



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΙΧΑΛΗΣ ΝΤΕΝΤΕΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Επιβλέπων καθηγητής
Αναπλ. Καθηγητής Φώτης Στεργιόπουλος

Ο υπογεγραμμένος δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα Διπλωματική Εργασία του ΠΜΣ του Διεθνούς Πανεπιστημίου Ελλάδος είναι εξ' ολοκλήρου δικό μου έργο και συγγράφηκε ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του ΠΜΣ Εφαρμοσμένα Συστήματα Αυτοματοποίησης.

Δηλώνω υπεύθυνα ότι κατά τη συγγραφή ακολούθησα την πρέπουσα ακαδημαϊκή δεοντολογία αποφυγής λογοκλοπής και έχω αποφύγει οποιαδήποτε ενέργεια που συνιστά παράπτωμα λογοκλοπής.

(Όνομα, Ημερομηνία)

ΝΤΕΝΤΕΣ ΜΙΧΑΗΛ

30/10/2022

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα	1
Περίληψη	2
Κεφάλαιο 1 – Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	3
1.1 Αιολική ενέργεια.....	6
1.2 Ηλιακή ενέργεια.....	6
1.3 Αναγκαιότητα αποθήκευσης της ενέργειας.....	7
Κεφάλαιο 2 – Αποθήκευση ενέργειας	9
2.1 Εθνικό σχέδιο αποθήκευσης ενέργειας.....	9
2.2 Μονάδες συσσωρευτών.....	9
2.3 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.....	10
Κεφάλαιο 3 – Συσσωρευτές (μπαταρίες)	12
3.1 Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion).....	13
3.2 Ηλεκτροχημεία.....	14
3.3 Κατάσταση φόρτισης SOC (State of Charge).....	19
3.4 Εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης.....	20
3.5 Μέθοδοι προσδιορισμού του State of Charge.....	20
3.6 Μπαταρίες μολύβδου οξέος (Lead acid).....	28
3.6.1 Λειτουργία μπαταρίας μολύβδου οξέος.....	31
3.6.2 Τάση της μπαταρίας μολύβδου οξέος κατά τη φόρτιση.....	33
3.6.3 Χαρακτηριστικά της μπαταρίας μολύβδου οξέος.....	33
Κεφάλαιο 4 – Ηλεκτρικά μοντέλα μπαταριών	49
4.1 Ηλεκτροχημικά μοντέλα.....	50
4.2 Αναλυτικά μοντέλα.....	51
4.3 Μοντέλο κινητικής μπαταρίας.....	52
4.5 Μοντέλο ιδανικής μπαταρίας.....	53
4.6 Μοντέλο Thevenin μπαταρίας.....	54
Κεφάλαιο 5 – Μοντέλα προσομοίωσης φόρτισης και εκφόρτισης μπαταριών	56
5.1 Μοντέλο φόρτισης μπαταρίας.....	56
5.2 Μοντέλο εκφόρτισης μπαταρίας.....	63
5.3 Διάγραμμα Ragone.....	69
Κεφάλαιο 6 – Επίδραση θερμοκρασίας στις μπαταρίες	73
6.1 Εισαγωγή.....	73
6.2 Πειραματικό μέρος.....	74
Θερμικό μοντέλο της κυψέλης.....	74
Θερμικό μοντέλο 4 μπαταριών.....	79
Κεφάλαιο 7 – Αλγόριθμος MPPT – Perturb & Observe	81
7.1 Εισαγωγή.....	81
7.2 Το φωτοβολταϊκό σύστημα.....	81
7.3 Μετατροπέας υποβιβασμού (buck converter).....	82
7.4 Η μέθοδος Perturb & Observe.....	83
7.5 Πειραματικό μέρος, παραδείγματα.....	86
Συγκεντρωτικοί πίνακες	117
Συμπεράσματα	118
Βιβλιογραφία	122

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η θέρμανση χώρων, τα μέσα μεταφοράς, καθώς και η λειτουργία βιομηχανικών μονάδων, είναι μερικές από τις ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας που απαιτούν τεράστιες ποσότητες ενέργειας. Η διαφαινόμενη εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων του πλανήτη, σε συνδυασμό με την διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, αλλά και την βαθμιαία επιδείνωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, οδήγησε τις σύγχρονες κοινωνίες να στραφούν αφενός σε τεχνικές εξοικονόμησης και ορθολογικής χρήσης της ενέργειας, αφετέρου στην αξιοποίηση των ήπιων ή **Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**.

Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μία σημαντική εγχώρια πηγή ενέργειας, με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Συνεισφέρουν σημαντικά στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό και εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού.

Στην χώρα μας η ανάπτυξη αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων μπορεί να γίνει πιο εύκολα, καθώς ως μία μεσογειακή χώρα έχει μεγάλο δυναμικό αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Οι δύο αυτές μορφές ενέργειας μπορούν να καλύψουν ένα μεγάλο μέρος της παραγωγής ενέργειας.

Σημαντικό επίσης, για την αξιοποίηση των ΑΠΕ, είναι και η αποθήκευση της ενέργειας αυτής ιδιαίτερα της ηλιακής και της αιολικής σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές. Μόνο με αξιόπιστα συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας μπορούν να λειτουργήσουν τα αυτόνομα συστήματα ΑΠΕ, αλλά και να επιτευχθεί η ενσωμάτωση σε μεγάλη κλίμακα της ηλεκτρικής ισχύος από τις ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Η διαθεσιμότητα αξιόπιστης αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας θα οδηγήσει στη χρήση ηλεκτρικών αυτοκινήτων, τουλάχιστον μέσα στις πόλεις, με προφανή θετική επίδραση στο περιβάλλον της πόλης.

Μπορεί να καλύψει τους καταναλωτές σε περιπτώσεις διακοπών (συστήματα UPS) και για τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στις ώρες αιχμής, όταν και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλότερο. Η βέλτιστη μέθοδος αποθήκευσης της ενέργειας για κάθε περίπτωση εξαρτάται από την ποσότητα της ενέργειας που πρέπει να αποθηκευτεί, τη χρονική διάρκεια αποθήκευσης, τη μορφή της ενέργειας που απαιτείται για αποθήκευση και την απόδοση με την οποία ανακτάται η ενέργεια.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να μελετήσουμε την ενεργειακή διαχείριση συστήματος παροχής ενέργειας με αυξημένη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες).

Ξεκινάει με αναφορά στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και την αξιοποίησή τους με βάση την υπάρχουσα τεχνολογία και συνεχίζει με την ανάλυση των συσσωρευτών αποθήκευσης της ενέργειας (μπαταρίες). Οι μπαταρίες που εξετάζονται είναι κυρίως οι Li-Ion (ιόντων λιθίου) και οι μολύβδου οξέος (lead acid). Αναλύεται η λειτουργία τους με τη βοήθεια ισοδύναμων ηλεκτρικών μοντέλων και προσομοιώσεων.

Τέλος, ακολουθούν προσομοιώσεις με φωτοβολταϊκό πάνελ όπου μελετάται η ενεργειακή απόδοση (ισχύς) σε διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος αλλά και διαφορετικής έντασης ακτινοβολίες. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται σε πίνακες και εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

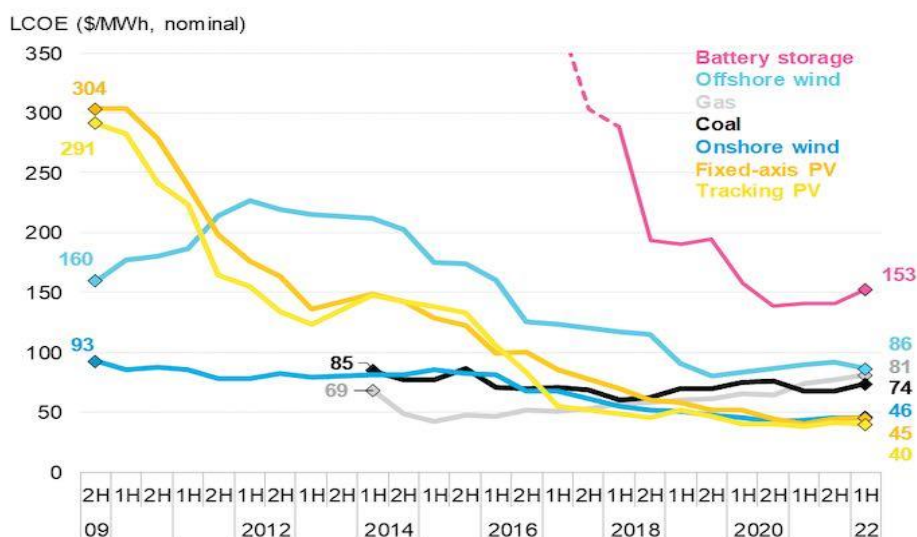
Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η θέρμανση χώρων, τα μέσα μεταφοράς, καθώς και η λειτουργία βιομηχανικών μονάδων, είναι μερικές από τις ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας που απαιτούν τεράστιες ποσότητες ενέργειας, οι οποίες προέρχονται, σε μεγαλύτερο ποσοστό, από συμβατικές πηγές ενέργειας (άνθρακας, φυσικό αέριο, πετρέλαιο, σχάσιμα υλικά). Η διαφαινόμενη εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων του πλανήτη, σε συνδυασμό με την διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, αλλά και την βαθμιαία επιδείνωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, οδήγησε τις σύγχρονες κοινωνίες να στραφούν αφενός σε τεχνικές εξοικονόμησης και ορθολογικής χρήσης της ενέργειας, αφετέρου στην αξιοποίηση των ήπιων ή **Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)**.

Ακόμη και με τις προσωρινές αυξήσεις του κόστους, **το χάσμα τιμών μεταξύ της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και των ορυκτών καυσίμων συνεχίζει να διευρύνεται**, καθώς οι τιμές των καυσίμων και του άνθρακα αυξάνονται ακόμη πιο γρήγορα χωρίς ενδείξεις υποχώρησης.

Τα νεόδμητα **χερσαία αιολικά και ηλιακά έργα είναι τώρα περίπου 40% χαμηλότερα** από τα παγκόσμια σημεία αναφοράς της BNEF για παραγωγή ενέργειας με καύση άνθρακα και φυσικού αερίου, καθώς αυτές βρίσκονται στα επίπεδα των \$US 74 και \$US 81 ανά MWh, αντίστοιχα.

Figure 1: Global levelized cost of electricity benchmarks, 2009-2022

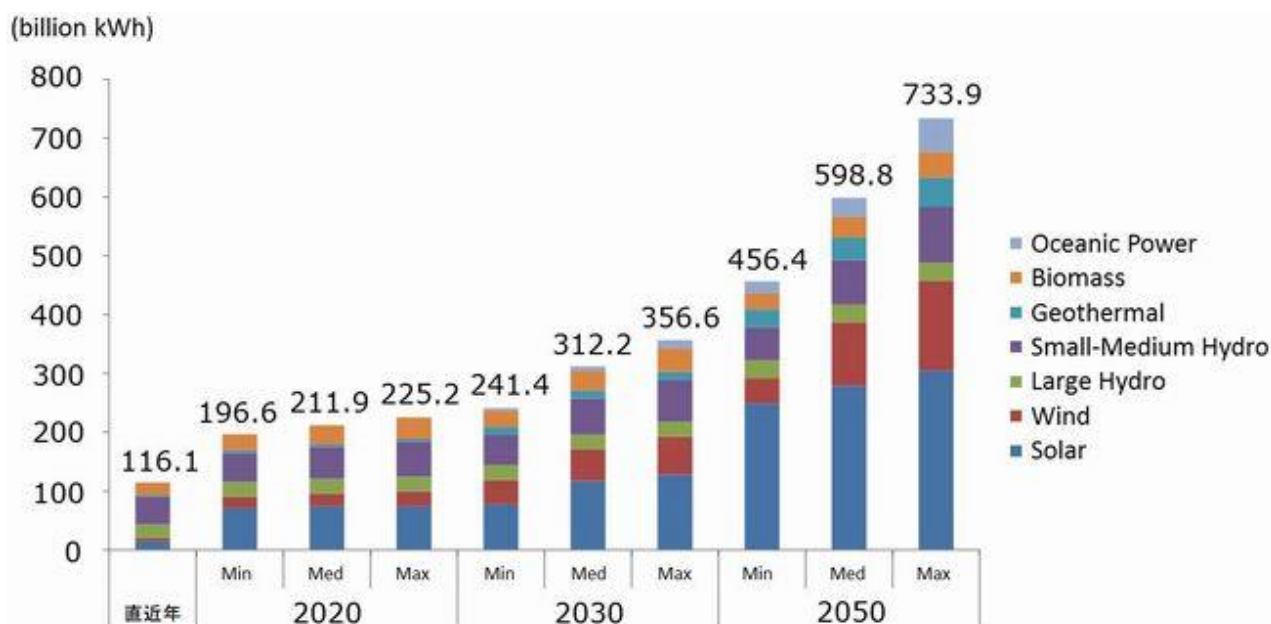


Source: BloombergNEF. Note: The global benchmark for PV, wind and storage is a country-weighted average using the latest annual capacity additions. The storage LCOE is reflective of a utility-scale Li-ion battery storage system with four-hour duration running at a daily cycle and includes charging costs.

Σχήμα 1. Ισοσταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας

Αυτό σημαίνει ότι **οι ΑΠΕ παραμένουν η φθηνότερη πηγή νέας ενέργειας σε χώρες που περιλαμβάνουν τα δύο τρίτα του παγκόσμιου πληθυσμού και τα εννέα δέκατα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας**, όπως φαίνεται στο σχήμα 2. [1.1]

Οι **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)** είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, ο ήλιος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Συγκεκριμένα σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ως **ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές θεωρείται η αιολική, ηλιακή, αεροθερμική, γεωθερμική, υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών, υδροηλεκτρική, από βιομάζα, από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια.** Στην παρακάτω εικόνα παρατηρούμε την χρήση των διάφορων πηγών ενέργειας και το μερίδιο που κατέχει η κάθε μία στο σύνολο των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας και η τάση τους που προβλέπεται μέχρι το 2050.

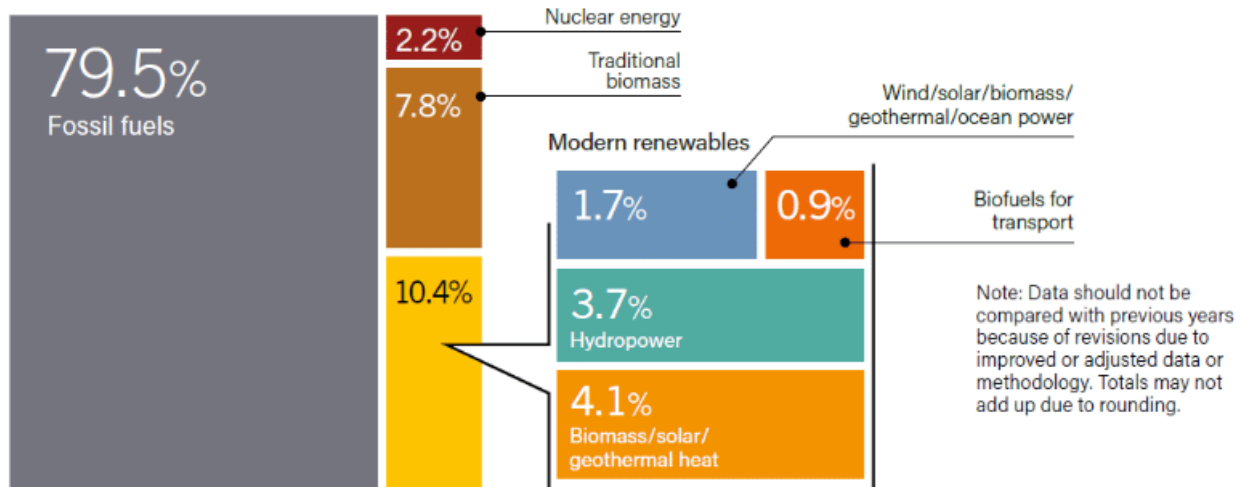


Εικόνα 1. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το 2020. (Πηγή: https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id035296.html)

Ο χαρακτηρισμός «ανανεώσιμες» είναι κάπως καταχρηστικός, αφού ορισμένες από αυτές τις πηγές, όπως η γεωθερμική ενέργεια, δεν ανανεώνονται σε κλίμακα χιλιετιών. Σε κάθε περίπτωση οι ΑΠΕ έχουν μελετηθεί ως λύση στο πρόβλημα της αναμενόμενης εξάντλησης των (μη ανανεώσιμων) αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων. Τελευταία, από την Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και από πολλά μεμονωμένα κράτη, υιοθετούνται νέες πολιτικές για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που προάγουν τέτοιες εσωτερικές πολιτικές και για τα κράτη μέλη. Οι ΑΠΕ αποτελούν τη βάση του μοντέλου οικονομικής ανάπτυξης της πράσινης οικονομίας και κεντρικό σημείο εστίασης του οικολογικού κινήματος.

Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μία σημαντική εγχώρια πηγή ενέργειας, με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Συνεισφέρουν σημαντικά στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό και εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συντελούν και στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς η αξιοποίησή τους δεν το επιβαρύνει, αφού δεν συνοδεύεται από παραγωγή ρύπων ή αερίων που ενισχύουν τον κίνδυνο της κλιματικής αλλαγής, δεδομένου ότι έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός

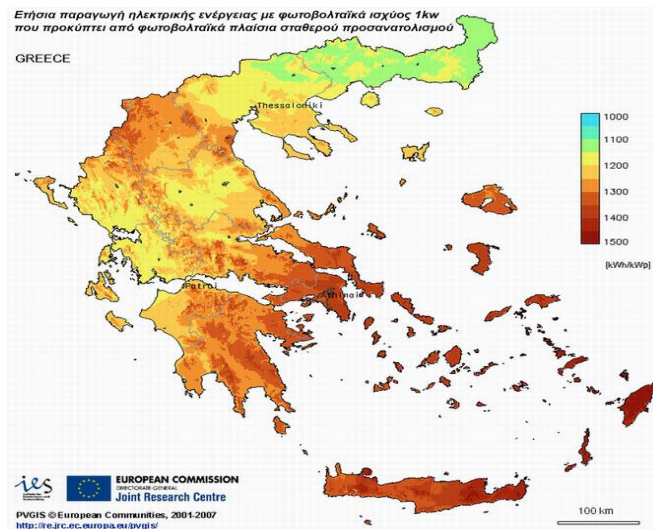
τομέας είναι ο πρωταρχικά υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος [1.2]. Παρ' όλα αυτά, σήμερα την μερίδα του λέοντος στην παραγωγή ενέργειας συνεχίζουν να την κατέχουν τα ορυκτά καύσιμα (εικόνα 2).



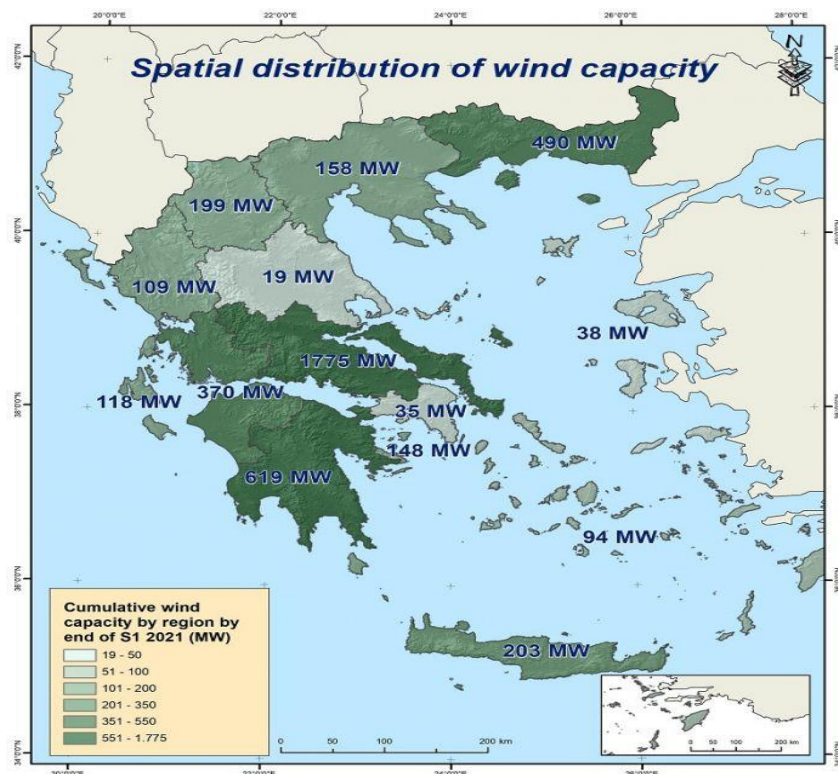
Εικόνα 2. Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας σε σχέση με ορυκτά καύσιμα. (Πηγή: <https://www.researchgate.net/figure>)

Για όλους τους παραπάνω λόγους που αναφέραμε, οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας θα είναι το μέλλον στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η Ελλάδα διαθέτει αξιόλογο δυναμικό ΑΠΕ, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν μια πραγματική εναλλακτική λύση για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών μας αναγκών, συνεισφέροντας στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικά καύσιμα, στην ελάττωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και στην ανάπτυξη αποκεντρωμένων περιοχών. Στην χώρα μας η ανάπτυξη αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων μπορεί να γίνει πιο εύκολα, καθώς ως μία μεσογειακή χώρα έχει μεγάλο δυναμικό αιολικής (εικόνα 4) και ηλιακής ενέργειας (εικόνα 3).



Εικόνα 3. Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με φ/β 1KW. (Πηγή: <http://www.solar-systems.gr/photovoltaic-map-greece-photo.html>)



Εικόνα 4. Η γεωγραφική κατανομή της αιολικής ισχύος για το 2021 (σε MW). (Πηγή: <https://energypress.gr/news/sta-43gw-aioliko-dynamiko-tis-horas-i-statistiki-tis-eletaen-oi-etaireies-protathlites-1o>)

1.1 Αιολική Ενέργεια - Ανεμογεννήτριες

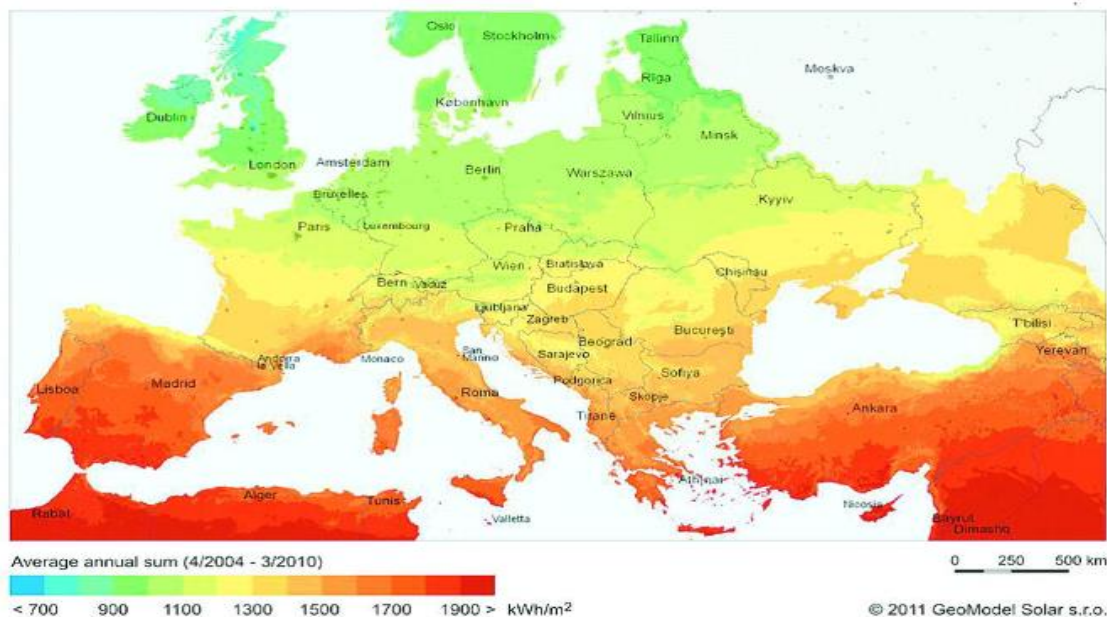
Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου υπήρξε από την αρχαιότητα μια λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του ανθρώπου σε εφαρμογές όπως: ιστιοφόρα, ανεμόμυλοι κ.λπ. Για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούμε σήμερα τις ανεμογεννήτριες, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Οι νησιωτικές περιοχές της Ελλάδας είναι από τις ευνοϊκότερες γεωγραφικές θέσεις παγκοσμίως για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.

1.2 Ηλιακή ενέργεια - Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Φ/Β) μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, λύνοντας έτσι το πρόβλημα της ηλεκτροδότησης περιοχών που είναι δύσκολο να έχουν πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο (απομονωμένα σπίτια, φάρoi, κ.α.). Μικροί υπολογιστές και ρολόγια χρησιμοποιούν τα Φ/Β για την λειτουργία τους. Στην Ελλάδα υπάρχουν προϋποθέσεις για ανάπτυξη και εφαρμογή των Φ/Β συστημάτων, λόγω του ιδιαίτερα υψηλού δυναμικού ηλιακής ενέργειας. Παρ' όλα αυτά στη χώρα μας υπάρχει ένας μικρός αριθμός εγκατεστημένων Φ/Β συστημάτων, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος της τάξης των 1000 kWp. Οι κυριότερες εφαρμογές Φ/Β στη χώρα μας, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος της τάξης των 1000 kWp, αφορούν μικρά αυτόνομα συστήματα για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων περιοχών.

Δύο νέα τεράστια projects ηλιακής ενέργειας έχουν ενταχθεί στις Στρατηγικές Επενδύσεις.

Πρόκειται για φωτοβολταϊκά έργα συνολικής ισχύος 1.063 MW και εκτιμώμενης επένδυσης άνω των 500 εκατ. ευρώ. Το mega project πήρε το πράσινο φως της ΠΑΕ τον περασμένο Απρίλιο και προβλέπει την κατασκευή σταθμού εγκατεστημένης ισχύος 700 MW και μέγιστης ισχύος παραγωγής 630 MW. Το έργο που θα διαθέτει, παράλληλα, και σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Επίσης, έχει ήδη ξεκινήσει η πρώτη στρατηγική επένδυση ύψους 421,6 εκατ. ευρώ που προβλέπει τη δημιουργία 26 νέων φωτοβολταϊκών σταθμών με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 830 MWp, σε διάφορες εκτάσεις στη Μαγνησία, τη Λάρισα και το Κιλκίς. [1.3]



Εικόνα 33. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στις Χώρες της Ευρώπης
(Πηγή: Ίδρυμα Ενέργειας – Ευρωπαϊκή Επιτροπή)

1.3 Αναγκαιότητα Αποθήκευση της Ενέργειας

Η αποθήκευση ενέργειας και κυρίως η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντική για τους παρακάτω λόγους;

- ♣ Σήμερα ουσιαστικά χρησιμοποιούμε αποθηκευμένη ενέργεια με τη μορφή των ορυκτών καυσίμων, τα οποία αποτελούν εξέλιξη της αποθήκευσης της βιομάζας. Αλλά και η αποθήκευση των συμβατικών καυσίμων (σε δεξαμενές, σε υπόγειες στοές για το φυσικό αέριο, στο ντεπόζιτο της βενζίνης του αυτοκινήτου) αποτελεί μορφή αποθήκευσης ενέργειας.
- ♣ Αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για να γίνει δυνατή η αξιοποίηση των περισσότερων ΑΠΕ και, ιδιαίτερα, της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας. Μόνο με αξιόπιστα συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας μπορούν να λειτουργήσουν τα αυτόνομα συστήματα ΑΠΕ, αλλά και να επιτευχθεί η ενσωμάτωση σε μεγάλη κλίμακα της ηλεκτρικής ισχύος από τις ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο.
- ♣ Είναι σημαντική για την εξισορρόπηση της ηλεκτρικής ισχύος από τις εταιρίες ηλεκτροπαραγωγής: οι σταθμοί παραγωγής λειτουργούν αποδοτικότερα με σταθερή παραγωγή και για

να καλύψουν ώρες αιχμής θα ήταν επιθυμητή η αποθήκευση της περίσσειας στα χρονικά διαστήματα με μικρότερη κατανάλωση. Η αποθήκευση ηλεκτρισμού μπορεί να μειώσει το λειτουργικό κόστος μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Επιπλέον βοηθά στο πρόβλημα της «ποιότητας» του ηλεκτρισμού, δηλαδή να μειώνει τις διακυμάνσεις του δυναμικού, της έντασης ή της συχνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος.

♣ Η διαθεσιμότητα αξιόπιστης αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας θα οδηγήσει στη χρήση ηλεκτρικών αυτοκινήτων, τουλάχιστον μέσα στις πόλεις, με προφανή θετική επίδραση στο περιβάλλον της πόλης.

♣ Μπορεί να καλύψει τους καταναλωτές σε περιπτώσεις διακοπών (συστήματα UPS) και για τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στις ώρες αιχμής, όταν και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλότερο.

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. Υπάρχουν διάφορα συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας, από μερικά mW για το βηματοδότη μέχρι ορισμένα MW σε μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής.

Η ενεργειακή πυκνότητα καθορίζει κυρίως την επιλογή του συστήματος αποθήκευσης. Υπενθυμίζεται ότι τα πρώτα αυτοκίνητα ήταν ηλεκτρικά, αλλά η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα της βενζίνης γρήγορα άλλαξε τον τρόπο κίνησης των αυτοκινήτων. Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές δεν είναι αρκετή και συνεχίζονται οι προσπάθειες για τη βελτίωσή τους.

Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι η προσθήκη αποθηκευτικού συστήματος σε υπάρχοντες και νέους σταθμούς ΑΠΕ θα έχει θετικό αντίκτυπο στην ευστάθεια των αυτόνομων ηλεκτρικών συστημάτων και θα επιτρέψει την μείωση της στρεφόμενης θερμικής εφεδρείας αλλά και την αντικατάσταση της θερμικής παραγωγής από ΑΠΕ με θετικά αποτελέσματα στο θερμικό κόστος παραγωγής λόγω μείωσης του κόστους καυσίμου, λειτουργικών εξόδων και μείωση των εκπεμπόμενων αερίων θερμοκηπίου.

Εκτός από τα μη διασυνδεδεμένα νησιά και τα νησιά υπό διασύνδεση, τα επόμενα χρόνια η αποθήκευση θα επιτρέψει την εγκατάσταση νέων μονάδων ΑΠΕ σε κορεσμένες περιοχές και στην ηπειρωτική χώρα, π.χ. όπως η Νότιος Πελοπόννησος και σε κάθε περίπτωση τα σχέδια για περαιτέρω σημαντική διεύρυνση ΑΠΕ στα δίκτυα σημαίνουν ανάγκη αύξησης της ευελιξίας της παραγωγής και κατανάλωσης, γεγονός που εξυπηρετείται με τα συστήματα αποθήκευσης και την διαχείριση της ζήτησης και της παραγωγής.[1.4][1.5]

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να μελετήσουμε την ενεργειακή διαχείριση συστήματος παροχής ενέργειας με αυξημένη διεύρυνση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Αποθήκευση ενέργειας

2.1 Εθνικό σχέδιο αποθήκευσης ενέργειας

Το σχέδιο για αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στην κατανάλωση στο 67% μέχρι το 2030, μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με σημαντικές επενδύσεις στην αποθήκευση ενέργειας. Οι επενδύσεις αυτές είναι κομβικές για τον στόχο της απανθρακοποίησης. Η παραγωγή των ΑΠΕ είναι στοχαστική (έχει διακυμάνσεις), οπότε οι μονάδες αποθήκευσης μπορούν να συγκεντρώσουν την περίσσεια παραγωγή ΑΠΕ, η οποία στη συνέχεια αξιοποιείται από το σύστημα όταν υπάρχει έλλειψη.

Με τα συστήματα αποθήκευσης, οι ΑΠΕ θα μετατρέπονται σε μονάδες βάσης, δηλαδή σε μονάδες που θα καλύπτουν βασικά φορτία του συστήματος. Εκτιμάται ότι η χώρα χρειάζεται αποθηκευτική ικανότητα **3 GWh** και όλοι οι μεγάλοι ενεργειακοί όμιλοι ετοιμάζονται επενδυτικά να ανταπεξέλθουν σε αυτή την ανάγκη. Στη βάση του στόχου που έχει τεθεί στο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) για διείσδυση των ΑΠΕ στην τελική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτείται **εγκατεστημένη ισχύς 1500-1750 MW**, εκ των οποίων τα 500 MW ενδείκνυται να είναι ισχύς συσσωρευτών σχετικά περιορισμένης χωρητικότητας (μπαταρίες) και το υπόλοιπο αντλησιοταμίευση.

Μάλιστα, η κυβέρνηση έχει εντάξει τις επενδύσεις για τη δημιουργία συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στο Ταμείο Ανάκαμψης. Συγκεκριμένα, προβλέπεται να ενισχυθούν έργα αποθήκευσης ενέργειας, είτε με μπαταρίες είτε με αντλησιοταμίευση, με χρηματοδότηση ύψους 450 εκατ. ευρώ. [2.1]

2.2 Μονάδες συσσωρευτών

Γενικά για την αποθήκευση ενέργειας

Στην Οδηγία 2019/944 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, ως αποθήκευση ενέργειας στο περιβάλλον των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται:

«η αναβολή της τελικής χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε χρονική στιγμή μεταγενέστερη από αυτή της παραγωγής της ή η μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε μορφή ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί, η αποθήκευση της εν λόγω ενέργειας, και η μεταγενέστερη εκ νέου μετατροπή της εν λόγω ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια ή η χρήση σε διαφορετικό φορέα ενέργειας.»

Ως αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται η ίδια ως άνω διεργασία, εξαιρουμένης της μετατροπής σε διαφορετικό φορέα ενέργειας. Πρόκειται δηλαδή για την απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας και μεταγενέστερη επαναπόδοσή της στο ηλεκτρικό σύστημα από την ίδια εγκατάσταση [2.2]. Έτσι, λοιπόν, οι μονάδες αποθήκευσης συσσωρευτών (μπαταρίες) μπορούν να συγκεντρώσουν την περίσσεια παραγωγή ενέργειας, για να αξιοποιηθεί αργότερα από το σύστημα όταν θα υπάρχει έλλειψη.



Εικόνα 3. Μονάδα αποθήκευσης της TESLA 100MW/400MWh βασισμένο στο Tesla Megapack.
(Πηγή: Image: Arevon Asset Management.)

Στην συνέχεια της εργασίας μας θα μελετήσουμε την χρήση μπαταριών μολύβδου οξέος (lead acid) και ιόντων λιθίου (Li-ion) στην αποθήκευση ενέργειας παραγόμενη από τις Α/Γ και κυρίως από Φ/Β πάνελ.

2.3 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, ως γενικότερη έννοια, μπορεί να επιτευχθεί από πλήθος εναλλακτικών τεχνολογιών, οι οποίες διαφέρουν ως προς την κλίμακα ενέργειας και ισχύος, την καταλληλότητα για διάφορες εφαρμογές, την απόδοση, το κόστος και την εν γένει τεχνολογική ωριμότητα.

Οι διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης που υπάρχουν σήμερα, κατάλληλες για εφαρμογές ηλεκτρικών συστημάτων και χρηστών, περιλαμβάνουν [2.3]:

➤ **Μηχανικές μέθοδοι**

- Αντλησιοταμίευση
- Αποθήκευση με πεπιεσμένο αέρα
- Σφόνδυλοι (Flywheels)

➤ **Θερμικές μέθοδοι**

- Αποθήκευση με χρήση τηγμένων αλάτων, υγροποιημένου αέρα κ.ά.

➤ **Ηλεκτροχημικές μέθοδοι**

- Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (Lead-acid)
- Συσσωρευτές νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)

- Συσσωρευτές νατρίου-θείου (NaS)
- Συσσωρευτές θείου-νικελίου-χλωρίου (Sodium-nickel-chloride)
- Συσσωρευτές ιόντων λιθίου (Li-ion)
- Συσσωρευτές ροής (Flow batteries)
- Συσσωρευτές μολύβδου-άνθρακα (Lead Carbon) κ.ά.

➤ **Ηλεκτρικές και μαγνητικές μέθοδοι**

- Υπερπυκνωτές
 - Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Συσσωρευτές (Μπαταρίες)

Εισαγωγή

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των μπαταριών είναι:

- Φόρτιση/εκφόρτιση:** Διαδικασίες μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική (φόρτιση) ή της χημικής σε ηλεκτρική (εκφόρτιση) κατά τη διέλευση συνεχούς ρεύματος (DC).
- Χωρητικότητα:** Ποσότητα φορτίου (σε αμπερώρια, 1 Ah) που μπορεί να παρέχει μια μπαταρία κατά τη διάρκεια μιας εκφόρτισης (συμβολίζεται με C)
- Ονομαστική χωρητικότητα:** Ποσότητα φορτίου που μπορεί θεωρητικά να αντληθεί σε δεδομένο χρονικό διάστημα (συνήθως 10 h (C10) ή 20 h (C20)) υπό θερμοκρασία 20°C.
- Βάθος εκφόρτισης:** Λόγος αντλούμενου φορτίου προς ονομαστική χωρητικότητα.
- Μέγιστο βάθος εκφόρτισης:** Η μέγιστη τιμή βάθους εκφόρτισης που μπορεί να λειτουργήσει ένας συσσωρευτής χωρίς να προκληθεί βλάβη σ' αυτόν.
- Στάθμη φόρτισης (SOC):** Χωρητικότητα που μπορεί να εκφορτιστεί από μια μπαταρία σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.
- Ενεργός αξιοποιήσιμη χωρητικότητα:** Γινόμενο ονομαστικής χωρητικότητας και μέγιστου βάθους εκφόρτισης.
- Ρυθμός εκφόρτισης/φόρτισης:** Ρεύμα στο οποίο φορτίζονται/εκφορτίζονται οι μπαταρίες για συγκεκριμένο αριθμό ωρών (π.χ., C/5 για 5 ώρες, C/20 για 20 ώρες, κλπ).
- Απόδοση:** Λόγος των Ah που εκφορτίζονται από τη μπαταρία προς τις Ah που φορτίζονται στην μπαταρία σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.
- Κύκλος:** Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία εκφόρτισης και φόρτισης που συμβαίνει σε μια μπαταρία εν λειτουργία.
- Κύκλος ζωής:** Αριθμός κύκλων που μπορεί να δώσει μια μπαταρία κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής της – αντιστοιχεί συνήθως στον αριθμό των κύκλων εκφόρτισης για ένα συγκεκριμένο βάθος που η μπαταρία μπορεί να πραγματοποιήσει πριν η χωρητικότητά της μειωθεί σε συγκεκριμένο ποσοστό (συνήθως 80%) της αρχικής της τιμής.

□ **Αυτοεκφόρτιση:** Απώλεια φορτίου μπαταρίας αν αυτή αφεθεί σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος για υπολογίσιμο χρονικό διάστημα (τυπικές τιμές: 1-4% ανά μήνα σε θερμοκρασία 20-25°C. [3.1])

3.1 Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion)

Εισαγωγή

Την τελευταία δεκαετία σημειώνεται ταχύτατη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος συστημάτων συσσωρευτών (μπαταριών) στα ηλεκτρικά συστήματα διεθνώς. Μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών μπαταριών που είναι σήμερα διαθέσιμες για βιομηχανική χρήση, οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου (Li-ion) αποτελούν την κυρίαρχη σήμερα επιλογή για νέες εγκαταστάσεις, με το κόστος τους να μειώνεται διαρκώς, κυρίως λόγω των εφαρμογών στην ηλεκτροκίνηση.

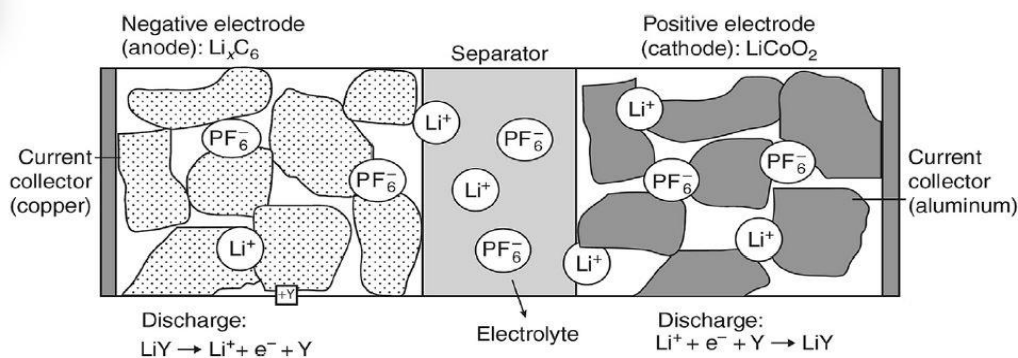
Κύρια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής για χρήσεις ηλεκτρικών συστημάτων είναι η εξαιρετικά γρήγορη απόκριση, ο υψηλός βαθμός απόδοσης πλήρους κύκλου, η ευχέρεια ανάπτυξης σε σταθμούς όλων των μεγεθών (από λίγα kW, έως εκατοντάδες MW) και οι πολύ χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Μειονεκτήματα αποτελούν η περιορισμένη διάρκεια ζωής τους (τυπικά έως 10 έτη) και το ακόμη υψηλό κόστος, το οποίο όμως βαίνει μειούμενο με γρήγορους ρυθμούς.



Εικόνα 4. Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες Li-ion (Powin's Stack22). (Πηγή: <https://www.advancedbatteriesresearch.com/>)

Το πολυμερές του ηλεκτρολύτη και οι ενώσεις παρεμβολής των ηλεκτροδίων αναπτύχθηκαν για να αποφευχθεί η αντίδραση του λιθίου με το θειικό άλας. Η πρώτη μπαταρία λιθίου - ιόντων με βάση το γραφίτη / οξείδιο του κοβαλτίου λιθίου (LiCoO_2 , LCO) εισήχθη στην αγορά από τη Sony το 1991. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου δεν αντιμετωπίζουν τα προβλήματα ασφάλειας των μπαταριών υψηλής δραστηριότητας μετάλλου λιθίου. Τα ενεργά υλικά του αρνητικού και θετικού ηλεκτροδίου είναι ενώσεις λιθίου οι οποίες έχουν διαφορετικά ηλεκτροχημικά δυναμικά σε σχέση με το μέταλλο λιθίου. Τα περισσότερα εμπορικά στοιχεία χρησιμοποιούν ενώσεις παρεμβολής λιθίου διοξειδίου του άνθρακα για το αρνητικό ηλεκτρόδιο και ένα μεταλλικό οξείδιο λιθίου ως ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου [3.2].

Τα σύνθετα ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα από σωματίδια ενεργού υλικού τα οποία συγκρατούνται μαζί με ένα συνδετικό υλικό και ένα αγωγίμο πληρωτικό μέσο όπως ο γραφίτης ή η αιθάλη.



Εικόνα 4. Μπαταρία Ιόντων - Λιθίου.

Η απόδοση αυξάνεται χάρη στο μικρό σε μέγεθος σωματίδιο, στη μεγάλη επιφάνεια, και τις μικρές αποστάσεις διαδρομής για τα ιόντα λιθίου στο εσωτερικό των σωματιδίων και μεταξύ των ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια καλύπτονται από μία μεμβράνη επιφάνεια, τη λεγόμενη SEI. Από την εισαγωγή τους το 1991, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν γίνει οι κυρίαρχες μπαταρίες επαναφορτιζόμενης τεχνολογίας για φορητά προϊόντα και αρχίζουν να χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στις μεταφορές και τις εφαρμογές σταθερής αποθήκευσης [3.3].

Η τεχνολογία μπαταριών ιόντων - λιθίου παρέχει την υψηλότερη δυνατή ενεργειακή πυκνότητα από κάθε άλλη μακράς διάρκειας κύκλου ζωής επαναφορτιζόμενη μπαταρία, γεγονός το οποίο ήταν ο πιο σημαντικός και καθοριστικός παράγοντας που οδήγησε στην ευρεία υιοθέτηση της. Πάνω από 4,5 δισεκατομμύρια στοιχεία ιόντων λιθίου (σχεδόν 40.000 MWh), παρήχθησαν το 2011, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων χρησιμοποιήθηκαν σε ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης και σε εφαρμογές, όπως φορητούς υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα. Ενώ η ζήτηση για τέτοια στοιχεία αυξάνεται σε ποσοστό 15% ανά έτος, οι αναδυόμενες εφαρμογές μπορεί να αυξήσουν σημαντικά την αγορά Li-ion. Αναμένεται ότι οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις τόσο στο χώρο των μεταφορών όσο και στα σταθερά (μη φορητά) αποθηκευτικά μέσα θα οδηγήσουν σε δραματική αύξηση του όγκου της παραγωγής Li-ion. Οι μπαταρίες αυτές χρησιμοποιούνται και σε συστοιχία για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας.

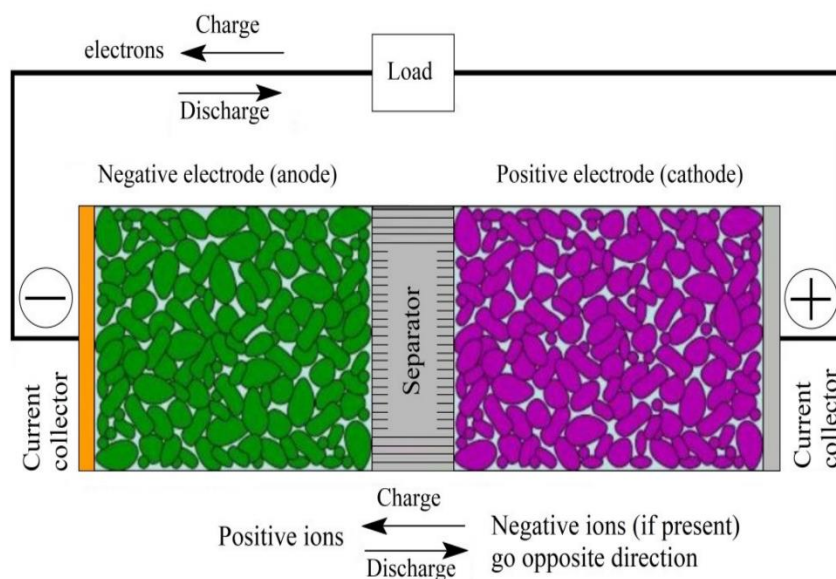
3.2. Ηλεκτροχημεία

Τα αντιδρώντα στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις σε μια μπαταρία ιόντων λιθίου είναι το αρνητικό και το θετικό ηλεκτρόδιο και ο ηλεκτρολύτης που παρέχει αγωγίμο μέσο ώστε τα ιόντα λιθίου να μετακινηθούν μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η ηλεκτρική ενέργεια ρέει από ή μέσα στην μπαταρία όταν τα ηλεκτρόνια ρέουν διαμέσου εξωτερικού κυκλώματος κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης ή της φόρτισης αντίστοιχα.

Και τα δύο ηλεκτρόδια επιτρέπουν στα ιόντα του λιθίου να μετακινούνται μέσα και έξω από τις δομές τους με μια διεργασία που λέγεται εισαγωγή (παρεμβολή) ή εξαγωγή (αποπαρεμβολή), αντίστοιχα.

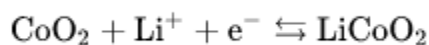
Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, τα (θετικά) ιόντα λιθίου μετακινούνται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο (συνήθως γραφίτης) προς το θετικό ηλεκτρόδιο (σχηματίζοντας ένωση του λιθίου) μέσω του ηλεκτρολύτη, ενώ τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος κατά την ίδια κατεύθυνση. Όταν το στοιχείο φορτίζεται, συμβαίνει το αντίθετο με τα ιόντα του λιθίου και τα

ηλεκτρόνια να μετακινούνται πίσω στο αρνητικό ηλεκτρόδιο σε καθαρή υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση.

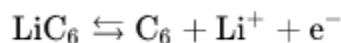


Εικόνα 5. Δομή του εσωτερικού ενός ηλεκτροχημικού κελιού μπαταρίας Li-ion. (Πηγή: <https://www.mdpi.com/2313-0105/6/3/37/htm>)

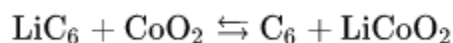
Οι παρακάτω αντιδράσεις δίνουν έναν παράδειγμα της χημείας. Το θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) της ημιαντίδρασης στο υπόστρωμα οξειδίου του κοβαλτίου με πρόσμειξη λιθίου είναι:



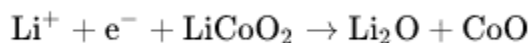
Το αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) της ημιαντίδρασης για τον γραφίτη είναι:



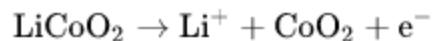
Η πλήρης αντίδραση (αριστερά: φόρτιση, δεξιά: εκφόρτιση) είναι:



Η συνολική αντίδραση έχει τα όρια της. Η υπερεκφόρτιση κάνει υπέρκορο το οξείδιο κοβαλτίου-λιθίου, οδηγώντας στην παραγωγή οξειδίου του λιθίου, πιθανόν μέσω της παρακάτω μη αντιστρεπτής αντίδρασης:



Υπερφόρτωση μέχρι 5,2 βολτ οδηγεί στη σύνθεση οξειδίου του κοβαλτίου, όπως αποδεικνύεται με περίθλαση ακτίνων X:



Σε μια μπαταρία ιόντων λιθίου τα ιόντα λιθίου μεταφέρονται προς και από το θετικό και αρνητικό ηλεκτρόδιο οξειδώνοντας το στοιχείο μετάπτωσης κοβάλτιο (Co), σε $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$ από Co^{3+} σε Co^{4+} κατά τη διάρκεια της φόρτισης και ανάγοντας από Co^{4+} σε Co^{3+} κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης. Η αντίδραση στο ηλεκτρόδιο κοβαλτίου είναι αντιστρεπτή **μόνο** για $x < 0,5$ (x σε mol), περιορίζοντας το βάθος της επιτρεπόμενης εκφόρτισης. Αυτή η χημεία που χρησιμοποιήθηκε στα στοιχεία ιόντων λιθίου αναπτύχθηκε από τη Sony το 1990. Η ενέργεια του στοιχείου είναι ίση με την τάση επί το φορτίο. Κάθε γραμμάριο λιθίου αντιστοιχεί σε σταθερά του Φαρεντέι 6,941 ή 13.901 coulombs. Στα 3 V, αυτό δίνει 41,7 kJ ανά γραμμάριο λιθίου, ή 11,6 kWh ανά kg. Αυτό είναι λίγο περισσότερο από τη θερμότητα καύσης της βενζίνης, αλλά δεν λαμβάνει υπόψη τα άλλα υλικά που μπαίνουν σε μια μπαταρία λιθίου και αυτό καθιστά τις μπαταρίες λιθίου πολλές φορές πιο βαριές ανά μονάδα ενέργειας. [3.4]

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μπαταριών ιόντων - λιθίου είναι τα εξής [3.5]:

➤ **Πλεονεκτήματα:**

✓ **Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα:**

Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα είναι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας μπαταριών ιόντων λιθίου. Με τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό όπως τα κινητά τηλέφωνα που χρειάζονται να λειτουργούν περισσότερο μεταξύ των φορτίων, ενώ καταναλώνουν περισσότερη ισχύ, υπάρχει πάντα ανάγκη για μπαταρίες με πολύ μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα. Επιπλέον, υπάρχουν πολλές εφαρμογές ισχύος από ηλεκτρικά εργαλεία έως ηλεκτρικά οχήματα. Η πολύ υψηλότερη πυκνότητα ισχύος που προσφέρουν οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ένα ξεχωριστό πλεονέκτημα. Τα ηλεκτρικά οχήματα χρειάζονται επίσης τεχνολογία μπαταρίας που έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα.

