μηχανικές καταπονήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, ως αποτέλεσμα της αλλαγής του μοριακού όγκου των υλικών, επηρεάζουν πολύ περισσότερο την αποδοτικότητα της καθόδου, σε σχέση με τους αντίστοιχους μηχανισμούς στην άνοδο. [56,58]. Λόγω της διαδικασίας λιθιοποίησης/απολιθιοποίησης, κάποια οξείδια της καθόδου, αλλάζουν φάση, οδηγώντας σε παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος [58]. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε παραμορφώσεις στα σύνορα των υλικών και ασυνέχειες, προκαλώντας φθορές και ρωγμές σε νανοδομές [66]. Υπάρχουν πολλές αναφορές και μελέτες που προσπαθήσαν να μοντελοποιήσουν την δημιουργία ρωγμών από την μηχανική καταπόνηση και τις περεταίρω φθορές στις νανοδομές της καθόδου [67,68].

Διάλυση και Απομόνωση του ενεργού υλικού:

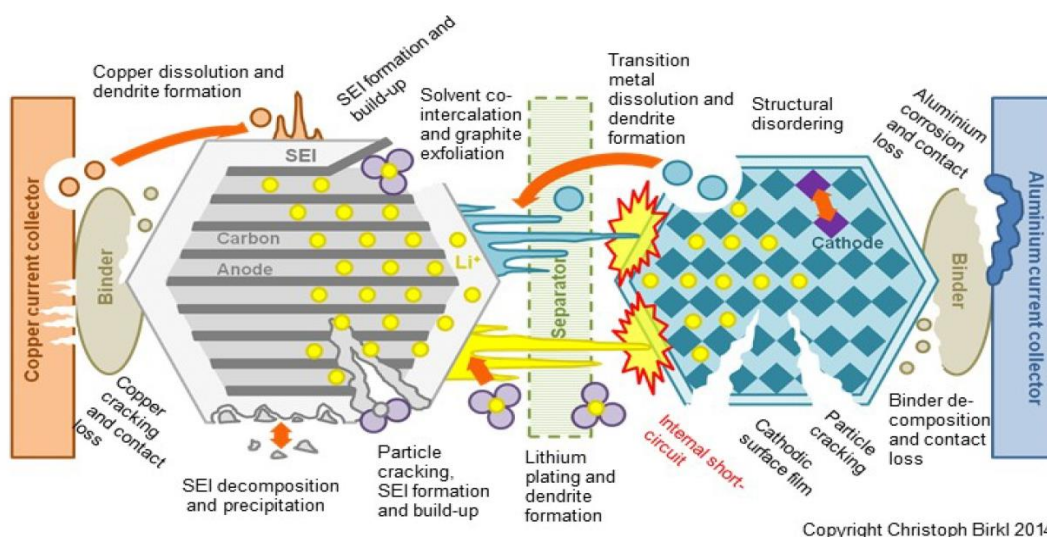
Η γήρανση που προκαλείται από την διάλυση του ενεργού υλικού κυρίως συναντάται σε καθόδους από μαγγάνιο [58]. Ενώ έχει παρατηρηθεί κυρίως σε καθόδους μαγγανίου και ειδικά σε μεγάλες θερμοκρασίες και υπό συνθήκες φόρτισης [56]. Η απομόνωση των ενεργών στοιχείων της μπαταρίας είναι μια από της κυριότερες αιτίες φθοράς [56]. Τα αίτια εντοπίζονται κυρίως σε 3 μηχανισμούς: στην εμφάνιση ρωγμών στα ενεργά υλικά, στα ρήγματα του binder που διασυνδέει τα ενεργά υλικά και στην αλλοίωση των ιδιοτήτων προσκόλλησης του binder [50].

2.1.3.3 Φθορά στον διαχωριστή:

Η φθορά του διαχωριστή μπορεί να είναι υπεύθυνη για απώλεια ισχύος και τελικά ολική βλάβη του κελιού. Οι κύριες αιτίες που αφορούν την φθορά του βρίσκονται κυρίως στην ανάπτυξη δενδριτών λιθίου, φραγή των οδών του διαχωριστή κατά τους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης και δομική φθορά λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας ή του αριθμού των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης [69].

Υψηλές θερμοκρασίες της τάξεως των 130-150°C προκαλούν μείωση της σκληρότητας του φιλμ του διαχωριστή με αποτέλεσμα να σταματά η διαδικασία φόρτισης/εκφόρτισης, δυσχεραίνοντας την μεταφορά ιόντων μεταξύ των ηλεκτροδίων. Τοπική φραγή των πόρων του διαχωριστή ή και ολική επικάλυψη τους γίνεται σε πολύ υψηλές εσωτερικές θερμοκρασίες, με πολύ πιθανό ένα προτερόχρονο βραχυκύκλωμα. Το υλικό του διαχωριστή μπορεί να λιώσει και ύστερα να καλύψει τις οπές που χρησιμεύουν ως διαδρομές για τα ιόντα ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο [70]. Μετρώντας την σύνθετη αντίσταση του διαχωριστή κατά την αύξηση της θερμοκρασίας μπορούμε να εντοπίσουμε την φθορά του και την επίπτωσή της [71,72].

Ακόμα και αν τα υλικά του διαχωριστή θεωρούνται αδρανή και δεν επηρεάζουν την έξοδο ή την αποθήκευση ενέργειας, οι φυσικές τους ιδιότητες, μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση και την ασφάλεια του κελιού. Οι διαχωριστές με υψηλή αντίσταση θα έχουν πολύ μικρή απόδοση σε υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης και θα επεκτείνουν τον χρόνο πλήρους φόρτισης μιας μπαταρίας [71]. Οι μεγαλύτεροι πόροι στον διαχωριστή θα επιτρέψουν υψηλές αυτοεκφρορτίσεις. Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη της βελτιστοποίησης του μεγέθους των πόρων του διαχωριστή για την μεγαλύτερη αντοχή και απόδοση.



Σχήμα 2.7: Μηχανισμοί Φθοράς στην Μπαταρία Li-Ion [90]

2.1.3.4 Φθορά του συλλέκτη Ρεύματος σε άνοδο και κάθοδο:

Τα πιο συνήθη υλικά στους συλλέκτες ρεύματος για τα θετικά και αρνητικά ηλεκτρόδια είναι λεπτά φύλλα αλουμινίου και χαλκού αντίστοιχα. Η λειτουργία του συλλέκτη είναι να μεταφέρει το ρεύμα ισόποσα στα ενεργά υλικά, και να τους προσφέρει μηχανική στήριξη, και να προσφέρει μηχανικές ενώσεις για τους εσωτερικούς οδηγούς μεταφέροντας το ρεύμα σ' όλο το σώμα της μπαταρίας.

Ο κυριότερος μηχανισμός φθοράς στον συλλέκτη είναι αυτός της διάβρωσης του αλουμινίου στην κάθοδο. Έχουν γίνει διάφορες μελέτες για την συμπεριφορά του φαινομένου [73]. Οι ανοδικές ιδιότητες του αλουμινίου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την σύνθεση του ηλεκτρολύτη [74]. Έρευνες έχουν αποδείξει την σημασία:

- i) της σύνθεσης του ηλεκτρολύτη: κάποια υλικά ευνοούν την διατρητική διάβρωση, το κομμάτι αυτό αφορά τον σχεδιασμό και την κατασκευή του υλικού
- ii) του εφαρμοζόμενου δυναμικού: υψηλά δυναμικά φόρτισης μειώνουν την αντίσταση ενάντια στην διάβρωση εξαιτίας των υψηλών ρευμάτων διάβρωσης.
- iii) την σημασία του τύπου του αλουμινίου: αποδείχτηκε ότι διάφορα κράματα που χρησιμοποιήθηκαν δεν αλλοίωσαν αισθητά τον αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης.

Το χημικό δυναμικό του συλλέκτη ρεύματος από χαλκό σε πολύ χαμηλά δυναμικά αυξάνεται σε τέτοιο βαθμό που ο χαλκός αρχίζει να οξειδώνεται και να διαλύεται στην μορφή των ιόντων μέσα στον ηλεκτρολύτη. Στην συνέχεια τα ιόντα κατά την επαναφόρτιση επιστρώνονται ως μέταλλο χαλκού επάνω στην επιφάνεια της ανόδου, μειώνοντας την διαπερατότητα και καθιστώντας το κελί ευπαθές σε lithium plating και κατ' επέκταση απώλεια χωρητικότητας. Όταν συμβαίνει μια πολύ έντονη αποφόρτιση, η φθορά του κελιού συνήθως επιταχύνεται καθώς η άνοδος φθείρεται από την επίστρωση του χαλκού. Χάνει έτσι την ικανότητα εισροής λιθίου κατά τους κανονικούς ρυθμούς φόρτισης/εκφόρτισης. Κάτω από τέτοιες συνθήκες, σε κανονικούς ρυθμούς φόρτισης, συμβαίνει σε μεγαλύτερο βαθμό επίστρωση λιθίου, με αποτέλεσμα την ακόμα μεγαλύτερη μείωση της διαπερατότητας στις επιφάνειες. Τελικά η απότομη αποφόρτιση μπορεί να συντελέσει στην θερμική εκροή (thermal runaway) [70]. Αντίθετα με το αλουμίνιο ο χαλκός δεν είναι ευάλωτος στην διατρητική διάβρωση από το καθοδικό δυναμικό, αυτό σημαίνει ότι μπορεί να "αντέξει" μεγαλύτερη τάση ανοιχτού κυκλώματος. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά τον χαλκό προστατευμένο.

2.1.4 Η γήρανση και η φθορά της μπαταρίας σαν σύστημα

Τα χαρακτηριστικά και οι επιδόσεις της μπαταρίας μπορεί να αλλοιώνονται εξαιτίας γήρανσης (αναπόφευκτη λόγω της γραμμικότητας με τον χρόνο χρήσης, αποθήκευσης και κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης) αλλά και φθοράς που οφείλεται σε εξωτερικούς αλλά και σε εσωτερικούς παράγοντες. Η γήρανση, ή καλύτερα, η ημερολογιακή γήρανση είναι ένα φαινόμενο που έχει επιρροή στην απόδοση και τις επιδόσεις της μπαταρίας. Όταν μια μπαταρία χρησιμοποιείται (φορτίζεται και

εκφορτίζεται) τότε τα ιόντα λιθίου οξειδώνονται, ανάγωνται και χάνουν ή κερδίζουν ηλεκτρόνια αντίστοιχα. Αυτό αφήνει λιγότερα χρήσιμα Ιόντα Λιθίου κι επομένως επηρεάζει άμεσα την απόδοση και την ζωή της μπαταρίας [75]. Όμως, υπάρχουν παράγοντες που επιταχύνουν την γήρανση και τους μηχανισμούς φθοράς που είδαμε παραπάνω, είτε τους εκκινούν. Αυτοί οι παράγοντες συνήθως εντοπίζονται

- i) στον σχεδιασμό και την κατασκευή της μπαταρίας. Στην παρούσα μελέτη δεν θα εξεταστούν αυτοί
- ii) στις συνθήκες αποθήκευσης της μπαταρίας (πχ θερμοκρασία, υγρασία και άλλοι εξωτερικοί παράγοντες που στο παρούσα εργασία δεν λαμβάνονται υπόψιν) και τέλος ως σημαντικότερη κρίνεται η φθορά που οφείλεται
- iii) στους χειρισμούς, τις στρατηγικές φόρτισης και τα ηλεκτρικά μεγέθη (τάσεις λειτουργίας, ένταση ρεύματος, στάθμες φόρτισης κλπ)

2.1.5 Παράγοντες καταπόνησης και φθοράς

Παρακάτω περιγράφονται οι κυριότεροι παράγοντες που ευθύνονται για την γήρανση των μπαταριών:

Επιπτώσεις ρυθμού φόρτισης/εκφόρτισης C-rate και αριθμού κύκλων:

Στην βιβλιογραφία έχει υπογραμμισθεί αρκετές φορές η επιτάχυνση της φθοράς της μπαταρίας με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης κι εκφόρτισης C-rate, ενώ έχει φανεί ότι πιο αργοί C-rates συνεισφέρουν σε μικρότερη απώλεια χωρητικότητας [76,77].

Οι υψηλές εντάσεις ρεύματος αυξάνουν την πόλωση λόγω του περιορισμού της διάχυσης, αφού η μεταφορά των ιόντων είναι πολύ μικρότερη από την ηλεκτρονιακή [77]. Επιπρόσθετα η μπαταρία εμφανίζει αυξημένη θερμοκρασία λόγω του φαινομένου Joule (η επίπτωση της θερμοκρασίας θα αναλυθεί παρακάτω). Αντίστοιχα η μέγιστη χωρητικότητα μειώνεται σταδιακά ως συνέπεια της γήρανσης εξαιτίας του αριθμού κύκλων. Βασικός παράγοντας που αυξάνει προσθετικά την αντίσταση της ανόδου ανά τον χρόνο, προκαλώντας έτσι μείωση της συνολικής ζωής της μπαταρίας [78]. Η μη αναστρέψιμη απώλεια χωρητικότητας οφείλεται σε έναν ή σε συνδυασμό μηχανισμών που αναλύθηκαν σε προηγούμενη ενότητα: αποσύνθεση ηλεκτρολύτη, δημιουργία SEI, αποσύνθεση ενεργών υλικών, μεταβάσεις φάσεων στα ηλεκτρόδια, και δομικές αλλαγές ηλεκτροδίων [78]. Σε ανάλογη μελέτη σχετικά με τους κύκλους λειτουργίας φάνηκε ότι η φθορά συμβαίνει σε 2 στάδια [79]. Στους πρώτους 500 κύκλους, τείνουν να προκαλούν φθορά η απώλεια ιόντων λιθίου εξαιτίας της δημιουργίας SEI στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων. Στο δεύτερο στάδιο -μετά τους 500 κύκλους- η ανάπτυξη του SEI περιορίζει την δυναμική στην διεπιφάνεια προκαλώντας απώλεια ενεργών υλικών στα ηλεκτρόδια, το οποίο επαυξάνει την απώλεια χωρητικότητας.

Επιπτώσεις θερμοκρασίας:

Η θερμοκρασία φαίνεται ότι επηρεάζει σημαντικά την ασφάλεια, την απόδοση και τον κύκλο ζωής στην μπαταρία [56,70,77,80,83]. Αρνητικά επηρεάζουν την χωρητικότητα τόσο οι υψηλές όσο και οι χαμηλές θερμοκρασίες. Για τον λόγο αυτό απολύτως αναγκαία είναι η ύπαρξη ενός αποδοτικού συστήματος διαχείρισης της θερμότητας για να επιτευχθεί η μακροζωία και η αποδοτικότητα της μπαταρίας.

Χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας:

Σύμφωνα με τον Νόμο Arrhenius, ο ρυθμός της χημικής αντίδρασης είναι ανάλογος της θερμοκρασίας. Η εξίσωση που εξάγεται από τον νόμο περιγράφει τον συσχετισμό που επιβάλλεται στην ζητούμενη χημική αντίδραση με την θερμοκρασία.

Φαίνεται ότι ο ρυθμός αντίδρασης αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Χάριν παραδείγματος, μια θετική διακύμανση θερμοκρασίας 10°C μπορεί να επιφέρει διπλασιασμό του ρυθμού φθοράς του κελιού [47]. Αντιθέτως ο ρυθμός στον οποίο τα ενεργά υλικά αντιδρούν μειώνεται σαν αποτέλεσμα της θερμοκρασίας λειτουργίας, κάτι που συνεπάγεται την πτώση στην ικανότητα διαχείρισης ισχύος της μπαταρίας κατά τον κύκλο φόρτισης και αποφόρτισης. Οι χαμηλές θερμοκρασίες μπορούν επίσης να παίξουν σημαντικό ρόλο στην απώλεια χωρητικότητας [80].

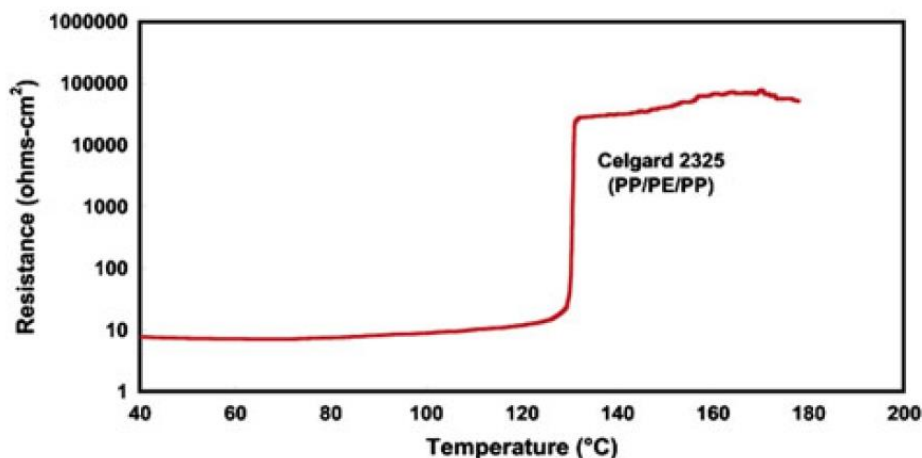
Υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας:

Όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή, οι δευτερογενείς αντιδράσεις όπως η διάβρωση, διευκολύνονται και η απώλεια λιθίου είναι πολύ πιο αυξημένη [81]. Από μελέτες φαίνεται ότι όσο θερμοκρασία λειτουργίας τόσο μεγαλύτερη και η χωρητικότητα [80]. Γενικά η θερμοκρασία αυξάνει προσωρινά την απόδοση της μπαταρίας ιόντων λιθίου, αυξάνοντας την απόδοσή της, υπακούοντας τον νόμο Arrhenius.

Ωστόσο, ενισχύει τον ρυθμό φθοράς των κελιών. Υψηλότερα ρεύματα προκαλούν υψηλότερη εκροή θερμότητας σύμφωνα με τον νόμο του Joule, με αποτέλεσμα η ανάπτυξη του SEI στρώματος να αυξάνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλά δυναμικά στο αρνητικό ηλεκτρόδιο [56,76,77]. Η υψηλή θερμοκρασία αυξάνει τον αριθμό των παράπλευρων αντιδράσεων, οδηγώντας σε μη αναστρέψιμη απώλεια ενεργού λιθίου με αποτέλεσμα να προκαλείται απώλεια και της χωρητικότητας της μπαταρίας. Σε υψηλή θερμοκρασία επίσης ευνοείται και η αναδημιουργία του SEI στρώματος. Λόγω των χαρακτηριστικών του SEI στρώματος σε υψηλή θερμοκρασία, επηρεάζεται η σταθερότητά του οδηγώντας και σε διάλυση παράγοντας παραπροϊόντα. Η διαδικασία της αναδιαμόρφωσης και διάσπασης του στρώματος προκαλεί αύξηση της σύνθετης αντίστασης και κατ' επέκταση απώλεια της χωρητικότητας (capacity fade) [82].

Έρευνες πάνω σε κύκλους μπαταριών σε ηλεκτροχημικό επίπεδο, έχουν δείξει ότι κελιά λιθίου/γραφίτη παρουσιάζουν σημαντική απώλεια χωρητικότητας (capacity

fade) όταν η αποθήκευση γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες άνω των 60°C. Σε συγκεκριμένες μελέτες για αποθήκευση στους 60°C για 10 ημέρες οδήγησε σε απώλεια ποσοστού χωρητικότητας της τάξεως του 40-45%) [83,84]. Όταν η μπαταρία δεν είναι σε χρήση, χαμηλές θερμοκρασίες συνδέονται με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και διατήρηση της απόδοσής της (έως 5% απώλεια χωρητικότητας στην προαναφερθείσα μελέτη) [83].



Γράφημα 2.1: Ο ρόλος της θερμοκρασίας στην αύξηση της εσωτερικής αντίστασης [84]

Θερμική Εκροή (Thermal Runaway):

Πρόκειται για μια μη επιθυμητή κατάσταση, κατά την οποία η υψηλή θερμοκρασία της μπαταρίας προκαλεί μια σειρά εξώθερμων αντιδράσεων που αυξάνουν ακόμα περισσότερο την θερμοκρασία με αποτέλεσμα ανεπανόρθωτες βλάβες στην υγεία της μπαταρίας [85,86].

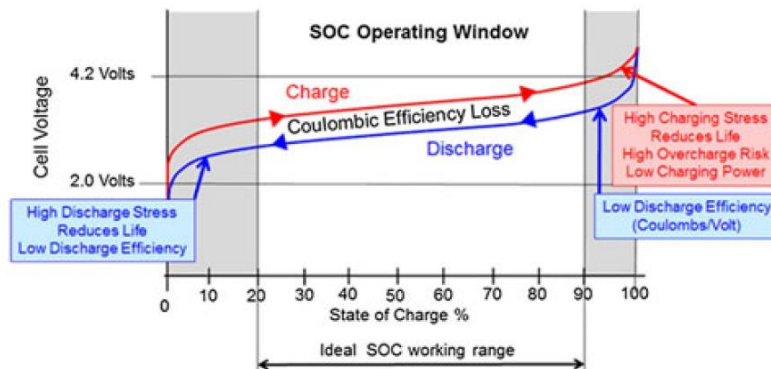
Επίπτωση υγρασίας:

Η υγρασία είναι επίσης ένα παράγοντας υπεύθυνος για την φθορά των κελιών. Το πιο συνηθισμένο άλας που χρησιμοποιείται για τον ηλεκτρολύτη στις μπαταρίες (LiPF₆) είναι πολύ ευάλωτο σε υγρασία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όταν το LiPF₆ εκτεθεί σε υγρασία, θα αποσυντεθεί σε υδροφθορικό οξύ (HF), το οποίο παρουσιάζει πολύ μεγάλη αλληλεπίδραση προκαλώντας αποσύνθεση στον ηλεκτρολύτη και το ηλεκτρόδιο.

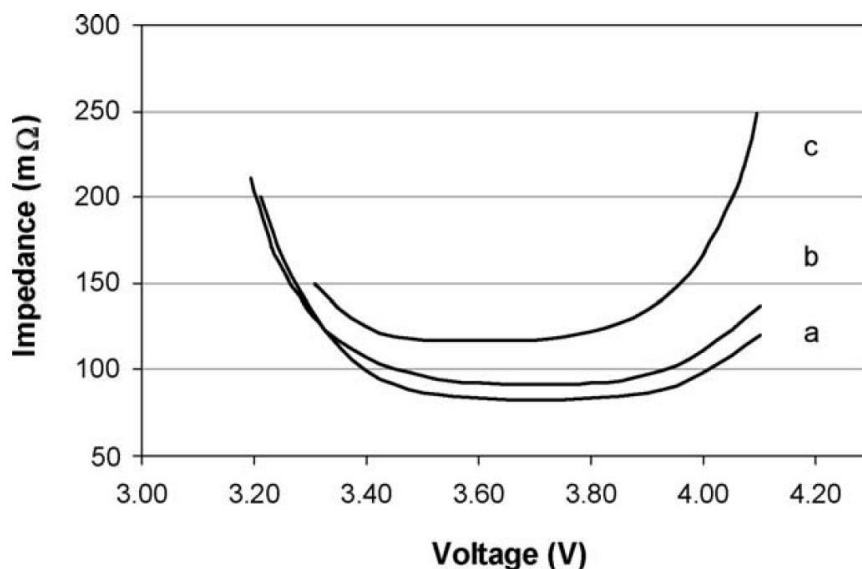
Επίδραση της στάθμης φόρτισης (State of Charge – SOC):

Τόσο οι υψηλές όσο και οι χαμηλές στάθμες φόρτισης μπορούν να ενισχύσουν την γήρανση της μπαταρίας είτε στην μορφή της απώλειας χωρητικότητας είτε στην μορφή απώλειας ισχύος είτε και στις δύο. Οι βαθιές εκφορτίσεις και οι υπερπλήρεις φορτίσεις είναι ικανές να μειώσουν την απόδοση μιας μπαταρίας. Οι υψηλές τάσεις χειρισμού της μπαταρίας έχουν επίσης παρόμοια επίπτωση όπως οι

παρασιτικές παράπλευρες αντιδράσεις και η δημιουργία και αύξηση του SEI στρώματος. Επίσης δυνατή είναι η διάλυση ηλεκτρολυτών [87]. Γι' αυτόν τον λόγο πιθανοί περιορισμοί τάσης είναι αναγκαίοι για την αποφυγή υπερφόρτισεων/εκφόρτισεων και των ενδεχόμενων επιπτώσεών τους.



Γράφημα 2.2: Η επίπτωση της SOC στην γήρανση της μπαταρίας [61]



Γράφημα 2.3: Ο ρόλος της τάσης στην αύξηση της εσωτερικής αντίστασης [56]

Βάθος Φόρτισης (Depth of Charge – DoD):

Έρευνες έχουν δείξει ότι η απώλεια χωρητικότητας δεν συνδέεται με τον ίδιο τρόπο για όλες τις στάθμες φόρτισης. Οι τάσεις όμως συνδέονται άμεσα με την στάθμη φόρτισης, και τα δύο αυτά μεγέθη μπορούν να αντιστοιχιστούν σε έναν παράγοντα αυτόν του Βάθους Φόρτισης (DoD) [88,89].

Γρήγορη Φόρτιση:

Σε εφαρμογές ταχείας φόρτισης, οι παράγοντες καταπόνησης όπως οι υψηλές τάσεις λειτουργίας σε συνδυασμό με τις υψηλές εντάσεις ρεύματος και τις υψηλές θερμοκρασίες συμβαίνουν ταυτόχρονα, κάτι που επιταχύνει σε μεγάλο βαθμό τους μηχανισμούς φθοράς. Επίσης κατά την γρήγορη φόρτιση μπαταριών, εμφανίζεται άλλος ένας σημαντικός μηχανισμός φθοράς, αυτός του lithium plating [56].

Όταν η ένταση του ρεύματος είναι υψηλή, κάποια ιόντα λιθίου δεν εκχέονται στην άνοδο, εξαιτίας του περιορισμού της διάχυσης, ειδικά στις χαμηλές θερμοκρασίες. Κάτω από αυτές τις συνθήκες τα μη εγχεόμενα στην άνοδο ιόντα μπορεί να αναχθούν σε λίθιο (μέταλλο) και να εναποτεθούν στην επιφάνεια της ανόδου, μειώνοντας έτσι τον αριθμό των ενεργών ιόντων (cyclable lithium). Εάν αυτή η διαδικασία συνεχισθεί, λόγω της εναπόθεσης μπορεί να σχηματισθούν δένδριτες (dendrites) επάνω στην επιφάνεια της ανόδου, προκαλώντας εσωτερικά βραχυκυκλώματα, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν θερμική εκροή (thermal runaway) στην χειρότερη περίπτωση.

Συνοψίζοντας η φθορά της μπαταρίας, η αύξηση της συνθέτης αντίστασης, η απώλεια ισχύος και χωρητικότητας, οφείλονται σε διάφορους σύνθετους μηχανισμούς και συνθήκες ενώ έχουν μεγάλη επίδραση στην διάρκεια ζωής και στις επιδόσεις της μπαταρίας.

Ανάλογα την χημική σύσταση του κελιού, σε υψηλές και χαμηλές στάθμες φόρτισης οι επιδόσεις μπορεί να χειροτερεύουν και να μικραίνει η διάρκεια ζωής.

Σε υψηλές θερμοκρασίες, ο ρυθμός μείωσης της χωρητικότητας αυξάνεται, αλλά στις χαμηλές, ειδικά κατά την φόρτιση, επίσης υπάρχουν αρνητικά φαινόμενα.

Ανάμεσα στα χαρακτηριστικά των υλικών, η χημική σύσταση της επιφάνειας παίζει τον σημαντικότερο ρόλο και για τα υλικά της ανόδου αλλά και της καθόδου. Στην κάθοδο, οι εναλλαγές φάσεων και οι δομικές αλλαγές στον κύριο όγκο του υλικού, επηρεάζουν δραματικά την γήρανση, ενώ στην άνοδο, θεωρούνται ελάσσονος σημασίας. Τεράστια σημασία έχουν οι χειρισμοί των μπαταριών στην αύξηση του ρυθμού της φθοράς τους. Το βάθος φόρτισης, η στάθμη φόρτισης, ο ρυθμός φόρτισης και τα επιβαλλόμενα ρεύματα και τάσεις έχουν άμεσες επιπτώσεις στην υγεία της μπαταρίας.

Κεφάλαιο 3: Το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της γήρανσης της μπαταρίας

3.1 Εισαγωγή – Περιγραφή του προβλήματος

Το κόστος μιας επένδυσης σε μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα είναι ακόμη πολύ υψηλό, ειδικά για μπαταρίες νέων τεχνολογιών. Είναι τέτοια τα οικονομικά μεγέθη που ο χρόνος ζωής μιας μπαταρίας ή ενός σετ μπαταριών ανάλογα την εφαρμογή, μπορεί να παίξει καταλυτικό ρόλο στην ανάλυση της οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης. Συνήθως οι αποφάσεις τέτοιων επενδύσεων λαμβάνονται με γνώμονα μεγέθη όπως ο ονομαστικός αριθμός κύκλων φόρτισης κι εκφόρτισης των μπαταριών, η ονομαστική τους χωρητικότητα, η ονομαστική τους ισχύ και απόδοση [94]. Στην πραγματικότητα, δεν υπάρχει κάποια γραμμική σχέση μεταξύ των χειρισμών των μπαταριών και της απώλειας χωρητικότητας της, οπότε το σύνολο της ενέργειας που μπορεί να διαθέσει μια μπαταρία στον ήδη μεταβλητό χρόνο ζωής της, είναι ένα μέγεθος που καθορίζεται μόνο εάν ψηφιοποιηθούν οι χειρισμοί της μπαταρίας σε διακριτούς χειρισμούς και μελετηθούν ως τέτοιοι. Έτσι, η στρατηγική διαχείρισης της μπαταρίας αποκτά νόημα και προβολή επάνω στην οικονομική αποδοτικότητα της μπαταρίας, αναπτύσσοντας ανάλογες πολιτικές χειρισμών που λαμβάνουν υπόψιν την υγεία και την διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Για την εύρεση βέλτιστης στρατηγικής χειρισμών, αντί για απλούς περιορισμούς μεγεθών, είναι δυνατή η χρήση ενός μοντέλου προγνωστικού ελέγχου (Model Predictive Control - MPC) [92]. Το MPC περιλαμβάνει δυναμικά μοντέλα και μεταβλητές ελέγχου, οπότε είναι αναγκαία η συστηματοποίηση της γήρανσης για τον προσδιορισμό και την ποσοτικοποίηση τόσο των αργών διαδικασιών φθοράς όσο και των γρήγορων δυναμικών διαδικασιών.

3.1.1 Προσέγγιση του Προβλήματος

Μια συνηθισμένη προσπάθεια ποσοτικοποίησης της φθοράς και της γήρανσης της μπαταρίας περιλαμβάνει την χρήση διαθέσιμων κατασκευαστικών μεγεθών και δεδομένων που προσδιορίζουν την απώλεια χωρητικότητας υπό συνεχείς κύκλους [93]. Αυτές οι πληροφορίες, λόγω της μη δυναμικότητάς τους, δεν επιτρέπουν τον ακριβή καθορισμό της απώλειας χωρητικότητας μιας μπαταρίας, υπό διαφορετικούς κύκλους χρήσης, διαφορετικά ρεύματα φόρτισης, εκφόρτισης και συνθήκες από αυτές που προτείνει ο κατασκευαστής. Όπως είναι φυσικό, σε ένα δίκτυο υπάρχει η ανάγκη μεταβλητότητας αυτών των μεγεθών.

Στην παρούσα μελέτη γίνεται μια απόπειρα χαρτογράφησης των ταχέως δυναμικών και των αργών διαδικασιών φθοράς στην μπαταρία κατά την χρήση της, μέσα από μια ήδη δημοσιευμένη μελέτη [94,95]. Γενικότερα δεν μπορούν να γίνουν απολύτως κατανοητές όλες οι χημικές αντιδράσεις και οι μηχανισμοί που συνδράμουν στην γήρανση της μπαταρίας, καθιστώντας τους ένα ευρύ πεδίο έρευνας. Αφού η φθορά είναι πολύ δύσκολο να συστηματοποιηθεί και η αποτύπωσή της μπορεί να γίνει μόνο με πολυσύνθετο ηλεκτροχημικό περιεχόμενο, η μελέτη της επικεντρώνεται στην αναζήτηση μακροσκοπικών ημιεμπειρικών μοντέλων. Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση ενός μέρους της διαδικασίας που προτάθηκε στα [94,95].

Σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφ. 20) έγινε αναφορά σε διάφορα μοντέλα περιγραφής της μπαταρίας. Ένα από αυτά ήταν το αναλυτικό μοντέλο Ki.Ba.M. Πράγματι, ενώ το μοντέλο δεν ικανοποιεί πλήρως την περιγραφή των μπαταριών Li-

ιον, μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να τις καλύπτει, ξεκινώντας από ένα μοντέλο-αφετηρία που μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια την λειτουργία της Li-Ion χωρίς να δίνεται απαραίτητα βαρύτητα στα μεγέθη που επηρεάζουν την γήρανση όπως αυτό του C_{rate} και της εξάρτησης της χωρητικότητας σε ενέργεια. Η επικύρωση της αξιοπιστίας του παραγόμενου μοντέλου, λόγω περιορισμένου χρόνου και πόρων, γίνεται με το πολύ ακριβές και αξιόπιστο μοντέλο DUALFOIL στο [94], αντί για κάποιο πραγματικό σύστημα μπαταριών. Το μοντέλο που αναπτύσσεται είναι γραμμικό και έχει την δυνατότητα να περιγράψει τις ταχείες δυναμικές αλλαγές στην μπαταρία, το Rate Capacity Effect [96] επιτρέποντας την ενσωμάτωσή του σε γραμμικό πρόβλημα και την εύκολη επίλυσή του.

Με το τροποποιημένο μοντέλο, γίνεται δυνατή η περιγραφή της συμπεριφοράς της μπαταρίας σε διάφορες πολιτικές φορτίσεων, οπότε ο περιορισμός των SoC δεν είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί, καθώς αυτορυθμίζεται από το ίδιο το μοντέλο κατά τα βέλτιστα.

Για την αντιστοίχιση της γήρανσης στα μεγέθη λειτουργίας δημιουργείται ένας χάρτης γήρανσης που την περιγράφει [95]. Ο χάρτης γήρανσης, δημιουργείται συσχετίζοντας τους διακριτούς χειρισμούς της μπαταρίας με την στάθμη φόρτισης και την ένταση του ρεύματος φόρτισης/εκφόρτισης [94], κάνοντας παράλληλα χρήση μοντέλων ημερολογιακής γήρανσης [91,92,93] ή δεδομένων από το μοντέλο Dualfoil [95] και μοντέλων ικανών για την περιγραφή της γήρανσης των μπαταριών [97, 98].

Οι χάρτες γήρανσης σε συνδυασμό με το μοντέλο που δημιουργήθηκε, περιγράφουν την μόνιμη απώλεια της χωρητικότητας από την φθορά της μπαταρίας.

Για την οικονομική ποσοτικοποίηση της γήρανσης γίνεται αναφορά στην διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε στο [94]. Με εμπειρικό μετασχηματισμό δημιουργείται ένας χάρτης κόστους. Ο χάρτης αυτός στην συνέχεια, μέσω προσεγγιστικής μελέτης αντιστοιχίζεται σε γραμμική συνάρτηση κόστους.

3.2 Μελέτη Μοντελοποίησης Λειτουργίας Μπαταρίας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η λύση προσεγγίστηκε με τροποποίηση υπάρχοντος μοντέλου KiBaM και εξακρίβωση της αξιοπιστίας του από το Dualfoil, η διαδικασία περιγράφεται στο [94]. Η μελέτη της γήρανσης για το μοντέλο, χωρίζεται σε δύο μέλη: την μελέτη των γρήγορων και των αργών χημικών αντιδράσεων. Παρακάτω φαίνεται η διαδικασία τροποποίησης του μοντέλου [34] για την μοντελοποίηση των ταχέων χημικών αλληλεπιδράσεων κατά την λειτουργία της μπαταρίας.

3.2.1 Μελέτη ταχέων Αντιδράσεων και Κατασκευή του μοντέλου μπαταρίας

Ως αφετηρία για την μοντελοποίηση της μπαταρίας επιλέγεται το μοντέλο που παρουσιάστηκε στο [38]. Η αξιοπιστία στην πρόβλεψη της SOC, της τάσης και του ρεύματος της μπαταρίας έχει αξιολογηθεί στο [38] συγκρίνοντας τις καμπύλες φόρτισης με αυτές που παρέχονται από τους κατασκευαστές των μπαταριών που χρησιμοποιήθηκαν. Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2, το συγκεκριμένο μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος είναι μη γραμμικό. Περιλαμβάνει μια εσωτερική αντίσταση

R, της οποίας η τιμή εξαρτάται κυρίως από την αγωγιμότητα του ιόντος του ηλεκτρολύτη [38]. Η διαθέσιμη φόρτιση Q_{bat} περιορίζεται από τις τάσεις αποκοπής f_{ocv} των στοιχείων της μπαταρίας ενώ η SoC είναι ανάλογη του ρεύματος φόρτισης I_{bat} και αντιστρόφως ανάλογη της διαθέσιμης φόρτισης Q_{bat} . Έτσι καταστρώνεται το μη γραμμικό βασικό μοντέλο για την διαδικασία ορισμού του τελικού γραμμικού μοντέλου:

Μοντέλο 1:

$$\dot{SoC} = -Q_{bat}^{-1} * I_{bat} \quad (3.1)$$

$$V_t = f_{ocv}(SoC) - R * I_{bat} \quad (3.2)$$

Όπου V_t είναι η τάση εξόδου της μπαταρίας (terminal) . Για την ώρα η f_{ocv} θεωρείται γνωστή από έναν πίνακα αντιστοίχισης (look up).

3.2.1.1 Η επέκταση με χρήση του KiBaM

Το παραπάνω μοντέλο, ενώ αρκεί για την μοντελοποίηση της μπαταρίας ιόντων λιθίου, δεν καλύπτει την εξάρτηση της χωρητικότητας της μπαταρίας από το C_{RATE} ή αλλιώς το rate capacity effect όπως αναφέρθηκε. Για την επέκταση του μοντέλου χρησιμοποιούμε τις δυναμικές σχέσεις του μοντέλου Ki.Ba.M. [99], που περιέχει - βάσει μοντελοποίησης - δύο πηγάδια χωρητικότητας φόρτισης x_1 και x_2 , για να επεκτείνουμε τις σχέσεις (3.1) και (3.2). Τελικά η SoC περιγράφεται από την σχέση $SoC = x_1 + x_2$.

Η διαθέσιμη ενέργεια μπορεί να αφαιρείται μόνο από το πηγάδι x_1 , ενώ τα δύο πηγάδια είναι εσωτερικά συνδεδεμένα με «βαλβίδα». Οι αδιάστατες παράμετροι c_r και c_w περιγράφουν όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, την αγωγιμότητα της βαλβίδας (η δίοδος ουσιαστικά της ενέργειας από το x_2 στο x_1) και το πλάτος του διαθέσιμου πηγαιδιού αντίστοιχα. Το KiBaM περιγράφει μόνον τις μπαταρίες μολύβδου - οξέως οπότε μετράπεται η εξίσωση του μοντέλου ώστε στην Τάση εξόδου V_t να περιλαμβάνεται η τάση αποκοπής f_{ocv} . Έτσι καλύπτεται η συμπεριφορά των μπαταριών ιόντων λιθίου για το rate capacity effect. Οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι:

Μοντέλο 2:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c_r}{c_w} & \frac{c_r}{1 - c_w} \\ \frac{c_r}{c_w} & -\frac{c_r}{1 - c_w} \end{bmatrix} * x - \begin{bmatrix} Q_{bat}^{-1} \\ 0 \end{bmatrix} * I_{bat} \quad (3.3\alpha)$$

$$V_t = f_{ocv} * \left(\frac{x_1}{c_w} \right) - R * I_{bat} \quad (3.4)$$

$$\dot{SoC} = \dot{x} \quad (3.3\beta)$$

$$\mu\epsilon \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{c_r}{c_w} & \frac{c_r}{1-c_w} \\ \frac{c_r}{c_w} & -\frac{c_r}{1-c_w} \end{bmatrix} \text{ και } SOC = x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Το Μοντέλο 2, με τις προσθήκες της κανονικοποιημένης φόρτισης και των τάσεων αποκοπών από το Μοντέλο 1, είναι ικανό να περιγράψει το rate capacity effect και στις Li-Ion μπαταρίες. Παρ' όλα αυτά, παραμένει μη γραμμικό και δυσχεραίνει την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

3.2.1.2 Γραμμικοποίηση του μικτού Μοντέλου 2:

Το μοντέλο που προέκυψε στην 3.2.1.1 ενότητα, μπορεί να περιγράψει σωστά τα φαινόμενα γήρανσης αλλά απαιτείται γραμμικοποίηση για την λύση του.

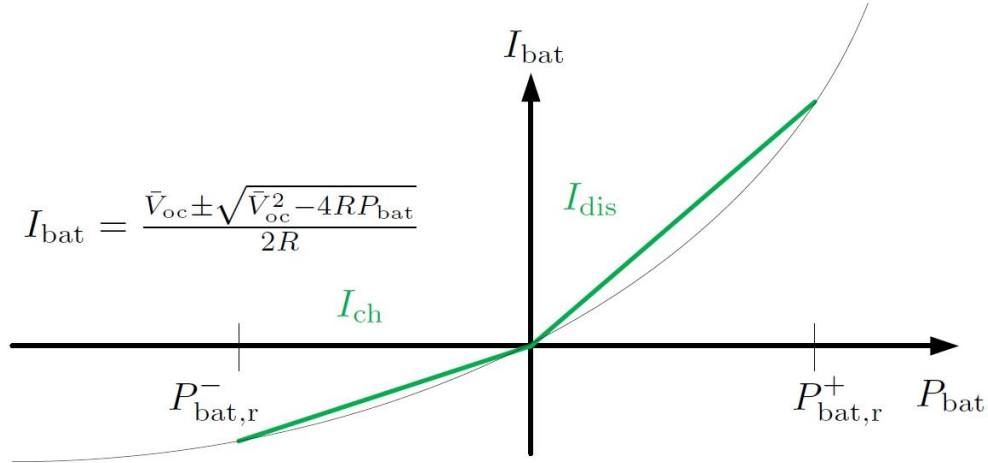
Είναι δυνατόν η τάση αποκοπής f_{ocv} να αντικατασταθεί με έναν σταθερό όρο \bar{V}_{OC} χωρίς να επηρεαστεί η αποδοτικότητα του μοντέλου [94]. Έτσι μπορεί να γραμμικοποιηθεί η εξίσωση (4) του Μοντέλου 2. Με τον πολλαπλασιασμό των εξισώσεων (3.2) και (3.4) με το ρεύμα της μπαταρίας I_{bat} προκύπτει μια σχέση για την ισχύ της μπαταρίας. Η υπόθεση ότι δεν υπάρχει άλλη ροή ισχύος προς/από την μπαταρία (πχ μετατροπείς ισχύος) δεν παραβιάζει την αξιοπιστία της σχέσης [94].

$$P_{bat} = V_t * I_{bat} = \bar{V}_{OC} * I_{bat} - R * I_{bat}^2 \quad (3.5\alpha)$$

Λύνοντας ως προς I_{bat} έχουμε:

$$I_{bat} = \frac{\bar{V}_{OC} \pm \sqrt{\bar{V}_{OC}^2 - 4P_{bat}}}{2R} \quad (3.5\beta)$$

Η γραμμικοποίηση του ρεύματος γύρω από την πραγματική ρίζα της (3.5β) για δεδομένη τιμή της \bar{V}_{OC} και της μέγιστης ονομαστικής ισχύος $P_{bat,r}$ φαίνεται παρακάτω. Στο γράφημα φαίνεται η γραμμικοποίηση του ρεύματος φόρτισης I_{ch} (αρνητικός ημιάξονας) και του ρεύματος εκφόρτισης I_{dis} (θετικός ημιάξονας).



Γράφημα 3.1: Η γραμμικοποίηση του ρεύματος μπαταρίας [94].

Στην συνέχεια ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη (χωρητικότητα μπαταρίας, συντελεστές απόδοσης, ισχύς μπαταρίας):

$$C_{bat} = Q_{bat} \bar{V}_{OC} \quad (3.6)$$

$$\eta_{gen}^{-1} = \frac{I_{dis} \bar{V}_{OC}}{P_{bat,r}^+} = \frac{\bar{V}_{OC} - \sqrt{\bar{V}_{OC}^2 - 4P_{bat,r}^+}}{2RP_{bat,r}^+} \bar{V}_{OC} \quad (3.7)$$

$$\eta_{load} = \frac{I_{ch} \bar{V}_{OC}}{P_{bat,r}^-} = \frac{\bar{V}_{OC} - \sqrt{\bar{V}_{OC}^2 - 4P_{bat,r}^+}}{-2RP_{bat,r}^-} \bar{V}_{OC} \quad (3.8)$$

$$u_{load}^{bat} = \begin{cases} -P_{bat}, & \text{για } P_{bat} < 0 \\ 0, & \text{για } P_{bat} \geq 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

$$u_{gen}^{bat} = \begin{cases} |P_{bat}|, & \text{για } P_{bat} > 0 \\ 0, & \text{για } P_{bat} \leq 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

Πολλαπλασιάζοντας την (3.1) με την \bar{V}_{OC} προκύπτει:

$$\bar{V}_{OC} * \dot{x} = -Q_{bat}^{-1} * I_{bat} * \bar{V}_{OC}$$

Εισάγοντας τα γραμμικά πλέον ρεύματα φόρτισης κι εκφόρτισης στις σχέσεις (3.1) και (3.2) του Μοντέλου 1 και με χρήση των (3.6)-(3.10) η παραπάνω γίνεται:

$$\dot{x} C_{bat} = -\eta_{gen}^{-1} * u_{gen}^{bat} + \eta_{load} * u_{load}^{bat} \quad (3.11)$$

Όπου στην ουσία η (3.11α) πρόκειται για την εξίσωση Ισχύος στους κόμβους με εγκατεστημένες μόνο τις μονάδες αποθήκευσης.

Ενώ η σχέση (3.4) παίρνει πλέον την μορφή:

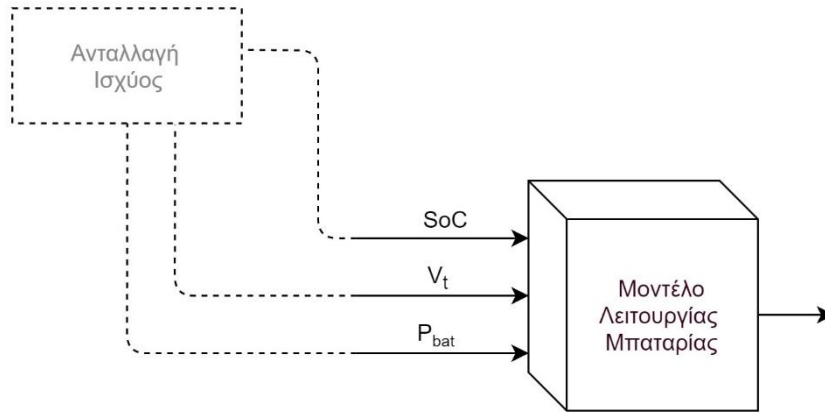
$$V_t = \bar{V}_{OC} - \left(\frac{R}{\bar{V}_{OC}} \right) (u_{gen}^{bat} - u_{load}^{bat}) \quad (3.12)$$

Οι σχέσεις (3.11) και (3.12) περιγράφουν το Μοντέλο 3, μια γραμμικοποιημένη εκδοχή του μοντέλου 1. Σύμφωνα με την προεργασία και τις σχέσεις του μοντέλου 2, για την περιγραφή του Rate Capacity Effect, εισάγοντας την (3.3) στην σχέση (3.11) λαμβάνουμε τις:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c_r}{c_w} & \frac{c_r}{1-c_w} \\ \frac{c_r}{c_w} & -\frac{c_r}{1-c_w} \end{bmatrix} * x - C_{bat}^{-1} \begin{bmatrix} -\eta_{gen}^{-1} & \eta_{load} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{gen} \\ u_{load} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$V_t = \bar{V}_{OC} - \left(\frac{R}{\bar{V}_{OC}} \right) (u_{gen} - u_{load}) \quad (3.14)$$

Οι σχέσεις (3.13) και (3.14) αποτελούν το Μοντέλο 4. Μέσα από τροποποίηση του αρχικού μοντέλου, με τις εξισώσεις του Κί.Βα.Μ επιτυγχάνεται να δημιουργηθεί μια μαθηματική μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της μπαταρίας λιθίου που περιλαμβάνει το Rate Capacity Effect.



Σχήμα 3.1: Το προτεινόμενο μοντέλο 4

3.2.1.3 Μελέτη αξιοπιστίας μοντέλου

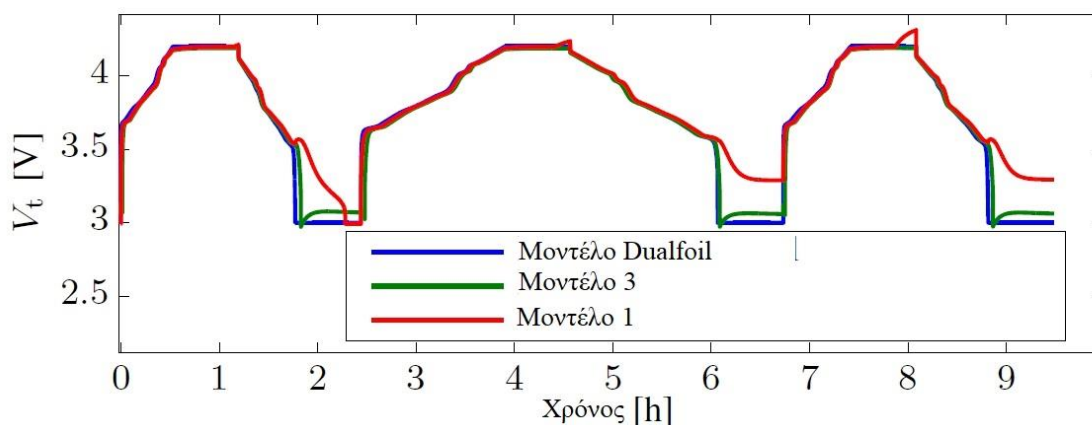
Η επαλήθευση του μοντέλου που δημιουργήθηκε παρουσιάζεται στην μελέτη [94], συγκριτικά με το μοντέλο Dual Foil. Εκεί, καταστρώνεται ένα σύστημα παραμέτρων έτσι ώστε να περιλαμβάνονται και οι χημικές αντιδράσεις που προκαλούν μη ανακτήσιμη απώλεια χωρητικότητας.

Όπως προαναφέρθηκε το μοντέλο Dual Foil είναι ένα πολύ ακριβές μοντέλο λειτουργίας μπαταριών και υλοποιείται με μερικές διαφορικές αλγεβρικές εξισώσεις που λύνονται με την επαναληπτική μέθοδο Newton Raphson. Η προσομοίωση έγινε με κύκλους φορτίσεων έως η μπαταρία να φτάσει στο 0.8 της συνολικής της χωρητικότητας, (End of Life 0.2) και οι παράμετροι του Dual Foil ορίστηκαν ώστε η μπαταρία να εκτελέσει 4000 κύκλους. Γίνεται υπολογισμός των «πραγματικών» τιμών της SoC και της απώλειας χωρητικότητας και εν τέλει χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστούν οι παράμετροι των μοντέλων που δημιουργήθηκαν παραπάνω. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (μη γραμμικά) με χρήση της:

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_{k=1}^N (V_{t,dualfoil}(k) - V_{t,model}(I_{bat}(k), \theta, x_0))^2 \quad (3.15)$$

Όπου $\hat{\theta}_1^T = [R \ Q_{batt}]^T$, παράμετρος που αντιστοιχεί στην εξίσωση (3.2) του γραμμικού Μοντέλου 1, $\hat{\theta}_2^T = [R \ Q_{batt} \ cw \ cr]^T$ παράμετρος που αντιστοιχεί στην σχέση (3.13) του γραμμικού Μοντέλου 4 και x_0 η αρχική SoC της μπαταρίας.

Στο [94] έγινε προσομοίωση με κύκλους σταθερής έντασης ρεύματος και τάσης CC-CV με αρχικά αφόρτιστη μπαταρία. Παρατίθενται παρακάτω τα αποτελέσματα της σύγκρισης των μη γραμμικών μοντέλων 1 και 3 σε σχέση με το μοντέλο Dual Foil [94]:



Γράφημα 3.2: Το σφάλμα της τάσης λειτουργίας της Μπαταρίας [94]

Βλέπουμε ότι κατά την φάση σταθερής τάσεως τα μοντέλα που περιεγράφηκαν παραπάνω αδυνατούν να παρουσιάσουν αποτελέσματα που να προσομοιάζουν στα πραγματικά. Για να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα των 4 μοντέλων που δημιουργήθηκαν, έγινε χρήση της κανονικοποιημένης ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος:

$$KP_{MT\Sigma} = \frac{\|V_{dualfoil} - V_{model}\|_2}{\|V_{model} - \bar{V}_{model}\|_2} \quad (3.16)$$

Όπου $V_{dualfoil}$ το αποτέλεσμα του μοντέλου Dual Foil και V_{model} η εκτιμώμενη τιμή για καθένα από τα 4 μοντέλα. Οι τιμές που παίρνει το σφάλμα φαίνονται παρακάτω

Μοντέλο Νο:	Σφάλμα SoC (%)	Σφάλμα V_t (%)
1	0	38
2	0	18
3	3	98
4	3	59

Πίνακας 3.1: Το Σφάλμα KP_{MTS} (3.16) των 4 μοντέλων σε σχέση με το Dual foil [94]

Το σφάλμα του μοντέλου 4 για την V_t , που καταλήξαμε ως βέλτιστο, είναι αρκετά μεγάλο και μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη μελέτη εάν δεν ληφθεί υπόψιν. Η χρήση των τιμών του Dual Foil δειγματοληπτικά ώστε περιοδικά να διορθώνονται V_t και V_{oc} , μπορεί να οδηγήσει σε πιο ακριβές αποτέλεσμα. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται στο άρθρο [94]. Η V_t δύναται επίσης να διορθωθεί μέσω lookup table [95] είτε τον ημιεμπειρικό τύπο που εξάγεται στο [100] που αποτελεί και την βέλτιστη επιλογή σε περίπτωση μη χρήσης πειραματικών δεδομένων ή του Dualfoil.

3.2.1.4 Περιορισμός του σφάλματος V_t με εμπειρικό τύπο

Για τον περιορισμό του σφάλματος της τάσης γίνεται αξιοποίηση των δεδομένων του άρθρου [101]. Οι μπαταρίες υπόκεινται σε κύκλους λειτουργίας και από τα αποτελέσματα εξάγονται κάποια συμπεράσματα που βοηθούν στην μαθηματική ερμηνεία των μεταβολών των μεγεθών τους.

Στο [100] εξάγεται μια παραμετρική εξίσωση που περιγράφει την μεταβολή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης (που προηγουμένως θεωρήθηκε σταθερή και ίση με την μέση τάση ανοιχτοκύκλωσης κατά την λειτουργία) με μορφή:

$$V_{oc}(SoC) = K_0 + K_1 \frac{1}{1 + e^{a_1(SoC - \beta_1)}} + K_2 \frac{1}{1 + e^{a_2(SoC - \beta_2)}} + K_3 \frac{1}{1 + e^{a_3(SoC - 1)}} + K_4 \frac{1}{1 + e^{a_4 SoC}} + K_5 SoC \quad (3.17\alpha)$$

Το παραπάνω αποτελεί μια απλούστευση της σχέσης του ηλεκτροχημικού μοντέλου που παρουσιάστηκε στο άρθρο [102]. Στην συνέχεια εξετάστηκε ζώνη του SoC από 10% έως 90% ώστε να αποκλειστούν τις περιοχές με πολύ ασταθείς μηχανισμούς, όπου η (3.17α) μπορεί να γραμμικοποιηθεί. Στο [102] το παραπάνω μοντέλο συγκρίνεται με τα αποτελέσματα πραγματικής λειτουργίας της μπαταρίας για 18 μήνες και προσδιορίζονται οι παράμετροι:

Παράμετρος	Τιμή
K_0	3.4002
K_1	0.0080
K_2	0.0785
K_3	-0.2150
K_4	-1.3032
K_5	0.0891
α_1	-14
α_2	-18
α_3	28
α_4	40

Πίνακας 3.2: Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου [102]

Οπότε η προτεινόμενη σχέση (3.17α) για την τάση ανοιχτοκύκλωσης παίρνει την μορφή:

$$V_{oc}(SoC) = K_0 + K_1 \frac{1}{1 + e^{\alpha_1(SoC)}} + K_2 \frac{1}{1 + e^{\alpha_2(SoC)}} + K_3 \frac{1}{1 + e^{\alpha_3(SoC-1)}} + K_4 \frac{1}{1 + e^{\alpha_4 SoC}} + K_5 SoC \quad (3.17\beta)$$

Το σφάλμα ΜΤΣ της (3.17β) σε σύγκριση με πραγματικά δεδομένα για την τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} είναι 1.0 mV και η μέγιστη τιμή του σφάλματος είναι 2.5mV.

Έτσι με την ακριβέστερη μοντελοποίηση της V_{oc} επιτυγχάνεται μια καλύτερη περιγραφή της τάσης V_t μέσω της Σχέσης (3.14), με αποτέλεσμα να καλύπτεται η αδυναμία του μοντέλου να περιγράψει τις μεταβολές της τάσης σε σχέση με την στάθμη φόρτισης με ακριβή τρόπο. Η (3.14) με χρήση της (3.17β) που προέκυψε στο [102], γίνεται :

$$V_t = V_{oc}(SoC) - \left(\frac{R}{V_{oc}(SoC)} \right) (u_{gen} - u_{load}) \quad (3.17\gamma)$$

Όπου λόγω της μοντελοποίησης Κι.Βα.Μ ισχύει και $SoC = x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$.

3.2.2 Μελέτη αργών αντιδράσεων

Τα φαινόμενα γήρανσης στην μπαταρία όπως ήδη έχει αναφερθεί προκαλούνται και από τους χειρισμούς κατά την λειτουργία της. Λόγω της πολυπλοκότητας των μηχανισμών που αλληλοεπιδρούν η πλήρης ερμηνεία των φαινομένων είναι αρκετά δύσκολη ακόμη και σε ηλεκτροχημικό επίπεδο [103]. Κύριοι παράγοντες όπως

προαναφέρθηκε είναι οι χημικές αντιδράσεις που καθιστούν τα κινούμενα ιόντα, στέρεα. Η εναπόθεση των στέρεων πλέον στοιχείων μπορεί να συμβαίνει τόσο στην άνοδο αυξάνοντας την εσωτερική αντίδραση της μπαταρίας, τόσο και στην κάθοδο, όπου ο ηλεκτρολύτης αποσυντίθεται και αυτός σε στέρεα σωματίδια. Οι βλαπτικές χημικές αντιδράσεις ενεργοποιούνται λόγω:

- 1) διαφοράς δυναμικού στον ηλεκτρολύτη και τα ηλεκτρόδια
- 2) θερμοκρασίας
- 3) ρεύματος μπαταρίας

Έτσι για την περιγραφή της γήρανσης μπορούμε να ορίσουμε ως ρυθμό αντίδρασης I_s [94], τον αριθμό των ιόντων που μετατρέπονται σε στέρεο υλικό ανά μονάδα χρόνου:

$$I_s = -\dot{Q}_{batt} = f(V_{OC}, I_{bat}, \theta) \quad (3.18)$$

όπου θ είναι η θερμοκρασία, V_{oc} η τάση ανοιχτοκύκλωσης ως συνάρτηση της SoC, I_{bat} το ρεύμα της μπαταρίας και C_{batt} η χωρητικότητα της μπαταρίας.

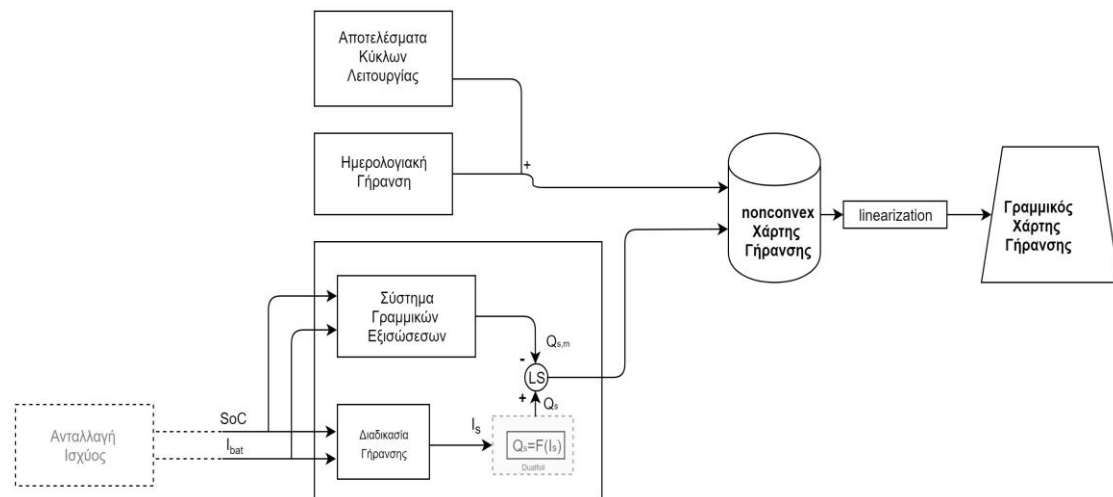
Η σχέση (3.18) περιγράφει μια διαδικασία που γίνεται εσωτερικά, οπότε δεν δύναται να μετρηθεί άμεσα. Επίσης η μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης δεν αρκεί για την μοντελοποίηση της γήρανσης καθώς οφείλεται κυρίως στην εναπόθεση στην άνοδο. Εμπειρικά η γήρανση μπορεί να μετρηθεί μόνο μετά από μεγάλο αριθμό κύκλων [104]. ενώ δεν μπορεί να συσχετιστεί με μεμονωμένους χειρισμούς. Παρ' όλα αυτά είναι δυνατός ο υπολογισμός της απώλειας χωρητικότητας χαρακτηρίζοντας και διακρίνοντας τους τύπους των χειρισμών της μπαταρίας. Για τον λόγο αυτό αναπτύσσεται η παρακάτω μέθοδος για την μοντελοποίησή της γήρανσης. Η μέθοδος περιλαμβάνει τον συσχετισμό των βασικών μεγεθών με την γήρανση, σχηματίζοντας ένα γράφημα για την χαρτογράφηση της γήρανσης. Οι χάρτες αυτοί, στην βιβλιογραφία αναφέρονται ως χάρτες γήρανσης.

3.3 Κατασκευή Χάρτη Γήρανσης

Ως χάρτης γήρανσης ορίζεται η σχέση χαρακτηριστικών μεγεθών της μπαταρίας με την γήρανση που προκαλούν στην μπαταρία. Η σχέση αυτή θα πρέπει να είναι διερευνηθεί, ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί η γήρανση εξαιτίας των χειρισμών της μπαταρίας σε κάθε χρονική μονάδα.

Στο [95] γίνεται περιγραφή της διαδικασίας του χάρτη γήρανσης, με διαφορετικούς τρόπους και για διαφορετικά υλικά. Γίνεται παρακάτω περιγραφή της διαδικασίας που προτάθηκε και παράθεση των αποτελεσμάτων. Για τον χαρακτηρισμό των χειρισμών, έγινε συσχέτιση τους με την στάθμη φόρτισης της μπαταρίας (SoC) και του ρεύματος μπαταρίας (I_{bat}). Αυτές οι δύο μεταβλητές διακριτοποιούνται σε "n" ζώνες Στάθμης Φόρτισης (SoC) και "m" περιόδους για του ρεύμα της μπαταρίας (I_{bat}). Η αντιστοίχιση αυτή με δεδομένα χειρισμών από το Dualfoil μοντέλο συνέχεια χαρτογραφούνται μέσω της μαθηματικής διαδικασίας που περιγράφεται παρακάτω. Θεωρώντας την θερμοκρασία της μπαταρίας σταθερή, στο παρόν δεν γίνεται μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς ενώ γίνεται διόρθωση της ακρίβειάς του με την συνδρομή μελετών για την ημερολογιακή γήρανση των μπαταριών και με την εκμετάλλευση των

στοιχείων που παρέχονται από τους κατασκευαστές. Έτσι οι χημικές αντιδράσεις συσχετίζονται μη γραμμικά με τις μεταβλητές της μπαταρίας SoC και I_{bat} . Στην συνέχεια γίνεται γραμμικοποίηση του εξαγόμενου χάρτη.