✓ **Αυτοεκφόρτιση:**

Ένα ζήτημα με πολλές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες είναι το ποσοστό αυτοεκφόρτισης. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι πολύ χαμηλότερος από αυτόν των άλλων επαναφορτιζόμενων κυττάρων όπως οι μορφές Ni-Cad και NiMH. Συνήθως είναι περίπου 5% τις πρώτες 4 ώρες μετά τη φόρτιση, αλλά στη συνέχεια πέφτει σε ποσοστό περίπου 1 ή 2% ανά μήνα.

✓ **Χαμηλή συντήρηση:**

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι ότι δεν χρειάζονται συντήρηση για να διασφαλίσουν την απόδοσή τους.

✓ **Τάση κυψέλης:**

Η τάση που παράγεται από κάθε κυψέλη ιόντων λιθίου είναι περίπου 3.6 βολτ. Αυτό έχει πολλά πλεονεκτήματα. Όντας υψηλότερη από εκείνη του τυπικού νικελίου-καδμίου, του υδριδίου νικελίου-μετάλλου και ακόμη και των τυπικών αλκαλικών κυττάρων σε περίπου 1.5 βολτ και μολύβδου-οξέος σε περίπου 2 βολτ ανά κύτταρο, η τάση κάθε κυττάρου ιόντων λιθίου είναι υψηλότερη, απαιτώντας

λιγότερα κύτταρα. Ενδεικτικά, για τα έξυπνα τηλέφωνα, ένα μόνο κελί είναι το μόνο που χρειάζεται και αυτό απλοποιεί τη διαχείριση ισχύος.

✓ Χαμηλή συντήρηση:

Τα χαρακτηριστικά φορτίου μιας κυψέλης ή μπαταρίας ιόντων λιθίου είναι αρκετά καλά. Παρέχουν αρκετά σταθερά 3.6 βολτ ανά κυψέλη πριν πέσουν καθώς χρησιμοποιείται η τελευταία φόρτιση. Ορισμένες επαναφορτιζόμενες κυψέλες πρέπει να προετοιμάζονται όταν λαμβάνουν την πρώτη φόρτιση. Αυτό δεν είναι απαραίτητο στις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Δεν υπάρχει καμμία απαίτηση για την πρώτη φόρτιση.

✓ Ποικιλία διαθέσιμων τύπων:

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυττάρων ιόντων λιθίου. Αυτό το πλεονέκτημα των μπαταριών ιόντων λιθίου μπορεί να σημαίνει ότι η σωστή τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή που απαιτείται. Ορισμένες μορφές μπαταρίας ιόντων λιθίου παρέχουν υψηλή πυκνότητα ρεύματος και είναι ιδανικές για κινητό ηλεκτρονικό εξοπλισμό καταναλωτών. Άλλοι είναι σε θέση να παρέχουν πολύ υψηλότερα επίπεδα ρεύματος και είναι ιδανικά για ηλεκτρικά εργαλεία και ηλεκτρικά οχήματα.

➤ Μειονεκτήματα:

▪ Απαιτήσεις προστασίας:

Οι κυψέλες και οι μπαταρίες ιόντων λιθίου δεν είναι τόσο στιβαρές όσο ορισμένες άλλες επαναφορτιζόμενες τεχνολογίες. Απαιτούν προστασία από υπερβολική φόρτιση και εκφόρτιση. Εκτός από αυτό, πρέπει να διατηρείται το ρεύμα τους εντός ασφαλών ορίων. Κατά συνέπεια, ένα μειονέκτημα της μπαταρίας ιόντων λιθίου είναι ότι απαιτούν την χρήση ενός ενσωματωμένου κυκλώματος προστασίας για να διασφαλιστεί ότι διατηρούνται εντός των ασφαλών ορίων λειτουργίας τους. Το σύστημα αυτό είναι γνωστό ως **Battery Management System (BMS)**.

Χρησιμοποιώντας, τη σύγχρονη τεχνολογία ολοκληρωμένου κυκλώματος, αυτό μπορεί να ενσωματωθεί σχετικά εύκολα στην μπαταρία ή στον εξοπλισμό, εάν η μπαταρία δεν είναι εναλλάξιμη. Η ενσωμάτωση του κυκλώματος διαχείρισης μπαταριών (**BMS**), επιτρέπει τη χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου χωρίς καμία ειδική γνώση. Τα κελιά μπορούν να παραμείνουν φορτισμένα και μετά την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας, ο φορτιστής θα διακόψει την τροφοδοσία του.

Τα κυκλώματα προστασίας ενσωματωμένα σε μπαταρίες ιόντων λιθίου παρακολουθούν ορισμένες πτυχές της λειτουργίας τους. Το κύκλωμα προστασίας περιορίζει την μέγιστη τάση κάθε κυψέλης κατά τη διάρκεια της φόρτισης, καθώς η υπερβολική τάση μπορεί να βλάψει τα στοιχεία. Συνήθως φορτίζονται σε σειρά καθώς συνήθως υπάρχει μόνο μία σύνδεση για μια μπαταρία και ως εκ τούτου, καθώς διαφορετικά κελιά ενδέχεται να απαιτούν διαφορετικά επίπεδα φόρτισης, υπάρχει πιθανότητα ένα κελί να έχει υψηλότερη από την απαιτούμενη τάση.

Επίσης, το κύκλωμα προστασίας αποτρέπει την πτώση της τάσης του κυττάρου κατά την εκφόρτιση. Και πάλι αυτό μπορεί να συμβεί εάν ένα κελί μπορεί να αποθηκεύσει λιγότερη φόρτιση από άλλα στην μπαταρία και η φόρτιση της να εξαντληθεί πριν από τα άλλα.

Μια περαιτέρω άποψη του κυκλώματος προστασίας είναι ότι η θερμοκρασία του κυττάρου παρακολουθείται για να αποφευχθούν οι ακραίες θερμοκρασίες. Το μέγιστο ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης στις περισσότερες συσκευασίες περιορίζεται μεταξύ 1C και 2C.

- **Γρήγορη γήρανση:**

Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα μπαταριών ιόντων λιθίου για τα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης είναι ότι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου υποφέρουν από γρήγορη γήρανση. Δεν εξαρτάται μόνο από τον χρόνο (διάρκεια ζωής μπαταρίας), αλλά εξαρτάται επίσης και από τον αριθμό των κύκλων φόρτισης που έχει υποστεί η μπαταρία. Συχνά οι μπαταρίες μπορούν να αντέξουν μόνο 500 - 1000 κύκλους εκφόρτισης πριν μειωθεί η χωρητικότητά τους. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας Li-ion, ο αριθμός αυτός αυξάνεται, αλλά μετά από λίγο, οι μπαταρίες μπορεί να χρειαστούν αντικατάσταση και αυτό μπορεί να είναι πρόβλημα εάν είναι ενσωματωμένες στον εξοπλισμό.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου επίσης γερνούν είτε χρησιμοποιούνται είτε όχι. Παρά τη χρήση, υπάρχει επίσης ένα στοιχείο που σχετίζεται με το χρόνο για τη μείωση της χωρητικότητας. Για ένα τυπικό καταναλωτή οξειδίου του λιθίου - κοβαλτίου (μπαταρία LCO) η κυψέλη θα πρέπει να φορτιστεί μερικώς - περίπου 40% έως 50% και να διατηρείται σε δροσερό χώρο αποθήκευσης. Η αποθήκευση υπό αυτές τις συνθήκες θα συμβάλει στην αύξηση της διάρκειας ζωής.

- **Κόστος:**

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της μπαταρίας ιόντων λιθίου είναι το κόστος της. Συνήθως, είναι περίπου 40% πιο δαπανηρές στην κατασκευή από τα κύτταρα νικελίου-καδμίου. Αυτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας κατά την εξέταση της χρήσης τους σε είδη μαζικής παραγωγής καταναλωτικών προϊόντων, όπου οποιοδήποτε πρόσθετο κόστος αποτελεί μείζον ζήτημα.

- **Ανάπτυξη τεχνολογίας:**

Παρόλο που οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι διαθέσιμες για πολλά χρόνια, μπορεί να θεωρηθεί ως ανώριμη τεχνολογία από ορισμένους, καθώς είναι σε μεγάλο βαθμό αναπτυσσόμενη περιοχή. Αυτό μπορεί να είναι ένα μειονέκτημα όσον αφορά το γεγονός ότι η τεχνολογία δεν παραμένει σταθερή. Ωστόσο, καθώς οι νέες τεχνολογίες ιόντων λιθίου αναπτύσσονται συνεχώς, μπορεί επίσης να είναι ένα πλεονέκτημα καθώς διατίθενται καλύτερες λύσεις.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αλλοιώνονται όταν εκφορτίζονται κάτω από τα 2V και παρουσιάζουν διαφυγή αερίων όταν υπερφορτίζονται, επειδή δεν έχουν κάποιο χημικό μηχανισμό για τον έλεγχο της υπερφόρτισης. Για προστασία από υπερφορτίσεις, και θερμοκρασιακές συνθήκες εκτός των ορίων λειτουργίας τους οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν κυκλώματα και μηχανικές διατάξεις αποσύνδεσης.

Οι μπαταρίες αυτές επίσης χάνουν μόνιμα τη χωρητικότητά τους όταν εκτίθενται σε αυξημένες θερμοκρασίες (65°C), όπως οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου και υδριδίου νικελίου-μετάλλου, όμως με μικρότερο ρυθμό.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι οι περισσότερες προκλήσεις για την ευρύτερη χρήση των μπαταριών ιόντων λιθίου σχετίζονται είτε με τη σταθερότητά τους σε υψηλές θερμοκρασίες είτε με θέματα ασφαλείας. Παρότι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν για περιορισμένο χρονικό διάστημα να εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως στους 70°C, η αλλοίωση ξεκινά ήδη από τους 60°C περίπου. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ασφαλείς σε γενικές γραμμές.

Διαφυγή αερίων μπορεί να συμβεί μόνο σε περίπτωση υπερφόρτισης ή σύνθλιψης. Ωστόσο πρέπει να επισημάνουμε ότι για να συμβεί διαφυγή αερίων εξαιτίας υπερφόρτισης, η μπαταρία πρέπει να φορτιστεί περισσότερο από το 200% της ονομαστικής χωρητικότητάς της. Όλα τα παραπάνω προβλήματα (υπερφόρτιση, υπερεκφόρτιση και όρια θερμοκρασιών) έχουν επιλυθεί σε μεγάλο βαθμό με την προσθήκη κυκλωμάτων προστασίας.

3.3. Κατάσταση φόρτισης SOC (State of Charge)

Το SOC είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για τις μπαταρίες, αλλά ο ορισμός του παρουσιάζει πολλά διαφορετικά θέματα. Γενικά, το SOC μιας μπαταρίας ορίζεται ως ο λόγος της τρέχουσας χωρητικότητάς του προς την ονομαστική χωρητικότητα. Η ονομαστική χωρητικότητα δίνεται από τον κατασκευαστή και αντιπροσωπεύει το μέγιστο ποσό φόρτισης που μπορεί να αποθηκευτεί στην μπαταρία. Το SOC μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n}$$

Εκτός από το **State of Charge (SOC)**, σημασία για την μελέτη αυτή καταλαμβάνει και η έννοια **Depth of Discharge (DOD)** και που είναι το βάθος εκφόρτισης.

Το DOD είναι το βάθος στο οποίο κατεβαίνει η στάθμη της μπαταρίας κατά την χρήση της ενώ το SOC υποδηλώνει την κατάσταση φόρτισης, και τα δύο ως κλάσμα της συνολικής χωρητικότητας. Όπως γίνεται αντιληπτό, τα δύο αυτά μεγέθη λειτουργούν συμπληρωματικά το ένα με το άλλο. Αναλυτικότερα, αν η κατάσταση φόρτισης είναι π.χ 60%, το βάθος εκφόρτισης είναι 40%. Το DOD μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη συμπεριφορά του ρεύματος εκφόρτισης και με την βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης (το SOC είναι το συμπληρωματικό του).

$$DOD/\% = 100 - SOC/\%$$

Άλλα μεγέθη που έχουν τεράστια σημασία στη μελέτη αυτή είναι ο κύκλος ζωής (**Cycle life**) και η κατάσταση υγείας (**State of Health, SOH**).

Ως κύκλος ζωής της μπαταρίας μπορεί να χαρακτηριστεί ο αριθμός των κύκλων φορτίσεων-εκφορτίσεων που μπορεί να υποστεί διατηρώντας ένα συγκεκριμένο ποσοστό της αρχικής χωρητικότητας, μετά το οποίο η μπαταρία φτάνει το τέλος της ζωής της.

Σαν κατάσταση υγείας (**SOH**) ονομάζεται το κλάσμα της ονομαστικής χωρητικότητας της μπαταρίας που είναι πραγματικά διαθέσιμη για τη διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης. Όσο φθείρεται η μπαταρία το SOH πέφτει από το 100% που είναι η αρχική τιμή. Όταν η τιμή του φτάσει το 80% τότε η μπαταρία φτάνει στο τέλος της ζωής της.

Σημαντική παράμετρος είναι και το ενεργό SOC/DOD, όπου αναφέρεται στην κατάσταση φόρτισης και στο βάθος εκφόρτισης την ώρα που η μπαταρία είναι σε χρήση. Η σημασία γύρω από το εγχείρημα είναι να βρεθούν τα ακριβή σημεία που συμβάλλουν στην καταπόνηση της μπαταρίας.

3.4 Εκτίμηση της κατάστασης της φόρτισης

Όπως αναφέραμε παραπάνω το SOC ορίζεται ως η εναπομένουσα χωρητικότητα εκφραζόμενη ως ποσοστό κάποιας αναφοράς. Κάποιες φορές αυτή η αναφορά είναι η ονομαστική χωρητικότητα, αν και τις περισσότερες φορές είναι η χωρητικότητα που είχε κατά τον τελευταίο κύκλο χρήσης. Ωστόσο, η ασάφεια που παρουσιάζει αυτή η προσέγγιση οδηγεί πολλές φορές σε λάθος εκτιμήσεις.

Η προτιμότερη αναφορά για το SOC είναι η ονομαστική χωρητικότητα ενός καινούριου κελιού. Αυτό επειδή η χωρητικότητα ενός κελιού μειώνεται καθώς αυτό γηράσκει. Για παράδειγμα, η πραγματική χωρητικότητα ενός πλήρως φορτισμένου κελιού προς το τέλος της ζωής του προσεγγίζει μόλις το 80% της αρχικής ονομαστικής του χωρητικότητας. Η θερμοκρασία και ο βαθμός εκφόρτισης επιδρούν επίσης περαιτέρω στη διαμόρφωση της χωρητικότητας. Αυτή η διαφορά που παρουσιάζεται ανάμεσα στις αναφορές για το SOC είναι εξαιρετικά σημαντική αν το SOC ρυθμίζει τη λειτουργία ενός συστήματος.

Συνήθως, η αναφορά μέτρησης του SOC ορίζεται ως η χωρητικότητα του κελιού εκείνη τη στιγμή (αν είναι πλήρως φορτισμένο). Σε αυτήν την περίπτωση, ένα πλήρως φορτισμένο κελί, το οποίο όμως φτάνει στο τέλος της ζωής του, θα διαθέτει SOC ίσο με 100% ενώ η χωρητικότητά του θα προσεγγίζει μόλις το 80% της ονομαστικής του τιμής.

3.5 Μέθοδοι Προσδιορισμού του State Of Charge

Για τον προσδιορισμό του SOC χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Μερικές από αυτές εξειδικεύονται σε κελιά συγκεκριμένης χημικής σύστασης. Οι περισσότερες ωστόσο βασίζονται στην μέτρηση ορισμένων παραμέτρων οι οποίες αλλάζουν ανάλογα με το SOC.

➤ Άμεση Μέτρηση

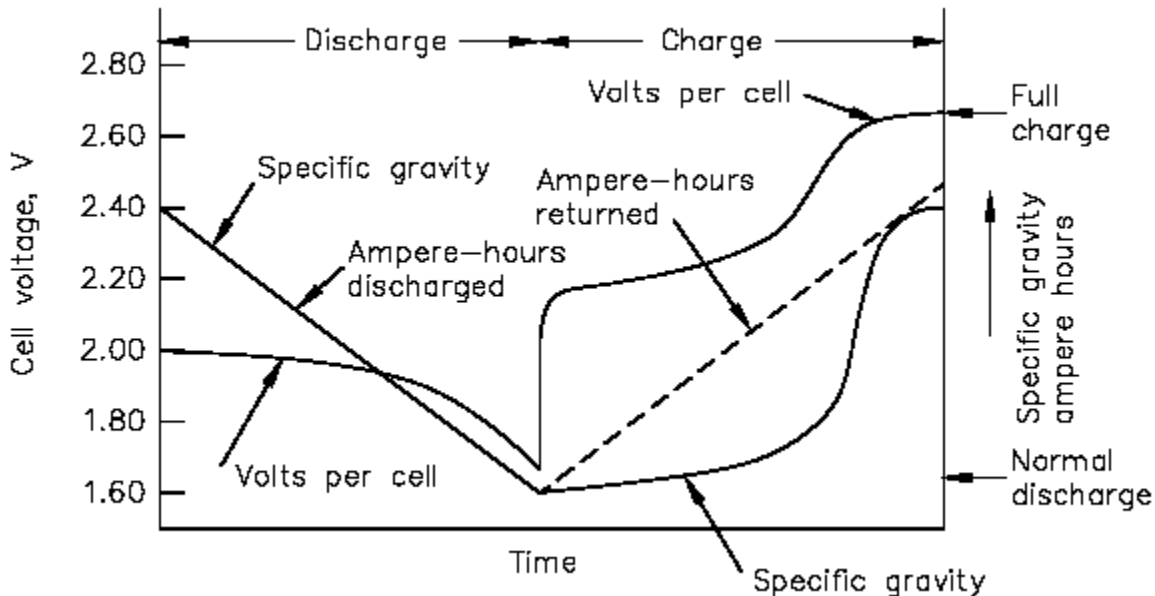
Η μέθοδος αυτή θα ήταν ιδιαίτερα εύκολη αν η μπαταρία εκφορτιζόταν με σταθερό ρυθμό. Το φορτίο σε μία μπαταρία είναι ίσο με το γινόμενο του ρεύματος επί τον χρόνο στον οποίο ρέει. Δυστυχώς, προκύπτουν δύο προβλήματα με αυτό.

- Πρώτον: Σε όλες τις πραγματικές μπαταρίες, το ρεύμα εκφόρτισης δεν είναι σταθερό αλλά μειώνεται καθώς η μπαταρία εκφορτίζεται, συνήθως με μη γραμμικό τρόπο. Κάθε συσκευή μέτρησης επομένως θα πρέπει να είναι σε θέση να υπολογίζει το ολοκλήρωμα του ρεύματος στον χρόνο που ρέει.
- Δεύτερον: Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εκφόρτιση της μπαταρίας με σκοπό τον προσδιορισμό της φόρτισης που αυτή περιείχε. Στις περισσότερες εφαρμογές υπάρχει ανάγκη προσδιορισμού του SOC χωρίς να χρειάζεται να εκφορτιστεί η μπαταρία.

➤ Προσδιορισμός του SOC μέσω της μέτρησης του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη.

Μία μέθοδος μέσω της οποίας μπορεί να εκτιμηθεί το SOC σε μπαταρίες μολύβδου οξέος είναι η μέτρηση του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη. Αυτό ορίζεται ως το κλάσμα της πυκνότητας του διαλύματος του ηλεκτρολύτη προς την πυκνότητα του καθαρού νερού. Σε έναν πλήρως φορτισμένο συσσωρευτή μολύβδου, η περιεκτικότητα σε θειικό οξύ (H₂SO₄) είναι 36% κατά βάρος ή 25% κατ'

όγκο και το ειδικό βάρος του διαλύματος είναι περίπου 1.25 στους 27°C. Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται το ειδικό βάρος του διαλύματος του μειώνεται και επανέρχεται όταν επαναφορτίζεται. [3.6]

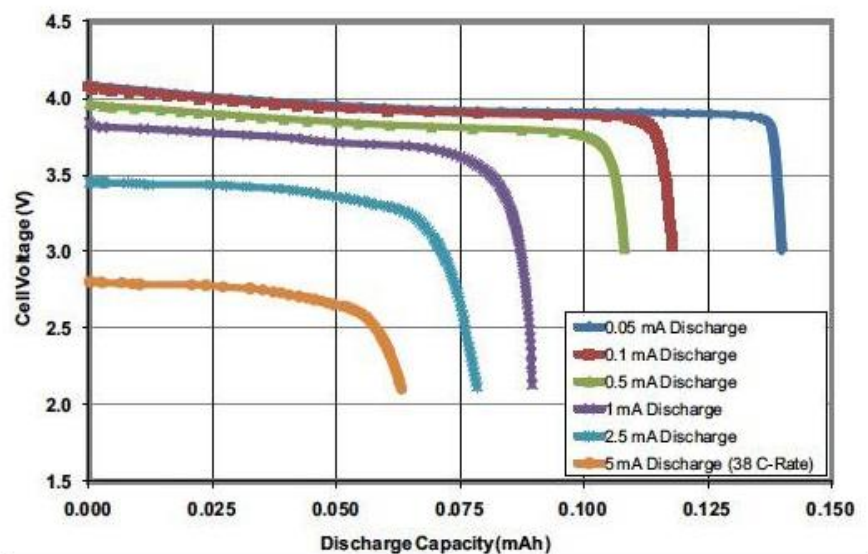


Εικόνα 6. Αλλαγές στα διάφορα χαρακτηριστικά της μπαταρίας κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση. (Πηγή:

https://www.engineersedge.com/battery/specific_gravity_battery.htm)

➤ Προσδιορισμός του SOC μέσω της τάσης

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη χρήση της τάσης του κάθε κελιού με σκοπό τον προσδιορισμό του SOC, καθώς έχει δειχτεί ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της κατάστασης φόρτισης και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος της μπαταρίας. Τα αποτελέσματα ποικίλουν ανάλογα με την πραγματική στάθμη της τάσης, τη θερμοκρασία, τον ρυθμό εκφόρτισης και τη γήρανση του κελιού. Γι' αυτό το λόγο παρέχεται κάποιου είδους αντιστάθμιση, ούτως ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Ωστόσο, σε συγκεκριμένες χημείες μπαταριών μπορεί να προκύψουν προβλήματα. Αυτά τα προβλήματα είναι ιδιαίτερα αισθητά στις μπαταρίες χημείας λιθίου οι οποίες επιδεικνύουν πολύ μικρή μεταβολή της τάσης τους κατά τον κύκλο λειτουργίας τους.



Εικόνα 7. Καμπύλες εκφόρτισης σε θερμοκρασία 25οC ενός κελιού LiFePO4. (Πηγή: Infinite Power Solutions.)

Αυτές οι καμπύλες είναι ιδανικές για ένα κελί καθώς η τάση του δεν μειώνεται σημαντικά καθώς εκφορτίζεται. Για τον ίδιο λόγο όμως, η τάση του κελιού αυτού δεν αποτελεί καθόλου καλή ένδειξη του SOC του κελιού. Η ραγδαία πτώση τάσης κατά το τέλος του κύκλου λειτουργίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ένδειξη επικείμενης πλήρους εκφόρτισης του κελιού, ωστόσο σε πολλές εφαρμογές απαιτείται μία πιο πρόωρη προειδοποίηση. Η πλήρης εκφόρτιση των κελιών χημείας λιθίου οδηγεί σε δραματική μείωση της διάρκειας ζωής τους. Ενώ η τάση του κελιού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ένδειξη του σημείου τερματισμού λειτουργίας, μία πιο ακριβής μέτρηση είναι απαραίτητη στις περισσότερες εφαρμογές.

➤ Προσδιορισμός του SOC με βάση το ρεύμα (μέτρηση Coulomb)

Το φορτίο που μεταφέρεται σε μία ηλεκτρική φόρτιση μετρείται σε Coulombs και είναι ίσο με το ολοκλήρωμα ως προς χρόνο της διάρκειας φόρτισης του ρεύματος, το οποίο μεταφέρθηκε κατά τη φόρτιση. (Εξίσωση 1).

$$SOC = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{rated}} \int_{t_0}^{t_0 + \tau} (I_b - I_{loss}) dt \quad (1)$$

Όπου $SOC(t_0)$ είναι η αρχική τιμή SOC, C_{rated} είναι η ονομαστική χωρητικότητα, I_b είναι το ρεύμα της μπαταρίας και I_{loss} είναι το ρεύμα απωλειών.

Η εναπομένονσα χωρητικότητα ενός κελιού μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας το ρεύμα το οποίο εισέρχεται (φόρτιση) ή εξέρχεται (εκφόρτιση) από τα κελιά και ολοκληρώνοντάς το στον χρόνο φόρτισης.

Το σημείο αναφοράς είναι ένα πλήρως φορτισμένο κελί και το SOC λαμβάνεται αφαιρώντας την καθαρή ροή φόρτισης από ένα πλήρως φορτισμένο κελί. Αυτή η μέθοδος, γνωστή και ως μέτρηση **Coulomb** (Coulomb counting), προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια από τις άλλες μεθόδους μέτρησης

του SOC καθώς μετράει κατευθείαν τη ροή φόρτισης. Παρόλα αυτά, χρειάζεται κι αυτή περαιτέρω αντιστάθμιση έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι συνθήκες λειτουργίας.

Στην εικόνα 8 φαίνεται το διάγραμμα ροής του ενισχυμένου αλγορίθμου μέτρησης Coulomb (**Enhanced Coulomb Counting Algorithm**). Στην αρχή, τα ιστορικά δεδομένα της χρησιμοποιούμενης μπαταρίας ανακτώνται από την αντίστοιχη (συνδεδεμένη μνήμη). Χωρίς καμμία πληροφορία για μια νέα χρήση της μπαταρίας, θεωρείται ότι η μπαταρία είναι υγιής και το SOH θεωρείται ότι έχει τιμή 100%. Η αρχική τιμή του SOC εκτιμάται με τη δοκιμή είτε της τάσης ανοικτού κυκλώματος είτε της φορτισμένης τάσης φορτίου ανάλογα με τις συνθήκες εκκίνησης.

Η διαδικασία εκτίμησης βασίζεται στην παρακολούθηση της τάσης της μπαταρίας (V_b) και του ρεύματος (I_b). Η κατάσταση λειτουργίας της μπαταρίας (φόρτιση/εκφόρτιση) μπορεί να προσδιοριστεί από την ποσότητα και την κατεύθυνση του ρεύματος λειτουργίας. Το DOD αθροίζει το φορτίο που έχει αφαιρεθεί στη λειτουργία εκφόρτισης και μετρά αντίστροφα με το συσσωρευμένο φορτίο στην μπαταρία για τη λειτουργία φόρτισης.

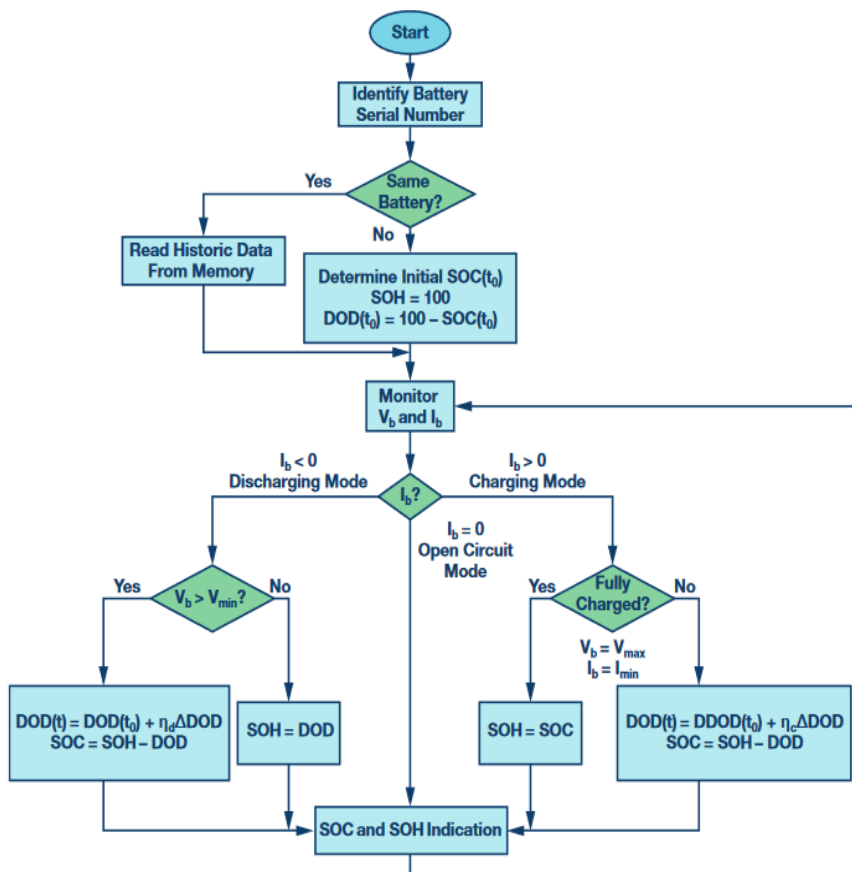
Μετά από μια διόρθωση με την απόδοση φόρτισης και εκφόρτισης, μια πιο ακριβής εκτίμηση μπορεί να επιτευχθεί. Το SOC μπορεί να εκτιμηθεί αφαιρώντας την ποσότητα DOD από την ποσότητα SOH. Όταν η μπαταρία είναι σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος με μηδενικό ρεύμα, το SOC λαμβάνεται απευθείας από τη σχέση μεταξύ της τάσης ανοικτού κυκλώματος (OCV) και SOC.

Σημειώνεται ότι η SOH μπορεί να επανεκτιμηθεί όταν η μπαταρία είναι είτε πλήρως εκφορτισμένη ή πλήρως φορτισμένη και το ρεύμα και η τάση λειτουργίας της μπαταρίας καθορίζονται από τους κατασκευαστές. Η μπαταρία είναι εξαντλημένη (εκφορτισμένη) όταν η φορτισμένη τάση (V_b) γίνεται μικρότερη από το κατώτερο όριο (V_{min}) κατά την εκφόρτιση. Σε αυτή την περίπτωση, η μπαταρία δεν μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί και πρέπει να επαναφορτιστεί.

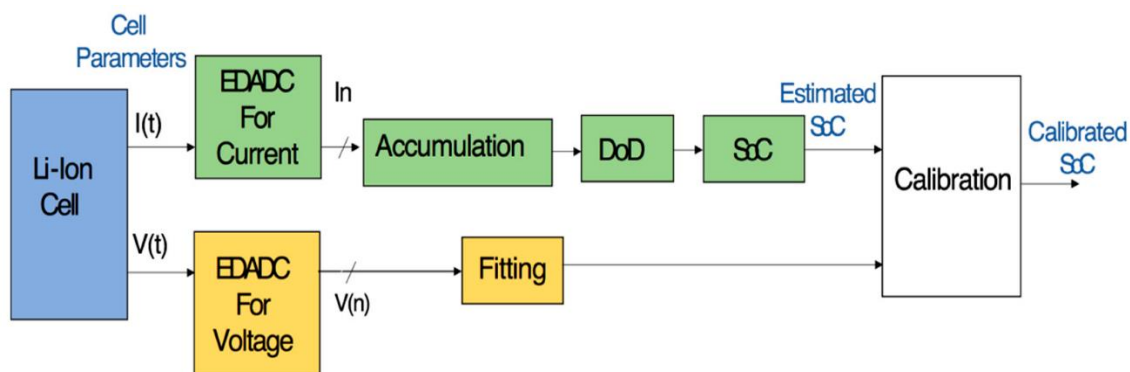
Ταυτόχρονα, μπορεί να γίνει επαναβαθμονόμηση στο SOH με την επανεκτίμηση της τιμής SOH με τη σωρευτική DOD στην κατάσταση εξάντλησης. Από την άλλη πλευρά, η χρησιμοποιημένη μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη εάν η (V_b) φτάσει το ανώτερο όριο (V_{max}) και (I_b) μειώνεται στο κατώτερο όριο (I_{min}) κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Μια νέα SOH λαμβάνεται με τη συσσώρευση του αθροίσματος της συνολικής φόρτισης της μπαταρίας και ισούται στη συνέχεια με SOC. Στην πράξη, οι καταστάσεις της πλήρως φορτισμένης και εξαντλημένης (εκφορτισμένης) μπαταρίας, εμφανίζονται περιστασιακά. Η ακρίβεια της αξιολόγησης SOH μπορεί να βελτιωθεί όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη και εκφορτισμένη αντίστοιχα.

Χάρη στον απλό υπολογισμό και τα απλά κυκλώματα που χρειάζονται, ο ενισχυμένος αλγόριθμος καταμέτρησης Coulomb μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε όλες τις φορητές συσκευές, καθώς και στα ηλεκτρικά οχήματα.



Εικόνα 8. Flow chart enhanced algorithm. (Πηγή: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/a-closer-look-at-state-of-charge-and-state-health-estimation-techniques.pdf>)



Εικόνα 9. Μπλοκ διάγραμμα της μεθόδου μέτρησης Coulomb (Coulomb counting). (Πηγή: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/21/5600/htm>)

Στην αγορά υπάρχουν διάφοροι μετρητές Coulomb για την μέτρηση του SOC, όπως αυτός που φαίνεται παρακάτω (εικόνα 10):



Εικόνα 10. Μετρητής Coulomb. (Πηγή: <https://edulab.com/product/digital-coulomb-meter/>)

Μέτρηση εσωτερικής αντίστασης.

Κατά τους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης ενός κελιού, η σύνθεση των ενεργών στοιχείων του κελιού μεταβάλλεται, κάτι το οποίο έχει άμεση επίδραση στην εσωτερική αντίσταση του κελιού. Επομένως, η μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης ενός κελιού μπορεί να βοηθήσει στον προσδιορισμό του SOC. Η εσωτερική αντίσταση υπολογίζεται ως το πηλίκο της πτώσης τάσης προς τη μεταβολή του ρεύματος κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος που είναι πάντα το ίδιο. Ο τελικός υπολογισμός εξαρτάται πάρα πολύ από το μέγεθος του διαστήματος αυτού.

Για χρόνο μικρότερο από 10ms συναντώνται μόνο ωμικά φαινόμενα. Αν όμως το διάστημα είναι μεγαλύτερο συνυπολογίζονται και άλλα φαινόμενα όπως αντιδράσεις μεταφοράς ή διάχυση οξέος και ο υπολογισμός γίνεται, έτσι, πολύπλοκος.

Η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιείται ευρέως λόγω των δυσκολιών στη μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης κατά τη λειτουργία καθώς και λόγω των μεταβολών που υφίσταται λόγω θερμοκρασιακών αλλαγών.

Ωστόσο θα μπορούσε να βελτιωθεί λαμβάνοντας υπόψιν την αποτελεσματικότητα Coulomb η_{Ah} σε διαφορετικές θερμοκρασίες και ονομαστικές φορτίσεις (**charge rates**). Ο λόγος αυτός ορίζεται ως ο αριθμός των φορτίσεων (κατά την διαδικασία φόρτισης) σε σύγκριση με τον αριθμό εκφόρτισεων (κατά την διάρκεια της εκφόρτισης), σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\eta_{Ah} = \frac{Q_{discharge}}{Q_{charge}} \times 100\% \quad (2)$$

Εφόσον ο λόγος η_A εξαρτάται από την ονομαστική ένταση (φόρτιση ή εκφόρτιση), όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μία ισοδύναμη αποτελεσματικότητα Coulomb (**Equivalent Coulombic**

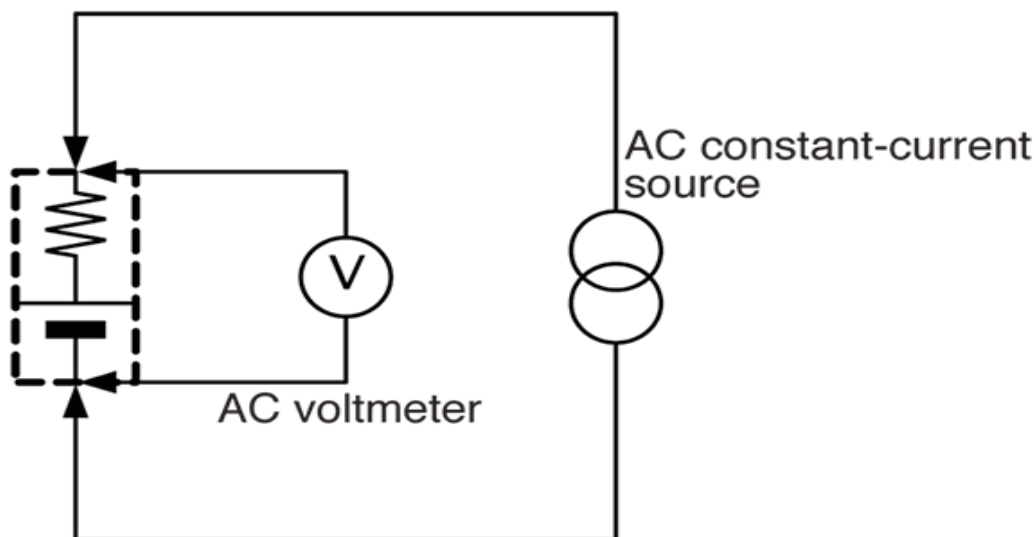
Efficiency -ECE) η_{eq} προστίθεται στην εξίσωση, συμπεριλαμβανομένου και της φόρτισης – εκφόρτισης. Σύμφωνα με αυτό η τροποποιημένη εξίσωση (1) μπορεί να γραφεί κα ως εξής:

$$SOC(t) = SOC_o - \frac{1}{C_a} \int \eta_{eq} i dt$$

Το η_{eq} και το C_a αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα το **ECE** και την τρέχουσα χωρητικότητα (η οποία διαφέρει από την ονομαστική χωρητικότητα C_{rated} , εξαιτίας της θερμοκρασίας και της γήρανσης της μπαταρίας)

Μεταξύ των διάφορων τεχνολογιών η μπαταρία Li-ion προσφέρει την μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα Coulomb σε φυσιολογικές SOC περιοχές (ξεπερνώντας το 99%). Η εκτίμηση του μεγέθους αυτού είναι δύσκολο γιατί χρειάζονται όργανα υψηλής ακρίβειας και αυτό αυξάνει το κόστος.[3.7]

Οι μετρητές εσωτερικής αντίστασης, όπως οι **Hioki 3561, BT3562, BT3563, και BT3554**, εφαρμόζουν ένα σταθερό AC ρεύμα σε συχνότητα 1 kHz και μετά υπολογίζουν την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας με την βοήθεια ενός AC βολτόμετρου (εικόνα 11).



Εικόνα 11. Μετρητής εσωτερικής αντίστασης. (Πηγή: https://www.hioki.com/en/learning/usage/resistance-meters_2.html)

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, η μέθοδος AC four-terminal (που χρησιμοποιεί ο μετρητής **Hioki 3561**) η οποία συνδέει ένα AC βολτόμετρο στο θετικό και το άλλο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, επιτρέπει την ακριβή μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης ενώ ελαχιστοποιεί την επίδραση που εμφανίζεται από την αντίσταση του καλωδίου και της αντίστασης που παρουσιάζουν οι επαφές. Αυτή η τεχνική δίνει την δυνατότητα της μέτρησης εσωτερικής αντίστασης μέχρι και μερικά milliohms. Η ακρίβεια (accuracy) φτάνει στο 0,01%. Σε συχνότητες άλλες από 1 kHz ο μετρητής BT4560 μπορεί να δώσει αποτελέσματα ακόμα πιο ακριβή, φτάνοντας στο 0,0035%. [3.8]

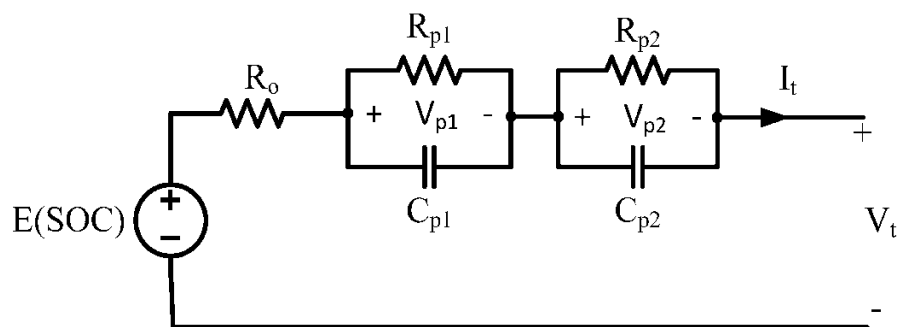
➤ Προσδιορισμός SOC με την βοήθεια του φίλτρου Kalman (Kalman Filter Method)

Τα φίλτρα **Kalman** εισήχθησαν το 1960 για να παρέχουν μια αναδρομική λύση βέλτιστου γραμμικού φιλτραρίσματος τόσο για προβλήματα παρατήρησης όσο και για προβλήματα πρόβλεψης. Σε σύγκριση με άλλες προσεγγίσεις εκτίμησης, το φίλτρο Kalman παρέχει αυτόματα δυναμικά όρια σφάλματος στις δικές του εκτιμήσεις κατάστασης. Ένα φίλτρο Kalman είναι ένας αλγόριθμος που υπολογίζει τις εσωτερικές μεταβλητές κατάστασης οποιουδήποτε δυναμικού συστήματος. Στην περίπτωση μας το δυναμικό σύστημα είναι η μπαταρία και μία από τις μεταβλητές κατάστασης είναι η στάθμη φόρτισης.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι μπορεί να παρέχει εκτιμήσεις για την στάθμη φόρτισης της μπαταρίας στην μεταβατική κατάσταση λειτουργίας.

Με τη μοντελοποίηση του συστήματος μπαταρίας για να συμπεριλάβει τις επιθυμητές άγνωστες ποσότητες (όπως το SOC) στην περιγραφή της κατάστασης, το φίλτρο Kalman εκτιμά τις τιμές τους και δίνει όρια σφάλματος στις εκτιμήσεις. Στη συνέχεια γίνεται μια τεχνική εκτίμησης κατάστασης βάσει μοντέλου που χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό διόρθωσης σφαλμάτων για να παρέχει προβλέψεις του SOC σε πραγματικό χρόνο.

Στην πράξη, όμως χρησιμοποιείται η μέθοδος εκτεταμένου φίλτρου Kalman (EKF). Μπορεί να επεκταθεί προκειμένου να αυξηθεί η δυνατότητα εκτίμησης SOH σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας το εκτεταμένο φίλτρο Kalman. Συγκεκριμένα, το εκτεταμένο φίλτρο Kalman (EKF) εφαρμόζεται όταν το σύστημα μπαταριών είναι μη γραμμικό και χρειάζεται ένα βήμα γραμμικοποίησης. Παρ'όλο που το φιλτράρισμα Kalman είναι μια δυναμική μέθοδος, χρειάζεται ένα κατάλληλο μοντέλο για την μπαταρία και ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων της. Χρειάζεται επίσης μεγάλη υπολογιστική ικανότητα και ακριβή αρχικοποίηση. Αν και η μέθοδος αυτήν έχει την δυνατότητα να υπολογίζει την στάθμη φόρτισης της μπαταρίας κατά την μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, έχει το μειονέκτημα ότι ο χρόνος υπολογισμού αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών κατάστασης.



Εικόνα 12. Δυναμικό μοντέλο της μπαταρίας. (Πηγή: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1751/htm>)

Άλλες μέθοδοι για την εκτίμηση SoC παρουσιάζονται σε διάφορες πηγές της βιβλιογραφίας, όπως π.χ. η φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης, η οποία βασίζεται στην σύνθετη αντίσταση κυψέλης.

Αν και αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κυψέλες ιόντων λιθίου (Li-ion) η εκτίμηση SOC και SOH, παραλείφθηκε δεδομένου ότι βασίζεται σε μετρήσεις που χρησιμοποιούν όργανα. Οι μέθοδοι που βασίζονται στην φυσική ιδιότητα των ηλεκτρολυτών και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα δεν εφαρμόζονται για μπαταρίες ιόντων λιθίου.[3.9]

Για τη μέτρηση του ρεύματος της μπαταρίας χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι:

Μέσω πτώσης τάσης. Είναι η πιο απλή μέθοδος για τον προσδιορισμό του ρεύματος. Βασίζεται στη μέτρηση της πτώσης τάσης στα άκρα μίας ωμικής αντίστασης υψηλής ακρίβειας η οποία είναι συνδεδεμένη σε σειρά ανάμεσα στην μπαταρία και το φορτίο. Αυτή η μέθοδος μέτρησης προκαλεί μία ελαφρά απώλεια ισχύος, θερμαίνει τη μπαταρία και είναι ανακριβής σε χαμηλά ρεύματα.

Οι μετατροπείς του φαινομένου Hall δεν παρουσιάζουν το παραπάνω πρόβλημα ωστόσο έχουν μεγαλύτερο κόστος. Ένα μειονέκτημα είναι ότι έχουν μικρή ανοχή σε υψηλά ρεύματα και είναι επιρρεπείς στο θόρυβο.

Οι αισθητήρες μαγνητοαντιστάσεων έχουν ακόμα υψηλότερο κόστος αλλά έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία και καλύτερη ευστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες από ότι οι αισθητήρες Hall. Η μέτρηση του φορτίου Coulomb εξαρτάται από το ρεύμα το οποίο ρέει από τη μπαταρία σε ένα εξωτερικό κύκλωμα και δεν λαμβάνει υπόψη το ρεύμα αυτοεκφόρτισης ή την Coulomb απόδοση της μπαταρίας.

3.6 Μπαταρίες μολύβδου οξέος (Lead acid) [3.11]

Η αποθήκευση ενέργειας με χρήση μπαταριών είναι ένας από τους σημαντικότερους και αποδοτικότερους τρόπους σταθεροποίησης των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας και υπάρχει μια ποικιλία διαφορετικών μπαταριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Οι μπαταρίες μολύβδου έχουν καθιερωθεί πολύ καλά τόσο για την αυτοκινητοβιομηχανία όσο και για βιομηχανικές εφαρμογές και έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία για την αποθήκευση ενέργειας σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος. Οι μπαταρίες μολύβδου έχουν πολλούς κύκλους και μεγάλους χρόνους διάρκειας ζωής. Έχουν εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια ώστε να έχουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με 20 χρόνια πριν.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν πλεονεκτήματα όσον αφορά την ενεργειακή πυκνότητα και την ειδική ενέργεια, αλλά αυτό είναι λιγότερο σημαντικό για τις στατικές εγκαταστάσεις. Οι μπαταρίες μολύβδου χρησιμοποιούνται σε διάφορα συστήματα ενέργειας, μη διασυνδεδεμένα (off-grid)/αυτόνομα εδώ και δεκαετίες και είναι μία από τις πιο συχνά προσφερόμενες επιλογές προϊόντων σε οικιακά συστήματα αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας. Επίσης είναι συνήθως οι πιο προσιτές σε κόστος.

Ο μολύβδος είναι το πιο αποτελεσματικά ανακυκλώσιμο μέταλλο και οι μπαταρίες μολύβδου είναι το μόνο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας που ανακυκλώνεται σχεδόν πλήρως, με πάνω από το 99% των μπαταριών μολύβδου να συλλέγονται και να ανακυκλώνονται στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ.

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος παρέχονται από μια μεγάλη, καθιερωμένη, παγκόσμια βάση προμηθευτών και έχουν το μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς για τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες τόσο από άποψη αξίας πωλήσεων όσο και από άποψη ενέργειας (MWh) παραγωγής. Η μεγαλύτερη αγορά είναι οι μπαταρίες αυτοκινήτων με κύκλο εργασιών της τάξης των 25bn \$ και η δεύτερη αγορά είναι οι βιομηχανικές μπαταρίες για εφεδρική και κινητήρια ενέργεια με κύκλο εργασιών το 2015 ~ 10bn \$. Η πλειονότητα των βιομηχανικών μπαταριών χρησιμοποιείται για εφεδρικές εφαρμογές για την παροχή αδιάλειπτης τροφοδοσίας για τις τηλεπικοινωνίες, τα δίκτυα δεδομένων, την εθνική ασφάλεια

και ένα τεράστιο φάσμα εφαρμογών όπου η συνέχεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη.

Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί προέκταση της εφεδρείας ή της σταθερής υπηρεσίας, αλλά οι απαιτήσεις των εφαρμογών είναι αρκετά διαφορετικές και καθώς η αγορά για την αποθήκευση ενέργειας αυξάνεται, πρέπει να αναγνωριστεί ως ένας πλήρως ξεχωριστός τομέας της αγοράς.

Στις πολύ πρώιμες ημέρες της ανάπτυξης των δημόσιων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, η ισχύς συνεχούς ρεύματος χαμηλής τάσης διανεμόταν στις τοπικές κοινότητες των μεγάλων πόλεων και οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος χρησιμοποιούνταν για την παροχή ισχύος αιχμής και για την βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας. Σύντομα η διανομή συνεχούς ρεύματος αντικαταστάθηκε από συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος και η δυνατότητα χρήσης μετασχηματιστών για την αύξηση ή μείωση της τάσης επέτρεψε την ανάπτυξη δικτύων μεγάλης έκτασης. Η χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας από μπαταρίες (BESS) μειώθηκε γρήγορα καθώς τα δίκτυα μεγάλων σε μέγεθος.

Μεγάλα δίκτυα έχουν εγκαταστήσει συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με αντλησιοταμίευση υδροηλεκτρικής ενέργειας για να αυξήσουν τη στρεφόμενη εφεδρεία τους, αλλά καθώς οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία, απαιτείται υψηλότερο επίπεδο ταχείας εφεδρείας. Οι μπαταρίες μπορούν να το προσφέρουν αυτό, με τις μπαταρίες μολύβδου να προσφέρουν υψηλή απόδοση για βραχυπρόθεσμη εφεδρεία και η χρήση τους για την υποστήριξη του δικτύου, τα έξυπνα δίκτυα, τα τοπικά συστήματα και τα οικιακά και μικρά εμπορικά ενεργειακά συστήματα θα αυξηθεί.

Οι προηγμένες μπαταρίες μολύβδου έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλά συστήματα για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας κοινής ωφέλειας και μικρότερης κλίμακας σε οικιακές και εμπορικές εφαρμογές. Ο όρος προηγμένες ή ενισχυμένες με άνθρακα (carbon-enhanced) μπαταρίες μολύβδου χρησιμοποιείται επειδή, εκτός από τις τυπικές μπαταρίες μολύβδου-οξέος, τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί συσκευές με ενσωματωμένη λειτουργία υπερπυκνωτή. Αυτές μπορεί να έχουν αρνητικό ηλεκτρόδιο με συνδυασμένο αρνητικό μολύβδου-οξέος και αρνητικό υπερπυκνωτή με βάση τον άνθρακα (πχ.: η UltraBattery) ή μπορεί να έχουν μόνο αρνητικό υπερπυκνωτή (η μπαταρία PbC) ή πρόσθετα σκόνης άνθρακα στο αρνητικό ενεργό υλικό. Σε όλες τις περιπτώσεις, το θετικό ηλεκτρόδιο είναι το ίδιο όπως σε μια συμβατική μπαταρία μολύβδου-οξέος.

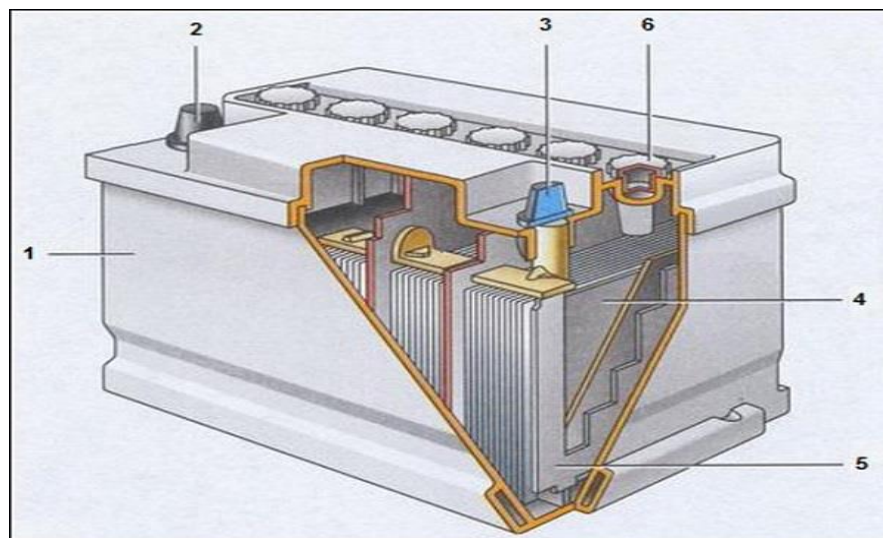
Οι μπαταρίες αυτές μπορεί να είναι υγρού τύπου (flooded) ή κλειστού τύπου (VRLA) και τα πλέγματα μπορεί να έχουν τη μορφή επίπεδων επικολλημένων πλακών ή σωληνοειδών πλακών. Οι διάφορες κατασκευές έχουν διαφορετικές τεχνικές επιδόσεις και μπορούν να προσαρμοστούν σε συγκεκριμένους κύκλους λειτουργίας. Οι μπαταρίες με σωληνοειδείς πλάκες προσφέρουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Για χρήση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ιδίως με φωτοβολταϊκά, το πρότυπο χρήσης είναι η συχνή εκφόρτιση με την μπαταρία να μην επιστρέφει απαραίτητα τακτικά σε πλήρη κατάσταση φόρτισης. Αυτή η λειτουργία μερικής κατάστασης φόρτισης (PSOC) μπορεί να είναι επιζήμια για τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος καθώς οδηγεί σε μη αναστρέψιμη θείωση των αρνητικών πλακών και οι μέθοδοι για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έχουν αποτελέσει αντικείμενο εντατικής έρευνας και ανάπτυξης. [3.10]



Εικόνα 13. Μπαταρία μολύβδου οξέος. (Πηγή: <https://haynes.com>)

Η τυπική δομή μίας μπαταρίας μολύβδου οξέος είναι ως παρακάτω (Εικόνα 14):

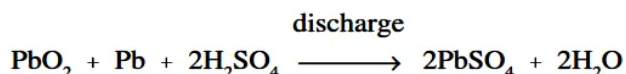
1. Θήκη, μέσα στην οποία χύνεται ο ηλεκτρολύτης.
2. Θετικός ακροδέκτης
3. Αρνητικός ακροδέκτης
4. Θετική πλάκα (άνοδος).
5. Αρνητική πλάκα (κάθοδος).
6. Βύσμα, μέσα στο οποίο υπάρχει "λαιμός" πλήρωσης (σημ.: δεν περιέχεται στις σύγχρονες μπαταρίες).



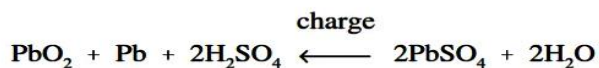
Εικόνα 14. Δομή μολύβδου οξέος. (Πηγή: <https://gtshina.ru/el/pokupka-avto/chego-sostoit-akb-ustroystvo-i-princip-raboty-akkumulyatornoi/>)

3.6.1 Λειτουργία μπαταρίας μολύβδου οξέος

Μια μπαταρία μολύβδου αποτελείται από ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο από σπογγώδη ή πορώδη μολύβδο. Ο μολύβδος είναι πορώδης για να διευκολύνει το σχηματισμό και τη διάλυση του μολύβδου. Το θετικό ηλεκτρόδιο αποτελείται από οξείδιο του μολύβδου. Και τα δύο ηλεκτρόδια βυθίζονται σε ηλεκτρολυτικό διάλυμα θειικού οξέος και νερού. Σε περίπτωση που τα ηλεκτρόδια έρθουν σε επαφή μεταξύ τους μέσω φυσικής κίνησης της μπαταρίας ή μέσω αλλαγών στο πάχος των ηλεκτροδίων, μια ηλεκτρικά μονωτική, αλλά χημικά διαπερατή μεμβράνη διαχωρίζει τα δύο ηλεκτρόδια. Η μεμβράνη αυτή αποτρέπει επίσης την ηλεκτρική βραχυκύκλωση μέσω του ηλεκτρολύτη. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος αποθηκεύουν ενέργεια μέσω της αντιστρεπτής χημικής αντίδρασης που παρουσιάζεται στις δύο παρακάτω αντιδράσεις (φόρτισης/εκφόρτισης):

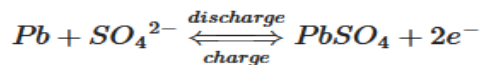


Αντίδραση εκφόρτισης

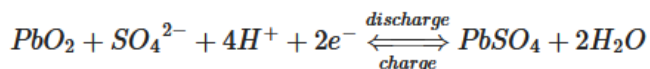


Αντίδραση φόρτισης

Στον αρνητικό ακροδέκτη οι αντιδράσεις φόρτισης και εκφόρτισης είναι:



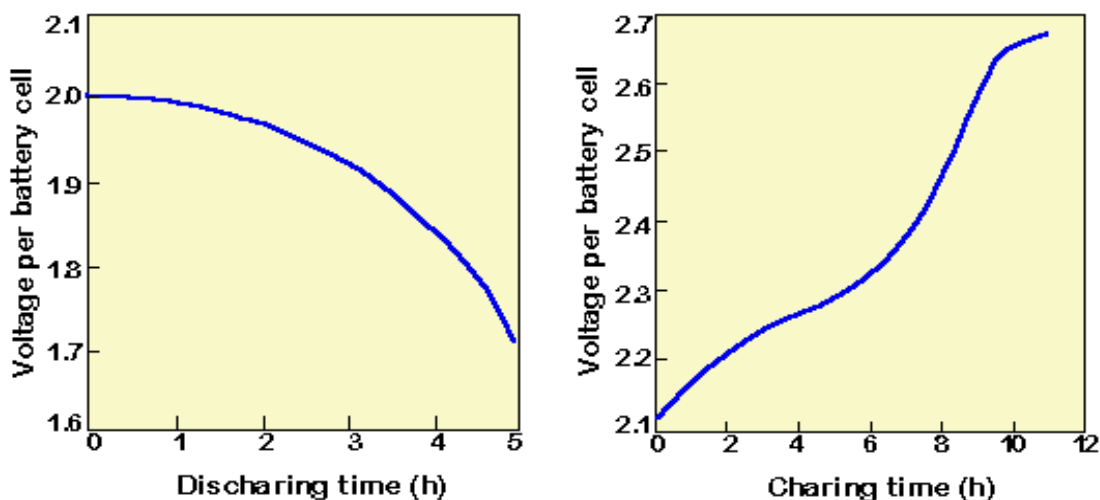
Στον θετικό ακροδέκτη οι αντιδράσεις φόρτισης και εκφόρτισης είναι:



Όπως δείχνουν οι παραπάνω χημικές εξισώσεις, η εκφόρτιση μιας μπαταρίας προκαλεί το σχηματισμό κρυστάλλων θειϊκού μολύβδου τόσο στον αρνητικό όσο και στο θετικό πόλο, καθώς και την απελευθέρωση ηλεκτρονίων λόγω της αλλαγής του φορτίου σθένους του μολύβδου. Ο σχηματισμός αυτού του θειϊκού μολύβδου χρησιμοποιεί θειϊκά άλατα από τον ηλεκτρολύτη θειϊκού οξέος που περιβάλλει τη μπαταρία. Ως αποτέλεσμα, ο ηλεκτρολύτης γίνεται λιγότερο συμπυκνωμένος. Η πλήρης εκφόρτιση θα είχε ως αποτέλεσμα και τα δύο ηλεκτρόδια να καλύπτονται

από θεϊκό μόλυβδο και νερό και όχι από θεϊκό οξύ που περιβάλλει τα ηλεκτρόδια. Στην πλήρη εκφόρτιση τα δύο ηλεκτρόδια είναι το ίδιο υλικό και δεν υπάρχει χημικό δυναμικό ή τάση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Στην πράξη, ωστόσο, η εκφόρτιση σταματά στην τάση αποκοπής, πολύ πριν από αυτό το σημείο. Επομένως, η μπαταρία δεν πρέπει να εκφορτίζεται κάτω από αυτή την τάση.

Μεταξύ της κατάστασης πλήρους εκφόρτισης και της κατάστασης φόρτισης, μια μπαταρία μολύβδου-οξέος παρουσιάζει σταδιακή μείωση της τάσης. Το επίπεδο τάσης χρησιμοποιείται συνήθως για να υποδείξει την κατάσταση φόρτισης μιας μπαταρίας. Η εξάρτηση της μπαταρίας από την κατάσταση φόρτισης της, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 15).



Εικόνα 15. Κατάσταση εκφόρτισης και φόρτισης μπαταρίας μολύβδου οξέος. (Πηγή: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/lead-acid-batteries>).

Εάν η μπαταρία παραμείνει σε χαμηλή κατάσταση φόρτισης για παρατεταμένες χρονικές περιόδους, μπορεί να αναπτυχθούν μεγάλοι κρύσταλλοι θεϊκού μολύβδου, γεγονός που μειώνει μόνιμα τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Αυτοί οι μεγαλύτεροι κρύσταλλοι είναι αντίθετοι με την τυπική πορώδη δομή του ηλεκτροδίου μολύβδου και είναι δύσκολο να μετατραπούν πάλι σε μόλυβδο.

3.6.2. Τάση της μπαταρίας μολύβδου οξέος κατά τη φόρτιση.

Η αντίδραση φόρτισης μετατρέπει τον θεϊκό μόλυβδο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο σε μόλυβδο. Στο θετικό ηλεκτρόδιο η αντίδραση μετατρέπει τον μόλυβδο σε οξείδιο του μολύβδου. Ως παραπροϊόν αυτής της αντίδρασης, αναπτύσσεται υδρογόνο. Κατά το πρώτο μέρος του κύκλου φόρτισης, η μετατροπή του θεϊκού μολύβδου σε μόλυβδο και οξείδιο του μολύβδου είναι η κυρίαρχη αντίδραση. Ωστόσο, καθώς η φόρτιση συνεχίζεται και το μεγαλύτερο μέρος του θεϊκού μολύβδου μετατρέπεται είτε σε μόλυβδο είτε σε διοξείδιο του μολύβδου, το ρεύμα φόρτισης ηλεκτρολύει το νερό από τον ηλεκτρολύτη και αναπτύσσονται τόσο υδρογόνο όσο και αέριο οξυγόνο, μια διαδικασία γνωστή ως **αεριοποίηση** (gassing) της μπαταρίας.

Εάν η μπαταρία τροφοδοτείται με ρεύμα ταχύτερα από ό,τι μπορεί να μετατραπεί ο θεϊκός μόλυβδος, τότε η αεριοποίηση αρχίζει προτού μετατραπεί όλος ο θεϊκός μόλυβδος, δηλαδή προτού η μπαταρία φορτιστεί πλήρως. Η αεριοποίηση εισάγει διάφορα προβλήματα σε μια μπαταρία μολύβδου οξέος. Η αεριοποίηση της μπαταρίας δεν εγείρει μόνο ανησυχίες για την ασφάλεια, λόγω της

εκρηκτικής φύσης του παραγόμενου υδρογόνου, αλλά μειώνει επίσης το νερό στη μπαταρία, το οποίο πρέπει να αντικαθίσταται χειροκίνητα, εισάγοντας ένα στοιχείο συντήρησης στο σύστημα. Επιπλέον, μπορεί να προκαλέσει την αποβολή ενεργού υλικού από τον ηλεκτρολύτη, μειώνοντας έτσι μόνιμα τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Για τους λόγους αυτούς, η μπαταρία δεν θα πρέπει να φορτίζεται τακτικά πάνω από την τάση που προκαλεί αυτό το φαινόμενο. Η τάση αεριοποίησης μεταβάλλεται με το ρυθμό φόρτισης. Ο θεϊκός μόλυβδος είναι μονωτής και, επομένως, ο τρόπος με τον οποίο σχηματίζεται ο θεϊκός μόλυβδος στα ηλεκτρόδια καθορίζει πόσο εύκολα μπορεί να εκφορτιστεί η μπαταρία.

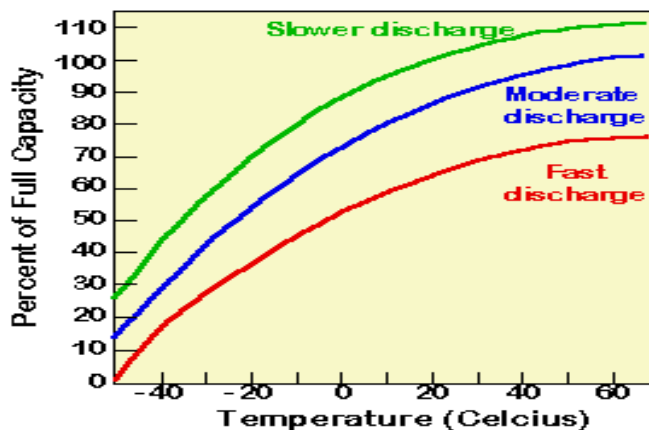
3.6.3. Χαρακτηριστικά της μπαταρίας μολύβδου οξέος

Για τα περισσότερα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας είναι: η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, το βάθος εκφόρτισης και οι απαιτήσεις συντήρησης της μπαταρίας. Αυτό το σύνολο παραμέτρων και η μεταξύ τους σχέση με τις συνθήκες φόρτισης, τη θερμοκρασία και την ηλικία περιγράφονται παρακάτω.

- **Βάθος εκφόρτισης**

Το βάθος εκφόρτισης σε συνδυασμό με τη χωρητικότητα της μπαταρίας είναι μια θεμελιώδης παράμετρος στο σχεδιασμό μιας συστοιχίας μπαταριών για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, καθώς η ενέργεια που μπορεί να εξαχθεί από τη μπαταρία βρίσκεται πολλαπλασιάζοντας τη χωρητικότητα της μπαταρίας με το βάθος εκφόρτισης. Οι μπαταρίες χαρακτηρίζονται είτε ως μπαταρίες βαθιάς (deep-cycle) ή ρηχής εκφόρτισης (shallow-cycle). Μια μπαταρία βαθιάς εκφόρτισης έχει βάθος εκφόρτισης μεγαλύτερο από 50% και μπορεί να φθάσει το 80%. Για να επιτευχθεί η ίδια ωφέλιμη χωρητικότητα, μια συστοιχία μπαταριών ρηχού κύκλου πρέπει να έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από μια συστοιχία μπαταριών βαθύ κύκλου.

Εκτός από το βάθος εκφόρτισης και την ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας, η στιγμιαία ή διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας επηρεάζεται έντονα από τον ρυθμό εκφόρτισης της μπαταρίας και τη θερμοκρασία λειτουργίας της μπαταρίας. Η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται κατά περίπου 1% ανά βαθμό κάτω από τους 20°C περίπου. Ωστόσο, ούτε οι υψηλές θερμοκρασίες είναι ιδανικές για τις μπαταρίες, καθώς αυτές επιταχύνουν τη γήρανση, την αυτοεκφόρτιση και τη χρήση του ηλεκτρολύτη. Το παρακάτω γράφημα δείχνει την επίδραση της θερμοκρασίας της μπαταρίας και του ρυθμού εκφόρτισης στη χωρητικότητα της μπαταρίας.



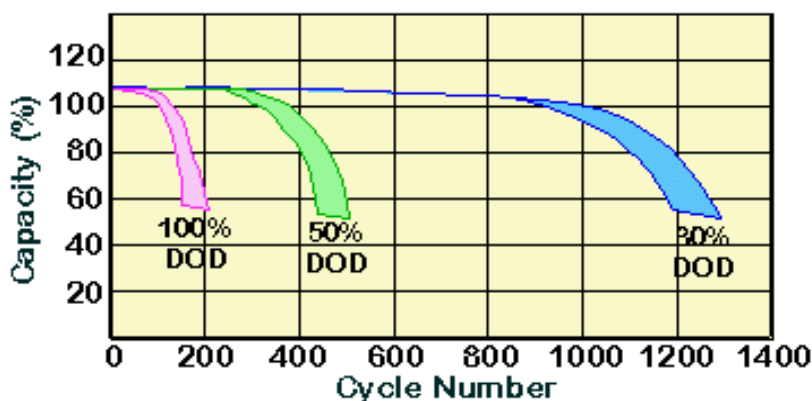
Εικόνα 15. Σχέση μεταξύ της χωρητικότητας της μπαταρίας, της θερμοκρασίας και του ρυθμού εκφόρτισης. (Πηγή: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/lead-acid-batteries>)

- **Διάρκεια ζωής**

Με την πάροδο του χρόνου, η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται λόγω της θείωσης της μπαταρίας και της αποβολής ενεργού υλικού. Η υποβάθμιση της χωρητικότητας της μπαταρίας εξαρτάται κυρίως από την αλληλεπίδραση μεταξύ των ακόλουθων παραμέτρων:

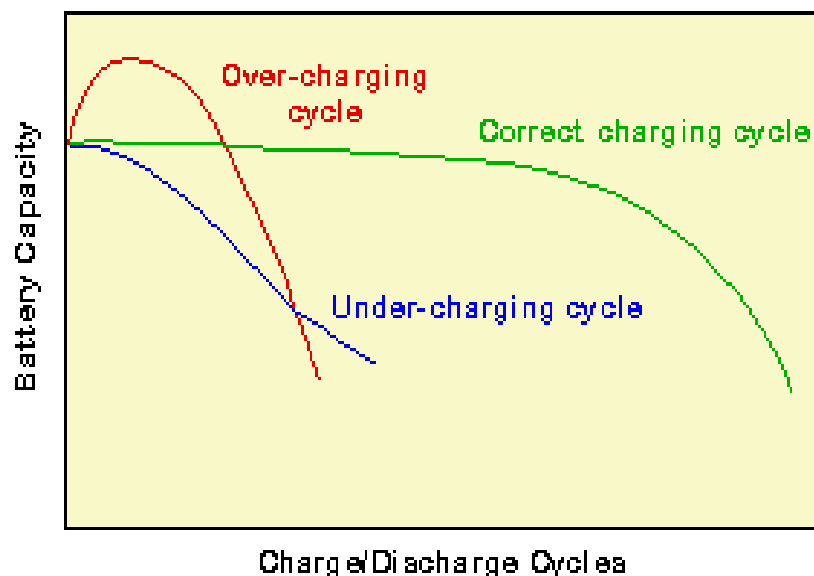
1. τον τρόπο φόρτισης/εκφόρτισης που έχει υποστεί η μπαταρία
2. το DOD της μπαταρίας κατά τη διάρκεια ζωής της
3. την έκθεσή του σε παρατεταμένες περιόδους χαμηλής εκφόρτισης
4. τη μέση θερμοκρασία της μπαταρίας κατά τη διάρκεια της ζωής της

Το ακόλουθο γράφημα δείχνει την εξέλιξη της λειτουργίας της μπαταρίας ως προς τον αριθμό των κύκλων και το βάθος εκφόρτισης για μια μπαταρία μολύβδου οξέος ρηχού κύκλου. Αντίθετα μία μπαταρία μολύβδου οξέος βαθέως κύκλου θα πρέπει να είναι σε θέση να διατηρεί διάρκεια ζωής κύκλων άνω των 1.000 ακόμη και σε DOD άνω του 50% (Εικόνα 16).



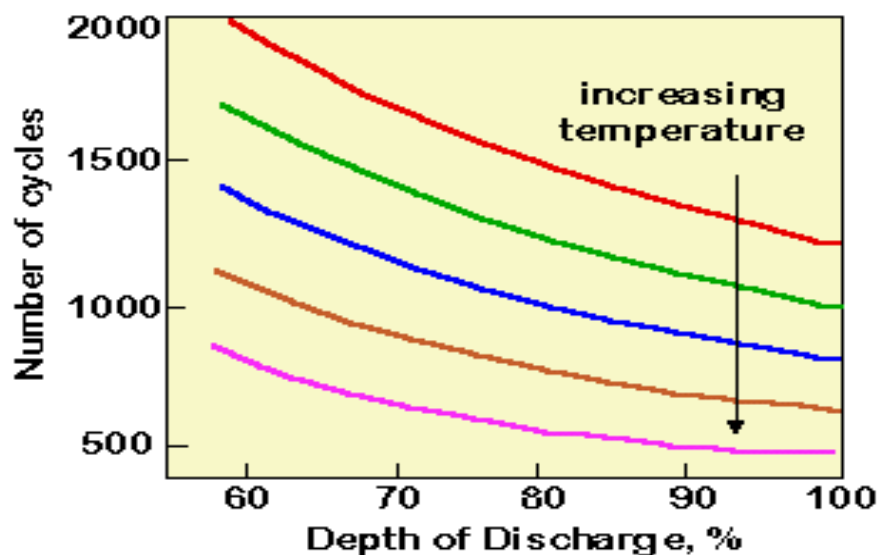
Εικόνα 15. Σχέση μεταξύ της χωρητικότητας της μπαταρίας, του βάθους εκφόρτισης και της διάρκειας ζωής για μια μπαταρία ρηχού κύκλου. (Πηγή: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/lead-acid-batteries>)

Εκτός από την DOD, και ο τρόπος φόρτισης παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Η υπερφόρτιση (overcharging) ή η υποφόρτιση (undercharging) της μπαταρίας έχει ως αποτέλεσμα είτε την αποβολή ενεργού υλικού είτε τη θείωση της μπαταρίας, μειώνοντας έτσι σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας (εικόνα 16).



Εικόνα 16. Επίδραση του καθεστώτος φόρτισης στη χωρητικότητα της μπαταρίας. (Πηγή: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/lead-acid-batteries>)

Η τελική επίπτωση στη φόρτιση της μπαταρίας σχετίζεται με τη θερμοκρασία της μπαταρίας. Αν και η χωρητικότητα μιας μπαταρίας μολύβδου οξέος μειώνεται σε λειτουργία σε χαμηλή θερμοκρασία, η λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία αυξάνει το ρυθμό γήρανσης της μπαταρίας.



Εικόνα 17. Σχέση μεταξύ της χωρητικότητας της μπαταρίας, της θερμοκρασίας και της διάρκειας ζωής για μια μπαταρία βαθιάς εκφόρτισης.

- **Απαιτήσεις συντήρησης**

Η παραγωγή και η διαφυγή αερίου υδρογόνου και οξυγόνου από μια μπαταρία προκαλεί απώλεια νερού και το νερό πρέπει να αντικαθίσταται τακτικά στις μπαταρίες μολύβδου οξέος. Άλλα

εξαρτήματα ενός συστήματος μπαταρίας δεν απαιτούν τόσο τακτική συντήρηση, οπότε η απώλεια νερού μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα. Εάν το σύστημα βρίσκεται σε απομακρυσμένη τοποθεσία, ο έλεγχος της απώλειας νερού μπορεί να αυξήσει το κόστος. Οι μπαταρίες κλειστού τύπου περιορίζουν την ανάγκη τακτικής προσοχής, καθώς εμποδίζουν ή μειώνουν την ποσότητα του αερίου που διαφεύγει από τη μπαταρία. Ωστόσο, λόγω της διαβρωτικής φύσης του ηλεκτρολύτη, όλες οι μπαταρίες εισάγουν σε κάποιο βαθμό ένα πρόσθετο στοιχείο συντήρησης σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

- **Αποδοτικότητα μπαταρίας (battery efficiency)**

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος έχουν συνήθως απόδοση Coulomb 85% και ενεργειακή απόδοση της τάξης του 70%.

- **Διαμορφώσεις μπαταριών μολύβδου οξέος**

Ανάλογα με το ποιο από τα παραπάνω προβλήματα απασχολεί περισσότερο μια συγκεκριμένη εφαρμογή, οι κατάλληλες τροποποιήσεις στη βασική διαμόρφωση της μπαταρίας βελτιώνουν την απόδοσή της. Για εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα παραπάνω προβλήματα θα επηρεάσουν το βάθος εκφόρτισης, τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και τις απαιτήσεις συντήρησης. Οι αλλαγές στη μπαταρία συνήθως περιλαμβάνουν τροποποίηση σε έναν από τους τρεις βασικούς τομείς:

- αλλαγές στη σύνθεση και τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου
- αλλαγές στο διάλυμα ηλεκτρολύτη
- τροποποιήσεις στο περίβλημα ή στους ακροδέκτες της μπαταρίας για την αποτροπή ή τη μείωση της διαφυγής του παραγόμενου αερίου υδρογόνου.

- **Ειδικές εκτιμήσεις για μπαταρίες μολύβδου-οξέος**

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος τύπου flooded χαρακτηρίζονται από μεγάλους κύκλους και μεγάλη διάρκεια ζωής. Ωστόσο, οι μπαταρίες αυτού του τύπου απαιτούν περιοδική συντήρηση. Όχι μόνο πρέπει να παρακολουθείται τακτικά το επίπεδο του νερού στον ηλεκτρολύτη με τη μέτρηση του ειδικού του βάρους, αλλά απαιτείται επίσης "φόρτιση ώθησης" (boost charging).

Φόρτιση Ώθησης (Boost Charging)

Η φόρτιση ώθησης (boost charging) ή εξισορρόπησης περιλαμβάνει σύντομη περιοδική υπερφόρτιση, η οποία απελευθερώνει αέριο και αναμιγνύει τον ηλεκτρολύτη, αποτρέποντας έτσι τη διαστρωμάτωση του ηλεκτρολύτη στη μπαταρία. Επιπλέον, η φόρτιση ώθησης βοηθά επίσης στη διατήρηση όλων των μπαταριών στην ίδια χωρητικότητα. Για παράδειγμα, εάν μια μπαταρία αναπτύξει υψηλότερη εσωτερική αντίσταση σειράς από άλλες μπαταρίες, τότε η μπαταρία χαμηλότερης SR (silver oxide) θα υποφορτίζεται σταθερά κατά τη διάρκεια ενός κανονικού καθεστώτος φόρτισης λόγω της πτώσης τάσης στην αντίσταση σειράς. Ωστόσο, εάν οι μπαταρίες φορτιστούν σε υψηλότερη τάση, τότε αυτό επιτρέπει σε όλες τις μπαταρίες να φορτιστούν πλήρως.

Ειδικό βάρος (Specific Gravity - SG)

Μια μπαταρία ανοικτού τύπου υπόκειται σε απώλεια νερού από τον ηλεκτρολύτη λόγω της ανάπτυξης αερίου υδρογόνου και οξυγόνου. Το ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη, το οποίο μπορεί να μετρηθεί με ένα υδρόμετρο, θα υποδείξει την ανάγκη προσθήκης νερού στις μπαταρίες, εάν οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες. Εναλλακτικά, ένα υδρόμετρο θα δείξει με ακρίβεια το SOC της μπαταρίας, εάν είναι γνωστό ότι η στάθμη του νερού είναι σωστή. Η SG μετράται περιοδικά μετά από ενισχυμένη φόρτιση για να διασφαλιστεί ότι η μπαταρία έχει αρκετό νερό στον ηλεκτρολύτη. Το SG της μπαταρίας πρέπει να παρέχεται από τον κατασκευαστή.

Ειδικές εκτιμήσεις για, μπαταρίες μολύβδου-οξέος κλειστού τύπου με πηκτή (gelled)

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος πηκτής ή AGM (Absorbent Glass Mat - οι οποίες είναι συνήθως σφραγισμένες ή ρυθμιζόμενες με βαλβίδα) έχουν πολλά πιθανά πλεονεκτήματα:

- μπορούν να μεγάλο βάθος κύκλου, διατηρώντας τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας
- δεν χρειάζονται φόρτιση ώθησης (boost charging)
- απαιτούν λιγότερη συντήρηση.

Ωστόσο, αυτές οι μπαταρίες απαιτούν συνήθως ένα πιο ακριβές καθεστώς φόρτισης με χαμηλότερη τάση. Το καθεστώς φόρτισης χαμηλότερης τάσης οφείλεται στη χρήση ηλεκτροδίων μολύβδου-ασβεστίου, αλλά απαιτείται ακριβέστερο καθεστώς φόρτισης για την ελαχιστοποίηση της αεριοποίησης από τη μπαταρία. Επιπλέον, αυτές οι μπαταρίες μπορεί να είναι πιο ευαίσθητες στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, ιδίως εάν το σύστημα φόρτισης δεν αντισταθμίζει τη θερμοκρασία ή δεν έχει σχεδιαστεί για αυτούς τους τύπους μπαταριών.

• **Τρόποι αστοχίας για μπαταρίες μολύβδου-οξέος**

Η μπαταρία για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα θα αξιολογηθεί ως ένας συγκεκριμένος αριθμός κύκλων σε μια συγκεκριμένη DOD, καθεστώς φόρτισης και θερμοκρασία. Ωστόσο, οι μπαταρίες μπορεί να παρουσιάσουν είτε πρόωρη απώλεια χωρητικότητας είτε ξαφνική βλάβη για διάφορους λόγους. Η αιφνίδια αστοχία μπορεί να προκληθεί από εσωτερικό βραχυκύκλωμα της μπαταρίας λόγω αστοχίας τού ηλεκτρικού διαχωριστή των πλακών εντός της μπαταρίας. Ένα βραχυκύκλωμα στην μπαταρία θα μειώσει την τάση και τη χωρητικότητα της συνολικής συστοιχίας μπαταριών, ιδίως εάν τμήματα της μπαταρίας είναι συνδεδεμένα παράλληλα, και θα οδηγήσει επίσης σε άλλα πιθανά προβλήματα, όπως η υπερφόρτιση των υπόλοιπων μπαταριών. Η μπαταρία μπορεί επίσης να παρουσιάσει βλάβη ως ανοικτό κύκλωμα (δηλαδή μπορεί να υπάρξει σταδιακή αύξηση της εσωτερικής αντίστασης σειράς) και θα επηρεαστούν επίσης τυχόν μπαταρίες που είναι συνδεδεμένες σε σειρά με αυτή τη μπαταρία. Η κατάψυξη της μπαταρίας, ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας μολύβδου οξέος που χρησιμοποιείται, μπορεί επίσης να προκαλέσει μη αναστρέψιμη βλάβη της μπαταρίας.

Η σταδιακή μείωση της χωρητικότητας μπορεί να επιδεινωθεί από την ακατάλληλη λειτουργία, ιδίως από την υποβάθμιση του DOD. Ωστόσο, η λειτουργία ενός τμήματος της συστοιχίας μπαταριών υπό διαφορετικές συνθήκες από ένα άλλο θα οδηγήσει επίσης σε μείωση της συνολικής χωρητικότητας και αύξηση της πιθανότητας αστοχίας της μπαταρίας. Οι συσσωρευτές μπορεί να

λειτουργούν υπό διαφορετικά καθεστάτα είτε λόγω θερμοκρασιακών διακυμάνσεων είτε λόγω βλάβης ενός συσσωρευτή σε μια συστοιχία συσσωρευτών που οδηγεί σε άνιση φόρτιση και εκφόρτιση στη συστοιχία.

- **Εγκατάσταση**

Η εγκατάσταση των μπαταριών πρέπει να γίνεται σύμφωνα με το σχετικό πρότυπο της χώρας στην οποία εγκαθίστανται.

Μεταξύ άλλων παραγόντων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εγκατάσταση ενός συστήματος μπαταριών είναι ο εξαερισμός που απαιτείται για έναν συγκεκριμένο τύπο συστοιχίας μπαταριών, οι συνθήκες γείωσης στις οποίες πρόκειται να τοποθετηθεί η συστοιχία μπαταριών και οι διατάξεις που λαμβάνονται για την ασφάλεια των ατόμων που ενδέχεται να έχουν πρόσβαση στην συστοιχία μπαταριών. Επιπλέον, κατά την εγκατάσταση της συστοιχίας πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε η θερμοκρασία της μπαταρίας να εμπίπτει στις επιτρεπόμενες συνθήκες λειτουργίας της και η θερμοκρασία των επιμέρους μπαταριών σε μια μεγαλύτερη συστοιχία να είναι κοινή. Οι μπαταρίες σε πολύ ψυχρές συνθήκες υπόκεινται σε πάγωμα σε χαμηλές καταστάσεις φόρτισης, με αποτέλεσμα η μπαταρία να είναι πιο πιθανό να βρίσκεται σε χαμηλή κατάσταση φόρτισης το χειμώνα. Για να αποφευχθεί αυτό, η συστοιχία μπαταριών μπορεί να θαφτεί υπόγεια. Οι μπαταρίες που εκτίθενται τακτικά σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας μπορεί επίσης να υποστούν μειωμένη διάρκεια ζωής.

- **Ασφάλεια**

Οι μπαταρίες είναι δυνητικά επικίνδυνες και οι χρήστες πρέπει να γνωρίζουν τρεις βασικούς κινδύνους:

1. Το θειικό οξύ στον ηλεκτρολύτη είναι διαβρωτικό. Ο προστατευτικός ρουχισμός εκτός από την προστασία των ποδιών και των ματιών είναι απαραίτητος όταν γίνονται εργασίες με μπαταρίες.
2. Οι μπαταρίες έχουν ικανότητα παραγωγής υψηλού ρεύματος. Εάν ένα μεταλλικό αντικείμενο τοποθετηθεί κατά λάθος στους ακροδέκτες μιας μπαταρίας, υψηλά ρεύματα μπορούν να διαρρεύσουν μέσω αυτού του αντικειμένου. Η παρουσία περιττών μεταλλικών αντικειμένων (π.χ. κοσμήματα) θα πρέπει να ελαχιστοποιείται σε εργασίες με μπαταρίες και τα εργαλεία θα πρέπει να έχουν μονωμένες λαβές.
3. Κίνδυνοι έκρηξης λόγω ανάπτυξης αερίου υδρογόνου και οξυγόνου. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, ιδιαίτερα της υπερφόρτισης, ορισμένες μπαταρίες, συμπεριλαμβανομένων των περισσότερων μπαταριών που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα, ενδέχεται να αναπτύξουν ένα δυνητικά εκρηκτικό μείγμα αερίου υδρογόνου και οξυγόνου. Για να μειωθεί ο κίνδυνος έκρηξης, χρησιμοποιείται εξαερισμός για την αποτροπή της συσσώρευσης αυτών των αερίων και εξαλείφονται οι πιθανές πηγές ανάφλεξης (δηλ. κυκλώματα που μπορεί να δημιουργήσουν σπινθήρες ή τόξα) από το περίβλημα της μπαταρίας.

- **Συντήρηση**

Οι μπαταρίες εισάγουν ένα στοιχείο περιοδικής συντήρησης σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Όλες οι μπαταρίες, συμπεριλαμβανομένων των μπαταριών "χωρίς συντήρηση"(maintenance free), απαιτούν ένα πρόγραμμα συντήρησης το οποίο πρέπει να εξασφαλίζει ότι:

- οι ακροδέκτες της μπαταρίας δεν είναι διαβρωμένοι
- οι συνδέσεις της μπαταρίας είναι σφιχτές
- το περίβλημα της μπαταρίας δεν πρέπει να έχει ρωγμές και διάβρωση.

Οι μπαταρίες ανοικτού τύπου απαιτούν επιπλέον και πιο συχνή συντήρηση. Για τις μπαταρίες αυτές, το επίπεδο του ηλεκτρολύτη και το ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη για κάθε μπαταρία πρέπει να ελέγχονται τακτικά. Ο έλεγχος του ειδικού βάρους με τη χρήση υδρομέτρου πρέπει να πραγματοποιείται τουλάχιστον 15 λεπτά μετά από μια εξισορρόπηση ή μια φόρτιση ενίσχυσης. Στις μπαταρίες πρέπει να προστίθεται μόνο αποσταγμένο νερό. Το νερό της βρύσης περιέχει ανόργανα άλατα που μπορεί να βλάψουν τα ηλεκτρόδια της μπαταρίας.

- **Απόρριψη και ανακύκλωση μπαταριών**

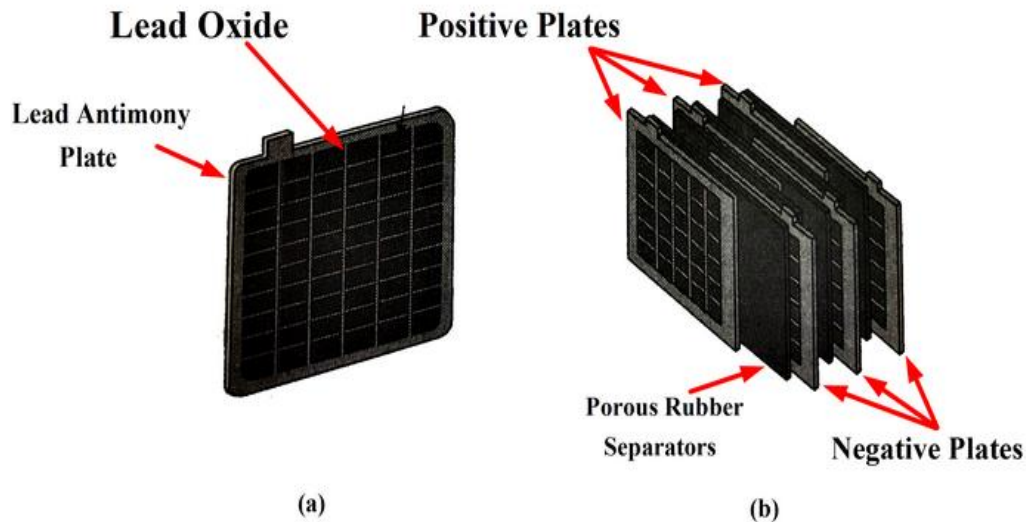
Ο μόλυβδος σε μια μπαταρία μολύβδου οξέος αποτελεί περιβαλλοντικό κίνδυνο εάν δεν διατεθεί σωστά. Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος πρέπει να ανακυκλώνονται έτσι ώστε ο μόλυβδος να μπορεί να ανακτηθεί χωρίς να προκληθεί περιβαλλοντική ζημία.

- **Υλικά και διαμόρφωση ηλεκτροδίων**

Τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένα τα ηλεκτρόδια επηρεάζουν σημαντικά τη χημεία της μπαταρίας και, ως εκ τούτου, επηρεάζουν την τάση της μπαταρίας και τα χαρακτηριστικά φόρτισης και εκφόρτισης. Η γεωμετρία του ηλεκτροδίου καθορίζει την εσωτερική αντίσταση σειράς και τον ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης.

- **Υλικό πλακών**

Τα βασικά υλικά ανόδου και καθόδου σε μια μπαταρία μολύβδου οξέος είναι ο μόλυβδος και το διοξείδιο του μολύβδου (PbO₂). Το ηλεκτρόδιο μολύβδου έχει τη μορφή πορώδους υλικού. Ο πορώδης μόλυβδος είναι επιθυμητός, καθώς λόγω της μορφής του, η επιφάνεια μεταξύ του μολύβδου και του ηλεκτρολύτη θειϊκού οξέος είναι πολύ μεγάλη. Η προσθήκη μικρών ποσοτήτων άλλων στοιχείων στο ηλεκτρόδιο μολύβδου για τη δημιουργία κραμάτων μολύβδου μπορεί να μειώσει αρκετά από τα μειονεκτήματα που σχετίζονται με το μόλυβδο. Οι κύριοι τύποι ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται είναι μόλυβδος-αντιμόνιο (με χρήση αρκετών ποσοστών αντιμονίου), κράματα μολύβδου-ασβεστίου και κράματα μολύβδου-αντιμονίου-ασβεστίου.



Εικόνα 18. Διάταξη πλακών μπαταρίας μολύβδου-οξέος. (Πηγή:

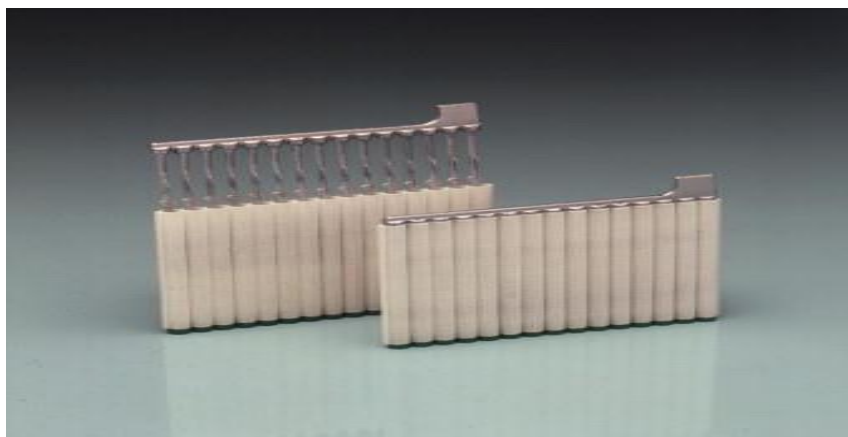
<https://electricalacademia.com/batteries/lead-acid-battery-construction-working-charging/>)

Οι μπαταρίες από κράματα μολύβδου-αντιμονίου έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα ηλεκτρόδια καθαρού μολύβδου. Τα πλεονεκτήματα αυτά περιλαμβάνουν:

- το χαμηλότερο κόστος του μολύβδου-αντιμονίου,
- την αυξημένη αντοχή του ηλεκτροδίου μολύβδου-αντιμονίου
- και την ικανότητα βαθιάς εκφόρτισης για μικρό χρονικό διάστημα.

Ωστόσο, τα κράματα μολύβδου-αντιμονίου είναι επιρρεπή σε θείωση και δεν πρέπει να παραμένουν σε χαμηλές καταστάσεις φόρτισης για παρατεταμένες χρονικές περιόδους. Επιπλέον, τα κράματα μολύβδου-αντιμονίου αυξάνουν την αεριοποίηση (**gassing**) της μπαταρίας κατά τη φόρτιση, οδηγώντας σε υψηλά επίπεδα απώλειας νερού. Δεδομένου ότι το νερό πρέπει να προστεθεί σε αυτές τις μπαταρίες, έχουν περισσότερη συντήρηση. Επιπλέον, οι μπαταρίες μολύβδου-αντιμονίου έχουν υψηλό ρυθμό εκφόρτισης και μικρή διάρκεια ζωής. Τα προβλήματα αυτά προκαλούνται από τη διάλυση του αντιμονίου από το ένα ηλεκτρόδιο και την εναπόθεση ή επιμετάλλωση του στο άλλο ηλεκτρόδιο.

Οι μπαταρίες μολύβδου-ασβεστίου είναι μια τεχνολογία ενδιάμεσου κόστους. Όπως το αντιμόνιο, έτσι και το ασβέστιο προσθέτει αντοχή στον μολύβδο του αρνητικού ηλεκτροδίου, αλλά σε αντίθεση με το αντιμόνιο, η προσθήκη ασβεστίου μειώνει την αεριοποίηση (**gassing**) της μπαταρίας και παράγει επίσης χαμηλότερο ρυθμό αυτοεκφόρτισης. Ωστόσο, οι μπαταρίες ασβεστίου-μολύβδου δεν πρέπει να εκφορτίζονται βαθιά. Κατά συνέπεια, αυτοί οι τύποι μπαταριών μπορεί να θεωρούνται "χωρίς συντήρηση" (**maintenance-free**), αλλά είναι μόνο μπαταρίες ρηχού κύκλου.

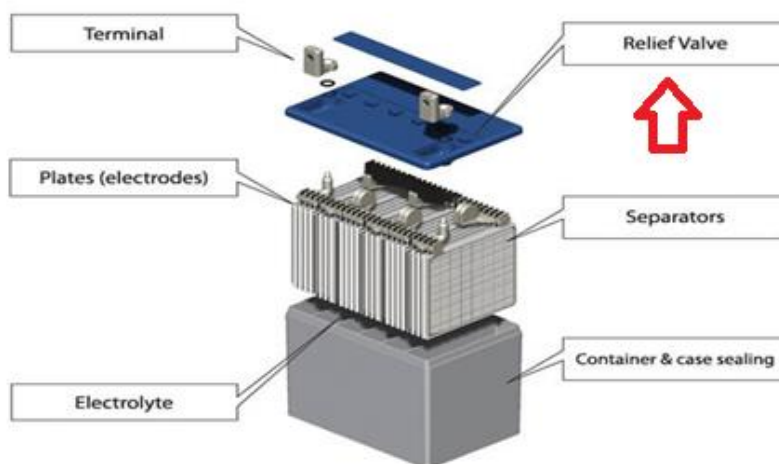


Εικόνα 19. Πλάκες κράματος ασβεστίου. (Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/antimony-alloys>)

Η προσθήκη αντιμονίου καθώς και ασβεστίου στα ηλεκτρόδια παρέχει ορισμένα από τα πλεονεκτήματα, αλλά με αυξημένο κόστος. Οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης μπορούν επίσης να έχουν υψηλή διάρκεια ζωής. Επιπλέον, στα ηλεκτρόδια μπορούν να προστεθούν ίχνη άλλων υλικών για να αυξηθεί η απόδοση της μπαταρίας.

- **Περίβλημα μπαταρίας**

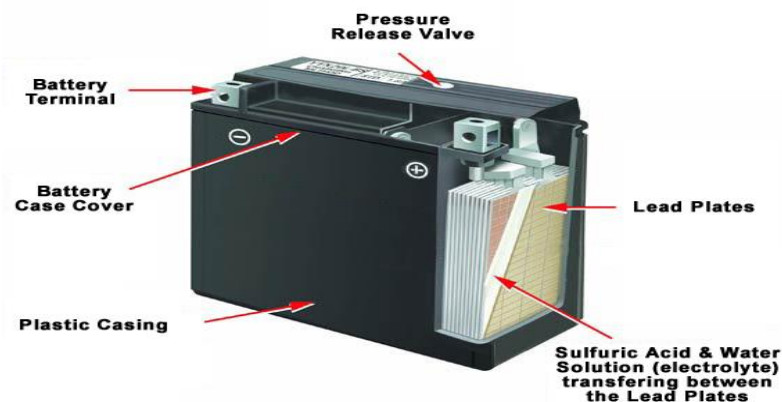
Σε μια μπαταρία ανοικτού τύπου, κάθε αέριο που παράγεται μπορεί να διαφύγει στην ατμόσφαιρα, προκαλώντας προβλήματα ασφάλειας και συντήρησης. Μια σφραγισμένη μπαταρία μολύβδου οξέος (SLA), μια μπαταρία μολύβδου οξέος με ρύθμιση βαλβίδας (VRLA) ή μια μπαταρία μολύβδου οξέος ανασυνδυασμού αποτρέπει την απώλεια νερού από τον ηλεκτρολύτη εμποδίζοντας ή ελαχιστοποιώντας τη διαφυγή αερίου υδρογόνου από τη μπαταρία.



Εικόνα 20. Μπαταρία μολύβδου οξέος (SLA). (Πηγή: <https://www.power-sonic.com/blog/a-guide-to-sealed-lead-acid-battery-construction/>)

Σε μια σφραγισμένη μπαταρία μολύβδου οξέος (SLA), το υδρογόνο δεν διαφεύγει στην ατμόσφαιρα αλλά μετακινείται στο άλλο ηλεκτρόδιο όπου ανασυνδυάζεται (ενδεχομένως υποβοηθούμενο από μια καταλυτική διαδικασία μετατροπής) για να σχηματίσει νερό. Αντί να είναι πλήρως σφραγισμένες, οι μπαταρίες αυτές περιλαμβάνουν έναν εξαερισμό πίεσης (vent) για να αποτρέπεται η συσσώρευση υπερβολικής πίεσης στη μπαταρία. Οι σφραγισμένες μπαταρίες απαιτούν αυστηρούς ελέγχους φόρτισης για να αποτραπεί η συσσώρευση υδρογόνου ταχύτερα από ό,τι μπορεί να ανασυνδυαστεί, αλλά απαιτούν λιγότερη συντήρηση από τις ανοικτές μπαταρίες.

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος με ρύθμιση βαλβίδων (VRLA) είναι παρόμοιες στην έννοια με τις σφραγισμένες μπαταρίες μολύβδου οξέος (SLA), εκτός από το ότι οι βαλβίδες αναμένεται να απελευθερώνουν λίγο υδρογόνο κοντά στην πλήρη φόρτιση. Οι μπαταρίες SLA ή VRLA διαθέτουν συνήθως πρόσθετα χαρακτηριστικά σχεδιασμού, όπως η χρήση ηλεκτρολυτών πηκτής (gelled) και η χρήση πλακών ασβεστίου μολύβδου για να διατηρείται στο ελάχιστο η ανάπτυξη αερίου υδρογόνου.



Εικόνα 21. Μπαταρία μολύβδου οξέος τύπου (VRLA). (Πηγή:

<https://bgsctechclub.wordpress.com/the-magic-of-steam-unit-one/energy-battery-cutaway/>)

- **Τύποι μπαταριών μολύβδου οξέος**

Παρά το εύρος των τύπων και των εφαρμογών των μπαταριών, τα χαρακτηριστικά που είναι ιδιαίτερα σημαντικά στις εφαρμογές φωτοβολταϊκών είναι οι απαιτήσεις συντήρησης της μπαταρίας και η ικανότητα βαθιάς φόρτισης μιας μπαταρίας με παράλληλη διατήρηση μεγάλης διάρκειας ζωής. Για την προώθηση της μεγάλης διάρκειας ζωής με βαθιά εκφόρτιση, οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης μπορεί να είναι είτε ανοικτού τύπου, με περίσσεια ηλεκτρολυτικού διαλύματος και παχιές πλάκες, είτε ακινητοποιημένου ηλεκτρολυτικού τύπου. Οι σφραγισμένες μπαταρίες πηκτής (sealed gelled) μπορούν να χαρακτηριστούν ως μπαταρίες βαθέως κύκλου, αλλά συνήθως αντέχουν λιγότερους κύκλους και χαμηλότερες εκφορτίσεις από τις ειδικά σχεδιασμένες μπαταρίες flooded πλακών ή AGM (Absorbent Glass Mat). Οι μπαταρίες χαμηλού κύκλου χρησιμοποιούν συνήθως λεπτότερες πλάκες από κράματα ασβεστίου-μολύβδου και δεν έχουν συνήθως βάθος εκφόρτισης πάνω από 25%.