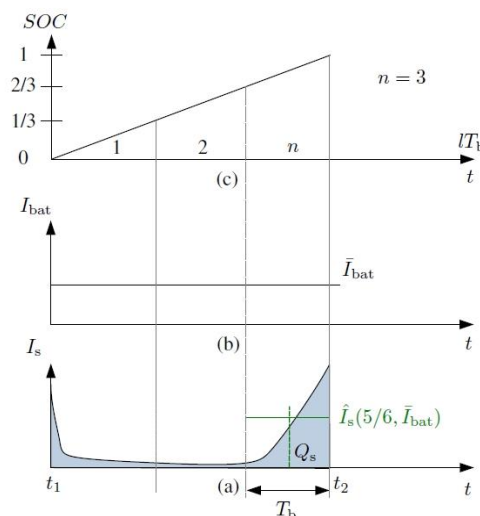
Σχήμα (3.2): Η διαδικασία κατασκευής του χάρτη γήρανσης

3.3.1 Κατασκευή Χάρτη Γήρανσης

Στα [94,95] γίνεται χρήση του παραδείγματος που φαίνεται παρακάτω. Έτσι η μη ανακτήσιμη χωρητικότητα ανάμεσα σε δύο χρονικές στιγμές t_1 και t_2 μπορεί να περιγραφεί [95] από την:

$$Q_s = Q_{batt}(t_1) - Q_{batt}(t_2) = \int_{t_2}^{t_1} I_s(SOC(t), I_{batt}(t)) dt, \quad (3.19)$$

Η (3.19) φαίνεται στο παράδειγμα του [95] με το γράφημα (3.3):



Γράφημα 3.3: Η απώλεια χωρητικότητας Q_s [94]

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα [95] χρησιμοποιήθηκαν n=3 Ζώνες SoC, ώστε η μη ανακτήσιμη χωρητικότητα να διαιρείται σε διακριτές τιμές ρεύματος, που κάθε μία αντιστοιχεί σε μια ζώνη στάθμης φόρτισης και μια περίοδο ρεύματος. Έτσι η Qs μπορεί να προσεγγιστεί με το άθροισμα των διακριτών αυτών τιμών ρεύματος.

$$Q_s \approx \sum_{i=1}^n \hat{I}_s(SOC(l), \bar{I}_{bat}) T_b \quad (3.20)$$

Όπου \bar{I}_{bat} είναι το ρεύμα που αντιστοιχίζεται στην σχετική περίοδο ρεύματος και T_b η χρονική διάρκεια της μετάβασης της SoC στην αντίστοιχη SoC ζώνη, για το δεδομένο \bar{I}_{batt} .

Η αντίστοιχη περίοδος του ρεύματος βρίσκεται με τον υπολογισμό του μέσου ρεύματος της μπαταρίας, όσο αυτή βρισκόταν εντός της ζώνης SoC με κέντρο $(\frac{2l-1}{2n})$. Για την μέτρηση n_m απωλειών χωρητικότητας $(Q_{s,1}, Q_{s,2}, \dots, Q_{s,n_m})$ και αυθαίρετο μοτίβο χειρισμών, οι άγνωστες διακριτοποιημένες τιμές του ρεύματος \hat{I}_s , με μετασχηματισμό της σχέσης (3.20) και την χρήση του \hat{M}_p για την προβολή της απώλειας χωρητικότητας μπορεί να αποτυπωθεί σε σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^n p_{1,(n(j-1)+l)} T_{b,j} \hat{I}_s \left(\frac{2l-1}{n}, \bar{I}_{bat,j} \right) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^n p_{n_m,(n(j-1)+l)} T_{b,j} \hat{I}_s \left(\frac{2l-1}{n}, \bar{I}_{bat,j} \right) \end{bmatrix}}_{\hat{M}_p \hat{I}_s} = \underbrace{\begin{bmatrix} Q_{s,1} \\ \vdots \\ Q_{s,n_m} \end{bmatrix}}_{\hat{Q}_s} \quad (3.21)$$

Όπου p, ο μετρητής για τους χειρισμούς που γίνονται σε κάθε ζώνη SoC και περίοδο ρεύματος. Το \hat{I}_s εκτιμάται με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (LS):

$$\hat{I}_s = \arg \min_{\hat{I}_s} \|\hat{M}_p \hat{I}_s - \hat{Q}_s\|_2^2, \text{ με } \hat{I}_s > 0 \quad (3.22)$$

Ο χάρτης γήρανσης με τις συσχετισμένες μεταβλητές που προκύπτει είναι μη κυρτός [96] και πρέπει να γίνει γραμμικοποίησή του ώστε να εξαχθεί μια κυρτή απεικόνιση του κατάλληλη να χρησιμοποιηθεί σε ένα γραμμικό περιβάλλον.

3.3.2 Επέκταση Χάρτη Γήρανσης με μοντέλα ημερολογιακής γήρανσης και δεδομένα κατασκευαστή.

Στα άρθρα [91,92,93] γίνεται μελέτη του ρόλου του συνόλου των κύκλων και της ημερολογιακής γήρανσης στην απώλεια χωρητικότητας της μπαταρίας. Στην συνέχεια

αυτή προσδιορίζεται από τις τιμές των συνολικών κύκλων, της θερμοκρασίας και του ρεύματος. Δεδομένα για τους κύκλους λειτουργίας των μπαταριών, παρέχονται από τους κατασκευαστές τους και σχετίζονται με το αναμενόμενο σύνολο των κύκλων λειτουργίας n_{cycle} σε διάφορα βάθη εκφόρτισης (DoD). Από αυτά τα δεδομένα μπορεί να ανακατασκευαστεί το μοτίβο των ρευμάτων που προκάλεσαν την αντίστοιχη απώλεια χωρητικότητας [94].

Για κάθε διακριτό DoD απαιτείται ο κύκλος λειτουργίας που πραγματοποιήθηκε και οδήγησε στην απώλεια χωρητικότητας $Q_{i,s}$. Υποθέτοντας ότι η διακύμανση των βαθών φόρτισης έχει κέντρο την Στάθμη Φόρτισης $SoC = 0.5$ τότε μπορεί να δημιουργηθεί το παρακάτω σύστημα γραμμικών εξισώσεων όπως προέκυψαν στο άρθρο [95]:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & T_{b,p_1} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{b,p_{n_m}} & \dots & T_{b,p_{n_m}} \end{bmatrix}}_{\hat{M}_p T_b} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{I}_s \left(\frac{2 \cdot 1 - 1}{2n}, I_{bat} \right) \\ \vdots \\ \hat{I}_s \left(\frac{2k - 1}{2n}, I_{bat} \right) \\ \vdots \\ \hat{I}_s \left(\frac{2n - 1}{2n}, I_{bat} \right) \end{bmatrix}}_{\hat{I}_s(I_{bat})} = \underbrace{\begin{bmatrix} Q_{s,1} \\ \vdots \\ Q_{s,n_m} \end{bmatrix}}_{\hat{Q}_s} \quad (3.23)$$

Όπου πλέον ο αριθμός των χειρισμών για κάθε στάθμη φόρτισης SoC_i είναι γνωστός και υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση [98]:

$$p_i = 2 \frac{n_{cycle}}{DoD_i} \quad (3.24)$$

Ενώ ο χρόνος για την μετάβαση από την μία στάθμη στην επόμενη είναι:

$$T_b = 2 \frac{C_{bat}}{I_{bat} n} \quad (3.25)$$

Έτσι για διαφορετικά ρεύματα $I_{bat,1}, I_{bat,2}, \dots, I_{bat,n_m}$ έχουμε τελικά:

$$\begin{bmatrix} M_p(T_{b,1}) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & M_p(T_{b,n_m}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{bat,1} \\ \vdots \\ I_{bat,n_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{bat,1} \\ \vdots \\ I_{bat,n_m} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Ο ίδιος χάρτης βλέπουμε ότι προέκυψε και στην Σχέση (3.22), όμως οι τιμές της απώλειας της χωρητικότητας θα πρέπει να διερευνηθούν εκτιμώντας τα αποτελέσματα από τα κατάλληλα μοντέλα ημερολογιακής γήρανσης για δεδομένους χειρισμούς που επιγράφονται από το \hat{M}_p .

3.3.3 Τροποποίηση Χάρτη για μπαταρία κάθε μεγέθους

Οι χάρτες που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες αναφέρονται σε συγκεκριμένα μεγέθη μπαταριών. Για την εκτίμηση της γήρανσης σε οποιοδήποτε σύστημα αποθήκευσης είναι αναγκαία η προβολή των αποτελεσμάτων σε επίπεδο στοιχείου. Επιπλέον, για να συμβαδίζουν οι χάρτες με τα πρότυπα και τον τρόπο διαχείρισης στα Συστήματα Ισχύος θα πρέπει η εξάρτησή τους σε ρεύμα να “μεταφραστεί” ως προς το πεδίο της Ισχύος.

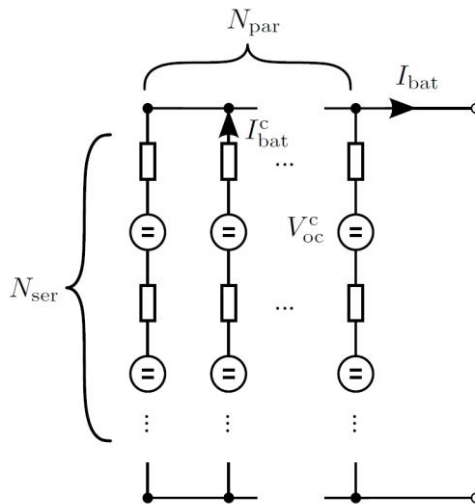
Σε επίπεδο στοιχείου, οι χάρτες αναπαριστούν έναν χάρτη $f(Q^C, I_{batt}^C)$ που περιγράφει την απώλεια χωρητικότητας ανά μονάδα χρόνου συσχετισμένη με το ρεύμα στοιχείου μπαταρίας I_{batt}^C και την φόρτιση του στοιχείου Q^C . Πολλαπλασιάζοντας τον χάρτη με την μέση τάση ανοιχτού κύκλου του στοιχείου \bar{V}_{OC}^C , η φθορά του μπορεί να εκφραστεί σε μονάδες ενέργειας ανά μονάδα χρόνου DEG^C με την σχέση (3.27):

$$DEG^C = f(Q^C, I_{batt}^C) \bar{V}_{OC}^C \quad (3.27)$$

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα (3.3), η μπαταρία αποτελείται από N_{par} παράλληλες γραμμές στοιχείων. Κάθε γραμμή περιέχει συνδεδεμένα σε σειρά N_{ser} στοιχεία. Μετατρέποντας την Σχέση (3.27) κατάλληλα μπορούμε να έχουμε μια σχέση που να εκφράζει την απώλεια χωρητικότητας για οποιοδήποτε σύστημα αποθήκευσης:

$$DEG = N_{par} f\left(\frac{Q}{N_{par}}, \frac{I_{batt}}{N_{par}}\right) N_{ser} \bar{V}_{OC}^C \quad (3.28)$$

Όπου Q πλέον είναι η φόρτιση της μπαταρίας.



Σχήμα 3.3: Η διαμόρφωση των κελιών μιας μπαταρίας

Η χωρητικότητα ενέργειας μιας μπαταρίας συνολικά είναι $C_{batt} = N_{par} C_{cell} N_{ser} \bar{V}_{OC}^C$, οπότε η ισχύς της μπαταρίας είναι $P_{batt} \approx I_{batt} N_{ser} \bar{V}_{OC}^C$. Η

απόλυτη Στάθμη Ενέργειας $SoE \approx QN_{ser}\bar{V}_{OC}^C$ ενώ η κανονικοποιημένη από την συνολική χωρητικότητα είναι $SoE_n = SoE/C_{batt}$. Με τα παραπάνω η (3.28) γίνεται:

$$\frac{DEG}{C_{batt}} = \frac{f\left(SoE_n C_{Cell}, \frac{P_{batt}}{C_{batt}} C_{Cell}\right)}{C_{Cell}} \quad (3.29)$$

Η (3.29) είναι κανονικοποιημένη στα μεγέθη της εκάστοτε μπαταρίας. Αποδεικνύεται έτσι ότι ο χάρτης γήρανσης στο επίπεδο του στοιχείου της μπαταρίας μπορεί να μετατραπεί με έναν γραμμικό μετασχηματισμό για οποιοδήποτε σύστημα μπαταριών με διαφορετική ισχύ και χωρητικότητα. Η μορφή του χάρτη γήρανσης είναι αμετάβλητη κατά την μετατροπή του, πράγμα που σημαίνει ότι ο μετασχηματισμός διατηρεί την μορφή του χάρτη.

3.3.4 Γραμμικοποίηση Χάρτη Γήρανσης

Οι χάρτες που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα είναι μη γραμμικοί και δεν μπορούν αξιοποιηθούν σε ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ωστόσο είναι δυνατόν να υπολογισθεί η γραμμική προσέγγιση του χάρτη (3.29) χρησιμοποιώντας την τριγωνοποίηση Delaunay [105,106]. Στο [95] χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ των τριγώνων της γραμμικής περιβάλλουσας του χάρτη, που προκύπτουν κατά την διαδικασία γραμμικής προσέγγισης η (3.29) γράφεται:

$$\frac{DEG}{C_{batt}} = \max\left(\alpha_1 SoE_n + \alpha_2 \frac{P_{batt}}{C_{batt}} + \alpha_3\right) \quad (3.30)$$

Για την έκφραση της γήρανσης σε kWh/h μιας μπαταρίας με χωρητικότητα C_{batt} σε συνάρτηση με την απόλυτη στάθμη ενέργειας (ενεργειακό περιεχόμενο) SoE και την ισχύ P_{batt} η (3.30) μετασχηματίζεται καταλλήλως:

$$DEG = \max\left([\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3] \begin{bmatrix} P_{batt} \\ SoE \\ C_{batt} \end{bmatrix}\right) \quad (3.31)$$

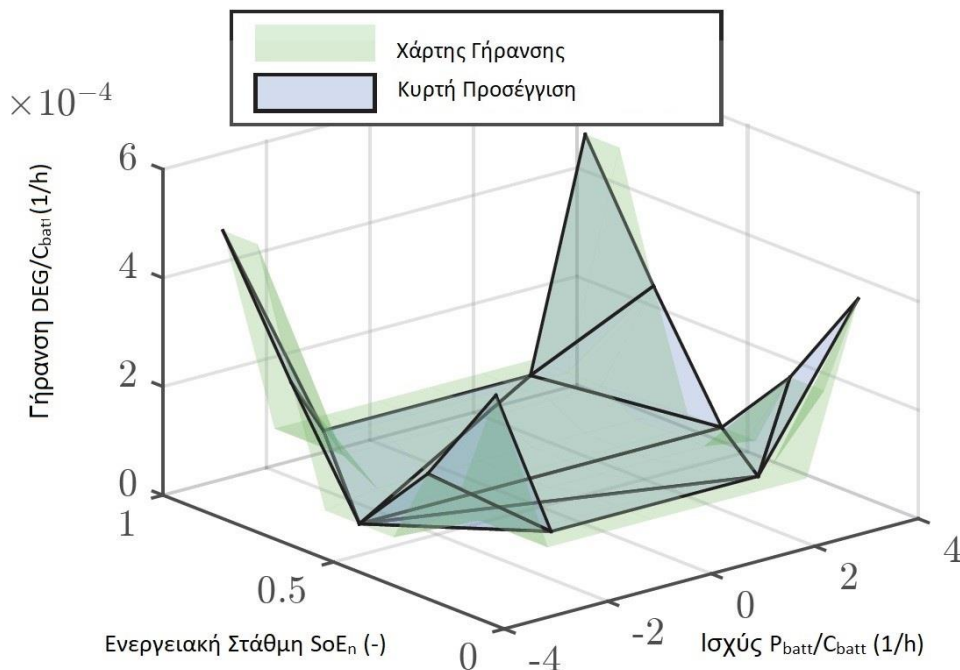
3.3.5 Σχηματοποίηση και Απεικόνιση Χάρτη Γήρανσης

Για την απεικόνιση του χάρτη χρησιμοποιούνται τα στοιχεία από τους κύκλους λειτουργίας που αρχειοποιήθηκαν στο άρθρο [107]. Εκεί καταγράφηκε η απώλεια χωρητικότητας για την μπαταρία λιθίου LiMnNiCo/LiMn₂O₄ για διάφορες τιμές Βάθους Εκφόρτισης και Ρευμάτων Μπαταρίας. Οι χάρτες με την διαδικασία που προαναφέρθηκε μπορούν να μετατραπούν για αποθηκευτικό μέσο οποιουδήποτε

μεγέθους. Για την απεικόνιση, σχηματίζονται κατάλληλα τα διανύσματα των χειρισμών $\hat{M}_{p,i}$, των επιμέρους απωλειών χωρητικότητας $\hat{Q}_{i,s}$ και οι n ζώνες της SoC. Επιλύοντας το σύστημα (3.26) για τα δεδομένα που εισάγονται και μετασχηματίζοντας για τα επιθυμητά μεγέθη μπαταριών προκύπτει ο “Χάρτης Γήρανσης” στο σχήμα (3.3). Έχοντας πλέον την γενικευμένη μορφή του χάρτη γήρανσης, απαιτούμε η συνάρτηση που τον περιγράφει να είναι η (3.30). Με τον τριγωνισμό Delaunay όπως αναφέρθηκε, επιλύεται ένα σύστημα 3x3 για κάθε κορυφή τριγώνου που προκύπτει και βρίσκονται οι τιμές των παραμέτρων $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ για την γραμμικοποιημένη πλέον συνάρτηση για τις διάφορες τιμές της SoC και Ρεύματος. Στο άρθρο [95] καταλήγουν στην γραμμική κυρτή προσέγγιση του χάρτη γήρανσης με Κανονικοποιημένη Τετραγωνική Ρίζα του Μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE) να ισούται με 1.06% [95].

α_1 (-)	α_2 (1/h)	α_3 (1/h)
-1.608e-04	-9.698e-04	-7.274e-05
-1.373e-04	-7.065e-04	-6.940e-05
-1.998e-04	1.055e-03	-1.169e-03
0.000e+00	1.549e-04	-1.975e-05
0.000e+00	-9.016e-05	1.027e-04
0.000e+00	-9.016e-05	1.027e-04
0.000e+00	1.549e-04	-1.975e-05
-2.083e-4	1.150e-03	-1.265e-03
1.608e-4	-9.698e-04	-7.274e-05
1.373e-4	-7.065e-04	-6.940e-05
1.998e-4	1.055e-03	-1.169e-03
2.083e-4	1.150e-03	-1.265e-03

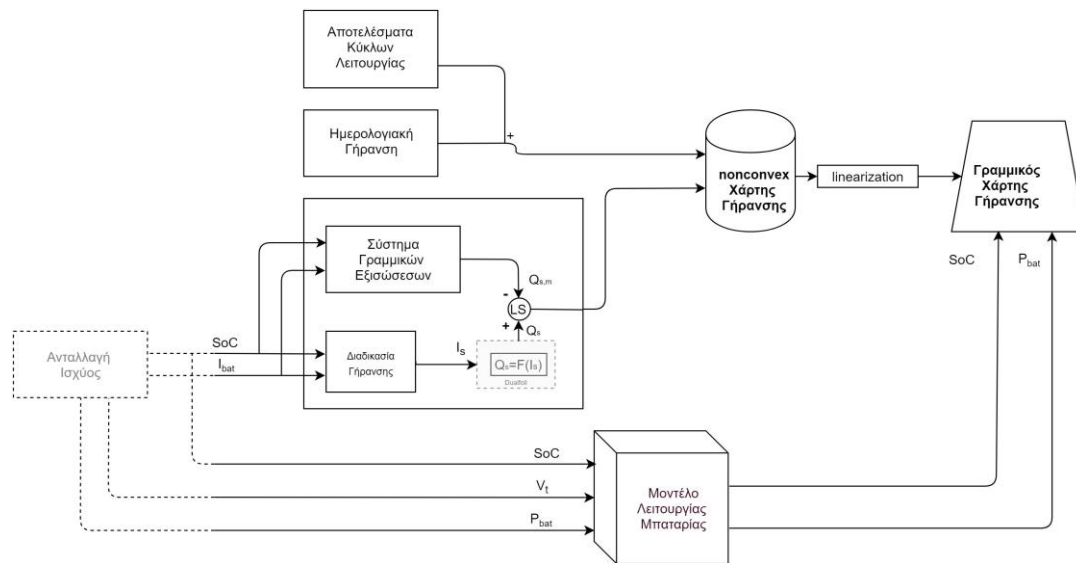
Πίνακας 3.3: Οι τιμές των παραμέτρων του χάρτη γήρανσης [107]



Γράφημα 3.4: Ο χάρτης γήρανσης και η γραμμικοποίησή του [95]

3.4 Κατασκευή Αλγορίθμου για Ελαχιστοποίηση της Γήρανσης

Πλέον έχοντας κατασκευάσει το μοντέλο που μπορεί να περιγράψει τη λειτουργία της μπαταρίας ενώ παραμένει ευαίσθητο στις μεταβολές των μεγεθών που επηρεάζουν την γήρανση (Ενότητα 3.2) σε συνδυασμό με τους χάρτες γήρανσης, είναι δυνατόν να κατασκευαστεί αλγόριθμος τέτοιος ώστε να ρυθμίζει την λειτουργία της μπαταρίας με σκοπό την ελαχιστοποίηση της γήρανσής της.



Σχήμα 3.4: Συνδυασμός Χάρτη Γήρανσης και Μοντέλου λειτουργίας της μπαταρίας

Η μορφή των εξισώσεων είναι συμβατή με αυτή του περιβάλλοντος του γραμμικού προγραμματισμού. Έτσι οι εξισώσεις του προβλήματος ελαχιστοποίησης διαμορφώνονται κατάλληλα:

$$\text{Min:} \quad f(T_h) = T_s \sum_{t=1}^{T_h} aDEG(t) + C_g(t)u_{gen}^{net}(t) \quad (3.32)$$

subj to:

$$x(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c_r}{c_w} & \frac{c_r}{1-c_w} \\ \frac{c_r}{c_w} & -\frac{c_r}{1-c_w} \end{bmatrix} * x(t) - C_{bat}^{-1} \begin{bmatrix} -\eta_{gen}^{-1} & \eta_{load} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{gen}^{bat}(t) \\ u_{load}^{bat}(t) \end{bmatrix}, \quad t \in T_h \quad (3.13)$$

$$(3.33)$$

$$SOC_L \leq x_1(t) + x_2(t) \leq SOC_H, \quad t \in T_h$$

$$x_1(t) \leq c_w, \quad t \in T_h \quad (3.34)$$

$$x_2(t) \leq 1 - c_w, \quad t \in T_h \quad (3.35)$$

$$u_{gen}^{bat}(t) + u_{load}^{bat}(t) + u_{gen}^{net}(t) - P_{load}(t) = 0, \quad t \in T_h \quad (3.36)$$

$$u_{gen}^{net}(t) \leq u_{gen,max}^{net}, \quad t \in T_h \quad (3.37)$$

$$u_{gen}^{bat}(t) \leq P_{batt,r}, \quad t \in T_h \quad (3.38)$$

$$u_{load}^{bat}(t) \leq P_{batt,r}, \quad t \in T_h \quad (3.39)$$

Όπου a , παράγοντας στάθμισης του όρου $\sum DEG$ στην βελτιστοποίηση, που εκτιμάται μετά από πολλές επαναλήψεις της βελτιστοποίησης και παρατήρησης της τιμής του όρου $\sum DEG$ για τις διάφορες τιμές a , C_g το κόστος της Ενέργειας από το δίκτυο, T_h ο χρονικός ορίζοντας της βελτιστοποίησης και T_s οι διακριτές τιμές του χρόνου. Η σχέση (3.13) στον διακριτό χρόνο με χρήση της $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$, γράφεται και:

$$x(t) - x(t-1) = \begin{bmatrix} x_1(t) - x_1(t-1) \\ x_2(t) - x_2(t-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c_r}{c_w} & \frac{c_r}{1-c_w} \\ \frac{c_r}{c_w} & -\frac{c_r}{1-c_w} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} - C_{bat}^{-1} \begin{bmatrix} -\eta_{gen}^{-1} & \eta_{load} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{gen}^{bat}(t) \\ u_{load}^{bat}(t) \end{bmatrix}$$

Διαδοχικά:

$$x_1(t) - x_1(t-1) = -\frac{c_r}{c_w} x_1(t) + \frac{c_r}{1-c_w} x_2(t) + C_{bat}^{-1} \eta_{gen}^{-1} u_{gen}^{bat}(t) - C_{bat}^{-1} \eta_{load} u_{load}^{bat}(t) \quad (3.40)$$

$$x_2(t) - x_2(t-1) = \frac{c_r}{c_w} x_1(t) - \frac{c_r}{1-c_w} x_2(t) \quad (3.41)$$

- Οι σχέσεις (3.40) και (3.41) για $t \in T_h$ αντικαθιστούν την (3.13) στο σύστημα εξισώσεων για την βελτιστοποίηση και στην ουσία περιγράφουν την λειτουργία της μπαταρίας, όπως αυτή διαμορφώθηκε με το αντίστοιχο μοντέλο στην ενότητα (3.2).
- Η σχέση (3.33) αποτελεί τον αριθμητικό a priori περιορισμό της στάθμης φόρτισης.
- Οι σχέσεις (3.34) και (3.35) αποτελούν τον περιορισμό που τίθεται από το μοντέλο Ki.Ba.M. Στην ουσία η (3.34) δεσμεύει την ποσότητα ενέργειας έτοιμης προς μετατροπή σε ηλεκτρική ώστε να είναι μικρότερη ή ίση με την χωρητικότητα του αντίστοιχου "πηγαδιού". Αντίστοιχα η (3.36) για την ενέργεια που είναι δεσμευμένη και δεν μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική άμεσα.
- Η σχέση (3.36) αποτελεί το ισοζύγιο ισχύος στο Σ.Η.Ε που εξετάζεται.

- Η σχέση (3.37) αποτελεί περιορισμό της ισχύος για την προστασία των στοιχείων του Σ.Η.Ε
- Οι σχέσεις (3.38) και (3.39) στην ουσία περιορίζουν την εισερχόμενη και την εξερχόμενη Ισχύ προς και από την μπαταρία σε σχέση με την μέγιστη ονομαστική της τιμή.

3.4 Εκτέλεση Αλγορίθμου για την Ελαχιστοποίηση της Γήρανσης

Στην συνέχεια εκτελείται ο αλγόριθμος με εξισώσεις (3.32) – (3.41) στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, ενώ η διαδικασία της βελτιστοποίησης γίνεται με την χρήση του εργαλείου Yalmip και του επιλυτή Gurobi. Η εκτέλεση έγινε για μπαταρίες διαφορετικών ονομαστικών μεγεθών (C_{bat}, P_{bat}) σε απλοποιημένο Δίκτυο με 1 μόνο ζυγό όπου είναι εγκαταστημένα φορτίο και μονάδες αποθήκευσης αμφότερα. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός, αγνοείται για την απλοποίηση της λύσης,

Case – Μπαταρία	C_{bat}	P_{bat}
1	20	18
2	80	60
3	100	80
4	200	150
5	250	200
6	350	300
7	350	200

Πίνακας 3.4: Παρουσίαση των C_{bat}, P_{bat} των μπαταριών

Όπως φάνηκε και στην Ενότητα 3.3.3 από την σχέση (3.29) η συνάρτηση της γήρανσης είναι ικανή να περιγράψει κάθε μπαταρία, με γραμμική μετατροπή με την χρήση των ονομαστικών της μεγεθών, ανεξαρτήτως εσωτερικής διαμόρφωσης στοιχείων και φιλοσοφίας της μπαταρίας.

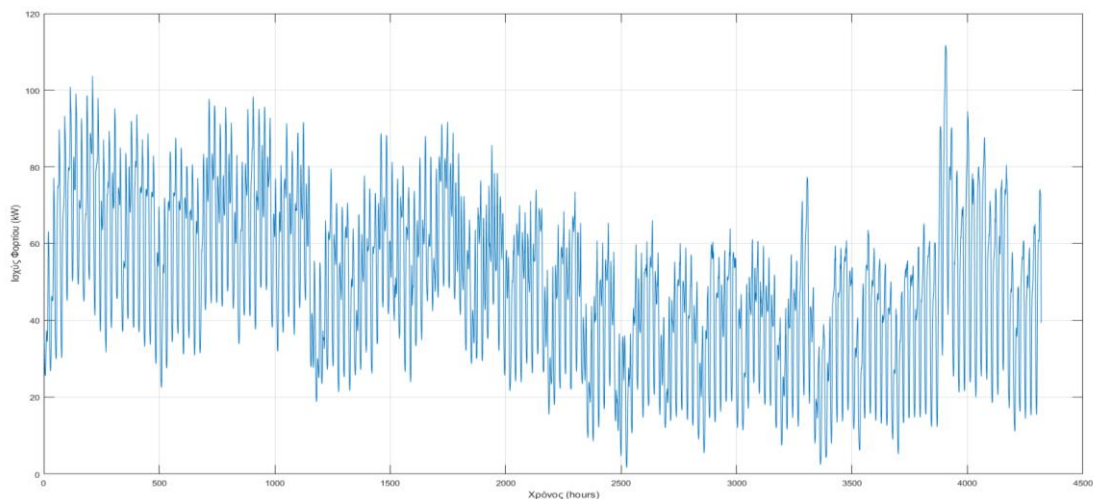
Για την διευκόλυνση της εποπτείας των αποτελεσμάτων οι μπαταρίες θεωρήθηκε ότι έχουν κοινά τα χαρακτηριστικά C_w, C_r [94] ενώ για την απλοποίηση του προβλήματος οι συντελεστές απόδοσης ισχύος κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση θεωρήθηκαν ανεξάρτητοι του χρόνου, ίδιοι σε όλες τις μπαταρίες και ίσοι με η_{load} και η_{gen} αντίστοιχα, ενώ όλες οι μπαταρίες θεωρούνται αρχικά αφόρτιστες, δηλαδή με αρχική φόρτιση ίση με $C_{t=0} = 0$ kWh. Η χωρητικότητα των μπαταριών σε ενέργεια εκφράζεται σε kWh για την ονομαστική τους τάση:

Παράμετρος	Τιμή
C_w	0.93
C_r	$2.24e-5$
η_{load}	0.98
η_{gen}	0.97
$C_{t=0}$	0 (kWh)

Πίνακας 3.5: Η τιμές των παραμέτρων για το σύνολο των περιπτώσεων

Ο χρονικός ορίζοντας που επιλέχθηκε είναι $T_h=180$ ημέρες, ενώ η διακριτή τιμή του χρόνου είναι $T_s = 1$ hour. Για φορτίο χρησιμοποιήθηκε πραγματική καμπύλη ισχύος φορτίου [109] ενώ τα στοιχεία του κόστους ενέργειας είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο [110].

Αρχικά παρουσιάζεται η συμπεριφορά των μπαταριών χωρίς κανένα περιορισμό και με απλοϊκή μοντελοποίηση ως κοινού μέσου αποθήκευσης στο δίκτυο. Στην συνέχεια γίνεται χρήση της μπαταρίας με περιορισμό της στάθμης φόρτισης. Εν τέλει πραγματοποιείται εφαρμογή του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης της γήρανσης και στην συνέχεια ακολουθεί μια μελέτη ευαισθησίας.



Γράφημα 3.5: Η ισχύς του φορτίου στο Σ.Η.Ε

3.4.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων για λειτουργία χωρίς την χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης

Αρχικά, το Σ.Η.Ε λειτουργεί με μόνο περιορισμό την ελαχιστοποίηση του κόστους της παρεχόμενης ενέργειας, χρησιμοποιώντας τις μπαταρίες για την παροχή ηλεκτρικής ισχύος όποτε αυτό κρίνεται συμφέρον. Τα αποτελέσματα λειτουργίας φαίνονται παρακάτω:

Λειτουργία χωρίς περιορισμούς SoC:

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα για την λειτουργία του ζυγού με εγκατεστημένη διαφορετική μπαταρία σε κάθε περίπτωση. Στον πίνακα (3.6) παρουσιάζονται 7 Cases με τα αποτελέσματα σχετικά με την Γήρανση, το κριτήριο EoL και τους κύκλους λειτουργίας χωρίς να γίνεται διάκριση εάν πρόκειται για πλήρεις ή μερικούς κύκλους.

Ενώ ο αλγόριθμος εκτελείται για 180 ημέρες, το φαινόμενο της γήρανσης θεωρείται ότι εξελίσσεται γραμμικά για το υπόλοιπο διάστημα λειτουργίας, έχοντας ως αναφορά την γήρανση των 180 πρώτων ημερών [94]. Έτσι για το κριτήριο του End of Life υπολογίζεται η γήρανση των 180 πρώτων ημερών και στην συνέχεια ανάγεται στον 1 χρόνο. Στην συνέχεια υπολογίζεται ο χρόνος που κατά το πέρας του η μπαταρία θα έχει υποστεί γήρανση ίση με αυτή που υποδεικνύει το κριτήριο End of Life. Στην παρούσα μελέτη γίνεται αξιολόγηση του EoL_{0.2} και EoL_{0.5}. Χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση

$$Lifetime(EoL_x) = \frac{x}{\text{Γήρανση 1ος Έτους}}$$

Όπου x , η απώλεια χωρητικότητας κατά το πέρας του αναμενόμενου χρόνου ζωής ως ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας (%), Γήρανση 1ος Έτους επίσης σε ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας (%). Για παράδειγμα με EoL_{0.2} και γήρανση ενός έτους ίση με 9% της ονομαστικής χωρητικότητας:

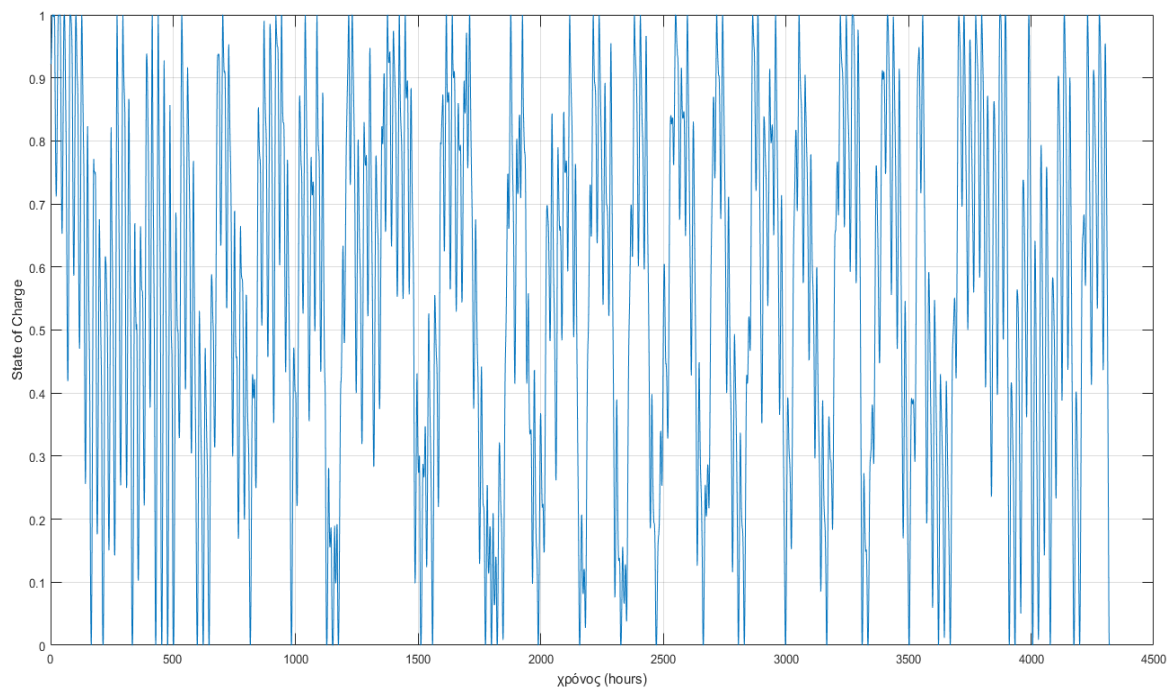
$$Lifetime(EoL_x) = \frac{0.20}{0.09} = 2.22 \text{ Έτη}$$

Όπου $Lifetime(EoL_x) = 2.22$ σημαίνει πως σε 2 Έτη και 82 ημέρες η μπαταρία θα έχει χάσει το 20% της ονομαστικής της χωρητικότητας

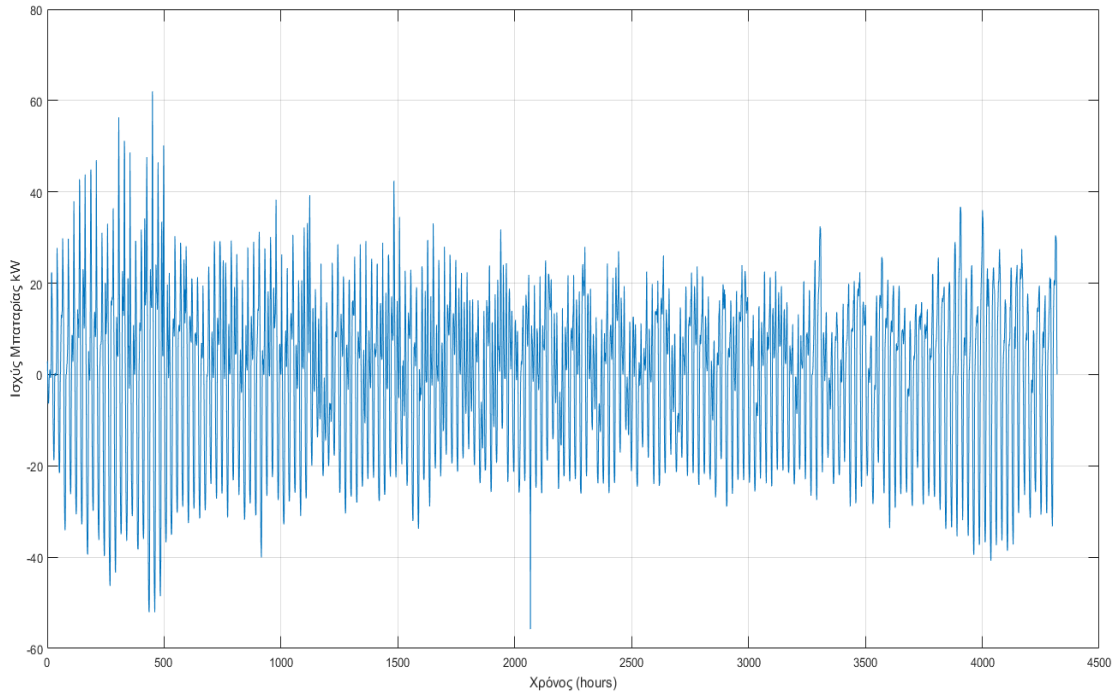
Case No.	Συνολική Γήρανση (kWh)	Συνολική Γήρανση (%)	Διάρκεια Ζωής EoL _{0.2}	Διάρκεια Ζωής EoL _{0.5}	Μέση Γήρανση (kWh/h)	Κύκλοι Λειτουργίας
1	2.3643	11.82	308 ημ.	2 χρ. 41 ημ.	7.50E-04	713
2	9.2595	11.57	315 ημ.	2 χρ. 58 ημ.	0.0017	604
3	10.54315	10.54	346 ημ.	2 χρ. 135 ημ.	2.44E-03	553
4	19.76374	9.88	1 χρ. 4 ημ.	2 χρ. 193 ημ.	4.57E-03	477
5	24.60643	9.84	1 χρ. 5 ημ.	2 χρ. 197 ημ.	5.70E-03	471
6	34.37454	9.82	1 χρ. 6 ημ.	2 χρ. 199 ημ.	0.007957	458
7	34.37454	9.82	1 χρ. 6 ημ.	2 χρ. 199 ημ.	0.007957	458

Πίνακας 3.6: Τα αποτελέσματα της λειτουργίας χωρίς περιορισμό SoC

Στην συνέχεια παρουσιάζονται γραφήματα για την λειτουργία της περίπτωσης 7 για 180 ημερολογιακές ημέρες:

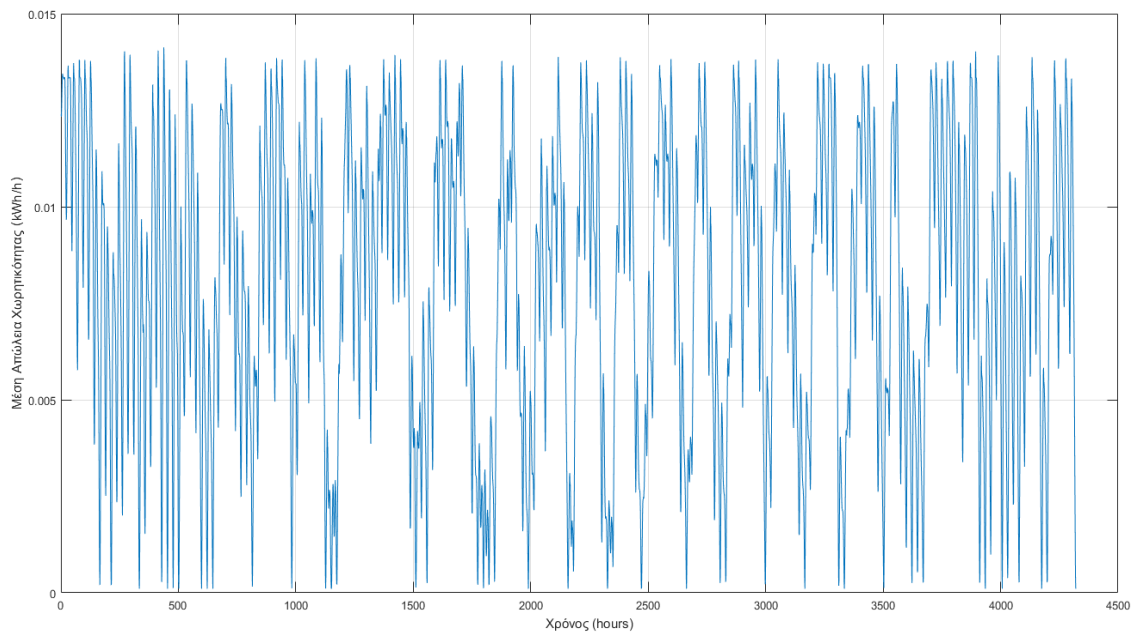


Γράφημα 3.5: Η Στάθμη Φόρτισης της Μπαταρίας No.7 για το σύνολο της λειτουργίας της



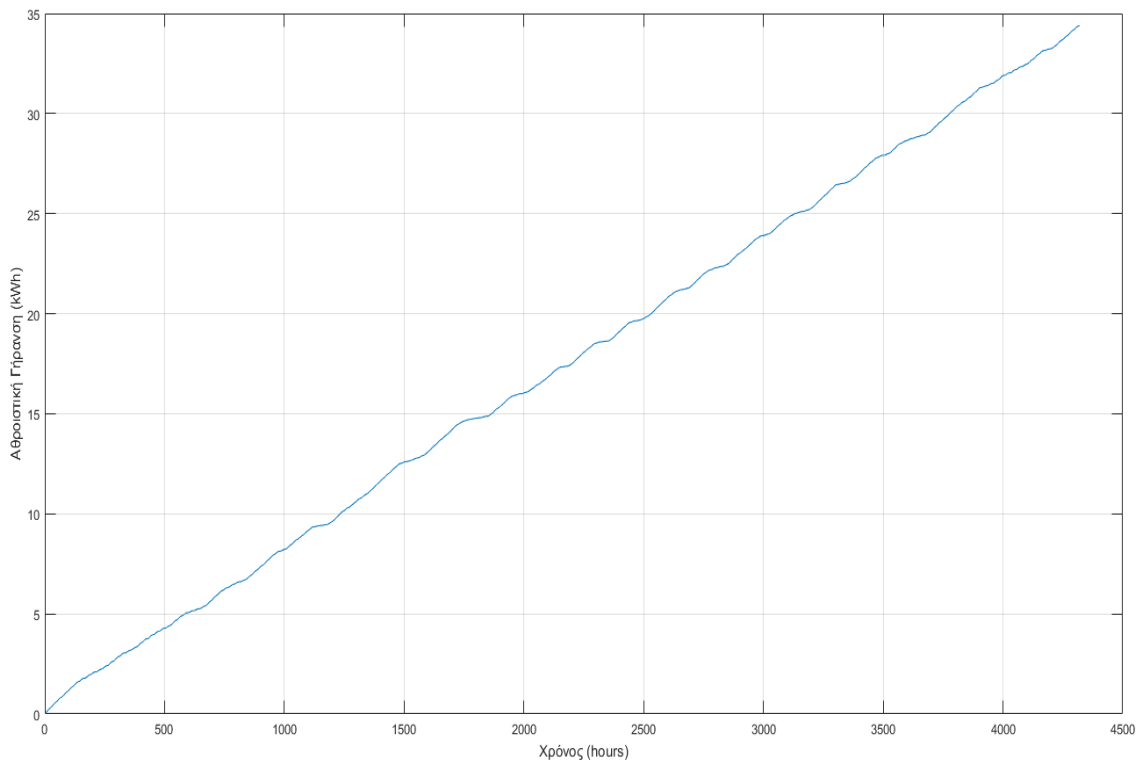
Γράφημα 3.6: Η ισχύς της μπαταρίας No.7 ως προς το Σ.Η.Ε 7 για το σύνολο της λειτουργίας της

Στα γραφήματα 3.5 και 3.6 παρατηρείται ότι η μπαταρία λειτουργεί συχνά σε ακραίες στάθμες φόρτισης και μέγιστη ονομαστική ισχύ. Αυτό συμβαίνει λόγω των αναγκών του δικτύου.



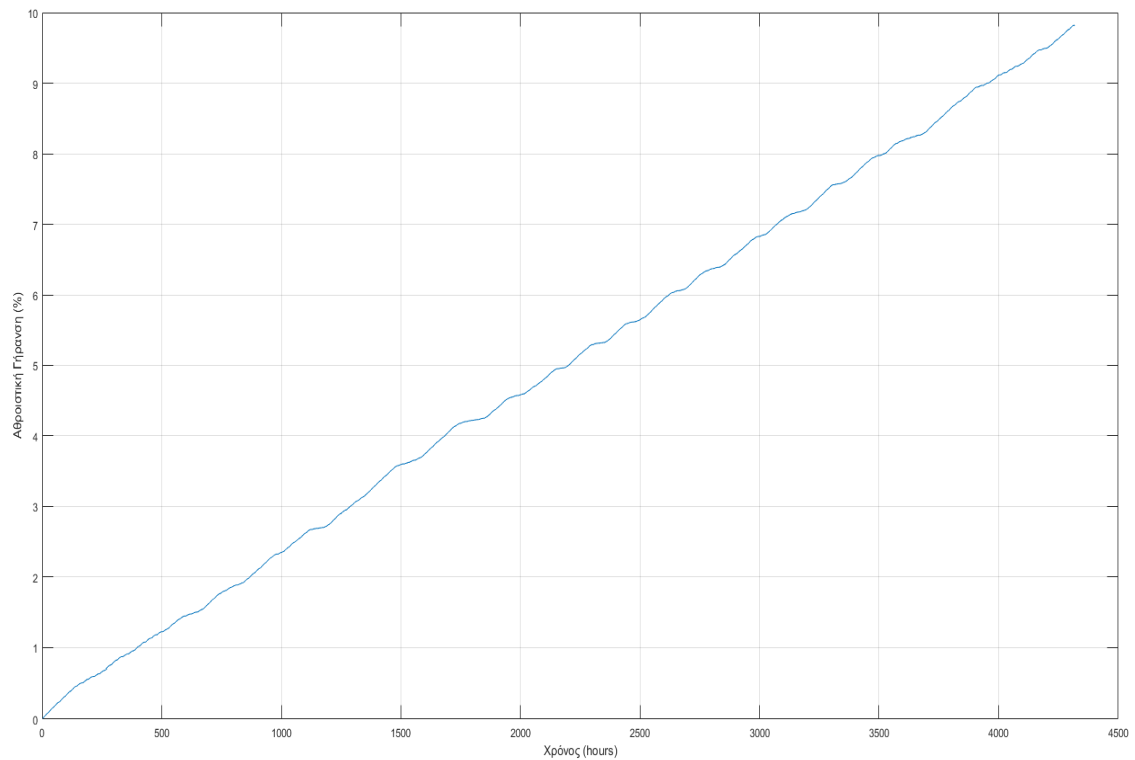
Γράφημα 3.8: Η μέση απώλεια χωρητικότητας για κάθε ώρα λειτουργίας της μπαταρίας No.7

Η μοντελοποίηση της γήρανσης μέσω του χάρτη γήρανσης και της εξαγόμενης συνάρτησης επιτρέπει την αντιστοίχιση των χειρισμών με την γήρανση της μπαταρίας εκφρασμένη ως απώλεια χωρητικότητας. Στο γράφημα 3.8 βλέπουμε την τιμή της μέσης απώλειας χωρητικότητας για κάθε ώρα.



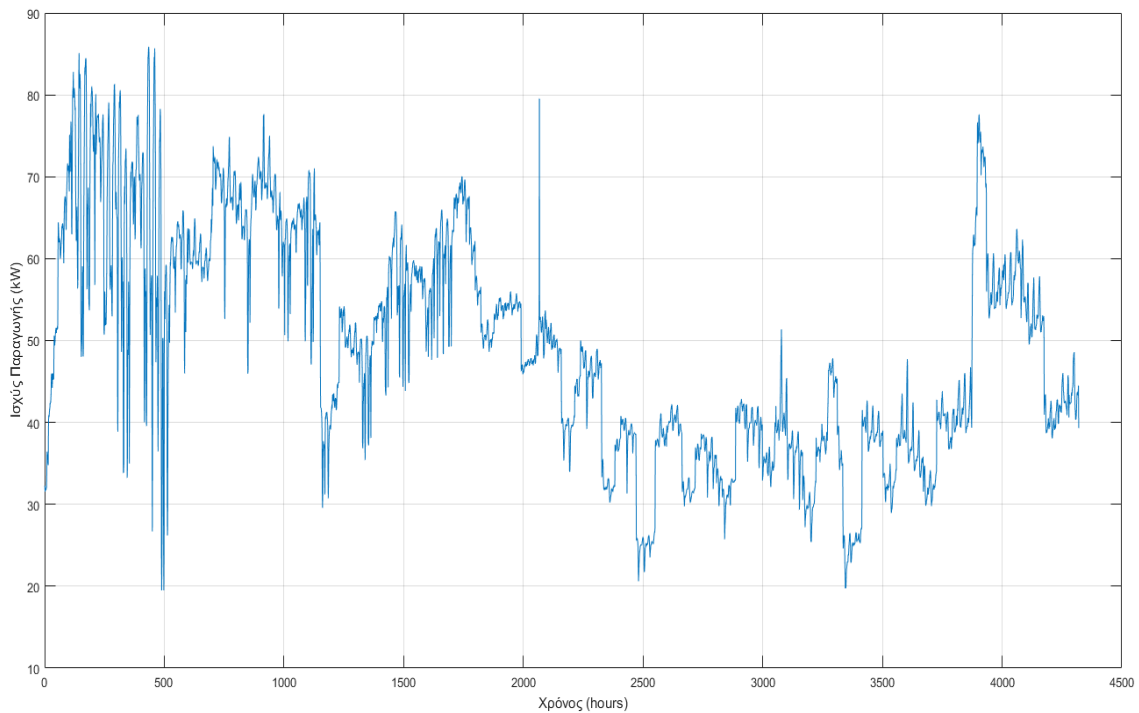
Γράφημα 3.9: Η αθροιστική απώλεια χωρητικότητας για κάθε ώρα λειτουργίας της μπαταρίας No.7

Στο Γράφημα 3.9 παρουσιάζεται αθροιστικά η γήρανση που προκαλείται στην μπαταρία για κάθε ώρα λειτουργίας της. Η συνολική γήρανση της μπαταρίας για τις 180 μέρες συναντάται στην τιμή της γραφικής για την τελευταία ώρα λειτουργίας της μπαταρίας (Χρόνος = 4250hours). Παρακάτω φαίνεται το ίδιο γράφημα, με την απώλεια χωρητικότητας της μπαταρίας εκφρασμένη ως ποσοστό της ονομαστικής της χωρητικότητας.

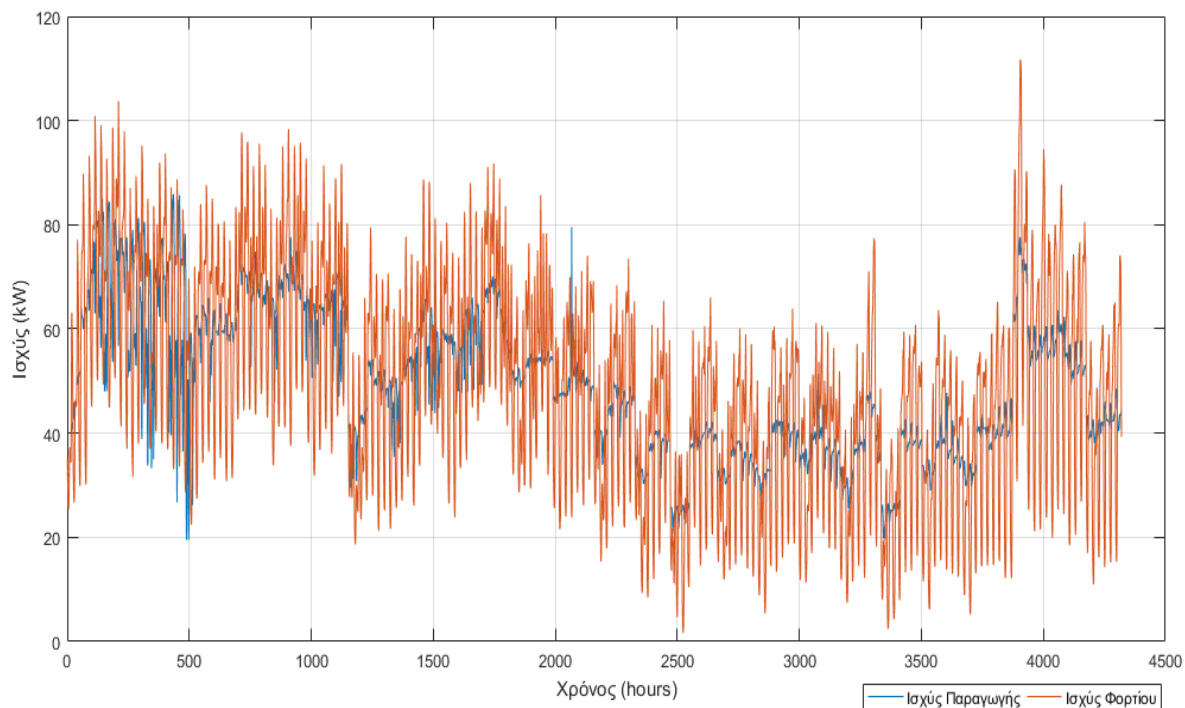


Γράφημα 3.10: Η αθροιστική απώλεια χωρητικότητας (%) για κάθε ώρα λειτουργίας της μπαταρίας No.7

Στο γράφημα 3.10 φαίνεται η τιμή της απώλειας χωρητικότητας για την μπαταρία 7 αθροιστικά για κάθε ώρα, κανονικοποιημένη από την ονομαστική της χωρητικότητα. Η τελευταία τιμή του γραφήματος αποτελεί και την συνολική απώλεια χωρητικότητας για την λειτουργία της μπαταρίας.

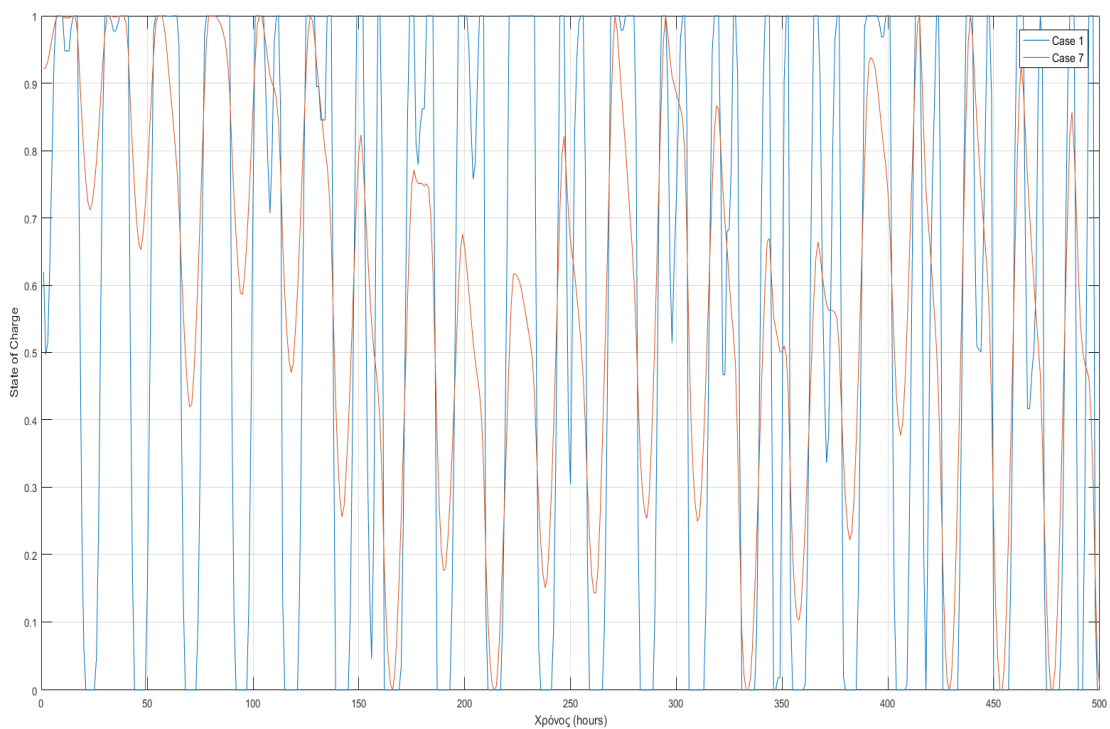


Γράφημα 3.11: Η Ισχύς της παραγωγής για το Case 7

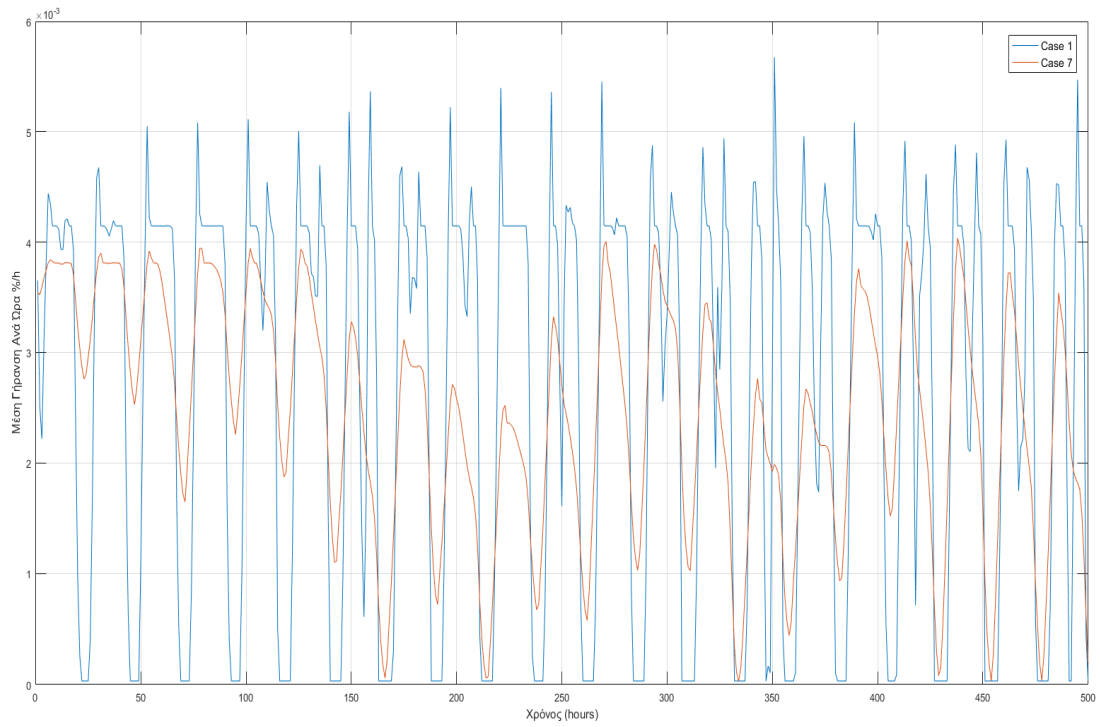


Γράφημα 3.12: Η ισχύς φορτίου και παραγωγής για το Case 7

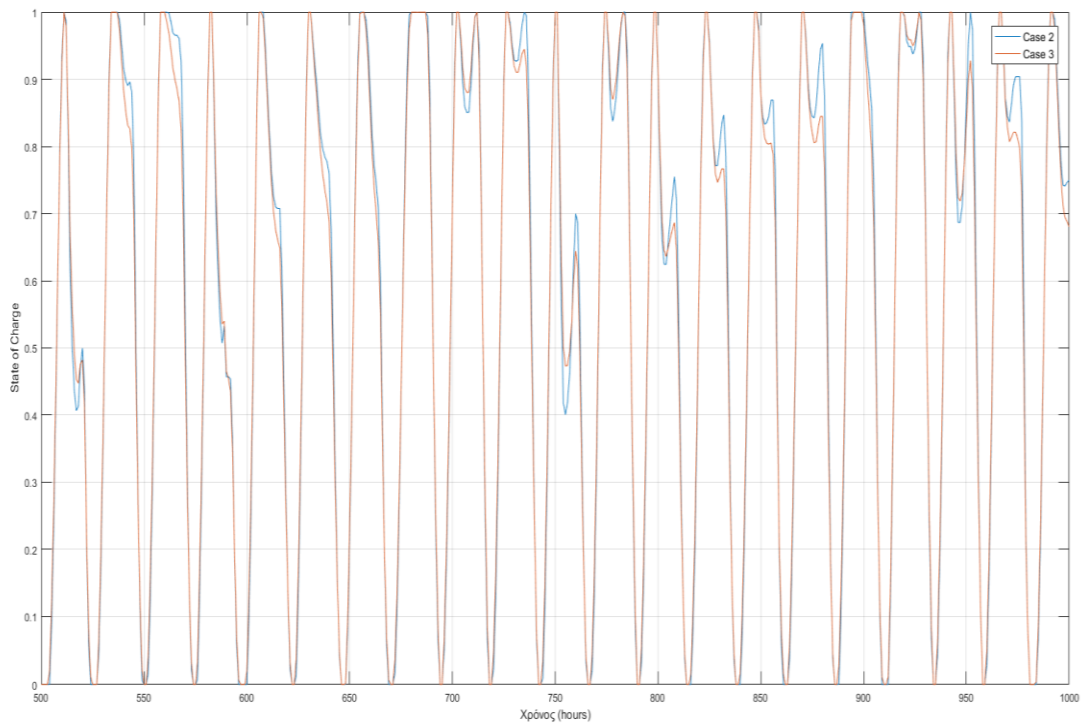
Στα γραφήματα 3.11 και 3.12 φαίνεται η ισχύς της μονάδας παραγωγής και η ισχύς του φορτίου με εγκατεστημένη την μπαταρία 7. Η επιπρόσθετη ισχύς όπου αυτή συναντάται, αποδίδεται από και προς την μπαταρία.