Μπαταρίες για φωτοβολταϊκά ή τροφοδοτικά απομακρυσμένων περιοχών (RAPS)

Οι αυστηρές απαιτήσεις για τις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν ωθήσει αρκετούς κατασκευαστές να κατασκευάσουν μπαταρίες ειδικά σχεδιασμένες για φωτοβολταϊκά ή άλλα απομακρυσμένα συστήματα ενέργειας. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται συχνότερα σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι, είτε τύπου μολύβδου οξέος βαθέως κύκλου είτε μπαταρίες χωρίς συντήρηση μικρότερου κύκλου. Οι μπαταρίες βαθέως κύκλου μπορεί να είναι ανοικτού τύπου (flooded) μπαταρίες (οι οποίες δεν είναι απαλλαγμένες από συντήρηση) ή μπαταρίες AGM με ηλεκτρολύτη, οι οποίες είναι απαλλαγμένες από συντήρηση, αλλά απαιτούν προσοχή στην επιλογή του ρυθμιστή φόρτισης. Ειδικές μπαταρίες ρηχού κύκλου χωρίς συντήρηση που αντέχουν σε σπάνιες εκφορτίσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών και, υπό την προϋπόθεση ότι η συστοιχία μπαταριών είναι κατάλληλα σχεδιασμένη, δεν απαιτούν ποτέ DOD άνω του 25%. Μια μπαταρία μεγάλης διάρκειας ζωής σε ένα κατάλληλα σχεδιασμένο φωτοβολταϊκό σύστημα με σωστή συντήρηση μπορεί να διαρκέσει έως και 15 χρόνια, αλλά η χρήση μπαταριών που δεν έχουν σχεδιαστεί για μεγάλη διάρκεια ζωής ή για τις συνθήκες σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ή αποτελούν μέρος ενός κακού σχεδιασμού του συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε μια συστοιχία μπαταριών που αστοχεί μετά από λίγα μόνο χρόνια.

Άλλοι τύποι μπαταριών ειδικού σκοπού.

❖ Μπαταρίες εκκίνησης, φωτισμού ανάφλεξης (SLI).

Αυτές οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αυτοκινήτων και έχουν υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης και φόρτισης. Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούν πλάκες ηλεκτροδίων ενισχυμένες είτε με μολύβδο αντιμονίου σε flooded διαμόρφωση, είτε με μολύβδο-ασβεστίου σε σφραγισμένη διαμόρφωση. Αυτές οι μπαταρίες έχουν καλή διάρκεια ζωής σε συνθήκες ρηχής ανακύκλωσης, αλλά πολύ χαμηλή διάρκεια ζωής σε βαθιά ανακύκλωση. Οι μπαταρίες SLI δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, καθώς τα χαρακτηριστικά τους δεν είναι βελτιστοποιημένα για χρήση σε ένα σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, επειδή η διάρκεια ζωής σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι τόσο χαμηλή.

❖ Μπαταρίες έλξης ή κίνησης.

Οι μπαταρίες έλξης ή κίνησης χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρά οχήματα μεταφοράς, όπως ηλεκτρικά περνοφόρα (κλάρκ) ή αμαξίδια του γκολφ. Σε σύγκριση με τις μπαταρίες SLI, έχουν σχεδιαστεί ώστε να έχουν μεγαλύτερη ικανότητα βαθέων κύκλων, διατηρώντας παράλληλα μεγάλη διάρκεια ζωής. Παρόλο που αυτό το χαρακτηριστικό τις καθιστά πιο κατάλληλες για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα από ό,τι ένα σύστημα που χρησιμοποιεί μπαταρίες SLI, οι μπαταρίες κίνησης δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης τους είναι πολύ υψηλός λόγω της χρήσης ηλεκτροδίων αντιμονίου-μολύβδου. Ο υψηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης θα προκαλέσει ουσιαστικά υψηλές απώλειες ισχύος από τη μπαταρία και θα καταστήσει το συνολικό Φ/Β σύστημα μη αποδοτικό, εκτός εάν οι μπαταρίες παρουσιάζουν μεγάλη DOD σε καθημερινή βάση. Ως εκ τούτου, οι μπαταρίες αυτές δεν είναι κατάλληλες για φωτοβολταϊκά συστήματα.

❖ **Μπαταρίες για τροχόσπιτα ή θαλάσσια σκάφη.**

Αυτές οι μπαταρίες είναι συνήθως ένας συμβιβασμός μεταξύ των μπαταριών SLI, των μπαταριών έλξης και των πραγματικών μπαταριών βαθέων κύκλων. Αν και δεν συνιστώνται, τόσο οι μπαταρίες κίνησης όσο και οι μπαταρίες σκαφών χρησιμοποιούνται σε ορισμένα μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα. Η διάρκεια ζωής αυτών των μπαταριών περιορίζεται σε λίγα χρόνια στην καλύτερη περίπτωση, οπότε σημαίνει ότι αυτές οι μπαταρίες δεν αποτελούν συνήθως μακροπρόθεσμα οικονομικά αποδοτική επιλογή.

❖ **Μπαταρίες σταθερών εφαρμογών.**

Οι μπαταρίες σταθερών εφαρμογών χρησιμοποιούνται συχνά για εφαρμογές παροχής ενέργειας έκτακτης ανάγκης ή αδιάλειπτης παροχής ενέργειας. Πρόκειται για μπαταρίες ρηχού κύκλου (shallow-cycle) που προορίζονται να παραμένουν σχεδόν πλήρως φορτισμένες για το μεγαλύτερο μέρος της διάρκειας ζωής τους με μόνο περιστασιακές βαθιές εκφορτίσεις. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε φωτοβολταϊκά συστήματα, εάν η συστοιχία μπαταριών έχει διαστασιολογηθεί έτσι ώστε να μην πέφτει ποτέ κάτω από ένα DOD μεταξύ 10% και 25%.

❖ **Μπαταρίες βαθέως κύκλου.**

Οι μπαταρίες αυτές πρέπει να είναι σε θέση να διατηρούν διάρκεια ζωής αρκετών χιλιάδων κύκλων υπό υψηλό DOD (80% ή περισσότερο). Μπορεί να παρατηρηθούν μεγάλες διαφορές στην απόδοση κύκλων με δύο τύπους μπαταριών βαθέως κύκλου και, επομένως, πρέπει να συγκρίνονται η διάρκεια ζωής κύκλων και το DOD διαφόρων deep cycle μπαταριών.

• **Πιθανά προβλήματα μπαταριών μολύβδου οξέος**

Μια μπαταρία οξέος μολύβδου αποτελείται από ηλεκτρόδια οξειδίου του μολύβδου και μολύβδου βυθισμένα σε διάλυμα ασθενούς θειικού οξέος. Τα πιθανά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι μπαταρίες μολύβδου οξέος περιλαμβάνουν:

Αέρια:

Ανάπτυξη αερίου υδρογόνου και οξυγόνου. Η αεριοποίηση της μπαταρίας οδηγεί σε προβλήματα ασφάλειας και σε απώλεια νερού από τον ηλεκτρολύτη. Η απώλεια νερού αυξάνει τις απαιτήσεις συντήρησης της μπαταρίας, καθώς το νερό πρέπει να ελέγχεται και να αντικαθίσταται περιοδικά.

Βλάβη στα ηλεκτρόδια.

Ο μολύβδος στο αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι μαλακός και καταστρέφεται εύκολα, ιδίως σε εφαρμογές στις οποίες η μπαταρία μπορεί να υφίσταται συνεχή ή έντονη κίνηση.

Στρωματοποίηση του ηλεκτρολύτη.

Το θειικό οξύ είναι ένα βαρύ, ιξώδες υγρό. Καθώς η μπαταρία εκφορτίζεται, η συγκέντρωση του θειικού οξέος στον ηλεκτρολύτη μειώνεται, ενώ κατά τη φόρτιση η συγκέντρωση του θειικού οξέος

αυξάνεται. Αυτή η κυκλική μεταβολή της συγκέντρωσης του θειικού οξέος μπορεί να οδηγήσει σε στρωματοποίηση του ηλεκτρολύτη, όπου το βαρύτερο θειικό οξύ παραμένει στον πυθμένα της μπαταρίας, ενώ το λιγότερο συμπυκνωμένο διάλυμα, το νερό, παραμένει κοντά στην κορυφή. Η στενή γειτνίαση των πλακών ηλεκτροδίων μέσα στη μπαταρία σημαίνει ότι η φυσική ανακίνηση δεν αναμιγνύει το θειικό οξύ και το νερό. Ωστόσο, η ελεγχόμενη αεριοποίηση του ηλεκτρολύτη ενθαρρύνει την ανάμιξη του νερού και του θειικού οξέος, αλλά πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά για να αποφευχθούν προβλήματα ασφάλειας και απώλειας νερού. Η περιοδική αλλά σπάνια αεριοποίηση της μπαταρίας για την πρόληψη ή την αντιστροφή της στρωματοποίησης του ηλεκτρολύτη απαιτείται στις περισσότερες μπαταρίες μολύβδου οξέος σε μια διαδικασία που αναφέρεται ως φόρτιση εξισορρόπησης "boost".

Θείωση της μπαταρίας.

Σε χαμηλές καταστάσεις φόρτισης, μπορεί να αναπτυχθούν μεγάλοι κρύσταλλοι θειικού μολύβδου στο ηλεκτρόδιο μολύβδου σε αντίθεση με το λεπτόκοκκο υλικό που συνήθως παράγεται στα ηλεκτρόδια. Ο θειικός μολύβδος είναι μονωτικό υλικό.

Διαρροή του θειικού οξέος.

Εάν το θειικό οξύ διαρρεύσει από το περίβλημα της μπαταρίας αποτελεί σοβαρό κίνδυνο για την ασφάλεια. Η ζελατινοποίηση ή η ακινητοποίηση του υγρού θειικού οξέος μειώνει την πιθανότητα διαρροής θειικού οξέος.

Πάγωμα της μπαταρίας σε χαμηλά επίπεδα εκφόρτισης.

Εάν η μπαταρία βρίσκεται σε χαμηλό επίπεδο εκφόρτισης μετά τη μετατροπή ολόκληρου του ηλεκτρολύτη σε νερό, τότε πέφτει και το σημείο πήξης του ηλεκτρολύτη.

Διάβρωση

Η διάβρωση αποτελείται από ένα σύνολο περιοχών αναγωγής/οξειδωσης στις οποίες και οι δύο αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στο ίδιο ηλεκτρόδιο. Για ένα σύστημα μπαταρίας, η διάβρωση οδηγεί σε διάφορες επιζήμιες επιπτώσεις. Ένα αποτέλεσμα είναι ότι μετατρέπει ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο σε μεταλλικό οξείδιο

Απώλεια ενεργού υλικού από τα ηλεκτρόδια.

Η απώλεια ενεργού υλικού από τα ηλεκτρόδια μπορεί να συμβεί μέσω διαφόρων διεργασιών. Μια διαδικασία που μπορεί να προκαλέσει μόνιμη απώλεια χωρητικότητας. Επιπλέον, οι ακατάλληλες συνθήκες φόρτισης και η αεριοποίηση μπορούν να προκαλέσουν αποκόλληση ενεργού υλικού από τα ηλεκτρόδια, οδηγώντας σε μόνιμη απώλεια χωρητικότητας.

Ανάλογα με το ποιο από τα παραπάνω προβλήματα απασχολεί περισσότερο μια συγκεκριμένη εφαρμογή, οι κατάλληλες τροποποιήσεις στη βασική διαμόρφωση της μπαταρίας βελτιώνουν την απόδοσή της. Για εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα παραπάνω προβλήματα επηρεάζουν

το βάθος εκφόρτισης, τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και τις απαιτήσεις συντήρησης. Οι αλλαγές στη μπαταρία συνήθως περιλαμβάνουν τροποποίηση σε έναν από τους τρεις βασικούς τομείς:

- αλλαγές στη σύνθεση και τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου
- αλλαγές στο διάλυμα ηλεκτρολύτη
- τροποποιήσεις στο περίβλημα ή στους ακροδέκτες της μπαταρίας για την αποτροπή ή τη μείωση της διαφυγής του παραγόμενου αερίου υδρογόνου.

• Αυτοεκφόρτιση

Όλες οι χημικές αντιδράσεις εξελίσσονται τόσο προς τη μία πλευρά όσο και προς την άλλη. Για να προχωρήσει η αντίστροφη αντίδραση, τα αντιδρώντα πρέπει να αποκτήσουν αρκετή ενέργεια για να υπερνικήσουν την ηλεκτροχημική διαφορά μεταξύ των αντιδρώντων και των προϊόντων, καθώς και την υπέρταση. Συνήθως στα συστήματα μπαταριών, η πιθανότητα να συμβεί η αντίστροφη αντίδραση είναι μικρή, καθώς υπάρχουν λίγα μόρια με αρκετά μεγάλη ενέργεια. Αν και μικρά, ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα μόρια που έχουν επαρκή ενέργεια. Σε μια φορτισμένη μπαταρία, υπάρχει μια διαδικασία με την οποία η μπαταρία μπορεί να εκφορτιστεί ακόμη και όταν δεν υπάρχει φορτίο συνδεδεμένο στη μπαταρία. Η ποσότητα που εκφορτίζεται μια μπαταρία κατά την παραμονή της είναι γνωστή ως αυτοεκφόρτιση. Η αυτοεκφόρτιση αυξάνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, επειδή μεγαλύτερο μέρος των προϊόντων θα έχει αρκετή ενέργεια ώστε η αντίδραση να προχωρήσει προς την αντίστροφη κατεύθυνση. Ένα ιδανικό σύνολο χημικών αντιδράσεων για μια μπαταρία θα ήταν αυτό στο οποίο υπάρχει ένα μεγάλο χημικό δυναμικό που απελευθερώνει μεγάλο αριθμό ηλεκτρονίων, έχει χαμηλή υπέρταση, προχωρά αυθόρμητα προς μία μόνο κατεύθυνση και είναι η μόνη χημική αντίδραση που μπορεί να συμβεί. Ωστόσο, στην πράξη, υπάρχουν διάφορα φαινόμενα που υποβαθμίζουν την απόδοση της μπαταρίας, λόγω ανεπιθύμητων χημικών αντιδράσεων, λόγω φαινομένων όπως η αλλαγή φάσης του όγκου των αντιδρώντων ή των προϊόντων και επίσης λόγω της φυσικής κίνησης των αντιδρώντων και των προϊόντων εντός της μπαταρίας.

• Αλλαγή της μορφής των υλικών

Κατά την πραγματοποίηση χημικών αντιδράσεων, πολλά υλικά υφίστανται αλλαγή φάσης ή, αν παραμείνουν στην ίδια φάση, ο όγκος και η πυκνότητα του υλικού μπορεί να μεταβληθούν από τη χημική αντίδραση. Τέλος, τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη μπαταρία, κυρίως η άνοδος και η κάθοδος, ενδέχεται να αλλάξουν την κρυσταλλικότητα ή την επιφανειακή τους δομή, γεγονός που με τη σειρά του θα επηρεάσει τις αντιδράσεις στη μπαταρία. Πολλά συστατικά στις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής (redox) υφίστανται αλλαγή φάσης είτε κατά την οξείδωση είτε κατά την αναγωγή. Για παράδειγμα, στην μπαταρία μολύβδου, τα θεϊκά ιόντα αλλάζουν από στερεά (ως θεϊκός μολύβδος) σε διαλύματα (ως θεϊκό οξύ). Εάν ο θεϊκός μολύβδος ανακρυσταλλωθεί οπουδήποτε αλλού εκτός από την άνοδο ή την κάθοδο, τότε το υλικό αυτό χάνεται από το σύστημα της μπαταρίας. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, μόνο τα υλικά που συνδέονται με την άνοδο και την κάθοδο μπορούν να συμμετέχουν στην ανταλλαγή ηλεκτρονίων και, επομένως, εάν το υλικό δεν αγγίζει την άνοδο ή την κάθοδο, τότε δεν μπορεί πλέον να επαναφορτιστεί.

Ο σχηματισμός αέριας φάσης σε μια μπαταρία παρουσιάζει επίσης ιδιαίτερα προβλήματα. Πρώτα απ' όλα, η αέρια φάση θα έχει συνήθως μεγαλύτερο όγκο από τα αρχικά αντιδρώντα, προκαλώντας έτσι αλλαγή της πίεσης στη μπαταρία. Δεύτερον, εάν τα προβλεπόμενα προϊόντα βρίσκονται στην

αέρια μεταβολή, πρέπει να περιοριστούν στην άνοδο και την κάθοδο, αλλιώς δεν θα μπορούν να φορτιστούν. Η αλλαγή του όγκου είναι επίσης συνήθως επιζήμια για τη λειτουργία της μπαταρίας.

- **Τροποποιήσεις στον ηλεκτρολύτη**

Μια τυπική μπαταρία μολύβδου ανοικτού τύπου έχει τα ηλεκτρόδια βυθισμένα σε υγρό θειϊκό οξύ. Χρησιμοποιούνται διάφορες τροποποιήσεις στον ηλεκτρολύτη για να βελτιωθεί η απόδοση της μπαταρίας. Οι βασικές παράμετροι του ηλεκτρολύτη που ελέγχουν την απόδοση της μπαταρίας είναι ο όγκος και η συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη και ο σχηματισμός ενός "παγιδευμένου" ηλεκτρολύτη.

- **Όγκος και συγκέντρωση ηλεκτρολυτών**

Οι αλλαγές στον όγκο του ηλεκτρολύτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας μιας μπαταρίας. Η αύξηση του όγκου ενός ηλεκτρολύτη καθιστά τη μπαταρία λιγότερο ευαίσθητη στις απώλειες νερού και, ως εκ τούτου, καθιστά την τακτική συντήρηση λιγότερο κρίσιμη. Η αύξηση του όγκου της μπαταρίας θα αυξήσει επίσης το βάρος της και θα μειώσει την ενεργειακή πυκνότητα της μπαταρίας.

- **Μπαταρίες μολύβδου οξέος με δεσμευμένο ηλεκτρολύτη**

Στις μπαταρίες με δεσμευμένο ηλεκτρολύτη, το θειϊκό οξύ ακινητοποιείται είτε με πηκτοποίηση (gelling) του θειϊκού οξέος είτε με τη χρήση απορροφητικού στρώματος γυαλιού (absorbent glass mat). Αμφότερα έχουν χαμηλότερη αεριοποίηση σε σύγκριση με μια flooded μπαταρία μολύβδου και κατά συνέπεια συναντώνται συχνά σε "χωρίς συντήρηση" (maintenance-free) σφραγισμένες μπαταρίες μολύβδου.

Πηκτοποίηση (gelling).

Σε μια μπαταρία μολύβδου οξέος με πηκτή (gelled), ο ηλεκτρολύτης μπορεί να ακινητοποιηθεί με πηκτοποίηση του θειϊκού οξέος με χρήση πηκτώματος πυριτίου. Ο πηκτοποιημένος ηλεκτρολύτης πλεονεκτεί στο ότι μειώνεται η αεριοποίηση και, κατά συνέπεια, οι μπαταρίες είναι χαμηλής συντήρησης. Επιπλέον, η στρωμάτωση του ηλεκτρολύτη δεν συμβαίνει με τις gelled μπαταρίες και επομένως δεν απαιτείται ενίσχυση της φόρτισης, και επειδή ο ηλεκτρολύτης είναι πηκτοποιημένος, μειώνονται επίσης οι πιθανότητες να χυθεί θειϊκό οξύ.

Ωστόσο, προκειμένου να μειωθεί περαιτέρω η αεριοποίηση, αυτές οι μπαταρίες "gel-cell" χρησιμοποιούν επίσης συνήθως πλάκες ασβεστίου μολύβδου, γεγονός που τις καθιστά ακατάλληλες για εφαρμογές βαθιάς εκφόρτισης. Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι ότι οι συνθήκες φόρτισης μιας gelled μπαταρίας μολύβδου οξέος, πρέπει να ελέγχονται πιο προσεκτικά για να αποφευχθεί η υπερφόρτιση και η βλάβη της μπαταρίας.

Απορροφητικό γυάλινο στρώμα.

Μια δεύτερη τεχνολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακινητοποίηση του θειϊκού οξέος είναι οι μπαταρίες απορροφητικού στρώματος γυαλιού ή AGM. Σε μια μπαταρία AGM, το θειϊκό οξύ απορροφάται σε ένα υαλοβάμβακα που τοποθετείται μεταξύ των πλακών των ηλεκτροδίων. Οι μπαταρίες AGM έχουν πολυάριθμα πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας βαθιάς εκφόρτισης χωρίς να επηρεάζεται η διάρκεια ζωής, επιτρέποντας υψηλούς ρυθμούς φόρτισης/εκφόρτισης και ένα εκτεταμένο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας. Το βασικό μειονέκτημα αυτών των μπαταριών είναι η ανάγκη για πιο προσεκτικές ελεγχόμενες φορτίσεις και το υψηλότερο αρχικό τους κόστος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ηλεκτρικά μοντέλα μπαταριών [4.1]

Η διάρκεια ζωής κάθε μπαταρίας εξαρτάται από τις φυσικές της ιδιότητες. Η γήρανση της μπαταρίας κυψελών είναι επίσης μη γραμμική. Η διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας δεν μπορεί να παραταθεί με την ελαχιστοποίηση της ισχύος κατανάλωσης σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Αντίθετα, εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο καταναλώνεται η ισχύς, καθώς και από τα μοτίβα εξαγωγής ρεύματος και τα επίπεδα ρεύματος. Επιπλέον, η συνεχής άντληση υψηλού ρεύματος μειώνει την εναπομένονσα χωρητικότητα.

Τα συστήματα διαχείρισης μπαταριών (BMS) είναι απαραίτητα για να διασφαλιστεί η ασφαλής και αποδοτική λειτουργία των μπαταριών έναντι βλαβών. Η κύρια λειτουργία των συστημάτων διαχείρισης μπαταριών είναι η διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας μιας μπαταρίας, τον έλεγχο της διαδικασίας φόρτισης και εκφόρτισης μιας μπαταρίας, την εξισορρόπηση κυττάρων, την υπερφόρτωση, προστασία από τη θερμοκρασία και την εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης (SOC) με τη μέτρηση της τάσης, ρεύματος και της θερμοκρασίας.

Το BMS παρακολουθεί τις συνθήκες και την κατάσταση της μπαταρίας, όπως την κατάσταση φόρτισης SOC, την κατάσταση υγείας (SOH), το βάθος εκφόρτισης (DOD) και τη θερμοκρασία λειτουργίας. Ως εκ τούτου, η μοντελοποίηση μιας μπαταρίας αποκτά σημαντικό ρόλο στη μελέτη, την εκτίμηση ή την πρόβλεψη της λειτουργίας της μπαταρίας σε πραγματικό χρόνο.

Σημασία της μοντελοποίησης της μπαταρίας

Η μαθηματική μοντελοποίηση μιας μπαταρίας είναι σημαντική για τους ακόλουθους λόγους:

- ❖ **Ανάπτυξη αποδοτικών συστημάτων BMS.**
- ❖ **Αποτελεί κλειδί για τη βελτίωση των τεχνικών φόρτισης/εκφόρτισης και τη βελτίωση της χωρητικότητας της μπαταρίας.**
- ❖ **Ανάγκη αποτύπωσης της επιρροής της κατανάλωσης ισχύος στη μπαταρία.**
- ❖ **Πρόληψη σοβαρών ζημιών στις μπαταρίες από υπερφόρτιση ή υπερβολική εκφόρτιση.**
- ❖ **Αποτελεί γρηγορότερο και ασφαλέστερο τρόπο μελέτης της συμπεριφοράς της μπαταρίας υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.**
- ❖ **Προσδιορισμός των ορίων λειτουργίας που επιτυγχάνουν την καλύτερη διάρκεια ζωής για συγκεκριμένες εφαρμογές.**

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει πολυάριθμα μοντέλα μπαταριών για διάφορους τύπους μπαταριών, όπως ηλεκτροχημικά μοντέλα, μαθηματικά μοντέλα, μοντέλα προσανατολισμένα στο κύκλωμα και συνδυασμός μοντέλων.

Τύποι μοντελοποίησης μπαταριών

Έχει αναπτυχθεί μεγάλη ποικιλία μοντέλων μπαταριών με διαφορετική πολυπλοκότητα τα οποία μπορούν να είναι χρήσιμα σε διάφορους τομείς εφαρμογών. Ανάλογα με το βαθμό φυσικής απεικόνισης, τα μοντέλα μπαταριών μπορούν να διακριθούν σε τρία επίπεδα, δηλαδή, μοντέλο λευκού κουτιού (π.χ. ηλεκτροχημικό μοντέλο), μοντέλο γκρίζου κουτιού (π.χ. μοντέλο προσανατολισμένο στο κύκλωμα) και μοντέλο μαύρου κουτιού.

Ένας σημαντικός παράγοντας στη μοντελοποίηση μιας μπαταρίας είναι η εκτίμηση των παραμέτρων της μπαταρίας. Διάφορες στρατηγικές μοντελοποίησης για εξαγωγή των παραμέτρων της μπαταρίας είναι οι ηλεκτροχημικές, οι μαθηματικές, οι προσανατολισμένες στο κύκλωμα και οι στρατηγικές με γνώμονα τα δεδομένα.

Η μέση διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας προσδιορίζεται από την ικανότητα αποικοδόμησής της από την αρχική της κατάσταση. Ειδικότερα, εάν οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μειώνεται λόγω της επιτάχυνσης και της πέδησης, η οποία απαιτεί δέκα φορές περισσότερη ισχύ από την απαιτούμενη μέση ισχύ. Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα, συνιστάται να μην βελτιωθεί μόνο η απαιτούμενη ειδική ενέργεια, αλλά και να μοντελοποιηθεί μια μπαταρία με τη χρήση βελτιστοποίησης για τη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας. Οι μέσες αποδόσεις των μπαταριών των κυψελών όπως Li-ion και LiFePO₄ είναι 92% και 95%, αντίστοιχα. Το βάθος εκφόρτισης για και για τους δύο τύπους κυψελών είναι 80%. Η μοντελοποίηση κάθε μπαταρίας επηρεάζει την αποδοτικότητα της μπαταρίας σε μεγάλο βαθμό.

4.1 Ηλεκτροχημικά μοντέλα

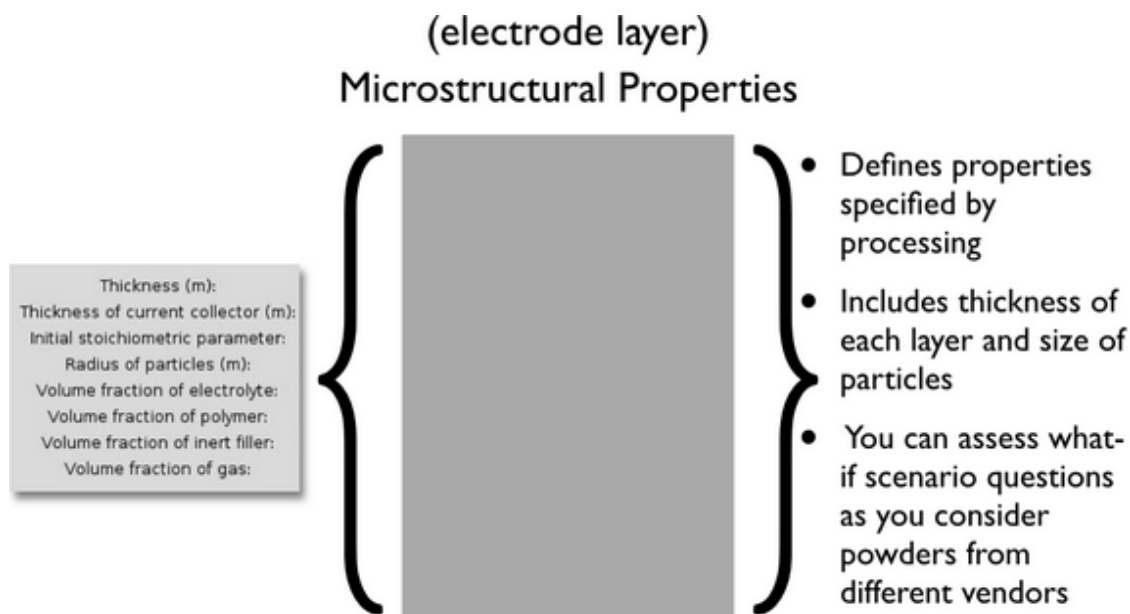
Για την παρακολούθηση του SOC και του SOH της μπαταρίας, πρέπει να λειτουργεί ένα ακριβές, υψηλής πιστότητας μαθηματικό μοντέλο μπαταρίας. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τα μοντέλα μπαταρίας και την ακρίβεια των εκτιμήσεων, όπως η ανισορροπία μεταξύ των κυψελών, η αυτοεκφόρτιση, επιδράσεις γήρανσης, η εξασθένιση χωρητικότητας και επιδράσεις θερμοκρασίας που δεν παρέχονται από τους κατασκευαστές μπαταριών.

Οι παράμετροι του ηλεκτροχημικού μοντέλου μπορούν να μετρηθούν πειραματικά εξετάζοντας τα κύτταρα, αλλά αυτή η προσέγγιση είναι δαπανηρή, χρονοβόρα και συχνά δεν μπορούν να ληφθούν τιμές για όλες τις παραμέτρους.

Αυτά τα μοντέλα προτιμώνται από τα ισοδύναμα κυκλώματα ή από άλλα είδη απλοποιημένων μοντέλων, χάρη στην ικανότητά τους να προβλέπουν τους φυσικούς περιορισμούς των κυψελών, οι οποίοι έχουν σημαντική επίδραση στην εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία.

- **Μοντέλο διπλού πτερυγίου,**

Το μοντέλο Dualfoil είναι ένα ισχυρό μοντέλο μπαταρίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση του συζευγμένου φαινομένου σε ένα σύστημα μπαταρίας πορώδους ηλεκτροδίου (συμπεριλαμβανομένων των μπαταριών Ni-MH και Li-ion. Το πρόγραμμα Dualfoil βασίζεται σε Fortran (γλώσσα προγραμματισμού που αναπτύχθηκε αρχικά από τους Marc Doyle και John Newman το 1992). Το Dualfoil μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση των ηλεκτροχημικών και θερμικών φαινομένων υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας για μπαταρία ιόντων λιθίου και μπορεί να βοηθήσει τους ερευνητές να κατανοήσουν βαθιά την απόδοση των μπαταριών προκειμένου να τις βελτιώσουν.



Εικόνα 21. Dualfoil concept. (Πηγή: nanoHUB.org - Resources: dualfoil.py)

Οι παράμετροι προσομοίωσης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

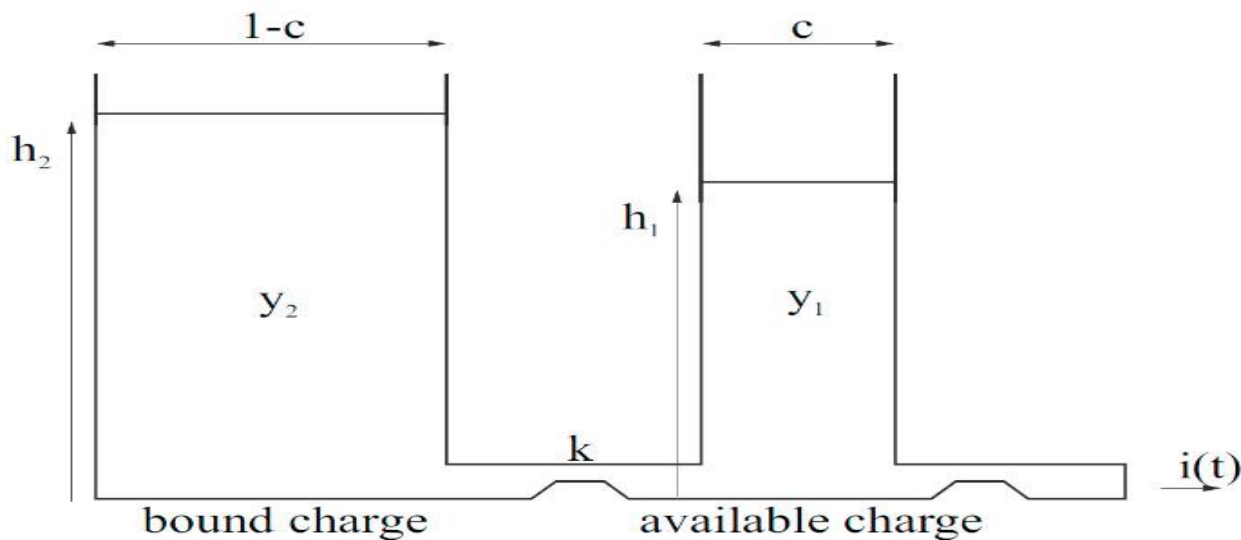
- Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις ρυθμιζόμενες από το σχεδιασμό παραμέτρους, όπως το πάχος και τα μεγέθη όγκου των ηλεκτροδίων, τα μεγέθη των σωματιδίων, το πάχος του διαχωριστή και το αρχικό άλας (συγκέντρωση αλατιού).
- Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις εγγενείς παραμέτρους του υλικού (π.χ. συντελεστής διάχυσης λιθίου, υλικό πυκνότητας και θερμοχωρητικότητα) και ορισμένα θερμοδυναμικά και κινητικά δεδομένα για τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.

4.2 Αναλυτικά μοντέλα

Τα αναλυτικά μοντέλα είναι τα απλουστευμένα ηλεκτροχημικά μοντέλα που περιλαμβάνουν μη γραμμικά φαινόμενα χωρητικότητας και μπορούν να προβλέψουν το χρόνο λειτουργίας των μπαταριών με μειωμένη τάξη εξισώσεων. Αυτό καθιστά αυτόν τον τύπο μοντέλων πολύ ευκολότερο στη χρήση. Τα αναλυτικά μοντέλα περιγράφουν τη μπαταρία σε υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης από τα ηλεκτροχημικά και ηλεκτρικά κυκλώματα. Αυτά τα μοντέλα αποδίδουν καλά για την παρακολούθηση της SOC και την πρόβλεψη του χρόνου λειτουργίας υπό συγκεκριμένα προφίλ εκφόρτισης. Το απλούστερο αναλυτικό μοντέλο ονομάζεται νόμος του Peukert. Αναπαριστά τη μη γραμμική σχέση μεταξύ του χρόνου λειτουργίας της μπαταρίας και του ρυθμού εκφόρτισης, αλλά δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της ανάκτησης. Ένα άλλο αναλυτικό μοντέλο είναι το κινητικό μοντέλο μπαταρίας (KiBaM).

4.3 Μοντέλο κινητικής μπαταρίας

Το μοντέλο κινητικής μπαταρίας αναπτύχθηκε από τους Manwell και McGowan. Το **KiBaM** (*Kinetic Battery Model*) είναι ένα πολύ διαισθητικό μοντέλο μπαταρίας. Ονομάζεται κινητικό επειδή χρησιμοποιεί ως βάση μια χημική κινητική διαδικασία. Αναπτύχθηκε αρχικά για τη μοντελοποίηση χημικών διεργασιών μεγάλων μπαταριών μολύβδου-οξέος.



Εικόνα 22. Μοντέλο δύο φρεατίων του κινητικού μοντέλου μπαταρίας.[17]

Στο μοντέλο αυτό, το φορτίο της μπαταρίας κατανέμεται σε δύο δεξαμενές: τη δεξαμενή διαθέσιμης φόρτισης y_1 και τη δεξαμενή δεσμευμένης φόρτισης y_2 .

Ένα κλάσμα c της συνολικής χωρητικότητας τοποθετείται στη δεξαμενή διαθέσιμης φόρτισης y_1 και ένα κλάσμα $1 - c$ στη δεξαμενή δεσμευμένης φόρτισης y_2 .

Η δεξαμενή διαθέσιμου φορτίου παρέχει ηλεκτρόνια απευθείας στο φορτίο ($i(t)$), ενώ η δεξαμενή δεσμευμένου φορτίου παρέχει ηλεκτρόνια μόνο στη δεξαμενή διαθέσιμου φορτίου. Το φορτίο ρέει από το «φρεάτιο» δεσμευμένου φορτίου προς το διαθέσιμο φορτίου μέσω μιας "βαλβίδας" με σταθερή αγωγιμότητα, k . Μαζί με αυτή την παράμετρο, ο ρυθμός με τον οποίο ρέει το φορτίο μεταξύ των φρεατίων εξαρτάται από τη διαφορά ύψους μεταξύ των δύο φρεατίων. Τα ύψη των δύο φρεατίων δίνονται από:

$$h_1 = y_1/c \text{ \& \ } - h_2 = y_2/(1 - c) \text{ (1)}$$

Η μπαταρία θεωρείται άδεια όταν δεν απομένει φορτίο στη δεξαμενή διαθέσιμης φόρτισης. Όταν εφαρμόζεται φορτίο στην μπαταρία, το διαθέσιμο φορτίο μειώνεται και η διαφορά ύψους μεταξύ των δύο δεξαμενών αυξάνεται. Όταν το φορτίο αποσυνδέεται, τότε αυτό ρέει από τη δεξαμενή δεσμευμένης φόρτισης στη δεξαμενή διαθέσιμης φόρτισης έως ότου τα h_1 και h_2 είναι και πάλι ίσα.

Έτσι, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου αδράνειας, περισσότερο φορτίο γίνεται διαθέσιμο και η μπαταρία διαρκεί περισσότερο, όπως όταν εφαρμόζεται το φορτίο συνεχώς. Με αυτόν τον τρόπο, λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της ανάκτησης. Παρ' όλα αυτά, το φαινόμενο της χωρητικότητας ρυθμού καλύπτεται, αφού για υψηλότερο ρεύμα εκφόρτισης το φορτίο διαθέσιμης φόρτισης

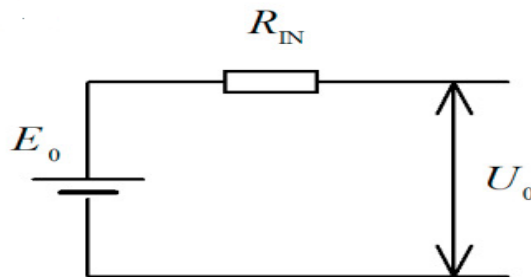
εξαντλείται ταχύτερα, λιγότερος χρόνος θα είναι διαθέσιμος για τον δεσμευμένο φορτίο να ρέει προς το διαθέσιμο φορτίο, επομένως, περισσότερο φορτίο θα παραμείνει αχρησιμοποίητο.

Η εξίσωση (1) δεν αντιπροσωπεύει τις σύγχρονες μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στις κινητές συσκευές, όπως οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, οι οποίες έχουν διαφορετικό προφίλ εκφόρτισης. Ωστόσο, αν κάποιος ενδιαφέρεται μόνο για τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και όχι τόσο για την πραγματική της τάση κατά την εκφόρτιση, το μοντέλο δύο δεξαμενών της KiBaM μπορεί να χρησιμοποιηθεί, επειδή το μοντέλο αυτό περιγράφει τόσο τη χωρητικότητα ρυθμού όσο και το φαινόμενο ανάκτησης

Το μοντέλο KiBaM είναι ικανό να περιγράψει τη μεταβολή της χωρητικότητας της μπαταρίας λόγω των μη γραμμικών φαινομένων χωρητικότητας. Ωστόσο, δεν μπορεί να αναπαραστήσει τα δυναμικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας που απαιτούνται για την προσομοίωση με άλλα ηλεκτρικά κυκλώματα και συστήματα.

4.5 Μοντέλο ιδανικής μπαταρίας

Αυτό το μοντέλο είναι το απλούστερο και το πιο προσεγγιστικό μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος. Αποτελείται από μια ιδανική μπαταρία με τάση ανοικτού κυκλώματος E_0 και σταθερή εσωτερική αντίσταση R_{IN} (εικόνα 23). Και οι δύο τιμές μπορούν να ληφθούν από τις μετρήσεις ανοικτού κυκλώματος και τις μετρήσεις με συνδεδεμένο φορτίο, όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη.



Εικόνα 23. Μοντέλο ιδανικής μπαταρίας

Αυτό το μοντέλο έχει αρκετά μειονεκτήματα. Το μοντέλο αυτό δεν λαμβάνει υπόψη τη μεταβαλλόμενη εσωτερική αντίσταση λόγω της μεταβαλλόμενης κατάστασης φόρτισης (SOC), της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και του σχηματισμού θειικών αλάτων. Σε αυτό το μοντέλο, η ενέργεια που αντλείται από τη μπαταρία θεωρείται ότι είναι απεριόριστη ή ότι η SOC έχει μικρή σημασία

4.6 Μοντέλο Thevenin μπαταρίας^[4.2]

Στην εικόνα 24 φαίνεται ένα μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin των ιόντων λίθιου (Li-ion) μπαταρίας το οποίο περιλαμβάνει μια πηγή τάσης που αντιπροσωπεύει την ανοικτή τάση κυκλώματος της μπαταρίας, μια αντίσταση σειράς και n , παράλληλους κλάδους RC .

Στο μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin της μπαταρίας, η τάση πηγής V_{OC} αντιπροσωπεύει την τάση ανοικτού κυκλώματος (OCV) της μπαταρίας, η οποία είναι συνάρτηση της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας και της θερμοκρασίας λειτουργίας, η αντίσταση σειράς R_S αντιπροσωπεύει την αντίσταση του επιφανειακού στρώματος της, είναι υπεύθυνη για τη στιγμιαία μεταβολή των ακροδεκτών της μπαταρίας ακολουθώντας ένα στιγμιαίο παλμό φόρτισης/εκφόρτισης της μπαταρίας. Οι παράλληλοι RC στο μοντέλο αντιπροσωπεύουν τη μεταβατική συμπεριφορά της μπαταρίας. Ο πρώτος κλάδος RC αντιπροσωπεύει την ταχύτερη συνιστώσα της τάσης της μπαταρίας, και οι άλλοι $n-1$ κλάδοι RC αντιπροσωπεύουν σχετικά πιο αργές μεταβατικές συνιστώσες της τάσης μιας μπαταρίας. Ακολουθώντας το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin της μπαταρίας στην εικόνα 24, η τάση του ακροδέκτη της μπαταρίας μπορεί να γραφεί ως εξής:

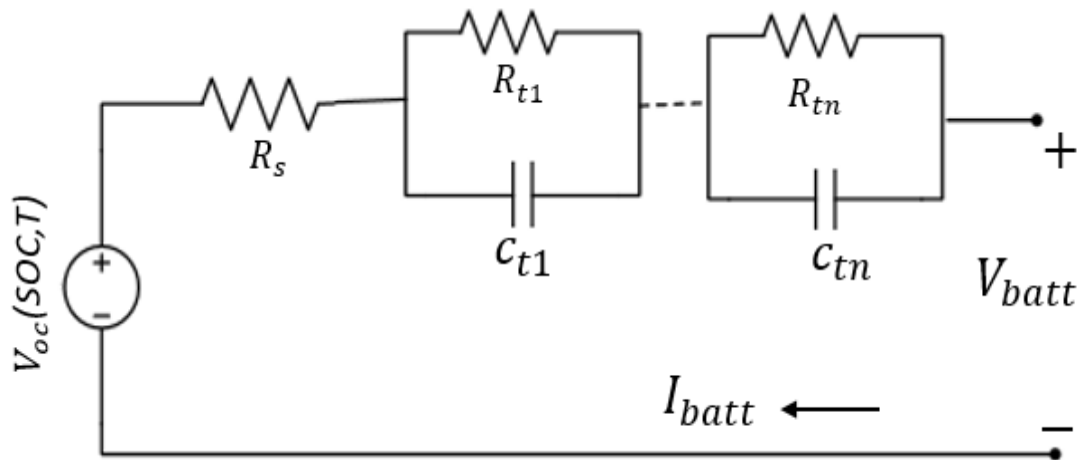
$$V_{batt}(t) = V_{OC}(SoC, T) - V_{RS}(i_{batt}) - \sum_{i=1}^n V_{RC,i}(i_{batt}, t) \quad (1)$$

Στην (1), V_{OC} είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος, η οποία είναι συνάρτηση της SOC της μπαταρίας και της θερμοκρασίας λειτουργίας, T . Ο όρος V_{RS} στην εξίσωση, είναι η στιγμιαία μεταβολή της τάσης στη σειρά αντίστασης R_S του μοντέλου μπαταρίας, μετά από μια αλλαγή του ρεύματος φόρτισης ή εκφόρτισης της μπαταρίας. Με άλλα λόγια:

$$V_{RS} = \Delta I R_S \quad (2)$$

όπου ΔI είναι το πλάτος της βηματικής μεταβολής του ρεύματος της μπαταρίας. Η δυναμική της τάσης στον n -ιοστό κλάδο RC μπορεί να γραφεί:

$$\frac{dV_{RC,i}}{dt} = -\frac{V_{RC,i}}{R_i C_i} + \frac{1}{C_i} i_{batt} \quad (3)$$



Εικόνα 24. Μοντέλο Thevenin μπαταρίας με n -νιοστούς RC κλάδους. [18]

Μεταξύ των n κλάδων RC σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin μιας μπαταρίας, ο πρώτος κλάδος RC είναι υπεύθυνος για το γρήγορο και μικρής διάρκειας μεταβατικό φαινόμενο, ενώ ο δεύτερος και οι υπόλοιποι κλάδοι RC είναι υπεύθυνοι για το μεταβατικό φαινόμενο μακράς διάρκειας.

Το μοντέλο αυτό είναι πλήρως δυναμικό, αφού συνδυάζει τόσο τα θερμικά όσο και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας. Η χωρητικότητα και η εξαρτημένη από το ρεύμα πηγή προσομοιώνουν την κατάσταση φόρτισης (SOC), και το χρόνο λειτουργίας της μπαταρίας.

Η εξαρτημένη από την τάση πηγή χρησιμοποιείται για να εκφραστεί η μη γραμμική σχέση της τάσης ανοικτού κυκλώματος (OCV) και του SOC. Τα δύο παράλληλα κυκλώματα δείχνουν την απόκριση της μπαταρίας στα μεταβατικά φορτία σε συγκεκριμένη κατάσταση φόρτισης και δίνονται συναρτήσει του SOC. Η R_s είναι υπεύθυνη για την πτώση τάσης του συσσωρευτή, ενώ οι R_{t1} , R_{t2} , C_{t1} , C_{t2} αποτελούν τις σταθερές της βηματικής απόκρισης.

Δεδομένου ότι το SOC της μπαταρίας παραμένει σταθερό κατά την περίοδο ηρεμίας, είναι περισσότερο κατάλληλο να υπολογιστούν τότε οι τιμές των συνιστωσών R και C, των παράλληλων κλάδων RC.

Αυτό το ηλεκτρικό μοντέλο δίνει με ακρίβεια το χρόνο λειτουργίας του συσσωρευτή και την αντίδραση της τάσης για κάθε φορτίο. Επομένως, η μέθοδος αυτή προσφέρει στους κατασκευαστές συστημάτων, τη δυνατότητα να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος και να παρατείνουν το χρόνο λειτουργίας.

Παρά το γεγονός ότι καταφέρνει να δείξει την μη γραμμικότητα, περιπλέκει τις παραμέτρους και απαιτεί πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις για να βρεθεί ο χρόνος λειτουργίας, με αποτέλεσμα να γίνεται πολυπλοκότερο και υπολογιστικά πιο χρονοβόρο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μοντέλα προσομοίωσης φόρτισης και εκφόρτισης μπαταριών

Σ' αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα δύο μοντέλα φόρτισης και εκφόρτισης μπαταριών με τη βοήθεια του λογισμικού PSIM. Η προσομοίωση γίνεται για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion). Στη συνέχεια θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων.

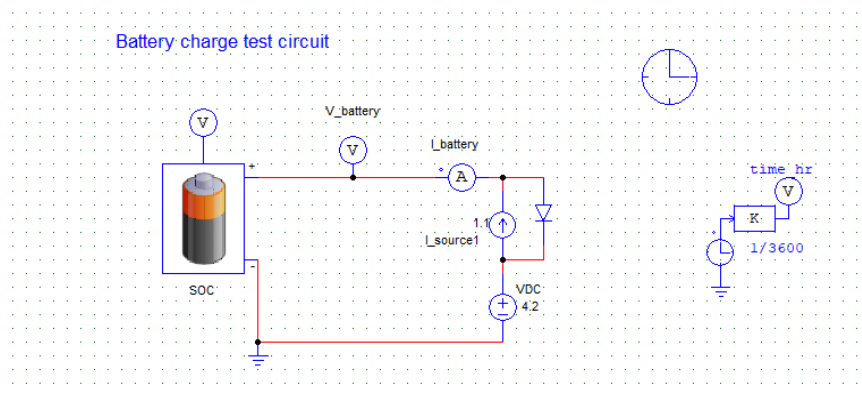
Λογισμικό PSIM

Το **PSIM** είναι ένα πακέτο λογισμικού προσομοίωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, σχεδιασμένο ειδικά για χρήση σε προσομοιώσεις ηλεκτρονικών ισχύος και κινητήρων, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση οποιουδήποτε ηλεκτρονικού κυκλώματος. Το PSIM, που αναπτύχθηκε από την **Powersim**, χρησιμοποιεί την ανάλυση κόμβων και την ολοκλήρωση του τραπεζοειδούς κανόνα ως βάση του αλγορίθμου προσομοίωσής του.

Το PSIM παρέχει μια διεπαφή δημιουργίας σχημάτων και μια συσκευή προβολής κυματομορφών **Simview**. Το PSIM διαθέτει διάφορες ενότητες που επεκτείνουν τη λειτουργικότητά του σε συγκεκριμένους τομείς προσομοίωσης και σχεδιασμού κυκλωμάτων, όπως: θεωρία ελέγχου, ηλεκτρικοί κινητήρες, φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες. Το PSIM χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία για έρευνα και ανάπτυξη προϊόντων και χρησιμοποιείται από εκπαιδευτικά ιδρύματα για έρευνα και διδασκαλία. [5.1]

5.1 Μοντέλο φόρτισης μπαταρίας

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται και σχολιάζεται το μοντέλο φόρτισης της μπαταρίας.



Εικόνα 25. Μοντέλο φόρτισης μπαταρίας

Περιγραφή μοντέλου

Στο λογισμικό PSIM σχεδιάστηκε το κύκλωμα που φαίνεται στην εικόνα 25.

Το κύκλωμα αποτελείται από:

1. Ένα κελί μπαταρίας
2. Βολτόμετρο (V-battery)
3. Αμπερόμετρο (I-battery)
4. Πηγή ρεύματος (παλμός; Τιμή του ρεύματος (1,1A) που θα χρειαστεί για την φόρτιση) (I-source)
5. Πηγή τάσης 4.2VDC

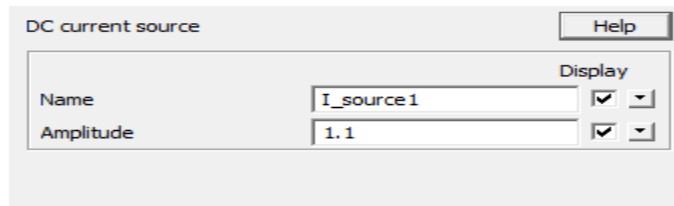
Οι αντίστοιχες τιμές των στοιχείων αυτών είναι:

1. Για το κελί της μπαταρίας οι τιμές είναι όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:
(Τα στοιχεία λήφθηκαν από τα data sheets της μπαταρίας lithium-ion battery VL34570 <https://psim.powersimtech.com/hubfs/PDF%20Tutorials/General%20PSIM%20Use/Tutorial-Lithium-Ion-Battery-Model.pdf>)

Parameter	Value	Display
Name	S2	<input type="checkbox"/>
No. of Cells in Series	1	<input type="checkbox"/>
No. of Cells in Parallel	1	<input type="checkbox"/>
Voltage Derating Factor	1	<input type="checkbox"/>
Capacity Derating Factor	1	<input type="checkbox"/>
Rated Voltage	3.7	<input type="checkbox"/>
Discharge Cut-off Voltage	2.5	<input type="checkbox"/>
Rated Capacity	5.4	<input type="checkbox"/>
Internal Resistance	0.05	<input type="checkbox"/>
Discharge Current	1.08	<input type="checkbox"/>
Capacity Factor	1.02	<input type="checkbox"/>
Full Voltage	4.2	<input type="checkbox"/>
Exponential Point Voltage	3.9	<input type="checkbox"/>
Nominal Voltage	3.6	<input type="checkbox"/>
Maximum Capacity	5.6	<input type="checkbox"/>
Exponential Point Capacity	1.08	<input type="checkbox"/>
Nominal Capacity	5.4	<input type="checkbox"/>
Initial State of Charge	0	<input type="checkbox"/>

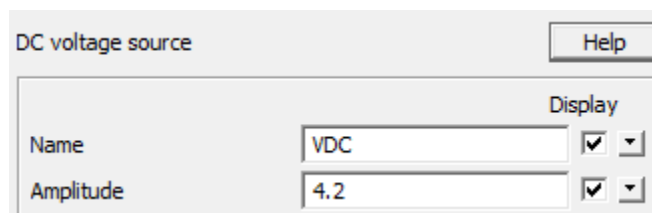
Εικόνα 26. Πίνακας τιμών κελιού μπαταρίας.

2. Για την πηγή ρεύματος χρησιμοποιείται η τιμή 1,1 A.



Εικόνα 27. Πλάτος έντασης πηγής ρεύματος

3. Για την τάση φόρτισης 4.2VDC έχουμε:

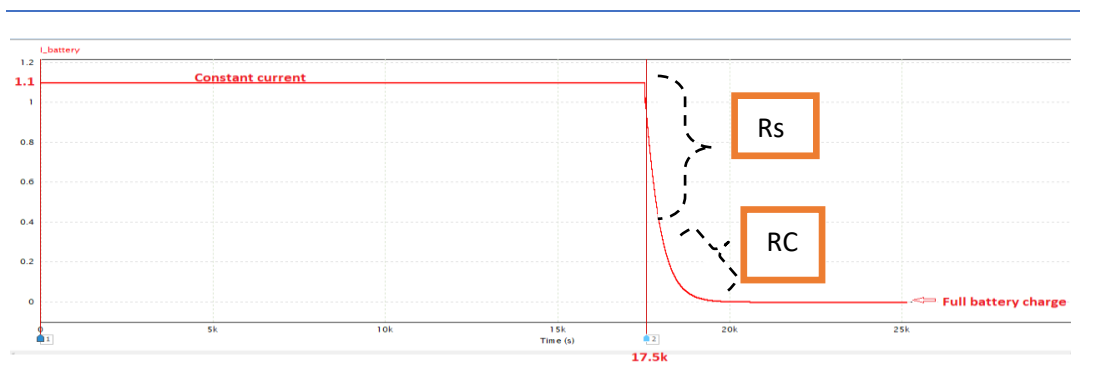


Εικόνα 28. Πηγή τάσης

Οι τιμές που χρησιμοποιήσαμε για την πηγή ρεύματος και πηγή τάσης τις πήραμε από τα φύλλα δεδομένων (data sheet) της μπαταρίας **lithium-ion battery VL34570** (όπου και δίνεται ένα αντίστοιχο παράδειγμα).

Στα παρακάτω διαγράμματα θα αναλυθεί η λειτουργία χρησιμοποιώντας τις γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την προσομοίωση με το PSIM. Η μελέτη θα αφορά διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας. Στην αρχή η φόρτιση θα ξεκινάει από το μηδέν και θα φτάνει μέχρι το **1C** (πλήρως φορτισμένη μπαταρία).

- Γραφική παράσταση ρεύματος (A) σε σχέση με τον χρόνο φόρτισης (Time (s)) (καμπύλη I)



Καμπύλη 1. Γραφική παράσταση Ρεύματος μπαταρίας (A) σε σχέση με τον χρόνο φόρτισης time (sec)

Από την καμπύλη παρατηρούμε ότι, το ρεύμα είναι σταθερό (constant current) μέχρι την χρονική στιγμή 17.5ksec, αυτό συμβαίνει γιατί από το χρόνο μηδέν (0s) μέχρι το χρονικό σημείο 17.5ksec λαμβάνει χώρα η φόρτιση. Από το 17.5ksec και μέχρι το 2ksec το ρεύμα μειώνεται μέχρι το 0A, εκεί η μπαταρία φτάνει στο σημείο της πλήρους φόρτισης (Full battery charge). Το σημείο καθόδου της, ακολουθεί στην αρχή γραμμική πορεία και στη συνέχεια εκθετική. Στο σημείο αυτό, όπου ξεκινάει η καμπή της, η καμπύλη είναι γραμμική γιατί αυτό οφείλεται στην εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας R_s (εικόνα 24). Ως εσωτερική αντίσταση ορίζεται η αντίσταση στη ροή ρεύματος εντός της μπαταρίας. Υπάρχουν δύο βασικά στοιχεία που επηρεάζουν την εσωτερική αντίσταση μιας μπαταρίας: η ηλεκτρονική αντίσταση και η ιοντική αντίσταση.

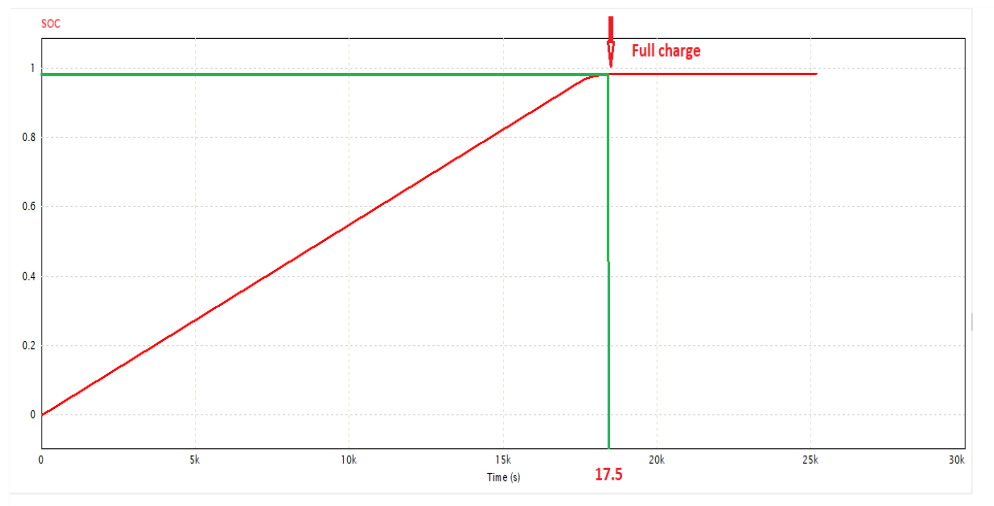
Μετά το γραμμικό κομμάτι της ακολουθεί το εκθετικό (μεταβατικό φαινόμενο), αυτό οφείλεται στους κλάδους RC (εικόνα 24) του ισοδύναμου κυκλώματος. Αυτό σημαίνει ότι στην πραγματικότητα ο πυκνωτής δεν φτάνει ποτέ στο 100% πλήρως φορτισμένος. Έτσι, για όλους τους πρακτικούς σκοπούς, μετά από πέντε χρονικές σταθερές (5T) φτάνει στο 99.3% της φόρτισης, οπότε σε αυτό το σημείο ο πυκνωτής θεωρείται πλήρως φορτισμένος. Στην πραγματικότητα η μπαταρία δεν φτάνει ποτέ σε πλήρη φόρτιση.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει σε ποια χρονική στιγμή η φόρτιση είναι πλήρης.

Πίνακας φόρτισης RC

Time Constant (χρονικές σταθερές)	RC Value	Percentage of Maximum	
		Voltage	Current
0.5 time constant	$0.5T = 0.5RC$	39.3%	60.7%
0.7 time constant	$0.7T = 0.7RC$	50.3%	49.7%
1.0 time constant	$1T = 1RC$	63.2%	36.8%
2.0 time constants	$2T = 2RC$	86.5%	13.5%
3.0 time constants	$3T = 3RC$	95.0%	5.0%
4.0 time constants	$4T = 4RC$	98.2%	1.8%
5.0 time constants	$5T = 5RC$	99.3%	0.7%

- Γραφική παράσταση SOC σε σχέση με τον χρόνο time (sec) (καμπύλη 2)



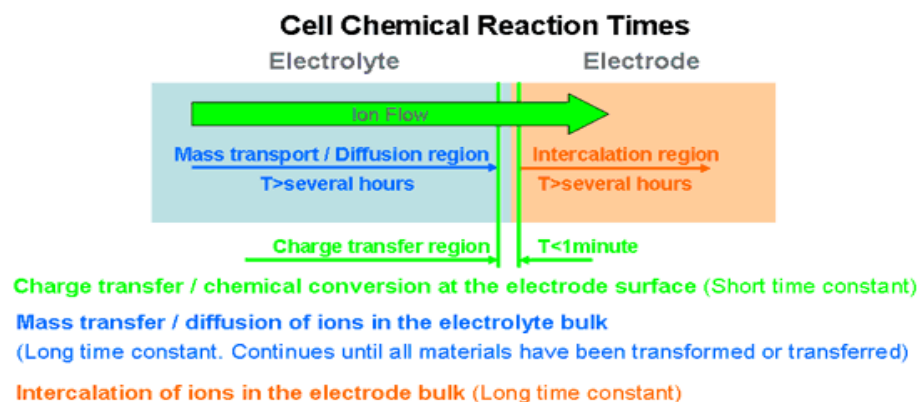
Καμπύλη 2. Γραφική παράσταση SoC σε σχέση με τον χρόνο time (s)

Στην παραπάνω καμπύλη παρατηρείται η διαδικασία της φόρτισης μέχρι το 100% της μπαταρίας. Όπως και στην προηγούμενη καμπύλη, φαίνεται ότι αυτό επιτυγχάνεται στον χρόνο 17.5 ksec.

Η τιμή του SOC κυμαίνεται μεταξύ 0% και 100%. Εάν η τιμή SOC είναι 100%, τότε το στοιχείο λέγεται ότι είναι πλήρως φορτισμένο, ενώ μια τιμή SOC 0% υποδηλώνει ότι το στοιχείο είναι πλήρως αποφορτισμένο. Στις πρακτικές εφαρμογές, το SOC δεν επιτρέπεται να πέσει κάτω από 50%, για αυτό το στοιχείο επαναφορτίζεται όταν το SOC φτάσει το 50%.

Όταν φορτίζεται η μπαταρία, και ζεσταθεί πολύ, πρέπει να σταματήσει τη φόρτιση. Η θερμοκρασία της μπαταρίας δεν πρέπει να ξεπερνά τους 51.6°C. Ιδανικά, η αργή φόρτιση των μπαταριών είναι η καλύτερη επιλογή.

Κατά τη διάρκεια της ταχείας φόρτισης είναι δυνατόν να διοχετευθεί ηλεκτρική ενέργεια στη μπαταρία ταχύτερα από ό,τι μπορεί να αντιδράσει η χημική διαδικασία (εικόνα 29), με καταστροφικά αποτελέσματα.



Εικόνα 29. Μεταφορά φόρτισης και χημική μετατροπή στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. (Πηγή: <https://www.mpoweruk.com/chargers.htm#rates>)

Η χημική δράση δεν μπορεί να λάβει χώρα ακαριαία, έτσι θα υπάρξει μια διαβάθμιση αντίδρασης στον όγκο του ηλεκτρολύτη μεταξύ των ηλεκτροδίων με τον ηλεκτρολύτη που βρίσκεται πιο κοντά στα ηλεκτρόδια ώστε να μετατρέπεται ή να φορτίζεται πριν από τον ηλεκτρολύτη που βρίσκεται πιο μακριά. Αυτό είναι ιδιαίτερα αισθητό σε κυψέλες υψηλής χωρητικότητας που περιέχουν μεγάλο όγκο ηλεκτρολύτη.

Συστήματα φόρτισης: [5.2]

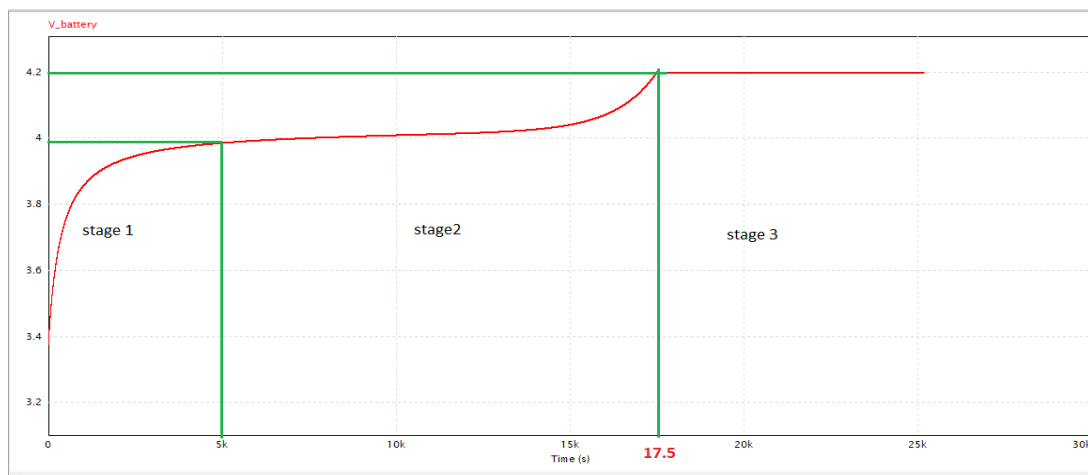
Ο φορτιστής έχει τρεις βασικές λειτουργίες:

- a. Τη φόρτιση της μπαταρίας (Φόρτιση)
- b. Βελτιστοποίηση του ρυθμού φόρτισης (Σταθεροποίηση)
- c. Δυνατότητα ελέγχου τερματισμού

Τερματισμός φόρτισης:

Μόλις μια μπαταρία φορτιστεί πλήρως, το ρεύμα φόρτισης πρέπει να διαχυθεί με κάποιο τρόπο. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή θερμότητας και αερίων, τα οποία είναι βλαβερά για τις μπαταρίες. Η ουσία της καλής φόρτισης είναι να είναι σε θέση να ανιχνεύει τότε ολοκληρώνεται η ανασύσταση των ενεργών χημικών ουσιών και να σταματά τη διαδικασία φόρτισης πριν προκληθεί οποιαδήποτε ζημιά, διατηρώντας πάντοτε τη θερμοκρασία του στοιχείου εντός των ασφαλών ορίων του. Η ανίχνευση αυτού του σημείου διακοπής και ο τερματισμός της φόρτισης είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Στους απλούστερους φορτιστές αυτό συμβαίνει όταν έχει επιτευχθεί ένα προκαθορισμένο ανώτερο όριο τάσης, που συχνά ονομάζεται τάση τερματισμού. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στους γρήγορους φορτιστές όπου ο κίνδυνος υπερφόρτισης είναι μεγαλύτερος.

- Γραφική παράσταση της τάσης ($V_{battery}$) σε σχέση με τον χρόνο $time$ (sec) (καμπύλη 3)



Καμπύλη 3. γραφική παράσταση τάσης ($V_{battery}$) σε σχέση με τον χρόνο $time$ (s)

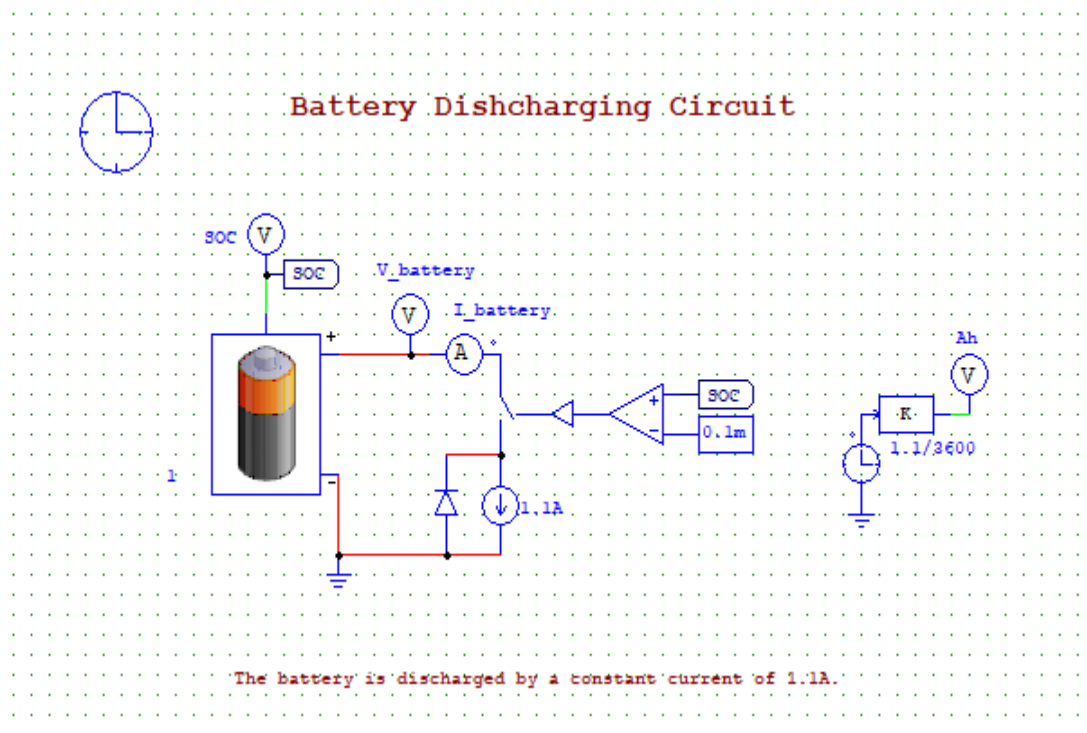
Οι μπαταρίες και η τάση έχουν περίπλοκη σχέση - η τάση δεν είναι σε ευθεία σχέση με τη χωρητικότητα. Η σχέση εξαρτάται από τον τύπο της μπαταρίας και τη χημεία της.

Η μπαταρία Li-ion έχει 3 περιοχές φόρτισης:

- 0 - 20% : αργή φόρτιση, για να σχηματιστούν οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της φόρτισης της μπαταρίας. Η τάση που φτάνει είναι μέχρι περίπου 4V (3,99V για την ακρίβεια).
- 20 - 80%: γρήγορη φόρτιση με χρήση σταθερού ρεύματος. Εδώ η μπαταρία αποκτά το μεγαλύτερο μέρος της χωρητικότητας και είναι η περιοχή που χρησιμοποιείται από τις συσκευές, π.χ. η ένδειξη 0 - 90% της μπαταρίας βρίσκεται συνήθως σε αυτή την περιοχή. Η τάση φόρτισης είναι περίπου 4,2V και είναι σχεδόν σταθερή. Το τέλος του κύκλου (περίπου 80%) υποδεικνύεται από μικρή πτώση της τάσης, περίπου 0,2V, η οποία πρέπει να ανιχνευθεί και να αλλάξει η λειτουργία φόρτισης.
- 80 - 100%: σταδιακή φόρτιση με σταθερή τάση. Είναι πολύ αργή και απαιτεί πολύ χρόνο. Οι περισσότερες συσκευές διατηρούν την ένδειξη της μπαταρίας στο πλήρες. Η τάση φόρτισης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ώστε να ωθεί ένα χρήσιμο επίπεδο ρεύματος μέσω της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας. Στην πράξη αυτό σημαίνει μερικά βολτ υψηλότερα από την κανονική τάση εξόδου της μπαταρίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση της μπαταρίας, τόσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο που μπορεί να εξαναγκαστεί να μεταφερθεί στις πλάκες του συσσωρευτή. Με άλλα λόγια, το φορτίο είναι ανάλογο της διαφοράς τάσης στον πυκνωτή. Μπορούμε να μετατρέψουμε αυτή την αναλογικότητα σε ισότητα εισάγοντας μια σταθερά αναλογικότητας, τη χωρητικότητα, C.

5.2 Μοντέλο εκφόρτισης μπαταρίας

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστεί και θα σχολιαστεί το μοντέλο εκφόρτισης της μπαταρίας.



Εικόνα 30. Μοντέλο εκφόρτισης μπαταρίας

Περιγραφή μοντέλου

Στο λογισμικό PSIM σχεδιάστηκε το κύκλωμα που φαίνεται στην εικόνα 30.

Το κύκλωμα αποτελείται από:

1. Ένα κελί μπαταρίας
2. Βολτόμετρο (V-battery)
3. Αμπερόμετρο (I-battery)
4. Πηγή ρεύματος (παλμός; Τιμή του ρεύματος (-1,1A) που θα χρειαστεί για την εκφόρτιση) (I-source)
5. Συγκριτής (Comparator), συγκρίνει την τιμή του SOC με την κατώτατη τιμή τάσης.
6. Μεταγωγικός διακόπτης (Bi-directional switch).

Οι αντίστοιχες τιμές των στοιχείων αυτών είναι:

1. Για το κελί της μπαταρίας οι τιμές είναι όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα: (Τα στοιχεία λήφθηκαν από τα data sheets της μπαταρίας lithium-ion battery VL34570 <https://psim.powersimtech.com/hubfs/PDF%20Tutorials/General%20PSIM%20Use/Tutorial-Lithium-Ion-Battery-Model.pdf>)

Li-Ion Battery : S2

Parameters | Color

Li-Ion Battery Help

		Display
Name	S2	<input type="checkbox"/> ▾
No. of Cells in Series	1	<input type="checkbox"/> ▾
No. of Cells in Parallel	1	<input type="checkbox"/> ▾
Voltage Derating Factor	1	<input type="checkbox"/> ▾
Capacity Derating Factor	1	<input type="checkbox"/> ▾
Rated Voltage	3.7	<input type="checkbox"/> ▾
Discharge Cut-off Voltage	2.5	<input type="checkbox"/> ▾
Rated Capacity	5.4	<input type="checkbox"/> ▾
Internal Resistance	0.05	<input type="checkbox"/> ▾
Discharge Current	1.08	<input type="checkbox"/> ▾
Capacity Factor	1.02	<input type="checkbox"/> ▾
Full Voltage	4.2	<input type="checkbox"/> ▾
Exponential Point Voltage	3.9	<input type="checkbox"/> ▾
Nominal Voltage	3.6	<input type="checkbox"/> ▾
Maximum Capacity	5.56	<input type="checkbox"/> ▾
Exponential Point Capacity	1.08	<input type="checkbox"/> ▾
Nominal Capacity	5.4	<input type="checkbox"/> ▾
Initial State of Charge	1	<input checked="" type="checkbox"/> ▾

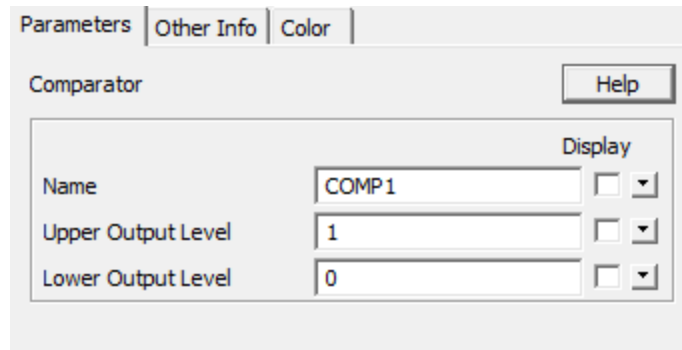
Εικόνα 31. Πίνακας τιμών εκφόρτισης μπαταρίας

Parameters | Color

DC current source Help

		Display
Name	IDC2	<input type="checkbox"/> ▾
Amplitude	1.1A	<input checked="" type="checkbox"/> ▾

Εικόνα 32. Πλάτος έντασης πηγής ρεύματος



Εικόνα 33. Συγκριτής (Comparator)

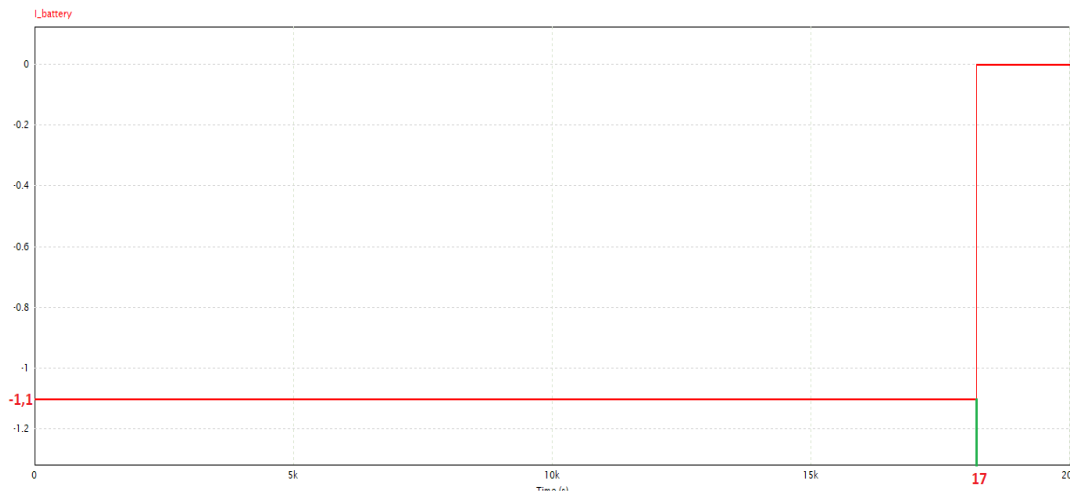
Όπως και πριν, οι τιμές που χρησιμοποιήσαμε για την πηγή ρεύματος και πηγή τάσης τις πήραμε από τα φύλλα δεδομένων (data sheet) της μπαταρίας **lithium-ion battery VL34570** (όπου και δίνεται ένα αντίστοιχο παράδειγμα).

Στα παρακάτω διαγράμματα θα σχολιαστεί η λειτουργία χρησιμοποιώντας τις γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την προσομοίωση με το PSIM. Η μελέτη θα αφορά διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας. Στην αρχή η εκφόρτιση θα ξεκινάει από το **1C** και θα φτάνει μέχρι το μηδέν (πλήρως εκφορτισμένη μπαταρία).

6 Γραφική παράσταση ρεύματος (I) σε σχέση με τον χρόνο αρχής εκφόρτισης (Time (s)) (καμπύλη 4)

Στην γραφική παράσταση (καμπύλη 4), παρατηρείται ένας αρνητικός παλμός ρεύματος $-1.1A$. Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι πρόκειται για την διαδικασία εκφόρτισης. Η διάρκεια του είναι είναι 17.5 ksec . Σε κάθε παλμό η μπαταρία εκφορτίζεται. Η παλμική φόρτιση/εκφόρτιση είναι στην πραγματικότητα ένα είδος περιοδικού τετραγωνικού παλμού ρεύματος. Αυτό είναι γνωστό για εφαρμογές μολύβδου-οξέος και μπαταρίες ιόντων λιθίου. Πολυάριθμες έρευνες και πρακτικές έχουν αποδείξει ότι τόσο η αποτελεσματικότητα της εκφόρτισης όσο και η διάρκεια ζωής του κύκλου μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά με τη χρήση της παλμικής λειτουργίας. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή το ρεύμα αλλάζει από το -1.1 (εκφόρτιση) στο $0A$ (παύση εκφόρτισης).

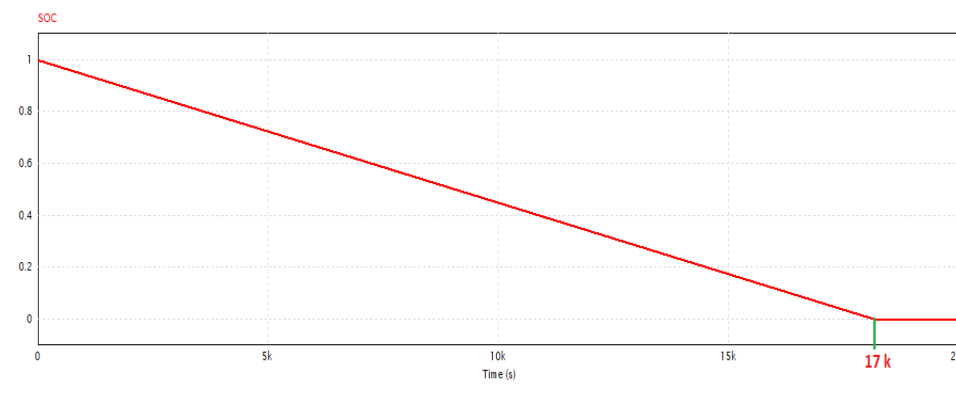
Η εκφόρτιση με αρνητικούς παλμούς, είναι μια μέθοδος κατά την οποία ένας πολύ σύντομος παλμός εκφόρτισης, εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου ανάπαυσης εκφόρτισης για την εκπόλωση του κελιού.



Καμπύλη 4. Ρεύμα μπαταρίας (A) σε σχέση με τον χρόνο της αρχής της εκφόρτισης (Time s))

7 Γραφική παράσταση SOC σε σχέση με τον χρόνο (Time (s)) (καμπύλη 5)

Στην καμπύλη 5, φαίνεται η πορεία του SOC κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης. Εκκινεί από την πλήρη φόρτιση (1C) και καταλήγει σε μηδενικό φορτίο. Η κατάσταση φόρτισης (SOC) μιας κυψέλης υποδηλώνει τη χωρητικότητα που είναι διαθέσιμη ως συνάρτηση της ονομαστικής χωρητικότητας.

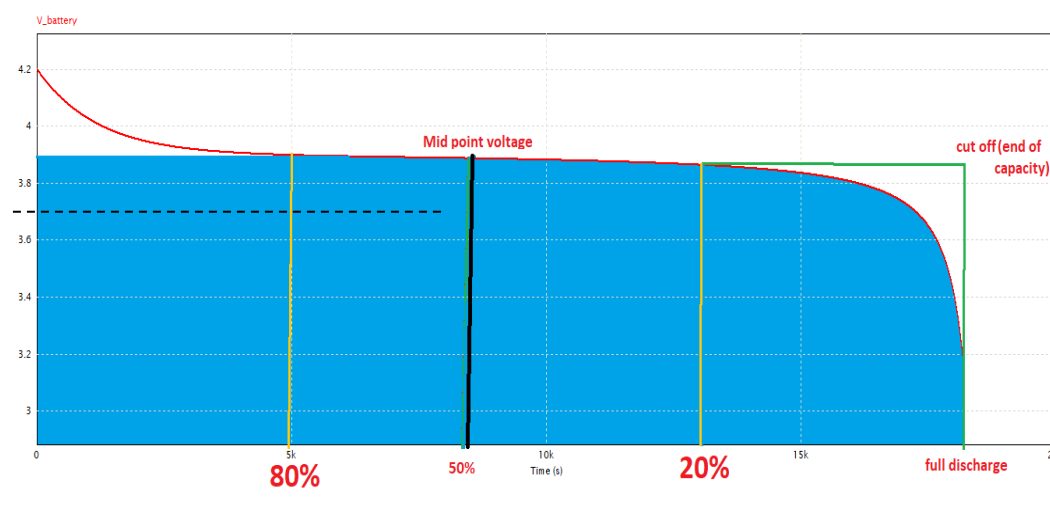


Καμπύλη 5. Γραφική παράσταση SoC

8 Γραφική παράσταση της τάσης (V battery) σε σχέση με τον χρόνο time (sec) (καμπύλη 6)

Η καμπύλη εκφόρτισης της μπαταρίας βασίζεται στην πόλωση της μπαταρίας που συμβαίνει κατά την εκφόρτιση. Η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παρέχει μια μπαταρία, η οποία αντιστοιχεί στην περιοχή κάτω από την καμπύλη εκφόρτισης, σχετίζεται στενά με τις συνθήκες λειτουργίας, όπως ο ρυθμός C και η θερμοκρασία λειτουργίας. Η μπλε περιοχή είναι η συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας.

Η τάση αποκοπής (cut off) είναι η τάση στην οποία μια μπαταρία θεωρείται πλήρως εκφορτισμένη, πέρα από την οποία η περαιτέρω εκφόρτιση θα μπορούσε να προκαλέσει βλάβη. Ορισμένες ηλεκτρονικές συσκευές, όπως τα κινητά τηλέφωνα, απενεργοποιούνται αυτόματα όταν επιτευχθεί η τάση αποκοπής. [5.3]



Καμπύλη 6. Γραφική παράσταση της τάσης (V_{battery}) σε σχέση με τον χρόνο

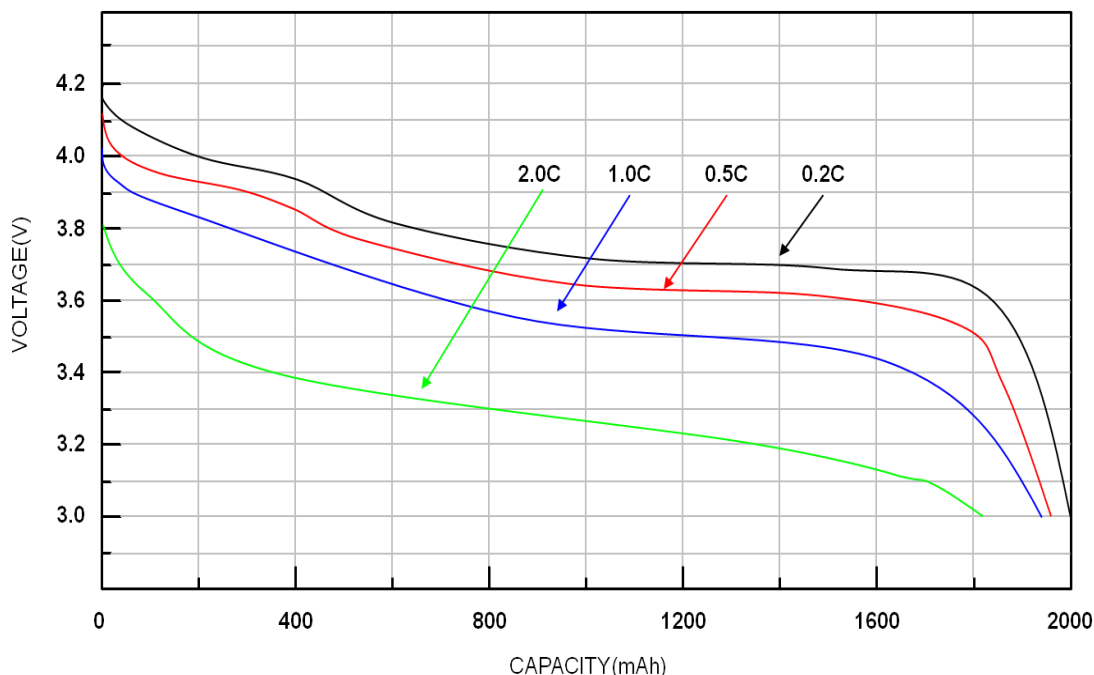
Μια επίπεδη καμπύλη εκφόρτισης, όπως φαίνεται στην καμπύλη 6, από το 80% μέχρι το 20% είναι καλύτερη γιατί σημαίνει ότι η τάση είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της εκφόρτισης της μπαταρίας. Αλλά μια επίπεδη καμπύλη εκφόρτισης σημαίνει επίσης ότι η μπαταρία μπορεί να μην αποδίδει κοντά στο 100% DOD (βάθος εκφόρτισης), επειδή η μπαταρία διακόπτει τη λειτουργία της εάν ένα από τα στοιχεία φτάσει την κατώτερη τάση αποκοπής.

Ωστόσο, για κυψέλες ιόντων λιθίου με επίπεδες καμπύλες εκφόρτισης, η εκτίμηση του SOC απαιτεί πιο σύνθετες μεθόδους, όπως η μέτρηση Coulomb που μετρά το ρεύμα εκφόρτισης μιας μπαταρίας και ενσωματώνει το ρεύμα με την πάροδο του χρόνου για την εκτίμηση του SOC.

Επιπλέον, η ισχύς από κυψέλες με καμπύλη εκφόρτισης με καθοδική κλίση πέφτει καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου εκφόρτισης. Ενδέχεται να είναι απαραίτητο να υπερδιαστασιοποιηθούν οι μπαταρίες για την υποστήριξη εφαρμογών υψηλής ισχύος προς το τέλος του κύκλου εκφόρτισης.

Ένας ρυθμιστής τάσης ενίσχυσης είναι συχνά απαραίτητος για την τροφοδοσία ευαίσθητων συσκευών και συστημάτων που χρησιμοποιούν μια μπαταρία με καμπύλη εκφόρτισης με απότομη κλίση.

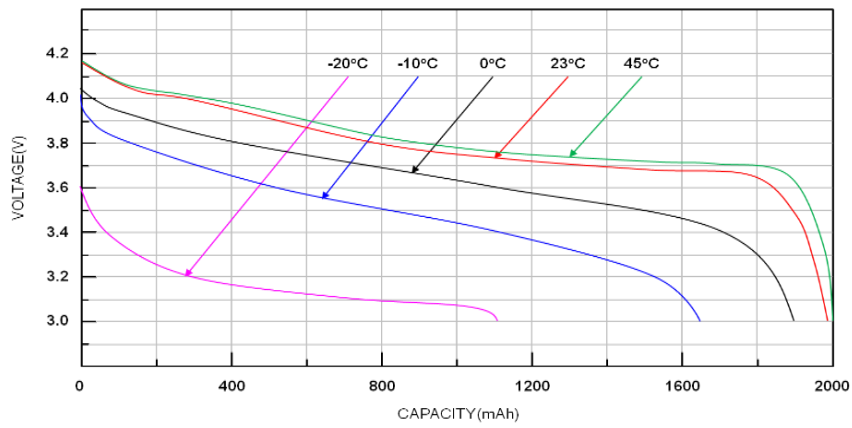
Οι καμπύλες εκφόρτισης για μια μπαταρία ιόντων λιθίου που ακολουθούν δείχνουν ότι η πραγματική χωρητικότητα μειώνεται εάν η κυψέλη εκφορτίζεται με πολύ υψηλούς ρυθμούς (ή αντίθετα αυξάνεται με χαμηλούς ρυθμούς εκφόρτισης). Αυτό ονομάζεται αντιστάθμιση χωρητικότητας και το φαινόμενο είναι κοινό στις περισσότερες χημικές κυψέλες.



Εικόνα 31. Η τάση και η χωρητικότητα της μπαταρίας ιόντων λιθίου μειώνονται με υψηλότερους ρυθμούς C. (Πηγή: <https://www.batterypowertips.com/how-to-read-battery-discharge-curves-faq/>)

Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση της μπαταρίας. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, οι μπαταρίες με υδατικούς ηλεκτρολύτες μπορεί να παγώσουν, θέτοντας ένα κατώτερο όριο στο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου υφίστανται επικάλυψη λιθίου της ανόδου σε χαμηλές θερμοκρασίες, μειώνοντας μόνιμα τη χωρητικότητα. Σε υψηλές θερμοκρασίες, οι χημικές ουσίες μπορούν να διασπαστούν και η μπαταρία παύει να λειτουργεί. Μεταξύ της κατάψυξης και της χημικής καταστροφής, η απόδοση της μπαταρίας συνήθως ποικίλλει ευρέως ανάλογα με τη θερμοκρασία.

Το παρακάτω γράφημα (εικόνα 32) δείχνει τον αντίκτυπο στην απόδοση των ιόντων λιθίου σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, η απόδοση μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Ωστόσο οι καμπύλες εκφόρτισης της μπαταρίας είναι μόνο ένα μέρος της υπόθεσης σχετικά με την απόδοση της μπαταρίας. Για παράδειγμα, όσο περισσότερο διαφέρει η θερμοκρασία λειτουργίας μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου από τη θερμοκρασία δωματίου, τόσο περισσότερο υποβαθμίζεται η διάρκεια ζωής του κύκλου. Η πλήρης ανάλυση όλων των παραγόντων που επηρεάζουν την καταλληλότητα των διαφόρων χημικών υλικών μπαταρίας για συγκεκριμένες εφαρμογές ξεφεύγει από το πλαίσιο αυτής της μελέτης των καμπυλών εκφόρτισης μπαταρίας.



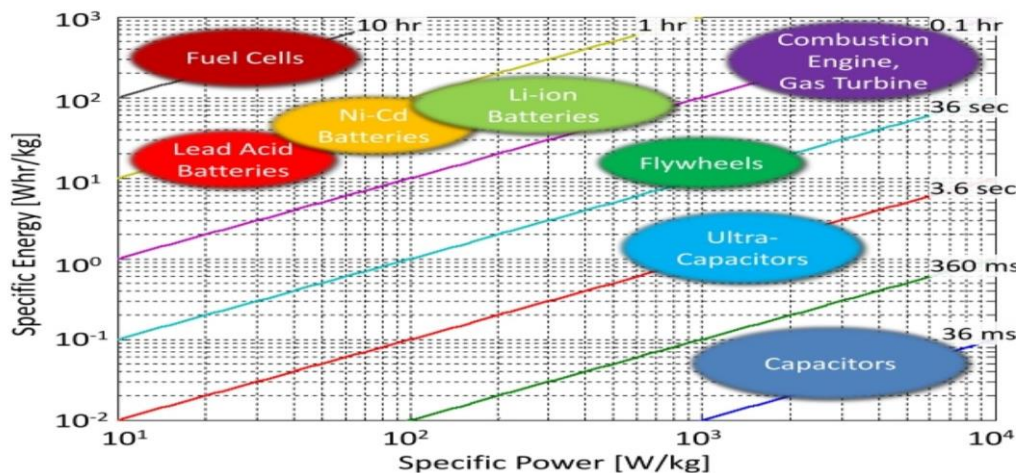
Εικόνα 32. Η τάση και η χωρητικότητα της μπαταρίας εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.

(Πηγή: <https://www.batterypowertips.com/how-to-read-battery-discharge-curves-faq/>)

Ένα παράδειγμα άλλων τρόπων ανάλυσης των επιδόσεων των διαφόρων μπαταριών είναι το διάγραμμα Ragone.

5.3 Διάγραμμα Ragone

Ένα διάγραμμα Ragone συγκρίνει την ειδική ισχύ σε σχέση με την ειδική ενέργεια διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Για παράδειγμα, όταν εξετάζονται μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων, η ειδική ενέργεια σχετίζεται με την αυτονομία, ενώ η ειδική ισχύς αντιστοιχεί στην επιτάχυνση.



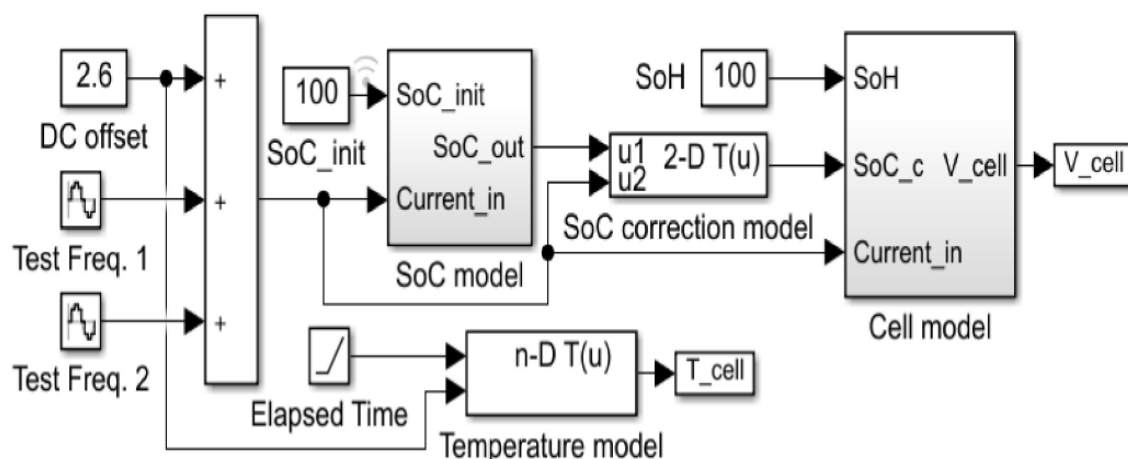
Εικόνα 32. Διάγραμμα Ragone που συγκρίνει τη σχέση μεταξύ ειδικής ενέργειας και ειδικής ισχύος για διάφορες τεχνολογίες. (Πηγή: <https://www.batterypowertips.com/how-to-read-battery-discharge-curves-faq/>)

Συμπερασματικά, είναι σημαντικό να κατανοήσει κανείς τις καμπύλες εκφόρτισης των μπαταριών και τις διάφορες παραμέτρους που συνθέτουν τις οικογένειες καμπυλών εκφόρτισης που σχετίζονται με κάθε συγκεκριμένη χημεία μπαταρίας. Ως αποτέλεσμα των πολύπλοκων ηλεκτροχημικών και θερμοδυναμικών συστημάτων, οι καμπύλες εκφόρτισης των μπαταριών είναι επίσης πολύπλοκες,

αλλά αποτελούν μόνο έναν τρόπο κατανόησης των συμβιβασμών απόδοσης μεταξύ των διαφόρων χημικών στοιχείων και κατασκευών μπαταριών.

Μοντέλο Simulink για διαφορετικά C-rates εκφόρτισης. [5.4]

Στην εικόνα 33 φαίνεται η συνολική εμφάνιση του μοντέλου στην προσομοίωση Matlab/Simulink.

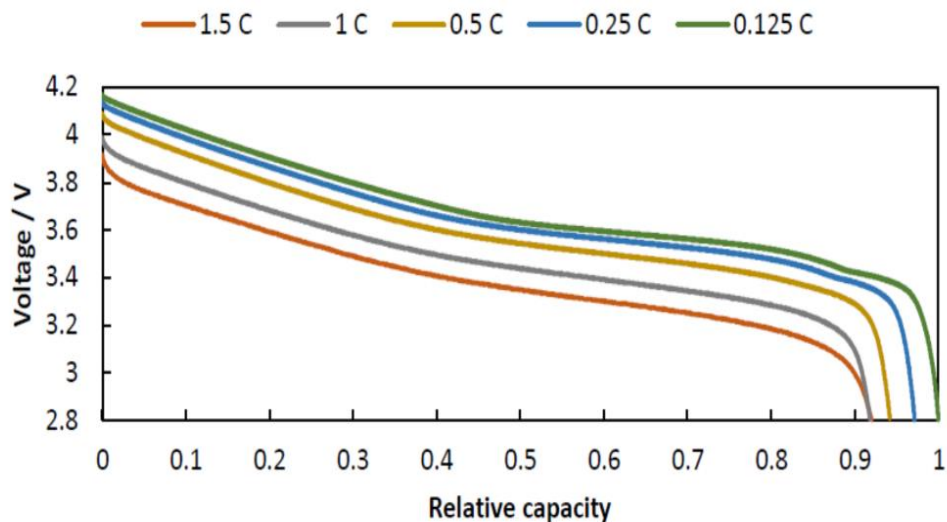


Εικόνα 33. Μοντέλο μπαταρίας για διαφορετικά C-rates εκφόρτισης. (Πηγή: <file:///C:/Users/decibel/Downloads/batteries-08-00008-v2-2.pdf>)

Η είσοδος ρεύματος (**Current_in**) είναι ένα σήμα που λαμβάνεται με την προσθήκη δύο σημάτων συχνότητας (**Test Freq. 1**, **Test Freq. 2**) στο **DCoffset**. Το μοντέλο SOC παρέχει ένα **real time** (πραγματικό χρόνο) SOC στο μοντέλο κυψέλης. Το αρχικό SOC δίνεται ως **SOC_init** και το **SOC real time** είναι η έξοδος που φαίνεται ως **SOC_out**.

Τα SOC υπολογίζονται με βάση τη χωρητικότητα των κελιών που μπορούν να εκφορτιστούν, η οποία μεταβάλλεται με το ρεύμα λειτουργίας (C-rate). Το μοντέλο διόρθωσης SOC χρησιμοποιείται για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της χωρητικότητας. Το μοντέλο κυψέλης λαμβάνει υπόψιν το ρεύμα και το **SOC real time** και δίνει ως έξοδο μια τάση κυψέλης σε πραγματικό χρόνο (**Vcell**). Η τάση εξόδου Vcell μετασχηματίζεται κατά Fourier ώστε να υπολογίζει την αντίσταση της κυψέλης σε κάθε συχνότητα δοκιμής. Οι υπολογισμοί της σύνθετης αντίστασης της κυψέλης λαμβάνουν υπόψη το SOH και τη θερμοκρασία της κυψέλης.

Στην εικόνα 34 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης της κυψέλης ιόντων λιθίου για διαφορετικά C-rate.



Εικόνα 34. Καμπύλη εκφόρτιση μπαταρίας Li-ion για διαφορετικές τιμές C-rate. (Πηγή: <file:///C:/Users/decibel/Downloads/batteries-08-00008-v2-2.pdf>)

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι προδιαγραφές του κελιού μπαταρίας που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση.

Parameter	Description
Product name	Samsung ICR 18650-26F
Battery system	Li-ion
Nominal voltage	3.7 V
Rated capacity	2.6 Ah (0.2 C, to 2.75 V discharge)
Wh rating	9.62 Wh
Anode	Based on intercalation graphite
Cathode	Based on lithiated metal oxide ¹

¹ Consists of cobalt, nickel, and manganese.

Πίνακας 1. Προδιαγραφές του κελιού μπαταρίας. (Πηγή: <file:///C:/Users/decibel/Downloads/batteries-08-00008-v2-2.pdf>)

Ο πίνακας 2 δείχνει τη σχετική χωρητικότητα της κυψέλης όταν εκφορτίζεται σε διαφορετικούς ρυθμούς C.

Όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός C, τόσο μικρότερη είναι η συνολική ποσότητα ενέργειας (Wh) που μπορεί να απελευθερωθεί από την κυψέλη. Εάν η ωφέλιμη χωρητικότητα της κυψέλης στους 0,125 C είναι 100%, η ωφέλιμη σχετική χωρητικότητα στους 1,5 C είναι 92%.

C-Rate	Relative Capacity
1.5	0.92
1	0.92
0.5	0.94
0.25	0.97
0.125	1

Πίνακας 2. Σχετική χωρητικότητα για διαφορετικά C-rate εκφόρτισης. (Πηγή: <file:///C:/Users/decibel/Downloads/batteries-08-00008-v2-2.pdf>)

Αυτό υλοποιείται στο μοντέλο διόρθωσης του SOC με τη χρήση ενός πίνακα τιμών (look-up table) που λαμβάνει SOC_{out} και $Current_{in}$ ως εισόδους. Η έξοδος SOC διορθωμένη από το ρεύμα εκφόρτισης εκφράζεται ως SOC_c .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Επίδραση θερμοκρασίας στις μπαταρίες

6.1 Εισαγωγή

Για την μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας στην μπαταρία όσο αφορά το SOC, θα αναλυθεί η τεχνική της **ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης** (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS).