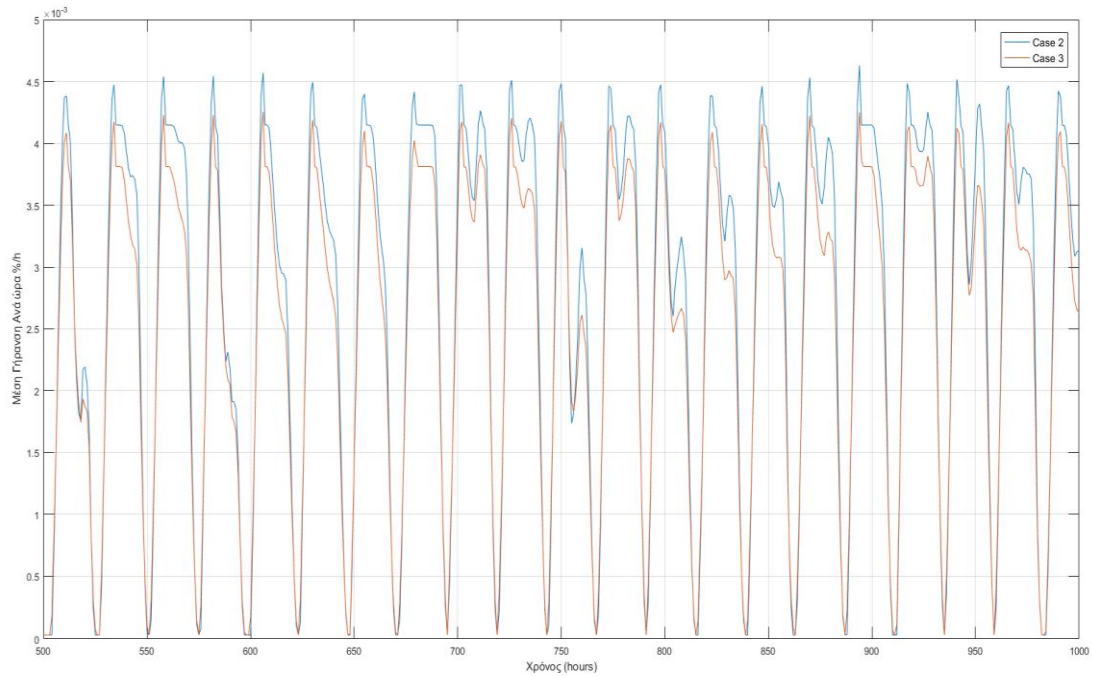
Γράφημα 3.13: Η Στάθμη φόρτισης για τις περιπτώσεις 1 και 7 , τις πρώτες 500 ώρες λειτουργίας



Γράφημα 3.14: Η μέση γήρανση ανά ώρα για τις περιπτώσεις 1 και 7, τις πρώτες 500 ώρες λειτουργίας

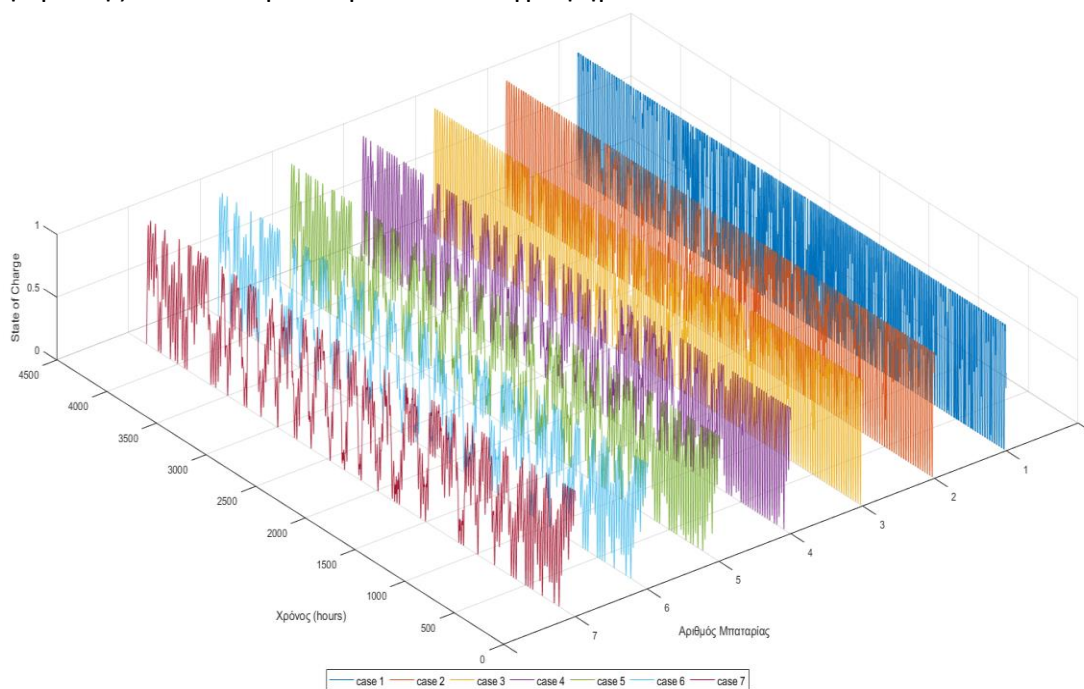


Γράφημα 3.15: Η Στάθμη φόρτισης για τις περιπτώσεις 2 και 3, κατά τις 500-1000 πρώτες ώρες λειτουργίας



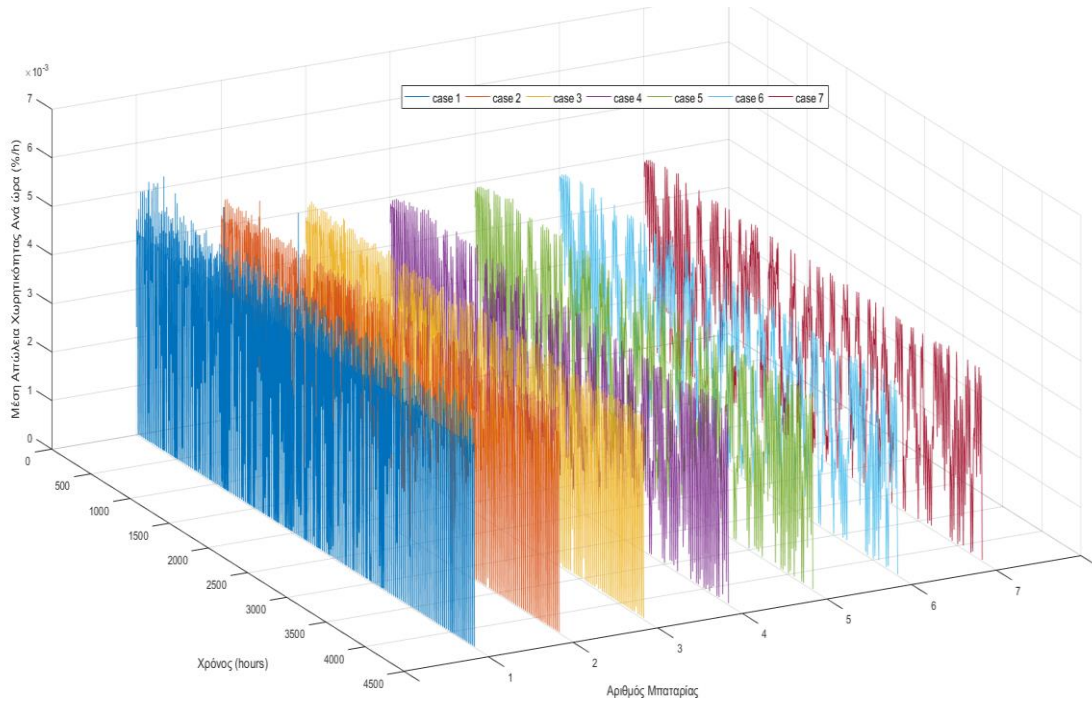
Γράφημα 3.16: Η μέση απώλεια χωρητικότητας για τις περιπτώσεις 2 και 3 , κατά τις 500-1000 πρώτες ώρες λειτουργίας

Στα γραφήματα 3.13 - 3.16 φαίνονται η στάθμη φόρτισης και η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα για διαφορετικές μπαταρίες. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι μπαταρίες με μικρότερα ονομαστικά μεγέθη καταπονούνται περισσότερο, λειτουργώντας σε μεγαλύτερες στάθμες φόρτισης, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη απώλεια χωρητικότητας. Παρακάτω παρουσιάζονται η γήρανση και η στάθμη φόρτισης όλων των μπαταριών σε ένα γράφημα:

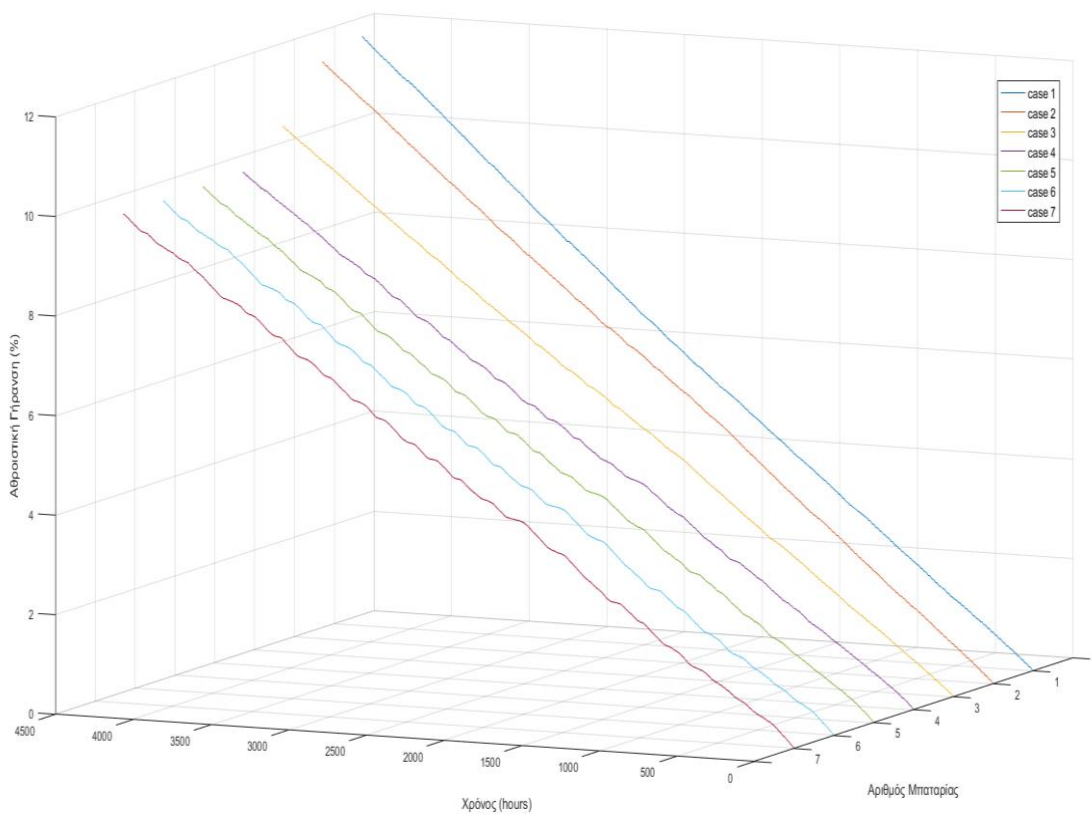


Γράφημα 3.17 : Η στάθμη φόρτισης για τις 7 μπαταρίες

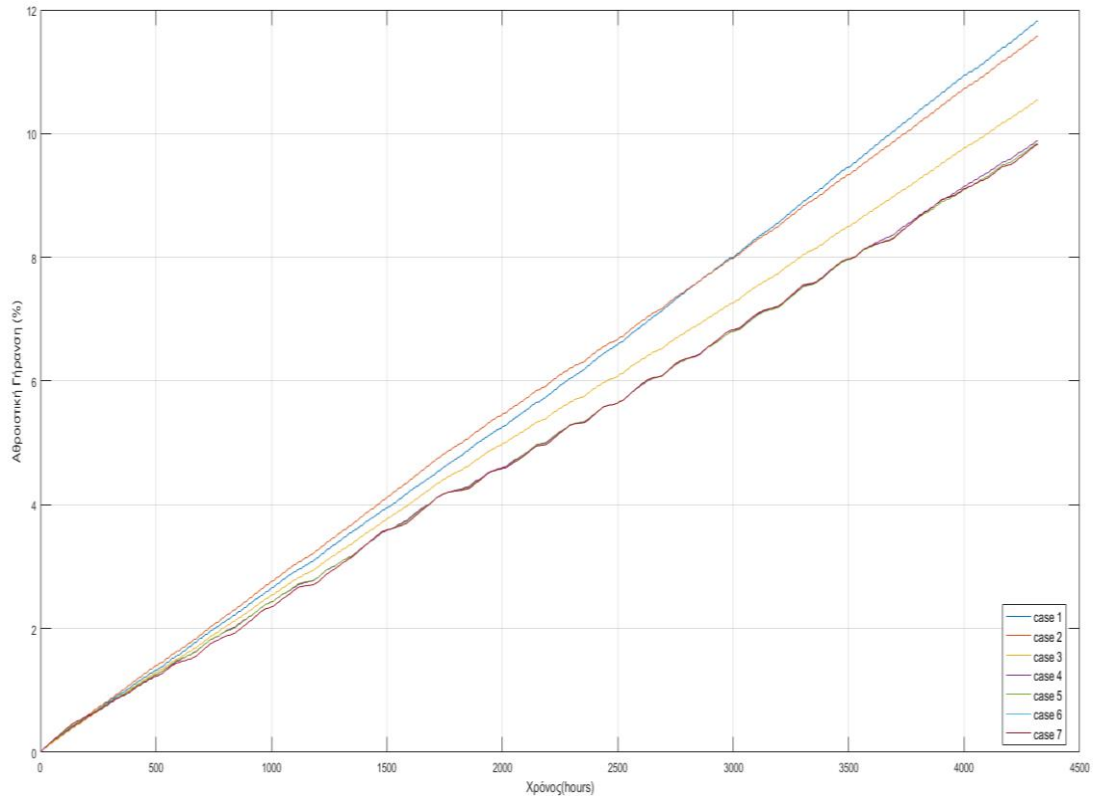
Στο γράφημα 3.17 φαίνεται η στάθμη φόρτισης όλων των μπαταριών. Είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας, η στάθμη φόρτισής της μεταβάλλεται (μειώνεται) σε πολλές περιπτώσεις. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη.



Γράφημα 3.18 : Η Μέση Απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα για τις 7 μπαταρίες



Γράφημα 3.19α : Η Ποσοστιαία Αθροιστική Γήρανση για τις 7 μπαταρίες



Γράφημα 3.19β : Η Ποσοστιαία Αθροιστική Γήρανση για τις 7 μπαταρίες

Επιβεβαιώνεται στο 3.18, παραπάνω για όλες τις μπαταρίες που χρησιμοποιήθηκαν, ότι η συνολική γήρανση που προκαλείται στην μπαταρία, αυξάνεται όσο μειώνονται τα ονομαστικά μεγέθη της μπαταρίας. Στα γραφήματα 3.19α και 3.19β φαίνεται η γήρανση των 7 μπαταριών, αθροιστικά για κάθε ώρα λειτουργίας τους. Η μεγαλύτερες σε χωρητικότητα μπαταρίες φαίνεται να καταπονούνται λιγότερο. Ωστόσο, η διαφορά στην γήρανση, ποσοτικά, δεν είναι δραματική. Στην συνάρτηση γήρανσης (Σχέση 3.31) ο πρώτος όρος αφορά την ισχύ της μπαταρίας. Είναι κατανοητό πως μπαταρίες με μικρότερη ικανότητα ισχύος θα δέχονται μειωμένη γήρανση εξαιτίας της. Επίσης μπαταρίες με διαφορετική μέγιστη ονομαστική ισχύ που υπερβαίνουν σε ικανότητα ισχύος τις ανάγκες του δικτύου, θα παρουσιάζουν ίδια τιμή γήρανσης εξαιτίας του συγκεκριμένου όρου, αφού ουσιαστικά η ανταλλαγή ισχύος θα είναι η ίδια. Για τον δεύτερο όρο της 3.31, παρατηρούμε πως το ποσό της γήρανσης που προκαλείται από αυτόν είναι κανονικοποιημένο και εξαρτάται επί της ουσίας από την στάθμη φόρτισης της μπαταρίας. Έτσι είναι λογικό μια μπαταρία που χρησιμοποιείται με βαθιές εκφορτίσεις και υψηλές εκφορτίσεις να παρουσιάζει αυξημένη γήρανση. Σε ό,τι αφορά τον τρίτο όρο της 3.31, η ονομαστική χωρητικότητα, αν παρατηρήσει κανείς και τον πίνακα 3.3 λόγω του α_3 δεν συνεισφέρει δραματικά στην απώλεια χωρητικότητας λόγω της γήρανσης.

Έτσι οι μπαταρίες 1 και 2 ενώ δεν ανταλλάσσουν μεγάλα ποσά ισχύος, λειτουργούν συνεχώς σε ακραίες τιμές στάθμες φόρτισης με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν υψηλή απώλεια χωρητικότητας. Η μπαταρία, με λίγο μεγαλύτερη

ονομαστική χωρητικότητα από τις πρώτες δύο, παρουσιάζει μειωμένη απώλεια, ενώ οι 4,5,6 και 7, με κατά πολύ μεγαλύτερες χωρητικότητες μπορεί να μην λειτουργούν σε υψηλές στάθμες φόρτισης, αλλά οι τιμές ισχύος φόρτισης κι εκφόρτισης είναι κατά πολύ υψηλότερες. Έτσι η απώλεια χωρητικότητάς τους, μετριάζεται, αλλά η βελτιώσή της (8% απώλεια χωρητικότητας) δεν αποτελεί αποδοτική μεταβολή.

Λειτουργία με περιορισμό SoC:

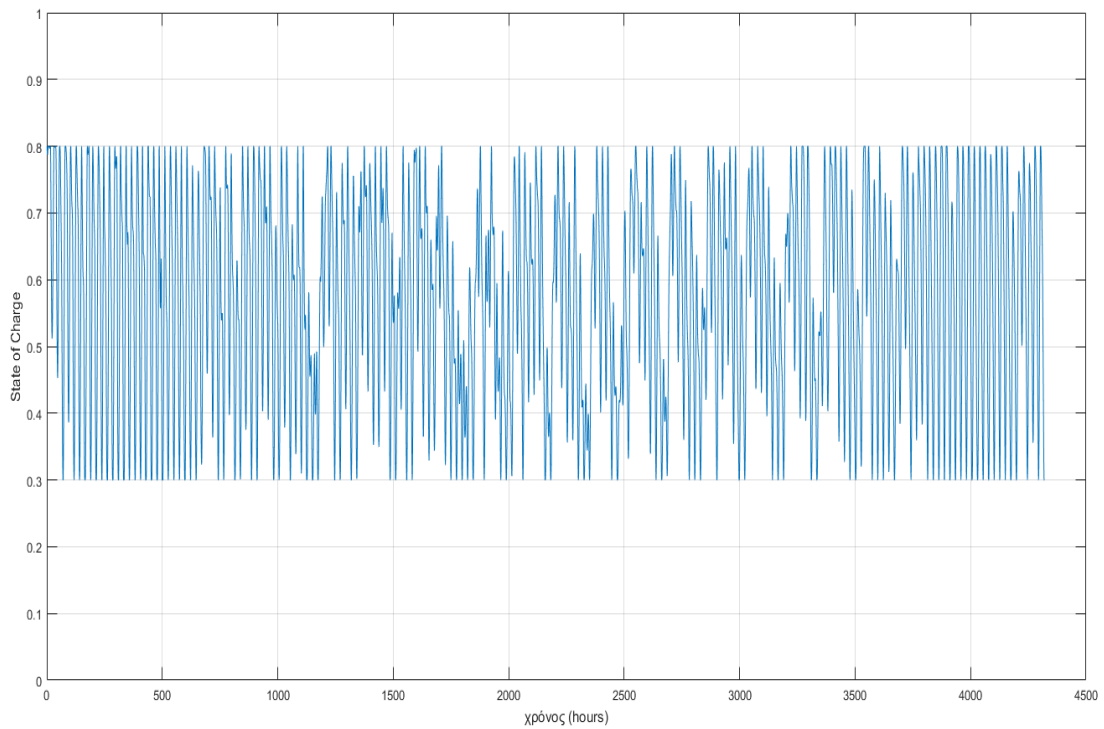
Στην συνέχεια γίνεται χρήση περιορισμού της SoC. Με τον σταθερό περιορισμό της στάθμης φόρτισης όπως δείχνει και η (3.31) μπορούμε να επιτύχουμε μείωση της φθοράς της μπαταρίας, ενώ περιορίζεται και η ανταλασσόμενη ισχύς. Κάτι τέτοιο φαίνεται να λειτουργεί με εμφανή αποτελέσματα κατά τους συνεχείς σταθερούς κύκλους λειτουργίας της μπαταρίας. Όμως σε ένα σύστημα με χρονομεταβλητό κόστος παρεχόμενης ισχύος από το δίκτυο, η επιρροή της SoC δεν είναι δραματική. Αυτό συμβαίνει επειδή οι χειρισμοί του δικτύου απαιτούν την ελαχιστοποίηση του κόστους της παρεχόμενης από τον ζυγό παραγωγής ισχύος. Έτσι η στρατηγική του περιορισμού της SoC δεν μπορεί να φέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα σε κάθε Σ.Η.Ε. Τα αποτελέσματα λειτουργίας, με περιορισμό της SoC (3.43) φαίνονται παρακάτω:

$$0.3 \leq SOC \leq 0.8 \quad (3.42)$$

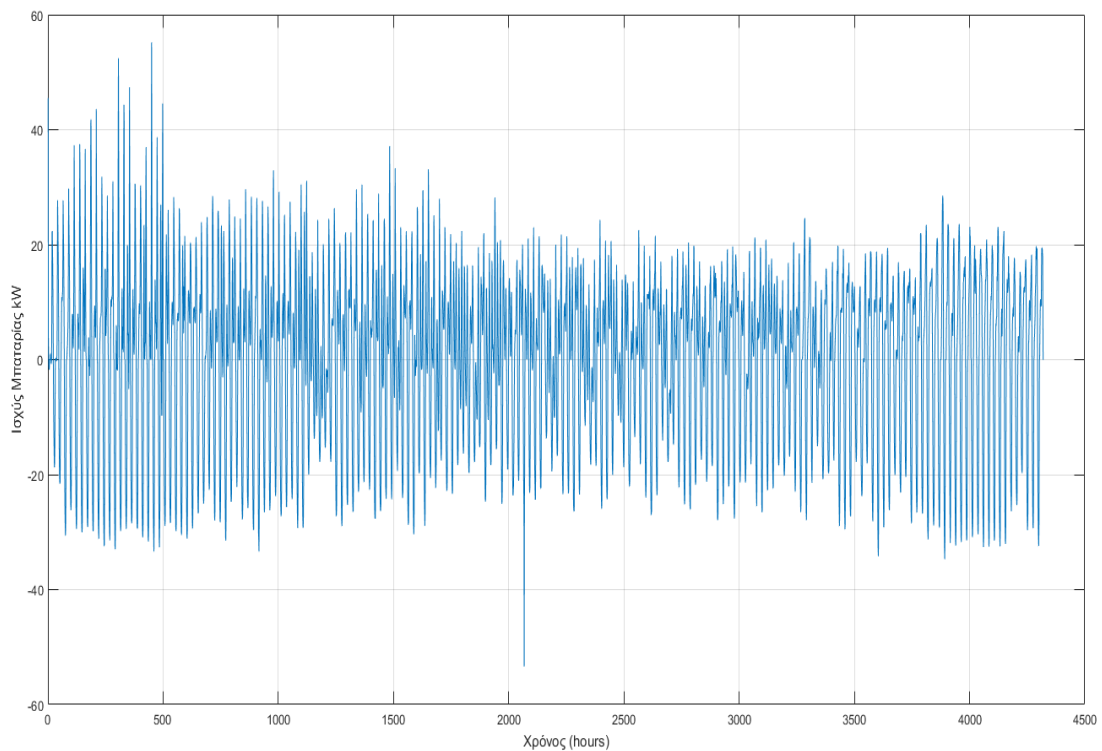
Case No.	Συνολική Γήρανση (kWh)	Συνολική Γήρανση (%)	Διάρκεια Ζωής EoLo ₂	Διάρκεια Ζωής EoLo ₅	Μέση Γήρανση (kWh/h)	Κύκλοι Λειτουργίας
1	2.237	11.18	326 ημέρες	2 χρόνια 85 ημ.	5.18E-04	624
2	9.1011	11.37	320 ημέρες	2 χρόνια 72 ημ.	2.10E-03	472
3	9.6645	9.66	1 χρόνος 12 ημ.	2 χρόνια 214 ημ.	0.0022	436
4	18.8279	9.41	1 χρόνος 22 ημ.	2 χρόνια 239 ημ.	0.0044	328
5	23.2209	9.28	1 χρόνος 27 ημ.	2 χρόνια 252 ημ.	0.0054	313
6	31.9846	9.13	1 χρόνος 34 ημ.	2 χρόνια 268 ημ.	0.0074	307
7	31.9846	9.13	1 χρόνος 34 ημ.	2 χρόνια 268 ημ.	0.0074	307

Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα λειτουργίας με περιορισμό SoC

Στην συνέχεια παρουσιάζονται γραφήματα για την λειτουργία της περίπτωσης 7 για 180 ημερολογιακές ημέρες:

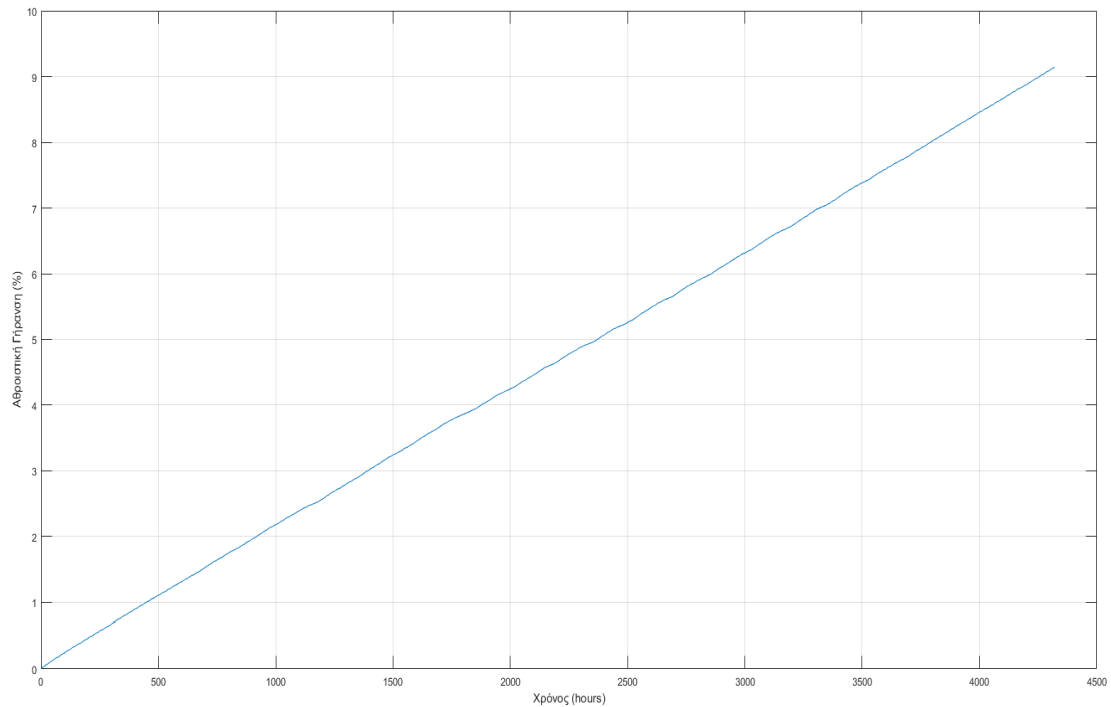


Γράφημα 3.20: Η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας για την περίπτωση 7, με περιορισμό SOC



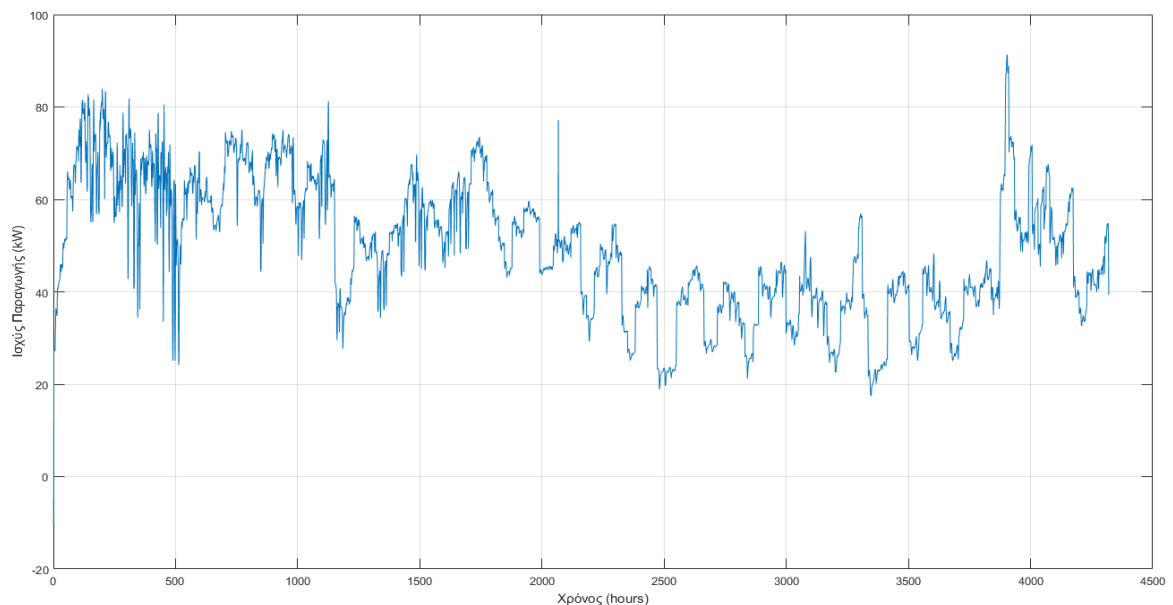
Γράφημα 3.21: Η ισχύς της μπαταρίας για την περίπτωση 7, με περιορισμό SOC

Τα γραφήματα 3.20 και 3.21 δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες ποιοτικές διαφοροποιήσεις από αυτά της περίπτωσης χωρίς την χρήση περιορισμού SOC. Εμφανής είναι ο περιορισμός (shave) της στάθμης φόρτισης και της ισχύος της μπαταρίας λόγω του αριθμητικού περιορισμού της πρώτης που επιβάλλεται από τον αλγόριθμο ελέγχου.

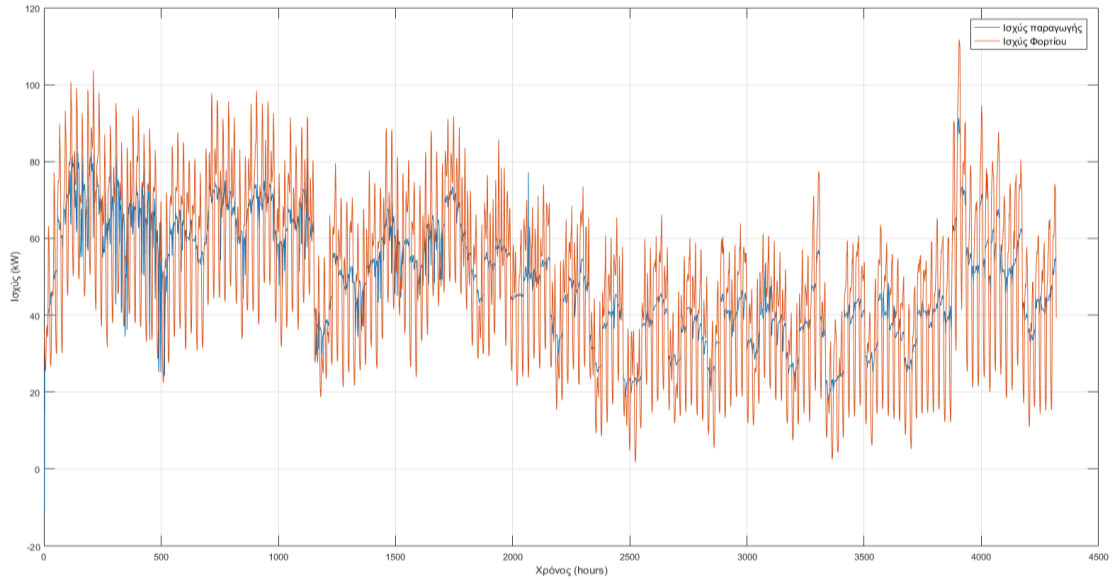


Γράφημα 3.22: Η ποσοστιαία αθροιστική γήρανση της μπαταρίας για την περίπτωση 7, με περιορισμό SOC

Στο γράφημα 3.22 Η αθροιστική γήρανση της μπαταρίας 7, εμφανίζεται μικρότερη συνολικά από την αντίστοιχη χωρίς τον περιορισμό της SOC. Ωστόσο η διαφορά

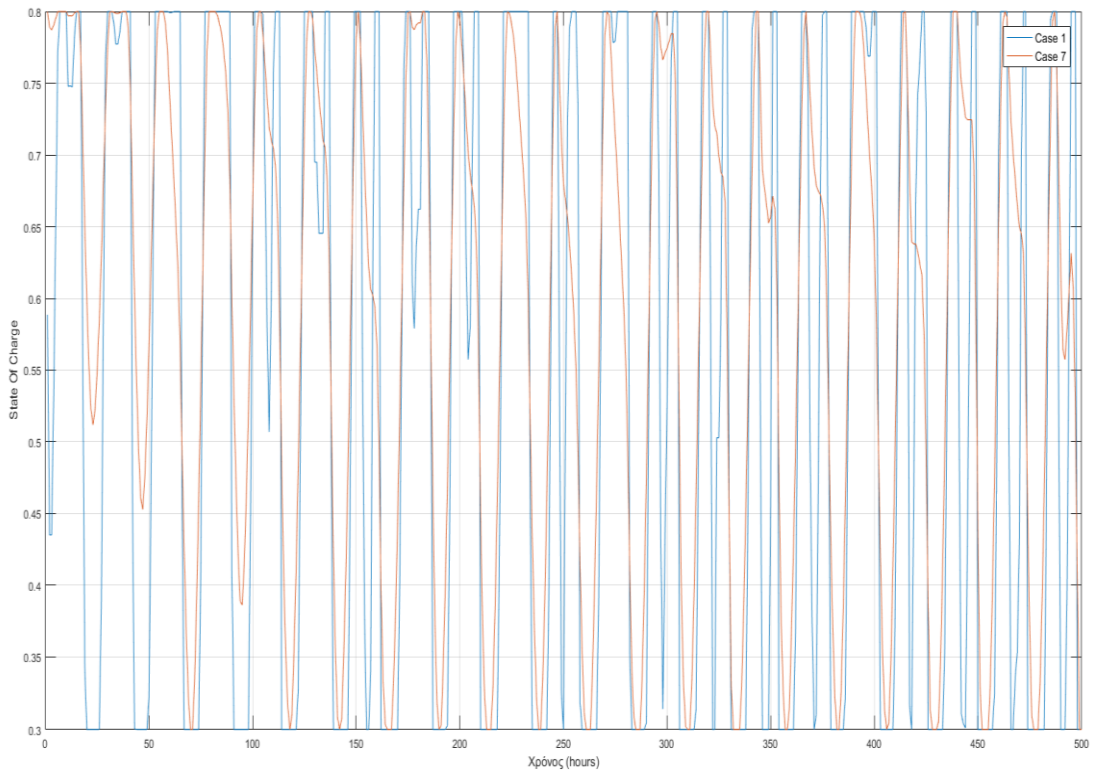


Γράφημα 3.23: Η ισχύς παραγωγής του δικτύου για την περίπτωση 7, με περιορισμό SOC

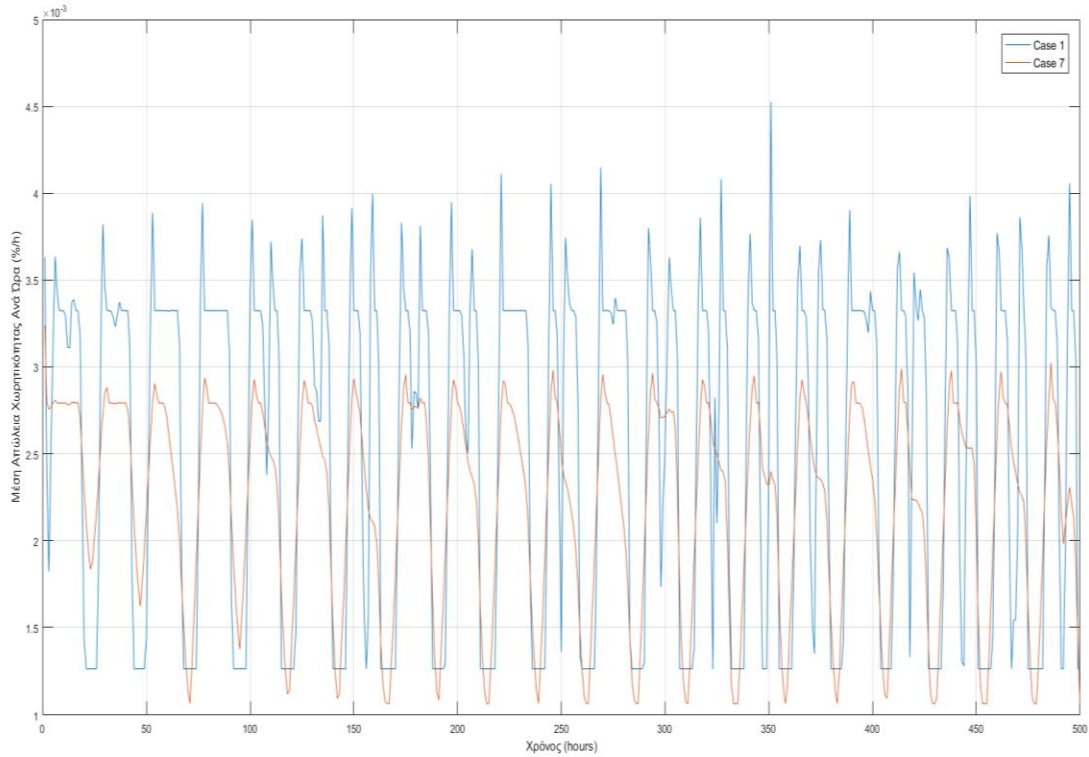


Γράφημα 3.24: Η ισχύς παραγωγής του δικτύου και η ισχύς του φορτίου για την περίπτωση 7, με περιορισμό SOC

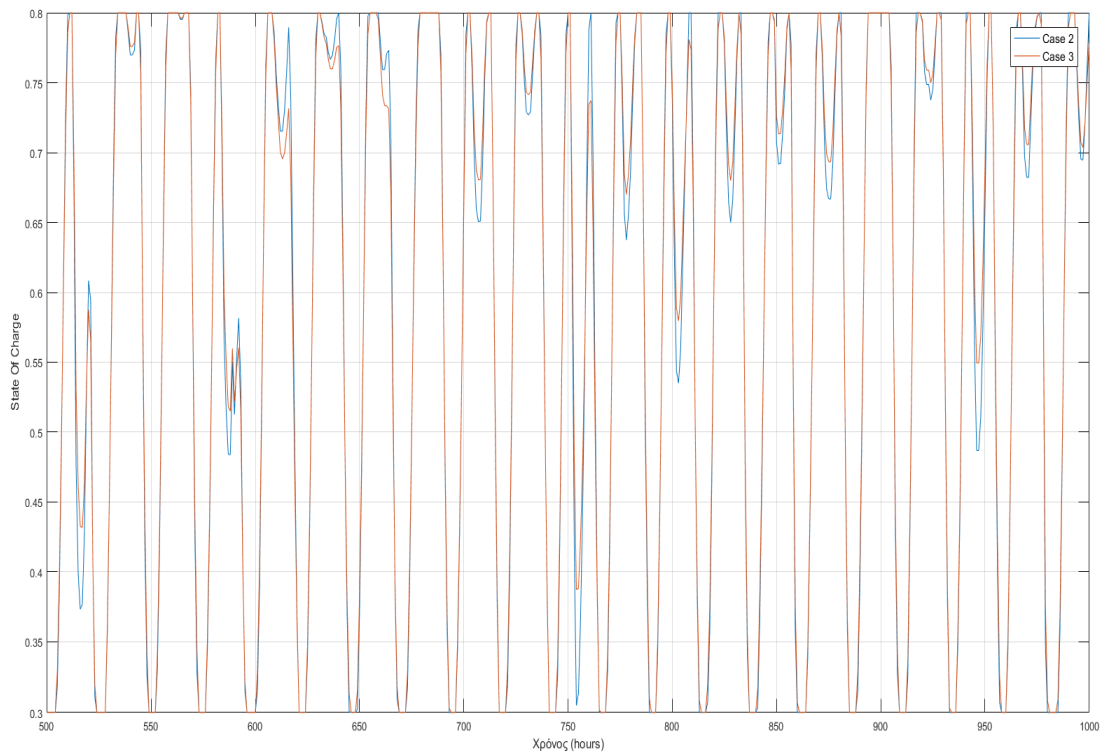
Η παραγωγή του δικτύου όπως διαμορφώνεται με την λειτουργία της μπαταρίας 7, φαίνεται στα γραφήματα 3.23 και 3.24.



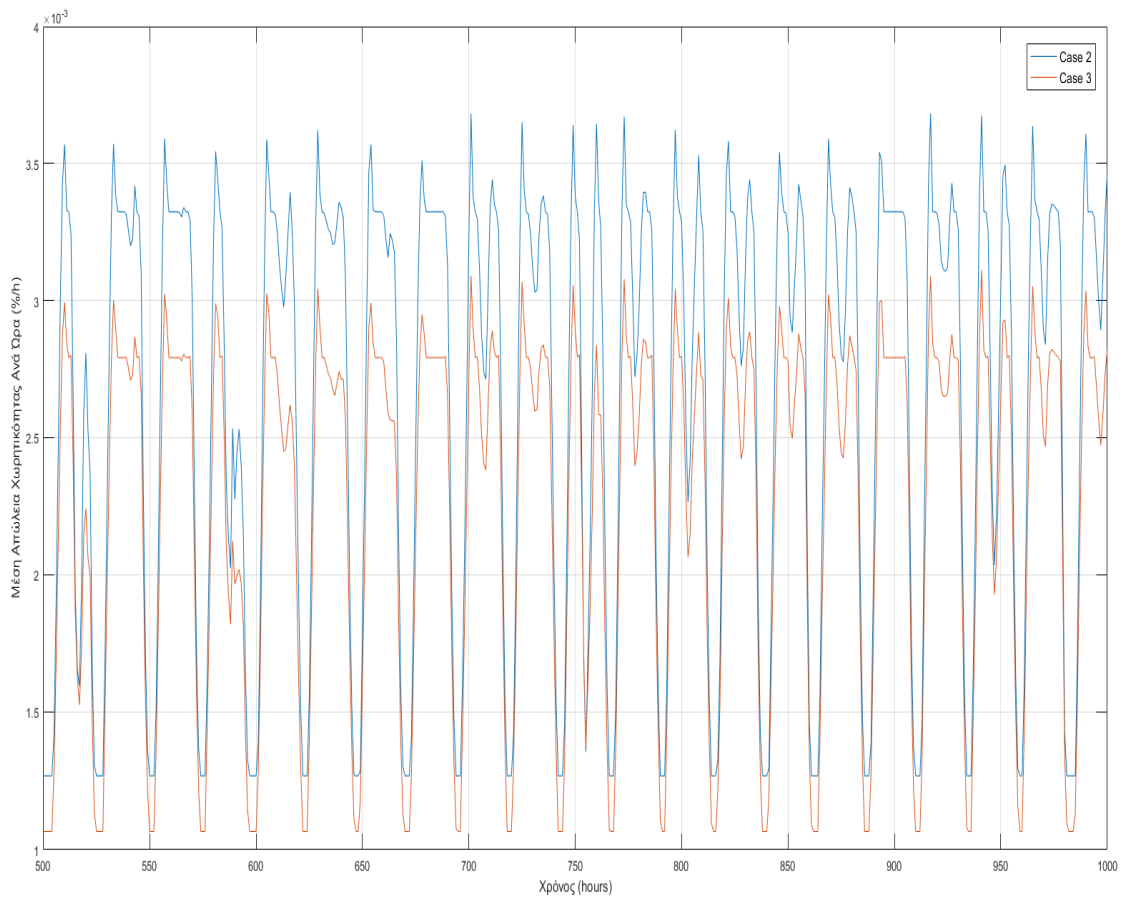
Γράφημα 3.25: Η στάθμη φόρτισης τις 500 πρώτες ώρες για τις περιπτώσεις 1 και 7, με περιορισμό SOC



Γράφημα 3.26: Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα για τις 500 πρώτες ώρες , σε ποσοστό επί της συνολικής, για τις περιπτώσεις 1 και 7, με περιορισμό SOC



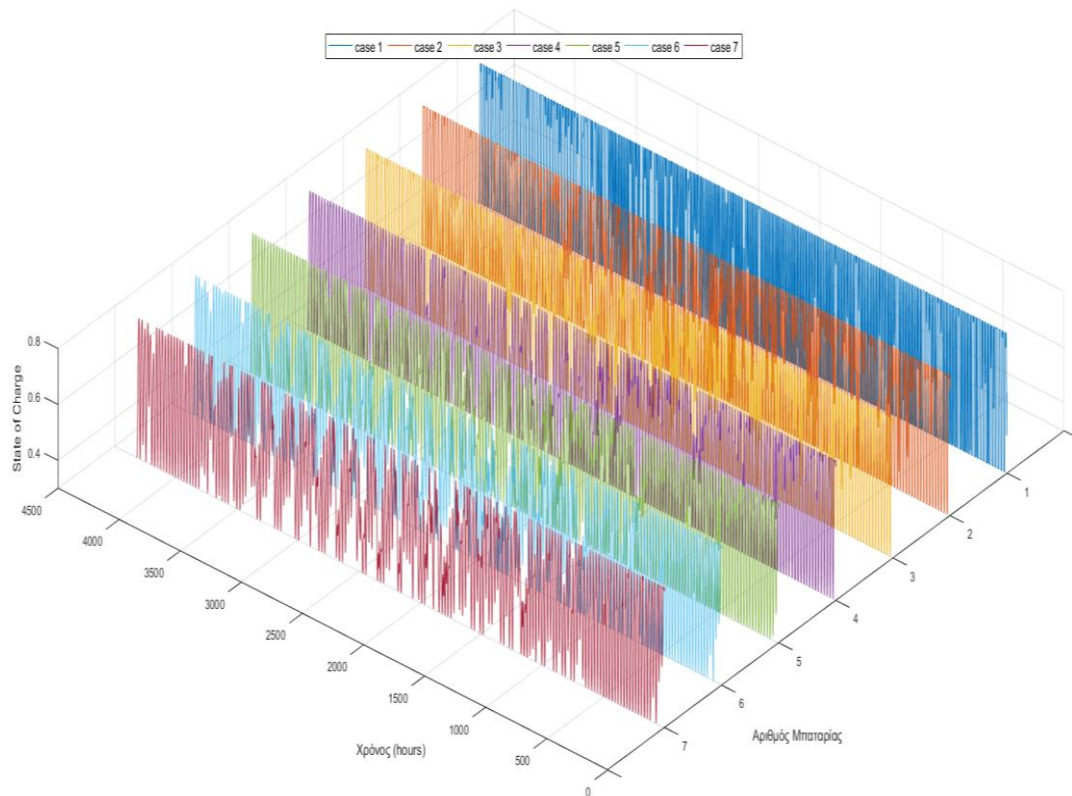
Γράφημα 3.27: Η στάθμη φόρτισης για τις περιπτώσεις 2 και 3 κατά τις πρώτες 500 – 1000 ώρες , με περιορισμό SOC



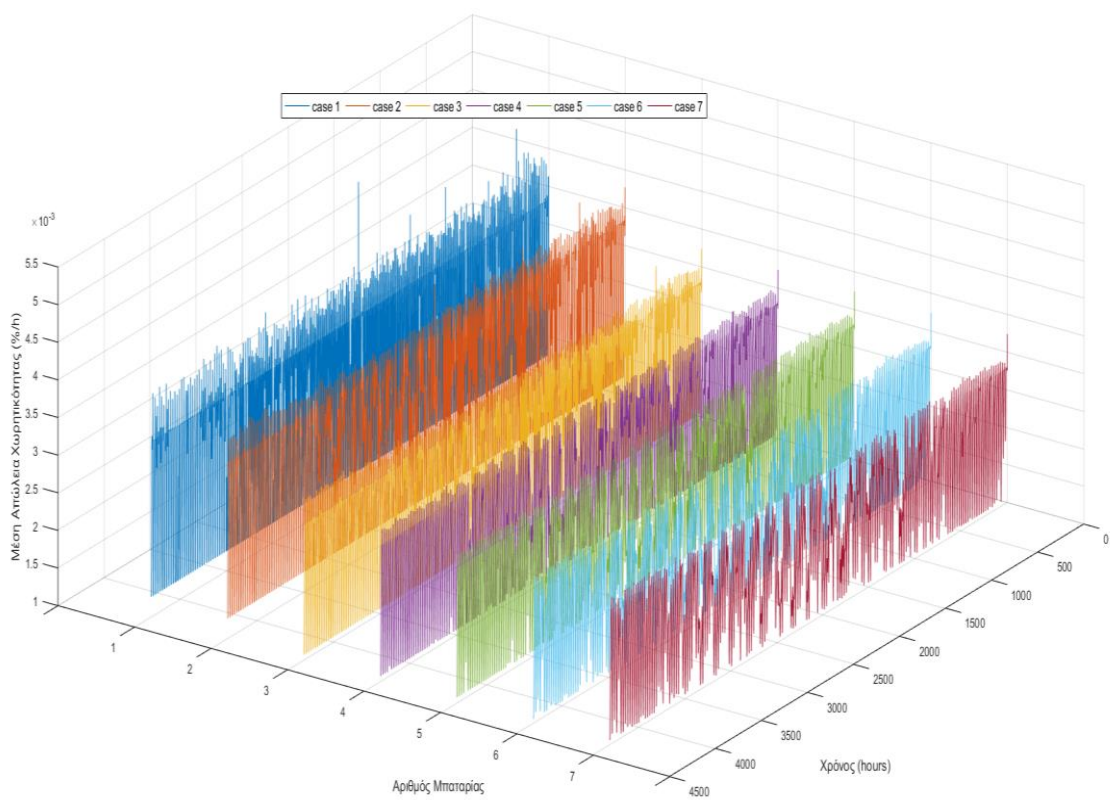
Γράφημα 3.28: Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα, σε ποσοστό επί της συνολικής για τις περιπτώσεις 2 και 3 κατά τις πρώτες 500 – 1000 ώρες , με περιορισμό SOC

Στα γραφήματα 3.25 - 3.28 φαίνεται η επίπτωση του περιορισμού της στάθμης φόρτισης στην ίδια και την μέση χωρητικότητα ανά ώρα. Κι εδώ επιβεβαιώνεται η μεγαλύτερη καταπόνηση των μικρότερων μονάδων.

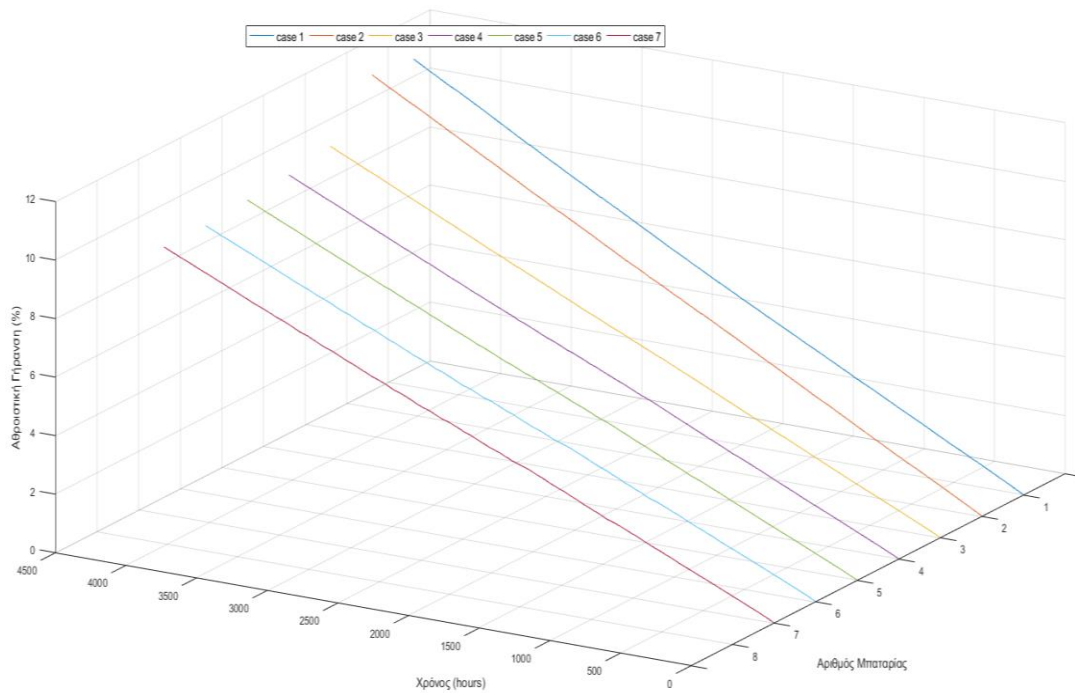
Παρακάτω παρουσιάζονται η γήρανση και η στάθμη φόρτισης όλων των μπαταριών σε ένα γράφημα:



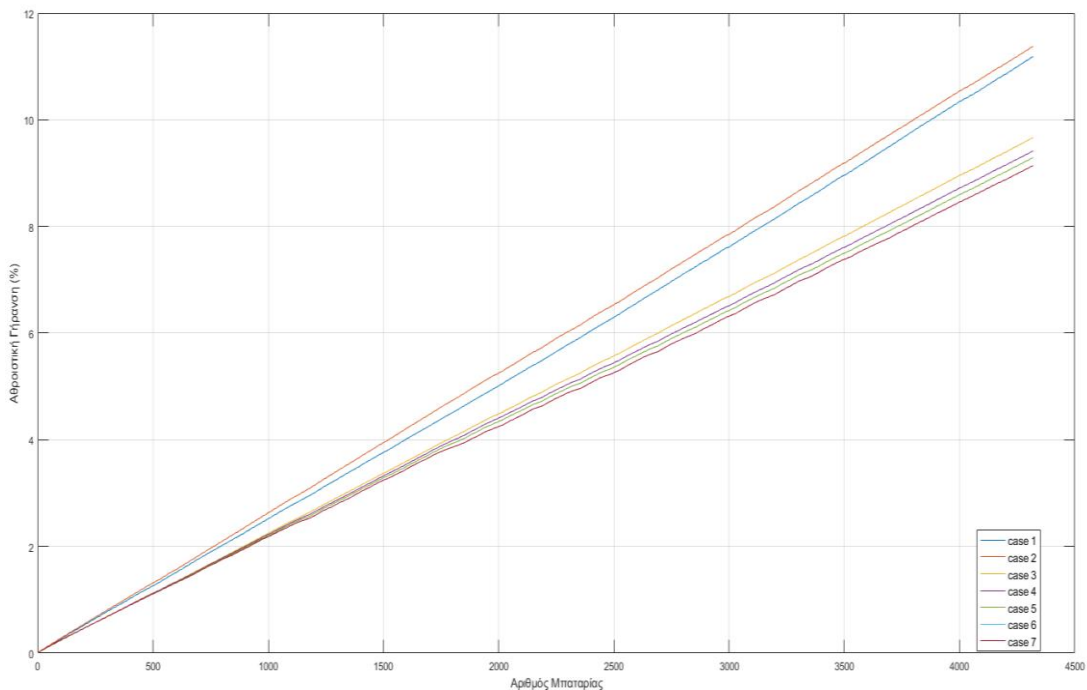
Γράφημα 3.29: Η στάθμη φόρτισης για όλες τις περιπτώσεις, με περιορισμό SOC



Γράφημα 3.30: Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα για όλες τις περιπτώσεις, με περιορισμό SOC



Γράφημα 3.31α: Η αθροιστική απώλεια χωρητικότητας ως ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας, ανά ώρα για όλες τις περιπτώσεις, με περιορισμό SOC



Γράφημα 3.31β: Η αθροιστική απώλεια χωρητικότητας ως ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας, ανά ώρα για όλες τις περιπτώσεις, με περιορισμό SOC

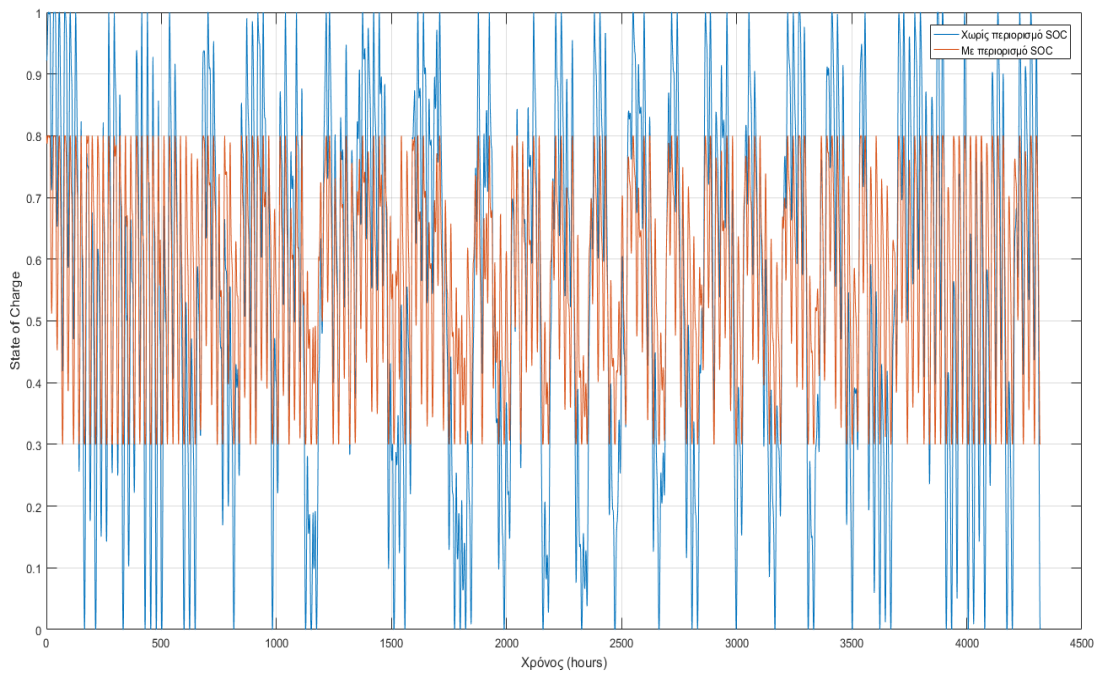
Η συμπεριφορά των μπαταριών υπό περιορισμένη SOC αναλογικά με τα μεγέθη της χωρητικότητας και της ικανότητας ισχύος παρουσιάζει ομοιότητα σε σχέση με την λειτουργία ανεξέλεγκτης στάθμης φόρτισης. Οι μεγαλύτερες μπαταρίες τείνουν να

παρουσιάζουν μικρότερη γήρανση σε σχέση με τις μικρότερες, χωρίς όμως η βελτίωση αυτή να είναι δραματική.

3.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την περίπτωση του περιορισμού της SoC και της περίπτωσης άνευ περιορισμών:

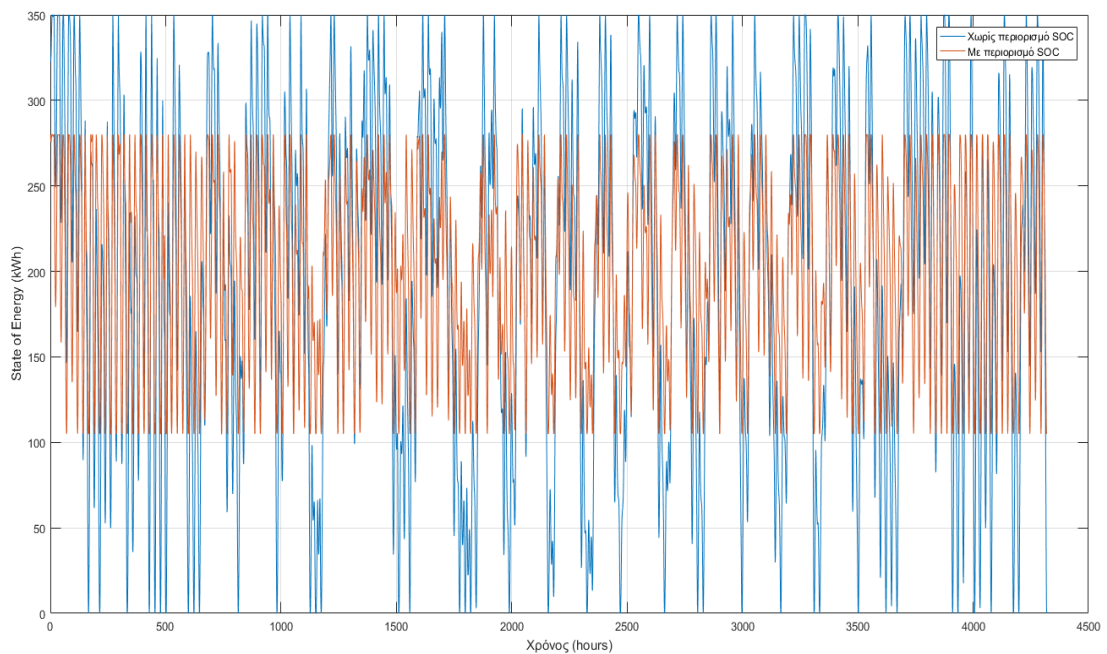
Case No.	Χωρίς Περιορισμό SOC			Με περιορισμό SOC		
	Συνολική Γήρανση (%)	Διάρκεια Ζωής EoL _{0.5}	Κύκλοι Λειτουργίας	Συνολική Γήρανση (%)	Διάρκεια Ζωής EoL _{0.5}	Κύκλοι Λειτουργίας
1	11.82	2 χρ. 41 ημ.	713	11.18	2 χρ. 85 ημ.	624
2	11.57	2 χρ. 58 ημ.	604	11.37	2 χρ. 72 ημ.	472
3	10.54	2 χρ. 135 ημ.	553	9.66	2 χρ. 214 ημ.	436
4	9.88	2 χρ. 193 ημ.	477	9.41	2 χρ. 239 ημ.	328
5	9.84	2 χρ. 197 ημ.	471	9.28	2 χρ. 252 ημ.	313
6	9.82	2 χρ. 199 ημ.	458	9.13	2 χρ. 268 ημ.	307
7	9.82	2 χρ. 199 ημ.	458	9.13	2 χρ. 268 ημ.	307

Πίνακας 3.8: Τα αποτελέσματα με και χωρίς πολιτική περιορισμού SOC

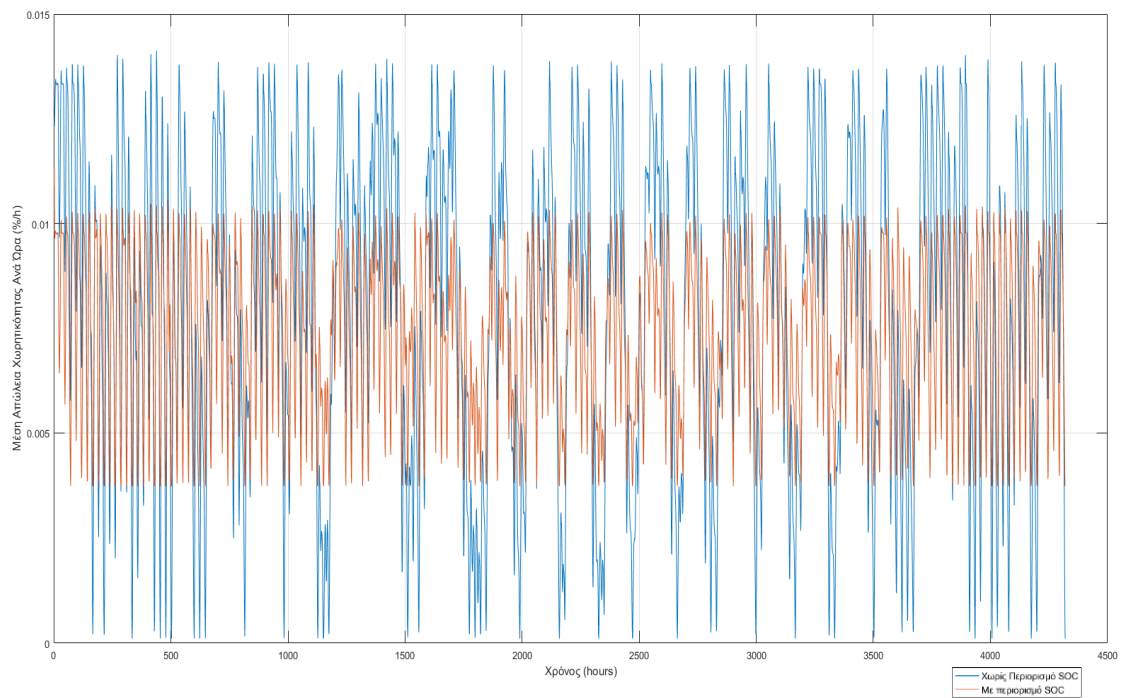


Γράφημα 3.32: Η στάθμη φόρτισης για την περίπτωση 7, με ή χωρίς περιορισμό SOC

Ο περιορισμός της SOC της μπαταρίας στο διάγραμμα 3.34, είναι εμφανής. Η απώλεια χωρητικότητας λόγω στάθμης αναμένεται να είναι μειωμένη στην περίπτωση περιορισμού της στάθμης φόρτισης.