Η ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης (EIS) είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τη διερεύνηση των ιδιοτήτων των υλικών και των αντιδράσεων των ηλεκτροδίων. Η ανάλυση δεδομένων σύνθετης αντίστασης χρησιμοποιείται για να καταδειχθεί η δομή σφάλματος για τις μετρήσεις σύνθετης αντίστασης, τη χρήση μοντέλων μέτρησης και διεργασιών και την ευαισθησία της σύνθετης αντίστασης στην εξέλιξη των ιδιοτήτων του ηλεκτροδίου. Αυτό παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για τον πειραματικό σχεδιασμό, δίνει τη σημασία των διαγραμμάτων ακρίβειας για την επιλογή καλωδίωσης και οργάνων. Επισημαίνονται οι εφαρμογές της EIS και στην απόδοση των μπαταριών, στη διάβρωση μετάλλων και κραμάτων και στους ηλεκτροχημικούς βιοαισθητήρες. Οι μετρήσεις ηλεκτροχημικής σύνθετης αντίστασης εξαρτώνται τόσο από τον υπό εξέταση μηχανισμό όσο και από εξωγενείς παραμέτρους, όπως η γεωμετρία του ηλεκτροδίου.

Για να την προσομοίωση των διεργασιών που θα μας δείξουν την επίδραση της θερμοκρασίας θα χρησιμοποιήσουμε το λογισμικό SIMULINK.

SIMULINK

Το Simulink, είναι ένα πρόσθετο προϊόν του MATLAB, που παρέχει ένα διαδραστικό, γραφικό περιβάλλον για τη μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση δυναμικών συστημάτων. Επιτρέπει την ταχεία κατασκευή εικονικών πρωτοτύπων για τη διερεύνηση σχεδιαστικών ιδεών σε οποιοδήποτε επίπεδο λεπτομέρειας με ελάχιστη προσπάθεια.

Για τη μοντελοποίηση, το Simulink παρέχει μια γραφική διεπαφή χρήστη (GUI) για την κατασκευή μοντέλων ως διαγραμμάτων μπλοκ. Περιλαμβάνει μια ολοκληρωμένη βιβλιοθήκη προκαθορισμένων μπλοκ που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή γραφικών μοντέλων συστημάτων με τη χρήση drag-and-drop λειτουργιών. Ο χρήστης είναι σε θέση να παράγει ένα "έτοιμο και λειτουργικό" μοντέλο που διαφορετικά θα απαιτούσε ώρες για να κατασκευαστεί σε εργαστηριακό περιβάλλον. Υποστηρίζει γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα, μοντελοποιημένα σε συνεχή χρόνο, δειγματοληπτικό χρόνο ή υβρίδιο των δύο, επίσης την αυτόματη παραγωγή κώδικα και τη συνεχή δοκιμή και επαλήθευση ενσωματωμένων συστημάτων. [6.1]

Ο διαδραστικός χαρακτήρας του Simulink ενθαρρύνει την δοκιμή των παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, και αμέσως μπορεί να δει κανείς τα αποτελέσματα του μοντέλου. Τέλος, το Simulink είναι ενσωματωμένο με το MATLAB και τα δεδομένα μπορούν εύκολα να διαμοιραστούν μεταξύ των δύο προγραμμάτων. [6.2]

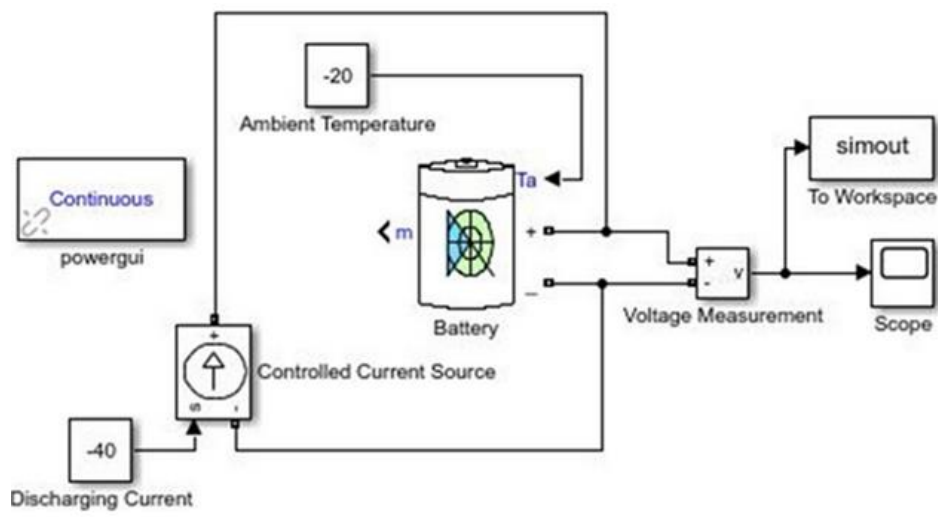
6.2 Πειραματικό μέρος

Θερμικό μοντέλο της κυψέλης

Το θερμικό μοντέλο της κυψέλης ιόντων λιθίου-πολυμερούς κατασκευάστηκε στην πλατφόρμα Simulink - battery block

Στο μοντέλο εκφόρτισης αναπαρίσταται η επίδραση της θερμοκρασίας στις παραμέτρους του μοντέλου της μπαταρίας. Η καρτέλα θερμοκρασίας (ρυθμίσεις από battery block του Simulink) δέχεται διάφορες παραμέτρους, οι οποίες προσδιορίζονται από τη δοκιμή εκφόρτισης της μπαταρίας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C . Η αρχική θερμοκρασία κυψέλης ορίζεται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, επειδή κάθε κυψέλη ψύχεται ή θερμαίνεται στη θερμοκρασία αυτή πριν από την έναρξη της δοκιμής εκφόρτισης. Η αρχική θερμοκρασία περιβάλλοντος T_1 (20°C) είναι η θερμοκρασία κατά την ονομαστική λειτουργία.

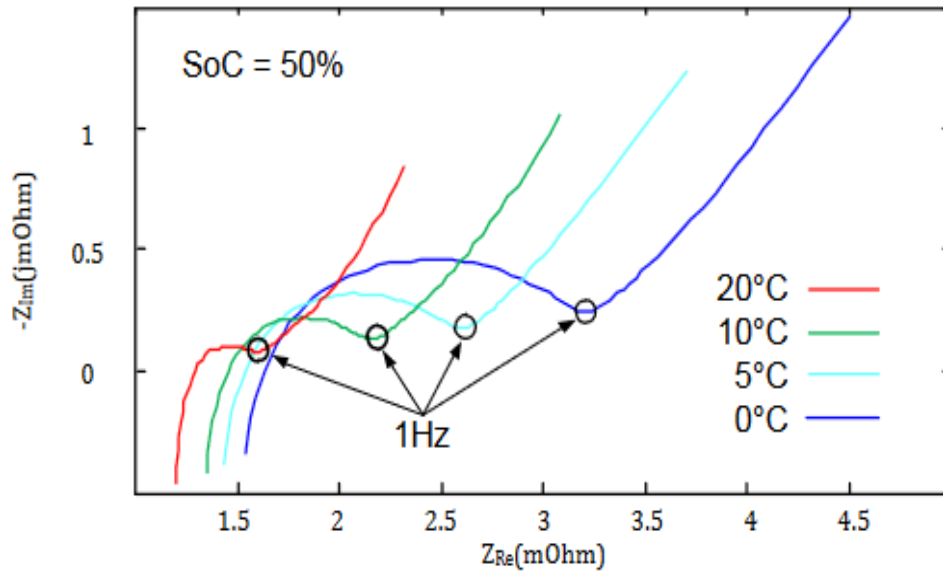
Όλες οι παράμετροι λαμβάνονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C . Στην εικόνα 35 παρουσιάζεται το μοντέλο εκφόρτισης κυψέλης λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. [6.5]



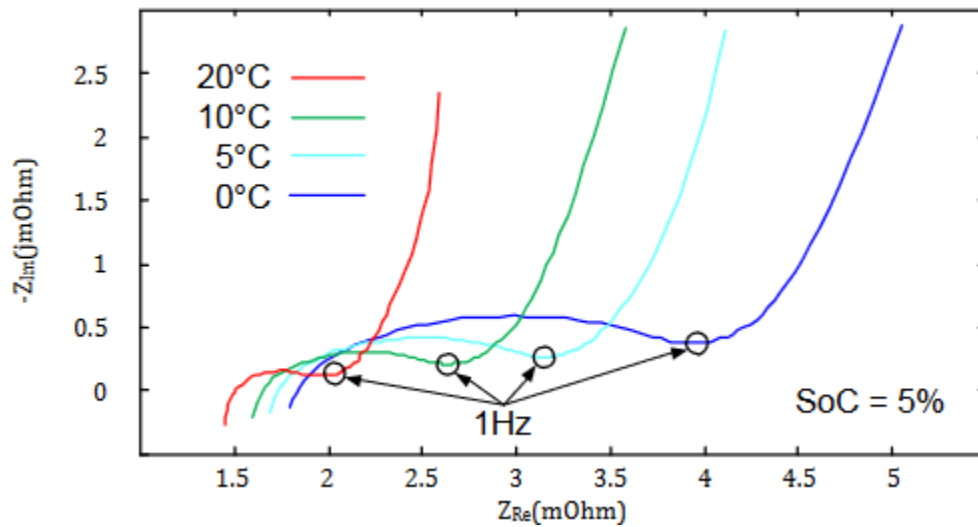
Εικόνα 35. Θερμικό μοντέλο κυψέλης μπαταρίας. (Πηγή:

https://www.researchgate.net/figure/Battery-cell-thermal-model-in-Simulink_fig3_339049054)

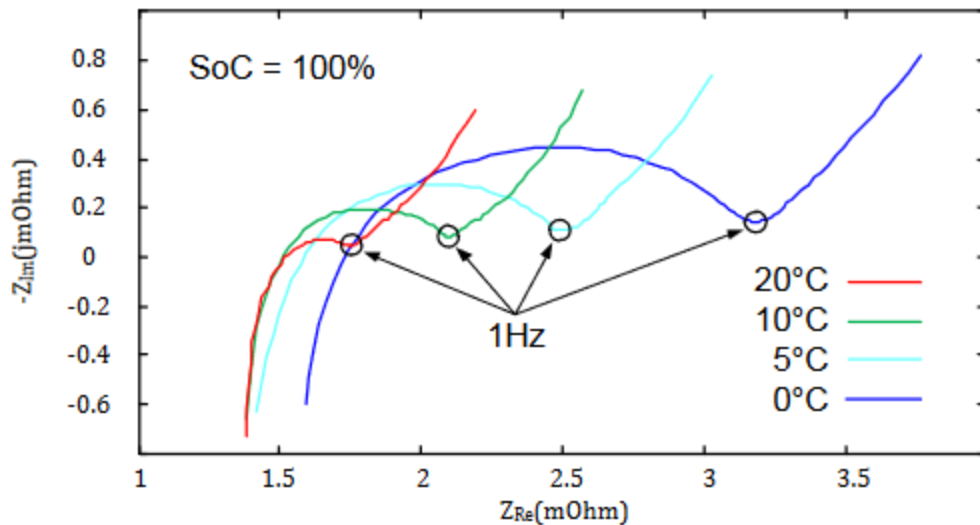
Οι γραφικές παραστάσεις (καμπύλες) από την προσομοίωση φαίνονται παρακάτω:



Καμπύλη 7. Επίδραση στην εσωτερική αντίσταση για SoC 50%



Καμπύλη 8. Επίδραση εσωτερική αντίσταση για SoC 5%



Καμπύλη 9. Επίδραση εσωτερική αντίσταση για SoC 100%

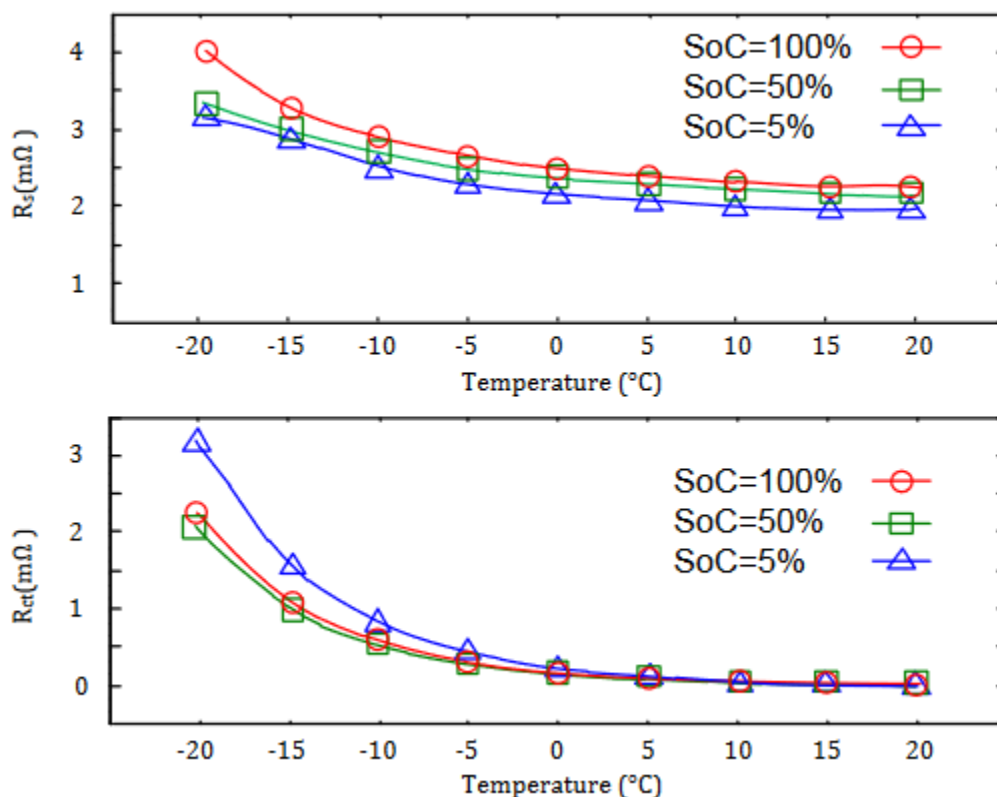
Τα αποτελέσματα των δοκιμών της προσομοίωσης σε 5% SOC, 50% SOC και 100% SOC παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Οι ακτίνες των ημικυκλίων σε αυτά τα διαγράμματα αυξάνονται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, για κλίσεις που αντιπροσωπεύουν τη διαδικασία διάχυσης του υλικού, οι κλίσεις παραμένουν ίδιες στις διαφορετικές θερμοκρασίες. Αυτό σημαίνει ότι η επίδραση της θερμοκρασίας στη διάχυση του υλικού είναι σχετικά μικρή. Επομένως, ο ρυθμός μεταφοράς φορτίου είναι ο πρωταρχικός παράγοντας που περιορίζει την απόδοση της μπαταρίας σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Temperature	-20	-10	-5	0	10
SoC=5%					
R_S	$1.67 \cdot 10^{-3}$	$1.83 \cdot 10^{-3}$	$1.99 \cdot 10^{-3}$	$2.19 \cdot 10^{-3}$	$\cdot 10^{-3}$
$C_{dl, T}$	20	18.55	17.8	16.58	12.93
$C_{dl, P}$	0.79	0.70	0.65	0.63	0.6014
R_{ct}	$9.33 \cdot 10^{-4}$	$2.22 \cdot 10^{-3}$	$3.91 \cdot 10^{-3}$	$6.64 \cdot 10^{-3}$	$2.46 \cdot 10^{-2}$
Z_w, T	3159	2675	2415	1839	1611
SoC=50%					
R_S	$2.02 \cdot 10^{-3}$	$2.23 \cdot 10^{-3}$	$2.41 \cdot 10^{-3}$	$2.67 \cdot 10^{-3}$	$3.05 \cdot 10^{-3}$
$C_{dl, T}$	14.9	12.22	11.96	12.21	12.22
$C_{dl, P}$	0.87	0.77	0.72	0.68	0.64
R_{ct}	$6.48 \cdot 10^{-4}$	$1.63 \cdot 10^{-3}$	$2.76 \cdot 10^{-3}$	$4.86 \cdot 10^{-3}$	$1.74 \cdot 10^{-2}$
Z_w, T	4777	3721	3315	3042	3013
SoC=100%					
R_S	$1.91 \cdot 10^{-3}$	$2.06 \cdot 10^{-3}$	$2.19 \cdot 10^{-3}$	$2.42 \cdot 10^{-3}$	$3.17 \cdot 10^{-3}$
$C_{dl, T}$	18.7	13.9	12.8	12.76	12.15
$C_{dl, P}$	0.81	0.76	0.72	0.67	0.61
R_{ct}	$6.80 \cdot 10^{-4}$	$1.56 \cdot 10^{-3}$	$2.60 \cdot 10^{-3}$	$4.48 \cdot 10^{-3}$	$1.60 \cdot 10^{-2}$
Z_w, T	2531	1844	1498	1194	813.2

Πίνακας 3. Προσδιορισμένες παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος σε SOC=5%, 50%, 100%.

(Πηγή:<https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/134041/Gong%20Dissertation%20Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>)

Σε SOC=100%, 50% και 5%, η ωμική αντίσταση R_s και η αντίσταση μεταφοράς φορτίου R_{ct} ως συναρτήσεις της θερμοκρασίας παρουσιάζονται στις παρακάτω καμπύλες. Η αύξηση της R_s είναι εντός 200% στην περιοχή από 20°C έως -20°C. Η αντίσταση μεταφοράς φορτίου R_{ct} αυξάνεται εκθετικά. Η R_{ct} αυξάνεται σε 2600% στους -20°C σε σύγκριση με τους 20°C.



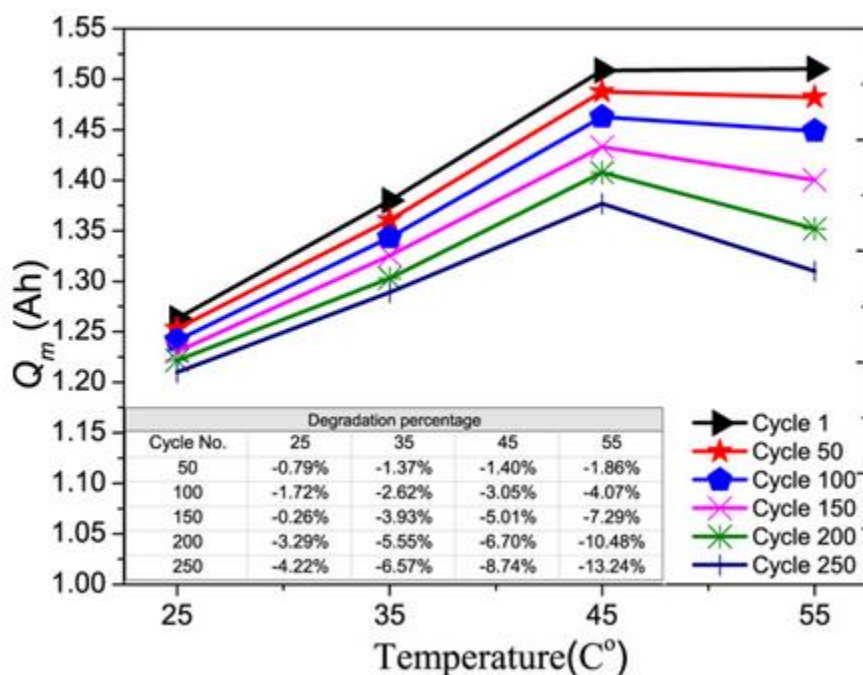
Καμπύλες 10 και 11. Ωμική αντίσταση R_s και αντίσταση μεταφοράς φορτίου R_{ct} συναρτήσει των θερμοκρασιών σε διαφορετικές τιμές SoC.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα των δοκιμών EIS δείχνουν ότι τόσο η ωμική αντίσταση R_s όσο και η αντίσταση μεταφοράς φορτίου R_{ct} αυξάνονται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, η μεταφορά φορτίου είναι ο κύριος παράγοντας που περιορίζει την απόδοση της μπαταρίας σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σοβαρές πολώσεις προκαλούνται από το γεγονός ότι η τάση της μπαταρίας φτάνει νωρίτερα στην τάση αποκοπής σε χαμηλές θερμοκρασίες και έχει ως αποτέλεσμα σε απώλειες χωρητικότητας.[6.3]

Επιπτώσεις της θερμότητας[6.4]

Όταν οι θερμοκρασίες αυξάνονται, αυτό επηρεάζει τις χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό μιας μπαταρίας. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία της μπαταρίας, επιταχύνονται και οι χημικές αντιδράσεις στο εσωτερικό της. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες μία από τις επιπτώσεις στις μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι η μεγαλύτερη απόδοση και η αυξημένη αποθηκευτική ικανότητα της μπαταρίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας από τους 25°C στους 45°C οδηγεί σε αύξηση της μέγιστης αποθηκευτικής ικανότητας κατά 20%.

Ωστόσο, υπάρχει μια παρενέργεια σε αυτή την αυξημένη απόδοση, ο κύκλος ζωής της μπαταρίας μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Όταν η μπαταρία φορτίζεται στους 45°C έναντι των 25°C, η υποβάθμιση του κύκλου ζωής είναι πολύ πιο σημαντική στην υψηλότερη θερμοκρασία. Για τους πρώτους 200 κύκλους η απόδοση της μπαταρίας υποβαθμίστηκε μόνο κατά 3,3% στους 25°C και στους 45°C η απόδοση μειώθηκε κατά 6.7%. Με βάση τη μεγαλύτερη υποβάθμιση σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ο κύκλος ζωής της μπαταρίας μπορεί να μειωθεί σημαντικά λόγω της συνεχούς έκθεσης σε ακραία θερμότητα. Έτσι, ενώ η έκθεση στη θερμότητα αυξάνει προσωρινά τη χωρητικότητα της μπαταρίας, η ζημιά που προκαλεί στον κύκλο ζωής μπορεί να προκαλέσει μακροπρόθεσμα προβλήματα και για αυτό τον λόγο η παρατεταμένη έκθεση στη θερμότητα θα πρέπει να αποφεύγεται. Το παρακάτω γράφημα δείχνει την μείωση του κύκλου ζωής της μπαταρίας με την αύξηση της θερμοκρασίας:



Γράφημα 1. Τάσης - χωρητικότητας

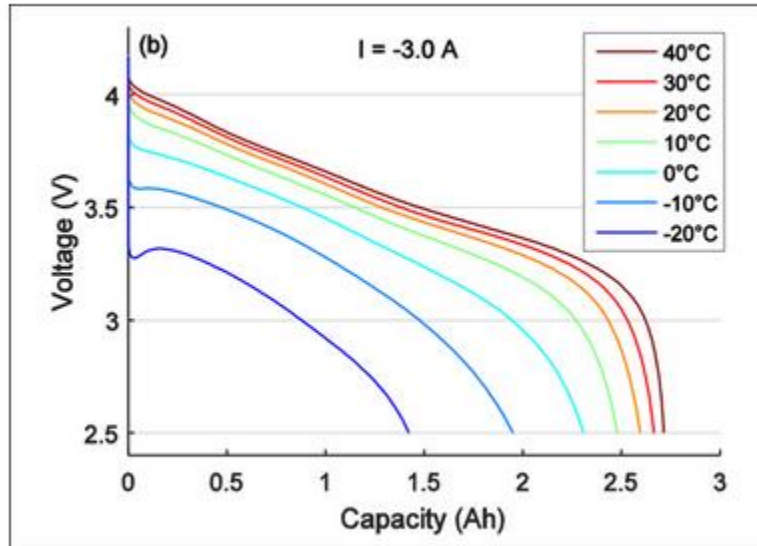
Επιπτώσεις των χαμηλών θερμοκρασιών

Η παρατεταμένη έκθεση σε χαμηλές θερμοκρασίες έχει επίσης μεγάλο αντίκτυπο στην απόδοση και την ασφάλεια της μπαταρίας. Όταν η θερμοκρασία ελαττώνεται, η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας αυξάνεται. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται μεγαλύτερη προσπάθεια από τη μπαταρία για τη φόρτιση, με αποτέλεσμα να μειώνεται η χωρητικότητα.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η απώλεια χωρητικότητας εξαρτάται επίσης από τους ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης. Η επίδραση του ψύχους είναι διαφορετική για μπαταρίες που έχουν κατασκευαστεί με διαφορετικές χημικές ουσίες. Για παράδειγμα, μια μπαταρία μολύβδου-οξέος μπορεί να παρέχει μόλις τη μισή ονομαστική χωρητικότητα στους -17°C.

Οι θερμοκρασίες λειτουργίας των μπαταριών είναι επίσης διαφορετικές ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν να φορτιστούν από 25°C έως 45°C και να εκφορτιστούν από -20°C έως 60°C (ωστόσο αν λειτουργούν σε τόσο υψηλά επίπεδα θερμοκρασίας υπάρχουν τα προβλήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως). Όμως οι μπαταρίες

μολύβδου-οξέος μπορούν να φορτιστούν και να εκφορτιστούν από -20°C έως 50°C . Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε τις θερμοκρασίες φόρτισης που μπορεί να αντέξει μια μπαταρία. Εάν οι μπαταρίες δεν λειτουργούν στην αποδεκτή θερμοκρασία, η φόρτιση θα μειωθεί επειδή ο συνδυασμός ιόντων θα είναι πιο αργός. Η επιβολή υψηλού ρεύματος μπορεί να δημιουργήσει πίεση προκαλώντας εκρήξεις σε σφραγισμένες μπαταρίες.



Γράφημα 2. Χαρακτηριστικές τάσης – χωρητικότητας σε διάφορες θερμοκρασίες.

Θερμικό μοντέλο 4 μπαταριών

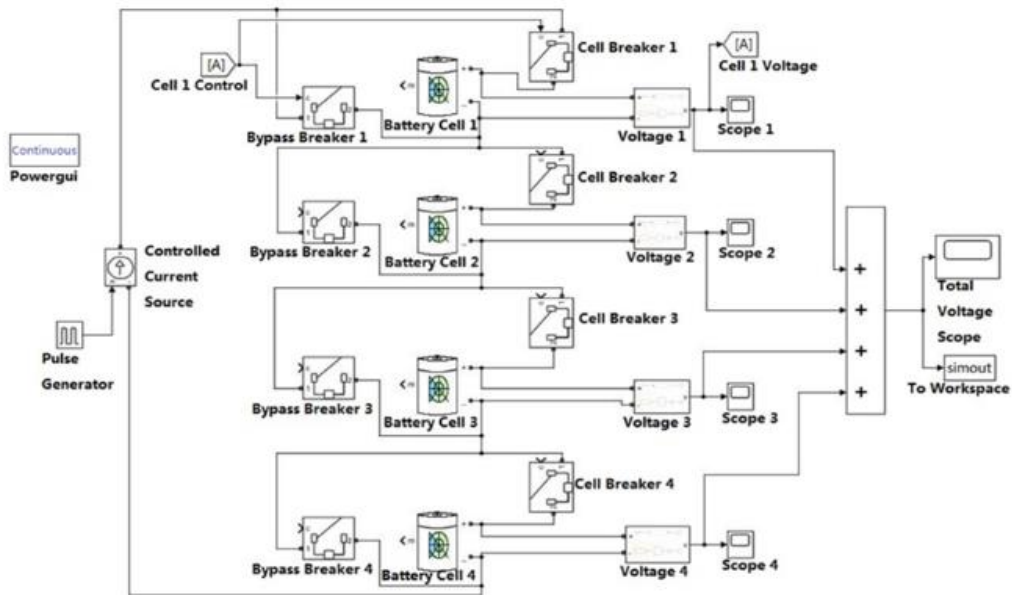
Στο Simulink δημιουργήθηκε ένα μοντέλο μπαταρίας που περιέχει τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά, όπως φαίνεται στην εικόνα 36. Η ελεγχόμενη πηγή ρεύματος, τα τέσσερα στοιχεία της μπαταρίας, οι διακόπτες με αλγοριθμικό έλεγχο για την εκτέλεση της λειτουργίας του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας (BMS), και η μέτρηση τάσης με διαγράμματα είναι τα τέσσερα υπομοντέλα στο μοντέλο της μονάδας.

Το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης προς κάθε κυψέλη παράγεται από το υπομοντέλο ελεγχόμενης πηγής ρεύματος, το οποίο έχει δύο παραμέτρους: δηλαδή τον τύπο της πηγής συνεχούς ρεύματος και το μηδενικό αρχικό πλάτος (A).

Η ελεγχόμενη πηγή ρεύματος είναι συνδεδεμένη με ένα σταθερό μπλοκ για τη δημιουργία ενός σταθερού ρεύματος φόρτισης ή εκφόρτισης. Το σταθερό μπλοκ είναι το σταθερό ρεύμα φόρτισης/εκφόρτισης.

Το μπλοκ γεννήτριας παλμών εφαρμόζεται για τη δημιουργία παλμού ρεύματος φόρτισης/εκφόρτισης. Διακόπτης κυψέλης, διακόπτης παράκαμψης, τάση κυψέλης και η ετικέτα ελέγχου (control tag) κυψέλης σχηματίζουν ένα υπομοντέλο BMS για κάθε κυψέλη. Όταν η κυψέλη φορτίζεται σε τάση υψηλότερη από 4,3 V ή εκφορτίζεται σε τάση χαμηλότερη από 2,3 V, το control tag (ετικέτα ελέγχου) ανοίγει τον διακόπτη κυψέλης και κλείνει τον διακόπτη παράκαμψης για να αποτρέψει την υπερφόρτιση ή την υπερεκφόρτιση της κυψέλης.

Κάθε υπομοντέλο περιέχει ένα ζεύγος ετικετών ελέγχου για τους διακόπτες. Η εικόνα 36 δείχνει μόνο ένα ζεύγος ετικετών.



Εικόνα 36. Μοντέλο μπαταρίας που περιέχει τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά. (Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Battery-cell-thermal-model-in-Simulink_fig3_339049054)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Αλγόριθμος MPPT - Perturb & Observe

7.1 Εισαγωγή

Η χρήση και η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται όλο και πιο δημοφιλής και έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή από τους ερευνητές στις μέρες μας.

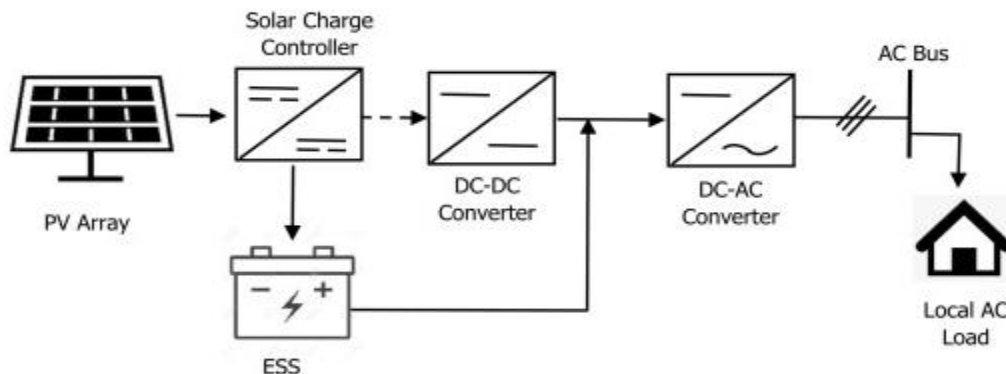
Ωστόσο, η ισχύς εξόδου των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστοιχιών ποικίλλει ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία, γεγονός που επηρεάζει την απόδοση των Φ/Β συστοιχιών. Ως εκ τούτου, η τεχνική **ελέγχου παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος** (αλγόριθμος maximum power point tracking (MPPT)) χρησιμοποιείται για την εξαγωγή της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες.

Η μέθοδος **Perturb and Observe** (P & O) είναι μια από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές που χρησιμοποιούνται συχνά λόγω της απλότητας και του χαμηλού κόστους του. Όμως, ο συμβατικός αλγόριθμος P & O έχει αρκετά μειονεκτήματα, τα οποία οδηγούν σε απώλεια ισχύος και έλλειψη απόδοσης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο αλγόριθμος **Perturb and Observe** για τον έλεγχο παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος. [7.1]

7.2 Το φωτοβολταϊκό σύστημα

Το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται κυρίως από τρία μέρη (Εικόνα 37):

- 9 Το πρώτο είναι τα ηλιακά πάνελ ή η ηλιακή μονάδα (μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια),
- 10 Το δεύτερο είναι τμήμα διασύνδεσης ή το τμήμα ισχύος, για τη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας που λαμβάνεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα, το οποίο έχει σχεδιαστεί ανάλογα με τις ανάγκες του καταναλωτή και
 - Το τρίτο είναι το ηλεκτρικό φορτίο.



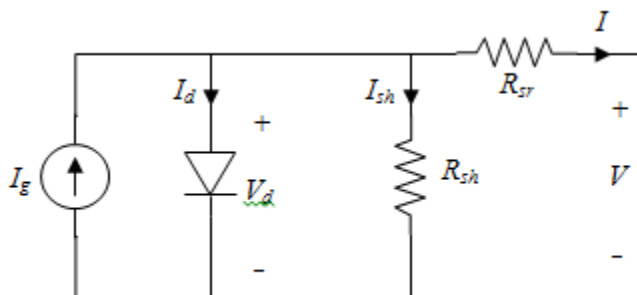
Εικόνα 37. Φωτοβολταϊκό σύστημα.

(Πηγή:<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-photovoltaic-system>)

Ηλιακό πάνελ

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες δεν είναι ούτε σταθερές πηγές ρεύματος ούτε πηγές τάσης αλλά μπορούν να προσεγγιστούν ως γεννήτριες ρεύματος με εξαρτώμενες πηγές τάσης. Κατά τη διάρκεια του σκοταδιού, η ηλιακή κυψέλη δεν είναι ενεργή συσκευή. Δεν παράγει ούτε ρεύμα ούτε τάση.

Μία ηλιακή κυψέλη είναι μια σύνδεση ημιαγωγών p-n. Όταν εκτίθεται στο φως, παράγεται ρεύμα (DC). Το παραγόμενο ρεύμα μεταβάλλεται γραμμικά με την ηλιακή ακτινοβολία. Η εικόνα 38 δείχνει το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας ιδανικής ηλιακής κυψέλης.



Εικόνα 38. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας ιδανικής ηλιακής κυψέλης. (Πηγή: https://www.pscad.com/webhelp/Master_Library_Models/Sources/Photovoltaic_Source.htm)

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κυκλώματος είναι τα εξής:

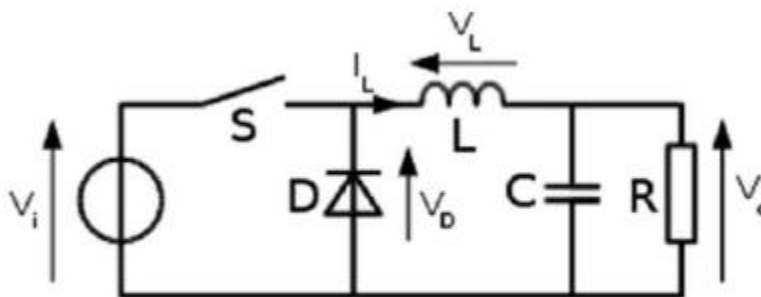
I_g:	Είναι το ρεύμα που παράγεται όταν το κύτταρο εκτίθεται στο φως, μεταβάλλεται γραμμικά με την ηλιακή ακτινοβολία
I_d:	Το ρεύμα I_d μέσω της παράλληλης διόδου είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνο για την παραγωγή των μη γραμμικών χαρακτηριστικών I-V του φωτοβολταϊκού στοιχείου.
R_{sr}:	Αντίσταση σειράς φωτοβολταϊκών στοιχείων, R_{sr} (Ω).
R_{sh}:	Αντίσταση παράκαμψης φωτοβολταϊκού στοιχείου, R_{sh} (Ω)
V_d:	Τάση της διόδου
V:	Τάση εξόδου

Η παράλληλη διάδος που τοποθετείται στο ισοδύναμο κύκλωμα τοποθετείται για τον λόγο ότι, εμποδίζει την εφαρμογή αντίστροφης τάσης σε μεμονωμένα πάνελ από τα άλλα πάνελ της συστοιχίας.

7.3 Μετατροπέας υποβιβασμού (Buck converter)

Ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (**Buck converter**) είναι ένας μετατροπέας ισχύος **DC-DC** που μειώνει την τάση (ενώ αυξάνει το ρεύμα) από την είσοδό του (τροφοδοσία) στην έξοδό του (φορτίο). Πρόκειται για μια κατηγορία μετατροπέων διακοπτόμενης λειτουργίας (SMPS) που περιέχουν συνήθως τουλάχιστον δύο ημιαγωγούς (μια διάοδο και ένα τρανζίστορ, αν και οι σύγχρονοι μετατροπείς buck converter αντικαθιστούν συχνά τη διάοδο με ένα δεύτερο τρανζίστορ που χρησιμοποιείται για σύγχρονη ανόρθωση) και τουλάχιστον ένα στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας, έναν πυκνωτή, ένα πηνίο ή και τα δύο σε συνδυασμό.

Για να μειωθεί η κυμάτωση της τάσης, φίλτρα από πυκνωτές (μερικές φορές σε συνδυασμό με πηνία) προστίθενται συνήθως στην έξοδο (φίλτρο από την πλευρά του φορτίου) και στην είσοδο (φίλτρο από την πλευρά της τροφοδοσίας) ενός τέτοιου μετατροπέα. Στην εικόνα 39 φαίνεται ένας μετατροπέας υποβιβασμού τάσης [7.2]. Το φορτίο είναι, για παράδειγμα, μία οικιακή κατανάλωση.



Εικόνα 39. Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Buck converter). [7.3]

Λειτουργία του μετατροπέα υποβιβασμού

Όταν ο διακόπτης S (MOSFET) είναι κλειστός, τότε το ρεύμα I_L έχει φορά από την πηγή εισόδου προς το φορτίο. Όταν ο διακόπτης S είναι ανοικτός και το ρεύμα εξόδου είναι συνεχές, υπάρχει συνεχής ροή, το οποίο σημαίνει ότι η τιμή του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα δεν μηδενίζει ποτέ ακόμα και όταν ο διακόπτης S είναι ανοικτός. Έτσι, το ρεύμα που δημιουργείται από το επαγωγικό μέρος του φορτίου μας, μέσω της διόδου «ελευθέρως ροής» ανορθώνεται και πηγαίνει και πάλι προς το φορτίο για αυτό και δεν μηδενίζει η τιμή του ρεύματος εξόδου.

Σε μια πρακτική εφαρμογή το προηγούμενο κύκλωμα έχει δύο μειονεκτήματα:

(1) Στην πράξη το φορτίο θα είναι επαγωγικό. Ακόμη και με ένα ωμικό φορτίο, θα υπάρχει πάντα κάποια παρασιτική αυτεπαγωγή. Αυτό σημαίνει ότι ο διακόπτης θα πρέπει να απορροφά (ή να καταναλώνει) την ενέργεια που αποθηκεύεται στην αυτεπαγωγή και για το λόγο αυτό μπορεί να καταστραφεί.

(2) Η τάση εξόδου κυμαίνεται μεταξύ V_o και V_D , γεγονός μη αποδεκτό στις περισσότερες εφαρμογές.

7.4 Η μέθοδος **Perturb and Observe**

Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος MPPT είναι η μέθοδος **Perturb and Observe** (P&O). Η λειτουργία του εν λόγω αλγορίθμου είναι η δημιουργία μίας συνεχούς διαταραχής περιορισμένου εύρους (1-5% περίπου) στον κύκλο λειτουργίας D (duty cycle), ώστε να ταλαντώνεται μονίμως το σημείο λειτουργίας σε ένα μικρό τμήμα της χαρακτηριστικής $P-V$, οδηγώντας το έτσι προς τη μεγαλύτερη ισχύ.

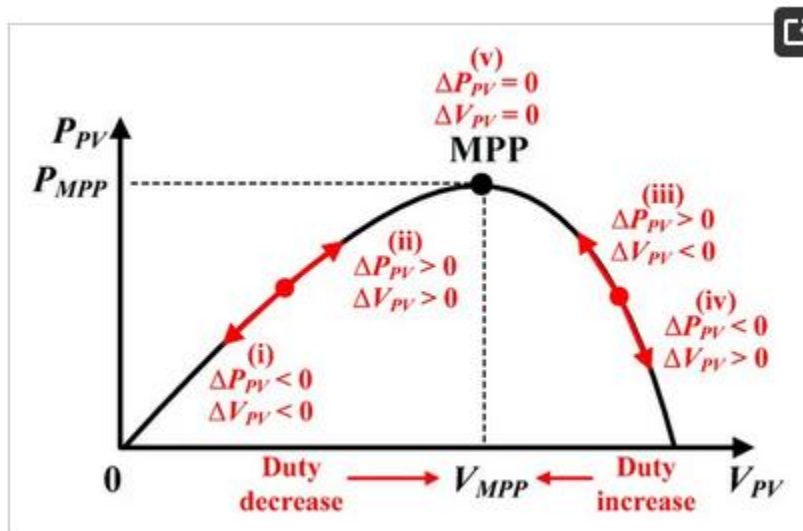
Αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί απλή ανατροφοδότηση και απλή ρύθμιση των παραμέτρων. Σε αυτή την προσέγγιση, εισάγεται μια μικρή διαταραχή που προκαλεί τη μεταβολή της ισχύος της φωτοβολταϊκής μονάδας. Η ισχύς εξόδου του επόμενου κύκλου διαταραχής συγκρίνεται με την ισχύ εξόδου του προηγούμενου κύκλου διαταραχής. Έτσι προκαλείται διακύμανση ισχύος της ηλιακής

μονάδας. Εάν η ισχύς αυξάνεται λόγω της διαταραχής, τότε η διαταραχή συνεχίζεται προς την ίδια κατεύθυνση (καμπύλη 12).

Η μέγιστη ισχύς στο MPP είναι μηδενική, όταν δηλαδή $\Delta P_{pv}=0$ και $\Delta V_{pv}=0$ (όπως φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη 12), στην συνέχεια μειώνεται και ως εκ τούτου μετά από αυτό η διαταραχή αντιστρέφεται.

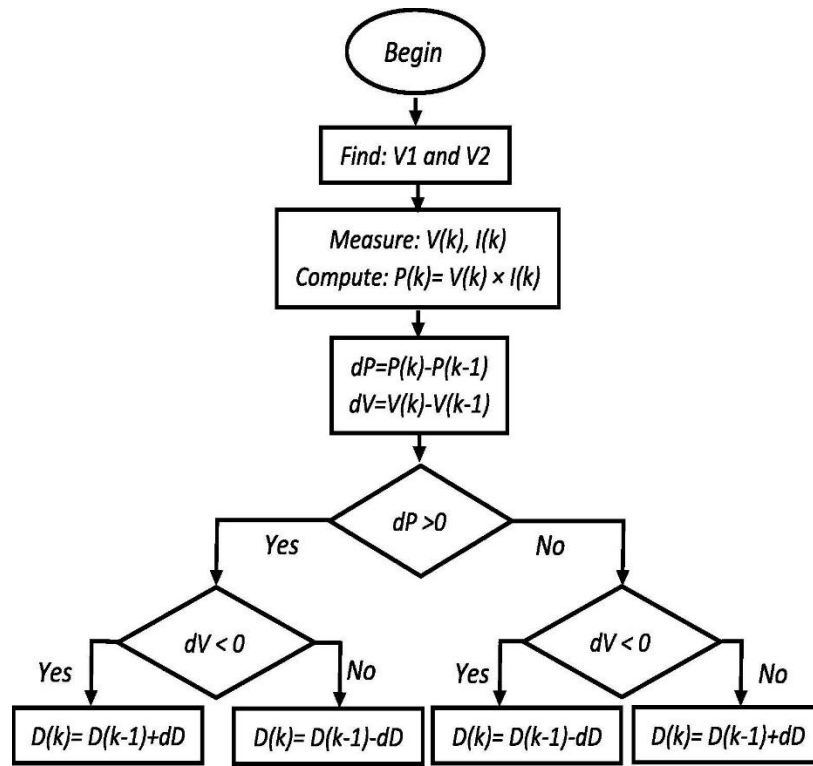
Όταν επιτευχθεί η σταθερή κατάσταση, ο αλγόριθμος ταλαντώνεται γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος. Για να διατηρηθεί η διακύμανση της ισχύος μικρή γύρω από την μέγιστη τιμή της (δηλ. $MPP=0$ και σφάλμα $steady\ state=0$), ο αλγόριθμος εισάγει έναν PI ελεγκτή.

Η τεχνική έχει εξελιχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να θέτει μια τάση αναφοράς που αντιστοιχεί στην τάση αιχμής της μονάδας. Παρατηρείται κάποια απώλεια ισχύος λόγω αυτής της διαταραχής και επίσης, η μονάδα αδυνατεί να παρακολουθήσει τη μέγιστη ισχύ υπό ταχέως μεταβαλλόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Παρ' όλα τα μειονεκτήματα, η μέθοδος αυτή παραμένει δημοφιλής και απλή στην υλοποίησή της.[7.3] Επίσης, οι τεχνικές αυτές είναι αποδοτικές μόνο όταν στις χαρακτηριστικές καμπύλες υπάρχει ένα και μοναδικό MPP, διαφορετικά δεν συγκλίνει στο ολικό μέγιστο (GPPT) αλλά εγκλωβίζεται σε τοπικό μέγιστο (LPPT).



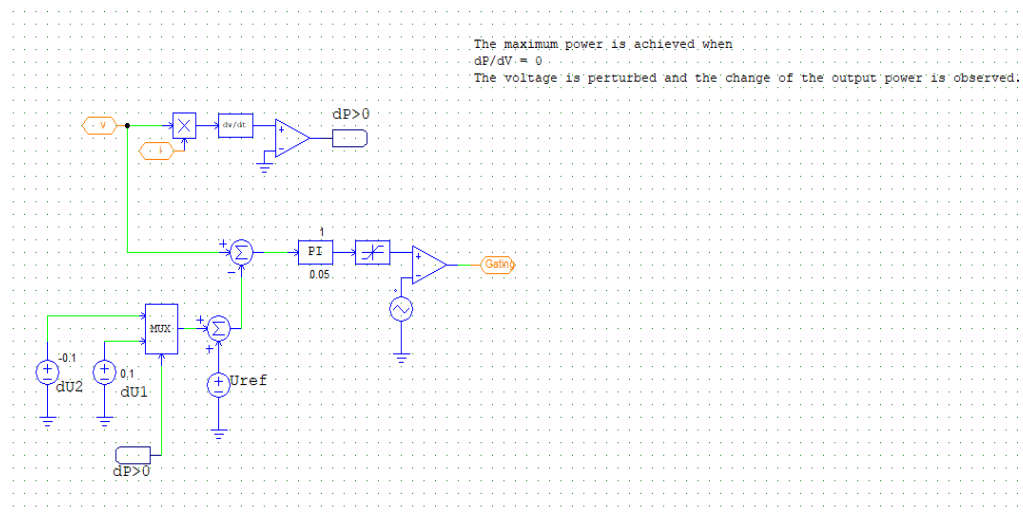
Καμπύλη 12. Αρχή λειτουργίας P&O αλγορίθμου. (Πηγή: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/18/3576/htm>)

Η παραπάνω καμπύλη μπορεί να μεταφερθεί σε διάγραμμα ροής (flow chart) όπως φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 40.



Εικόνα 40. Διάγραμμα ροής της μεθόδου Perturb and Observe. (Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S101836391730380X>)

Ο ελεγκτής που υλοποιεί το παραπάνω διάγραμμα ροής είναι αυτός που φαίνεται στην εικόνα 41, από την προσομοίωση στο PSIM.

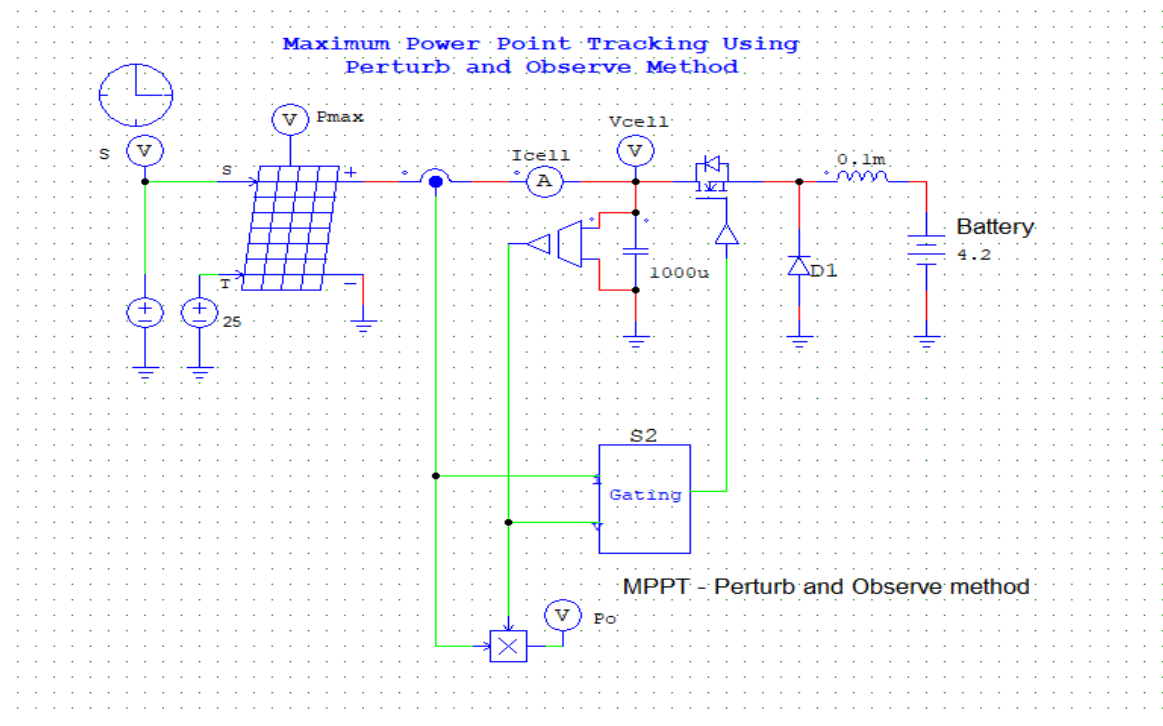


Εικόνα 41. Ελεγκτής MPPT - Perturb and Observe method

7.5 Πειραματικό μέρος

Στο πειραματικό μέρος θα λάβει χώρα η προσομοίωση και η επίδειξη των καμπυλών λειτουργίας του αλγορίθμου P&O χρησιμοποιώντας ένα φωτοβολταϊκό πάνελ (Εικόνα 42). Θα χρησιμοποιηθούν διάφορες τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία (S) και για την θερμοκρασία περιβάλλοντος (T). Οι τιμές αυτές θα εισαχθούν σε έναν πίνακα για την καλύτερη εξήγηση του αλγορίθμου αυτού.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η σχεδίαση της προσομοίωσης:

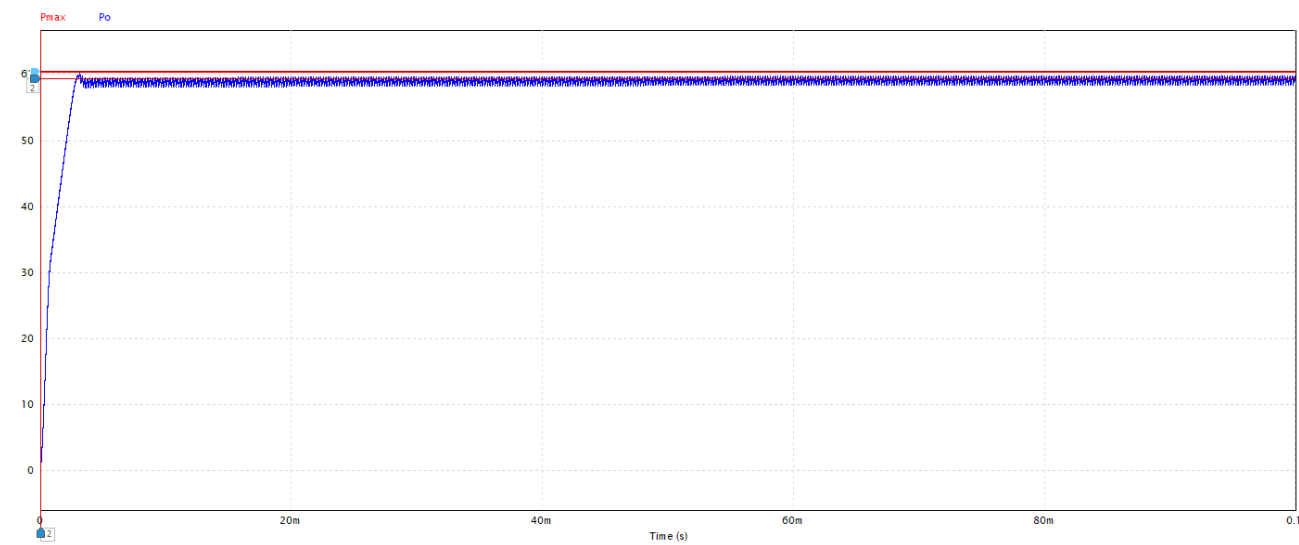


Εικόνα 42. Αλγόριθμος Perturb and Observe με ένα φωτοβολταϊκό πάνελ.

I. Ακτινοβολία $1000\text{W}/\text{m}^2$, θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C

Χρησιμοποιώντας την σχεδίαση στην εικόνα 42, η πρώτη προσομοίωση θα γίνει για ακτινοβολία $1000\text{W}/\text{m}^2$ και για θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C . Στο παραπάνω κύκλωμα χρησιμοποιείται στοιχείο μπαταρίας (4.2V) αντί για κυψέλη μπαταρίας Li-ion. Το βήμα προσομοίωσης που έχει επιλεγεί είναι $2\text{e}-06\text{sec}$ ($2 \times 10^{-6}\text{sec}$). Τα αποτελέσματα φαίνονται στις παρακάτω καμπύλες:

P_{max} & P_o



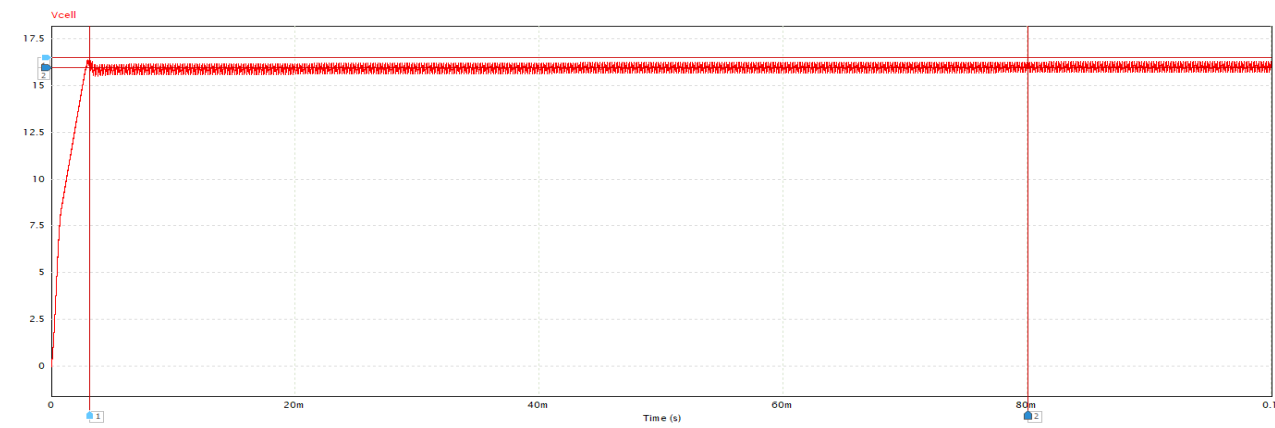
Καμπύλη 13. Γραφική παράσταση των ισχύων P_{max} και P_o.

Στην παραπάνω καμπύλη φαίνεται ότι η μέγιστη ισχύς **P_{max}** φτάνει τα 60.53W. Ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει είναι 3ms. Η καμπύλη για την ισχύ **P_o**, δείχνει την πορεία της ισχύος μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τιμή της P_{max} (πραγματική ισχύς). Η τιμή της (P_o) σταθεροποιείται στα 59.1W. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	X1	X2
Time	3.09ms	10.0ms
P_{max}	60.53	60.53
P_o	59.8	59.16
Vertical:	Y1	Y2
	59.8	58.5

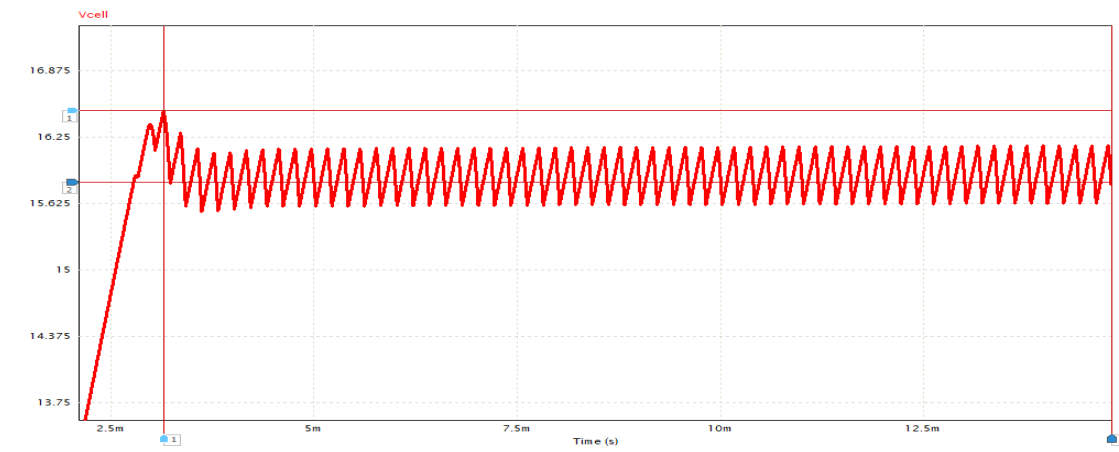
Εικόνα 43. Πίνακας τιμών των ισχύων P_{max} και P_o.

V_{cell}



Καμπύλη 14a. Γραφική παράσταση της τάσης V_{cell}.

Όπως φαίνεται από την καμπύλη 14α, στα πρώτα 3ms (χρόνος ανόδου) η τάση Vcell (τάση κελιού) φτάνει στα **16.5Volt** και στη συνέχεια σταθεροποιείται στα **15.8Volt**. Γύρω από αυτή την τάση έχουμε έντονη ταλάντωση όπως προβλέπεται και από τον αλγόριθμο P&O, που όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι ένα από τα μειονεκτήματά του. Οι τιμές της τάσης για διάφορες χρονικές στιγμές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (εικόνα 44). Στην καμπύλη 14β, φαίνεται σε μεγέθυνση η ταλάντωση της τάσης:

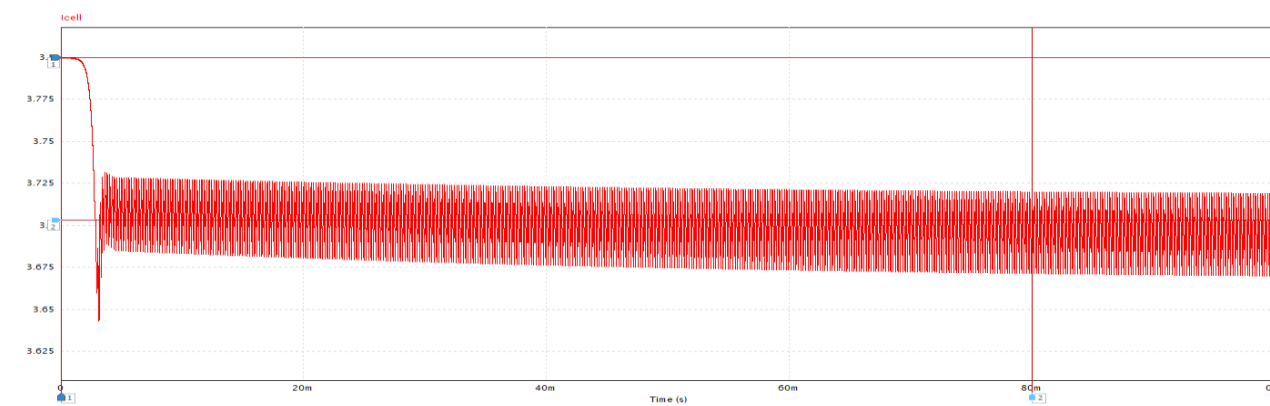


Καμπύλη 14β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση της τάσης Vcell.

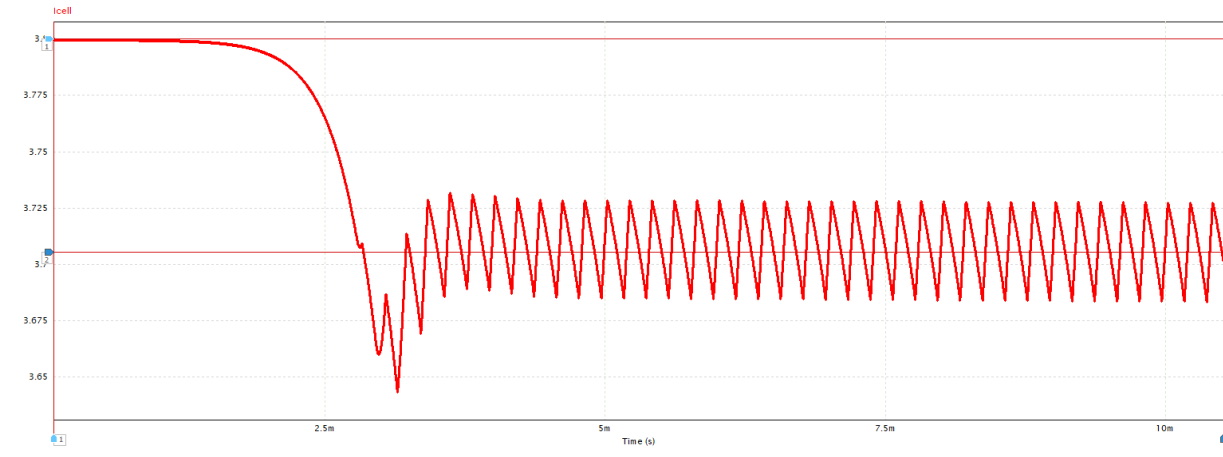
	X1	X2
Time	3.14ms	10.0ms
Vcell	16.5	15.9
Vertical:	Y1	Y2
	16.5	15.8

Εικόνα 44. Πίνακας τιμών της τάσης Vcell.

Icell



Καμπύλη 15α. Γραφική παράσταση του ρεύματος Icell.



Καμπύλη 15β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση του ρεύματος Icell.

Στην καμπύλη 15α, φαίνεται το ρεύμα του κελιού **Icell**. Από τα **3.8A** πέφτει στα **3.6A**, μέσα σε 3ms. Σταθεροποιείται γύρω από την τιμή **3.7A**. Η κλίμακα που χρησιμοποιήσαμε μάς δίνει την δυνατότητα να δούμε αυτή τη μικρή πτώση του ρεύματος.

Τα αποτελέσματα είναι συγκεντρωμένα στον παρακάτω πίνακα (εικόνα 45):

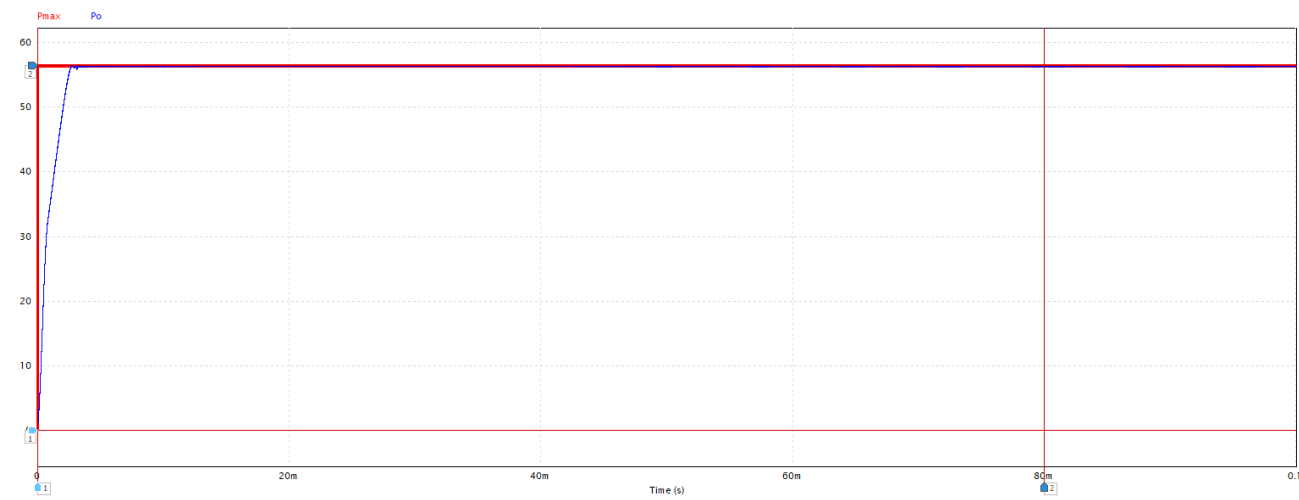
	X1	X2
Time	0.00	10.0ms
Icell	3.79	3.70
Vertical:	Y1	Y2
	3.79	3.70

Εικόνα 45. Πίνακας τιμών του ρεύματος Icell.

Το συμπέρασμα από αυτό το πείραμα για τις τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που θέσαμε εξαρχής, δείχνει ότι ο αλγόριθμος P&O λειτουργεί όπως είχε προβλεφθεί από την θεωρητική ανάλυση. Ακολουθεί, δηλαδή, τη μέγιστη τιμή ισχύος P_{max} . Αυτό συμβαίνει για ομοιόμορφη ακτινοβολία (σκίαση). Παρακάτω θα επαναλάβουμε την ίδια προσομοίωση για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

II. Ακτινοβολία 1000W/m^2 και θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C .

P_{max} & P_o



Καμπύλη 16. Γραφική παράσταση των ισχύων P_{max} και P_o .

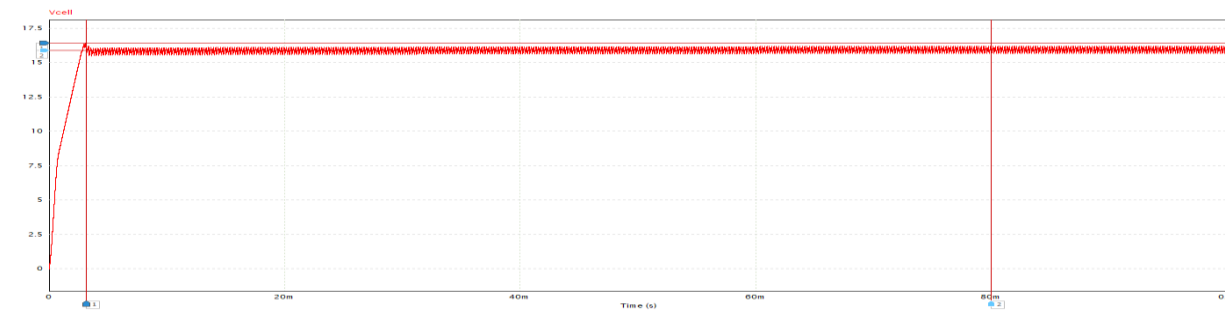
Σε αυτή την θερμοκρασία υπάρχει μία μικρή μείωση της ισχύος P_{max} στα **56.5W**. Αυτό συμβαίνει γιατί η θερμοκρασία επηρεάζει την τάση και το ρεύμα του ηλιακού συλλέκτη. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, μειώνεται η ποσότητα ενέργειας που παράγει ένα πάνελ. Η τάση μειώνεται γραμμικά ενώ η ένταση αυξάνεται εκθετικά. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της αντίστασης. Οι υψηλές θερμοκρασίες επιβραδύνουν την ταχύτητα του ηλεκτρικού ρεύματος. Ομοίως, καθώς μειώνεται η θερμοκρασία, η αντίσταση μειώνεται και η παραγωγή ενέργειας αυξάνεται. Η βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι οι **25 βαθμοί °C**.

Οι τιμές της ισχύος P_{max} φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

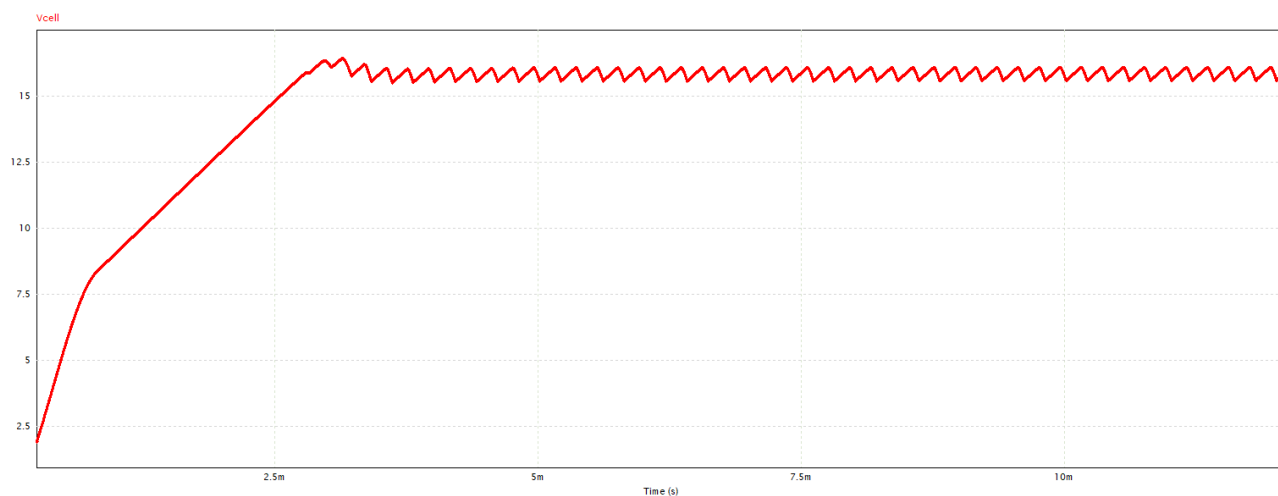
	X1	X2
Time	4.0ms	10.0ms
P_{max}	56.5	56.5
P_o	56.5	56.5

Εικόνα 46. Πίνακας τιμών των ισχύων P_{max} και P_o .

V_{cell}



Καμπύλη 17α. Γραφική παράσταση της τάσης Vcell.



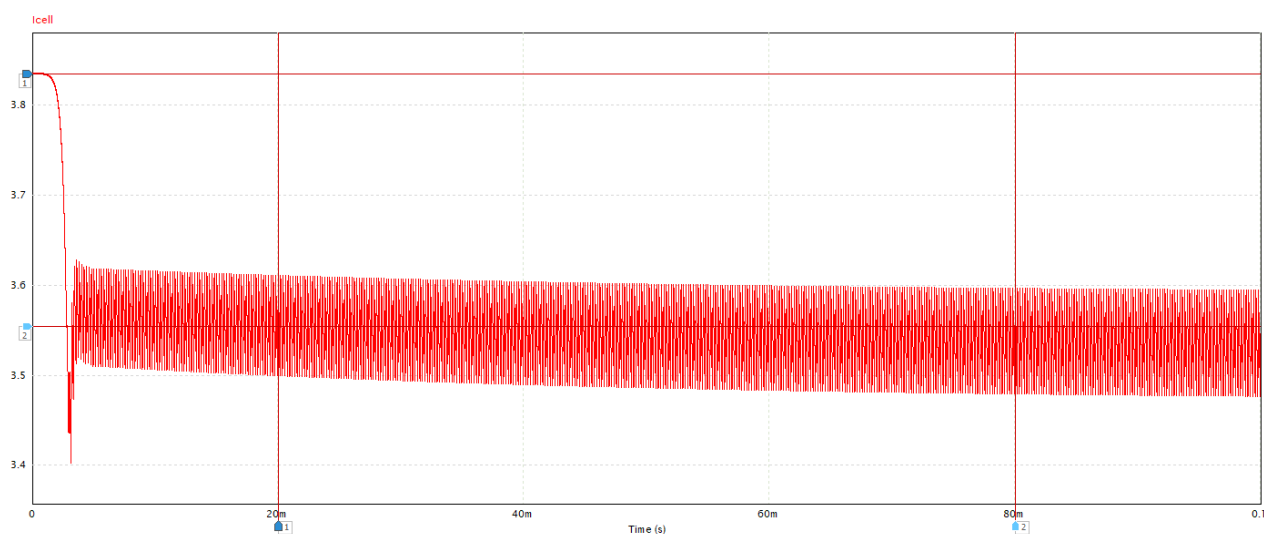
Καμπύλη 17β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση της τάσης Vcell.

Παρατηρείται μία μικρή μείωση της τάσης, όπως φαίνεται από τις τιμές του παρακάτω πίνακα.

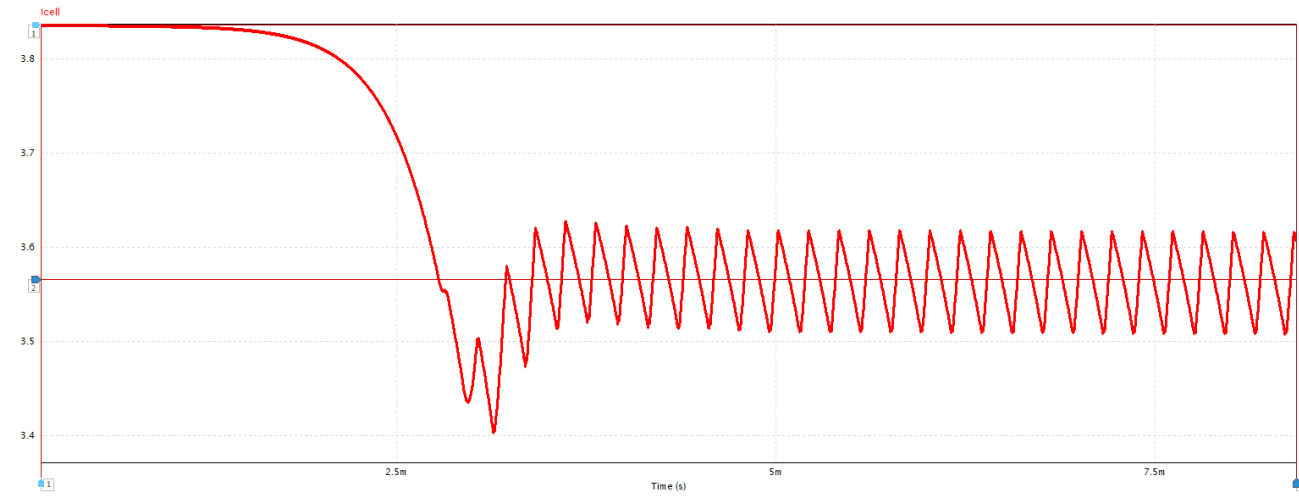
	X1	X2
Vcell	16.4	15.8
Vertical:	Y1	Y2
	16.43	15.89

Εικόνα 47. Πίνακας τιμών της τάσης Vcell.

Icell



Καμπύλη 18α. Γραφική παράσταση του ρεύματος Icell.



Καμπύλη 18β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση του ρεύματος I_{cell} .

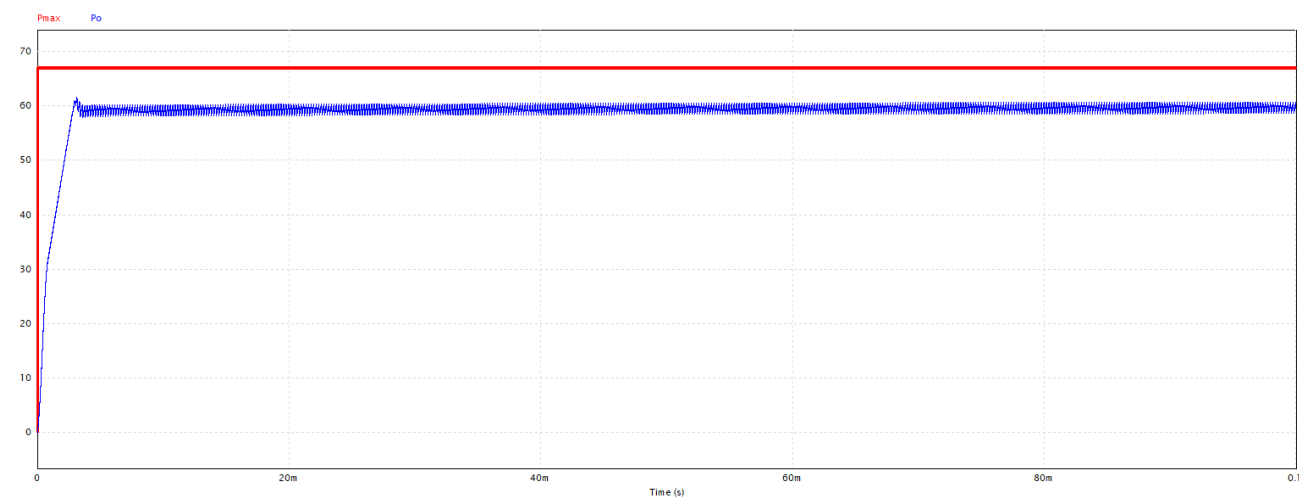
Στην καμπύλη του ρεύματος I_{cell} , έχουμε μία μικρή άνοδο του ρεύματος, όπως φαίνεται από τις τιμές του παρακάτω πίνακα (εικόνα 46). Ξεκινάει από τα **3.8A** και σταθεροποιείται στα **3.55A**.

	X1	X2
Time	2.00ms	10.0ms
I_{cell}	3.57	3.55
Vertical:	Y1	Y2
	3.83	3.55

Εικόνα 46. Πίνακας τιμών του ρεύματος I_{cell} .

III. Ακτινοβολία $1000W/m^2$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος $0^{\circ}C$.

P_{max} & P_o



Καμπύλη 19. Γραφική παράσταση των ισχύων P_{max} και P_o .

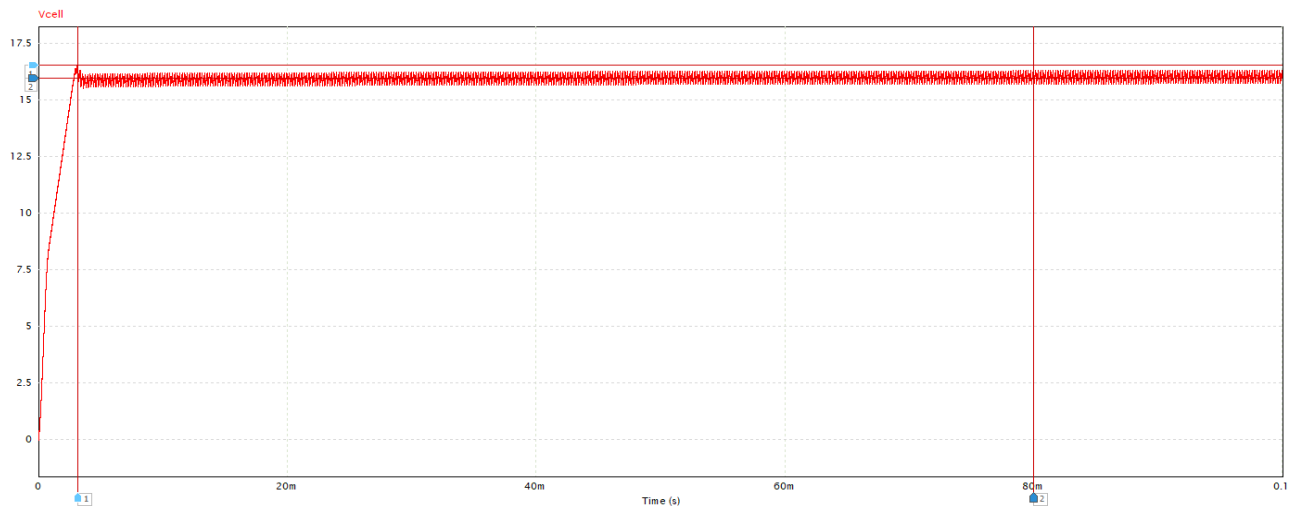
Από τη καμπύλη της ισχύος P_{max} και P_o αλλά και από τον παρακάτω πίνακα τιμών, για μηδενική θερμοκρασία η ισχύς P_{max} έχει αυξηθεί στα **67.1W**. Η P_o ακολουθεί μέχρι τα **60.8W** (ονομαστική ισχύς πάνελ) και σταθεροποιείται στο **59.6W**.

Από αυτό συμπεραίνεται ότι, ακόμη και σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας, οι ηλιακοί συλλέκτες μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Επειδή οι ηλιακοί συλλέκτες απορροφούν ενέργεια από το άφθονο φως του ήλιου, όχι από τη θερμότητα του ήλιου. Στην πραγματικότητα, τα ψυχρά κλίματα είναι ιδανικά για την απόδοση των ηλιακών συλλεκτών. Όσο το ηλιακό φως προσπίπτει σε έναν ηλιακό συλλέκτη, αυτός θα παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Οποιαδήποτε μειωμένη παραγωγή κατά τους χειμερινούς μήνες θα οφείλεται κυρίως στο βαρύ χιόνι και στις μικρότερες ώρες φωτός της ημέρας [7.4].

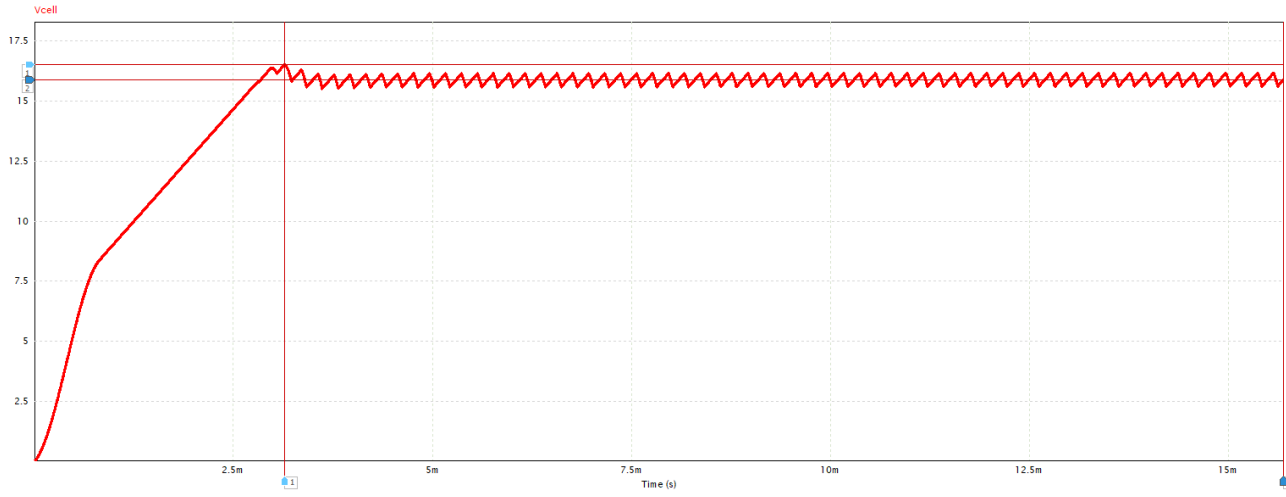
	X1	X2
Time	3ms	10ms
Pmax	67.1	67.1
Po	60.8	59.6
Vertical:	Y1	Y2
	66.6	59.6

Εικόνα 47. Πίνακας τιμών των ισχύων P_{max} και P_o .

Vcell



Καμπύλη 20α. Γραφική παράσταση της τάσης V_{cell} .



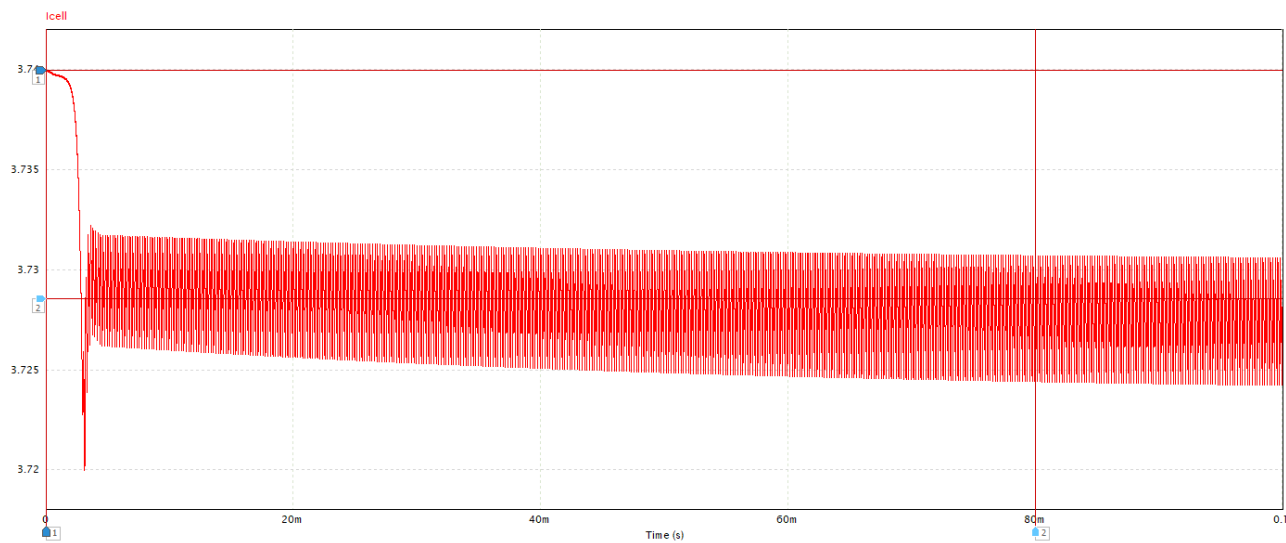
Καμπύλη 20β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση της τάσης Vcell.

Η τάση στην περίπτωση αυτή έχει ανέβει ελαφρώς στην τιμή **15.9V**. Αυτό φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

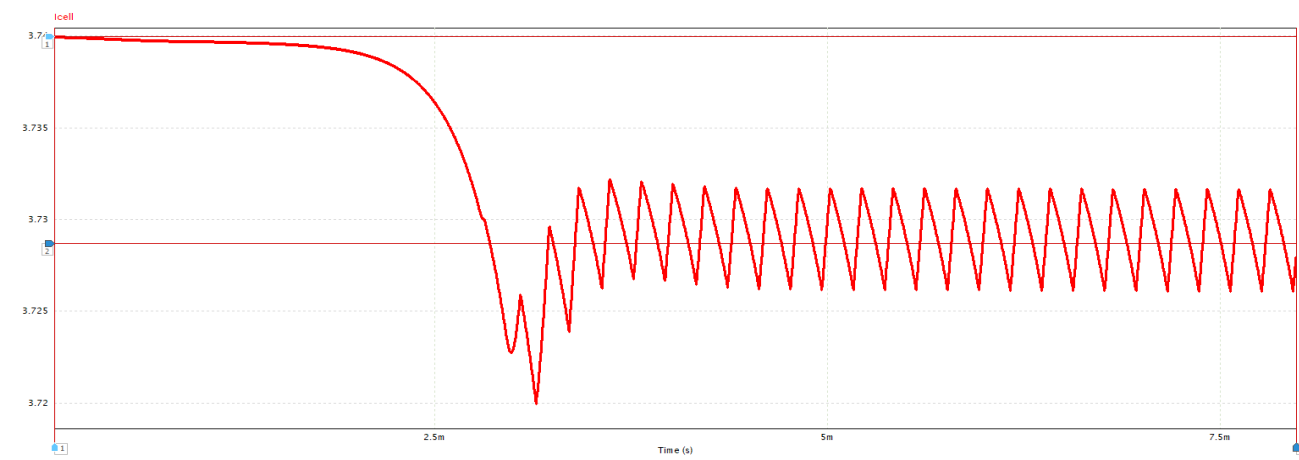
	X1	X2
Time	3.14	10.0
Vcell	16.54	15.95
Vertical:	Y1	Y2
	16.54	15.95

Εικόνα 48. Πίνακας τιμών για την τάση Vcell.

Icell



Καμπύλη 21α. Γραφική παράσταση του ρεύματος Icell.



Καμπύλη 21β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση του ρεύματος I_{cell} .

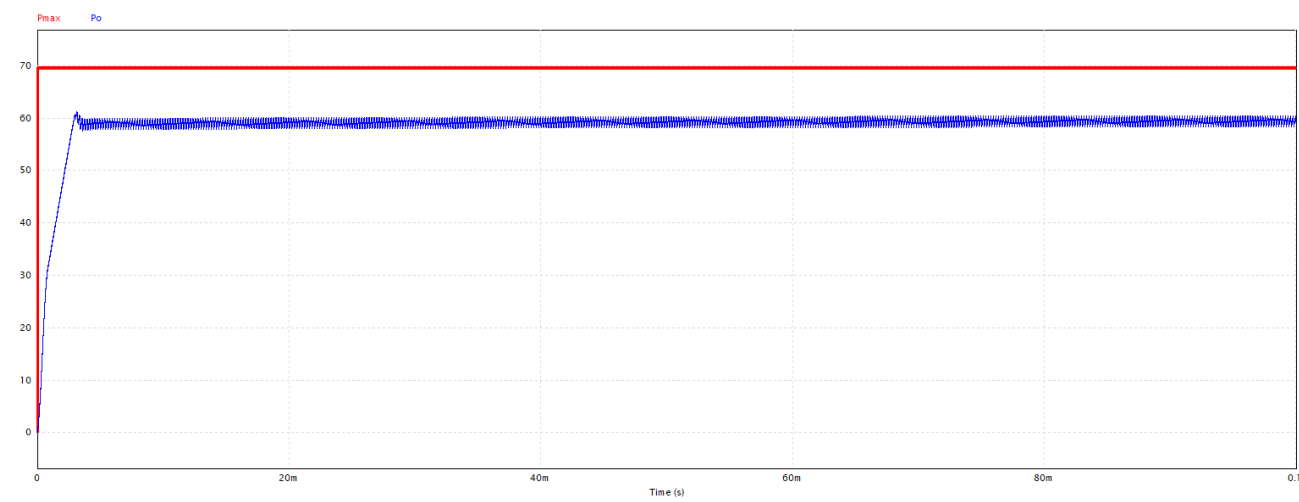
Όπως παραπάνω αναφέρθηκε η άνοδος της τάσης, έτσι και η ένταση (εικόνα 50) έχει αυξηθεί ελαφρώς. Έχει σταθεροποιηθεί στην τιμή 3.7A.

	X1	X2
Time	2.00ms	10.0ms
I_{cell}	3.73	3.72
Vertical:	Y1	Y2
	3.73	3.72

Εικόνα 49. Πίνακας τιμών του ρεύματος I_{cell} .

IV. Ακτινοβολία $1000W/m^2$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος $-10^{\circ}C$.

P_{max} & P_o



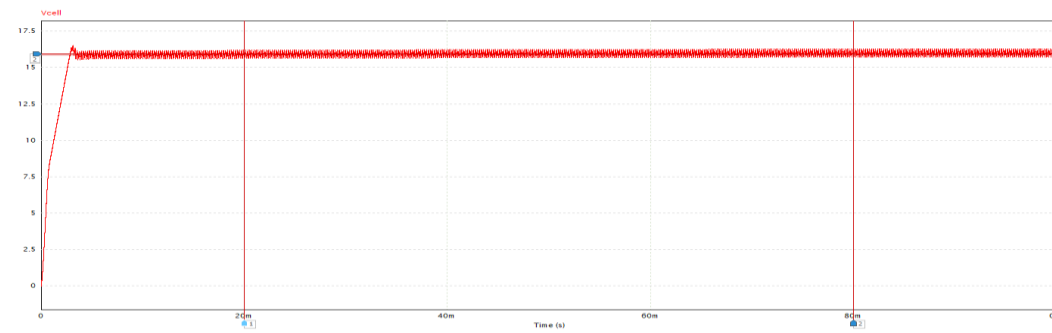
Καμπύλη 22. Γραφική παράσταση των ισχύων P_{max} και P_o .

Στη θερμοκρασία -10°C , η ισχύς έχει αυξηθεί στα **69.7W**. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι ηλιακοί συλλέκτες απορροφούν ενέργεια από το άφθονο φως του ήλιου, όχι από τη θερμότητα του ήλιου. Στην πραγματικότητα, τα ψυχρά κλίματα είναι ιδανικά για την απόδοση των ηλιακών συλλεκτών. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

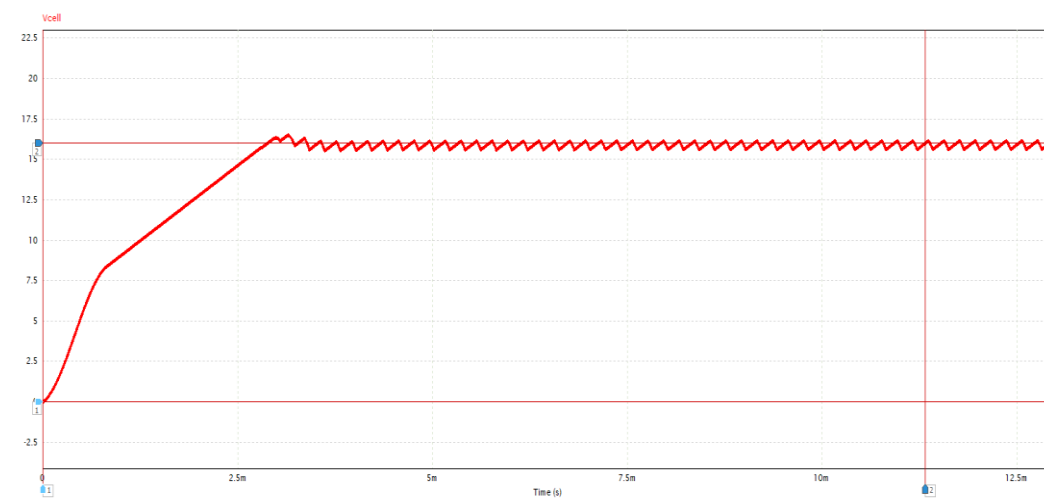
	X1	X2
Time	4.00ms	10.0ms
Pmax	69.70	69.70
Vertical:	Y1	Y2
Po	60.20	58.90

Εικόνα 50. Πίνακας τιμών των ισχύων P_{max} και P_o .

Vcell



Καμπύλη 23α. Γραφική παράσταση της τάσης Vcell.



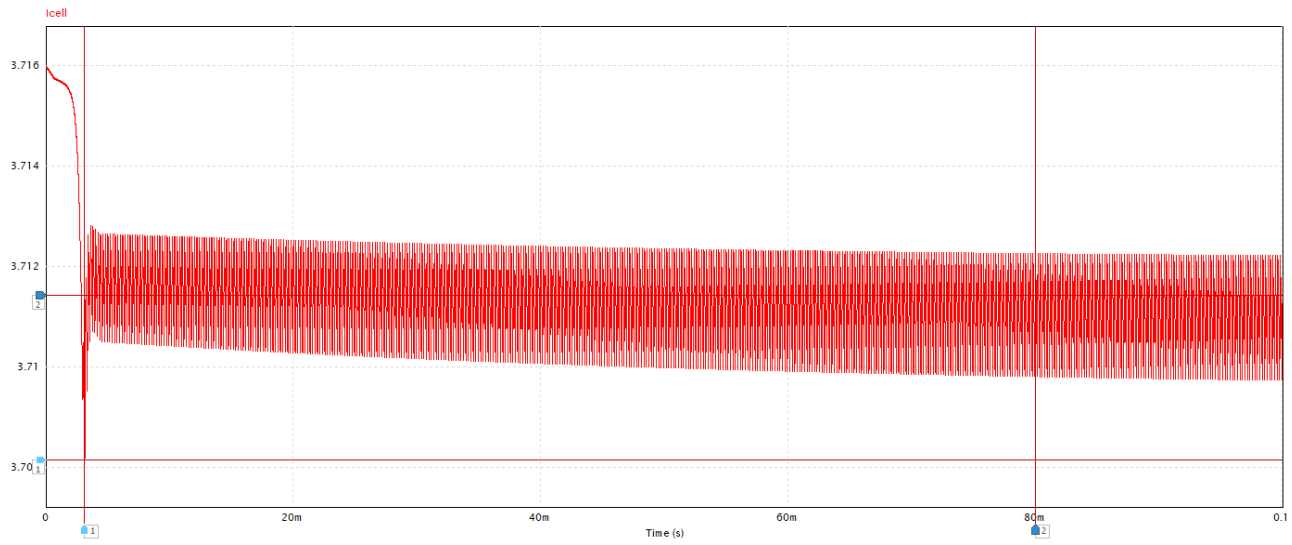
Καμπύλη 23β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση της τάσης Vcell.

Η τάση Vcell είναι ίδια με τη περίπτωση (III), όπως φαίνεται από την παραπάνω καμπύλη και τον πίνακα (εικόνα 52):

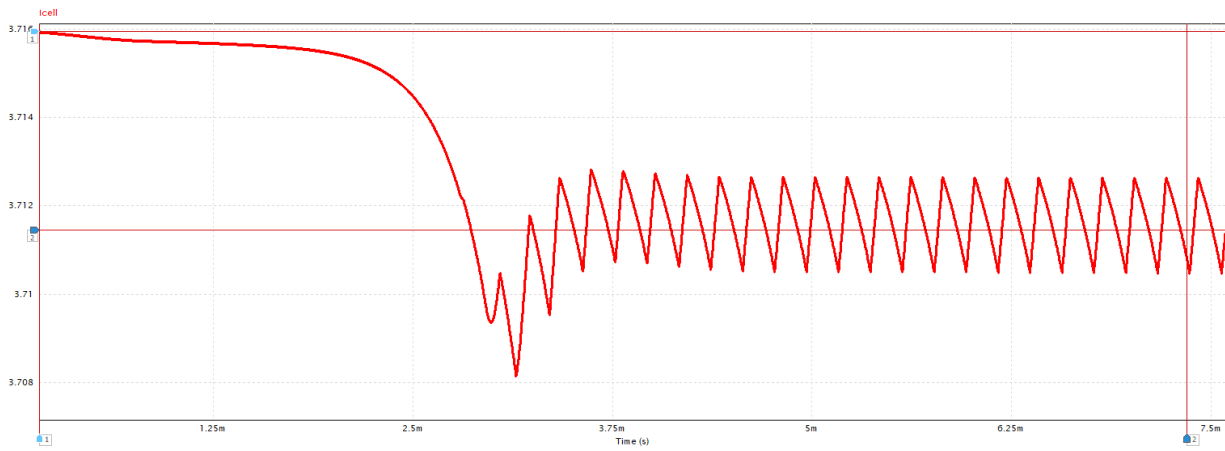
	X1	X2
Time	20.0ms	10.00ms
Vcell	15.85	15.95
Vertical:	Y1	Y2
	15.85	15.95

Εικόνα 51. Πίνακας τιμών της τάσης Vcell.

Icell



Καμπύλη 24α. Γραφική παράσταση του ρεύματος Icell.



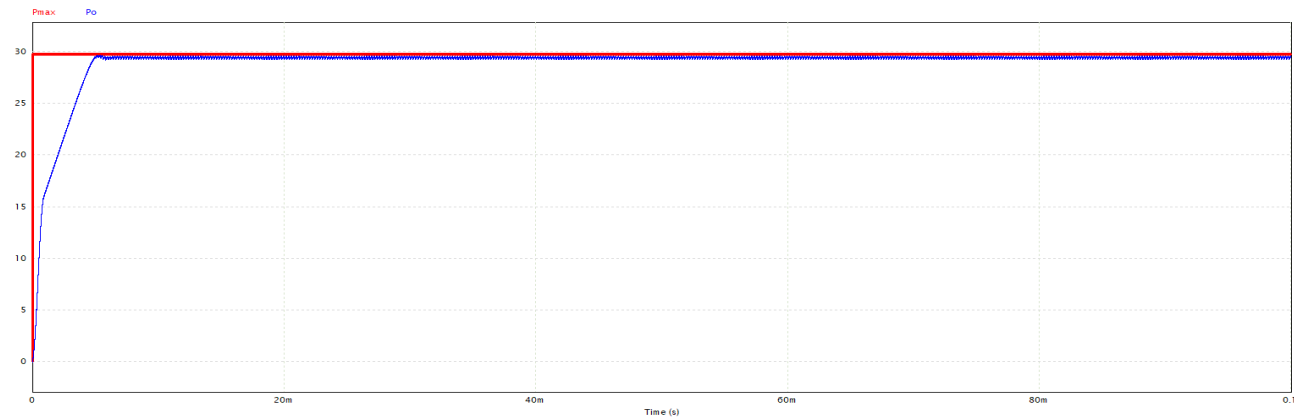
Καμπύλη 24β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση του ρεύματος Icell.

	X1	X2
Time	3.14ms	10.0ms
I_{cell}	3.70	3.71
Vertical:	Y1	Y2
	3.70	3.71

Εικόνα 52. Πίνακας τιμών του ρεύματος I_{cell}.

V. Ακτινοβολία 500W/m² και θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C.

P_{max} & P_o

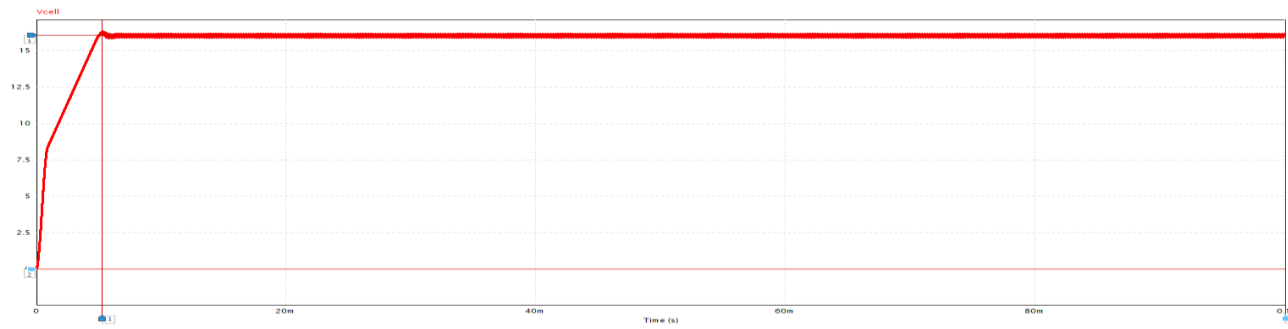


Καμπύλη 25. Γραφική παράσταση των ισχύων P_{max} και P_o.