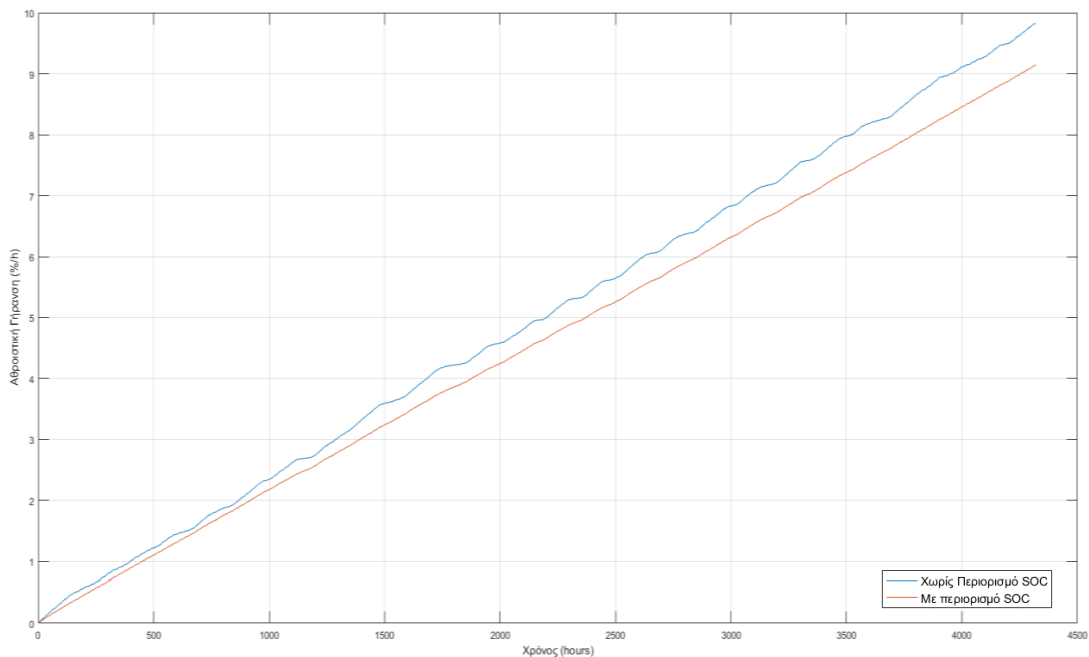


Γράφημα 3.33: Το ενεργειακό περιεχόμενο ανά ώρα για την περίπτωση 7, με ή χωρίς περιορισμό SOC



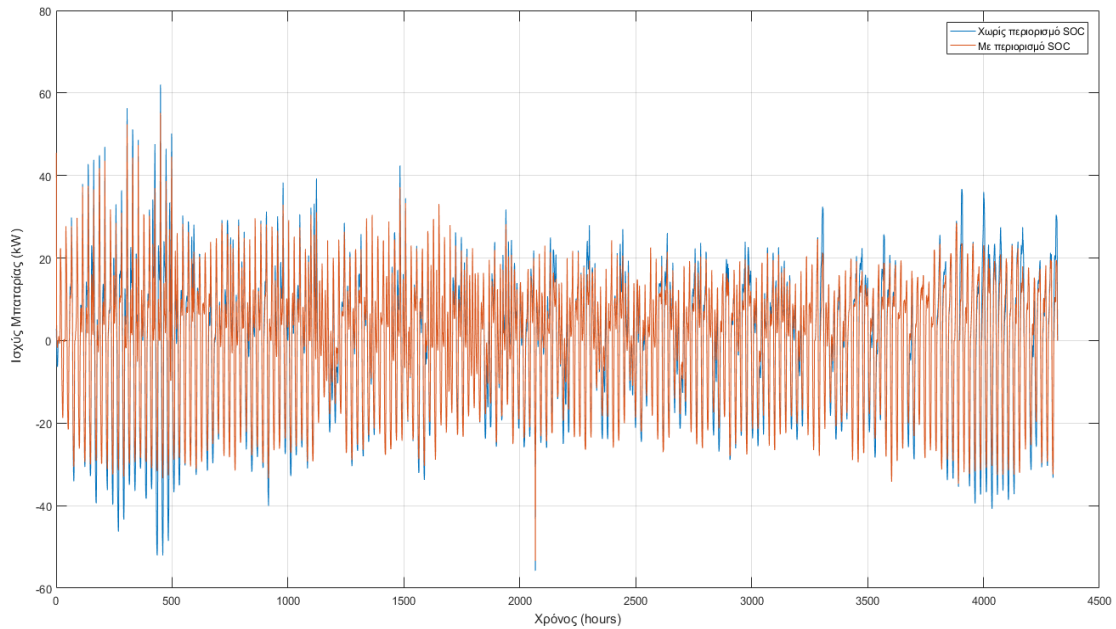
Γράφημα 3.34: Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα σε ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας για την περίπτωση 7, με ή χωρίς περιορισμό SOC

Στα γραφήματα 3.32-34 φαίνεται η επίδραση του περιορισμού της SOC στην λειτουργία της μπαταρίας.



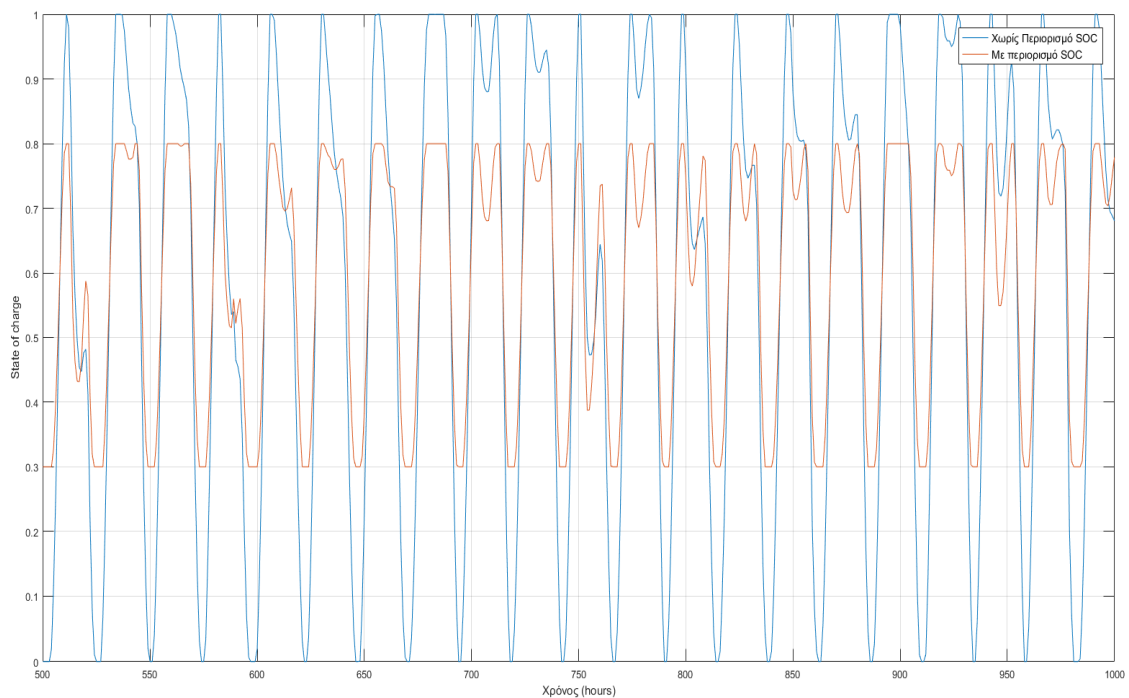
Γράφημα 3.35: Η αθροιστική απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα σε ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας για την περίπτωση 7, με ή χωρίς περιορισμό SOC

Στο γράφημα 3.35 φαίνεται η μειωμένη σχετικά απώλεια χωρητικότητας που παρουσιάζει η μπαταρία 7, με περιορισμό της στάθμης φόρτισης, σε σχέση με την περίπτωση που λειτουργούσε χωρίς περιορισμό λιγότερο από 1% της ονομαστικής.

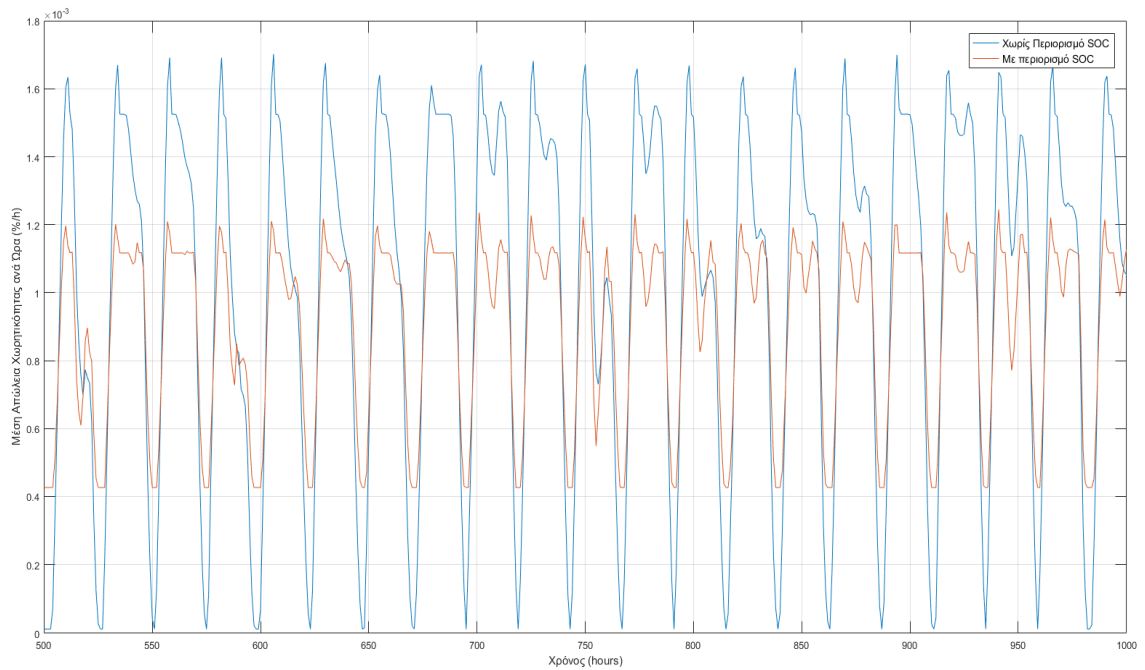


Γράφημα 3.36: Η ισχύς της μπαταρίας ως προς το ΣΗΕ, για την περίπτωση 7, με ή χωρίς περιορισμό SOC

Στο γράφημα 3.36 φαίνεται εποπτικά, ο μικρότερος κύκλος λειτουργίας της μπαταρίας 7 με χρήση περιορισμού της στάθμης φόρτισης αποδίδοντας και απορροφώντας ισχύ μικρότερης μέγιστης τιμής.

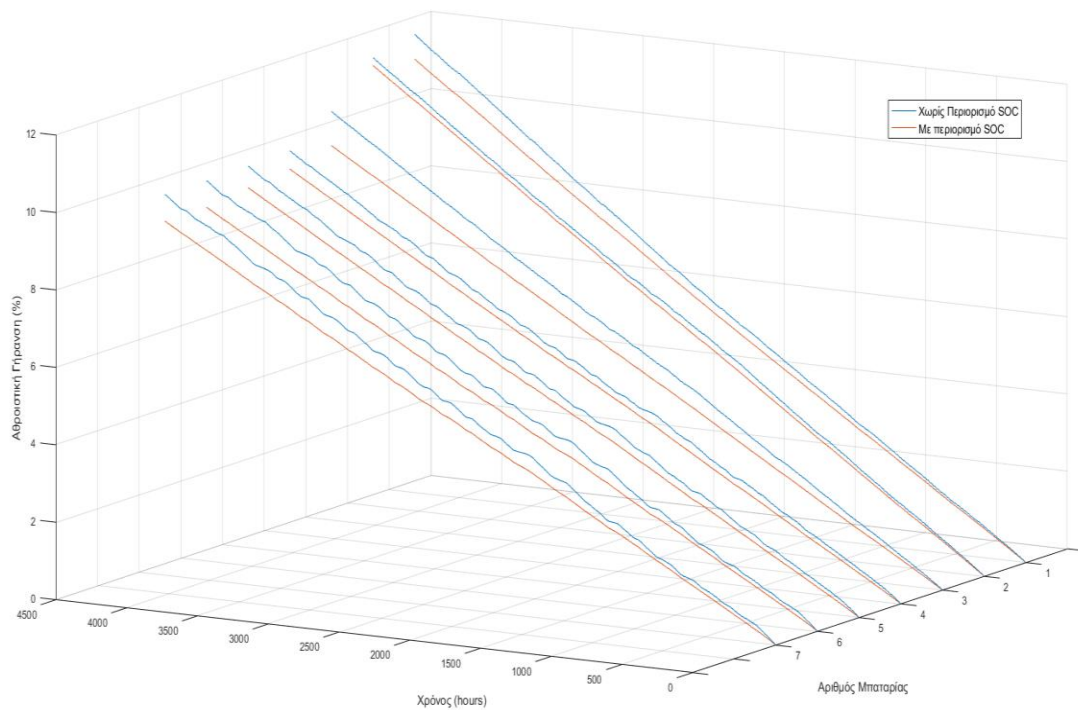


Γράφημα 3.37: Η στάθμη της μπαταρίας για την περίπτωση 3, στο στιγμιότυπο 500-1000 ώρες με ή χωρίς περιορισμό SOC



Γράφημα 3.38: Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα της μπαταρίας ως ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας για την περίπτωση 3, στο στιγμιότυπο 500-1000 ώρες με ή χωρίς περιορισμό SOC

Στα γραφήματα 3.37, 3.38 είναι εμφανής ο περιορισμός της στάθμης φόρτισης σε επίπεδο ωρών

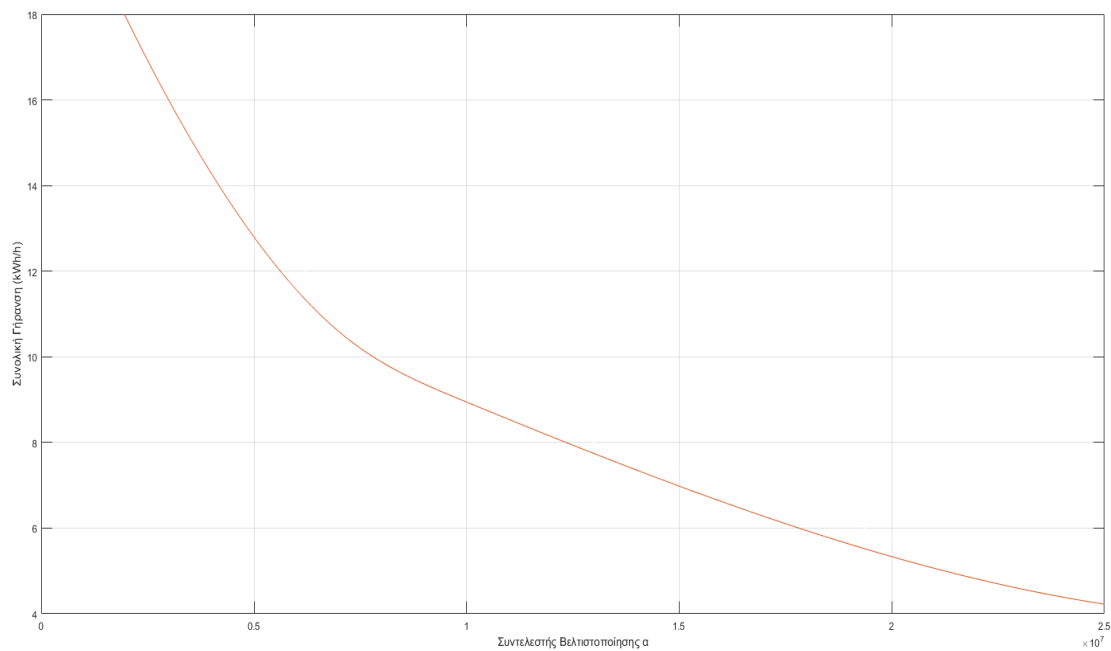


Γράφημα 3.39: Η αθροιστική γήρανση ανά ώρα όλων των περιπτώσεων με ή χωρίς περιορισμό SOC

Στο γράφημα 3.39 φαίνεται η αθροιστική γήρανση για το σύνολο των μπαταριών. Η σχετική μεταβολή της συνολικής γήρανσης κάθε μπαταρίας για τα δύο σενάρια λειτουργίας είναι μικρότερη του 1% της ονομαστικής.

3.4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για την χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης της γήρανσης:

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.4, η βελτιστοποίηση έγινε με την χρήση του συντελεστή α . Η βέλτιστη τιμή του υπολογίστηκε μετά από μεγάλο αριθμό εκτελέσεων του προβλήματος ελαχιστοποίησης της γήρανσης για κάθε περίπτωση.



Γράφημα 3.40: ο συντελεστής βελτιστοποίησης α , για την περίπτωση 7

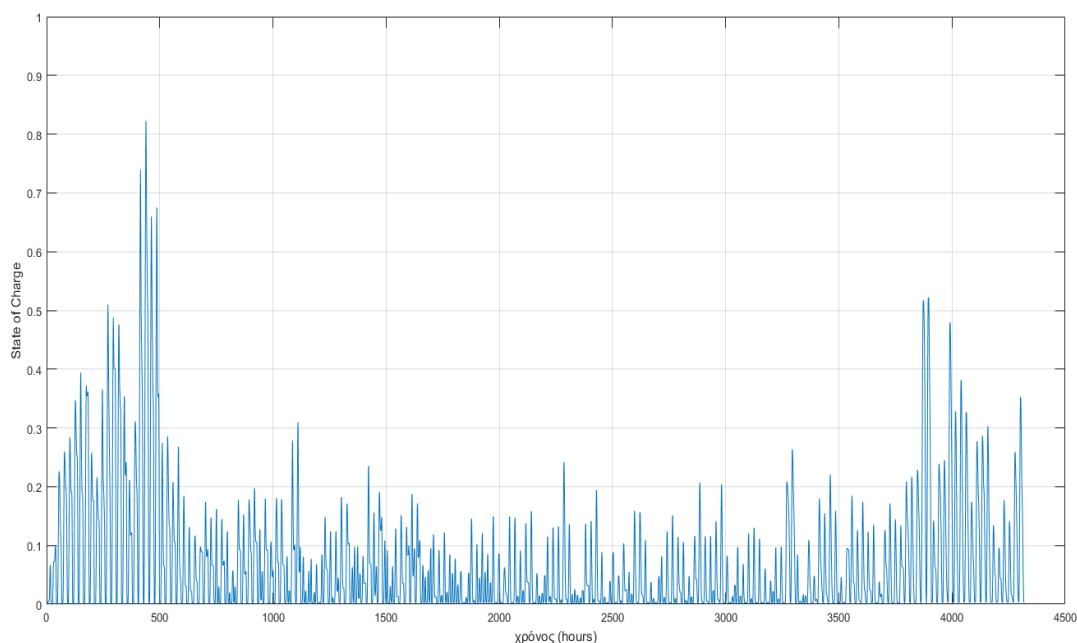
Η επιλογή του βέλτιστου συντελεστή γίνεται με σκοπό την επέκταση της ζωής της μπαταρία σύμφωνα με το κριτήριο $EoL_{0.5}$

Τα αποτελέσματα της ελαχιστοποίησης της γήρανσης φαίνονται παρακάτω:

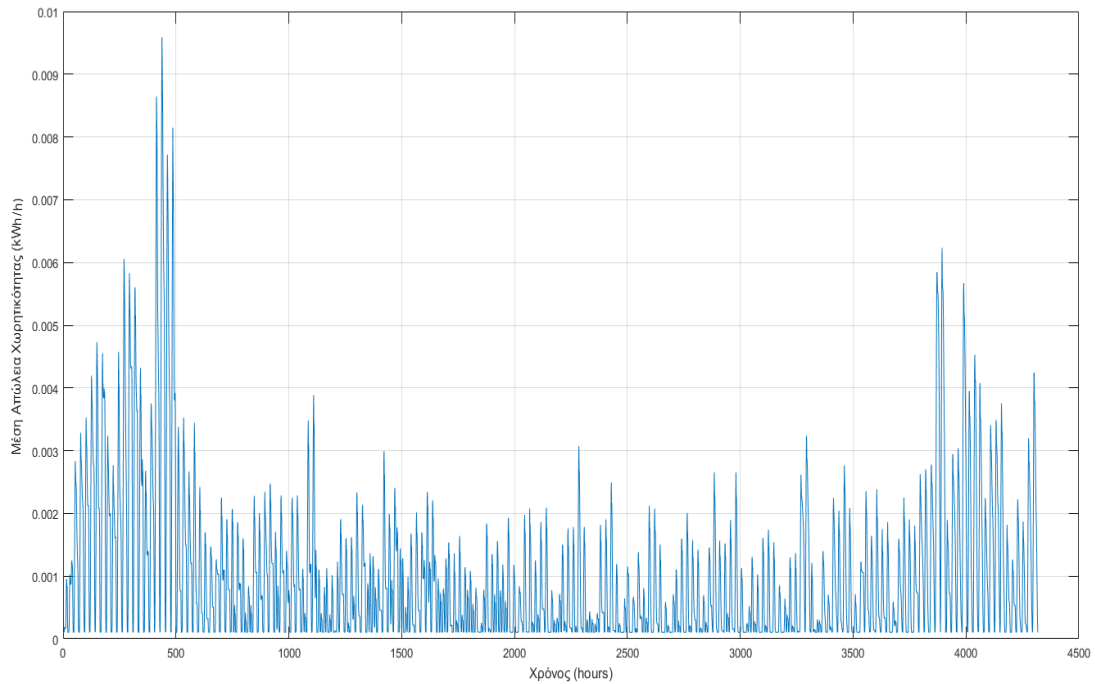
Case No.	Συνολική Γήρανση (kWh)	Συνολική Γήρανση (%)	ΕοL _{0.2}	ΕοL _{0.5}	Μέση Γήρανση (kWh/h)	Κύκλοι Λειτουργίας
1	0.2497	1.24	8 χρόνια 3 ημ.	20 χρόνια 8 ημ.	5.78E-05	192
2	1.0017	1.25	7 χρόνια 360 ημ.	19 χρόνια 352 ημ.	2.32E-04	186
3	1.2637	1.26	7 χρόνια 333 ημ.	19 χρόνια 286 ημ.	2.93E-04	194
4	2.4701	1.23	8 χρόνια 35 ημ.	20 χρόνια 88 ημ.	5.72E-04	292
5	3.0706	1.22	8 χρόνια 51 ημ.	20 χρόνια 129 ημ.	7.11E-04	342
6	4.2204	1.2	8 χρόνια 106 ημ.	20 χρόνια 267 ημ.	9.77E-04	436
7	4.2204	1.2	8 χρόνια 106 ημ.	20 χρόνια 267 ημ.	9.77E-04	436

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα για την λειτουργία των μπαταριών με χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης της γήρανσης

Παρακάτω παρουσιάζονται σε γραφήματα τα αποτελέσματα για την λειτουργία της μπαταρίας στην περίπτωση 7

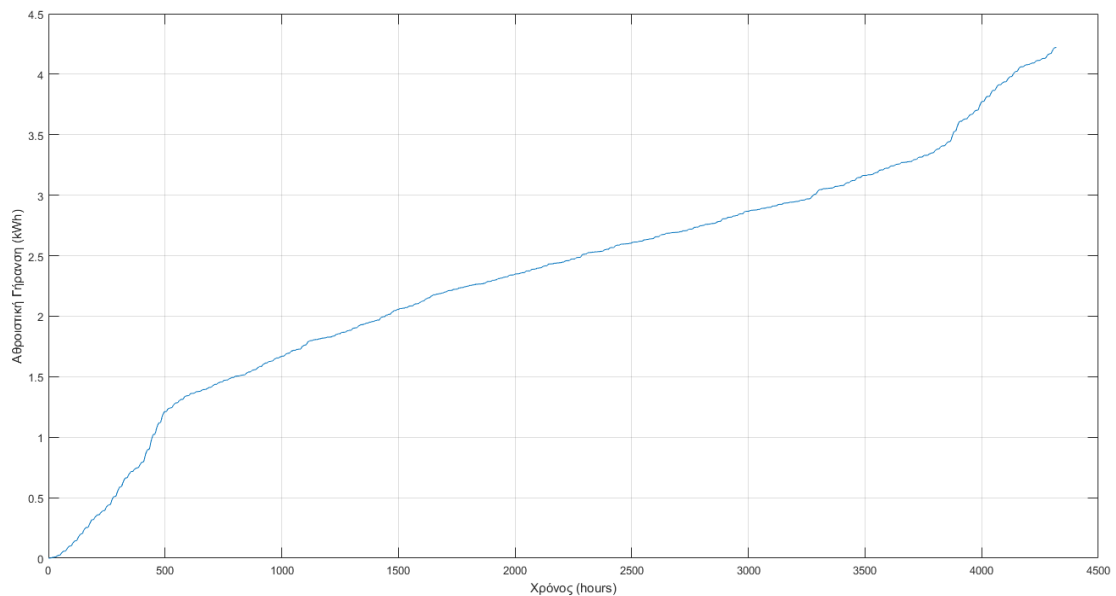


Γράφημα 3.41: Η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας για την περίπτωση 7, με χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης γήρανσης



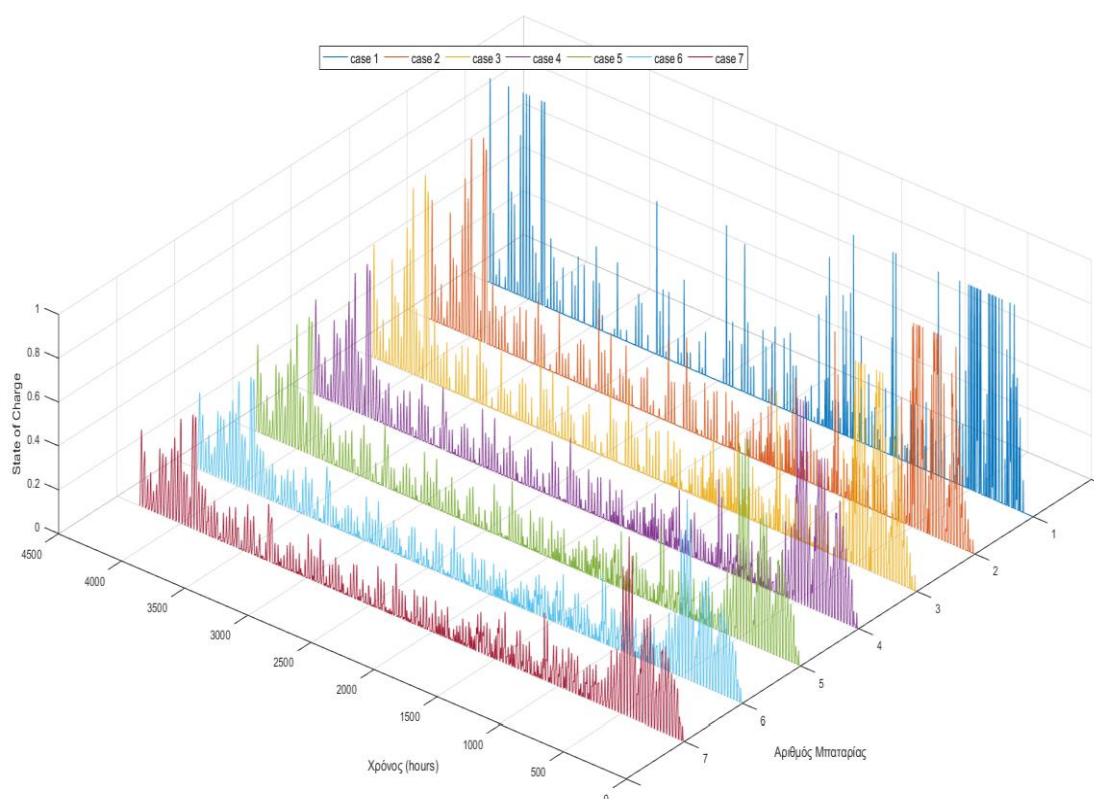
Γράφημα 3.42: Η μέση απώλεια χωρητικότητας της μπαταρίας ανά ώρα για την περίπτωση 7, με χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης γήρανσης

Στα παραπάνω γραφήματα 3.41-3.42 βλέπουμε την δραστική αλλαγή στα μεγέθη της μπαταρίας 7 με την χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης της γήρανσης. Η στάθμη φόρτισης φαίνεται ότι δεν περιορίζεται αριθμητικά.



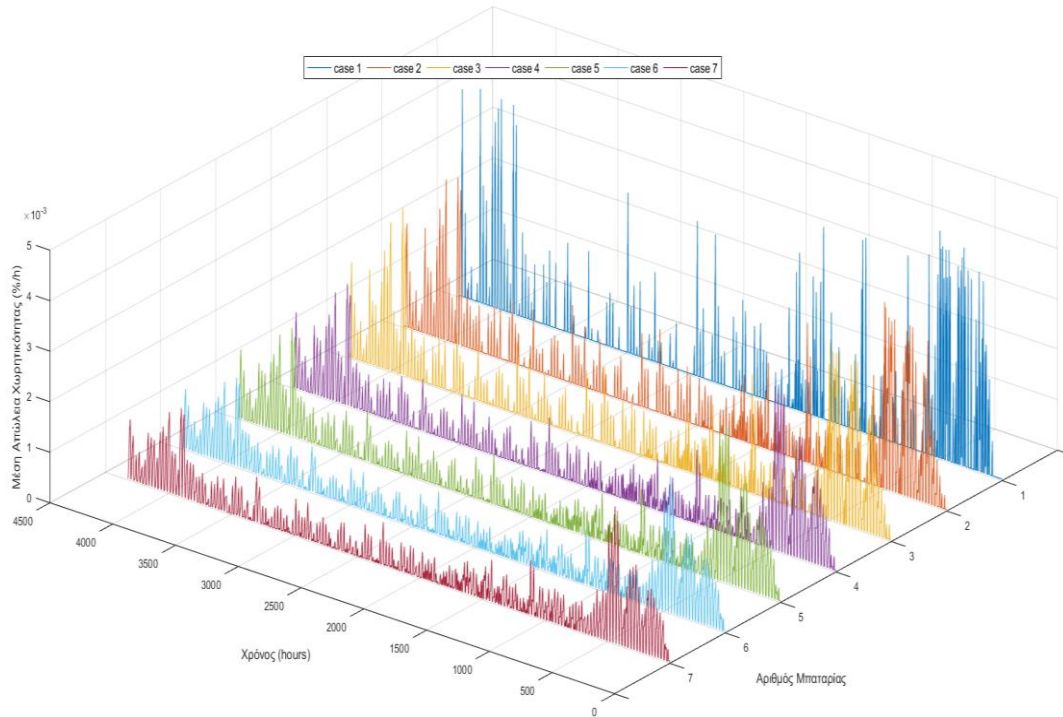
Γράφημα 3.43: Η αθροιστική γήρανση της μπαταρίας για την περίπτωση 7, με χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης γήρανσης

Με την χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης της γήρανσης η μορφή του γραφήματος αλλάζει και ο ρυθμός με τον οποίο η μπαταρία παρουσιάζει απώλεια χωρητικότητας αλλάζει δραματικά.



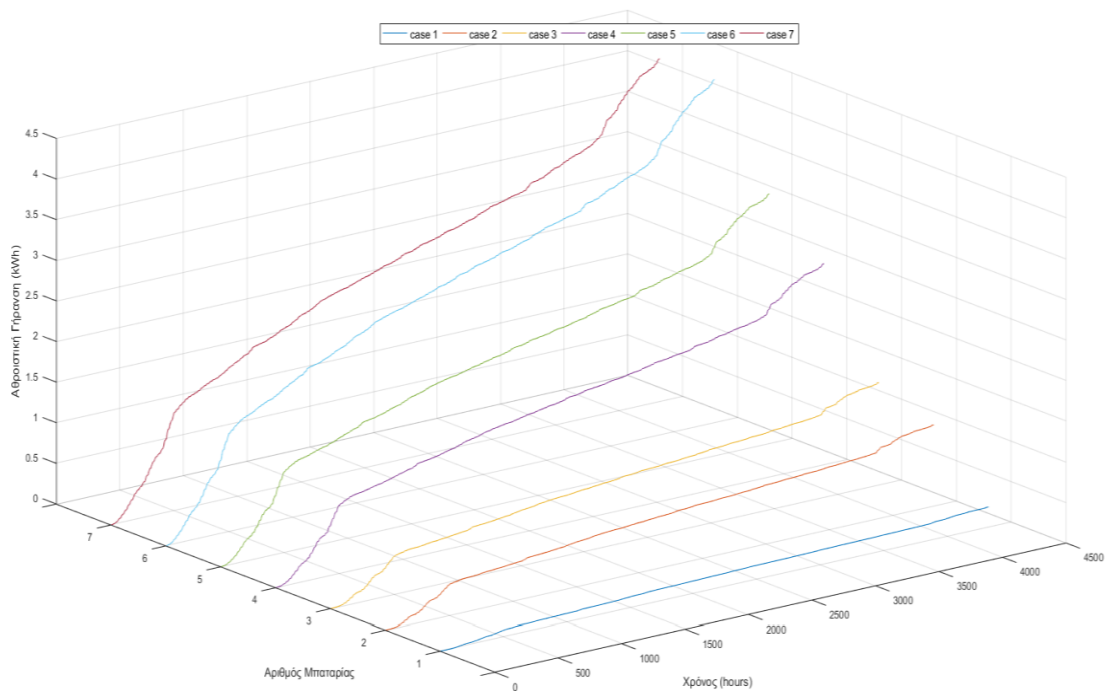
Γράφημα 3.44: Η στάθμη φόρτισης για όλες τις περιπτώσεις, με χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης γήρανσης

Στο διαγραμμα 3.44 φαίνεται η συμπεριφορά της στάθμης φόρτισης ανάλογα με το μέγεθος της μπαταρίας, να παρουσιάζει ποιοτικές ομοιότητες με τις δύο προηγούμενες στρατηγικές. Για την ικανοποίηση των αναγκών του ΣΗΕ κάποιες φορές οι μικρότερες μπαταρίες αναγκάζονται να λειτουργήσουν σε υψηλότερες στάθμες φόρτισης και σε χαμηλά επίπεδα εκφόρτισης. Αυτό όμως στην περίπτωση χρήσης του αλγορίθμου γήρανσης, ελέγχεται και μετριάζεται ώστε η συνολική γήρανση να ελαχιστοποιηθεί.



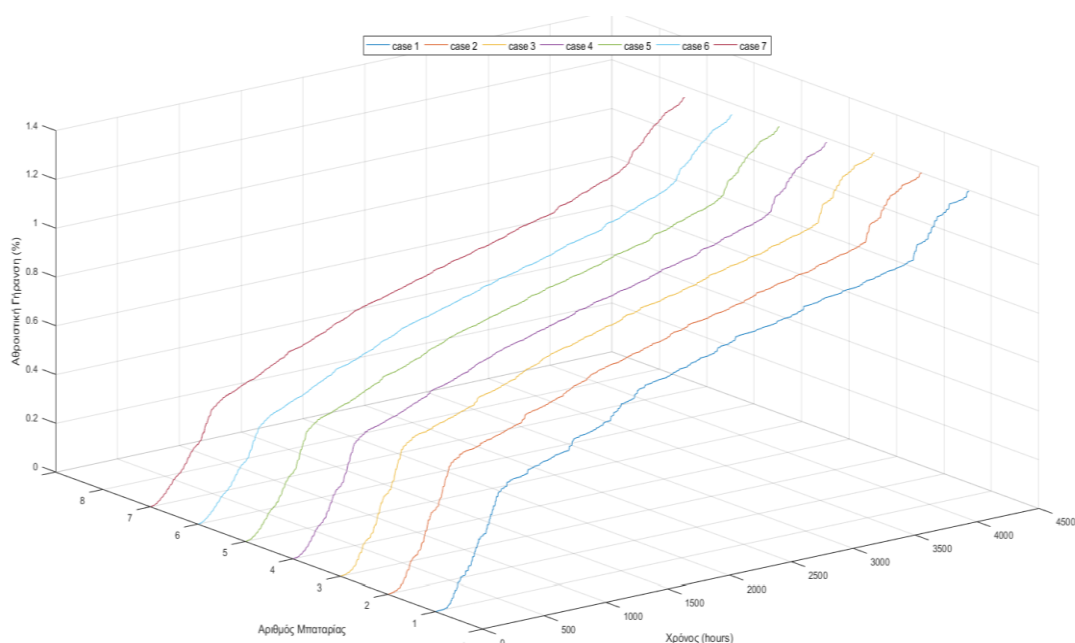
Γράφημα 3.45: Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα για όλες τις περιπτώσεις, με χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης γήρανσης

Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα φαίνεται στο διάγραμμα 3.45. Όπως θα δούμε παρακάτω, δεν ακολουθεί τον ίδιο κανόνα, ρυθμίζεται ώστε να επιτευχθεί ο βελτιστοποίηση της γήρανσης.



Γράφημα 3.46α: Η αθροιστική γήρανση για όλες τις περιπτώσεις, με χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης γήρανσης

Η τιμή της απώλειας χωρητικότητας λόγω γήρανσης σε kWh βλέπουμε ότι ακολουθεί αύξουσα τάση σε σχέση με τα ονομαστικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας. Η τάση αυτή δικαιολογείται από την ονομαστική χωρητικότητα και την ανταλλαγή ισχύος της κάθε μπαταρίας.



Γράφημα 3.46β: Η αθροιστική γήρανση σε ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας για όλες τις περιπτώσεις, με χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης γήρανσης

Στο γράφημα 3.46β είναι προφανής η χρήση του αλγορίθμου για την ελαχιστοποίηση της απώλειας χωρητικότητας λόγω γήρανσης. Ο συντελεστής βελτιστοποίησης προσαρμόζεται ώστε κάθε μπαταρία να επεκτείνει τον χρόνο ζωής της έως την ίδια τιμή. Έτσι στην κανονικοποιημένη μορφή, οι 7 μπαταρίες παρουσιάζουν την ίδια συνολική γήρανση.

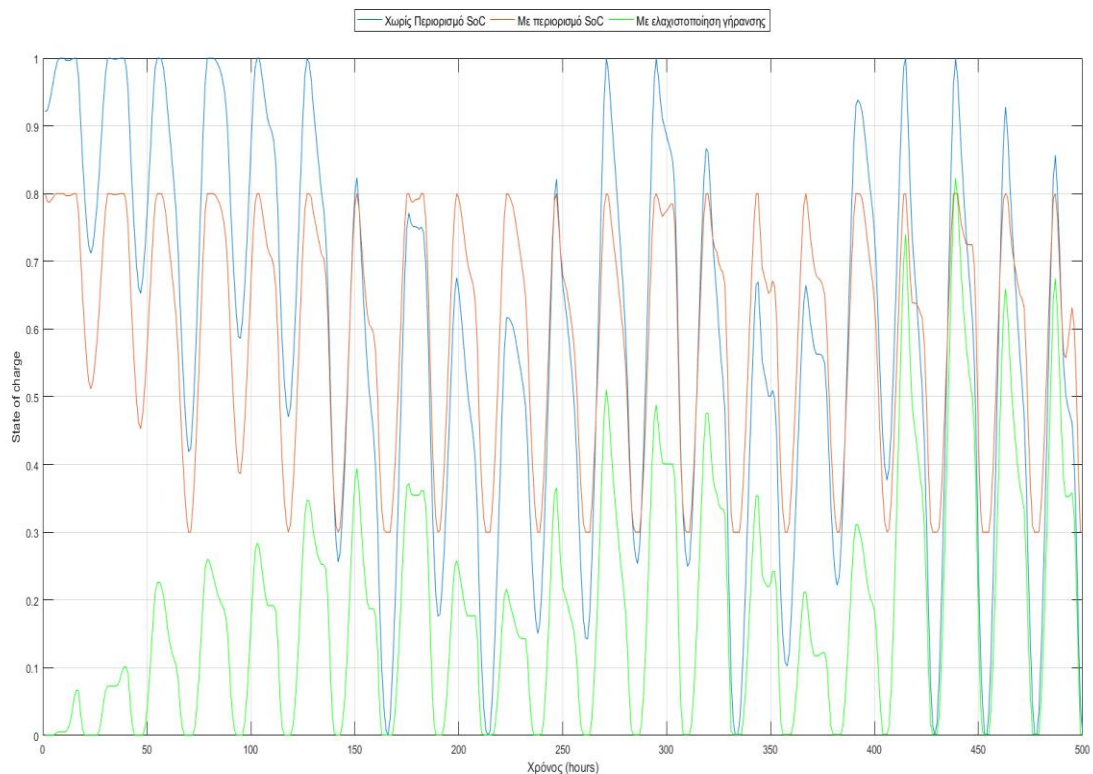
3.4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις παραπάνω πολιτικές χειρισμών των μπαταριών

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και συγκρίνονται τα αποτελέσματα λειτουργίας των μπαταριών με τις τρεις διαφορετικές στρατηγικές χειρισμών.

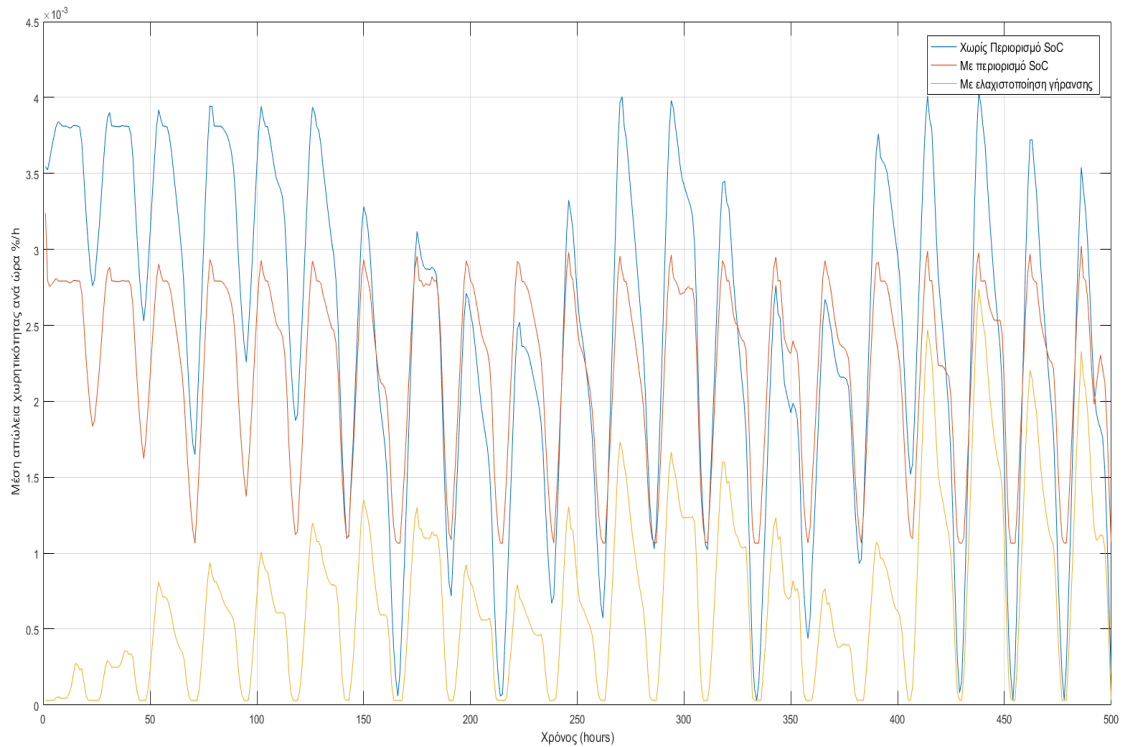
Case No.	Χωρίς περιορισμό SoC			Με περιορισμό SoC			Αλγόριθμος ελαχιστοποίησης γήρανσης		
	Συνολική Γήρανση (%)	Lifetime EoL _{0.5}	Κύκλοι Λειτουργίας	Συνολική Γήρανση (%)	Lifetime EoL _{0.5}	Κύκλοι Λειτουργίας	Συνολική Γήρανση (%)	EoL _{0.5}	Κύκλοι Λειτουργίας
1	11.82	2 έτη 41 ημ.	713	11.18	2 έτη 85 ημ.	624	1.24	20 έτη 8 ημ.	192
2	11.57	2 έτη 58 ημ.	604	11.37	2 έτη 72 ημ.	472	1.25	19 έτη 352 ημ.	186
3	10.54	2 έτη 135 ημ.	553	9.66	2 έτη 214 ημ.	436	1.26	19 έτη 286 ημ.	194
4	9.88	2 έτη 193 ημ.	477	9.41	2 έτη 239 ημ.	328	1.23	20 έτη 88 ημ.	292
5	9.84	2 έτη 197 ημ.	471	9.28	2 έτη 252 ημ.	313	1.22	20 έτη 129 ημ.	342
6	9.82	2 έτη 199 ημ.	458	9.13	2 έτη 268 ημ.	307	1.2	20 έτη 267 ημ.	436
7	9.82	2 έτη 199 ημ.	458	9.13	2 έτη 268 ημ.	307	1.2	20 έτη 267 ημ.	436

Πίνακας 3.10: Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τις 3 στρατηγικές λειτουργίας

Παρακάτω παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα:

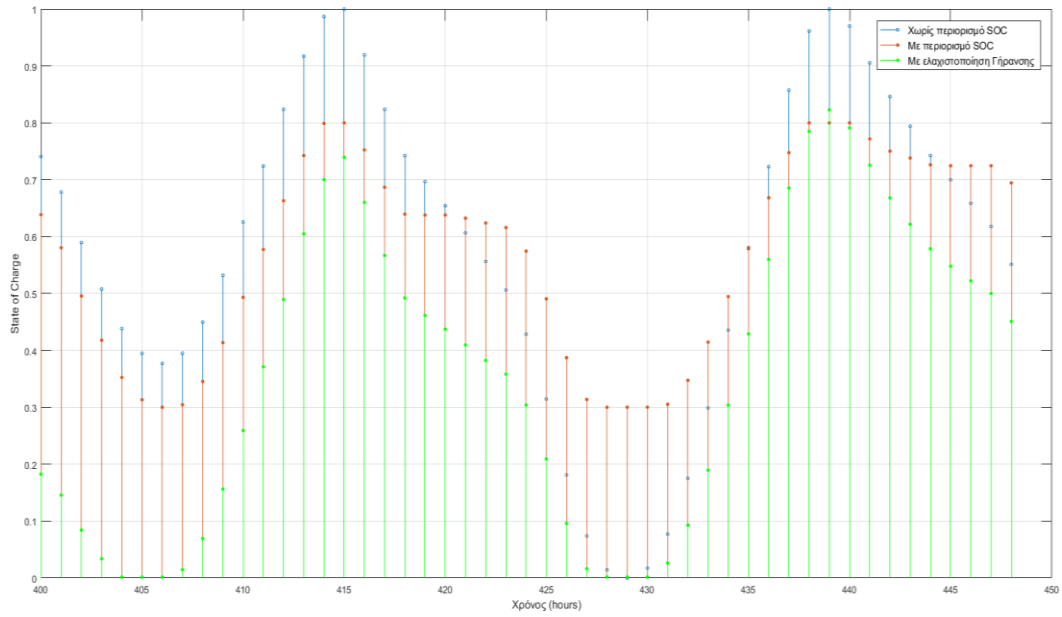


Γράφημα 3.47: Η στάθμη φόρτισης για την περίπτωση 7, με χρήση των τριών διαφορετικών στρατηγικών κατά τις πρώτες 500 ώρες

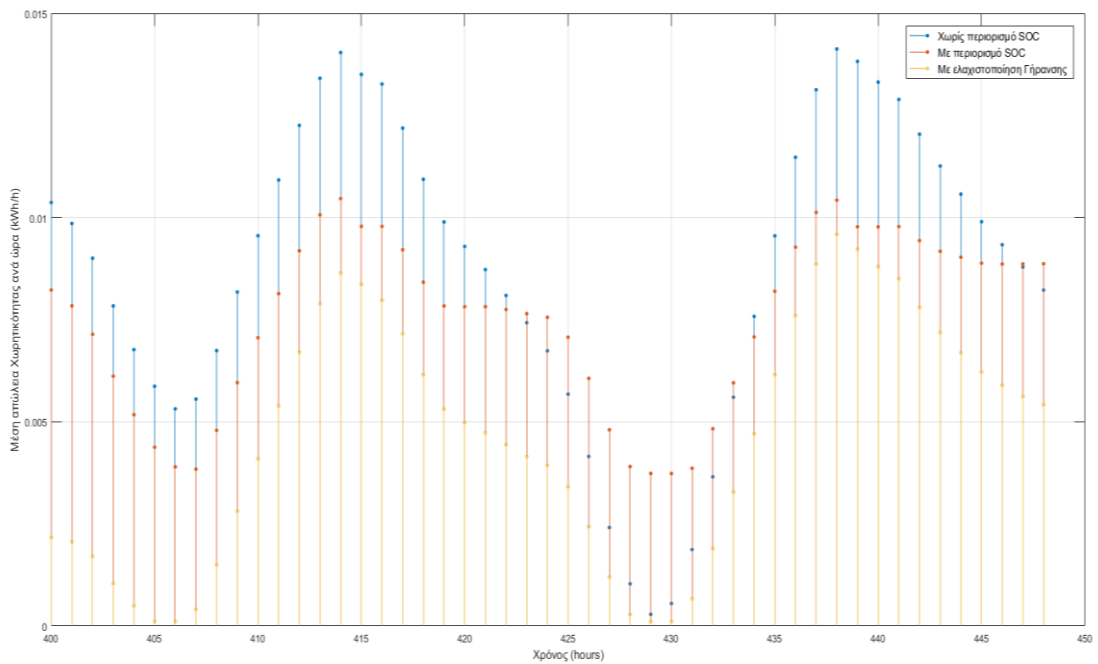


Γράφημα 3.48: Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα ως ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας για την περίπτωση 7, με χρήση των τριών διαφορετικών στρατηγικών κατά τις πρώτες 500 ώρες

Φαίνεται στο γράφημα 3.47, ότι για την μπαταρία 7 ο αλγόριθμος κρατά την στάθμη φόρτισης χαμηλότερα απ' ότι οι 2 άλλες στρατηγικές χειρισμών, με κάποια τοπικά μέγιστα να προσεγγίζουν την στάθμη της πολιτικής περιορισμού SOC. Ακόμη εμφανής είναι και η εξομάλυνση των φορτίσεων/εκφορτίσεων, παρουσιάζοντας μειωμένο ρυθμό αύξησης/μείωσης από τις άλλες 2 στρατηγικές. Στο 3.47, η μείωση της μέσης απώλειας χωρητικότητας ανά ώρα είναι εμφανής.

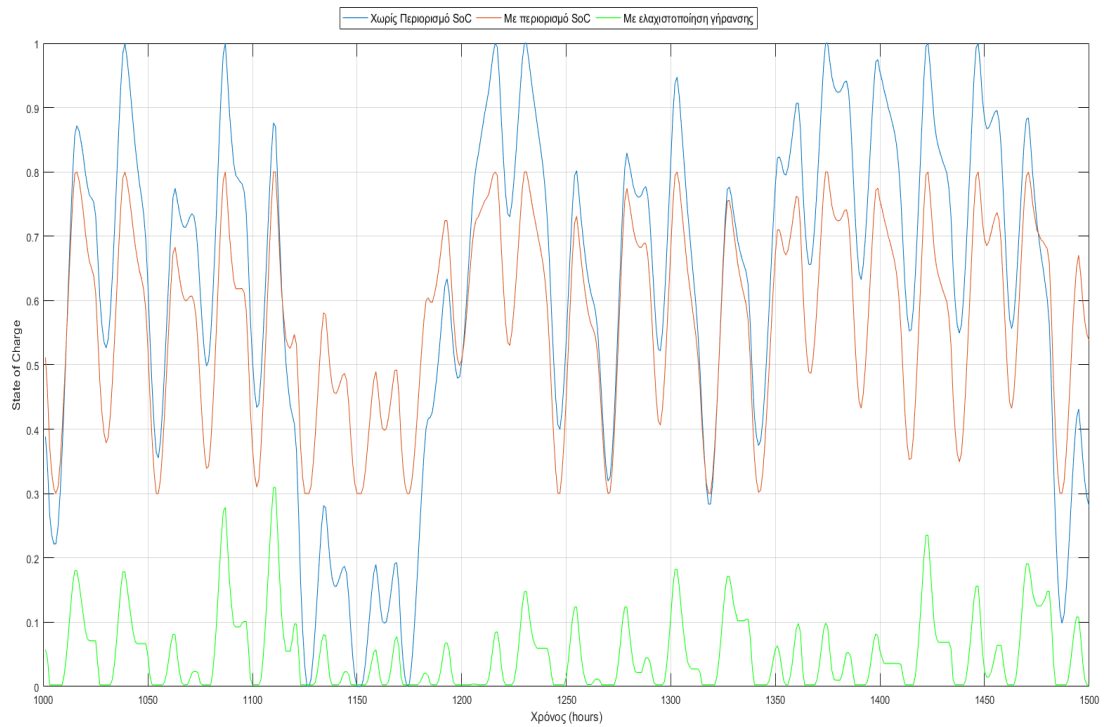


Γράφημα 3.48: Η στάθμη φόρτισης για την περίπτωση 7, με χρήση των τριών διαφορετικών στρατηγικών για 2 ημέρες

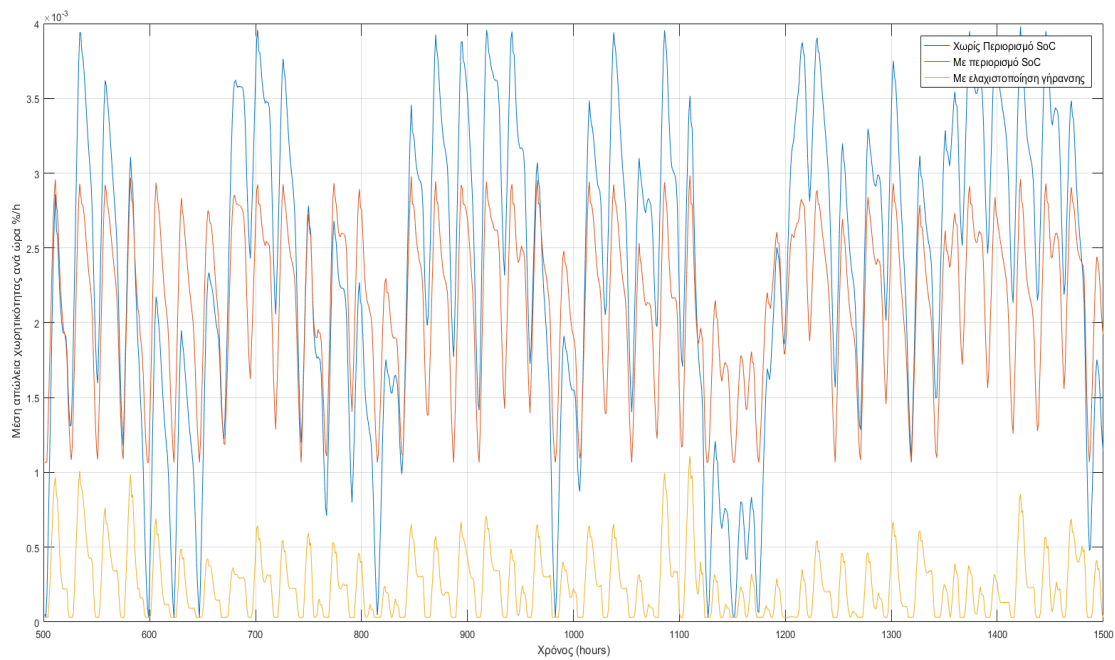


Γράφημα 3.49: Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα ως ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας για την περίπτωση 7, με χρήση των τριών για 2 ημέρες.

Στα 3.48 και 3.49 φαίνεται πιο καθαρά η επίδραση του αλγορίθμου σε επίπεδο ώρας.



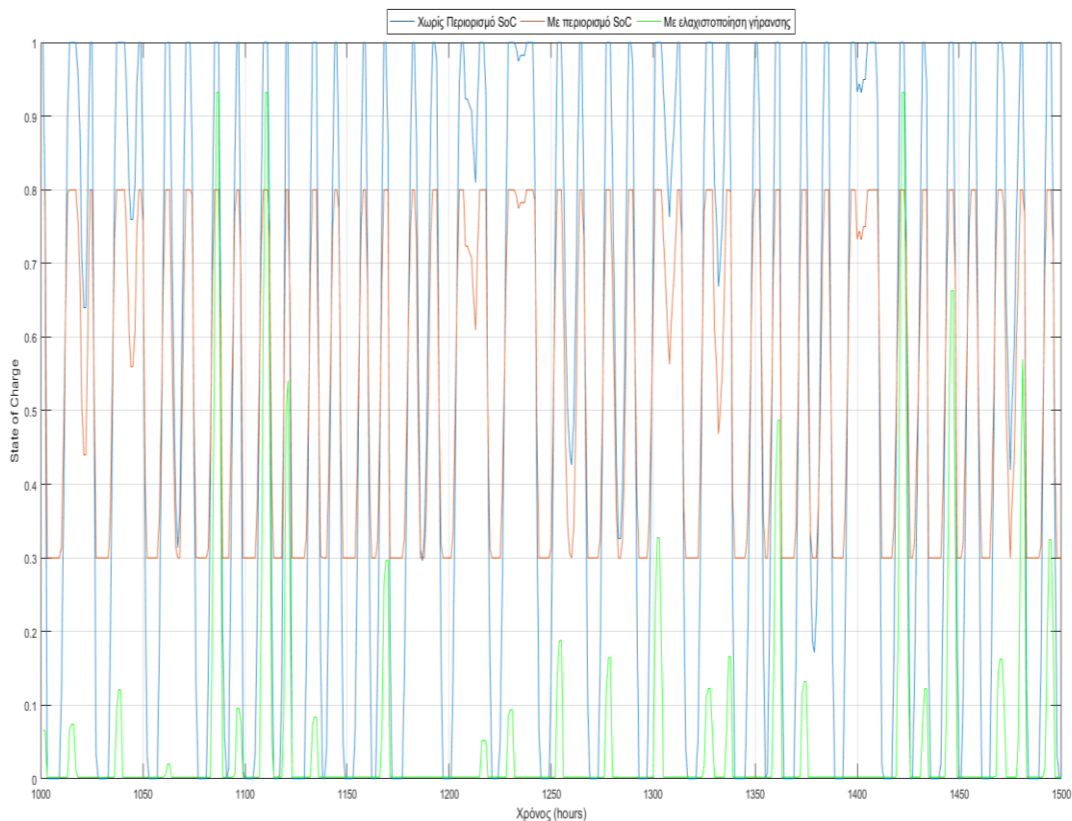
Γράφημα 3.50: Η στάθμη φόρτισης για την περίπτωση 7, με χρήση των τριών διαφορετικών στρατηγικών κατά το στιγμιότυπο 1001-1500 ώρες



Γράφημα 3.51: Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα ως ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας για την περίπτωση 7, με χρήση των τριών διαφορετικών στρατηγικών κατά το στιγμιότυπο 1001-1500 ώρες

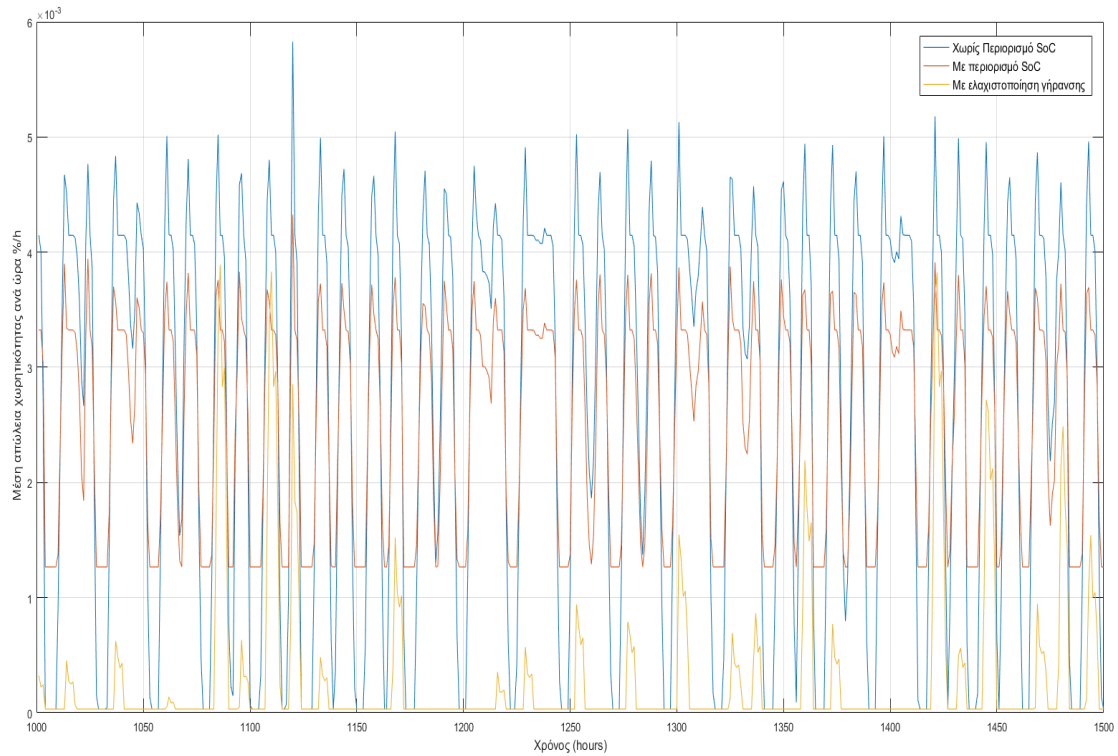
Για το στιγμιότυπο στο γράφημα 3.50, η συμπεριφορά της μπαταρίας φαίνεται παρόμοια με αυτή του γραφήματος 3.47. Ο αλγόριθμος γήρανσης, κρατά την στάθμη

σε χαμηλότερα επίπεδα. Σε αυτήν την περίπτωση τα μέγιστα δεν προσεγγίζουν τις άλλες 2 πολιτικές. Εμφανής είναι και εδώ η μείωση των επιμέρους βαθών εκφόρτισης



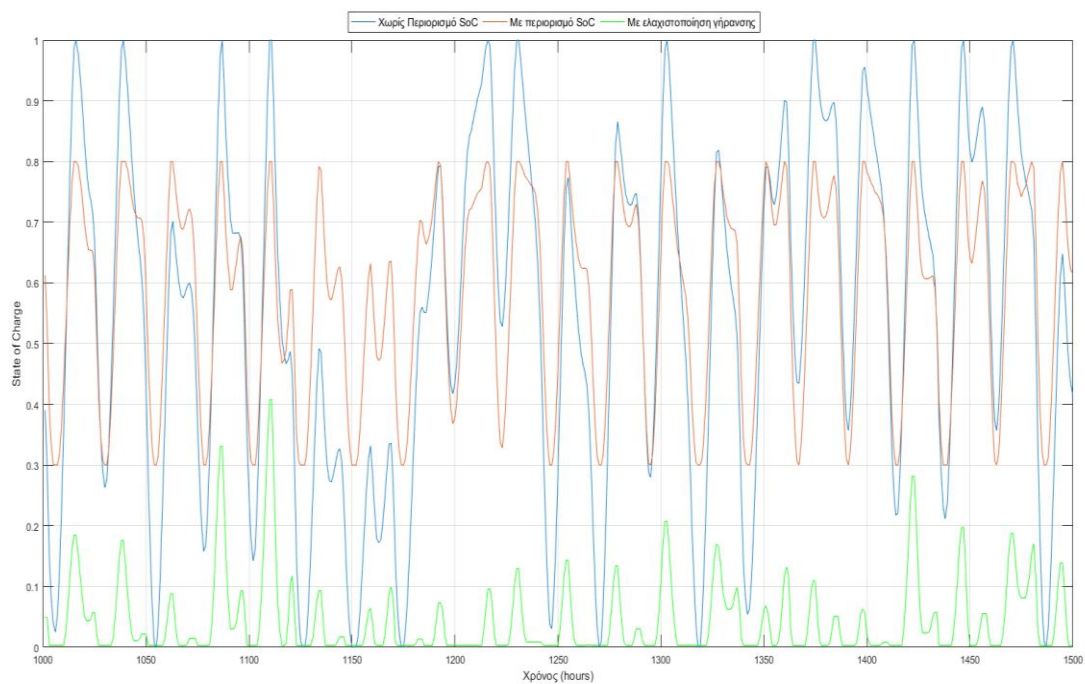
Γράφημα 3.52: Η στάθμη φόρτισης για την περίπτωση 1, με χρήση των τριών διαφορετικών στρατηγικών κατά το στιγμιότυπο 1001-1500 ώρες

Στο γράφημα 3.52, για την στάθμη φόρτισης της μικρότερης μπαταρίας, φαίνεται πως αλγόριθμος σε γενικές γραμμές κρατά την στάθμη φόρτισης χαμηλότερα από τις άλλες 2 στρατηγικές. Ωστόσο κατά τόπους, η SOC προσεγγίζει, ενώ σε μερικές περιπτώσεις είναι υψηλότερη από την στάθμη της πολιτικής με περιορισμό της SOC, επεκτείνοντας την ζωή της μπαταρίας έως τα 20 έτη περίπου.

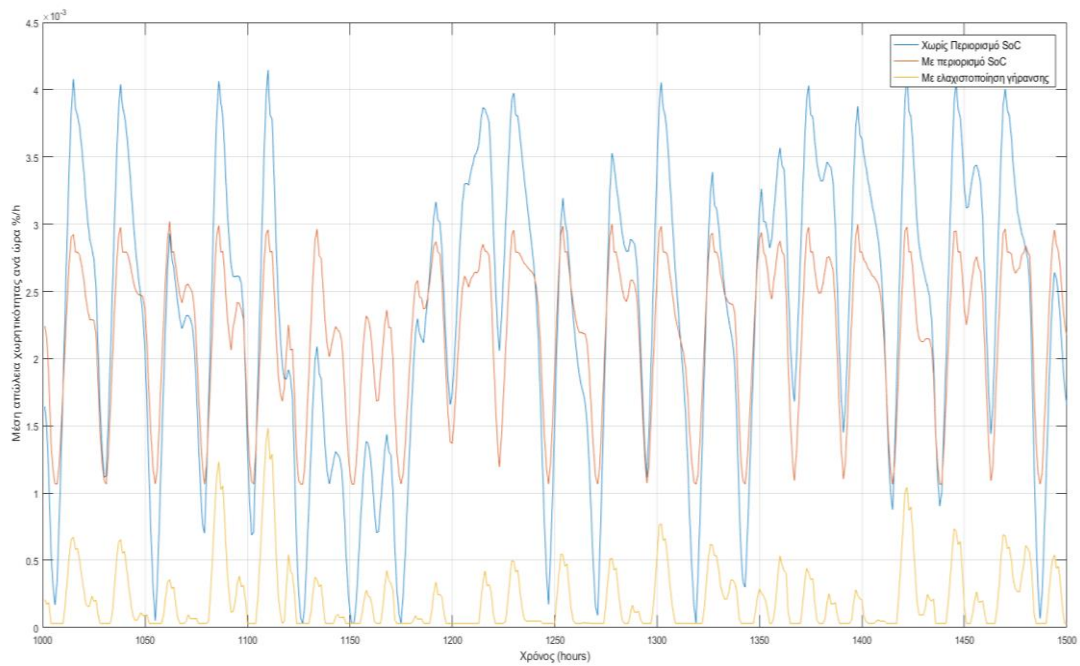


Γράφημα 3.53: Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα ως ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας για την περίπτωση 1, με χρήση των τριών διαφορετικών στρατηγικών κατά το στιγμιότυπο 1001-1500 ώρες

Η μέση απώλεια της χωρητικότητας της μπαταρίας εμφανίζεται σημαντικά μειωμένη στην περίπτωση χρήσης του αλγορίθμου γήρανσης.

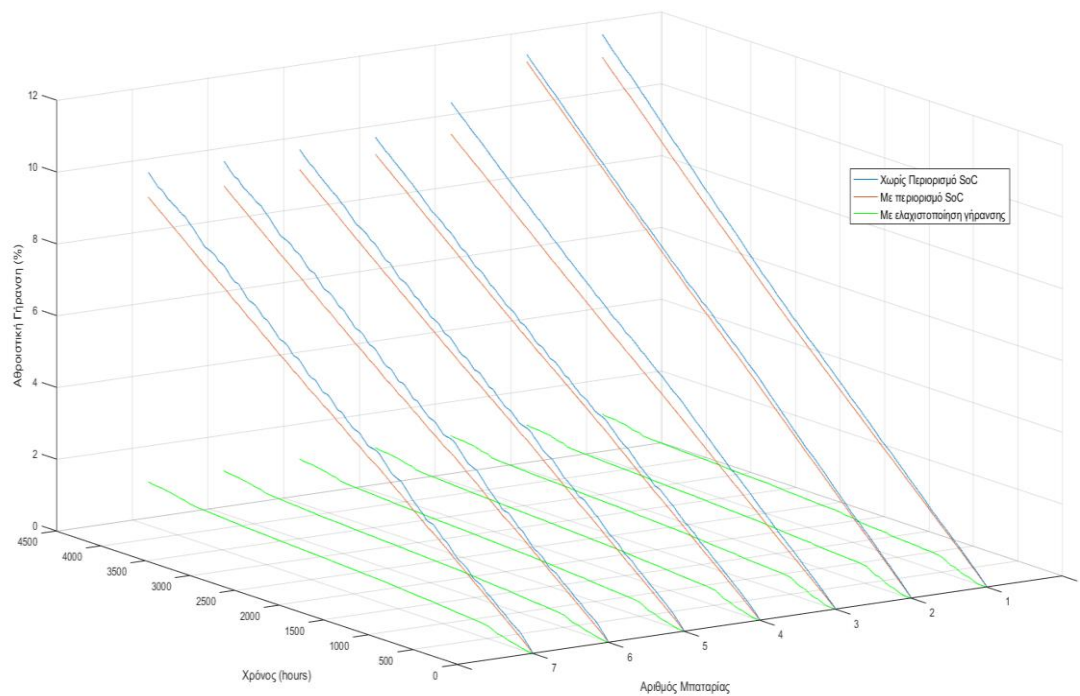


Γράφημα 3.53: Η στάθμη φόρτισης για την περίπτωση 4, με χρήση των τριών διαφορετικών στρατηγικών κατά το στιγμιότυπο 1001-1500 ώρες

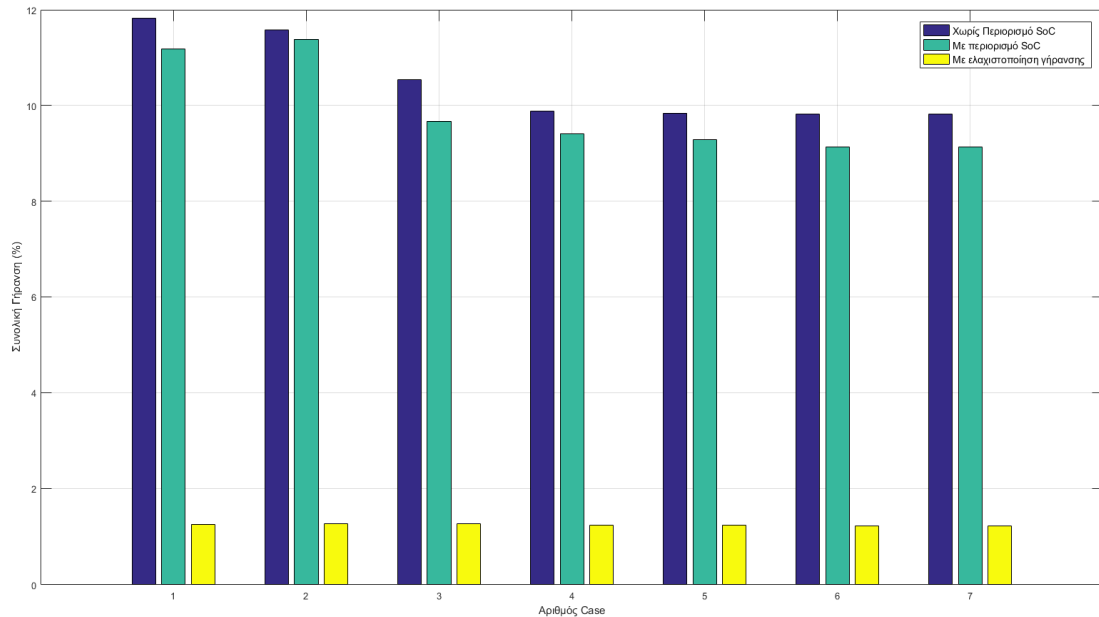


Γράφημα 3.54: Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα ως ποσοστό επί της συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας για την περίπτωση 4, με χρήση των τριών διαφορετικών στρατηγικών κατά το στιγμιότυπο 1001-1500 ώρες

Αντίστοιχα με την μπαταρία 7, διαμορφώνεται η συμπεριφορά της μπαταρίας 4 στα γραφήματα 3.53-3.54.



Γράφημα 3.55: Η αθροιστική γήρανση ως ποσοστό της ονομαστικής χωρητικότητας για όλες τις περιπτώσεις, για τις τρεις στρατηγικές φόρτισης



Γράφημα 3.56: Η συνολική γήρανση ως ποσοστό για όλες τις περιπτώσεις, για τις τρεις στρατηγικές φόρτισης

Στα Γράφημα 3.55 – 3.56 φαίνεται η δραματική επίδραση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης της γήρανσης στην συνολική απώλεια της χωρητικότητας λόγω γήρανσης στις 7 μπαταρίες που μελετήθηκαν. Η απώλεια είναι κανονικοποιημένη από την ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών για την άμεση σύγκρισή τους. Η διαφορά αγγίζει ακόμη και το 10% της συνολικής χωρητικότητας.

Ο αναμενόμενος χρόνος ζωής των 7 μπαταριών, όπως υπολογίστηκε για κάθε μπαταρία και κάθε στρατηγική χειρισμών. Τηρώντας το κριτήριο της απώλειας 50% της ονομαστικής χωρητικότητας, με τον αλγόριθμο ελαχιστοποίησης της γήρανσης επιτυγχάνεται χρόνος ζωής γύρω στα 20 έτη, όταν για τις υπόλοιπες 2 στρατηγικές ο αντίστοιχος αριθμός κυμαίνεται γύρω στα 2 έτη. Εμφανής είναι και η διαφορά της τάξης μεγέθους για το κριτήριο $EoL_{0.2}$ όπου χωρίς τον αλγόριθμο ο χρόνος ζωής των μπαταριών μετά βίας ξεπερνά το ένα έτος ενώ στις μικρότερες μπαταρίες επιτυγχάνεται χρόνος ζωής μικρότερος του έτους.

3.4.6 Ανάλυση ευαισθησίας της ελαχιστοποίησης της γήρανσης στον συντελεστή α της βελτιστοποίησης:

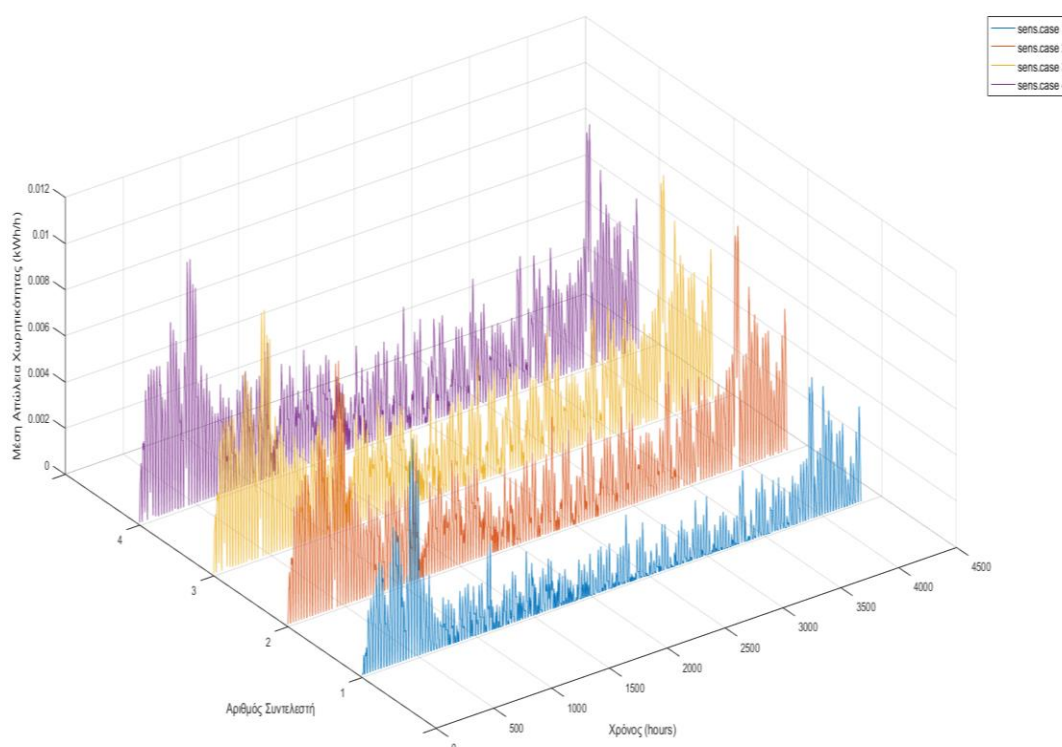
Κατά την κατασκευή του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης της γήρανσης έγινε η χρήση του συντελεστή α . Επί της ουσίας ο συντελεστής επιλέγεται μετά από μεγάλο αριθμό εκτελέσεων του προβλήματος βελτιστοποίησης. Στην Ενότητα 3.4.4 γίνεται χρήση του βέλτιστου συντελεστή. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για 4 διαφορετικές τιμές συντελεστή ώστε να γίνει αντιληπτή η

χρησιμότητά του. Στα παρακάτω χρησιμοποιείται η μπαταρία του Case 7. Ως α_1 επιλέγεται ο βέλτιστος συντελεστής.

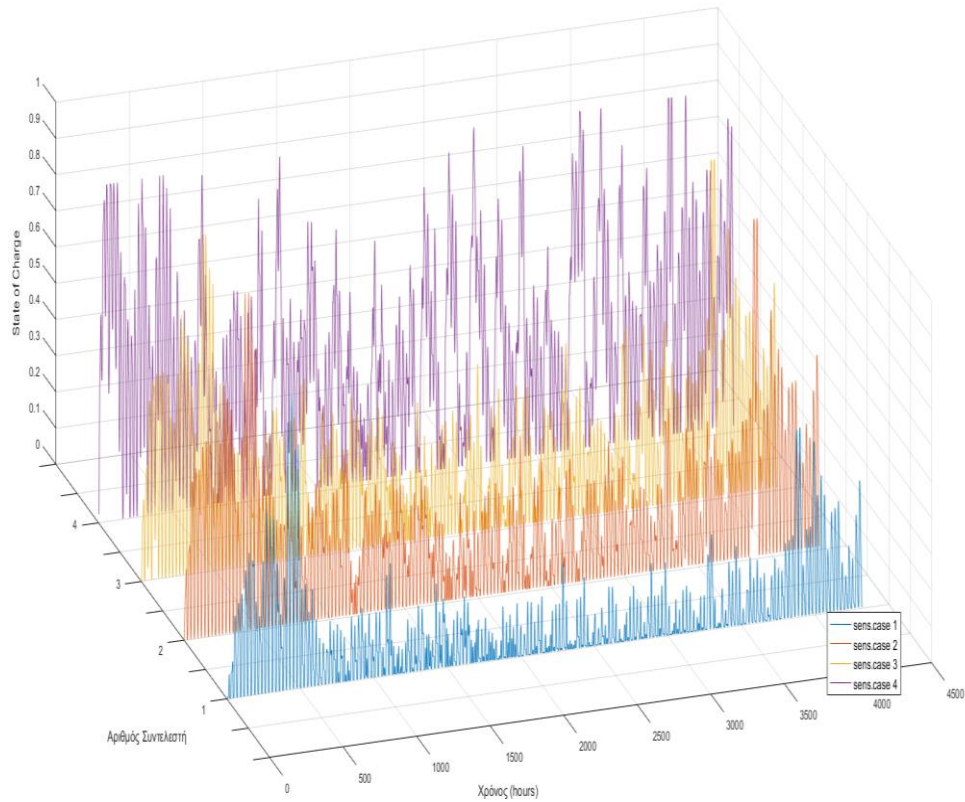
α	Συνολική Γήρανση (kWh)	Lifetime EoL _{0.2}	Lifetime EoL _{0.5}	Μέση Γήρανση (kWh/h)
$\alpha_1 = 2.5e7$	4.2204	8 χρόνια 106 ημ.	20 χρόνια 267 ημ.	9.77E-04
$\alpha_2 = 1e7$	8.9419	3 χρόνια 333 ημ.	9 χρόνια 286 ημ.	0.0021
$\alpha_3 = 7.5e6$	10.1993	3 χρόνια 157 ημ.	8 χρόνια 211 ημ.	0.0024
$\alpha_4 = 2e6$	17.8987	1 χρόνος 348 ημ.	4 χρόνια 324 ημ.	0.0041

Πίνακας 3.11: Τα αποτελέσματα για διαφορετικούς συντελεστές α

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε ένα διάγραμμα τα αποτελέσματα για τους διάφορους συντελεστές

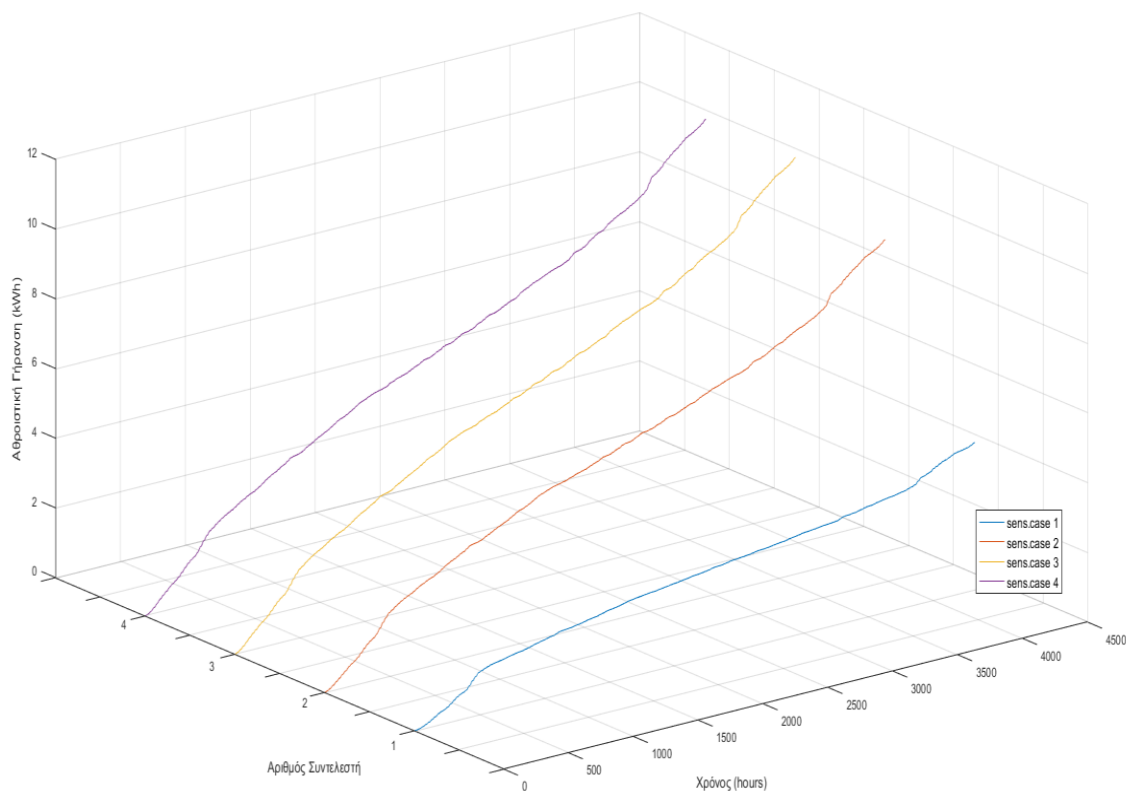


Γράφημα 3.57: Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα για την περίπτωση 7, για τους 4 διαφορετικούς συντελεστές



Γράφημα 3.58: Η στάθμη φόρτισης για την περίπτωση 7, για τους 4 διαφορετικούς συντελεστές

Στα γραφήματα 3.57 – 3.58 φαίνεται η επίπτωση στην μέση απώλεια χωρητικότητας και την στάθμη φόρτισης, η αύξηση της χρήση της μπαταρίας (μικρός συντελεστής α). Τα όρια χρήσης της μπαταρίας φαίνονται να χαλαρώνουν, με την χρήση της να αυξάνεται όσο ο συντελεστής στάθμισης μειώνεται. Το γράφημα της SOC, εμφανίζεται πυκνότερο με μεγαλύτερες ακραίες τιμές στο 3.57, ενώ ανάλογη είναι και η αύξηση της απώλεια χωρητικότητας για το ίδιο μοτίβο.

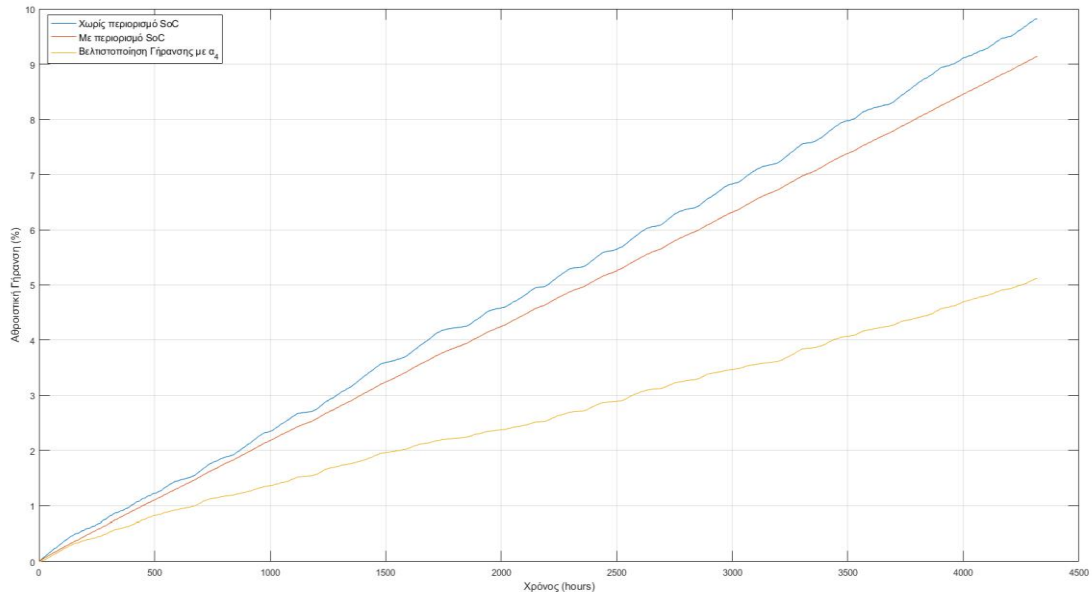


Γράφημα 3.59: Η στάθμη φόρτισης για την περίπτωση 7, για τους 4 διαφορετικούς συντελεστές

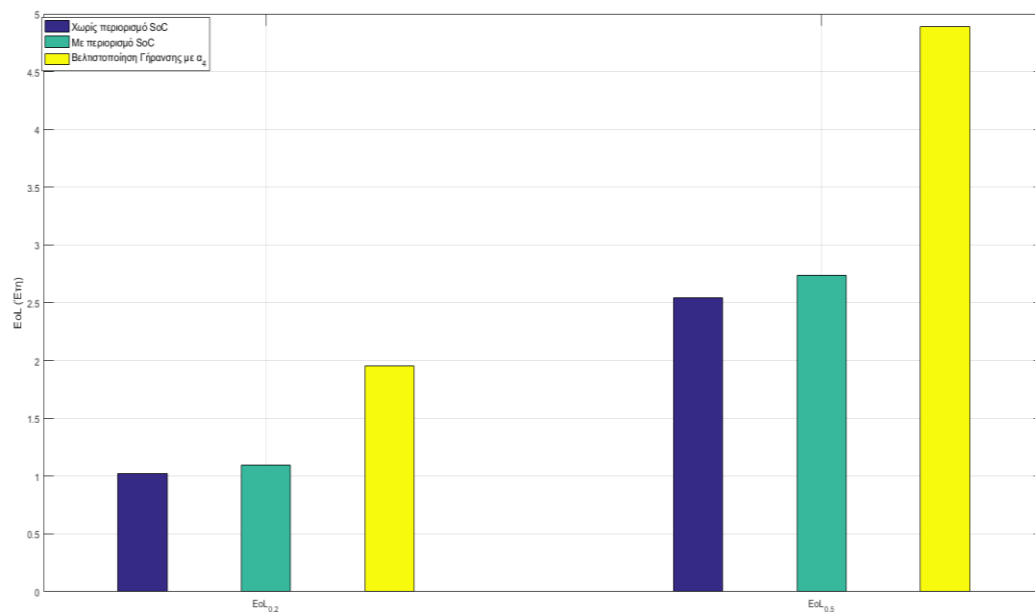
Στο γράφημα 3.59 είναι ξεκάθαρη η επίδραση της μεταβολής του συντελεστή στην συνολική γήρανση της μπαταρίας.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι ο συντελεστής βελτιστοποίησης ρυθμίζει την σχέση βελτιστοποίησης μεταξύ του μεγέθους της γήρανσης και αυτού του κόστους παραγωγής, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ο συντελεστής κόστους της απώλειας της μπαταρίας. Παρατηρώντας την συμπεριφορά της μπαταρίας κατά κάποιο τρόπο εκφράζει παράλληλα και την διείσδυση των μπαταριών στο σύστημα (μικρότερος συντελεστής, μεγαλύτερη χρήση της μπαταρίας, μεγαλύτερη απώλεια χωρητικότητας).

Στα παρακάτω γραφήματα γίνεται απεικόνιση της περίπτωσης χρήσης του συντελεστή α_4 όπου η χρήση της μπαταρίας προσεγγίζει αυτήν της περίπτωσης μη χρήσης του αλγορίθμου. Φαίνεται ότι ακόμη και για αυτήν την περίπτωση του συντελεστή, η συνολική γήρανση της μπαταρίας είναι μικρότερη.



Γράφημα 3.60: Η αθροιστική γήρανση για την περίπτωση 7, για τις 3 στρατηγικές που προαναφέρθηκαν με συντελεστή βελτιστοποίησης α_4



Γράφημα 3.61: Τα κριτήρια EoL για την περίπτωση 7, για τις 3 στρατηγικές που προαναφέρθηκαν με συντελεστή βελτιστοποίησης α_4

Στα παραπάνω γραφήματα 3.60 – 3.61 , γίνεται σύγκριση της συμπεριφοράς της μπαταρίας 7, για τον χειρότερο σχετικά με την γήρανση συντελεστή βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε. Ενώ η εξυπηρέτηση του φορτίου από την μπαταρία αγγίζει την τιμή που επιτυγχάνεται στις περιπτώσεις ελεύθερης ή περιορισμένης SOC, η συνολική γήρανση παρουσιάζει μεταβολή μεγαλύτερη του 50% ενώ ο αναμενόμενος χρόνος ζωής οριακά διπλασιάζεται για τα δύο κριτήρια EoL.

3.4.7 Διερεύνηση του αλγορίθμου για την εφαρμογή του σε μικρότερο χρονικό ορίζοντα

Για την μέχρι τώρα βελτιστοποίηση, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα ζήτησης ισχύος, καταγεγραμμένα στην βιβλιογραφία στοιχεία. Ενώ μια τέτοια προσέγγιση αρκεί για την αξιολόγηση του αλγορίθμου, σε ένα πραγματικό σύστημα η ακριβής πρόβλεψη του φορτίου σε βάθος 180 ημερών είναι αδύνατη.

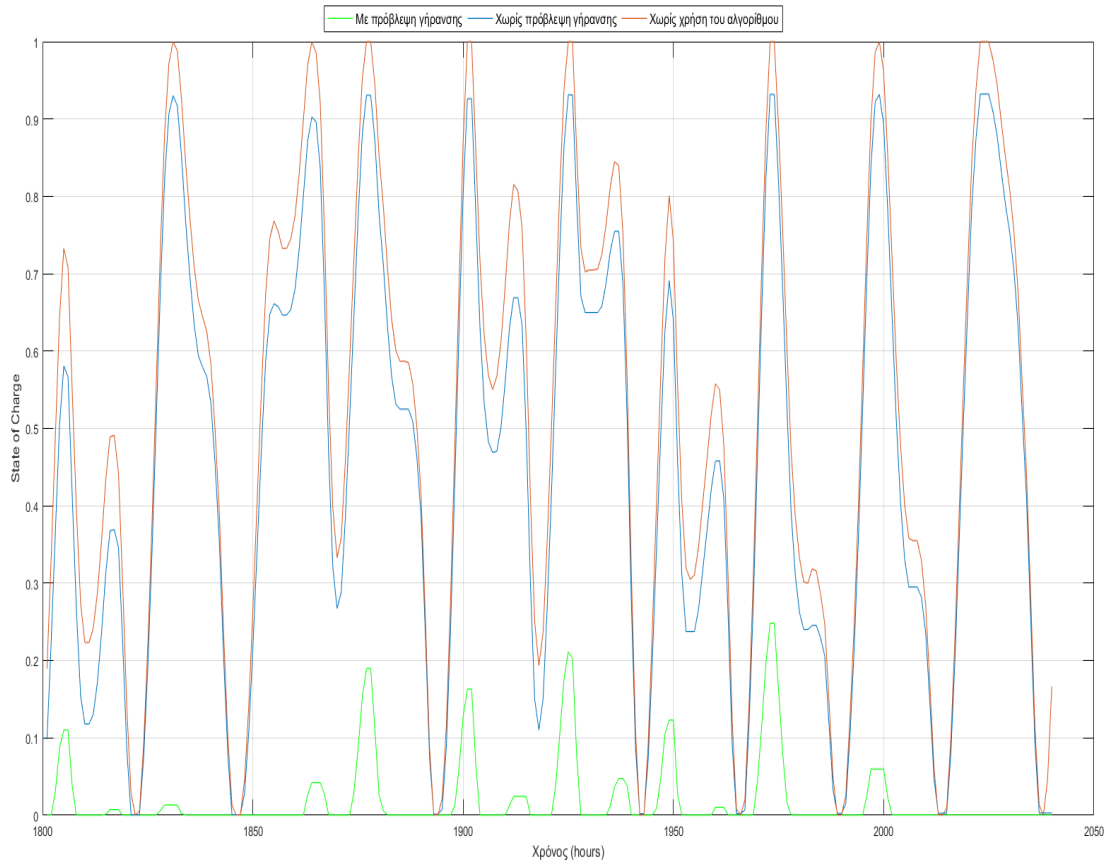
Στην προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου έγινε διερεύνηση του συντελεστή στάθμισης της συμπεριφοράς της γήρανσης. Τα αποτελέσματα για το κριτήριο EoL (επέκταση στην ουσία της ζωής της μπαταρίας) είναι εμφανή. Η μελέτη του κριτηρίου EoL βασίστηκε στο γεγονός ότι η συμπεριφορά της γήρανσης μετά από αρκετά μεγάλο αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου μπορεί να θεωρηθεί γραμμική [94]. Σε επίπεδο λίγων ημερών είναι κατανοητό, ότι οι λιγοστές επαναλήψεις του αλγορίθμου δεν επαρκούν για την μοντελοποίησή της γήρανσης.

Για την προσαρμογή του αλγορίθμου, είναι αναγκαίο, να λαμβάνεται υπόψη το παρελθόν, όπου κατά μία τυχαία χρονική στιγμή ή περίοδο όπου η πρόβλεψη του φορτίου είναι ακριβής, να είναι γνωστή η μέχρι εκείνη την στιγμή γήρανση της μπαταρίας. Μια άλλη προσθήκη μπορεί να είναι η πρόβλεψη της γήρανσης για τις υπόλοιπες χρονικές στιγμές έως ότου τα αποτελέσματα του αλγορίθμου να μπορούν να θεωρηθούν γραμμικά. Η εκτέλεση του αλγορίθμου με είσοδο την πρόβλεψη του φορτίου για την μελλοντική χρονική περίοδο μπορεί να δώσει μια εκτίμηση της πρόβλεψης της γήρανσης.

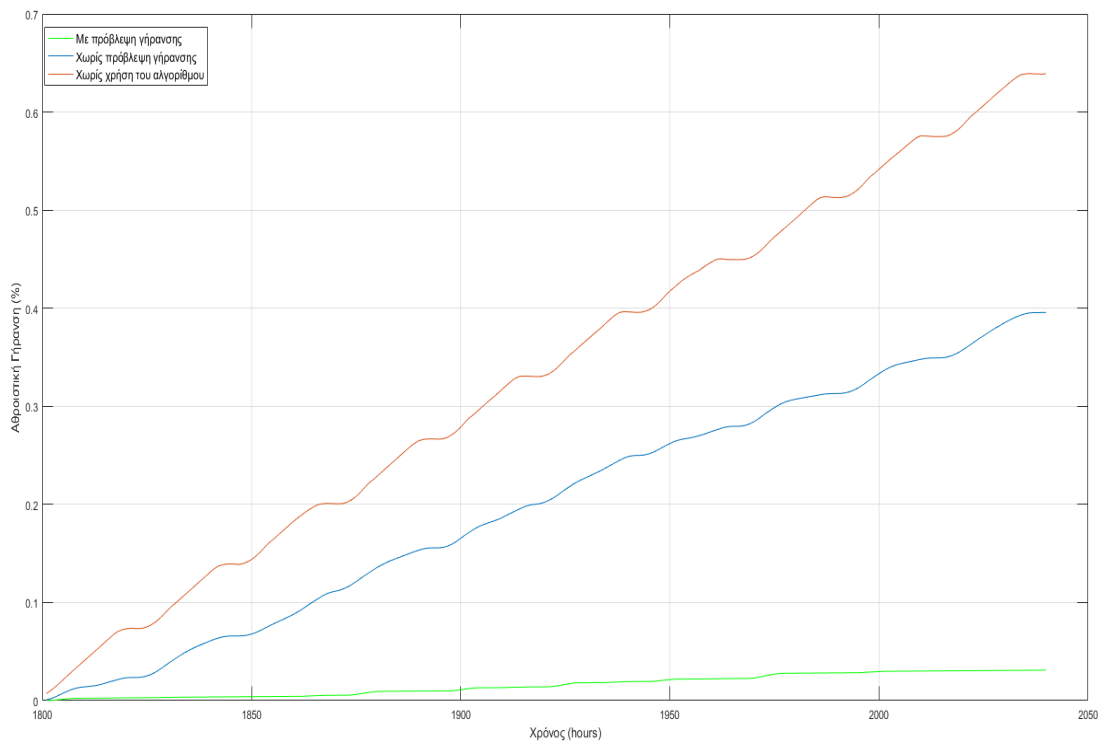
Παρακάτω γίνεται διερεύνηση για το 1^ο έτος λειτουργίας της μπαταρίας 3, των προηγούμενων ενοτήτων. Χρησιμοποιείται η καμπύλη φορτίου των προηγούμενων ενοτήτων. Ως χρόνος έναρξης της μελέτης θεωρείται η $t=1801$ ώρα, όπου θεωρείται δεδομένη αυθαίρετα η έως τότε γήρανση ίση με $Deg_{αρχ} = 0.7368 \%$ (η τιμή προέκυψε από την Ενότητα 3.4.3, ως αποτέλεσμα του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης της γήρανσης αλλά θα μπορούσε να είναι κάποια άλλη τιμή βασιζόμενη σε οποιοδήποτε άλλο μοτίβο χειρισμών της μπαταρίας). Το χρονικό διάστημα που η πρόβλεψη του φορτίου θεωρείται ακριβής θεωρούνται οι 10 ημέρες ενώ στην συνέχεια γίνεται αξιολόγηση και για την τρέχουσα ημέρα.

Αρχικά, θεωρείται αυθαίρετα, πως η συμπεριφορά της μπαταρίας μπορεί να θεωρηθεί γραμμική ως προς την γήρανση βασιζόμενοι στα αποτελέσματα του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης των δέκα ημερών. Έτσι ο συντελεστής στάθμισης του αλγορίθμου προσεγγίζεται, όμοια με την ενότητα 3.4.6, με στόχο την επέκταση του χρόνου ζωής της μπαταρίας βάσει του κριτηρίου $EoL_{0.5}$ στην τιμή που προέκυψε για την μπαταρία 3 στην ενότητα 3.4.3 (19 χρόνια και 286 ημέρες).

Στην συνέχεια, ως πρόβλεψη της γήρανσης θεωρούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την εφαρμογή του αλγορίθμου για τις 180 ημέρες λειτουργίας και ο συντελεστής στάθμισης προσεγγίζεται κατά τον ίδιο τρόπο, για την επίτευξη της επέκτασης ζωής της μπαταρίας 3, έως την τιμή που προαναφέρθηκε. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

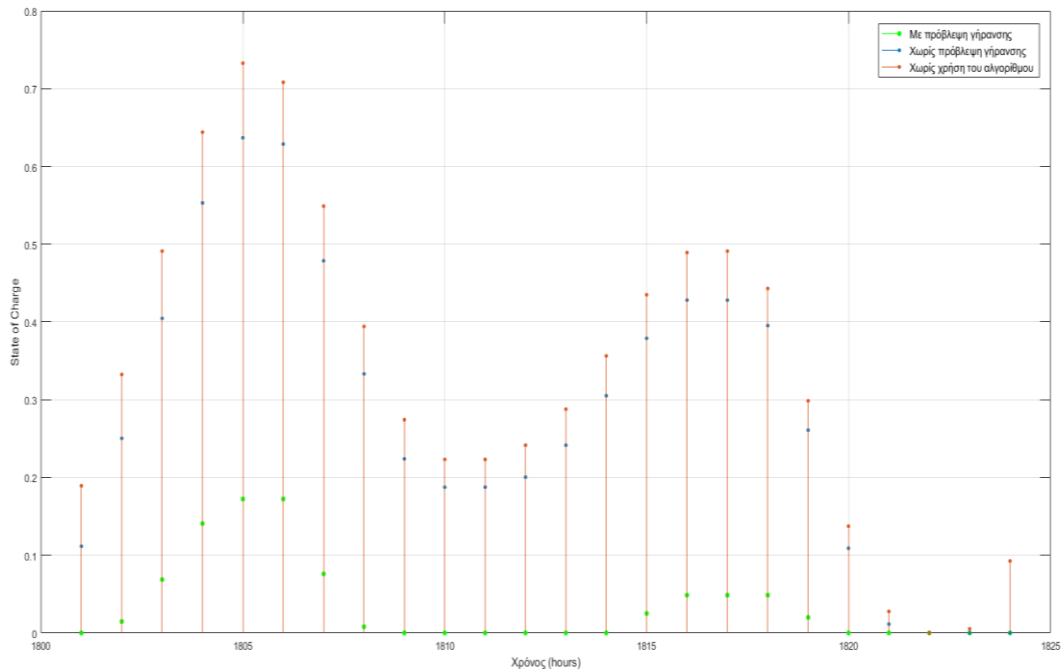


Γράφημα 3.62: Η Στάθμη φόρτισης για την μπαταρία 3 στην περίπτωση της μελέτης της γήρανσης για την περίοδο 10 ημερών

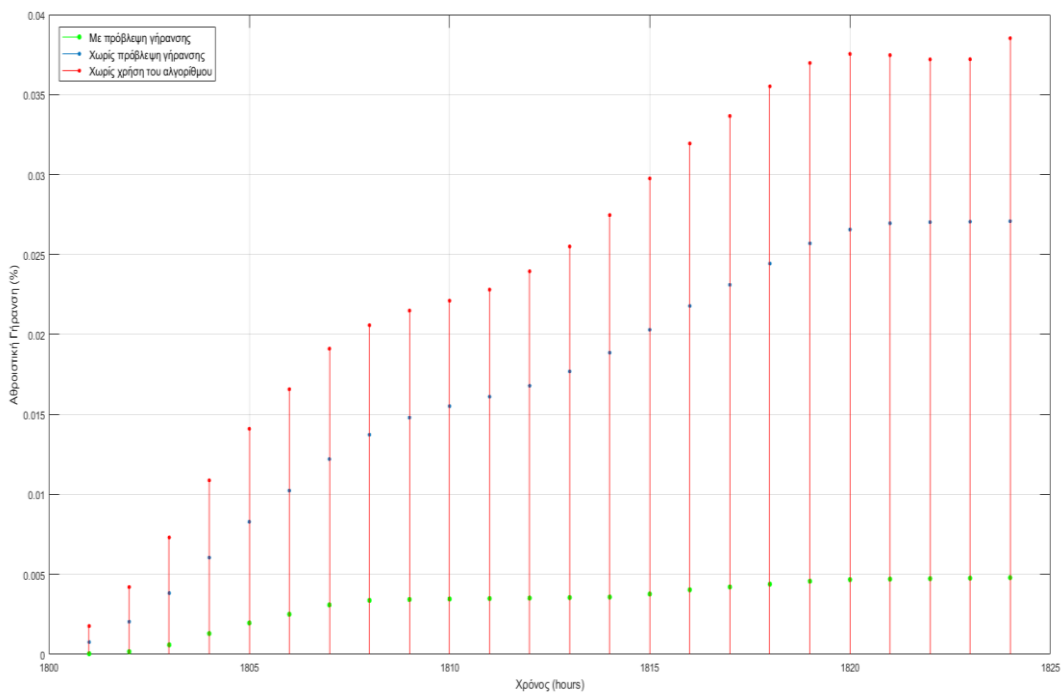


Γράφημα 3.63: Η γήρανση αθροιστικά για την 3 στην περίπτωση της μελέτης της γήρανσης για την περίοδο 10 ημερών

Για το διάστημα των δέκα ημερών φαίνεται στα παραπάνω γραφήματα η έντονη επιρροή της εισαγωγής της πρόβλεψης στη γήρανση για τις επόμενες 90 ημέρες. Παρακάτω γίνεται δοκιμή της φιλοσοφίας για το διάστημα 1 μέρας με χρόνο αφετηρίας την $t=1800h$.



Γράφημα 3.64: Η Στάθμη φόρτισης για την μπαταρία 3 στην περίπτωση της μελέτης της γήρανσης για την περίοδο 1 μέρας



Γράφημα 3.72: Η γήρανση αθροιστικά για την 3 στην περίπτωση της μελέτης της γήρανσης για την περίοδο 1 μέρας

Η διόρθωση της στάθμης φόρτισης είναι ακόμη πιο προφανής στην περίπτωση της τρέχουσας ημέρας (γράφημα 3.71) ενώ αντίστοιχη είναι και η επίδραση στην γήρανση της μπαταρίας.

Από τα αποτελέσματα διακρίνεται η αδυναμία του αλγορίθμου να εφαρμοστεί σε στιγμιαίο έλεγχο της μπαταρίας για την ελαχιστοποίησή της. Με τα παραπάνω φαίνεται η ανάγκη του συνδυασμού της εκτέλεσης του αλγορίθμου για το ζητούμενο διάστημα ακριβής πρόβλεψης του φορτίου, με την εισαγωγή αποτελεσμάτων της εφαρμογής του σε μελλοντικά φορτία, ενώ παράλληλα μια διαδικασία θα αναζητά τον βέλτιστο συντελεστή στάθμισης για τον δεδομένο στόχο διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Ο υπολογισμός της γήρανσης μπορεί να ενημερώνεται με κάθε νέα ακριβέστερη πρόβλεψη του φορτίου και της παραγωγής ώστε να βελτιστοποιείται η ακρίβειά της και να εισάγονται νέα δεδομένα γήρανσης κατά το πέρασ του χρόνου. Για τον υπολογισμό της επιθυμητής διάρκειας ζωής απαιτείται ξεχωριστή διαδικασία που να αξιολογεί τα οικονομικά δεδομένα του δικτύου και τους οικονομικούς δείκτες για την λειτουργία της μπαταρίας (Κόστος Επένδυσης, Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης κ.α.)

Κεφάλαιο 4: Το πρόβλημα της Βέλτιστης Ροής Ισχύος σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

4.1 Εισαγωγή

Για την αποδοτικότερη χρήση της γήρανσης της μπαταρίας σε ένα δίκτυο, απαιτείται η συνολική εκτίμηση των υπόλοιπων παραμέτρων του. Έτσι εκτός από την μελέτη που παρουσιάστηκε στο 3^ο Κεφάλαιο, που περιλάμβανε μόνο τους παράγοντες του κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, και της ζήτησής της, επιβάλλεται να εξετασθούν οι απώλειες και οι περιορισμοί του δικτύου. Μόνο με την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου, η βελτιστοποίηση του ρυθμού γήρανσης στις μονάδες αποθήκευσης αποκτά πραγματική αντιστοιχία σε ένα πραγματικό ΣΗΕ.

4.1.1 Ανάλυση και μελέτη Βέλτιστης Ροής Ισχύος

Η ζήτηση ενέργειας στον κόσμο αυξάνεται συνεχώς, ενώ ακόμη το 70% της συνολικής παραγωγής στηρίζεται σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, των οποίων τα κόστη υπόκεινται σε συνεχείς μεταβολές [110].

Εκ πρώτης όψεως η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας των εγκαταστάσεων αυτών επιτυγχάνεται με την Οικονομική Μελέτη (Economic Dispatch – ED) για το μέγεθος της παραγωγής ενέργειας που ικανοποιεί την καμπύλη της ζήτησης. Ο υπολογισμός όμως αυτός αγνοεί τις λεπτομέρειες και τις διαταραχές που μπορεί να προκληθούν στο εκάστοτε σύστημα. Λόγω της αδυναμίας βελτιστοποίησης των λειτουργιών ενός Σ.Η.Ε, η απλή οικονομική μελέτη ορίζοντας τα με απλό υπολογιστικά γραμμικό τρόπο, αντιστοιχίζει αναπόφευκτα τις απώλειες του δικτύου σε ανάγκη πρόσθετης παραγωγής ενέργειας για την ικανοποίηση του ισοζυγίου ισχύος [111].

Η μελέτη της Ροής Ισχύος (Power Flow – PF) από την άλλη, ενώ δεν συστηματοποιεί οικονομικά μεγέθη, βελτιστοποιεί την κατάσταση λειτουργίας του δικτύου ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες και διασφαλίζει την τήρηση των ορίων στους ζυγούς και τις γραμμές μεταφοράς.

Για τον λόγο αυτό είναι αναγκαία η μελέτη της βέλτιστης ροής Ισχύος (Optimal Power Flow – OPF) και όχι η μελέτη μιας απλής οικονομικής ανάλυσης χωρίς τον συνυπολογισμό του δικτύου. Η Βέλτιστη Ροή Ισχύος στην ουσία συνδυάζει τους υπολογισμούς της Οικονομικής Μελέτης (Economic Dispatch – ED) και της Μελέτης της Ροής Ισχύος (Power Flow – PF) ώστε τα δύο ξεχωριστά αυτά προβλήματα να λύνονται ταυτόχρονα [112]. Έτσι οι απώλειες και οι υπόλοιποι περιορισμοί που ισχύουν σε ένα δίκτυο αποτελούν μεταβλητές/δεδομένα για το πρόβλημα της οικονομικής μελέτης για την δεδομένη καμπύλη ζήτησης του φορτίου. Το OPF αποτελεί ένα εργαλείο σχεδιασμού/λειτουργίας με το οποίο διασφαλίζεται η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί ασφάλειας και λειτουργίας του δικτύου [113]. Σαν αποτέλεσμα, υπάρχει μια οικονομική πρόβλεψη σε χρηματικές μονάδες ανά μονάδα χρόνου, ενώ ταυτόχρονα ο χειριστής του δικτύου είναι σε θέση να γνωρίζει, τα φορτία των γραμμών και τα μεγέθη που αφορούν την έγχυση ισχύος και την τάση στον κάθε ζυγό.

4.2 Η διατύπωση του OPF προβλήματος

Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από ζυγούς (bus) ή κόμβους (nodes), οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω γραμμών. Η κατηγοριοποίηση των ζυγών γίνεται βάσει των χαρακτηριστικών τους. Ζυγοί τροφοδοσίας, με δυνατότητα κεντρικής παραγωγής ονομάζονται ζυγοί ταλάντωσης (slack bus). Οι ζυγοί που φέρουν τα όποια διασυνδεδεμένα φορτία ονομάζονται ζυγοί φορτίου (PQ bus), ενώ όπου υπάρχει διασυνδεδεμένη παραγωγή ονομάζονται ζυγοί παραγωγής (PV bus). Η ροή της ισχύος στο δίκτυο εξαρτάται κάθε στιγμή από την κατάσταση λειτουργίας του δικτύου.

4.2.1 Μαθηματική Μοντελοποίηση του OPF:

4.2.1.1 Στοιχεία Δικτύου:

Για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος είναι απαραίτητος ο ορισμός κάποιων μεγεθών που αφορούν την τοπολογία και τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Οι γραμμές του δικτύου μπορούν να συμβολιστούν με From – Το συμβολισμό, ενώ η αναφορά σε ζυγούς θα γίνεται με την χρήση του μοναδικού αριθμού που αντιστοιχεί σε αυτόν. Η γραμμή $(i,j) \in L$ ενώνει τους ζυγούς i και j με $i \in N$ και $j \in N$, όπου L το σύνολο των γραμμών και N το σύνολο των κόμβων στο δίκτυο.

Για κάθε ζυγό του ηλεκτρικού συστήματος αντιστοιχούν βασικά μεγέθη λειτουργίας και κατάστασης. Αυτά που απαιτούνται για την πλήρη πληροφορία και αποδοτική επίλυση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος είναι:

Τάση Ζυγού i :

$$\hat{V}_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (4.1)$$

Ζήτηση Φορτίου (φαινόμενη ισχύς) στον Ζυγό i :

$$\hat{S}_{d_i} = P_{d_i} + jQ_{d_i} \quad (4.2)$$

Παραγωγή Ισχύος (φαινόμενη) στον Ζυγό i :

$$\hat{S}_{g_i} = P_{g_i} + jQ_{g_i} \quad (4.3)$$

όπου $|V_i|$ το μέτρο της τάσης στον ζυγό i , δ_i η γωνία της τάσης στον ζυγό i , P_{d_i} , Q_{d_i} η πραγματική και άεργη, αντίστοιχα, ισχύς του φορτίου στον ζυγό i , P_{g_i} , Q_{g_i} η πραγματική και άεργη, αντίστοιχα, ισχύς που παράγεται στον ζυγό i .

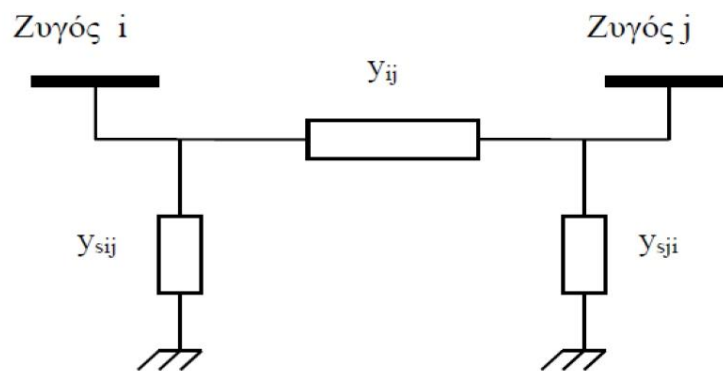
Κάθε γραμμή (i,j) δύναται να αναπαρασταθεί με το ανά φάση ισοδύναμο Π μοντέλο [114], ενώ η αγωγιμότητά της υπολογίζεται από την σχέση (4.4) παρακάτω:

$$\hat{Y}_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} \quad (4.4)$$

Θεωρούμε το πραγματικό και το μιγαδικό μέρος της αγωγιμότητας παρακάτω:

$$\hat{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (4.5)$$

Με R_{ij}, X_{ij} αντίσταση και αντίδραση σειράς της γραμμής (i,j)



Σχήμα 4.1: Το ισοδύναμο Π της γραμμής [115].

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, για την γραμμή (i,j) που συνδέει τους ζυγούς i και j ορίζονται τα παρακάτω:

Αγωγιμότητα σειράς	Y_{ij}
Εγκάρσια αγωγιμότητα στην έναρξη	Y_{sij}
Εγκάρσια αγωγιμότητα στην αφετηρία	Y_{sji}

Πίνακας 4.1: Αγωγιμότητες γραμμής

Τα στοιχεία του πίνακα 4.1 υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις, ενώ για την απλοποίηση του προβλήματος οι αγωγιμότητες ως προς την γη, θεωρούνται μηδενικές.

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (4.6)$$

$$y_{sij} = g_{sij} + jb_{sij} = 0 \quad (4.7)$$

$$y_{sji} = g_{sji} + jb_{sji} = 0 \quad (4.8)$$

Έτσι με την τιμή της αγωγιμότητας για κάθε γραμμή $(i,j) \in L$ που συνδέει τους $i, j \in N$ κόμβους, δημιουργείται ο πίνακας αγωγιμότητας Y_{bus} του δικτύου, ο οποίος έχει μέγεθος $N \times N$ και είναι της μορφής:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & \cdots & Y_{NN} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Έχοντας ορίσει την τάση των ζυγών και την αγωγιμότητα των γραμμών που τους συνδέουν, αναγκαία είναι πλέον η πληροφορία για την ένταση του ρεύματος για τον κάθε ζυγό.. Έτσι για το Ρεύμα Έγχυσης στον ζυγό i , I_i έχουμε:

$$\hat{I}_i = \hat{I}_{i1}\hat{V}_1 + \hat{I}_{i2}\hat{V}_2 \dots + \hat{I}_{iN}\hat{V}_{iN} = \sum_{k=1}^N \hat{Y}_{ik}\hat{V}_k \quad (4.10)$$

Με γνωστή την τάση και το ρεύμα εγχύσεως σε κάθε ζυγό μπορεί να οριστεί η έγχυση μιγαδικής ισχύς στον ζυγό i στο ανά μονάδα σύστημα (α.μ. / p.u.) :

$$\hat{S}_i = P_i + jQ_i = \hat{V}_i\hat{I}_i^* \quad (4.11)$$

Όπου \hat{I}_i^* ο συζυγής μιγαδικός της έντασης του ρεύματος στον ζυγό i , \hat{I}_i .

4.2.2.2 Κατάστρωση των εξισώσεων ροής φορτίου

Για την μοντελοποίηση της ροής ισχύος στο εκάστοτε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, σε κάθε ζυγό i ορίζεται το μέγεθος της έγχυσης ισχύος, ως το διανυσματικό άθροισμα της εισερχόμενης και της εξερχόμενης ροής ισχύος στον ζυγό i . Με άλλα λόγια το ισοζύγιο μιγαδικής ισχύος στο ζυγό i είναι:

$$\hat{S}_i = \hat{S}_{g_i} + \hat{S}_{d_i} \stackrel{(4.11)}{\iff} P_i + jQ_i = P_{g_i} - P_{d_i} + j(Q_{g_i} - Q_{d_i}) \quad (4.12)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.11),(4.10),(4.1) διαδοχικά έχουμε:

$$\hat{S}_i = \hat{V}_i \hat{I}_i^* \stackrel{(4.10)}{\iff} \quad (4.13)$$

$$\hat{S}_i = \hat{V}_i \left(\sum_{j=1}^N \hat{Y}_{ij} \hat{V}_j \right)^* \stackrel{(4.1)}{\iff} \quad (4.14)$$

$$\hat{S}_i = (|V_i| \angle \delta_i) \sum_{j=1}^N \hat{Y}_{ij}^* (|V_{kj}| \angle \delta_j)^* \quad (4.15)$$

Εδώ χρησιμοποιώντας τον του ορισμού της αγωγιμότητας (4.4), ξαναγράφουμε την (4.15):

$$\hat{S}_i = (|V_i| \angle \delta_i) \sum_{j=1}^N (G_{ij} + jB_{ij})^* |V_j| \angle -\delta_j \quad (4.16)$$

Βάζοντας μέσα στο άθροισμα τον πρώτο όρο έχουμε:

$$\hat{S}_i = \sum_{j=1}^N |V_i| (G_{ij} + jB_{ij})^* |V_j| \angle -\delta_j \angle \delta_i \quad (4.17)$$

Ξαναγράφοντας την (4.17) έχουμε:

$$\hat{S}_i = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| (G_{ij} - jB_{ij}) \angle \delta_i - \delta_j \quad (4.18)$$

Από την εξίσωση του Euler για τους μιγαδικούς, όπως εμφανίζεται και στην (4.1):

$$\hat{V}_i = |V_i|(\cos\delta_i + jsin\delta_i)$$

Η (4.18) γίνεται αντίστοιχα:

$$\hat{S}_i = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| (G_{ij} - jB_{ik}) [\cos(\delta_i - \delta_j) + jsin(\delta_i - \delta_j)] \quad (4.19)$$

Κάνοντας τους αλγεβρικούς υπολογισμούς μέσα στο όρισμα του αθροίσματος της (4.19) καταλήγουμε:

$$\hat{S}_i = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] + j \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (4.20)$$

Από την (4.11) για την μιγαδική ισχύ σε ζυγό i :

$$\hat{S}_i = P_i + jQ_i \stackrel{(4.20)}{\iff} \quad (4.22)$$

$$P_i + jQ_i = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] + j \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)]$$

Εξισώνοντας τα μιγαδικά και πραγματικά μέρη της (4.22) έχουμε:

$$P_i = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (4.23)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (4.24)$$

Για την ροή της ισχύος στις γραμμές μεταφοράς στο ανά μονάδα σύστημα (α.μ./ρ.υ.), αντίστοιχα με την (4.11), για την γραμμή (i,j) ∈ L που ενώνει τους ζυγούς i και j με i ∈ N και j ∈ N, ισχύει [116]:

$$\hat{S}_{ij} = g_{ij}|V_i|^2 - |V_i| |V_j| [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] + j \{-b_{ij}|V_i|^2 - |V_i| |V_j| [g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)]\} \quad (4.25)$$

όπου:

$$G_{ij} + jB_{ij} = -g_{ij} + -jb_{ij} \quad (4.26)$$

$$g_{ij} = g_{ji} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad (4.27)$$

$$b_{ij} = b_{ji} = \frac{-X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad (4.28)$$

Οπότε λόγω της $\hat{S}_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij}$, εξισώνοντας τελικά τα πραγματικά και φανταστικά μέρη από την (4.25) εξάγουμε:

$$P_{ij} = g_{ij}V_i^2 - [|V_i| |V_j| g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (4.29)$$

$$Q_{ij} = -b_{ij}V_i^2 - [|V_i| |V_j| g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (4.30)$$

Οι εξισώσεις (4.23), (4.24) ονομάζονται Εξισώσεις Ροής Φορτίου [116] και μαζί με τις (4.29),(4.30) είναι το βασικό κομμάτι απ' όπου ξεκινά η επίλυση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος.

4.3 Γραμμικοποίηση του OPF προβλήματος

Στο δίκτυο για το οποίο γίνεται η εύρεση της βέλτιστης ροής ισχύος, γνωρίζουμε συνήθως την έγχυση Μιγαδικής Ισχύος σε κάθε κόμβο, όπως αυτή προκύπτει από το εκάστοτε ισοζύγιο ισχύος. Άγνωστες μεταβλητές παραμένουν το μέτρο και η γωνία της τάσης των ζυγών. Για την επίλυση του προβλήματος ως έχει, απαιτείται η ταυτόχρονη λύση μη γραμμικών εξισώσεων. Είναι κατανοητό ότι για ένα δίκτυο N ζυγών οι μη γραμμικές εξισώσεις απαιτούν ταυτόχρονη επίλυση είναι 2N. Για τον λόγο αυτό, υπάρχει μια τεράστια γκάμα εργαλείων και τεχνικών που χρησιμοποιούνται από

επιστήμονες και ερευνητές για την λύση του προβλήματος OPF. Από το 1981 που γίνεται μελέτη του προβλήματος, έχει γίνει χρήση της Μεθόδου Παραγώγων με χρήση Langrange, της Μεθόδου Newton, Γραμμικού Προγραμματισμού, Τετραγωνικής Μεθόδου, Εσωτερικού Σημείου (IP Method) καθώς και τεχνικών δανειζόμενων από βιολογικές επιστήμες: Τεχνητής Νοημοσύνης και Γενετικών Αλγορίθμων (AI method), Βελτιστοποίησης με Particle Swarm (PSO method), ακόμα και τεχνικών με χρήση Artificial Bee Colony [117].

Στην παρούσα μελέτη, επιλέγεται ο γραμμικός προγραμματισμός για την επίλυση του OPF προβλήματος. Συνήθως, για να λυθεί γραμμικά το πρόβλημα, οι ερευνητές προβαίνουν σε προσεγγιστικές απλοποιήσεις σε σχέση με την αντίσταση των γραμμών και την άεργο ισχύ [116], που δεν έχουν όμως καθολική εφαρμογή σε όλα τα δίκτυα και αποδεικνύεται ότι παραβλέπουν αρκετά μεγάλο μέρος της πληροφορίας του δικτύου με αποτέλεσμα να γίνονται ανακριβή [117]. Στο παρόν γίνεται γραμμικοποίηση του προβλήματος με την χρήση του αναπτύγματος Taylor. Στην βιβλιογραφία η μέθοδος αναφέρεται ως Taylor Series Linearization (TSL) [118].

4.3.1 Γραμμικοποίηση με χρήση αναπτύγματος Taylor (TLS)

Η τεχνική αυτή συνιστά την γραμμική προσέγγιση των μη γραμμικών όρων της συνάρτησης f τοπικά γύρω από ένα δεδομένο σημείο. Για την γραμμικοποίηση χρησιμοποιείται ένα σημείο ισορροπίας x τέτοιο ώστε $f(\bar{x}) = 0$ και το ανάπτυγμα Taylor 1^{ου} βαθμού της f [119,120].

$$f(x) = f(\bar{x}) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x}) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2f}{dx^2} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x})^2 + \dots + \frac{1}{n} \left. \frac{d^n f}{dx^n} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x})^n \quad (4.31)$$

Τοπικά, για x πολύ κοντά στο \bar{x} οι μεγαλύτερης τάξεως όροι θα είναι σχεδόν μηδενικοί οπότε και απαλείφονται οδηγώντας στην προσεγγιστική απλούστευση, οπότε για $n > 0$, έχουμε $\frac{1}{n} \left. \frac{d^n f}{dx^n} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x})^n = 0$ και η (4.31) παίρνει την μορφή:

$$f(x) \cong f(\bar{x}) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x}) \quad (4.32)$$

Εφόσον εξορισμού $f(\bar{x}) = 0$, η μη γραμμική διαφορική εξίσωση $\dot{x} = f(x)$, γύρω από το σημείο ισορροπίας μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$\dot{x} = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x}) \quad (4.33)$$

Ορίζοντας $\alpha = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=\bar{x}}$ η (4.33) παίρνει την μορφή:

$$\dot{x} = \alpha(x - \bar{x}) \quad (4.34)$$

Οπότε η μέθοδος για x_1, x_2, \dots, x_i μεταβλητές και f_i συναρτήσεις συστηματοποιείται ως εξής :

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_i) \cong \sum_{j=1}^i \left[f_i(\bar{x}_j) + \frac{\theta f_i}{\theta x_j} \Big|_{x_j=\bar{x}_j} (x_j - \bar{x}_j) \right] \quad (4.35)$$

Όπου $\frac{\theta f_i}{\theta x_j} \Big|_{x_j=\bar{x}_j} = \alpha, \beta, \gamma, \dots$ για $i = 1, 2, 3 \dots$

Επιστρέφοντας στις εξισώσεις (4.23),(4.24),(4.29),(4.30) που αποτελούν τις θεμελιώδεις f_i του συστήματος εξισώσεων προς γραμμικοποίηση, παρατηρείται ότι είναι συναρτήσεις τριών μεταβλητών $|V_i|, |V_j|, (\delta_i - \delta_j)$:

Οπότε η (4.38) για τρεις μεταβλητές γράφεται:

$$f(x_1, x_2, x_3) \cong f(x, y, z) + \frac{\theta f}{\theta x_1} \Big|_{x_1=x} (x_1 - x) + \frac{\theta f}{\theta x_2} \Big|_{x_2=y} (x_2 - y) + \frac{\theta f}{\theta x_3} \Big|_{x_3=z} (x_3 - z) \quad (4.36)$$

Γνωρίζουμε ότι η διαφορά στις γωνίες δ_i, δ_j των τάσεων των ζυγών i και j με $i \in N$ και $j \in N$, σε ένα δίκτυο προσεγγίζει πολύ μικρές τιμές, οπότε γραμμική προσέγγιση των τριγωνομετρικών συναρτήσεων $\cos(x)$ και $\sin(x)$ με $x = \delta_i - \delta_j$ γύρω από το μηδέν μπορεί να θεωρηθεί:

$$\cos(\delta_i - \delta_j) \xrightarrow{\delta_i - \delta_j \cong 0} 1 \quad (4.37)$$

$$\sin(\delta_i - \delta_j) \xrightarrow{\delta_i - \delta_j \cong 0} \delta_i - \delta_j \quad (4.38)$$

Εφόσον βρισκόμαστε στο ανά μονάδα σύστημα, οι τιμές των μέτρων των τάσεων των κόμβων $|V_i|, |V_j|$ δεν θα απέχουν πολύ από την τιμή 1.0 α.μ. κατά την τυπική λειτουργία του δικτύου. Εδώ γραμμικοποιώντας με χρήση της προαναφερθείσας διαδικασίας και της σχέσης (4.32) τον όρο V_i^2 των (4.29), (4.30) γύρω από το σημείο $K(x) = (1)$, λαμβάνουμε την προσέγγιση:

$$V_i^2 = 2|V_i| - 1 \quad (4.39)$$

4.3.3 Κατάστρωση Γραμμικοποιημένων Εξισώσεων Ροής Φορτίου

Με τις γραμμικοποιήσεις (4.36)-(4.39) που υπολογίστηκαν στις ενότητες 4.3.2 και 4.3.1 οι εξισώσεις της ροής ισχύος του δικτύου (4.23), (4.24), (4.29), (4,30) γραμμικοποιούνται ως εξής:

$$P_i = \sum_{j=1}^N (|V_i| + |V_j| - 1)G_{ij} + B_{ij}(\delta_i - \delta_j) \quad (4.40)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^N G_{ij}(\delta_i - \delta_j) - B_{ij}(|V_i| + |V_j| - 1) \quad (4.41)$$

$$P_{ij} = g_{ij}(2|V_i| - 1) - g_{ij}(|V_i| + |V_j| - 1) - b_{ij}(\delta_i - \delta_j) \quad (4.42)$$

$$Q_{ij} = -b_{ij}(2|V_i| - 1) - g_{ij}(\delta_i - \delta_j) + b_{ij}(|V_i| + |V_j| - 1) \quad (4.43)$$

Οπότε με αφετηρία τις εξισώσεις (4.47)-(4.50) καταστρώνεται ο συνολικός αλγόριθμος του OPF προβλήματος.

4.4 Κατασκευή αλγορίθμου βέλτιστης ροής ισχύος

Για την κατασκευή του συνολικού αλγορίθμου θα πρέπει να τεθούν υπόψιν όλοι οι πιθανοί περιορισμοί που ισχύουν στο δίκτυο. Στην παρούσα εργασία η μελέτη της βέλτιστης ροής ισχύος γίνεται με γραμμικό προγραμματισμό οπότε οι εξισώσεις γράφονται σε κατάλληλη μορφή.

Η αντικειμενική συνάρτηση που θα βελτιστοποιεί ο αλγόριθμος θα είναι το κόστος λειτουργίας των μονάδων παραγωγής ενός δικτύου:

$$\min: F(N) = \sum_{i=1}^N C_{g,i} * P_{g,i}, \quad N: \text{ο αριθμός των ζυγών} \quad (4.44)$$

sbj to:

$$P_i = \sum_{j=1}^N (|V_i| + |V_j| - 1)G_{ij} + B_{ij}(\delta_i - \delta_j) \quad (4.45)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^N G_{ij}(\delta_i - \delta_j) - B_{ij}(|V_i| + |V_j| - 1) \quad (4.46)$$

$$P_{ij} = g_{ij}(2|V_i| - 1) - g_{ij}(|V_i| + |V_j| - 1) - b_{ij}(\delta_i - \delta_j) \quad (4.47)$$

$$Q_{ij} = -b_{ij}(2|V_i| - 1) - g_{ij}(\delta_i - \delta_j) + b_{ij}(|V_i| + |V_j| - 1) \quad (4.48)$$

$$|V|_{slack\ bus} = 1\ p.u. \quad (4.49)$$

$$\delta_{slack\ bus} = 0\ rad \quad (4.50)$$

$$0.95\ p.u. \leq |V_i| \leq 1.05\ p.u. \quad i \in (N - slack\ bus) \quad (4.51)$$

$$0 \leq P_{g,i} \leq P_{g,max} \quad (4.52)$$

$$0 \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,max} \quad (4.53)$$

$$P_g - P_{d,i} = P_i \quad (4.54)$$

$$Q_g - Q_d = Q_i \quad (4.55)$$

Όπου $|V|_{slack\ bus}$: η τάση του ζυγού ταλάντωσης, $\delta_{slack\ bus}$: η γωνία της τάσης του ζυγού ταλάντωσης, P_g, Q_g : η παραγωγή των γεννητριών σε ενεργό και άεργο ισχύ, P_d, Q_d : Η ζήτηση ενεργού και έργου ισχύος, $P_{g,max}, Q_{g,max}$: τα όρια της παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος, $S_{ij,max}$: το όριο της γραμμής μεταφοράς σε ροή Φαινόμενης Ισχύος. Επίσης $i, j \in N$

Οι (4.49),(4.50) αποτελούν τους περιορισμούς του ζυγού αναφοράς, η (4.51) ορίζει το όριο της διακύμανσης των τάσεων των ζυγών, οι (4.52), (4.53) αποτελούν τους περιορισμούς του δικτύου σε ότι αφορά τα όρια των εγκαταστάσεων παραγωγής, ο (4.54),(4.55) αποτελούν το ισοζύγιο ισχύος.

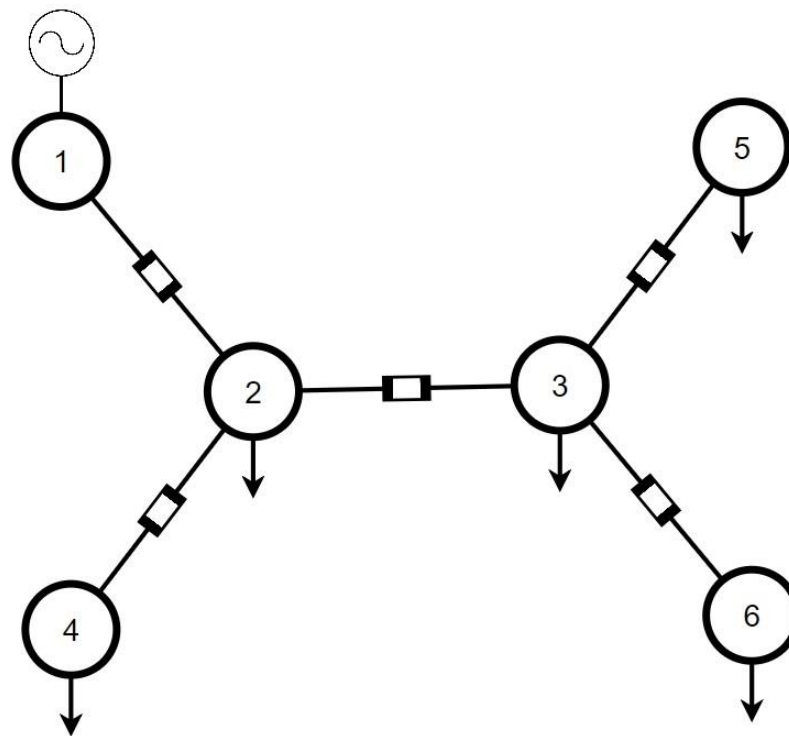
4.5 Μελέτη Αξιοπιστίας Αλγορίθμου Ροής Ισχύος

Ο αλγόριθμος που δημιουργήθηκε για την λύση του OPF προβλήματος, δημιουργήθηκε σε κώδικα κι εκτελέστηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB, με την βοήθεια των εργαλείων Matpower, Yalmip και του επιλυτή Gurobi.

Για την επικύρωση της βελτιστοποίησης συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου για χρονικό ορίζοντα 1 μονάδας χρόνου, σε 10 δίκτυα από την βιβλιοθήκη του Matpower και εκτιμήθηκε το σφάλμα από τις αντίστοιχες τιμές της έτοιμης συνάρτησης $runpf()$, που υλοποιείται με την μέθοδο του Newton και είναι διαθέσιμη στους πόρους του Matpower. Παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του αλγορίθμου για την λειτουργία 2 δικτύων.

4.5.1 Case study - Δίκτυο 6 ζυγών

Το δίκτυο 6 ζυγών [3] που χρησιμοποιήθηκε έχει την τοπολογία του Σχήματος 4.2 που δημιουργήθηκε με το εργαλείο STAC[10]:



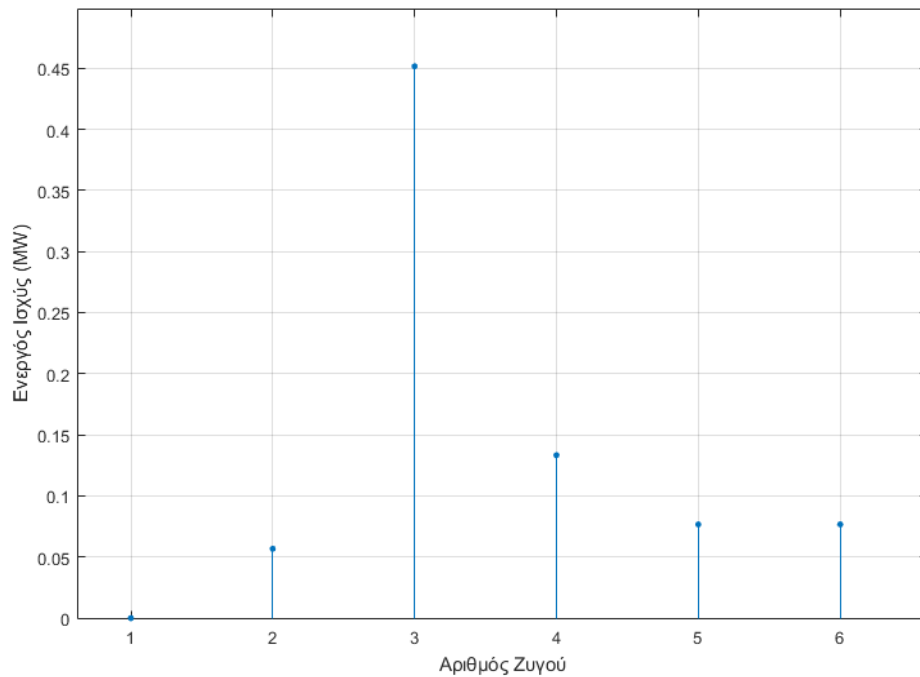
Σχήμα 4.2: Case Study – Το Δίκτυο 6 Ζυγών

Το εικονιζόμενο σύστημα παρουσιάζεται παρακάτω:

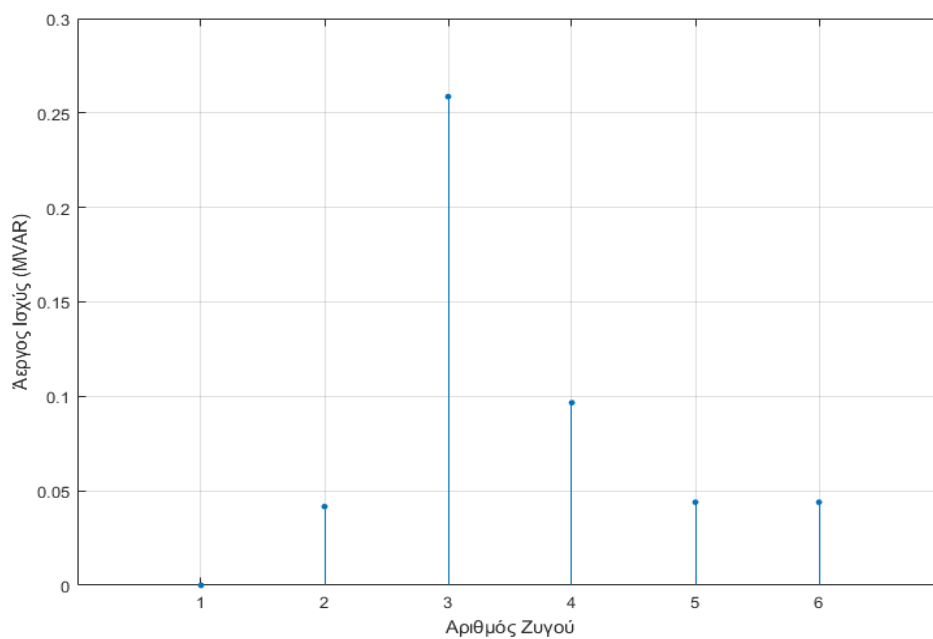
Ισχύς Βάσης S_b	5 MVA	
Τάση Βάσης V_b	4.16kV	
Ζυγός Αναφοράς N_0	1	
Αριθμός Ζυγών	6	
Αριθμός Γραμμών	5	
Συνδέσεις μεταξύ ζυγών - Γραμμές	r γραμμής (p.u)	x γραμμής (p.u.)
1 – 2	0.030643	0.02443
2 – 3	0.020352	0.065311
2 – 4	0.016199	0.020800
3 – 5	0.018386	0.014658
3 – 6	0.018386	0.014658
Ζήτηση Ισχύος ανά ζυγό	Ενεργός Ισχύς P_d (MW)	Άεργος Ισχύς Q_d (MVAR)
Ζυγός 1	0	0
Ζυγός 2	0.056667	0.041667
Ζυγός 3	0.451667	0.258667
Ζυγός 4	0.133333	0.096667
Ζυγός 5	0.076667	0.044000
Ζυγός 6	0.076667	0.044000

Πίνακας 4.2: Στοιχεία του Δικτύου 6 ζυγών

Για την καλύτερη εποπτεία των φορτίων, αυτά φαίνονται παρακάτω:



Γράφημα 4.1: Ζήτηση Ενεργού Ισχύος στους ζυγούς



Γράφημα 4.2: Ζήτηση Άεργου Ισχύος στους ζυγούς

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγόριθμου για το Σ.Η.Ε των έξι ζυγών συγκεντρώνονται παρακάτω, στον Πίνακα 4.3:

Συνολική Παραγωγή από τον ζυγό αναφοράς		Τιμή
Ενεργός Ισχύς P_i		0.7950010 MW
Άεργος Ισχύς Q_i		0.4849374 MVAR
Μέση τιμή Έγχυσης Ισχύος στους ζυγούς:		Τιμή
Ενεργός Ισχύς P_i		0.15900020 MW
Άεργος Ισχύς Q_i		0.0970002 MVAR
Μέγιστη Τιμή Έγχυσης Ισχύος	Αριθμός Ζυγού	Τιμή
Ενεργός Ισχύς P_i	3	0.4516670 MW
Άεργος Ισχύς Q_i	3	0.2586670 MVAR
Ελάχιστη Τιμή Έγχυσης Ισχύος	Αριθμός Ζυγού	Τιμή
Ενεργός Ισχύς P_i	2	0.0566670 MW
Άεργος Ισχύς Q_i	2	0.0416670 MVAR
Μέγιστη Τάση	Αριθμός Ζυγού	Τιμή
Κατά Μέτρο $ V_i $	2	0.992758 p.u.
Κατά απόλυτη γωνία $\delta_i /$ (μέγιστη απόκλιση από το 0)	5,6	0.007467 rads
Ελάχιστη Τάση	Αριθμός Ζυγού	Τιμή
Κατά Μέτρο $ V_i $	5,6	0.985357 p.u.
Κατά απόλυτη γωνία $\delta_i /$ (ελάχιστη απόκλιση από το 0)	2	9.1236e-04 rads

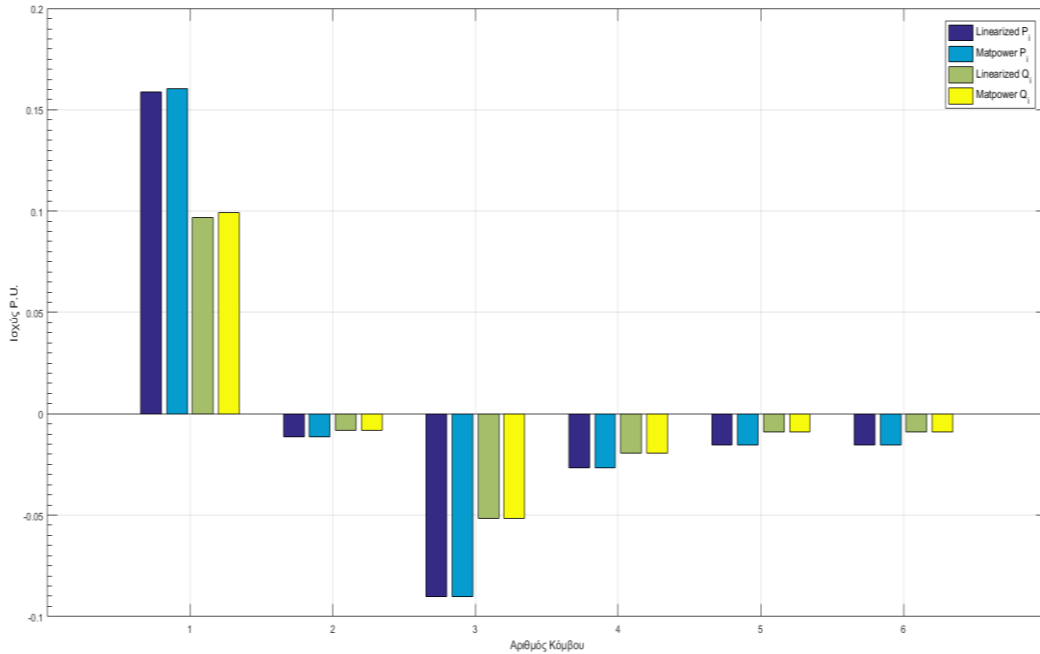
Πίνακας 4.3:Αποτελέσματα Υπολογισμού Ροής Φορτίου

Στην συνέχεια γίνεται εκτέλεση της συνάρτησης runpf() για το ίδιο δίκτυο. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

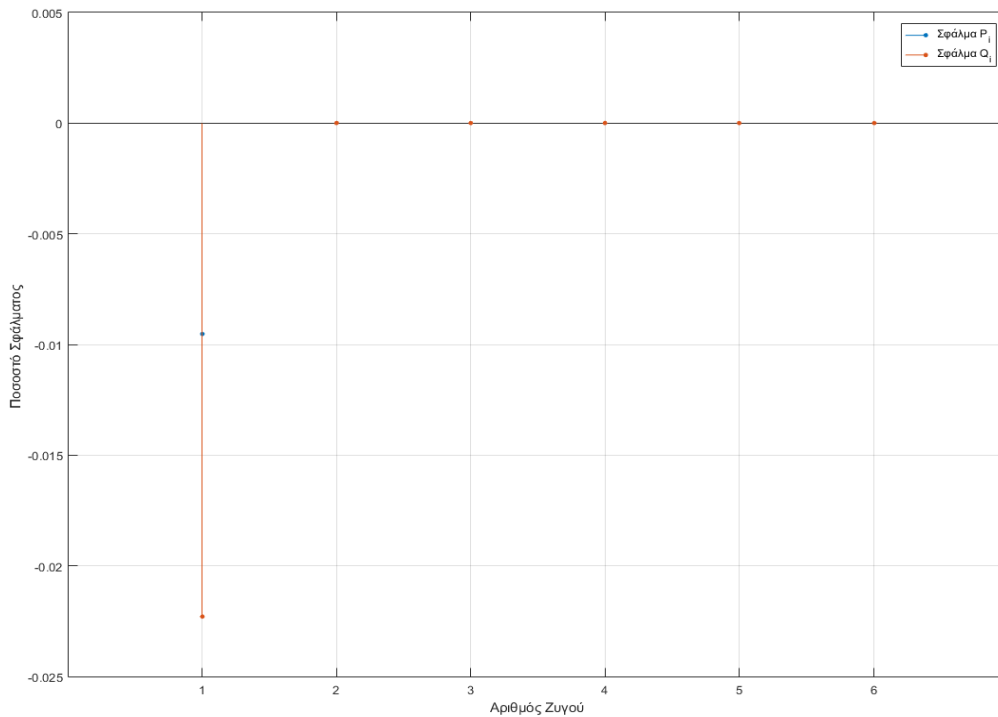
Συνολική Παραγωγή από τον ζυγό αναφοράς		Τιμή
Ενεργός Ισχύς P_i		0.8026434 MW
Άεργος Ισχύς Q_i		0.4959887 MVAR
Μέση τιμή Έγχυσης Ισχύος στους ζυγούς:		Τιμή
Ενεργός Ισχύς P_i		0.1605286 MW
Άεργος Ισχύς Q_i		0.0991978MVAR
Μέγιστη Τάση	Αριθμός Ζυγού	Τιμή
Κατά Μέτρο $ V_i $	2	0.992657 p.u.
Κατά απόλυτη γωνία $\delta_i /$ (μέγιστη απόκλιση από το 0)	5,6	0.007589 rads
Ελάχιστη Τάση	Αριθμός Ζυγού	Τιμή
Κατά Μέτρο $ V_i $	5,6	0.985125 p.u.
Κατά απόλυτη γωνία $\delta_i /$ (ελάχιστη απόκλιση από το 0)	2	8.8850e-04 rads

Πίνακας 4.4: Τα αποτελέσματα της runpf

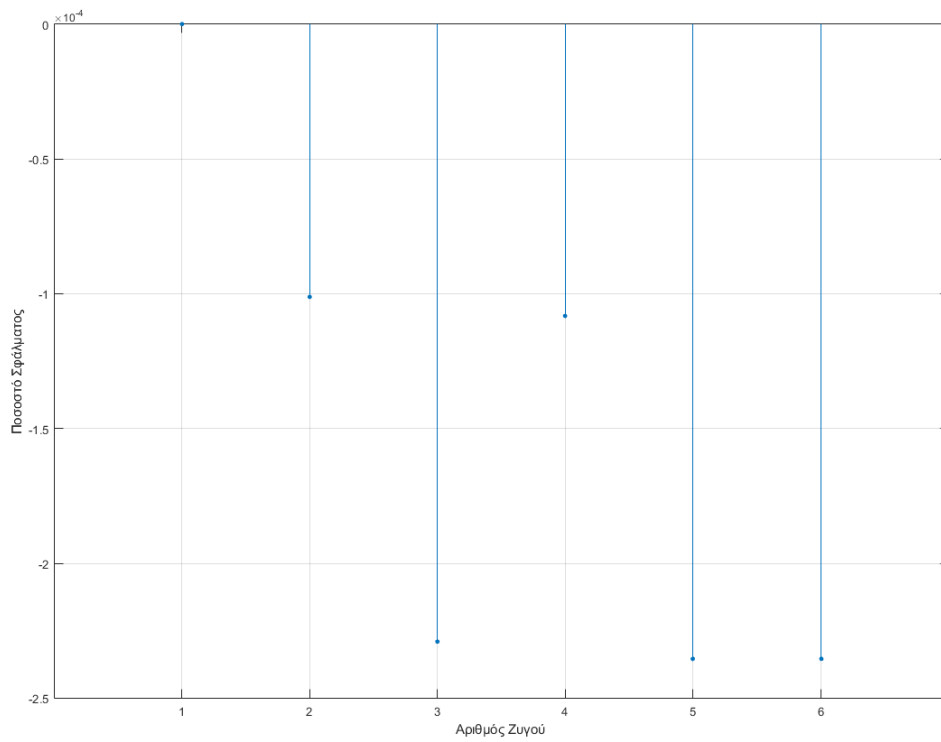
Για την επικύρωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων όπως προαναφέρθηκε γίνεται εκτίμηση του Σφάλματος των τιμών του αλγορίθμου που κατασκευάστηκε σε προηγούμενη Ενότητα (4.4) με τις τιμές που αποτελούν την έξοδο της συνάρτησης runpf του Matpower. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων φαίνεται στα παρακάτω γραφήματα:



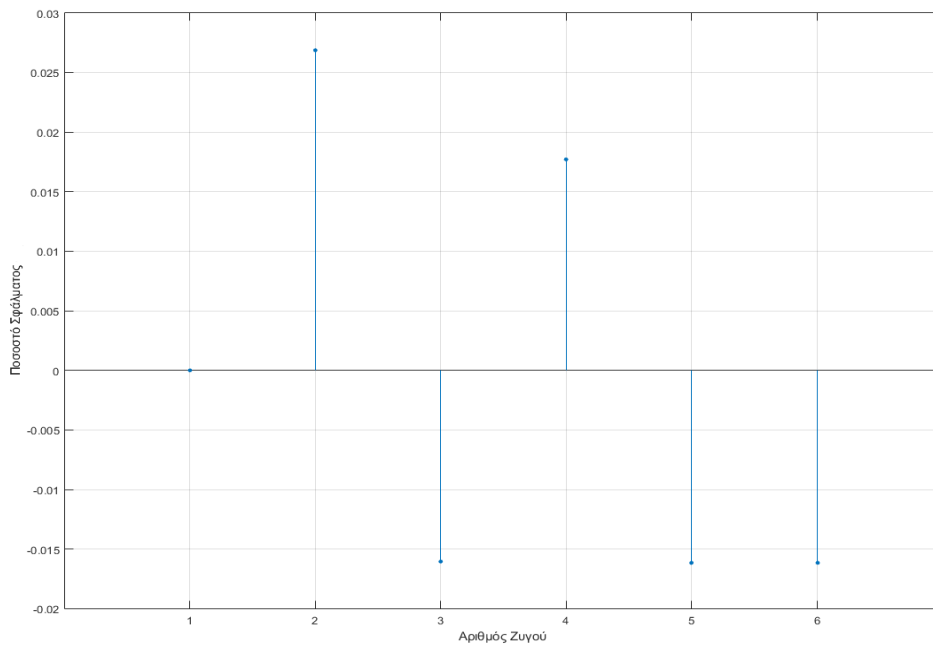
Γράφημα 4.7: Οι τιμές της Έγχυσης Ισχύος P_i , Q_i σε κόμβο



Γράφημα 4.8: Το ποσοστιαίο σφάλμα της Έγχυσης Ισχύος P_i , Q_i σε κόμβο



Γράφημα 4.9: Το ποσοστιαίο σφάλμα της τιμής της τάσης $|V_i|$ σε ζυγό



Γράφημα 4.10: Το ποσοστιαίο σφάλμα της γωνίας δ_i της τάσης σε ζυγό

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι ακραίες τιμές και η μέση τιμή του σφάλματος για τους 6 ζυγούς:

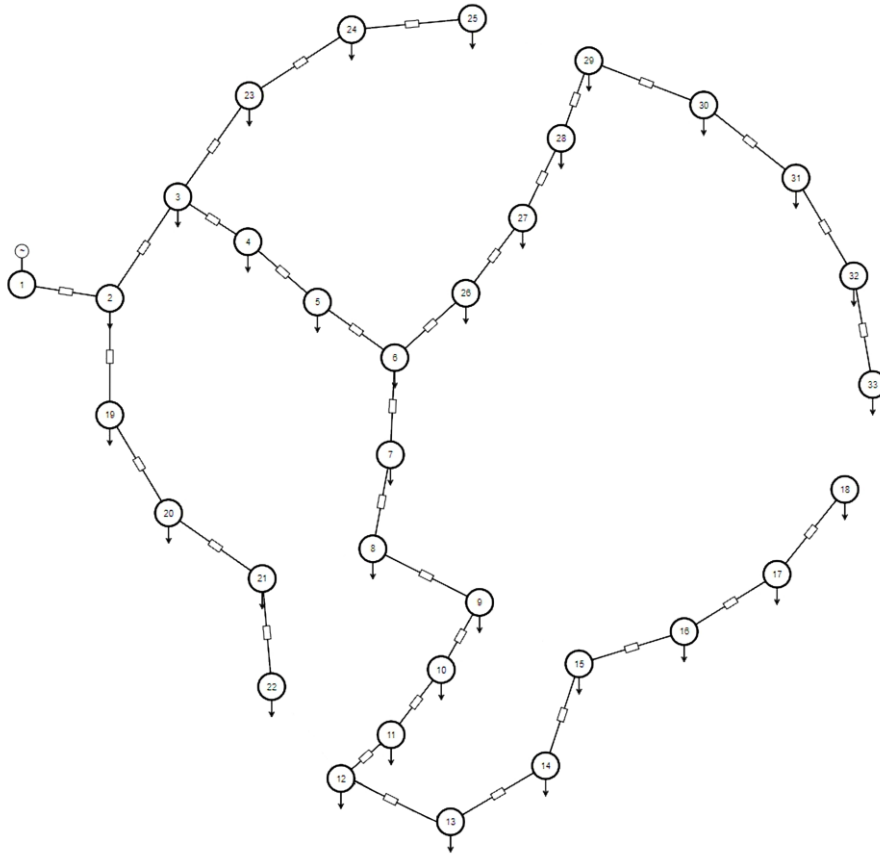
Σφάλμα (απόλυτο ποσοστό):	Τιμή	Ζυγός
Μέτρου Τάσης		
Μέγιστο	2.3542e-04	5,6
Ελάχιστο	1.0118e-04	2
Μέση τιμή	1.515e-04	
Γωνίας Τάσης		
Μέγιστο	0.0268602	2
Ελάχιστο	0.01604430	3
Μέση τιμή	0.01548665	
Ενεργού Ισχύος		
Μέγιστο	0.00952152	1
Ελάχιστο	2.16e-14	4
Μέση τιμή	0.001586920	
Άεργου Ισχύος		
Μέγιστο	0.022281535	1
Ελάχιστο	9.87e-15	3
Μέση τιμή	0.003713589	

Πίνακας 4.5: Στατιστικά στοιχεία των σφαλμάτων των τιμών

Από τα αποτελέσματα της σύγκρισης των τιμών, φαίνεται πως το σφάλμα των τιμών του αλγορίθμου OPF που δημιουργήθηκε είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις τιμές της συνάρτησης runrf για το Δίκτυο 6 ζυγών.

4.5.2 Case study - Δίκτυο 33 ζυγών

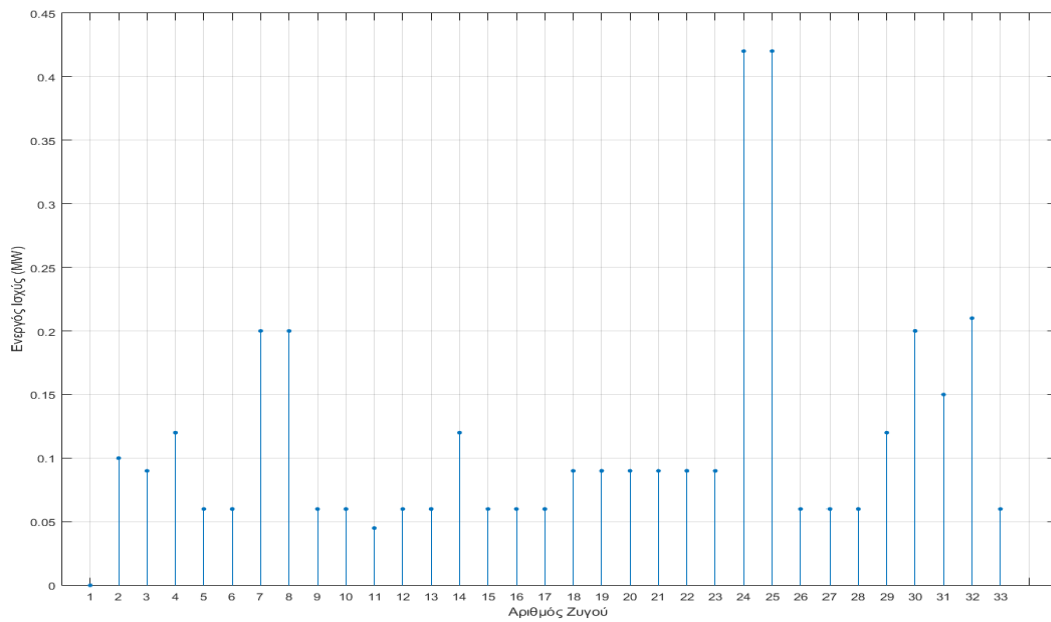
Το δίκτυο 33 ζυγών που χρησιμοποιήθηκε [3] έχει την τοπολογία του Σχήματος 4.3 που δημιουργήθηκε με το εργαλείο STAC[10]:



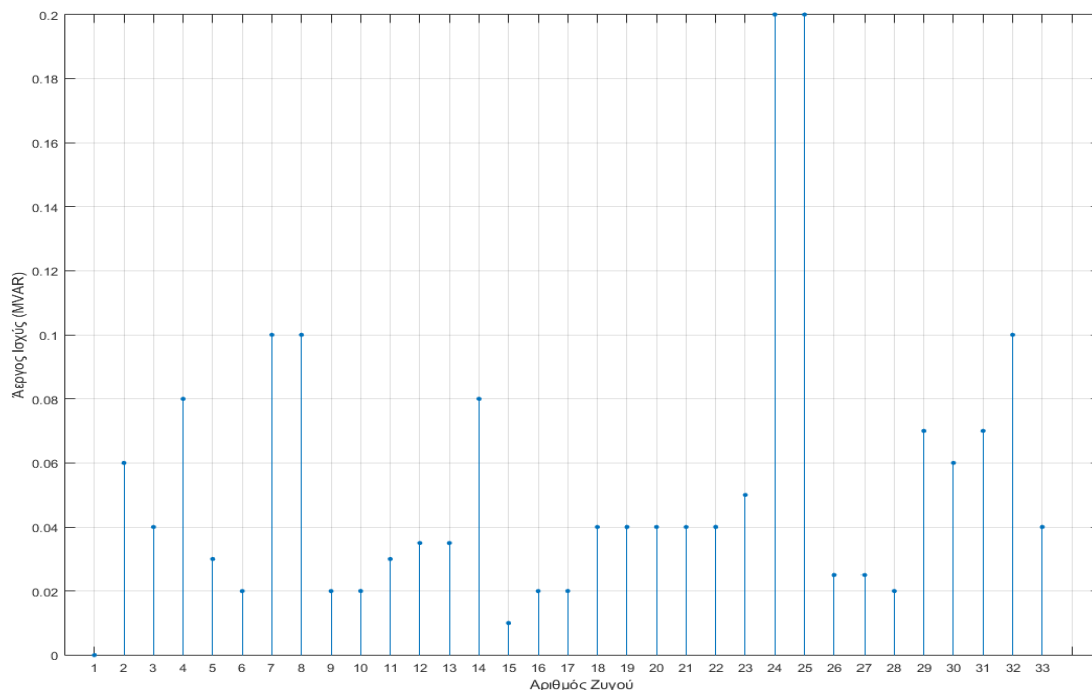
Σχήμα 4.3: Case Study – Το Δίκτυο 33 Ζυγών

Το εικονιζόμενο σύστημα παρουσιάζεται στον πίνακα του παραρτήματος (Π.1):

Για την καλύτερη εποπτεία των φορτίων, αυτά φαίνονται παρακάτω:



Γράφημα 4.11: Ζήτηση Ενεργού Ισχύος στους ζυγούς



Γράφημα 4.12: Ζήτηση Άεργου Ισχύος στους ζυγούς

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγόριθμου για το Σ.Η.Ε των έξι ζυγών συγκεντρώνονται παρακάτω, στον Πίνακα 4.6:

Συνολική Παραγωγή από τον ζυγό αναφοράς		Τιμή
Ενεργός Ισχύς P_i		3.7150 MW
Άεργος Ισχύς Q_i		1.76 MVAR
Μέση τιμή Έγχυσης Ισχύος στους ζυγούς:		Τιμή
Ενεργός Ισχύς P_i		0.1161 MW
Άεργος Ισχύς Q_i		0.0550 MVAR
Μέγιστη Τιμή Έγχυσης Ισχύος	Αριθμός Ζυγού	Τιμή
Ενεργός Ισχύς P_i	24	0.42000 MW
Άεργος Ισχύς Q_i	25	0.2 MVAR
Ελάχιστη Τιμή Έγχυσης Ισχύος	Αριθμός Ζυγού	Τιμή
Ενεργός Ισχύς P_i	11	0.0450 MW
Άεργος Ισχύς Q_i	15	0.01 MVAR
Μέγιστη Τάση	Αριθμός Ζυγού	Τιμή
Κατά Μέτρο $ V_i $	2	0.999004 p.u.
Κατά απόλυτη γωνία $\delta_i /$ (μέγιστη απόκλιση από το 0)	18	0.0055073rads
Ελάχιστη Τάση	Αριθμός Ζυγού	Τιμή
Κατά Μέτρο $ V_i $	18	0.9715134 p.u.
Κατά απόλυτη γωνία $\delta_i /$ (ελάχιστη απόκλιση από το 0)	2	2.89e-05 rads

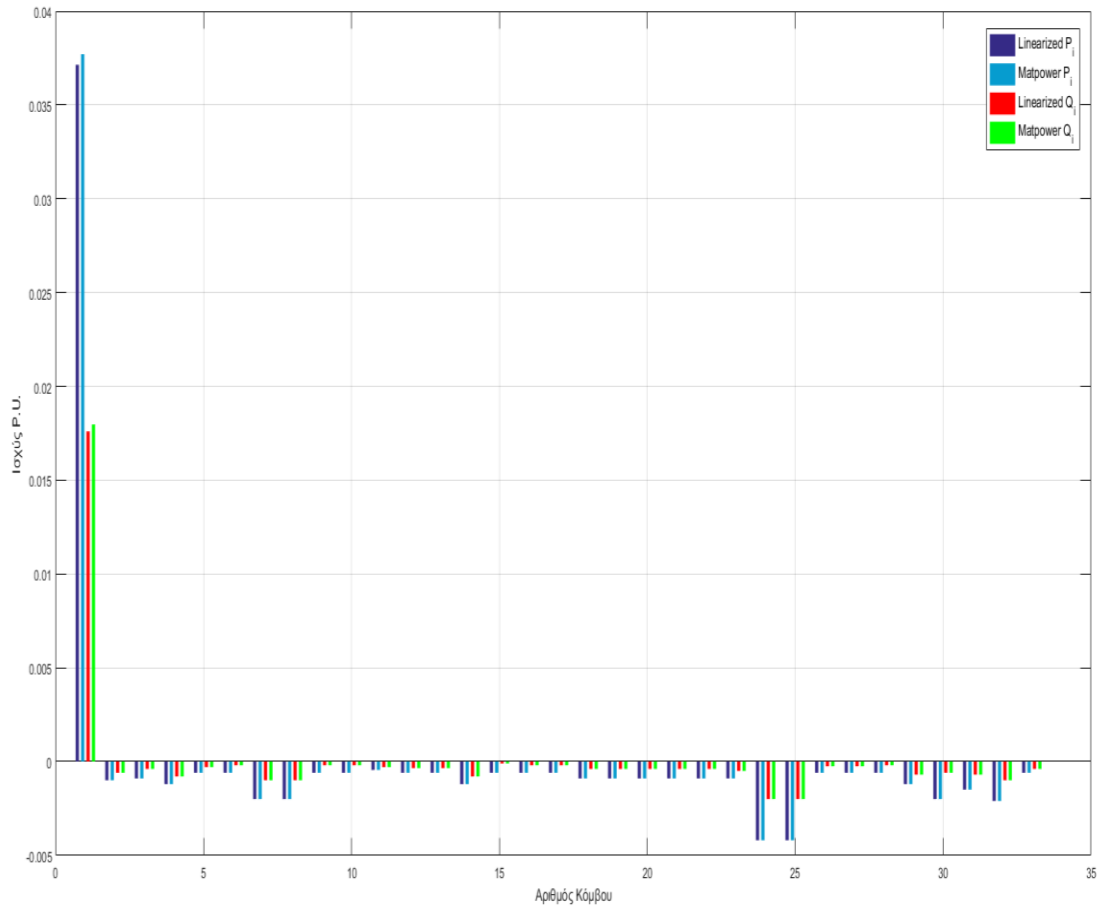
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα Υπολογισμού Ροής Ισχύος

Στην συνέχεια γίνεται εκτέλεση της συνάρτησης runpf() για το ίδιο δίκτυο. Η έξοδος της φαίνεται παρακάτω:

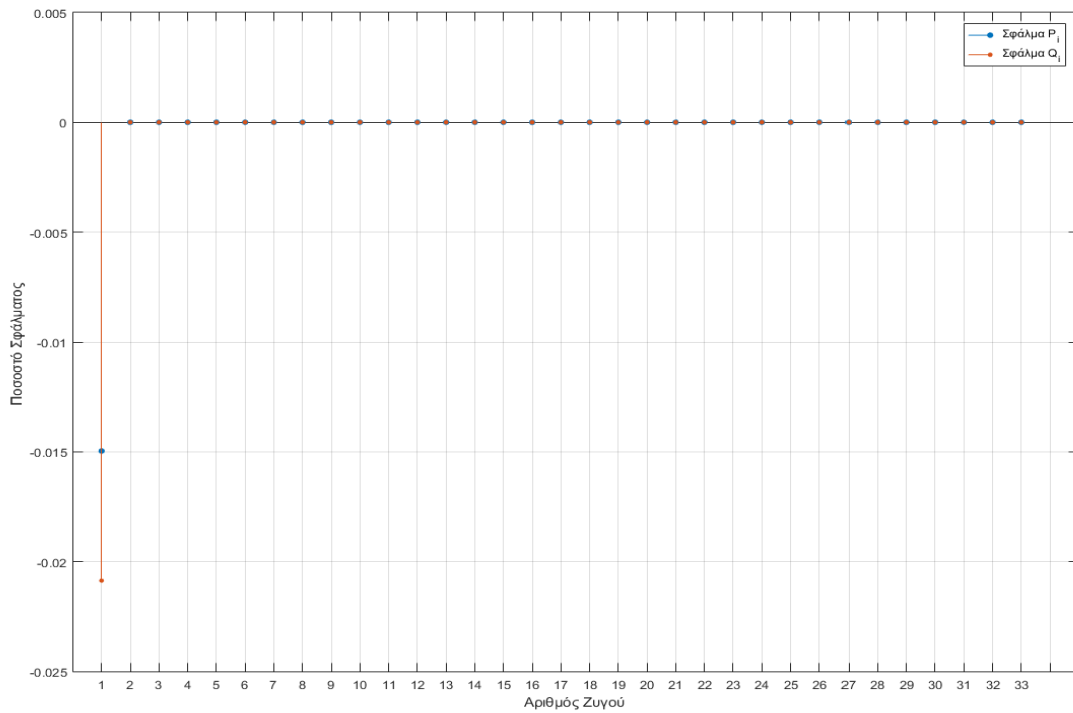
Συνολική Παραγωγή από τον ζυγό αναφοράς		Τιμή
Ενεργός Ισχύς P_i		3.7714163 MW
Άεργος Ισχύς Q_i		1.79748451 MVAR
Μέση τιμή Έγχυσης Ισχύος στους ζυγούς:		Τιμή
Ενεργός Ισχύς P_i		0.11609374 MW
Άεργος Ισχύς Q_i		0.055 MVAR
Μέγιστη Τάση	Αριθμός Ζυγού	Τιμή
Κατά Μέτρο $ V_i $	2	0.998987 p.u.
Κατά απόλυτη γωνία $\delta_i /$ (μέγιστη απόκλιση από το 0)	18	0.005699 rads
Ελάχιστη Τάση	Αριθμός Ζυγού	Τιμή
Κατά Μέτρο $ V_i $	18	0.970819 p.u.
Κατά απόλυτη γωνία $\delta_i /$ (ελάχιστη απόκλιση από το 0)	2	2.875e-05 rads

Πίνακας 4.7: Τα αποτελέσματα της runpf

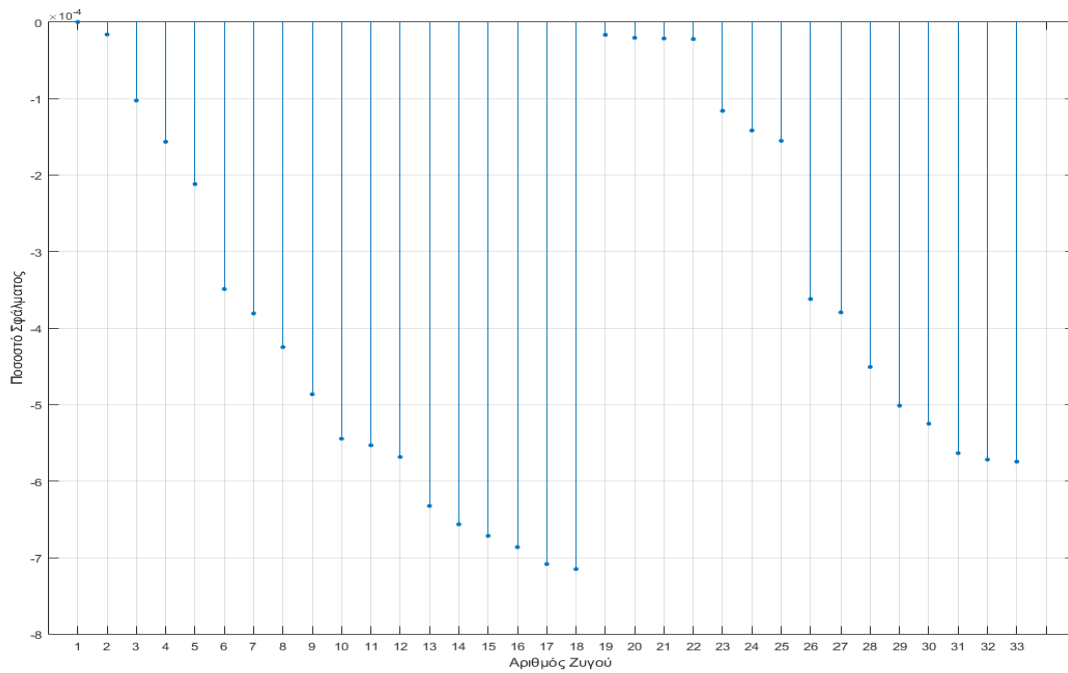
Για την επικύρωση των αποτελεσμάτων όπως προαναφέρθηκε γίνεται εκτίμηση του Σφάλματος των τιμών του αλγορίθμου που κατασκευάστηκε σε προηγούμενη Ενότητα (4.4) με τις τιμές που αποτελούν την έξοδο της συνάρτησης runpf του Matpower. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων φαίνεται στα παρακάτω γραφήματα:



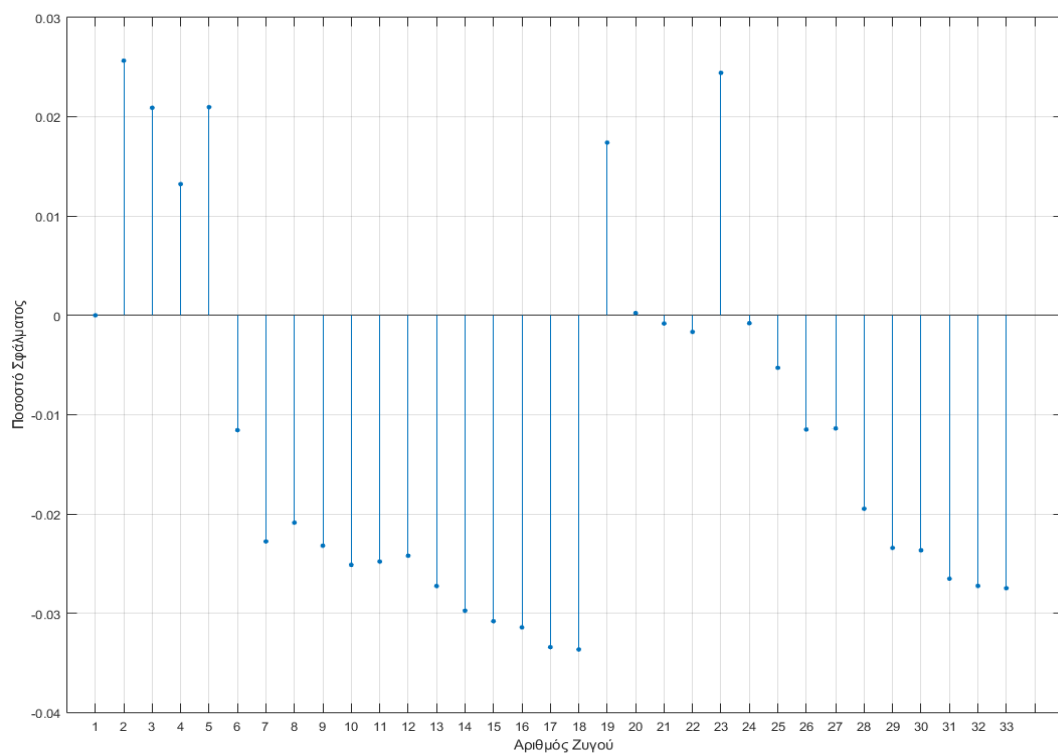
Γράφημα 4.20: Οι τιμές της Έγχυσης Ισχύος P_i, Q_i σε κόμβο.



Γράφημα 4.21: Το ποσοστιαίο σφάλμα της Έγχυσης Ισχύος P_i, Q_i σε κόμβο



Γράφημα 4.22: Το ποσοστιαίο σφάλμα της τιμής της τάσης $|V_i|$ σε ζυγό



Γράφημα 4.23: Το ποσοστιαίο σφάλμα της γωνίας δ_i της τάσης σε ζυγό

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι ακραίες τιμές και η μέση τιμή του σφάλματος για τους 33 ζυγούς:

Σφάλμα (απόλυτο ποσοστό %):	Τιμή	Ζυγός
Μέτρου Τάσης		
Μέγιστο	7.149-04	18
Ελάχιστο	1.633e-05	2
Μέση τιμή	3.72e-04	
Γωνίας Τάσης		
Μέγιστο	0.0336436	18
Ελάχιστο	2.29e-04	20
Μέση τιμή	0.019418	
Ενεργού Ισχύος		
Μέγιστο	0.0149589	1
Ελάχιστο	4.1e-16	7
Μέση τιμή	4.533e-04	
Άεργου Ισχύος		
Μέγιστο	0.0208539	1
Ελάχιστο	9.87e-15	18
Μέση τιμή	6.324e-04	

Πίνακας 4.7: Στατιστικά στοιχεία των σφαλμάτων των τιμών

Από τα αποτελέσματα της σύγκρισης των τιμών, φαίνεται πως το σφάλμα των τιμών του αλγορίθμου OPF που δημιουργήθηκε είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις τιμές της συνάρτησης runpf για το Δίκτυο 33 ζυγών.

4.6 Εκτέλεση Αλγορίθμου Βέλτιστης Ροής Φορτίου

Αφού εξακριβώθηκε η αξιοπιστία του αλγορίθμου για την λύση του προβλήματος Power Flow, στην συνέχεια, διαμορφώνεται κατάλληλα ώστε να επιλύει το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου σε βάθος χρονικού ορίζοντα T . Ο χρονικός ορίζοντας που επιλέχθηκε είναι οι 180 μέρες, (ως επαρκής για την μοντελοποίηση της γήρανσης της μπαταρίας που έγινε σε προηγούμενο (Κεφάλαιο 3)). Ως διακριτή μονάδα χρόνου επιλέγεται η τιμή $t = 1 \text{ hour}$. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για 2 δίκτυα.

4.6.1 Διαμόρφωση Αλγορίθμου OPF για την επίλυση του Multi Period προβλήματος

Το σύστημα εξισώσεων σε κατάλληλη μορφή για επίλυση με γραμμικό προγραμματισμό όπως διαμορφώθηκε στην Ενότητα 4.4.

Με την εισαγωγή της μεταβλητής του Χρονικού ορίζοντα $T = 180 \text{ μέρες} * 24 \text{ ώρες} = 4320 \text{ h}$ το σύστημα εξισώσεων παραμετροποιείται κατάλληλα ώστε να περιγράφει την λειτουργία του Σ.Η.Ε για κάθε διακριτή χρονική μονάδα $t = 1 \text{ hour}$, έτσι οι σχέσεις παίρνουν την μορφή:

$$\text{Min} \quad F(N, T) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_{g,i,t} * P_{g,i,t} \quad (4.55)$$

sbj to:

$$P_{i,t} = \sum_{j=1}^N (|V_{i,t}| + |V_{j,t}| + 1) G_{ij} + B_{ij} (\delta_{i,t} - \delta_{j,t}) \quad (4.56)$$

$$Q_{i,t} = \sum_{j=1}^N G_{ij} (\delta_{i,t} - \delta_{j,t}) - B_{ij} (|V_{i,t}| + |V_{j,t}| + 1) \quad (4.57)$$

$$P_{ij,t} = g_{ij} (2|V_{i,t}| - 1) - g_{ij} (|V_{i,t}| + |V_{j,t}| + 1) - b_{ij} (\delta_{i,t} - \delta_{j,t}) \quad (4.58)$$

$$Q_{ij,t} = -b_{ij} (2|V_{i,t}| - 1) - g_{ij} (\delta_{i,t} - \delta_{j,t}) + b_{ij} (|V_{i,t}| + |V_{j,t}| + 1) \quad (4.59)$$

$$|V|_{slack\ bus,t} = 1\ p.u. \quad (4.60)$$

$$\delta_{slack\ bus} = 0\ rad, t \in T \quad (4.61)$$

$$0.95\ p.u. \leq |V_{i,t}| \leq 1.05\ p.u., i \in (N - slack\ bus) \quad (4.62)$$

$$0 \leq P_{g,i,t} \leq P_{g,max} \quad (4.63)$$

$$0 \leq Q_{g,i,t} \leq Q_{g,max} \quad (4.64)$$

$$P_{g,i,t} - P_{d,i,t} = P_{i,t} \quad (4.65)$$

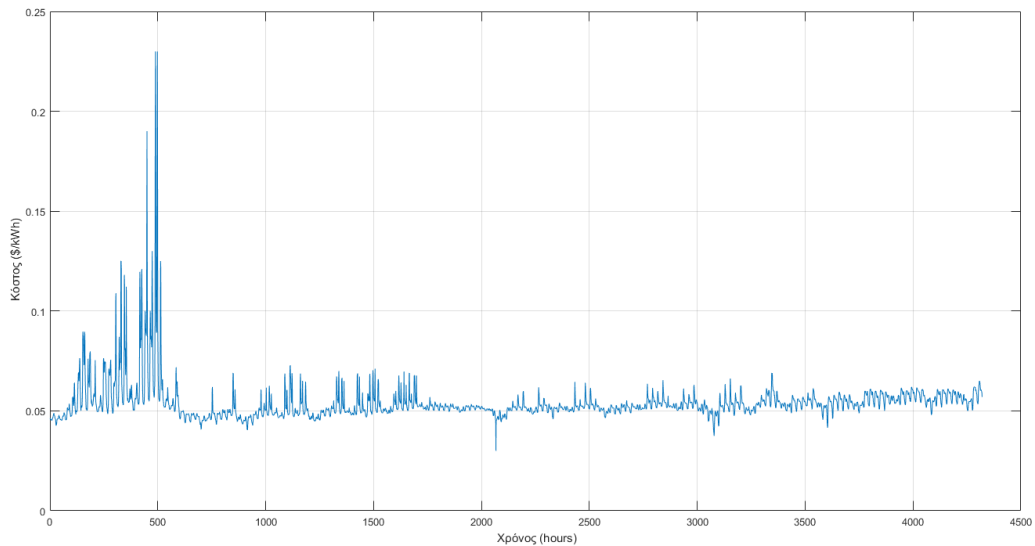
$$Q_{g,i,t} - Q_{d,t} = Q_{i,t} \quad (4.66)$$

Όπου, $i, j \in N, t \in T$

Έτσι το νέο σύστημα εξισώσεων (4.55)-(4.66) περιγράφει πλήρως το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος στο δίκτυο για χρονικό ορίζοντα T .

4.6.2 Εκτέλεση αλγορίθμου OPF για τα 2 Case Studies

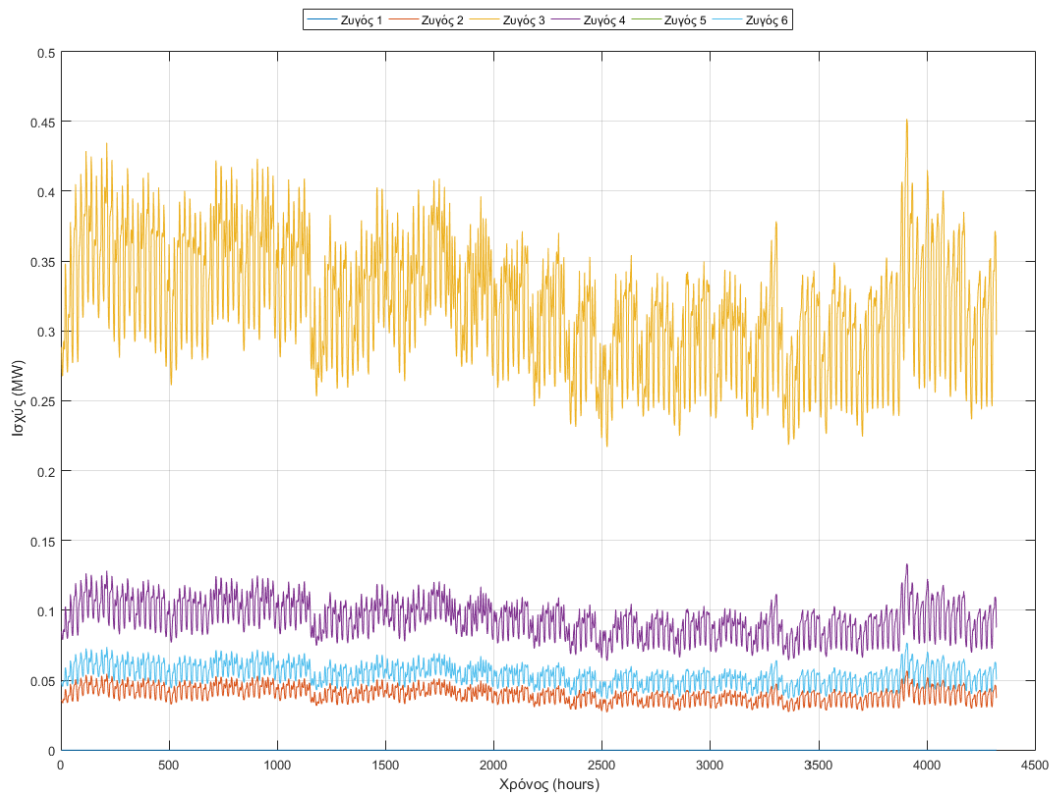
Για την επίλυση του χρονομεταβλητού προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου έγινε χρήση των δεδομένων κόστους και Καμπύλης φορτίου [108, 109]. Η καμπύλη του κόστους $Cg(t)$ σε χρηματικές μονάδες ανά μονάδα ενέργειας ($\$/kWh$ ανά 1 hour) φαίνεται στο Γράφημα 4.24:



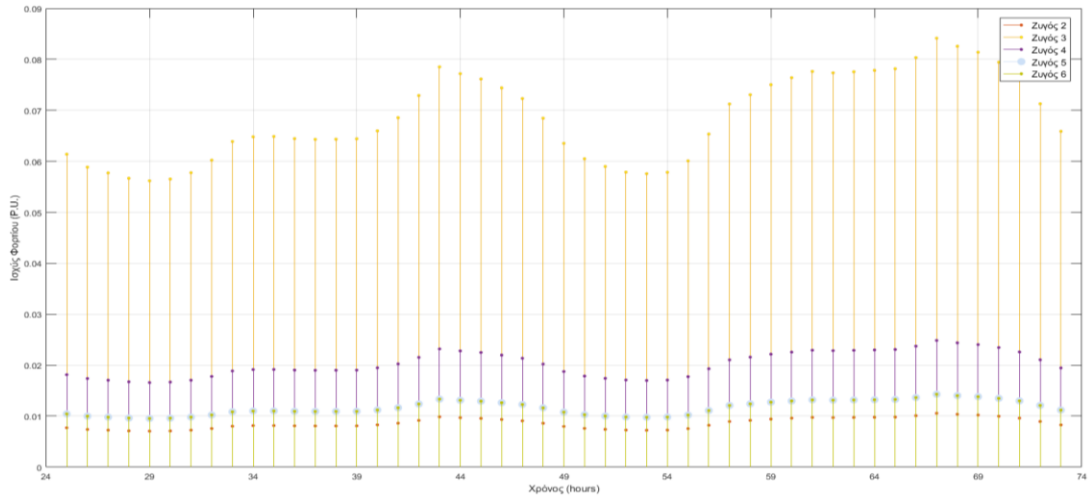
Γράφημα 4.24: Χρονομεταβλητό Κόστος Ενέργειας

4.6.2.1 Εκτέλεση αλγορίθμου OPF για το Σ.Η.Ε 6 ζυγών

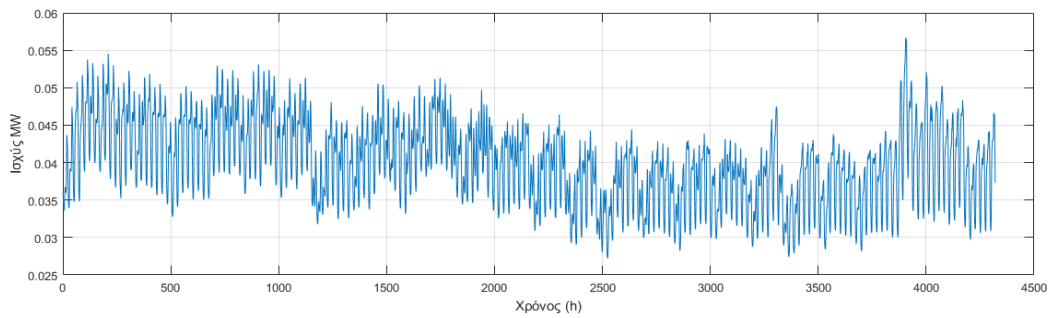
Τα στοιχεία του Σ.Η.Ε έξι ζυγών παραμένουν ίδια με αυτά που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.5.1, εκτός από την Καμπύλη Ισχύος του Φορτίου το οποίο πλέον είναι χρονομεταβλητό. Αυτό φαίνεται στο Γράφημα (4.25):



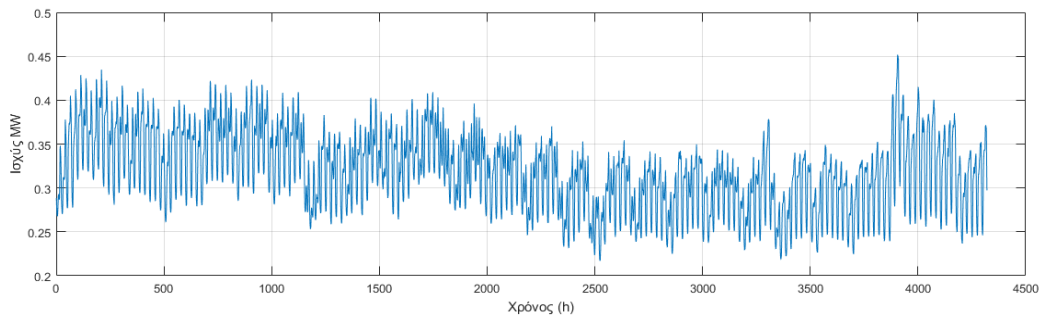
Γράφημα 4.25: Η καμπύλη ισχύος του φορτίου για $T=4320$ hours (οι ζυγοί 5,6 έχουν το ίδιο φορτίο)



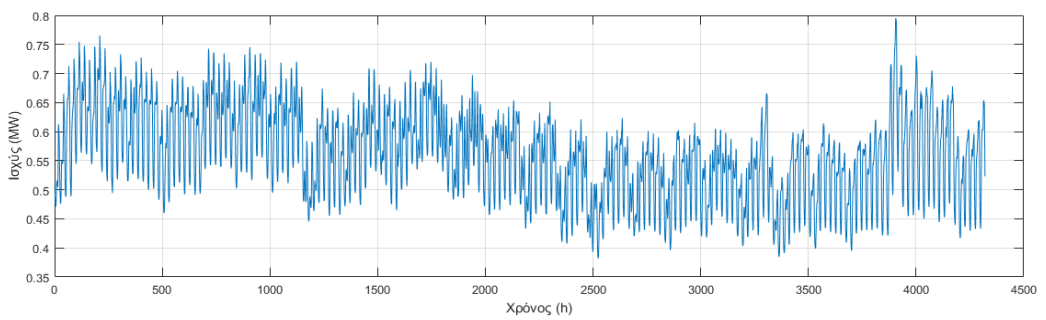
Γράφημα 4.26: Η καμπύλη ισχύος του φορτίου για 2 ημέρες



Γράφημα 4.27: Ελάχιστο Φορτίο ανά ώρα

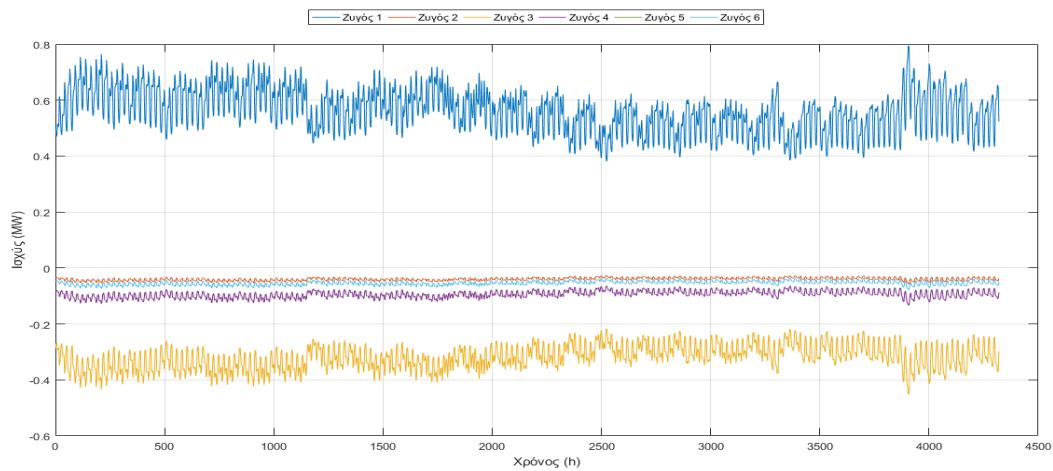


Γράφημα 4.28: Μέγιστο Φορτίο ανά ώρα

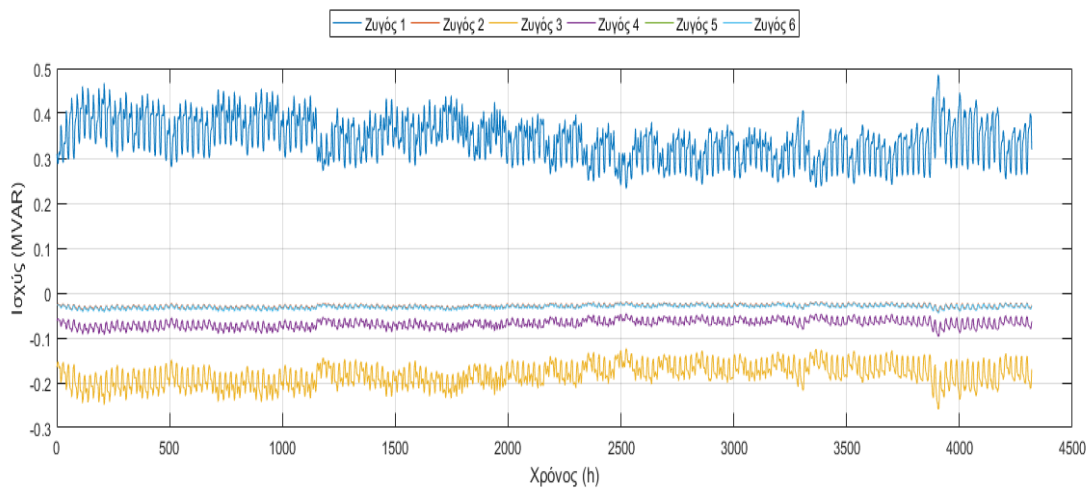


Γράφημα 4.29: Συνολικό Φορτίο ανά ώρα

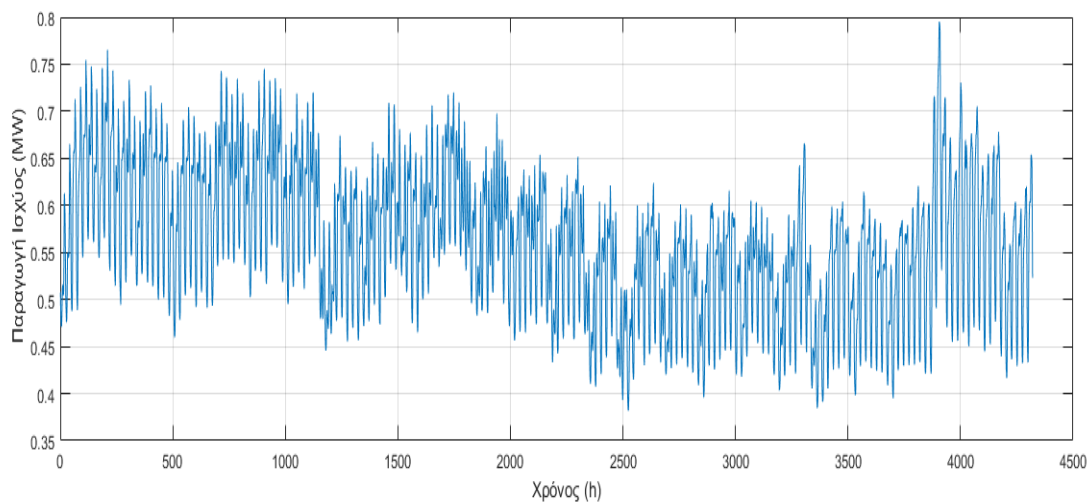
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την επίλυση του OPF προβλήματος, όπως αυτό ορίστηκε παραπάνω:



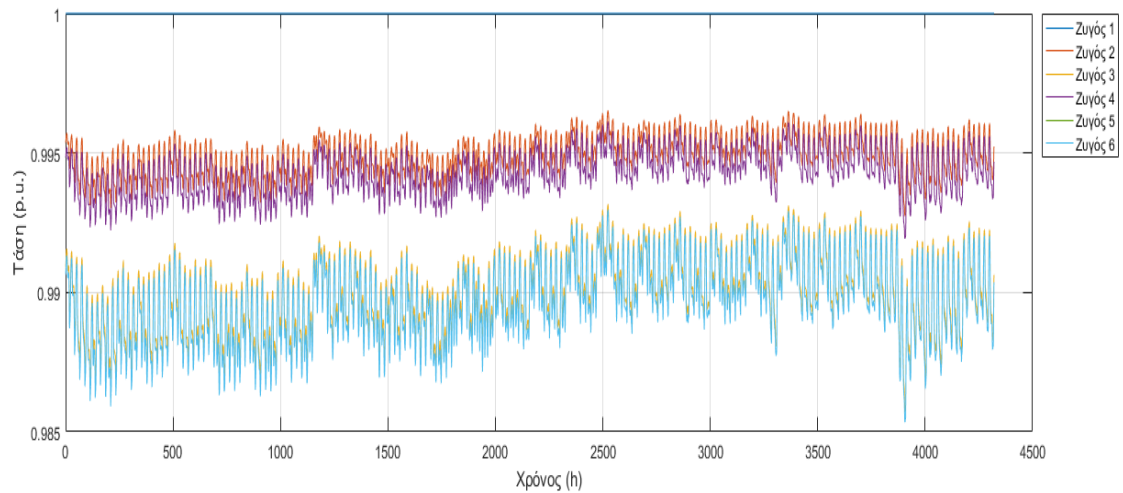
Γράφημα 4.30: Έγχυση Πραγματικής Ισχύος στους Κόμβους (ζυγός 5, επικαλύπτεται από ζυγό 6, λόγω ίδιας γραμμής και ζήτησης)



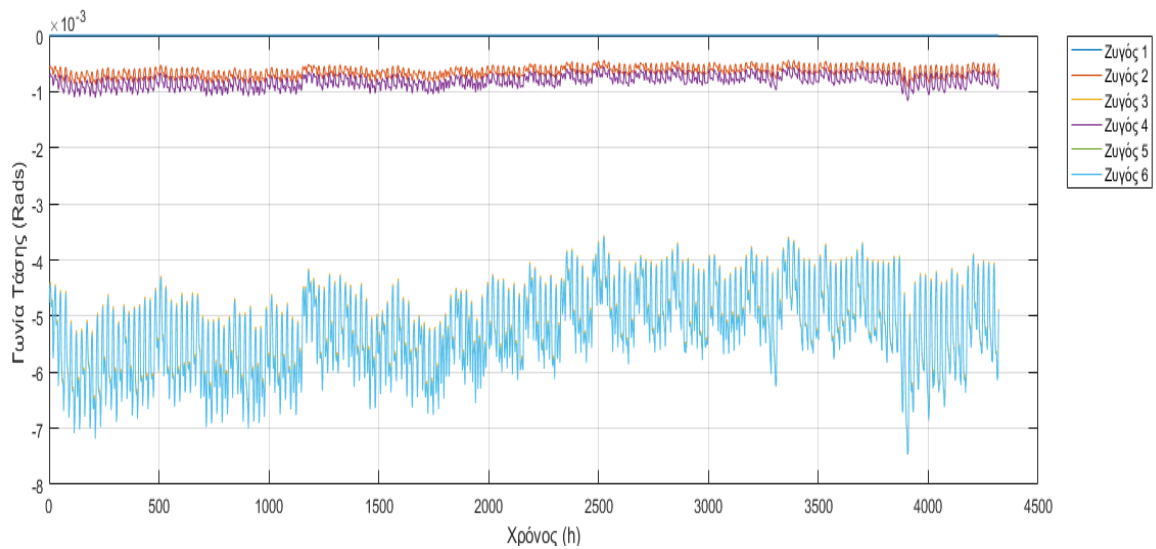
Γράφημα 4.31: Έγχυση Άεργου Ισχύος στους Κόμβους



Γράφημα 4.32: Παραγωγή Πραγματικής Ισχύος από τον Ζυγό Ταλάντωσης



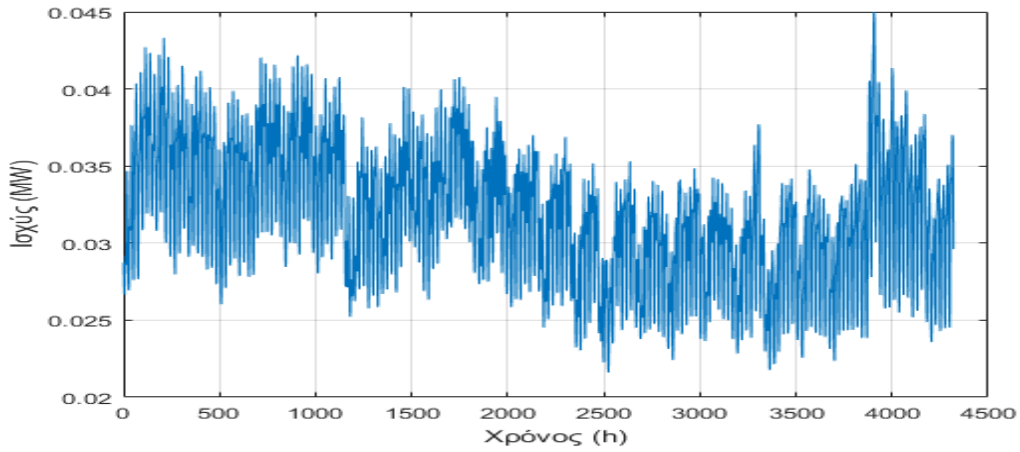
Γράφημα 4.33: Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών



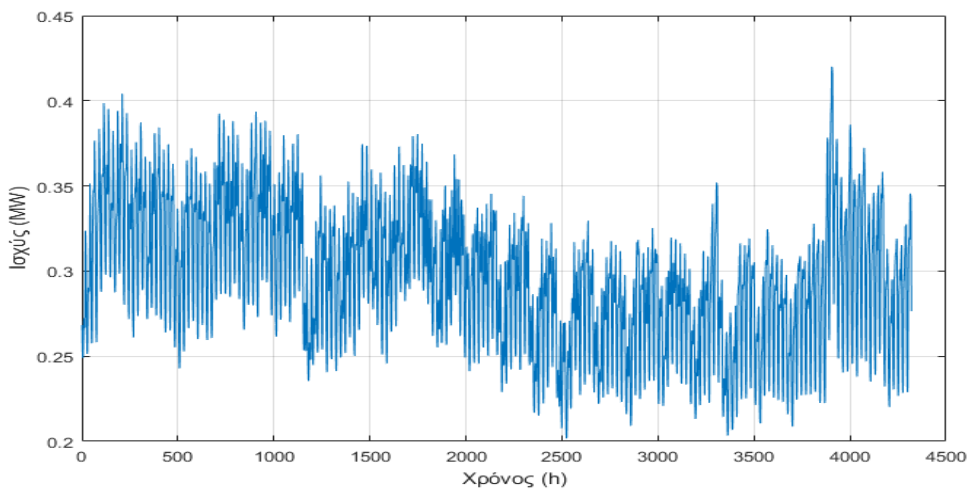
Γράφημα 4.34: Οι γωνίες των τάσεων των ζυγών

4.6.2.2 Εκτέλεση αλγορίθμου OPF για το Σ.Η.Ε 33 ζυγών

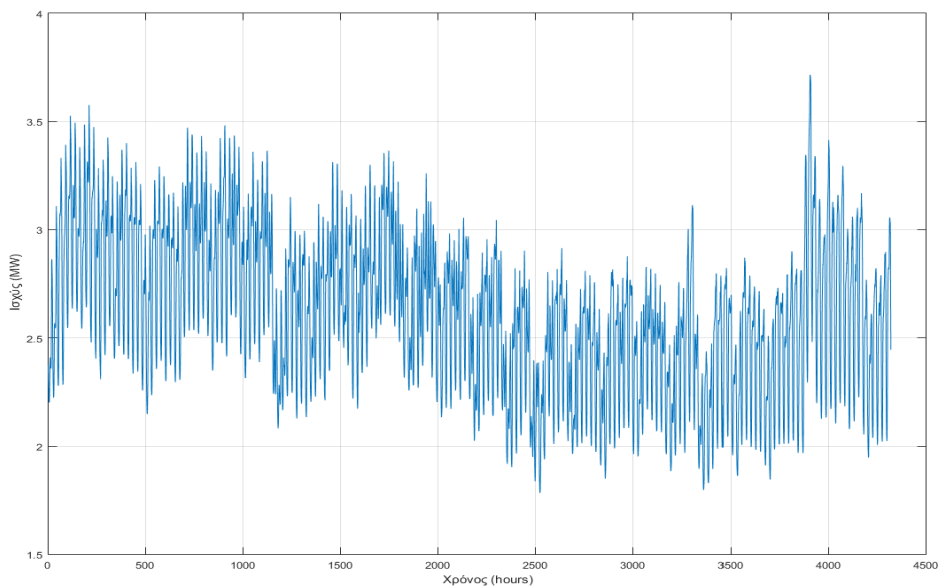
Τα στοιχεία του Σ.Η.Ε έξι ζυγών παραμένουν ίδια με αυτά που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.5.2, εκτός από την Καμπύλη Ισχύος του Φορτίου το οποίο πλέον είναι χρονομεταβλητό. Το συνολικό φορτίο φαίνεται στο Γράφημα (4.37):



Γράφημα 4.35: Ελάχιστο Συνολικό Φορτίο ανά ώρα

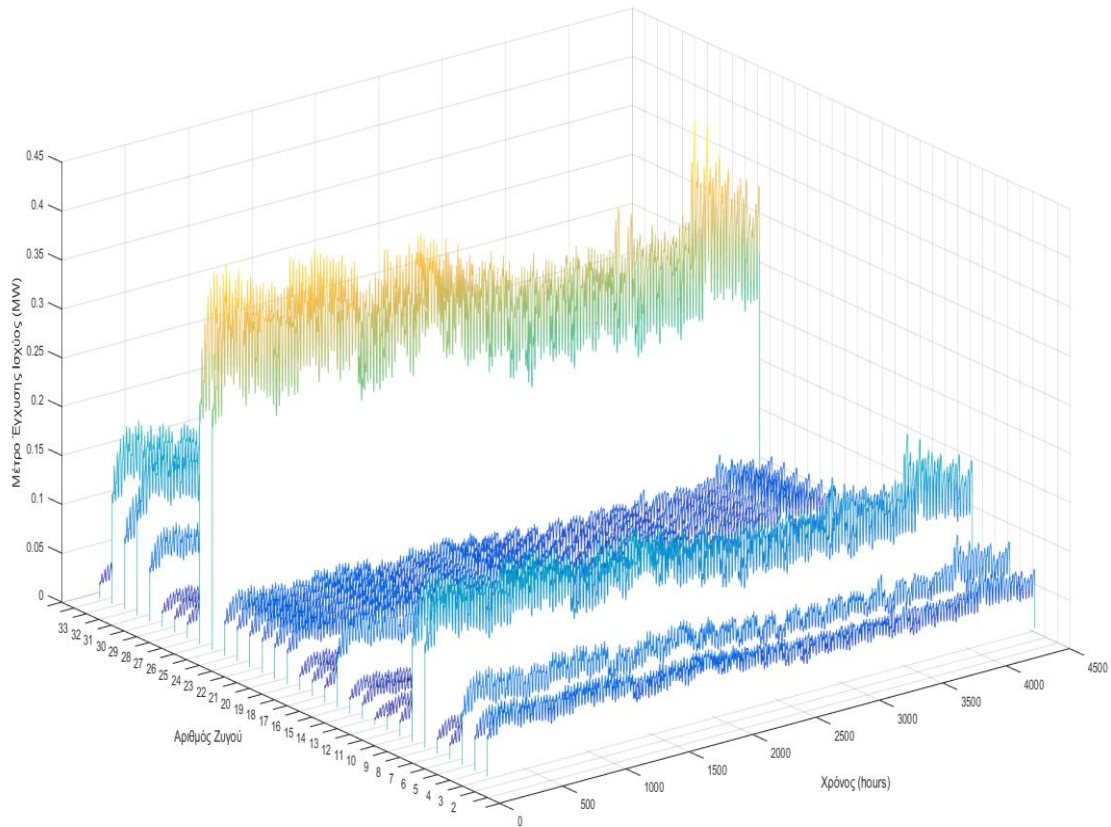


Γράφημα 4.36: Μέγιστο Συνολικό Φορτίο ανά ώρα

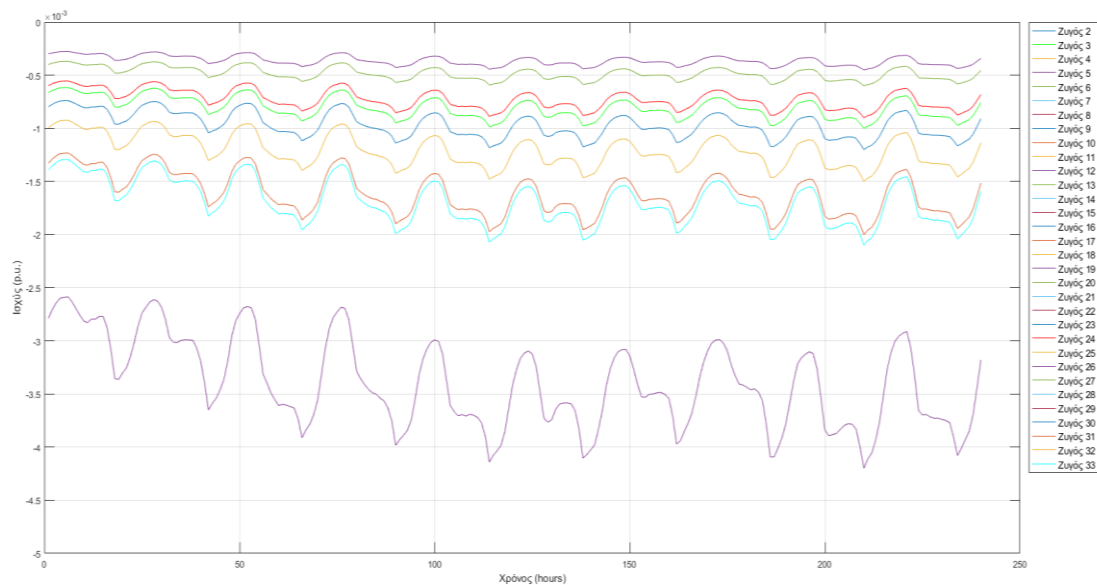


Γράφημα 4.37: Συνολικό Φορτίο ανά ώρα

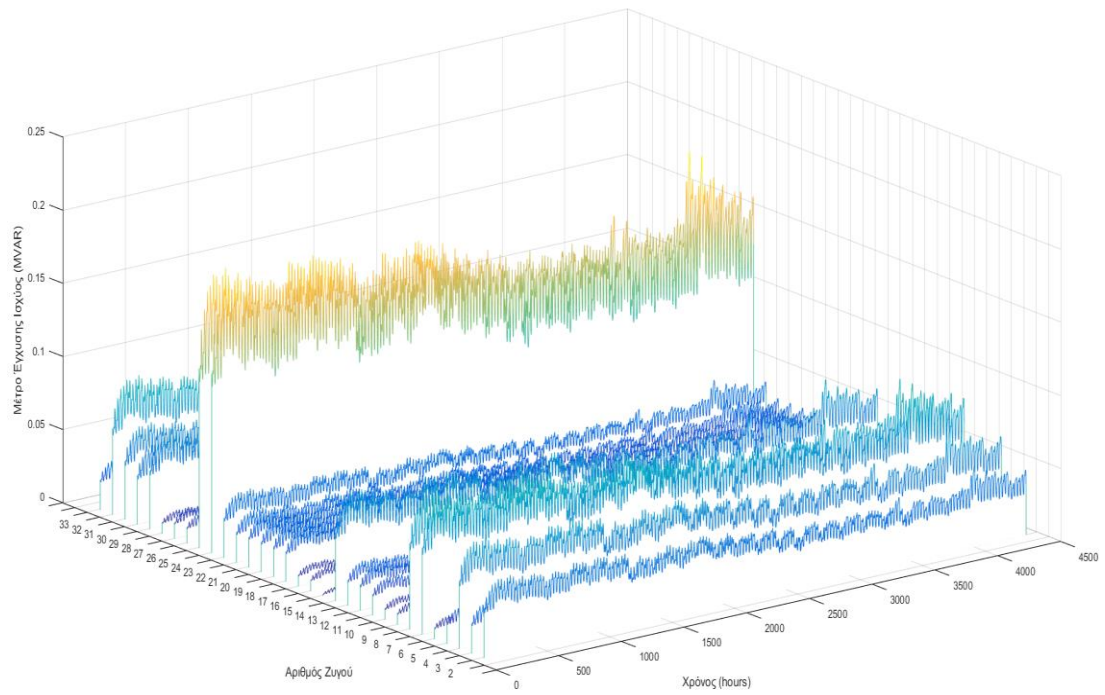
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την επίλυση του OPF προβλήματος, όπως αυτό ορίστηκε παραπάνω:



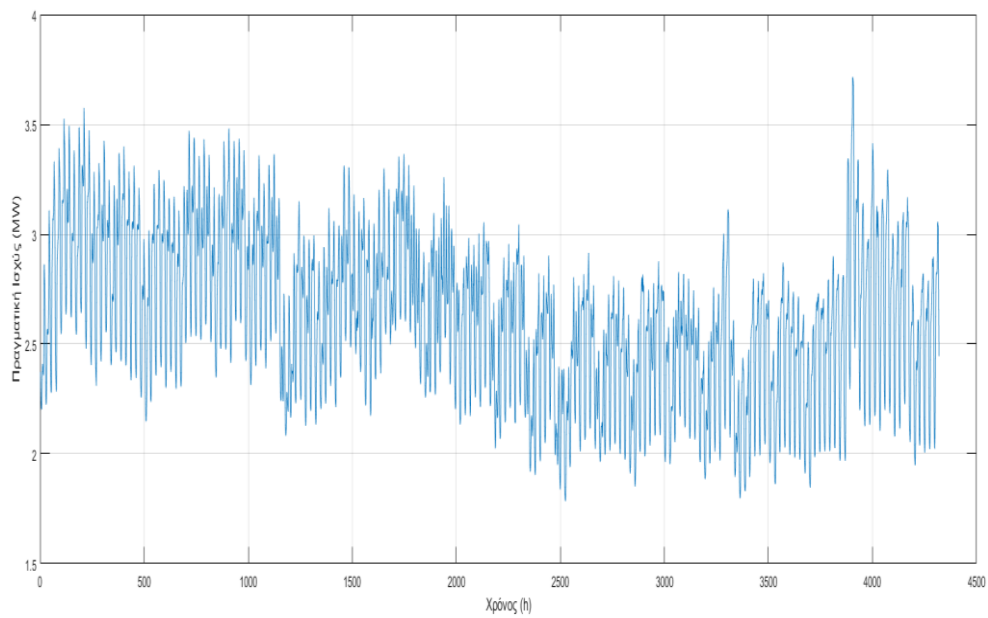
Γράφημα 4.38α: Μέτρο Έγχυσης Ενεργού Ισχύος στους Κόμβους (χωρίς την έγχυση του ζυγού ταλάντωσης)



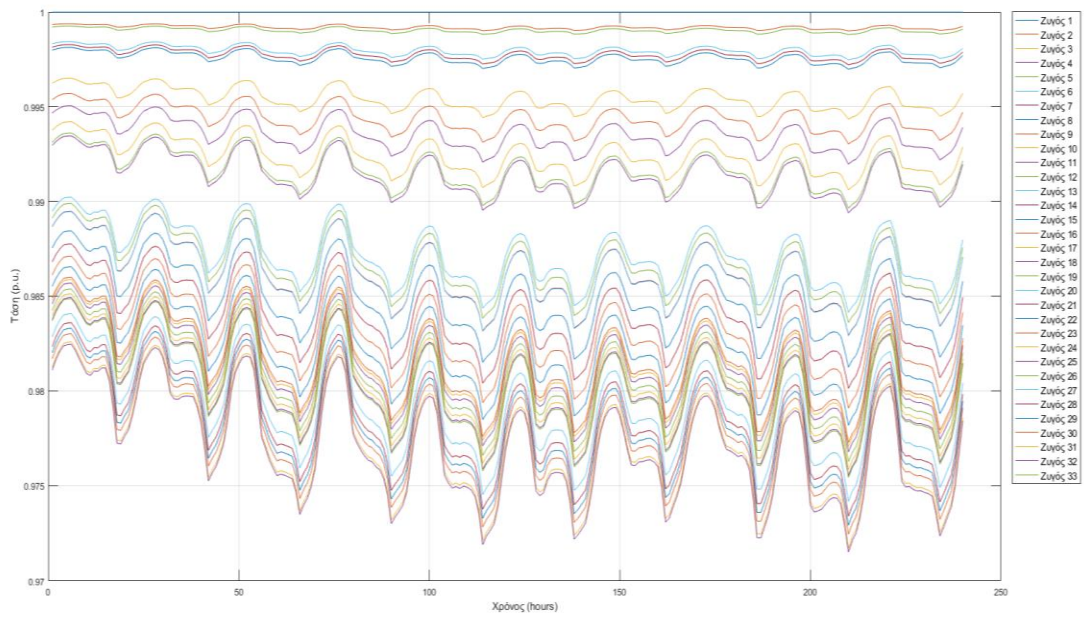
Γράφημα 4.38β: Μέτρο Έγχυσης Ενεργού Ισχύος στους Κόμβους για το στιγμιότυπο 1-240h (χωρίς την έγχυση του ζυγού ταλάντωσης)



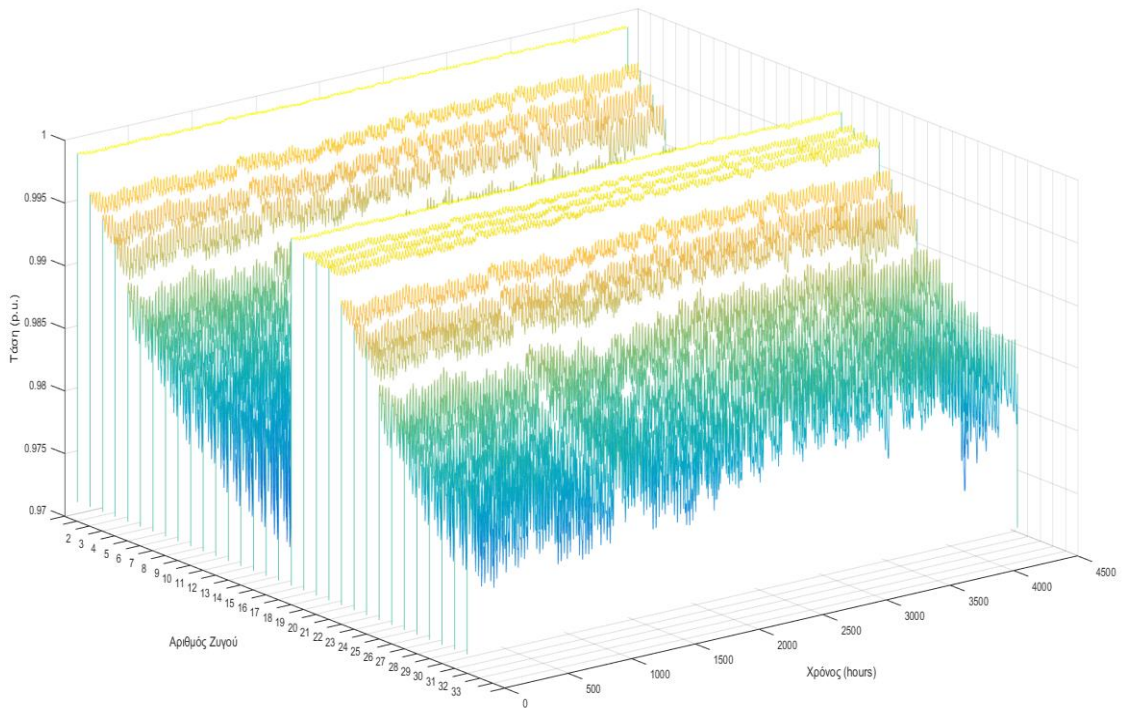
Γράφημα 4.39: Έγχυση Άεργου Ισχύος στους Κόμβους (χωρίς την έγχυση του Ζυγού 1)



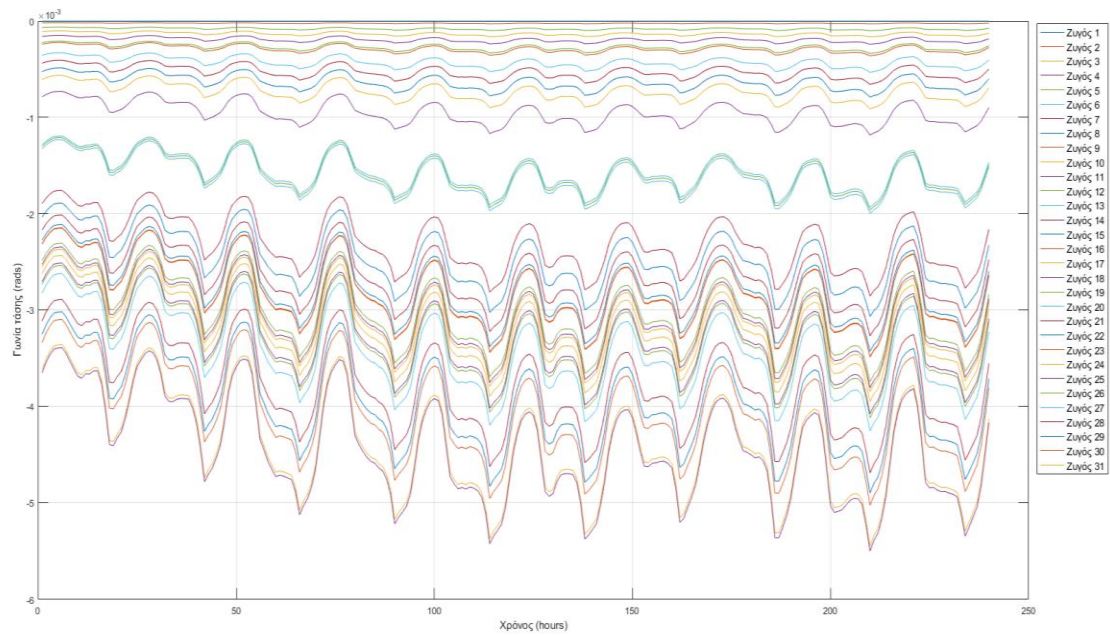
Γράφημα 4.40: Παραγωγή Πραγματικής Ισχύος από τον Ζυγό Ταλάντωσης



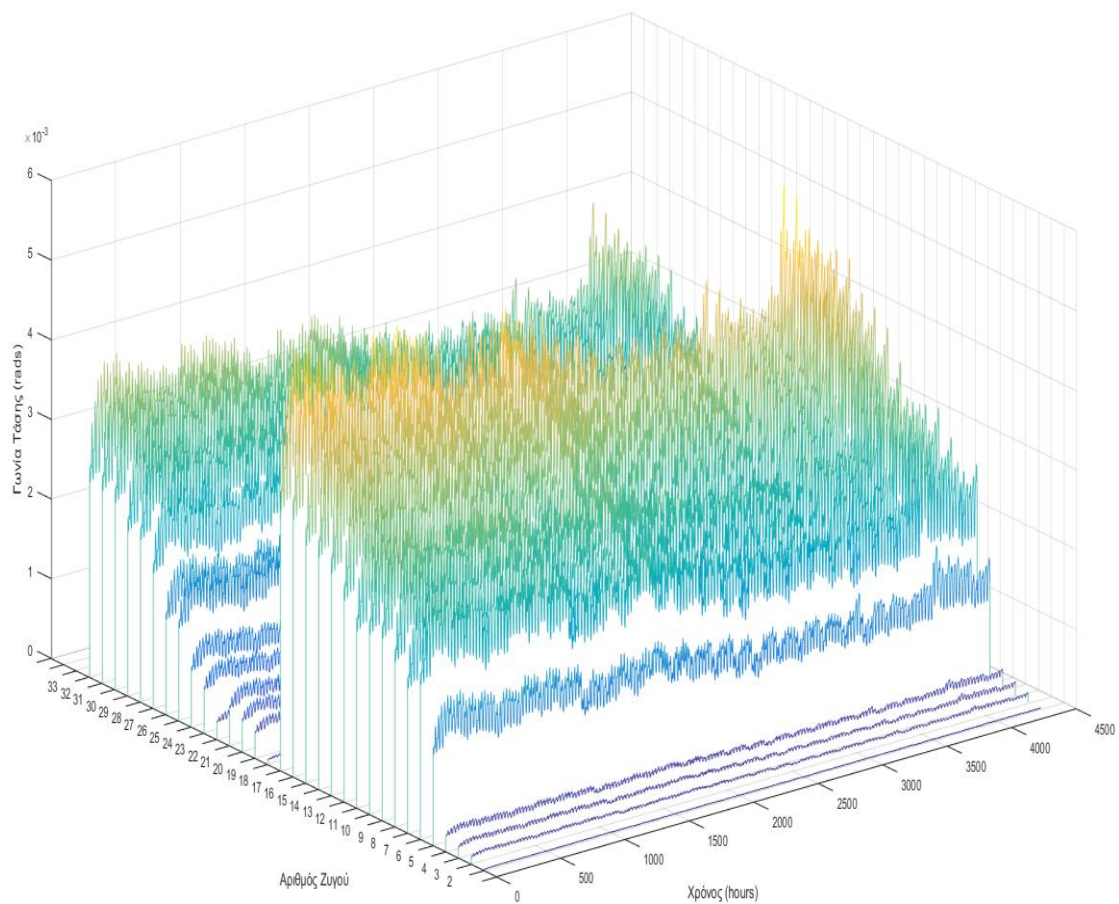
Γράφημα 4.41α: Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών για το στιγμιότυπο 1 – 240h (για καλύτερη εποπτεία)



Γράφημα 4.41β: Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών (χωρίς την τάση του Ζυγού 1)



Γράφημα 4.42α: Οι γωνίες των τάσεων των ζυγών για το στιγμιότυπο 1-240h

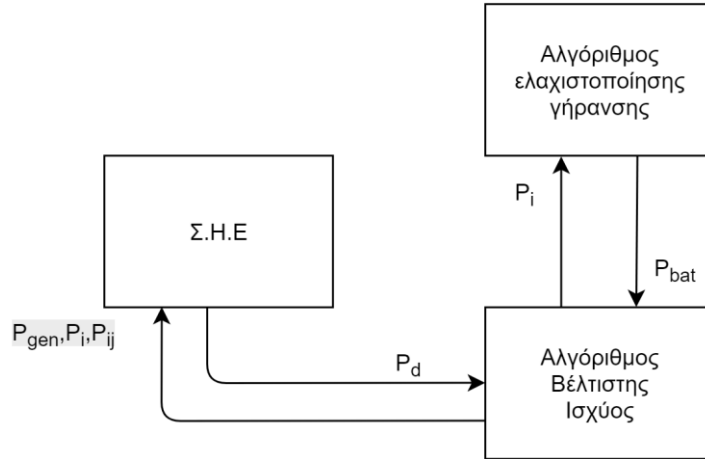


Γράφημα 4.42β: Η απόλυτη τιμή για τις γωνίες των τάσεων των ζυγών (χωρίς την γωνία του ζυγού 1)

Κεφάλαιο 5: Η λύση του συνδυασμένου προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος και ελαχιστοποίησης της γήρανσης των μπαταριών

5.1 Εισαγωγή

Έχοντας πλέον διερευνήσει την συμπεριφορά των αλγορίθμων λύσης των προβλημάτων ροής ισχύος και γήρανσης, είναι δυνατή η συνδυαστική εφαρμογή τους σε πραγματικό Σ.Η.Ε ώστε να παρατηρηθεί η αποδοτικότητά τους σε συνδυασμό και η εφαρμογή τους σε πραγματικά δεδομένα.



Σχήμα 5.1: Η πραγματική ισχύς στον συνδυαστικού αλγόριθμο

5.2 Κατασκευή συνδυαστικού αλγόριθμου

Για την λύση του συνδυασμένου προβλήματος απαιτείται προσαρμογή των αλγορίθμων που κατασκευάστηκαν στις ενότητες 3.4 και 4.6. Έτσι οι εξισώσεις σε περιβάλλον γραμμικού προγραμματισμού για τον συνδυαστικό αλγόριθμο παίρνουν την μορφή:

$$\text{Min } F(N_{bus}, N_{bat}, T) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{bus}} C_{g,i,t} * P_{g,i,t} + \sum_{k=1}^{N_{bat}} \sum_{t=1}^T a_k DEG_{k,t} \quad (5.1)$$

sbj to:

Οι εξισώσεις που αφορούν την ροή ισχύος:

$$P_{i,t} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N (|V_{i,t}| + |V_{j,t}| + 1) G_{ij} + B_{ij} (\delta_{i,t} - \delta_{j,t}) \quad (5.2)$$

$$Q_{i,t} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N G_{ij} (\delta_{i,t} - \delta_{j,t}) - B_{ij} (|V_{i,t}| + |V_{j,t}| + 1) \quad (5.3)$$

$$P_{ij,t} = g_{ij} (2|V_{i,t}| - 1) - g_{ij} (|V_{i,t}| + |V_{j,t}| + 1) - b_{ij} (\delta_{i,t} - \delta_{j,t}) \quad (5.4)$$

$$Q_{ij,t} = -b_{ij} (2|V_{i,t}| - 1) - g_{ij} (\delta_{i,t} - \delta_{j,t}) + b_{ij} (|V_{i,t}| + |V_{j,t}| + 1) \quad (5.5)$$

$$|V|_{slack\ bus,t} = 1\ p.u. \quad (5.6)$$

$$\delta_{slack\ bus,t} = 0\ rad \quad (5.7)$$

$$0.95\ p.u. \leq |V_{i,t}| \leq 1.05\ p.u.,\ i \in (N - slack\ bus) \quad (5.8)$$

$$0 \leq P_{g,i,t} \leq P_{g,max} \quad (5.9)$$

$$0 \leq Q_{g,i,t} \leq Q_{g,max} \quad (5.10)$$

Οι εξισώσεις που αφορούν την γήρανση:

$$\dot{x}_k = \begin{bmatrix} \dot{x}_{1,k}(t) \\ \dot{x}_{2,k}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c_r}{c_w} & \frac{c_r}{1-c_w} \\ \frac{c_r}{c_w} & -\frac{c_r}{1-c_w} \end{bmatrix} * x_k(t) - C_{bat,k}^{-1} \begin{bmatrix} -\eta_{gen}^{-1} & \eta_{load} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{gen_k}^{bat}(t) \\ P_{load_k}^{bat}(t) \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$SOC_L \leq x_{1,k}(t) + x_{2,k}(t) \leq SOC_H \quad (5.12)$$

$$x_{1,k}(t) \leq c_{w,k} \quad (5.13)$$

$$x_{2,k}(t) \leq 1 - c_{w,k} \quad (5.14)$$

$$P_{gen_k}^{bat}(t) \leq P_{batt,r,k} \quad (5.15)$$

$$P_{load_k}^{bat}(t) \leq P_{batt,r,k} \quad (5.16)$$

Το ισοζύγιο ισχύος διαμορφώνεται πλέον ως:

$$P_{g,i,t} - P_{d,i,t} - P_{load_{k,t}}^{bat} + P_{gen_{k,t}}^{bat} = P_{i,t} \quad (5.17)$$

$$Q_{g,i,t} - Q_{d,t} = Q_{i,t} \quad (5.18)$$

Όπου : $i, j \in N_{bus}, k \in N_{bat}, t \in T$

5.3 Εκτέλεση του αλγορίθμου και σύγκριση αποτελεσμάτων

Στην συνέχεια γίνεται εκτέλεση του αλγορίθμου για χρονικό ορίζοντα $T = 4320$ hours, στα δύο Σ.Η.Ε που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.5. Χρησιμοποιείται η ζήτηση ισχύος και το κόστος ενέργειας που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.6 (Σχήματα 4.24, 4.25, 4.34), ενώ οι μπαταρίες διαφόρων μεγεθών που τοποθετούνται στους ζυγούς διαθέτουν τα χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.4 (Πίνακας 3.5).

5.3.1 Εφαρμογή στο δίκτυο 6 ζυγών

Η τοπολογία του δικτύου φαίνεται στο σχήμα 4.2, ενώ τα χαρακτηριστικά του στον πίνακα 4.2 . Χρησιμοποιούνται 2 μπαταρίες που τοποθετούνται στους ζυγούς 4 και 6 χωρητικότητας και ισχύος που φαίνονται παρακάτω:

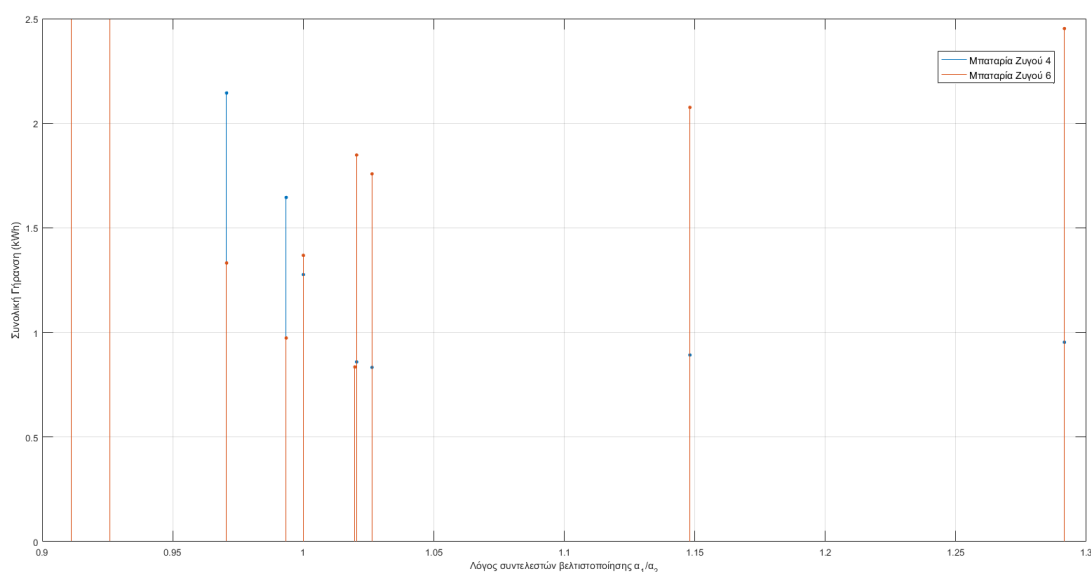
	Μπαταρία Ζυγού 4	Μπαταρία Ζυγού 6
C_{bat}	80 kWh	100 kWh
P_{bat}	60 kW	80 kW

Πίνακας 5.1: Τα στοιχεία των μπαταριών του δικτύου

Μετά από ανάλυση και πλήθος εκτελέσεων του αλγορίθμου, (και με αφετηρία τα ευρήματα του Sensitivity Analysis στην ενότητα 3.4.6 επιλέγεται μια κεντρική τιμή του συντελεστή βελτιστοποίησης ($\alpha_1=\alpha_2=1.5e4$) και προσεγγίζεται ο βέλτιστος λόγος α_1/α_2 . Κάθε μπαταρία διαφορετικού μεγέθους απαιτεί διαφορετικό συντελεστή στάθμισης για την βελτιστοποίησή της. Τα κριτήρια EoL όπως και στο κεφάλαιο 3, υπολογίζονται θεωρώντας τα φαινόμενα της γήρανσης γραμμικά ύστερα από το πέρασ των 4230 ωρών [94]. Τα αποτελέσματα για τις 2 μπαταρίες φαίνονται παρακάτω:

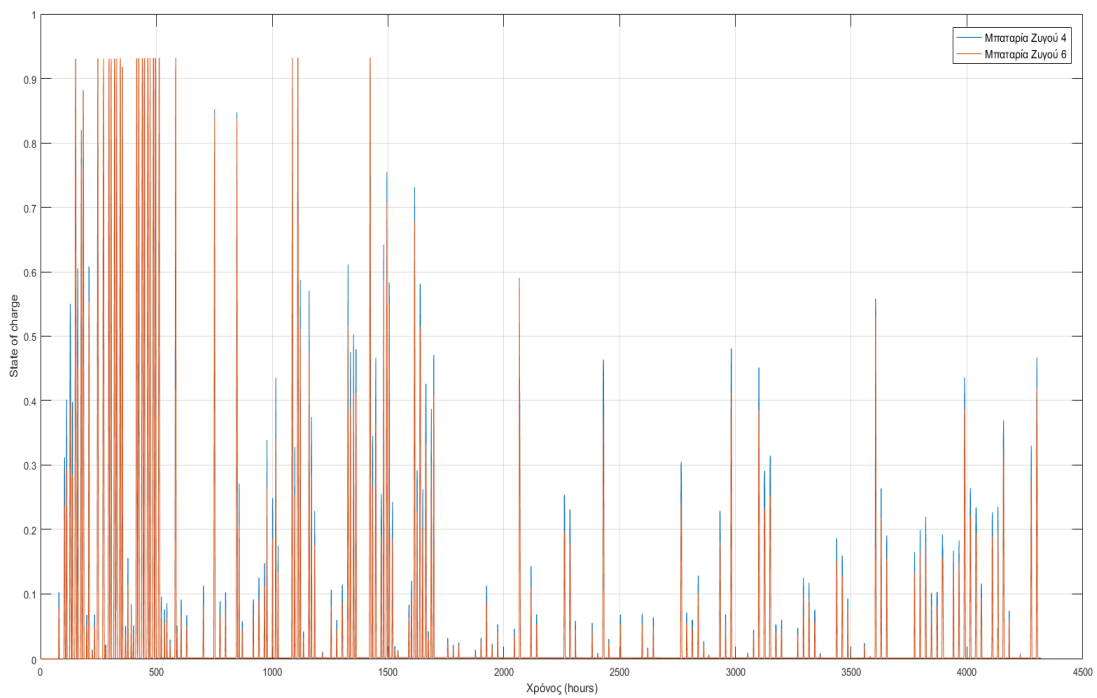
	Συνολική Γήρανση (kWh)	Συνολική Γήρανση (%)	Lifetime EoL _{0.2}	Lifetime EoL _{0.5}	Κυκλοι
Μπαταρία Ζυγού 4	1.2766	1.2765	6 χρόνια 97 ημ.	15 χρόνια 243 ημ.	425
Μπαταρία Ζυγού 6	1.3685	1.3685	7 χρόνια 112 ημ.	18 χρόνια 97 ημ.	424

Πίνακας 5.2: Τα αποτελέσματα λειτουργίας για τις μπαταρίες του ΣΗΕ

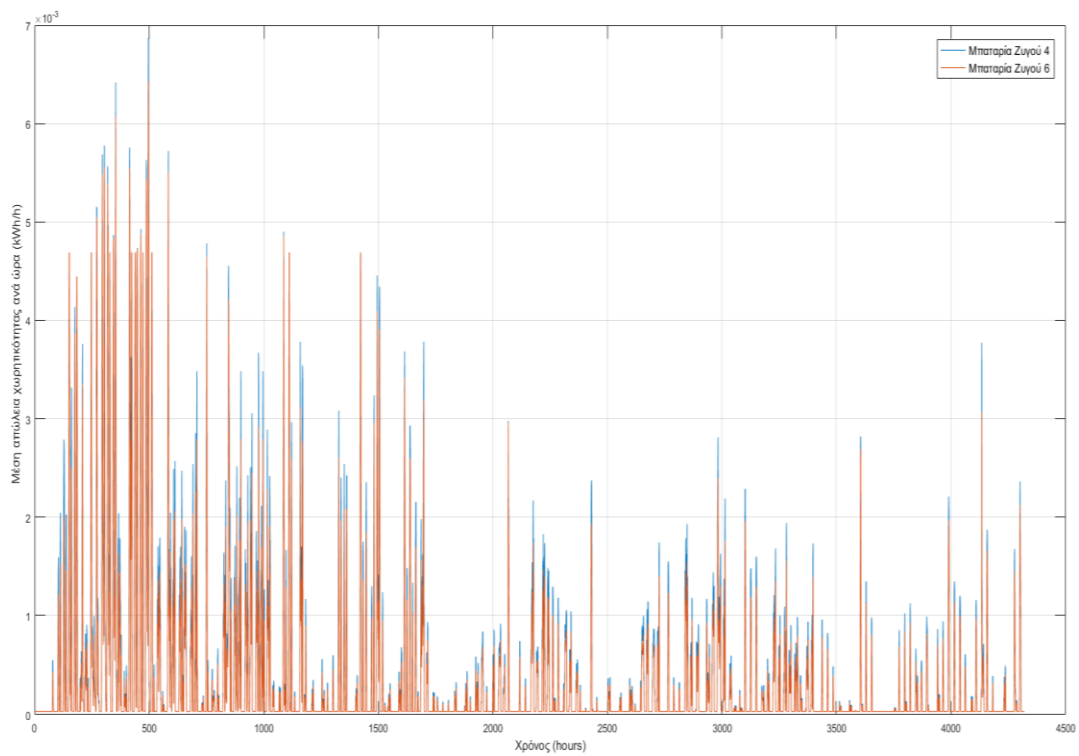


Γράφημα 5.1: Η σχέση του λόγου α_1/α_2 με την συνολική γήρανση της μπαταρίας, γύρω από την τιμή $1e4$

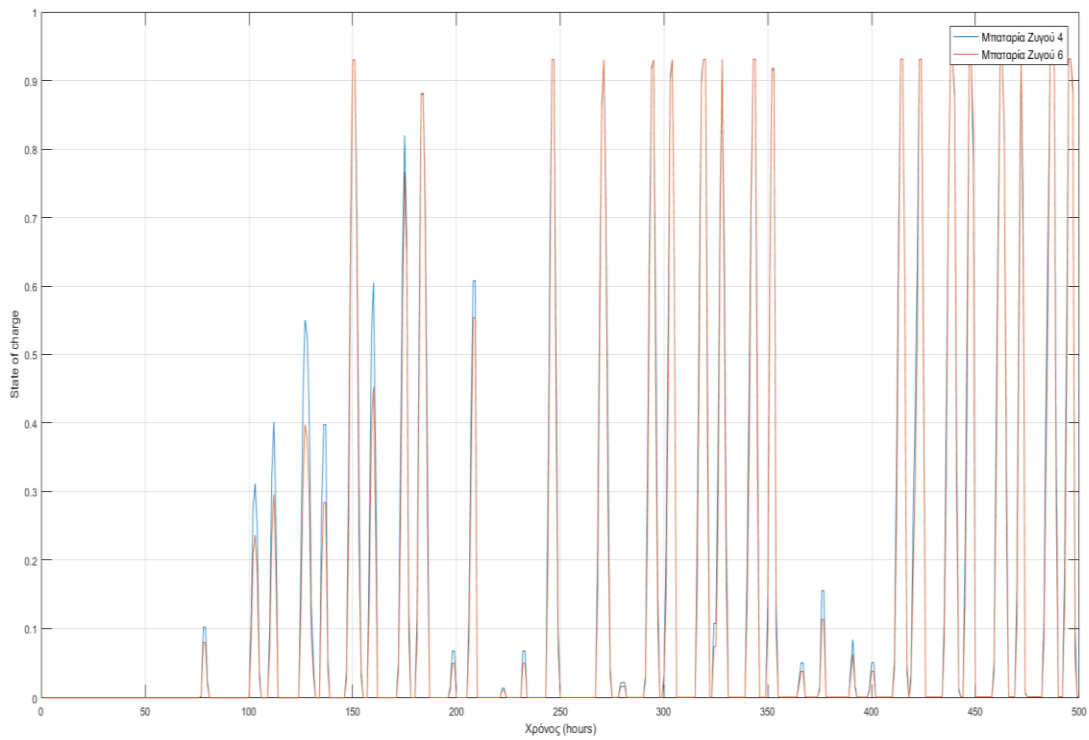
Τελικά επιλέχθηκε ως βέλτιστος ο λόγος $\alpha_1/\alpha_2=1$.



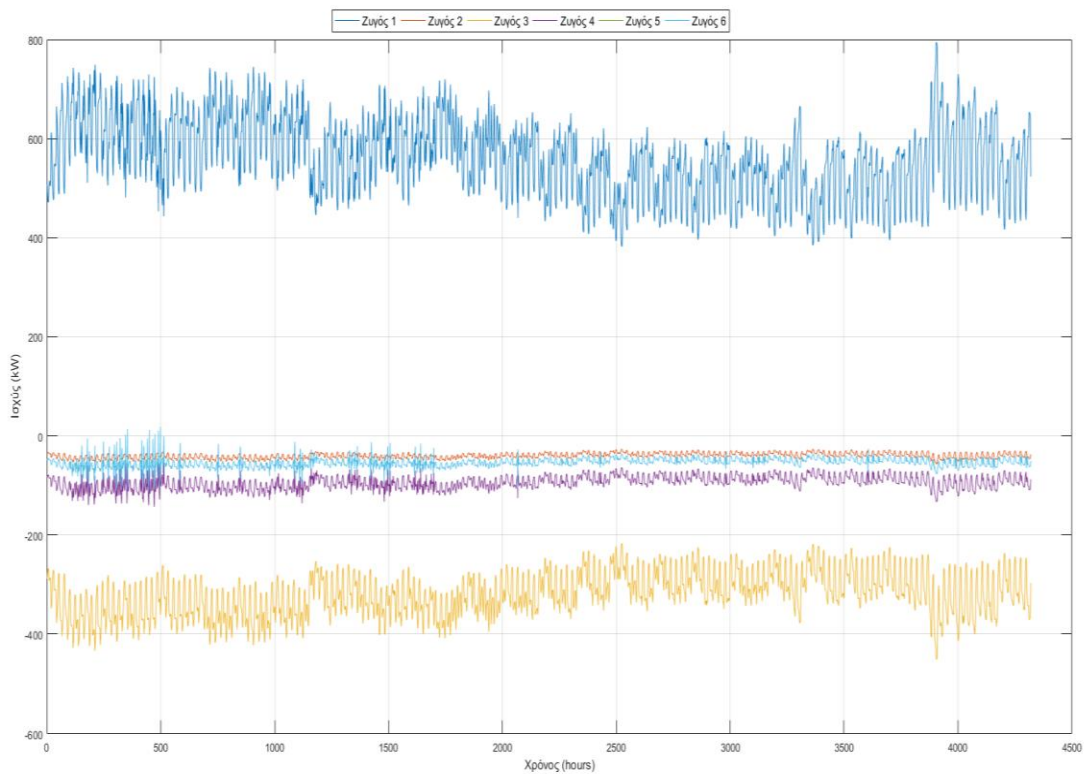
Γράφημα 5.2: Η στάθμη φόρτισης των μπαταριών



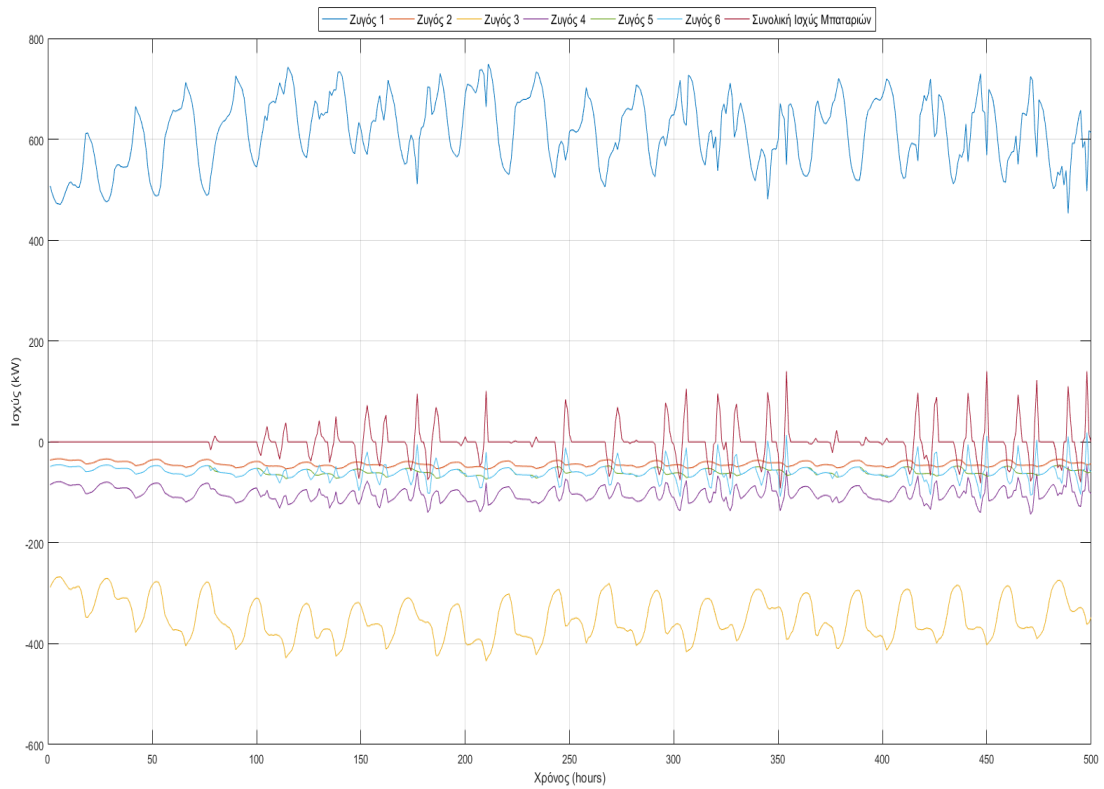
Γράφημα 5.3: Η μέση απώλεια χωρητικότητας ανά ώρα των μπαταριών



Γράφημα 5.4: Η στάθμη φόρτισης των μπαταριών για τις πρώτες 500 ώρες
 Στα γραφήματα 5.2 και 5.4 φαίνεται η επιλογή μικρότερης στάθμης φόρτισης για την μεγαλύτερη μπαταρία, όπως εξακριβώθηκε και στο κεφάλαιο 3.

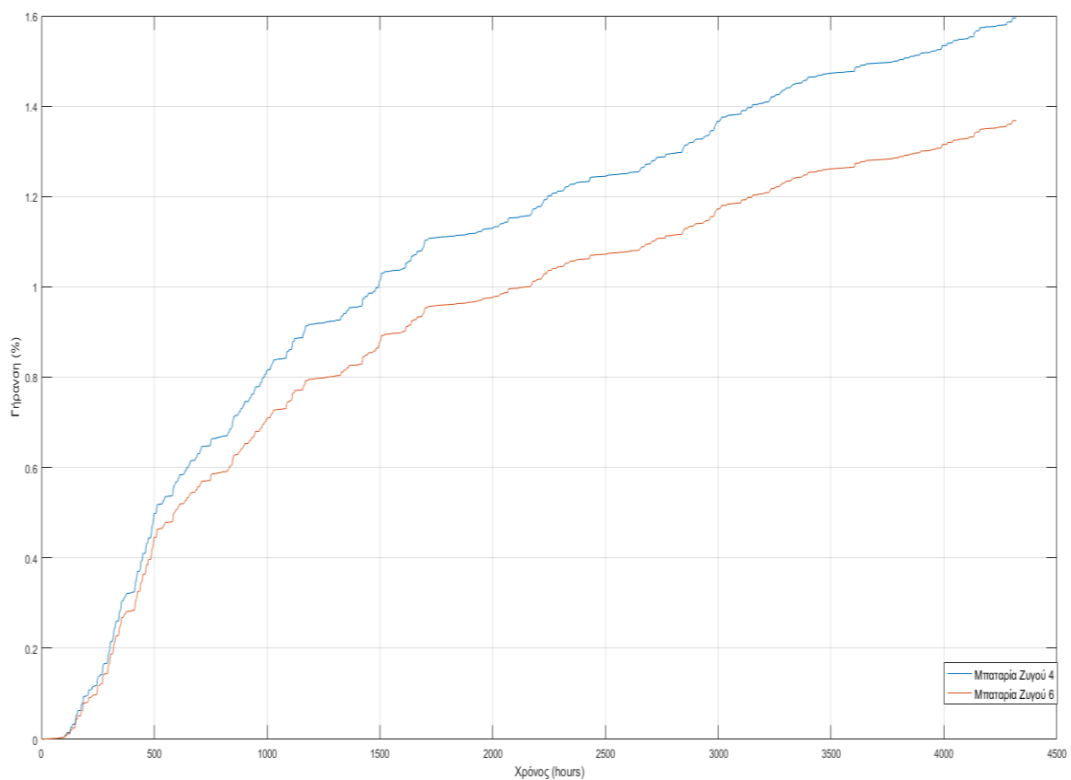


Γράφημα 5.5: Η έγχυση ισχύος στους ζυγούς



Γράφημα 5.6: Η έγχυση ισχύος στους ζυγούς και η συνολική ισχύς των μπαταριών για τις 500 πρώτες ώρες

Στα γραφήματα 5.5-5.6 φαίνεται η έγχυση της ισχύος στους ζυγούς και η επίπτωση της λειτουργίας της μπαταρίας.



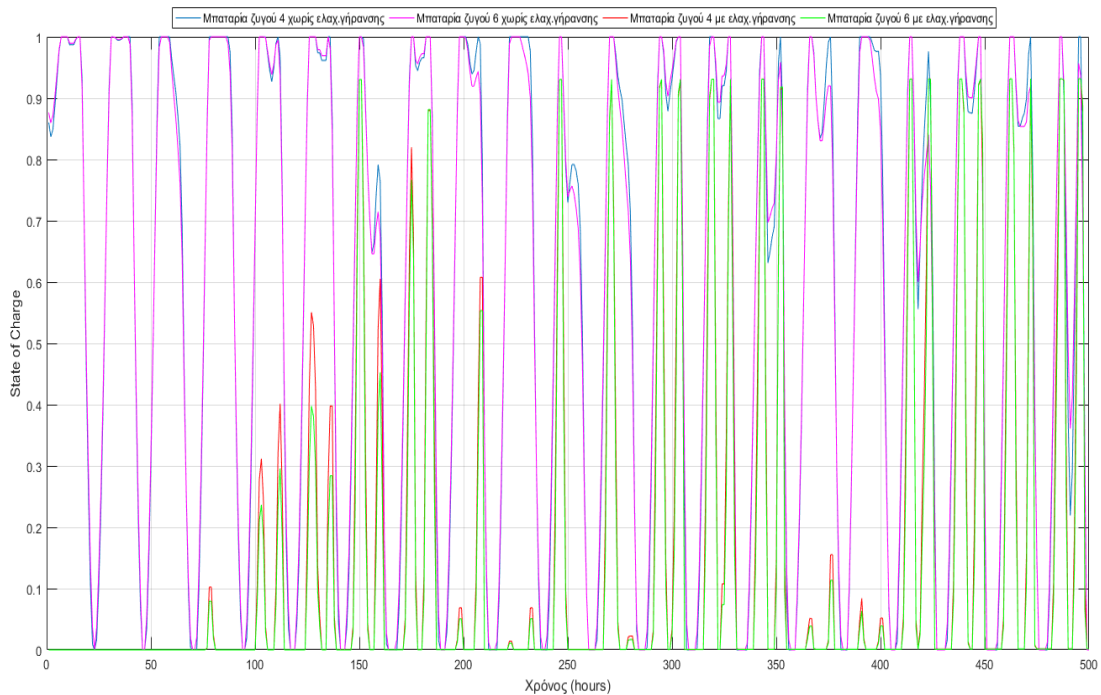
Γράφημα 5.7: Η αθροιστική συνολική γήρανση των μπαταριών

Ενώ στο κεφάλαιο 3, για το πλήθος των μπαταριών, ο αλγόριθμος ελαχιστοποίησης της γήρανσης οδηγούσε κάθε μπαταρία σε ίδια συνολική κανονικοποιημένη απώλεια χωρητικότητας, εδώ λόγω της απαίτησης χρήσης διαφορετικού συντελεστή, δεν επιτεύχθηκε η βέλτιστη τιμή για τις 2 μπαταρίες, ωστόσο αυτή προσεγγίστηκε με αρκετά καλό αποτέλεσμα, επεκτείνοντας τον χρόνο ζωής των μπαταριών σε 15 και 18 χρόνια για το κριτήριο EoL_{0.5}.

5.3.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής στο ΣΗΕ 6 ζυγών, με τα αποτελέσματα λειτουργίας χωρίς συνυπολογισμό της γήρανσης.

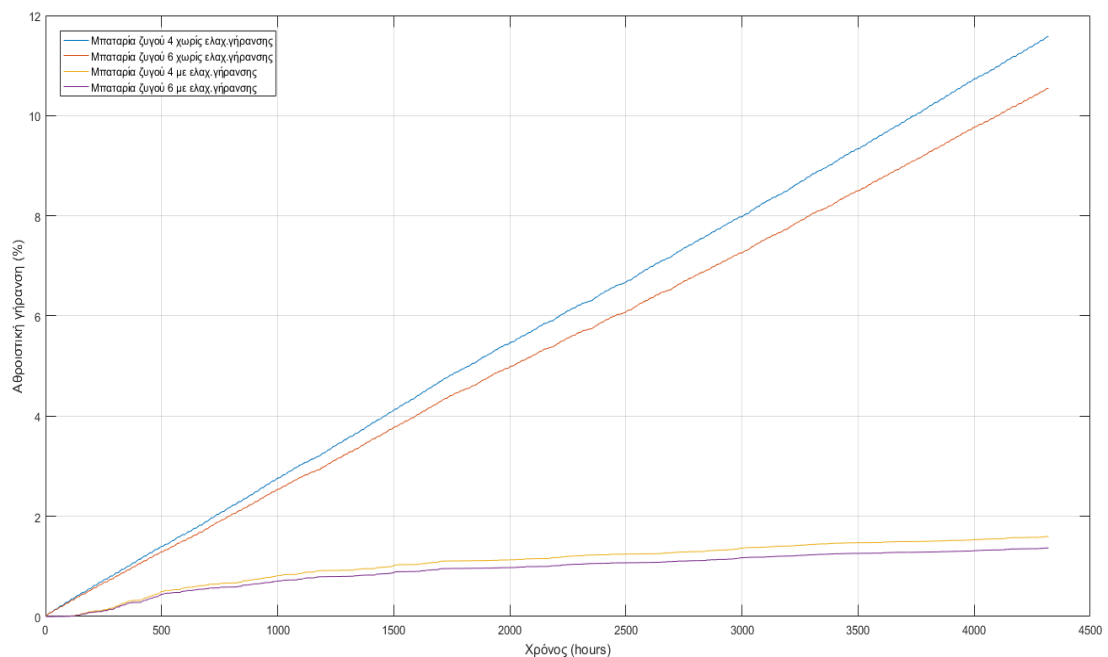
	Συνολική Γήρανση (kWh)	Συνολική Γήρανση (%)	EoL _{0.2}	EoL _{0.5}	Κυκλοι
Μπαταρία Ζυγού 4	1.2766	1.598	6 χρόνια 217 ημ.	15 χρόνια 235 ημ.	318
Μπαταρία Ζυγού 4 χωρίς ελαχ.γήρανσης	9.14	11.425	319 ημέρες	2 χρόνια 68 ημ.	602
Μπαταρία Ζυγού 6	1.3685	1.3685	7 χρόνια 112 ημ.	18 χρόνια 97 ημ.	320
Μπαταρία Ζυγού 6 χωρίς ελαχ.γήρανσης	10.231	10.231	346 ημέρες	2 χρόνια 135 ημ.	550

Πίνακας 5.3: Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα λειτουργίας για τις δύο πολιτικές, για το ΣΗΕ των 6 ζυγών



Γράφημα 5.8: Η στάθμη φόρτισης των μπαταριών για τις πρώτες 500 ώρες

Παραπάνω φαίνεται η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας του ζυγού 6 με ελαχιστοποίηση της γήρανσης να προσεγγίζει την στάθμη των μπαταριών με την πολιτική χωρίς την χρήση της ελαχιστοποίησης της γήρανσης. Γενικά η SOC με χρήση του αλγορίθμου κυμαίνεται χαμηλότερα απ' ότι χωρίς την χρήση του, όπως και στην περίπτωση απλοποιημένου ΣΗΕ. Για τις πρώτες 70 ώρες ο αλγόριθμος επιλέγει να μην φορτίσει καμία από τις μπαταρίες, κάτι το οποίο σχετίζεται και με το κόστος της ισχύος του δικτύου εκείνη την χρονική περίοδο.



Γράφημα 5.9: Η αθροιστική γήρανση των μπαταριών

Στο γράφημα 5.9 φαίνεται η διαφορά στην απώλεια χωρητικότητας λόγω γήρανσης για τις 2 πολιτικές χειρισμών. Με χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης της γήρανσης βλέπουμε ότι επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της απώλειας χωρητικότητας, πάνω από 10%

5.3.3 Εφαρμογή στο δίκτυο 33 ζυγών

Η τοπολογία του δικτύου φαίνεται στο σχήμα 4.3, ενώ τα χαρακτηριστικά του στον πίνακα 4.6 . Χρησιμοποιούνται 6 μπαταρίες που τοποθετούνται στους ζυγούς 4, 6, 14, 16, 23 και 28. Για διευκόλυνση και εξισορρόπηση του συστήματος χρησιμοποιούνται μπαταρίες ίδιου μεγέθους:

	Μπαταρία Ζυγών
C_{bat}	100 kwh
P_{bat}	80 kW

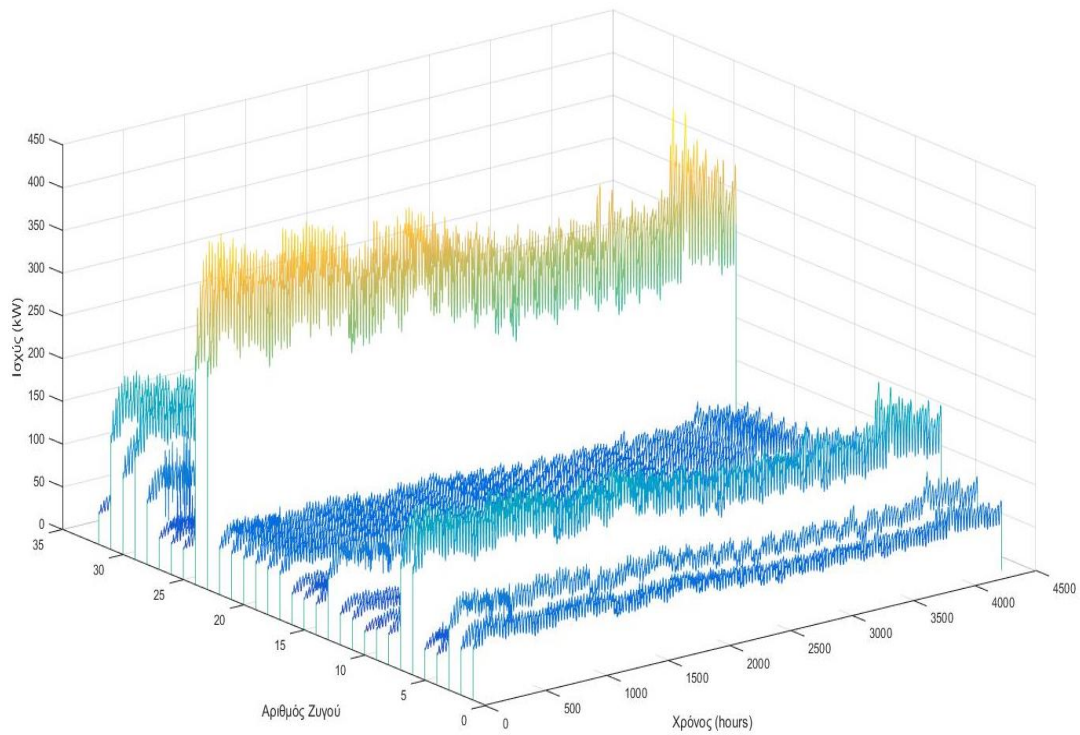
Πίνακας 5.4: Τα στοιχεία των μπαταριών του δικτύου

Μετά από ανάλυση και πλήθος εκτελέσεων του αλγορίθμου, (και με αφετηρία τα ευρήματα του Sensitivity Analysis στην ενότητα 3.4.6 επιλέγεται μια τιμή του συντελεστή βελτιστοποίησης ($\alpha=6e3$). Τα κριτήρια EoL όπως και στο κεφάλαιο 3, υπολογίζονται θεωρώντας τα φαινόμενα της γήρανσης γραμμικά ύστερα από το πέρας των 4230 ωρών [94].

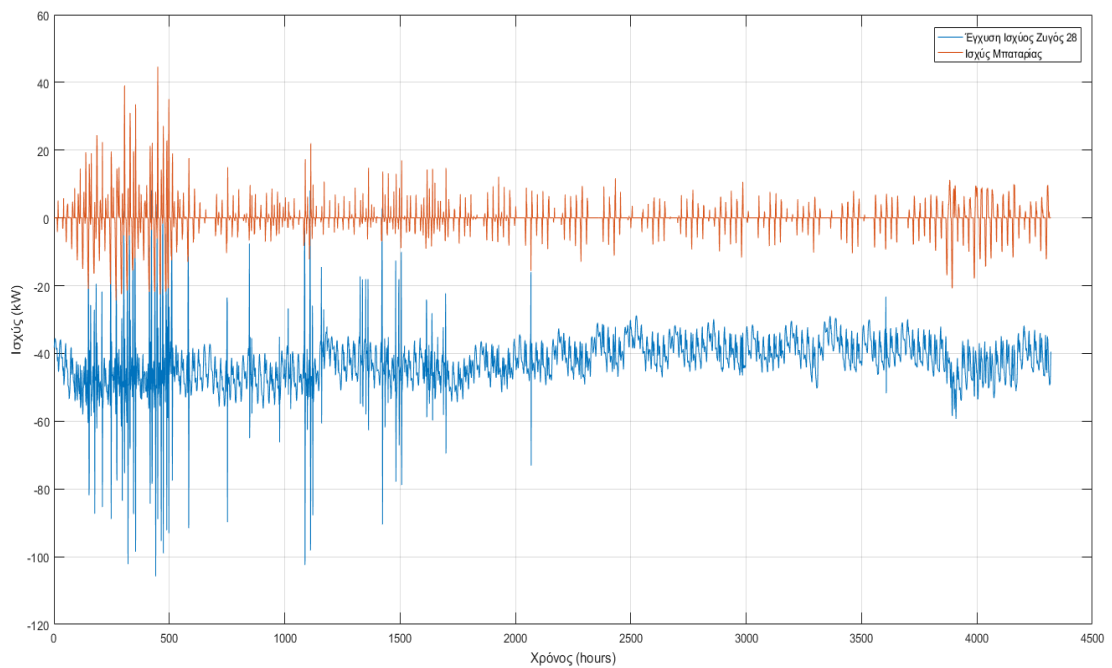
Τα αποτελέσματα με συνυπολογισμό της γήρανσης είναι ίδια για κάθε μπαταρία:

	Συνολική Γήρανση (kWh)	Συνολική Γήρανση (%)	Lifetime EoL_{0.2}	Lifetime EoL_{0.5}	Κυκλοι
Μπαταρία Ζυγού 4, 6, 14, 16, 23, 28	1.4377	1.4375	6 χρόνια 349 ημ.	17 χρόνια 142 ημ.	352

Πίνακας 5.5: Τα αποτελέσματα λειτουργίας για το ΣΗΕ 33 ζυγών

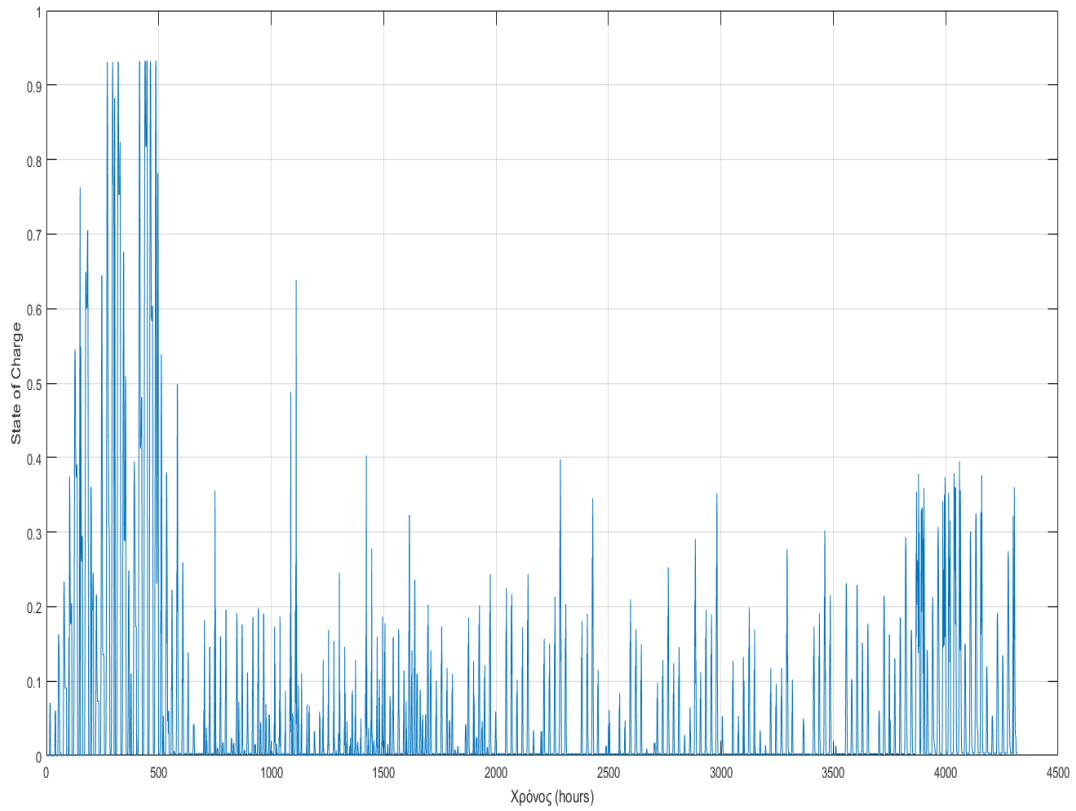


Γράφημα 5.10: Το μέτρο της έγχυσης ισχύος των ζυγών 2-33.

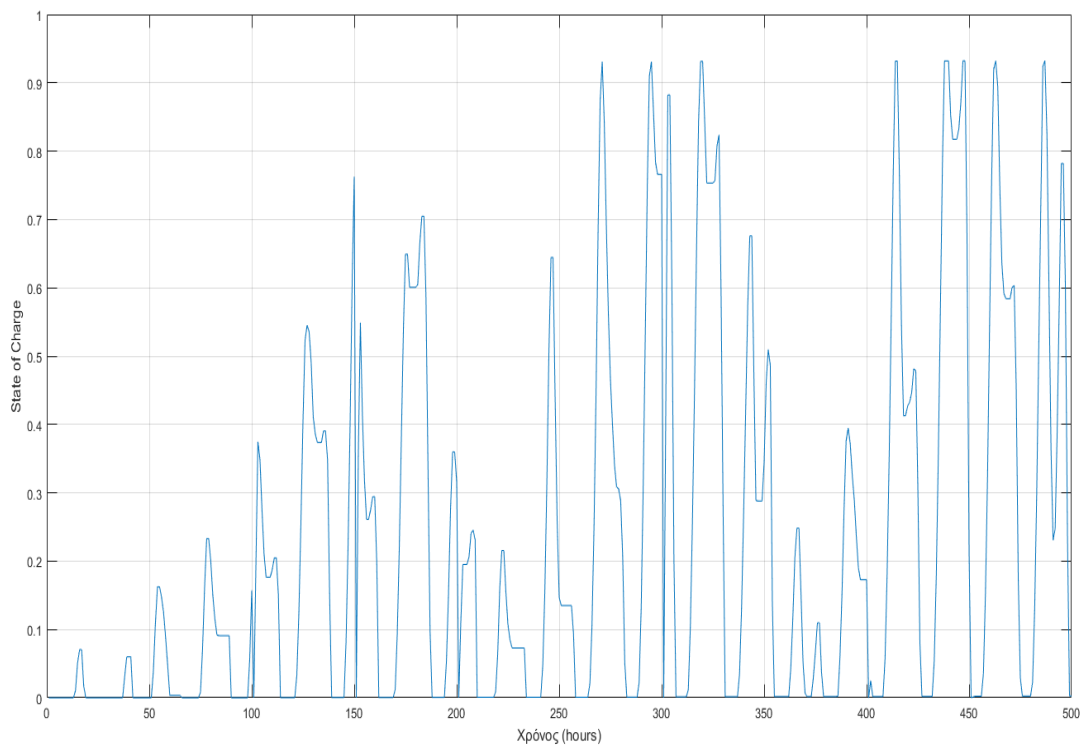


Γράφημα 5.11: Η έγχυση ισχύος του ζυγού 28 και η έγχυση από την μπαταρία που είναι τοποθετημένη στον ίδιο.

Στα γραφήματα 5.10 – 5.11 φαίνεται η έγχυση ισχύος στους ζυγούς και η επίπτωση της λειτουργίας της μπαταρίας σε αυτήν.

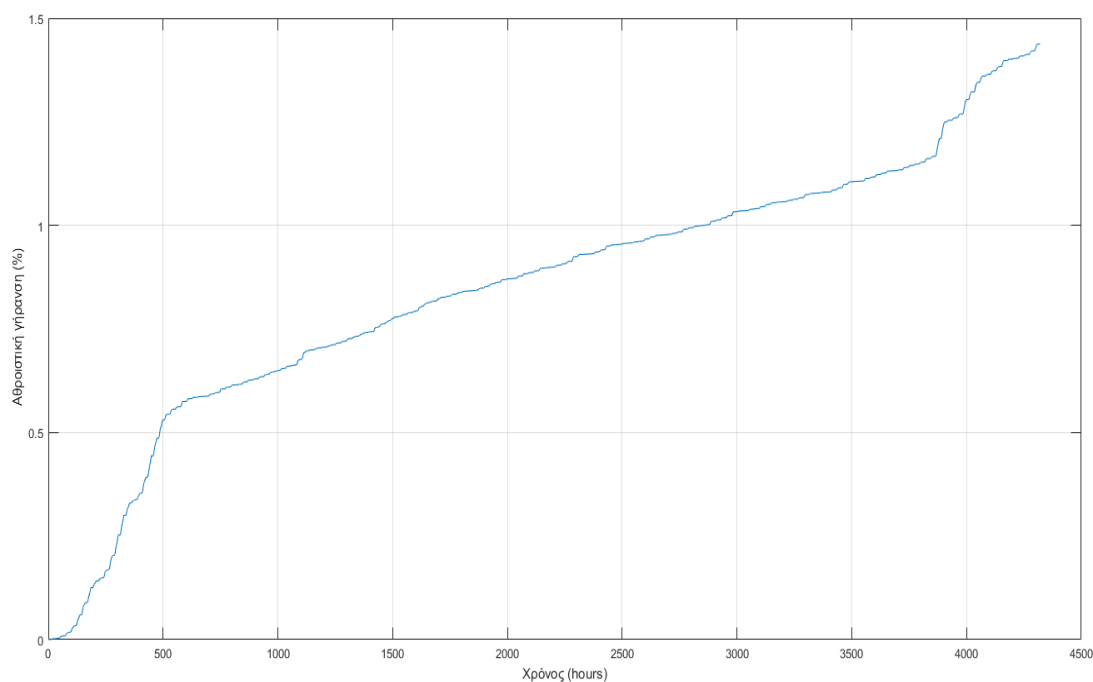


Γράφημα 5.12: Η στάθμη φόρτισης κάθε μπαταρίας



Γράφημα 5.13: Η στάθμη φόρτισης κάθε μπαταρίας για τις πρώτες 500 ώρες

Στα γραφήματα 5.12 - 5.13 φαίνεται η στάθμη φόρτισης κάθε μπαταρίας επηρεασμένη από τον αλγόριθμο ελαχιστοποίησης της γήρασης.

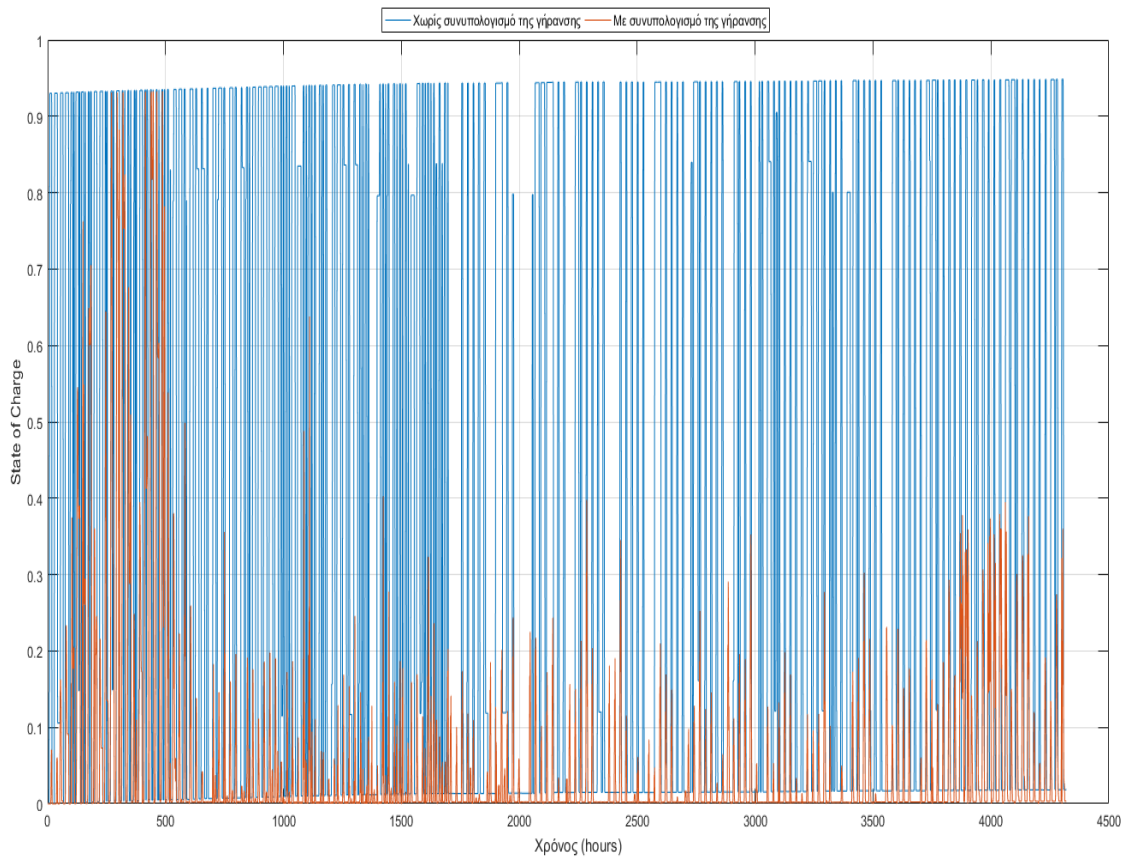


Γράφημα 5.14: Η αθροιστική γήρανση κάθε μπαταρίας

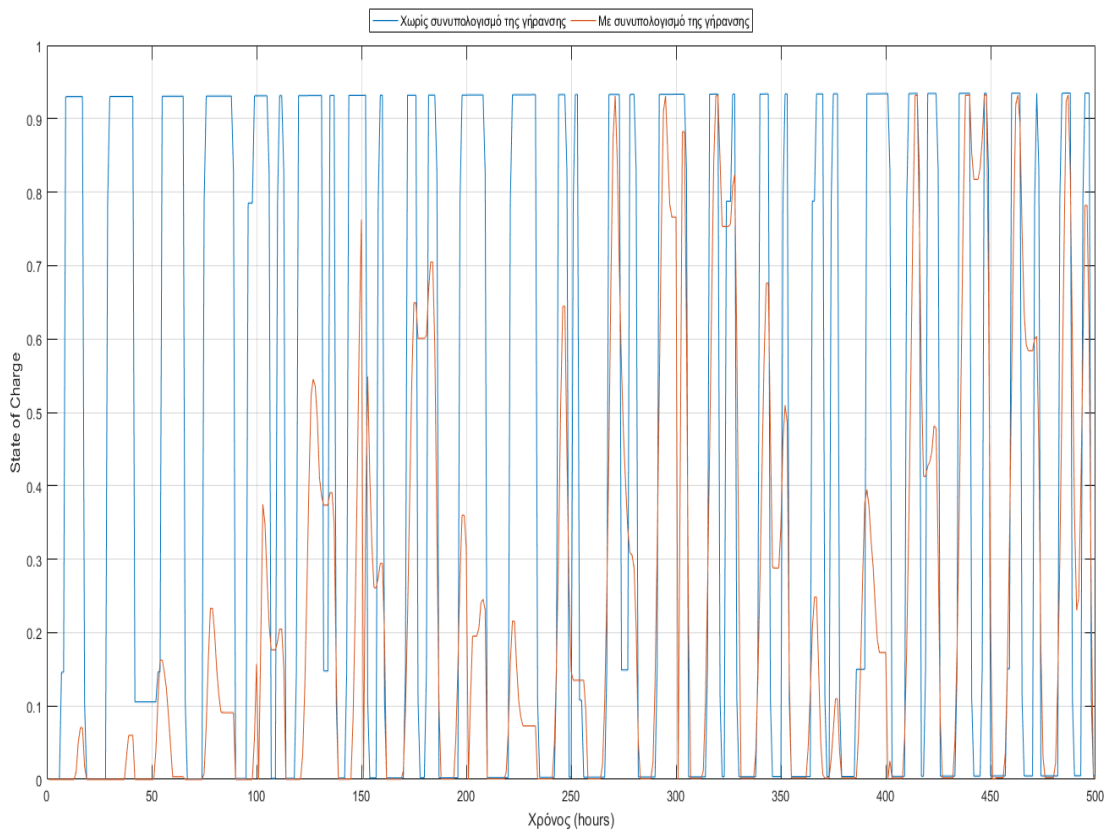
5.3.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής στο ΣΗΕ 33 ζυγών, με τα αποτελέσματα λειτουργίας χωρίς συνυπολογισμό της γήρασης.

	Συνολική Γήρανση (kWh)	Συνολική Γήρανση (%)	ΕοL _{0.2}	ΕοL _{0.5}	Κύκλοι
Μπαταρία Ζυγού 4, 6, 14, 16, 28	1.4377	1.4375	6 χρόνια 349 ημ.	17 χρόνια 142 ημ.	352
Μπαταρία Ζυγού 4, 6, 14, 16, 28 χωρίς ελαχ.γήρασης	9.3096	9.3096	1 χρόνος 27 ημ.	2 χρόνια 250 ημ.	590

Πίνακας 5.6: Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα λειτουργίας για τις δύο πολιτικές, για το ΣΗΕ των 33 ζυγών

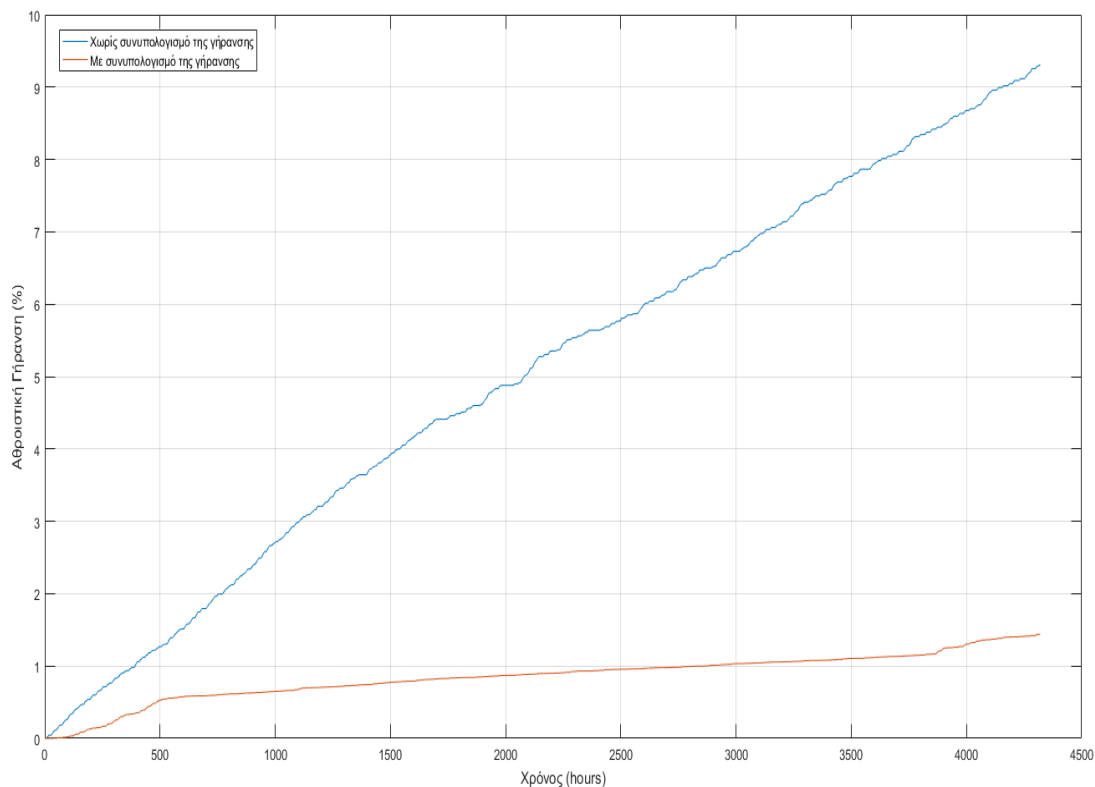


Γράφημα 5.15: Η στάθμη φόρτισης κάθε μπαταρίας



Γράφημα 5.16: Η στάθμη φόρτισης κάθε μπαταρίας για τις πρώτες 500 ώρες

Στα γραφήματα 5.15 – 5.16 φαίνεται έντονα η διαφορά της στάθμης φόρτισης με την χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης της γήρανσης. Ωστόσο η SOC δεν περιορίζεται με κάποιον σταθερό αριθμητικό περιορισμό, όπως φαίνεται και κατά τις πρώτες 500 ώρες που λαμβάνει μέγιστες τιμές.



Γράφημα 5.17: Η αθροιστική γήρανση κάθε μπαταρίας

Όπως και στο κεφάλαιο 3, εδώ φαίνεται η μεταβολή της συνολικής απώλειας χωρητικότητας με την χρήση του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης της γήρανσης. Στο case study των 33 ζυγών, καθεμιά από τις 6 τοποθετημένες μπαταρίες παρουσιάζει περισσότερο από 6 φορές λιγότερη γήρανση.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα, Σύνοψη και Επεκτάσεις

6.1 Σύνοψη

Λόγω της φύσης των υλικών στις μπαταρίες λιθίου, οι χειρισμοί κατά την λειτουργία τους είναι ο βασικότερος παράγοντας της φθοράς που προκαλείται σε αυτές. Φυσικά, η γήρανση οφείλεται σε πλήθος μηχανισμών που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2. Έτσι, ταυτοποιούνται οι παράγοντες και τα μεγέθη μιας μπαταρίας και συνδέονται με τους μηχανισμούς γήρανσης. Η ποσοτικοποίηση, πρόβλεψη κι ελαχιστοποίηση της γήρανσης μέσω μεγεθών λειτουργίας (στάθμη φόρτισης, ρεύμα/ισχύς μπαταρίας κ.α.) κρίνεται αναγκαία ώστε η μπαταρία να παραμείνει «υγιής» καθ' όλη την διάρκεια της εφαρμογής και να αποδίδει τα βέλτιστα.

Στο παρόν έγινε διερεύνηση της επίδρασης της γήρανσης σε μπαταρίες λιθίου σε επίπεδο δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Πλήθος ερευνών πειραματικά ή μελετητικά, έχουν πραγματοποιηθεί για τα φαινόμενα γήρανσης σε, μπαταρίες υπό διάφορα ρεύματα φόρτισης, εύρος κύκλων, τάσης και βάθους εκφόρτισης, επίσης μεγάλο μερίδιο της έρευνας καταλαμβάνουν και οι εφαρμογές τροφοδότησης ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο μικρός είναι ο αριθμός μελετών που συναντάται στην διεθνή βιβλιογραφία κι αφορά στην ενσωμάτωση της τεχνολογίας στο ζήτημα της φθοράς των μπαταριών λιθίου, σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και δίκτυα. Η ελαχιστοποίηση της γήρανσης ως διαδικασία, καλείται να εκτελεστεί παράλληλα με τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου. Η ανάλυση πλέον γίνεται στο επίπεδο της ισχύος ώστε να συνάδει με τα περιβάλλοντα ελέγχου και παραμετροποίησης των συστημάτων, ενώ οι η αποδοτικότητα κρίνεται βάσει της οικονομικής απόδοσης των συστημάτων αποθήκευσης κατά τους κύκλους λειτουργίας των δικτύων.

Για την υλοποίηση της βελτιστοποίησης, στην παρούσα εργασία, γίνεται χρήση και παραμετροποίηση υπάρχοντων μοντέλων για την δημιουργία ενός συστήματος μοντελοποίησης, ικανού να περιγράψει τις μεταβολές των μεγεθών λειτουργίας που επηρεάζουν την φθορά της μπαταρίας. Στην συνέχεια, χρησιμοποιείται η έννοια του χάρτη γήρανσης και μελετάται η κατασκευή του. Στην ουσία πρόκειται για την αντιστοίχιση των μεγεθών της στάθμης φόρτισης, ισχύος μπαταρίας και συνολικής χωρητικότητας με την γήρανση της μπαταρίας. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η ποσοτικοποίηση της γήρανσης που προκαλείται από μεμονωμένους χειρισμούς. Η γραμμικοποίηση του χάρτη γήρανσης, οδηγεί σε μια ευνοϊκότερη μαθηματική αποτύπωση, για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η ελαχιστοποίηση της γήρανσης, εξετάζεται εξατομικευμένα σε υποτιθέμενο ζυγό, ενώ στην συνέχεια ενσωματώνεται στην λειτουργία δικτύου με παράλληλη βελτιστοποίηση της ροής φορτίου. Η υλοποίηση της βελτιστοποίησης της ροής φορτίου πραγματοποιήθηκε με γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής ώστε να συμπεριληφθεί μαζί με την γήρανση σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού.

6.2 Συμπεράσματα

Για την ορθή αντιμετώπιση του προβλήματος της γήρανσης της μπαταρίας λιθίου πραγματοποιήθηκε θεωρητική μελέτη των φαινομένων της γήρανσης, έτσι ώστε να διακριθούν και να χαρακτηριστούν αυτά ανάλογα με την αναγκαιότητα της διερεύνησής τους στα πλαίσια λειτουργίας ενός δικτύου. Τα κυριότερα μεγέθη που επηρεάζουν την γήρανση και ελήφθησαν υπόψιν στην ελαχιστοποίηση είναι η στάθμη φόρτισης, η ροή ισχύος και το ρεύμα της μπαταρίας και η ονομαστική χωρητικότητά της.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση των μοντέλων περιγραφής της λειτουργίας των μπαταριών ώστε να βρεθεί μοντέλο κατάλληλο για την ενσωμάτωσή του σε αλγόριθμο ελαχιστοποίησης της γήρανσης. Σε μοντέλου ισοδύναμου κυκλώματος ικανού να περιγράψει την λειτουργία της μπαταρίας λιθίου ιόντων, έγινε η ενσωμάτωση του μοντέλου Ki.Ba.M καθώς μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης και των ταχέων αντιδράσεων ενώ ταυτόχρονα είναι πολύ εύχρηστο μαθηματικά.

Χρησιμοποιώντας δημοσιευμένες μελέτες σχετικές με την συσχέτιση των μεγεθών λειτουργίας της μπαταρίας με την γήρανσή της, γίνεται αναφορά στους χάρτες γήρανσης που μπορούν να παραχθούν και αναλύεται η διαδικασία κατασκευής τους. Η μετατροπή του χάρτη σε κυρτό, οδηγεί στην εξαγωγή της συνάρτησης γήρανσης που ύστερα από την αναγωγή της για κάθε μέγεθος μπαταρίας χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για την δημιουργία διακριτής σχέσης των χειρισμών της μπαταρίας με την απώλεια χωρητικότητας που επιδέχεται.

Κατά την διερεύνηση της συμπεριφοράς της μπαταρίας με τις πολιτικές της ελεύθερης στάθμης φόρτισης, του περιορισμού της στάθμης και της ελαχιστοποίησης της γήρανσης σε απλουστευμένο δίκτυο, διαπιστώθηκε ότι περιορίζοντας αριθμητικά την στάθμη φόρτισης δεν επιτυγχάνεται κάποιο επιθυμητό αποτέλεσμα, παραμόνο μια πολύ μικρή μεταβολή που δεν μπορεί να θεωρηθεί ως βελτίωση. Με την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης διαπιστώθηκε η σημαντική διαφορά της συνολικής απώλειας χωρητικότητας κατά το πέρας της προσομοίωσης. Σημαντική είναι επίσης και η επέκταση του χρόνου ζωής της μπαταρίας που επιτυγχάνεται με την χρήση του αλγορίθμου. Τα μεγέθη λειτουργίας της μπαταρίας δεν περιορίζονται πλέον στατικά αλλά παίρνουν τιμές με στόχο την ελαχιστοποίηση της συνολικής γήρανσης της μπαταρίας, κάτι που επιτρέπει στην μπαταρία πολλές φορές να λειτουργεί σε μέγιστες τιμές για την ικανοποίηση των αναγκών του δικτύου. Πολύ σημαντική επίσης είναι η εικόνα της συμπεριφοράς του αλγορίθμου ως προς το βάθος φόρτισης. Ο αλγόριθμος «εισάγει» ενδιάμεσα στάδια ώστε οι διαδικασίες φόρτισης κι εκφόρτισης να συμβαίνουν πιο ομαλά, δίνοντας προτεραιότητα κατά κάποιο τρόπο στις μερικές φορτίσεις έναντι των πλήρων. Ο αριθμός των κύκλων δεν φαίνεται να ακολουθεί κάποιον κανόνα. Ωστόσο είναι στις περισσότερες περιπτώσεις είναι φανερά λιγότεροι (έως και τρεις φορές) από τους αντίστοιχους κύκλους των δύο στρατηγικών όπου δεν εφαρμόζεται ο αλγόριθμος. Στην παρούσα διπλωματική, για την μέτρηση των κύκλων, δεν γίνεται διάκριση μεταξύ πλήρων ή μερικών, όμως όπως ειπώθηκε παραπάνω,

αναμένεται με την χρήση του αλγορίθμου, ο αριθμός των μερικών κύκλων λειτουργίας να αυξάνεται.

Από την ανάλυση ευαισθησίας της υλοποίησης στον παράγοντα στάθμισης της γήρανσης που πραγματοποιήθηκε φαίνεται ότι, η επίδοση του αλγορίθμου ως προς την απώλεια χωρητικότητας της μπαταρίας μπορεί να μετριασθεί ώστε να αυξηθεί η ανταλλαγή ισχύος από και προς το δίκτυο, με το αντίστοιχο τμήμα σε γήρανση της ίδιας της μπαταρίας. Ωστόσο, ακόμη και η επιλογή χαμηλού συντελεστή στάθμισης επέφερε σημαντική βελτίωση στην γήρανση και τον αναμενόμενο χρόνο ζωής της μπαταρίας.

Κατά την διερεύνηση της δυνατότητας της ενσωμάτωσης του αλγορίθμου σε συστήματα ελέγχου πραγματικού χρόνου, αναδείχθηκε η αναγκαιότητα συνδυασμού της εκτέλεσης του αλγορίθμου για το ζητούμενο χρονικό ορίζοντα, με την εισαγωγή προβλέψεων φορτίου και παραγωγής. Προτείνεται έτσι ο συνδυασμός αυτός με την χρήση μιας παράλληλης διαδικασίας για τον υπολογισμό του βέλτιστου συντελεστή στάθμισης για την επιδιωκόμενη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Εξετάζοντας στην συνέχεια, την αποδοτικότητα του αλγορίθμου βέλτιστης ροής ισχύος, αυτή κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική υπολογίζοντας το σφάλμα του σε σύγκριση με τις τιμές που παράγονται ως αποτέλεσμα της συνάρτησης $\text{runpf}()$ του `Matpower`. Έτσι βεβαιώνεται η ακρίβεια των υπολογισμών των μεγεθών του δικτύου για την επίλυση του συνδυασμένου προβλήματος ελαχιστοποίησης.

Κατά την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της παραγωγής και της γήρανσης των τοποθετημένων μπαταριών στο δίκτυο, η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της μη ελαχιστοποίησης της γήρανσης, δείχνει την χρηστικότητα του μοντέλου που χρησιμοποιείται. Η πρόβλεψη της ισχύος και της στάθμης φόρτισης της μπαταρίας με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της γήρανσης σε συνδυασμό με την εύρεση βέλτιστης ροής ισχύος στις γραμμές του ΣΗΕ, οδηγούν σε αποτελέσματα παρόμοια με αυτά που παρουσιάστηκαν στην περίπτωση ενός μόνο υποτιθέμενου ζυγού. Ωστόσο, η διερεύνηση της ευαισθησίας σε αυτήν την περίπτωση, διαπιστώθηκε δυσχερέστερη. Ειδική αντιμετώπιση, απαιτούν οι περιπτώσεις όπου τοποθετούνται διαφορετικού μεγέθους μπαταρίες στους ζυγούς. Στη παρούσα διπλωματική, καθώς ο χρόνος επίλυσης των προβλημάτων με πολλούς ζυγούς και πολλά διαφορετικά μεγέθη μπαταρίας, είναι μεγάλος, ο βέλτιστος συντελεστής βρέθηκε κατά προσέγγιση. Ακόμη και σε αυτήν την περίπτωση η γήρανση που υπολογίστηκε στο ΣΗΕ 6 ζυγών με εγκατεστημένες 2 διαφορετικές μπαταρίες ήταν κατά πολύ μικρότερη από αυτήν χωρίς την χρήση του αλγορίθμου, επεκτείνοντας την διάρκεια ζωής των μπαταριών σε πολλαπλάσιο χρόνο. Στο δίκτυο 33 ζυγών, χρησιμοποιήθηκαν μπαταρίες ίδιου μεγέθους για την ευνοϊκότερη επίλυση του συνδυασμένου προβλήματος. Η γήρανση και σε αυτή την περίπτωση υπολογίστηκε κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτήν όπου δεν χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ελαχιστοποίησης. Και στις δύο περιπτώσεις ισχύουν τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο απλοποιημένο δίκτυο σε σχέση με την συμπεριφορά της μπαταρίας.

Δίνεται έτσι, μια ερμηνεία των φαινομένων της γήρανσης σε επίπεδο διανομής και καταναλωτή και καθίσταται δυνατή η εκμετάλλευσή της ελαχιστοποίησης τους για την οικονομική αξιολόγηση και την βιωσιμότητα των αποθηκευτικών μέσων. Το κύριο

αποτέλεσμα αυτής της εργασίας ήταν η χρήση μοντέλου μπαταρίας που λαμβάνει υπόψη τα μεγέθη που επηρεάζουν την γήρανση, το οποίο προέκυψε ύστερα από τροποποίηση ήδη υπαρχόντων μοντέλων και μπορεί πολύ εύκολα να αυτοματοποιηθεί. Το μοντέλο αυτό σε συνδυασμό με την χρήση χάρτη γήρανσης καθιστά δυνατό τον υπολογισμό της γήρανσης της μπαταρίας ως απώλεια χωρητικότητας σε κάθε χειρισμό της και σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο εύρεσης βέλτιστης ροής φορτίου δύναται να ενσωματωθεί πλήρως στην μελέτη και την βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός δικτύου.

6.3 Επεκτάσεις της διπλωματικής εργασίας

Όπως αναδείχθηκε, ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε μπορεί να αποτελέσει μέρος μιας συνολικότερης προσέγγισης σε ένα σύστημα ελέγχου των χειρισμών της μπαταρίας. Όμως πέρα από την ενσωμάτωση της γήρανσης σε επίπεδο διανομής, απαιτείται ο συνυπολογισμός της σε κάθε επίπεδο μελέτης και σχεδίασης των δικτύων και του συνόλου του εξοπλισμού τους ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επιρροή της.

Δυνατός είναι ο συνυπολογισμός της γήρανσης στην διαδικασία διαστασιολόγησης και κατανομής των μπαταριών στο δίκτυο, επίσης ενδιαφέροντα αποτελέσματα θα μπορούσαν να προκύψουν από την μελέτη της προτεραιότητας ενσωμάτωσης των μέσων αποθήκευσης λαμβάνοντας υπόψιν την γήρανση τους.

Επίσης η φθορά από τους χειρισμούς θα μπορούσε να περιληφθεί και να αξιολογηθεί κατά την διάρκεια εφαρμογών εξομάλυνσης του κόστους παραγωγής, όπως η διείσδυση των αποθηκευτικών μέσων κατά τις περιόδους που η ζήτηση κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, την λειτουργία και την περαιτέρω διείσδυση των ΑΠΕ και άλλες εφαρμογές. Τα παραπάνω επίσης θα μπορούσαν να περιλαμβάνονται σε συνολικότερες οικονομικές αξιολογήσεις κατά τον σχεδιασμό της επένδυσης σε αποθηκευτικά μέσα, συστήματα ΑΠΕ, εξοπλισμό δικτύου και άλλες εφαρμογές όπου ο παράγοντας του κόστους της επένδυσης φαίνεται να επηρεάζεται από τις απώλειες του αποθηκευτικού μέσου λόγω της γήρανσης.

Βιβλιογραφία

- [1] mathworks.com (2018). Matlab [online] Available at: <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- [2] ntua.gr (2018) Αδειες [online] Available at: <http://www.central.ntua.gr/stats/licenses/currese>
- [3] cornell.edu (2018) Matpower [online] Available at: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>
- [4] cornell.edu (2018) Powerweb [online] Available at: <http://www.pserc.cornell.edu/powerweb/>
- [5] R. Zimmerman, C. Murillo-Sanchez, R. Thomas (2010) MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education , IEEE Transactions on Power Systems (Volume: 26 , Issue: 1 , Feb. 2011)
- [6] opensource.org (2018) BSD 3 Clause License [online] Available at: <https://opensource.org>
- [7] yalmip.github.io (2018) Yalmip [online] Available at: <https://yalmip.github.io/>
- [8] J. Lofberg (2004) YALMIP : a toolbox for modeling and optimization in MATLAB , 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation
- [9] gurobi.com (2018) Gurobi Solver [online] Available at: <http://www.gurobi.com/>
- [10] monash.edu.au (2018) STAC [online] Available at: <http://immersive.erc.monash.edu.au/stac/>
- [11] draw.io (2018) Draw [online] Available at: <https://about.draw.io>
- [12] Κ Βουρνάς, Γ. Κονταξής (2010) "Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας", Εκδόσεις Συμμετρία, ISBN 978-960-266-304-2
- [13] [online] Available at: <http://www.webpages.uidaho.edu/sustainability/images/ElectricPowerSystem-800.jpg>
- [14] [online] Available at: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/electricity.html>
- [15] ΑΔΜΗΕ, ΔΛΕΣ (2018) "Εκθεση για την απόδοση λειτουργίας του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Ετος 2017) " [online] Available at: http://www.admie.gr/fileadmin/groups/EDLES_DLS/PERFORMANCE_REPORT2017-IPTOver1.pdf
- [16] admie.gr (2018) "Περιγραφή του συστήματος μεταφοράς" [online] Available at: <http://www.admie.gr/to-systima-metaforas/dedomena-stoicheia-systimatos/%20perigrifi-systimatos-metaforas/>
- [17] rae.gr (2018) "Μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας" [online] Available at: http://www.rae.gr/site/categories_new/consumers/know_about/electricity/distribution.csp
- [18] Lab of soft energy applications (2018) "Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας" [online] Available at: <http://www.sealab.gr/download/attachments/6619619/tech+storage.pdf?version=1&modificationDate=1372667070000>
- [19] [online] Available at: <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/11/Capture11.jpg>
- [20] eclass.uth.gr (2018) "Αποθήκευση ενέργειας" [online] Available at: http://eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHXB122/Enotita_5.pdf
- [21] Δ. Παπαντώνης (2009) "Νέες προοπτικές για την ανάπτυξη της αντλησιοταμίευσης στην Ελλάδα - Τεχνολογία και τεχνολογικοί περιορισμοί" NTUA, laboratory of hydraulic turbomachines, TEE Ιωάννινα 2009 [online] Available at: http://library.tee.gr/digital/m2380/m2380_papantonis.pdf
- [22] C. Christensen "Energy Procurement in California" CESA, Electric Power Conference and Expo, April 2nd, 2014
- [23] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas , V. Efthimiou (2008) " Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications"" , Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1513–1522
- [24] L. Wagner "Chapter 27 - Overview of Energy Storage Technologies", Future Energy (Second Edition) 2014, Pages 613-631
- [25] [online] Available at: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/Diagram_of_a_battery_with_a_polymer_separator.jpg
- [26] MIT Electric Vehicle Team (2008) "A guide to understanding battery specifications"
- [27] A.Rohit, P. Devi, S. Rangnekara "An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector: Part I – Technologies and Comparison" Journal of Energy Storage, Volume 13, October 2017, Pages 10-23
- [28] M. M. Kabir , Dervis Emre Demirocak "Degradation mechanisms in Li-Ion batteries A state of the art review" Frank H. Dotterweich College of Engineering, Texas A&M University-Kingsville, TX, USA INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH Int. J. Energy Res. 2017; 41:1963–1986
- [29] Hellqvist Kjell (2013) "Performance of conventional and structural lithium-ion batteries", Doctoral Thesis, Applied Electrochemistry, School of Chemical Science and Engineering, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm
- [30] John Catton (2017) "Calendar Aging and Lifetimes of LiFePO4 Batteries and Considerations for Repurposing" , Master Thesis in Chemical Engineering, University of Waterloo, Canada
- [31] Da Deng "Li-ion batteries: basics, progress, and challenges " Energy Science and Engineering 2015, 3(5):385–418
- [32] M.R. Jongerden, B. R. Haverkort "Which battery model to use?" , IET Software (Volume: 3 , Issue: 6 , December 2009)
- [33] M.Doyle, T. F. Fuller,J. Newman (1993), "Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell" , J. Electrochem. Soc. 1993 volume 140, issue 6, 1526-1533
- [34] M.Doyle, T. F. Fuller,J. Newman (1994), "Simulation and Optimization of the Dual Lithium Ion Insertion Cell" J. Electrochem. Soc. 1994 volume 141, issue 1, 1-10
- [35] TF.Fuller "Relaxation phenomena in lithium-ion-insertion cells," Journal of the Electrochemical Society, vol. 141, no. 4, pp. 982 – 990, 1994
- [36] S. Hageman, "Simple PSpice models let you simulate common battery types," Electronic Design News, vol. 38, pp. 117 – 129, 1993.
- [37] S. Gold, "A PSPICE macromodel for lithium-ion batteries" in 12th Annual Battery Conference on Applications and Advances, 1997, pp. 215–222.

- [38] O. Tremblay, L.-A. Dessaint, and A.-I. Dekkiche, "A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles," in Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE, sept. 2007, pp. 284–289
- [39] C. Chiasserini and R. Rao, "Pulsed battery discharge in communication devices," in Proceedings of the 5th International Conference on Mobile Computing and Networking, 1999, pp. 88–95.
- [40] "A model for battery pulsed discharge with recovery effect," in Wireless Communications and Networking Conference. IEEE Press, 1999, pp. 636–639.
- [41] Improving battery performance by using traffic shaping techniques," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 19, no. 7, pp. 1385–1394, 2001
- [42] "Energy efficient battery management," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 19, no. 7, pp. 1235–1245, 2001
- [43] J. Manwell and J. McGowan, "Lead acid battery storage model for hybrid energy systems" Solar Energy, vol. 50, pp. 399–405, 1993.
- [44] "Extension of the kinetic battery model for wind/hybrid power systems" in Proceedings of the 5th European Wind Energy Association Conference (EWEC '94), 1994, pp. 284–289.
- [45] J. Manwell, J. McGowan, E. Baring-Gould, S. W., and A. Leotta, "Evaluation of battery models for wind/hybrid power system simulation," in Proceedings of the 5th European Wind Energy Association Conference (EWEC '94), 1994, pp. 1182–1187.
- [46] D. Rakhmatov S. Vrudhula, "An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems" in Proceedings of the International Conference on Computer Aided Design (ICCAD'01), 2001, pp. 488–493."
- [47] D. Rakhmatov, S. Vrudhula, D. A. Wallach "Battery lifetime predictions for energy-aware computing" in Proceedings of the 2002 International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED '02), 2002, pp. 154–159."
- [48] "A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer" IEEE Transactions on VLSI Systems, vol. 11, no. 6, pp. 1019–1030, 2003."
- [49] A. E. Trippe, R. Arunachala, T. Massier, A. Jossen, T. Hamacher "Charging Optimization of Battery Electric Vehicles including Cycle Battery Aging" , Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2014 IEEE PES
- [50] Demirocak DE, Bhushan B. "Probing the aging effects on nanomechanical properties of a LiFePO4 cathode in a large format prismatic cell" Journal of Power Sources 2015; 280:256–262
- [51] Arora P, White RE, Doyle M. "Capacity fade mechanisms and side reactions in lithium-ion batteries", Journal of the Electrochemical Society 1998, 145:3647–3667
- [52] Broussely M, Biensan P, Bonhomme F, Blanchard P, Herreyre S, Nechev K, Staniewicz RJ. "Main aging mechanisms in Li ion batteries" Journal of Power Sources 2005, 146:90–96
- [53] Mukhopadhyay A, Sheldon BW. "Deformation and stress in electrode materials for Li-ion batteries", Progress in Materials Science 2014; 63:58–116
- [54] Ramdon S, Bhushan B. "Nanomechanical characterization and mechanical integrity of unaged and aged Li-ion battery cathodes", Journal of Power Sources 2014, 246:219–224
- [55] Norin L, Kostecki R, McLarnon F. "Study of membrane degradation in high-power lithium-ion cells" Solid-State Letters 2002; 5:A67–A69
- [56] Vetter J, Novak P, Wagner MR, Veit C, Moller KC, Besenhard JO, Winter M, Wohlfahrt-Mehrens M, Vogler C, Hammouche A. Aging mechanisms in lithium-ion batteries. Journal of Power Sources 2005, 147:269–281
- [57] Aurbach D, Zinigrad E, Cohen Y, Teller H. "A short review of failure mechanisms of lithium metal and lithiated graphite anodes in liquid electrolyte solutions" Solid State Ionics 2002; 148:405–416
- [58] Nagpure SC, Bhushan B, Babu SS. "Multi-scale characterization studies of aged Li-ion large format cells for improved performance: an overview", Journal of Electrochemical Society 2013, 160(11): A2111–A2154.
- [59] K. Amine, C.H. Chen, J. Liu, M. Hammond, A. Jansen, D. Dees, I. Bloom, D. Vissers, G. Henriksen, J. Power Sources 97–98 (2001) 684–687
- [60] K. Amine, J. Luo, J. Liu, C. Chen, A. Anderson, D. Vissers, Proceedings Electrochem. Soc. 2000-36 (2001) 283–287
- [61] Y. Wang, X. Guo, S. Greenbaum, J. Liu, K. Amine, Electrochem, Solid State Letters 4 (2001) A68–A70.
- [62] Marcicki J, "Modeling, parametrization, and diagnostic for lithium-ion batteries with automotive application". Doctoral Thesis, Ohio State University, Columbus, OH, (2012)
- [63] Broussely M, Herreyre S, Biensan P, Kasztelna P, Nechev K, Staniewicz R. Journal Power Sources 2001, 97:13
- [64] Ohzuku T, Ueda A, Yamamoto N, Iwakoshi Y. Journal Power Sources 1995; 54:99
- [65] Ratnakumar BV, Smart MC, Surampudi S. Journal Power Sources 2001, 97–98:137
- [66] Srinivasan V "Batteries for vehicular applications", AIP conference proceedings physics of sustainable energy, Berkeley, CA, (2008), vol. 1044, pp. 283–296
- [67] Zhang X, Shyy W, Sastry AM. Journal of the Electrochemical Society 2007, 154:A910–A916.
- [68] Nagpure SC, Dinwiddie R, Babu SS, Rizzoni G, Bhushan B, Frech T. Journal of Power Sources 2010 195:872.
- [69] Kostecki R, Norin L, Song X, Mc Larnon F., Journal of the Electrochemical Society 2004; 151(4).
- [70] Mikolajczak C, Kahn M, White K, Thomas Long R, "Lithium-ion batteries hazard and use assessment, Fire Protection Research Foundation" July (2011).
- [71] Arora P, Zhang Z. Battery separators. Chemical Reviews 2004 104:4419–4462
- [72] Roth EP, Doughty DH, Pile DL. Effects of separator breakdown on abuse response of 18650 Li-ion cells. Journal of Power Sources 2007; 174:579–583
- [73] Kawakita J, Kobayashi K. Journal of Power Sources 2000; 90:182
- [74] Yoshimoto N, Shibata T, Ishikawa M, Morita M, Gijutu H. Journal of the Surface Finishing Society of Japan 2001; 52:581
- [75] Bharat Balagopal, Cong Sheng Huang, Mo-Yuen Chow "Effect of Calendar Aging on Li Ion Battery Degradation and SOH" Department of Electrical and Computer Engineering, North Carolina State University Raleigh, NC, USA

- [76] Ning G, Haran B, Popov BN. *Journal of Power Sources* 2003; 117:160–169
- [77] Leng F, Ming Tan C, Pecht M. "Effect of temperature on the aging rate of Li ion battery operating above room temperature". *Scientific Reports* 2015; 5:12967. "
- [78] C. Zhou, K. Qian, M. Allan, and W. Zhou, "Modeling of the cost of EV battery wear due to V2G application in power systems" *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 26, no. 4, pp. 1041–1050, Dec. 2011
- [79] Dubarry M et al. "Evaluation of commercial lithium-ion cells based on composite positive electrode for plug-in hybrid electric vehicle applications. Part II: Degradation mechanism under 2C cycle aging" *Journal of Power Sources* 2011, 196:10336–1034
- [80] Ji Y, Zhang Y, Wang CY. "Li-ion cell operation at low temperatures" *Journal of the Electrochemical Society* 2013, 160(4):A636–A649.
- [81] I. Bloom, B. Cole, J. Sohn, S. Jones, E. Polzin, V. Battaglia, G. Henrik-sen, C. Motloch, R. Richardson, T. Unkelhaeuser, D. Ingersoll, H. Case, *Journal of Power Sources* 101 (2) (2001) 238e247
- [82] D. Abraham, E. Reynolds, P. Schultz, A. Jansen, and D. Dees "Temperature dependence of capacity and impedance data from fresh and aged high-power lithium-ion cells" *J. of The Electrochemical Society*, vol. 153, pp. A1610-A1616, 2006
- [83] T. Zheng, A.S. Gozdz, G.G. Amatucci, *J. Electrochem. Soc.* 146 (1999) 4014–4018
- [84] Huang, K. Huang, S. Liu, Y. Zeng, L. Chen. *Electrochimica Acta* 54 (2009) 4783–4788
- [85] Shah K, Chalise D, Jain A. "Experimental and theoretical analysis of a method to predict thermal runaway in Li-ion cells" *J Power Sources* 2016, 330:167–74
- [86] Huaqiang Liua, Zhongbao Weib, Weidong Hec, Jiyun Zhaoa "Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review" *Energy Conversion and Management* 150 (2017) 304–330
- [87] J. Belt, V. Utgikar, and I. Bloom "Calendar and PHEV cycle life aging of high-energy, lithium-ion cells containing blended spinel and layered-dioxide cathodes" *J. Power Sources*, vol. 196, pp. 10213-10221, 2011
- [88] G. Ning, R. E. White, and B. N. Popov, "A generalized cycle life model of rechargeable Li-ion batteries" *Electrochimica Acta*, vol. 51, pp. 2012–2022, (2006)
- [89] G. Ning and B. N. Popov "Cycle life modeling of lithium-ion batteries" *J. Electrochemical Soc.*, vol. 151, pp. A1584–A1591, 2004
- [90] Christoph Birkel (2017) "Degradation diagnostics for lithium ion cells"
- [91] P. Poonpun and W. Jewell, "Analysis of the cost per kilowatt hour to store electricity," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 2, pp. 529–534, 2008"
- [92] S. Moura, J. Stein, and H. Fathy, "Battery-health conscious power management in plug-in hybrid electric vehicles via electrochemical modeling and stochastic control" *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 3, pp. 679–694, May 2013
- [93] M. Koller, T. Borsche, A. Ulbig, and G. Andersson, "Defining a degradation cost function for optimal control of a battery energy storage system" in *PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble, 2013*, pp.1–6.
- [94] P. Fortenbacher, J. Mathieu, G. Andersson "Modeling, Identification, and Optimal Control of Batteries for Power System Applications", 2014 *Power Systems Computation Conference*"
- [95] P. Fortenbacher, G. Andersson "Battery Degradation Maps for Power System Optimization and as a Benchmark Reference", 2017 *IEEE Manchester PowerTech*
- [96] M. Doyle and J. Newman, "Analysis of capacity-rate data for lithium batteries using simplified models of the discharge process" *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 27, no. 7, pp. 846–856, 1997"
- [97] J. C. Forman, S. J. Moura, J. L. Stein, and H. K. Fathy, "Optimal Experimental Design for Modeling Battery Degradation" 5th *Annual Dynamic Systems and Control Conference joint with the JSME 11th Motion and Vibration Conference*, vol. 1, pp. 309–318, 2012.
- [98] Z. Li, L. Lu, M. Ouyang, and Y. Xiao, "Modeling the capacity degradation of LiFePO₄/graphite batteries based on stress coupling analysis" *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 22, pp. 9757–9766, 2011
- [99] J. F. Manwell and J. G. McGowan, "Lead acid battery storage model for hybrid energy systems," *Solar Energy*, vol. 50, no. 5, pp. 399 – 405, 1993
- [100] Joel C. Forman, Scott J. Moura, Jeffrey L. Stein, Hosam K. Fathy, "Optimal experimental design for modeling battery degradation", *ASME 2012 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference*
- [101] Caihao Weng, Jing Sun, Hui Peng, "An open-circuit voltage model of lithium-ion batteries for effective incremental capacity analysis", *Proceedings of the ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference*
- [102] Safari M., Delacourt C., 2011. "Modeling of a commercial graphite/LiFePO₄ cell". *Electrochem. Soc.*, 158(5), pp. A562–A571.
- [103] P. Ramadass, B. Haran, P. M. Gomadam, R. White, and B. N. Popov, "Development of first principles capacity fade model for Li-ion cells" *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 151, no. 2, pp. A196–A203, 2004.
- [104] G. L. Plett, "Recursive approximate weighted total least squares estimation of battery cell total capacity," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 4, pp. 2319 – 2331, 2011"
- [105] S. Moura, J. Stein, and H. Fathy, "Battery-health conscious power management in plug-in hybrid electric vehicles via electrochemical modeling and stochastic control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 3, pp. 679–694, May 2013
- [106] D. T. Lee and B. J. Schachter, "Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation," *International Journal of Computer & Information Sciences*, vol. 9, no. 3, pp. 219–242
- [107] J. Wang, J. Purewal, P. Liu, J. Hicks-Garner, S. Soukiazian, E. Sherman, A. Sorenson, L. Vu, H. Tataria, and M. W. Verbrugge, "Degradation of lithium ion batteries employing graphite negatives and nickel - cobalt - manganese oxide + spinel manganese oxide positives: Part 1, aging mechanisms and life estimation," *Journal of Power Sources*, vol. 269, pp. 937–948, 2014."

- [108] ieso.ca (2018) Hourly Ontario Energy Price [online] Available at: <http://www.ieso.ca/Power-Data/Price-Overview/Hourly-Ontario-Energy-Price>
- [109] nordpoolgroup.com (2018) Historical Demand Data [online] Available at: <https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/>
- [110] T.Ackerman "Wind power in power systems" Chichester,U.K.: Wiley, pp 53-77,2005
- [111] Hans Glavitsch, Rainer Bacher "Optimal Power Flow Algorithms" Swiss Federal Institute of Technology
- [112] Allen J. Wood, Bruce Wollenberg, G. Sheble (2014) "Power Generation Operation and Control", 3rd Edition, John Wiley & Sons, Canada, ISBN 978-0-471-79055-6
- [113] J. Carpentier "Optimal power flow problem and Solution" bull. Soc.Fr. Electr.3 pp. 431-447, 1962
- [114] Π. Γεωργιάκης (2015) "Σύγχρονα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας", Εκδόσεις Κάλλιπος , ISBN: 978-960-603-038-3 [online] Available at: <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013>
- [115] Α. Αναστασίου (2017) "Βέλτιστη επαναδιαμόρφωση έξυπνων δικτύων διανομής με εφαρμογές σε προβλήματα αποκατάστασης της λειτουργίας τους" Διπλωματική εργασία , ΗΜΜΥ, ΕΜΠ , ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ [online] Available at: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/handle/123456789/13608>
- [116] Iowa State University , The power flow equations [online] Available at: http://home.eng.iastate.edu/~jdm/ee458_2011/PowerFlowEquations.pdf
- [117] M. Maskar, A. Thorat, Dr. Ir.Korachgaon "A review on optimal power flow problem and solution methodologies" , 2017 International Conference on Data Management, Analytics and Innovation (ICDMAI) Zeal Education Society, Pune, India, Feb 24-26, 2017"
- [118] P. Lavrakas "Encyclopedia of Survey Research Methods", Thousand Oaks, Calif. : SAGE Publications, ©2008
- [119] Illinois College of Engineering, Control Systems 2017 lecture notes, "Linearization via Taylor Series" [online] Available at: https://courses.engr.illinois.edu/ece486/fa2017/documents/lecture_notes/state_space_p2.pdf
- [120] Wikipedia (2018) Linearization [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Linearization>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ισχύς Βάσης S_b	100 MVA	
Τάση Βάσης V_b	20.66kV	
Ζυγός Αναφοράς N_0	1	
Αριθμός Ζυγών	33	
Αριθμός Γραμμών	32	
Συνδέσεις μεταξύ ζυγών - Γραμμές	r γραμμής (p.u)	x γραμμής (p.u.)
1 – 2	0.021601	0.011011
2 – 3	0.115501	0.058828
3 – 4	0.085747	0.043670
4 – 5	0.089285	0.045474
5 – 6	0.191877	0.165638
6 – 7	0.043858	0.144974
7 – 8	0.166668	0.055080
8 – 9	0.241311	0.173369
9 – 10	0.244591	0.173369
10 – 11	0.046060	0.015228
11 – 12	0.087715	0.029004
12 – 13	0.343926	0.270596
13 – 14	0.126887	0.167020
14 – 15	0.138461	0.123232
15 – 16	0.174845	0.127684
16 – 17	0.301990	0.403200
17 – 18	0.171495	0.134478
2 – 19	0.038422	0.036665
19 – 20	0.352407	0.317546
20 – 21	0.095939	0.112081
21 – 22	0.166083	0.219593
3 – 23	0.105708	0.072229
23 – 24	0.210385	0.166130
24 – 25	0.209917	0.164255
6 – 26	0.047559	0.024225
26 – 27	0.066583	0.033901
27 – 28	0.248105	0.218749
28 – 29	0.188410	0.164138
29 – 30	0.118898	0.060562
30 – 31	0.228285	0.225614
31 – 32	0.072745	0.084787
32 – 33	0.079890	0.124216
Ζήτηση Ισχύος ανά ζυγό	Ενεργός Ισχύς P_d (MW)	Άεργος Ισχύς Q_d (MVAR)
Ζυγός 1	0	0
Ζυγός 2	0.1	0.06
Ζυγός 3	0.09	0.04

Ζυγός 4	0.12	0.08
Ζυγός 5	0.06	0.03
Ζυγός 6	0.06	0.02
Ζυγός 7	0.2	0.1
Ζυγός 8	0.2	0.1
Ζυγός 9	0.06	0.02
Ζυγός 10	0.06	0.02
Ζυγός 11	0.045	0.03
Ζυγός 12	0.06	0.035
Ζυγός 13	0.06	0.035
Ζυγός 14	0.12	0.08
Ζυγός 15	0.06	0.01
Ζυγός 16	0.06	0.02
Ζυγός 17	0.06	0.02
Ζυγός 18	0.09	0.04
Ζυγός 19	0.09	0.04
Ζυγός 20	0.09	0.04
Ζυγός 21	0.09	0.04
Ζυγός 22	0.09	0.04
Ζυγός 23	0.09	0.05
Ζυγός 24	0.42	0.2
Ζυγός 25	0.42	0.2
Ζυγός 26	0.06	0.025
Ζυγός 27	0.06	0.025
Ζυγός 28	0.06	0.02
Ζυγός 29	0.12	0.07
Ζυγός 30	0.2	0.06
Ζυγός 31	0.15	0.07
Ζυγός 32	0.21	0.1
Ζυγός 33	0.06	0.04

Πίνακας Π1: Στοιχεία του Δικτύου 33 ζυγών