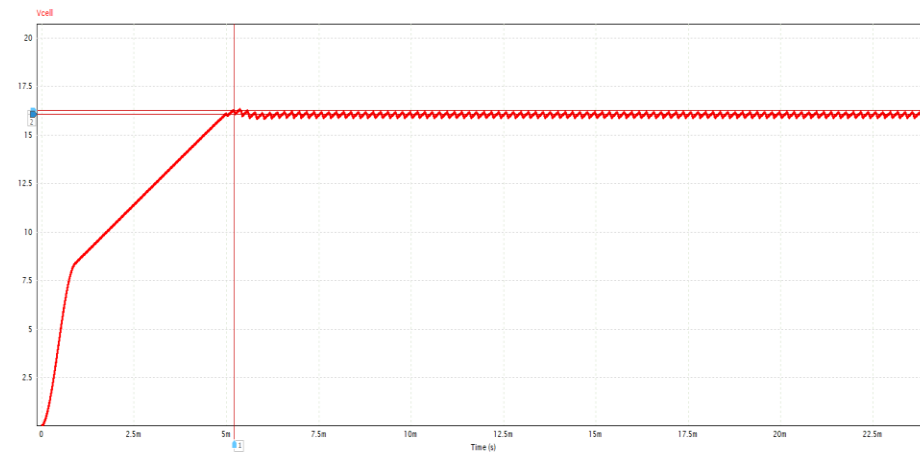
	X1	X2
Time	4.00ms	10.0ms
P_{max}	29.80	29.80
Vertical:	Y1	Y2
P_o	29.80	29.80

Εικόνα 53. Πίνακας τιμών των ισχύων P_{max} και P_o.

Vcell



Καμπύλη 26α. Γραφική παράσταση της τάσης Vcell.

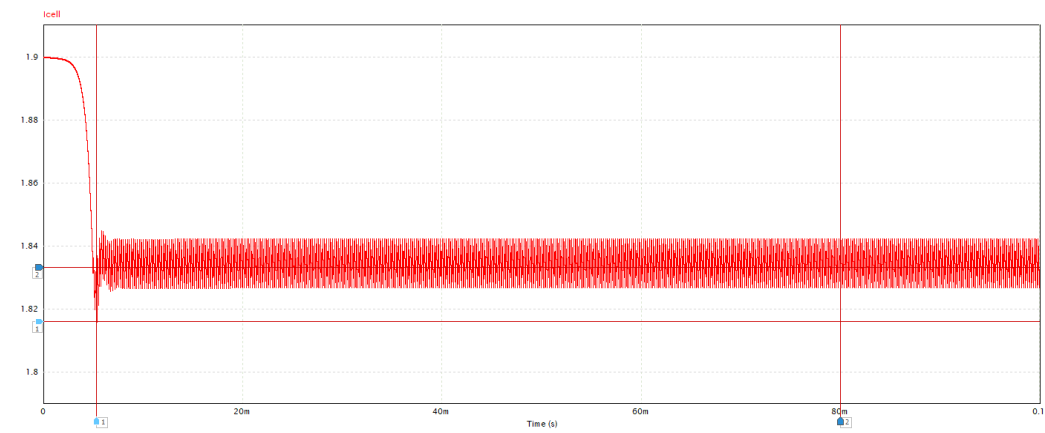


Καμπύλη 26β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση της τάσης Vcell.

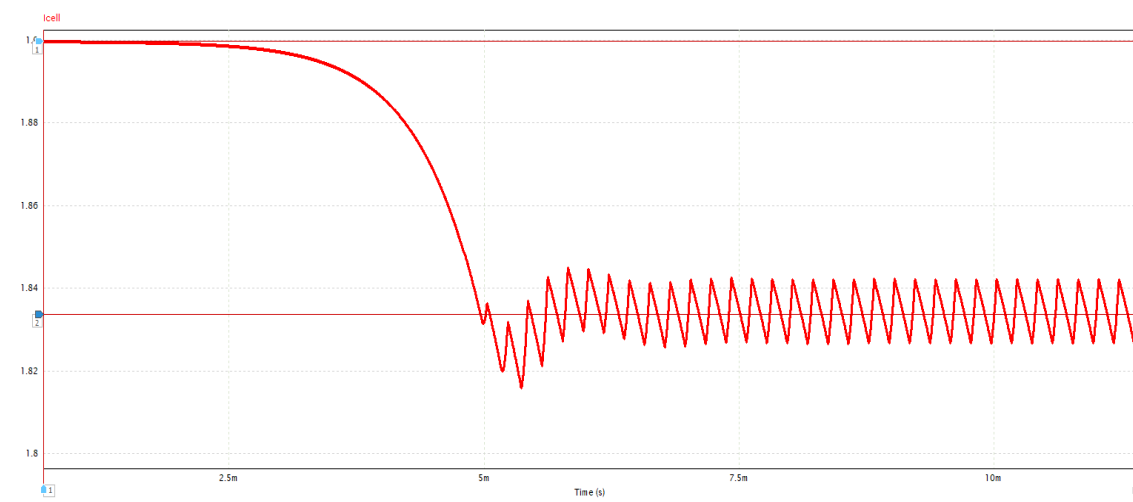
	X1	X2
Time	5.22ms	24.03ms
Vcell	16.1	15.9
Vertical:	Y1	Y2
	16.2	16.04

Εικόνα 54. Πίνακας τιμών της τάσης Vcell.

Icell



Καμπύλη 27α. Γραφική παράσταση του ρεύματος Icell.



Καμπύλη 27β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση του ρεύματος Icell.

	X1	X2
Time	5.36ms	10.0ms
Icell	1.89	1.83
Vertical:	Y1	Y2
	1.89	1.83

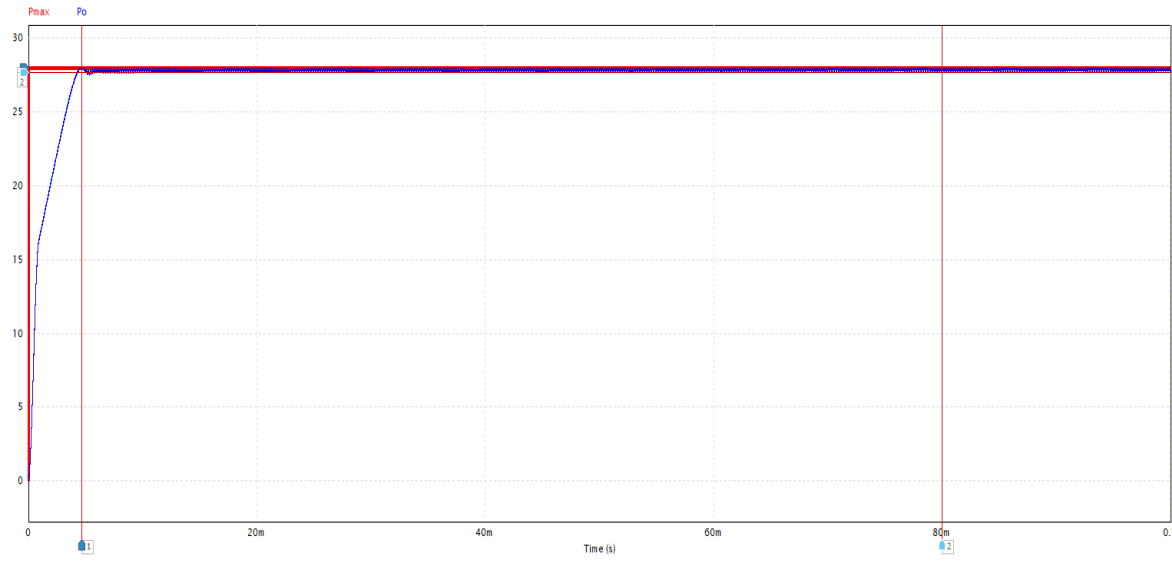
Εικόνα 55. Πίνακας τιμών του ρεύματος Icell.

Από τις γραφικές παραστάσεις της ισχύος P_{max} και I_{cell} παρατηρούμε ότι υπάρχει σημαντική μείωση της ισχύς ($29.8W_{rms}$) και του ρεύματος ($1.8A_{rms}$) αντίστοιχα. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί η ένταση της ακτινοβολίας έχει μειωθεί στο μισό ($500W/m^2$). Η ισχύς που αποδίδει το φωτοβολταϊκό πάνελ είναι ανάλογο της ενέργειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (μέχρι μία ανώτατη τιμή). Μετά την τιμή αυτή η απόδοση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι, λοιπόν, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος αυτού, όταν μειώνεται στο μισό η ακτινοβολία μειώνεται και η

παραγόμενη ισχύς. Ο αλγόριθμος P&O είναι επιρρεπής στην αλλαγή της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Είναι, όμως, ο πιο απλός αλγόριθμος και υλοποιείται με μικρό κόστος.

VI. Ακτινοβολία $500\text{W}/\text{m}^2$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C .

P_{max} & P_o

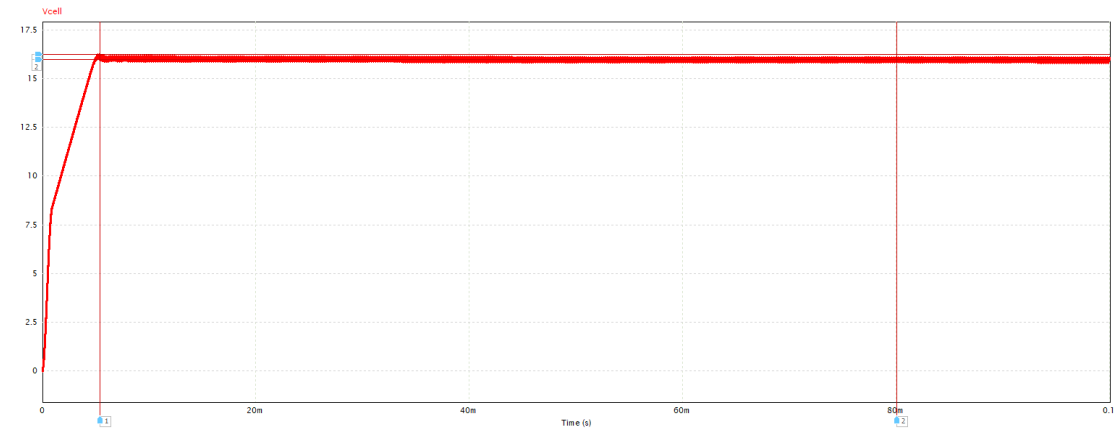


Καμπύλη 28. Γραφική παράσταση των ισχύων P_{max} και P_o.

	X1	X2
Time	4.64ms	10.0ms
P_{max}	27.9	27.9
P_o	27.9	27.8
Vertical:	Y1	Y2
	27.9	27.6

Εικόνα 56. Πίνακας τιμών των ισχύων P_{max} και P_o.

Vcell

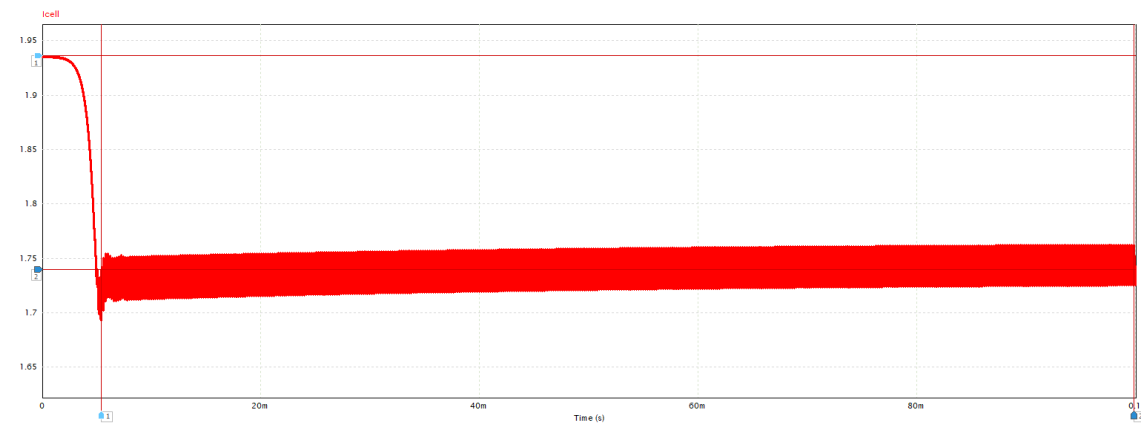


Καμπύλη 29. Γραφική παράσταση της τάσης Vcell.

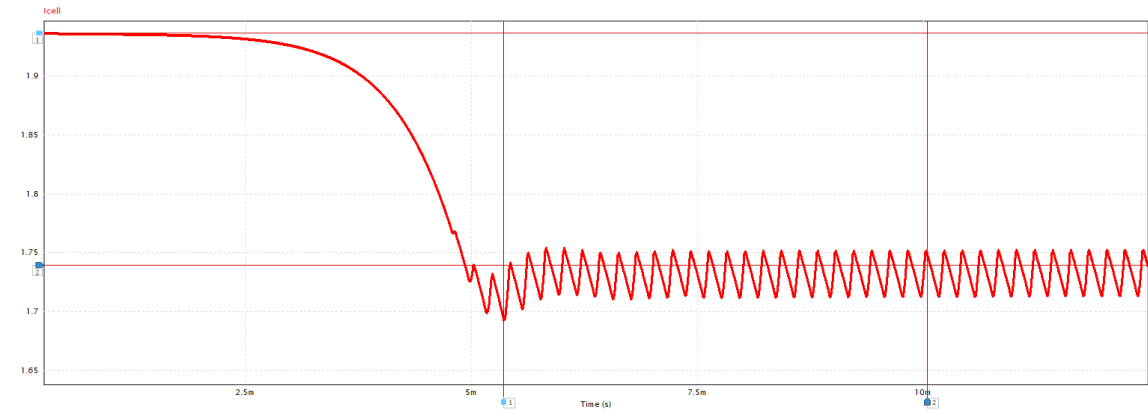
	X1	X2
Time	5.35ms	10.0ms
Vcell	16.2	16.03
Vertical:	Y1	Y2
	16.2	16.03

Εικόνα 57. Πίνακας τιμών της τάσης Vcell.

Icell



Καμπύλη 30α. Γραφική παράσταση του ρεύματος Icell.



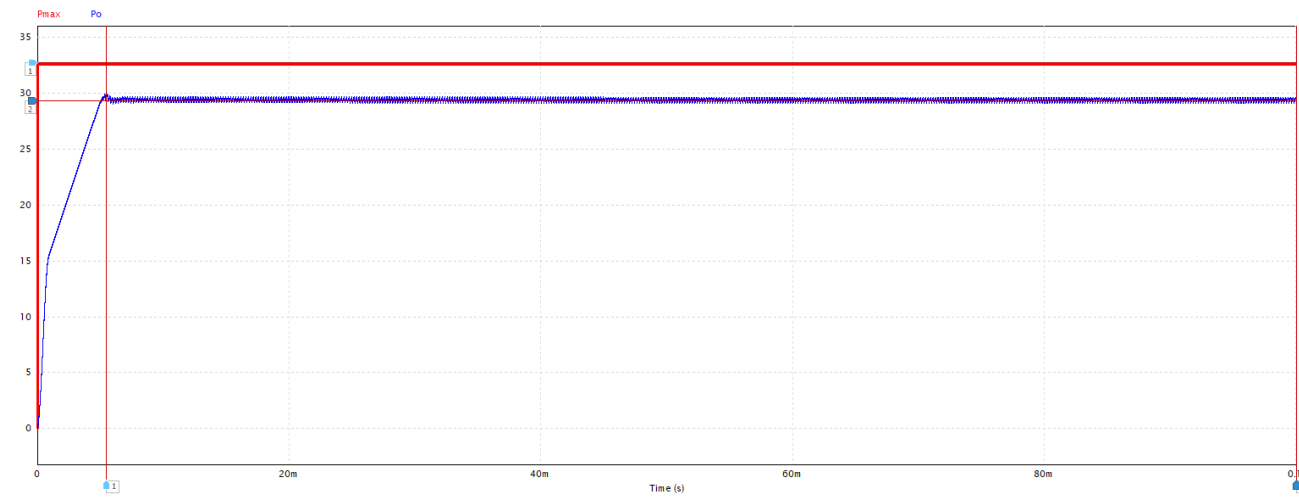
Καμπύλη 30β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση του ρεύματος Icell.

	X1	X2
Time	5.35ms	10.0ms
Icell	16.9	17.4
Vertical:	Y1	Y2
	1.93	1.73

Εικόνα 58. Πίνακας τιμών του ρεύματος Icell.

VII. Ακτινοβολία $500\text{W}/\text{m}^2$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος 0°C .

P_{max} & P_o

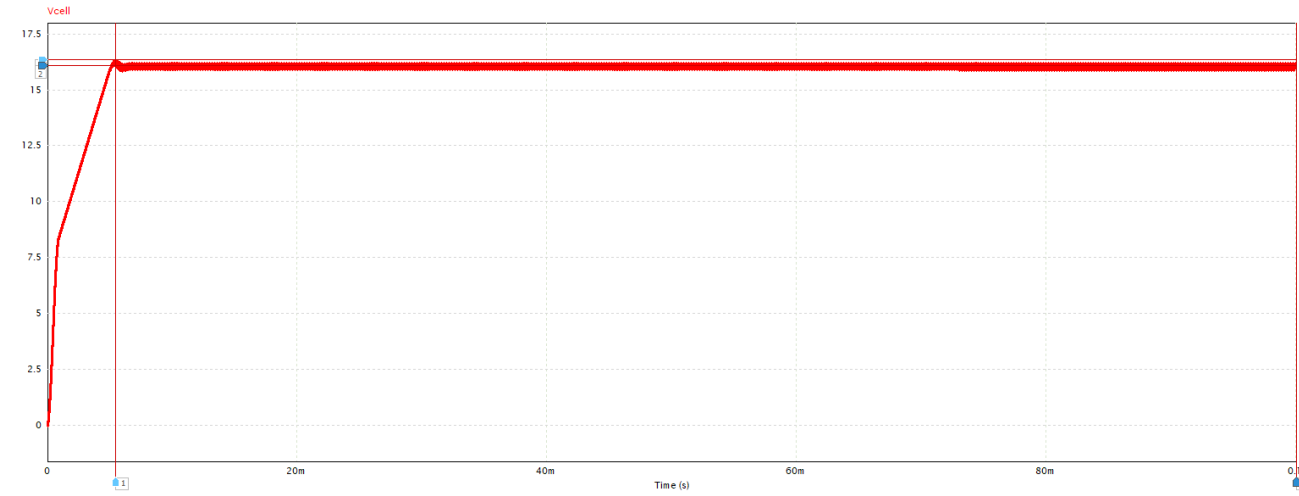


Καμπύλη 31. Γραφική παράσταση των ισχύων Pmax και Po.

	X1	X2
Time	5.44ms	10.0ms
Pmax	32.6	32.6
Po	29.5	29.4
Vertical:	Y1	Y2
	32.6	29.3

Εικόνα 58. Πίνακας τιμών των ισχύων Pmax και Po.

Vcell

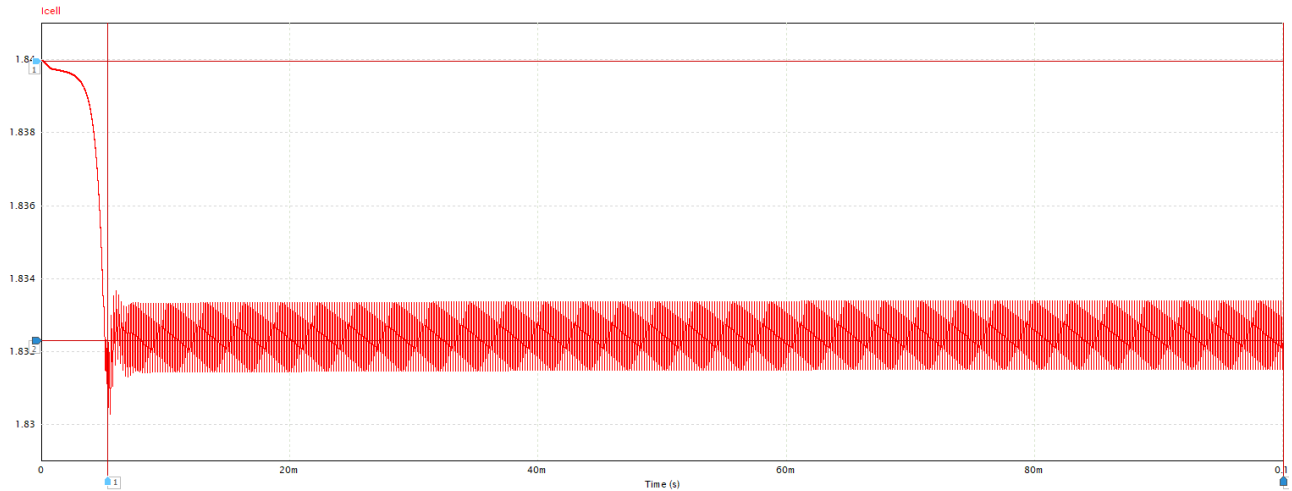


Καμπύλη 32. Γραφική παράσταση της τάσης Vcell.

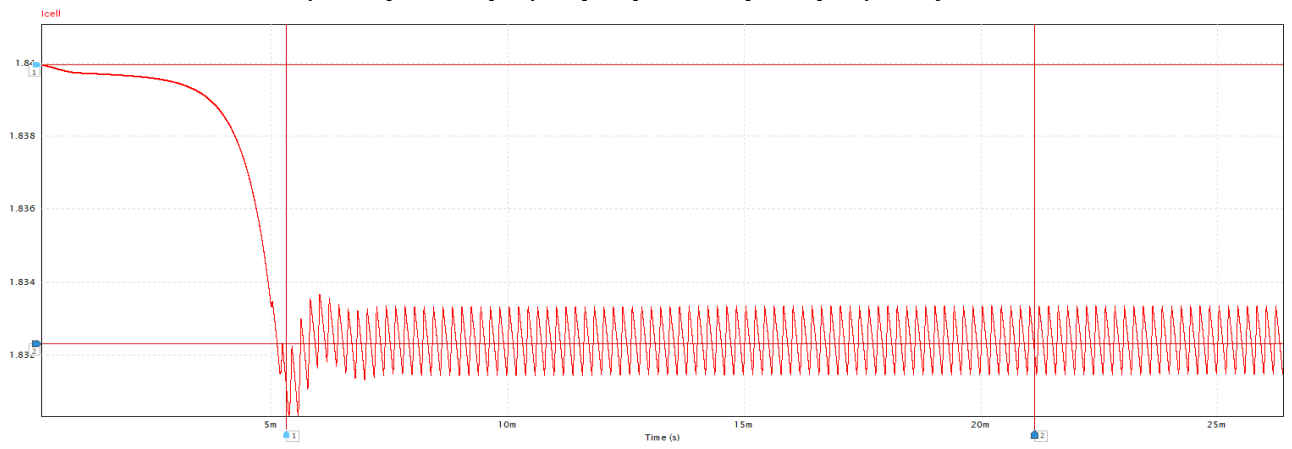
	X1	X2
Time	5.42ms	10.0ms
Vcell	16.1	16.0
Vertical:	Y1	Y2
	16.3	16.0

Εικόνα 59. Πίνακας τιμών της τάσης Vcell.

Icell



Καμπύλη 33α. Γραφική παράσταση του ρεύματος Icell.



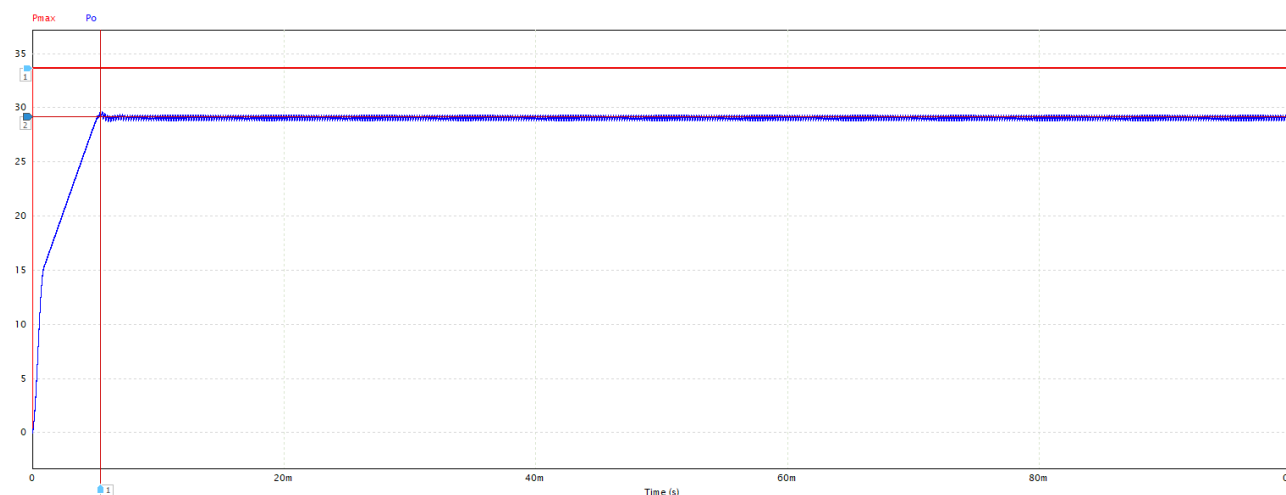
Καμπύλη 33β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση του ρεύματος Icell.

	X1	X2
Time	5.31ms	10.0ms
Icell	1.83	1.83
Vertical:	Y1	Y2
	1.83	1.83

Εικόνα 60. Πίνακας τιμών για το ρεύμα Icell.

VIII. Ακτινοβολία 500W/m^2 και θερμοκρασία περιβάλλοντος -10°C .

P_{max} & P_o

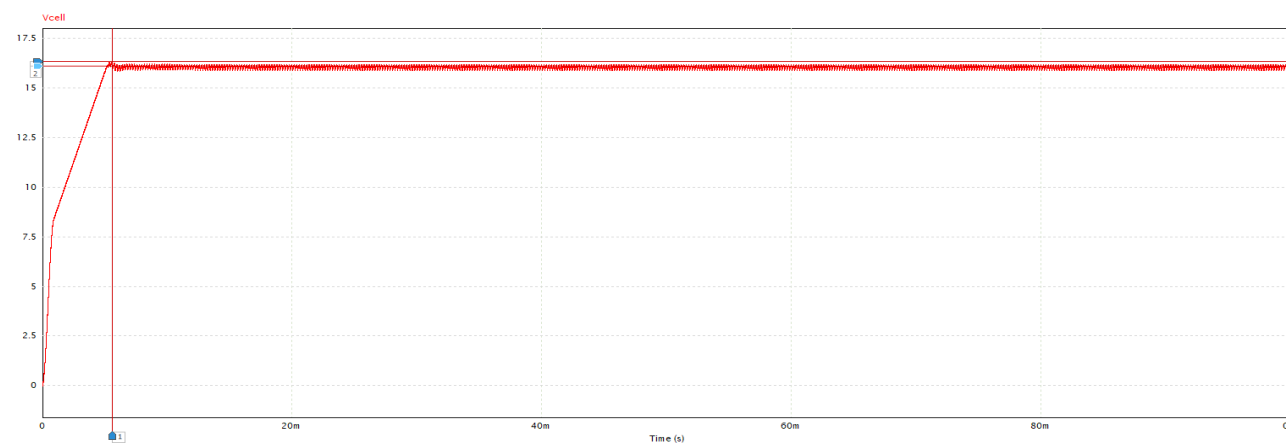


Καμπύλη 34. Γραφική παράσταση των ισχύων P_{max} και P_o .

	X1	X2
Time	5.37ms	10.0ms
P_{max}	33.7	33.7
P_o	29.5	2.9
Vertical:	Y1	Y2
	33.5	29.1

Εικόνα 61. Πίνακας τιμών των ισχύων P_{max} και P_o .

V_{cell}

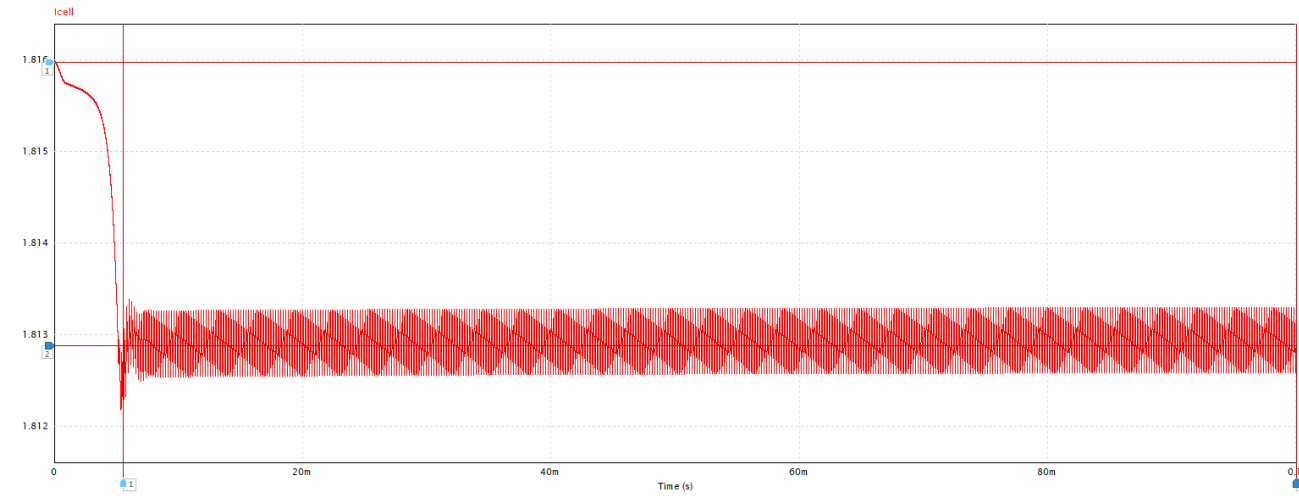


Καμπύλη 35. Γραφική παράσταση της τάσης V_{cell} .

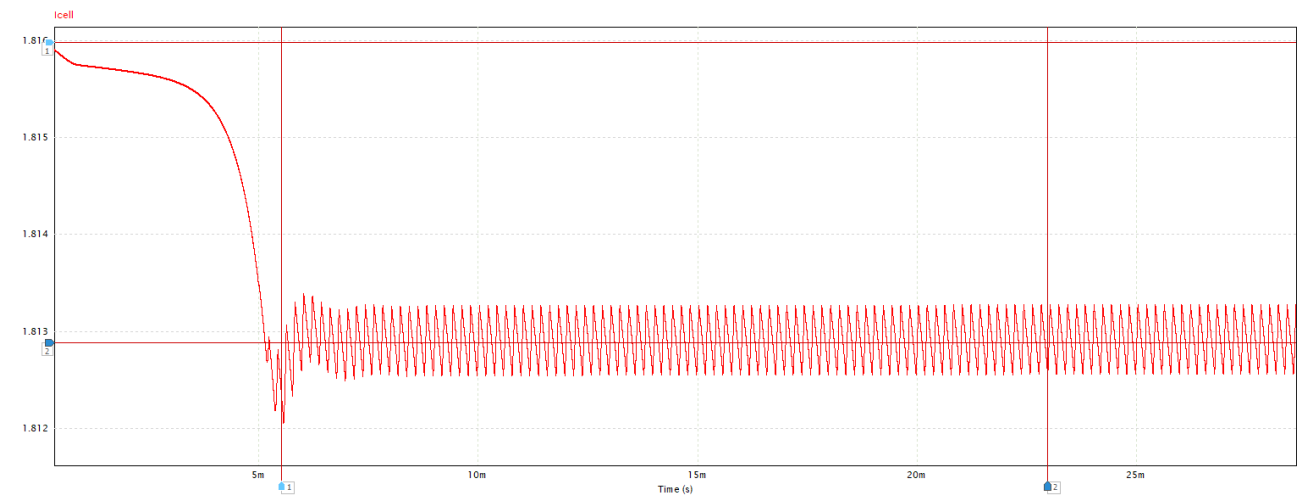
	X1	X2
Time	5.55ms	10.0ms
Vcell	16.3	16.0
Vertical:	Y1	Y2
	16.3	16.0

Εικόνα 61. Πίνακας τιμών της τάσης Vcell.

Icell



Καμπύλη 36α. Γραφική παράσταση του ρεύματος Icell.



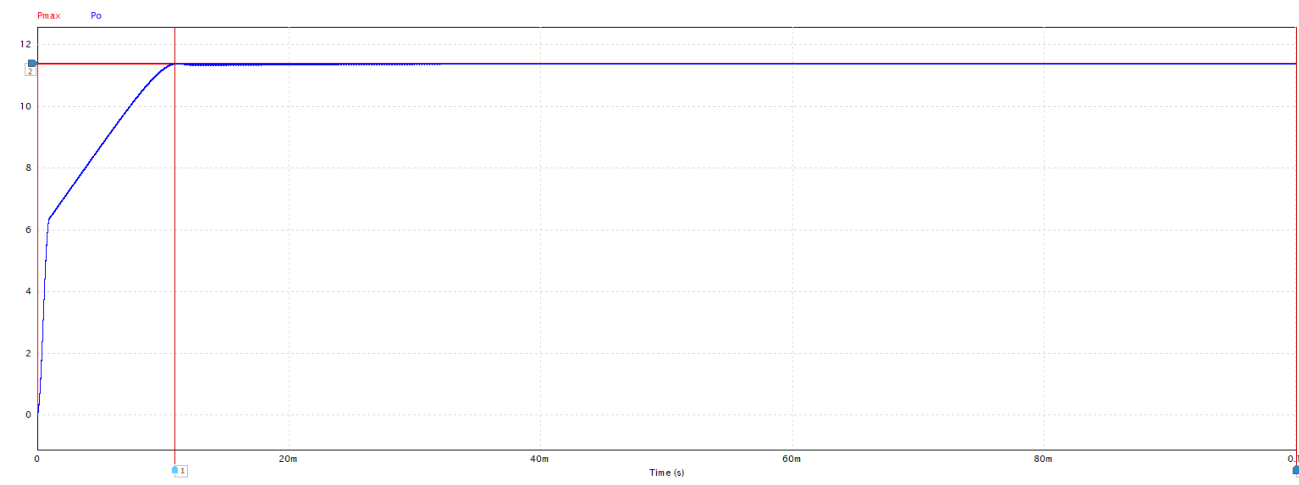
Καμπύλη 36β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση του ρεύματος Icell.

	X1	X2
Time	5.52ms	10.0ms
Icell	18.1	18.1
Vertical:	Y1	Y2
	1.81	1.81

Εικόνα 61. Πίνακας τιμών για το ρεύμα Icell.

IX. Ακτινοβολία 200W/m^2 και θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C .

Pmax & Po

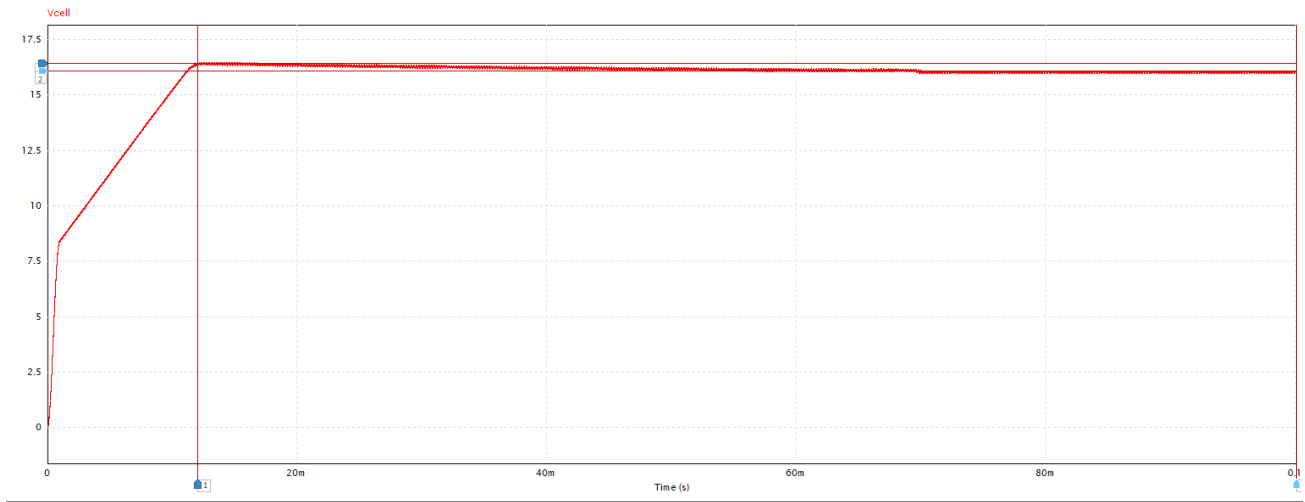


Καμπύλη 37. Γραφική παράσταση των ισχύων Pmax και Po.

	X1	X2
Time	1.08ms	10.0ms
Pmax	11.4	11.4
Po	11.39	11.4
Vertical:	Y1	Y2
	11.39	11.4

Εικόνα 62. Πίνακας τιμών για τον ισχύων Pmax και Po.

Vcell

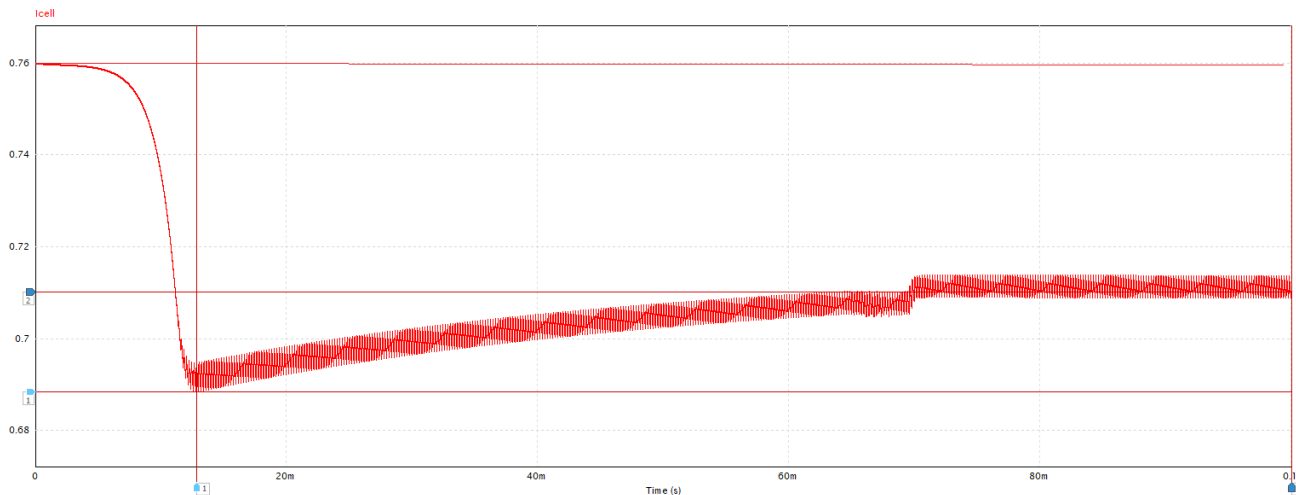


Καμπύλη 38. Γραφική παράσταση της τάσης Vcell

	X1	X2
Time	0.12ms	10.0ms
Vcell	16.4	16.0
Vertical:	Y1	Y2
	16.4	16.0

Εικόνα 62. Πίνακας τιμών της τάσης Vcell.

I_{cell}



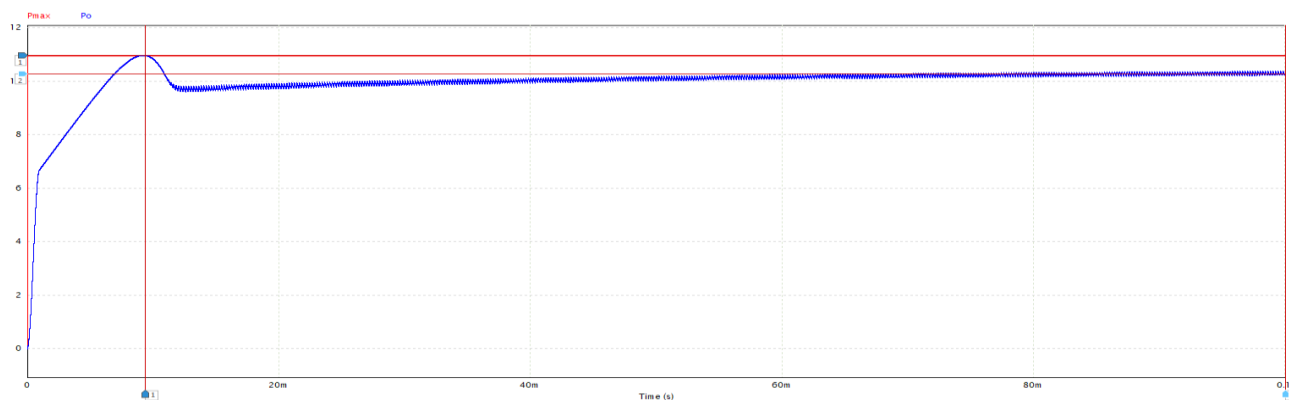
Καμπύλη 39. Γραφική παράσταση του ρεύματος I_{cell} .

	X1	X2
Time	0.12ms	10.0ms
I_{cell}	0.68	0.71
Vertical:	Y1	Y2
	0.68	0.71

Εικόνα 63. Πίνακας τιμών του ρεύματος I_{cell} .

X. Ακτινοβολία 200W/m^2 και θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C .

P_{max} & P_o

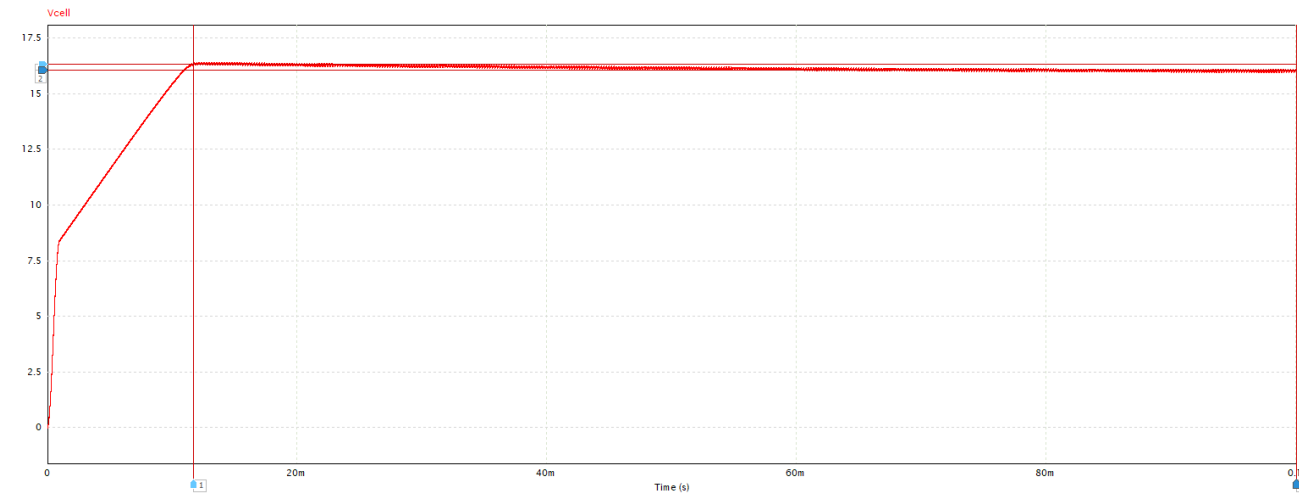


Καμπύλη 40. Γραφική παράσταση των ισχύων P_{max} και P_o .

	X1	X2
Time	9.34ms	10.0ms
Pmax	10.9	10.9
Po	10.9	10.2
Vertical:	Y1	Y2
	10.9	10.2

Εικόνα 64. Πίνακας τιμών των ισχύων Pmax και Po.

Vcell

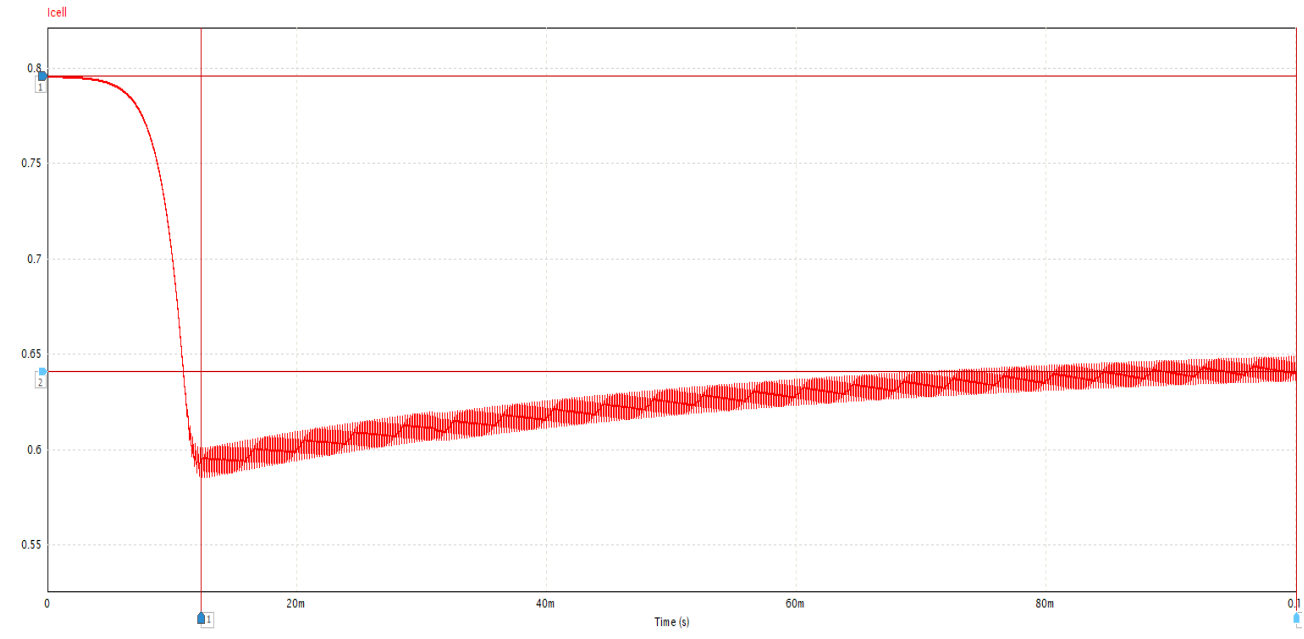


Καμπύλη 41. Γραφική παράσταση της τάσης Vcell.

	X1	X2
Time	0.01ms	0.10ms
Vcell	16.3	16.03
Vertical:	Y1	Y2
	16.3	16.03

Εικόνα 65. Πίνακας τιμών της τάσης Vcell.

Icell



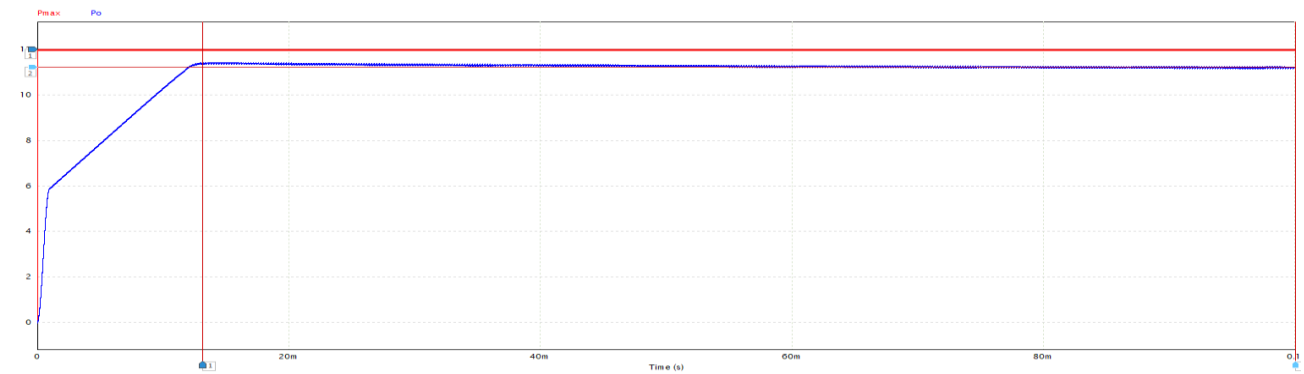
Καμπύλη 42. Γραφική παράσταση του ρεύματος Icell.

	X1	X2
Time	0.012ms	0.1
Icell	0.59	0.64
Vertical:	Y1	Y2
	0.79	0.64

Εικόνα 66. Πίνακας τιμών του ρεύματος Icell.

XI. Ακτινοβολία 200W/m^2 και θερμοκρασία περιβάλλοντος 0°C .

Pmax & Po

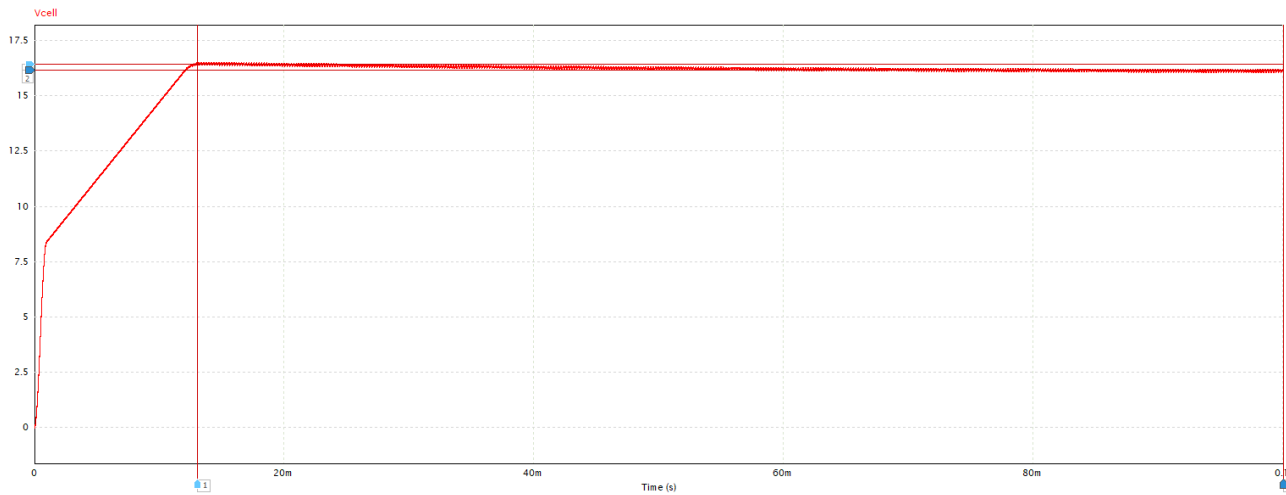


Καμπύλη 43. Γραφική παράσταση των ισχύων Pmax και Po.

	X1	X2
Time	0.013ms	0.10
Pmax	11.90	11.97
Po	11.38	11.21
Vertical:	Y1	Y2
	11.97	11.21

Εικόνα 67. Πίνακας τιμών των ισχύων Pmax και Po.

Vcell

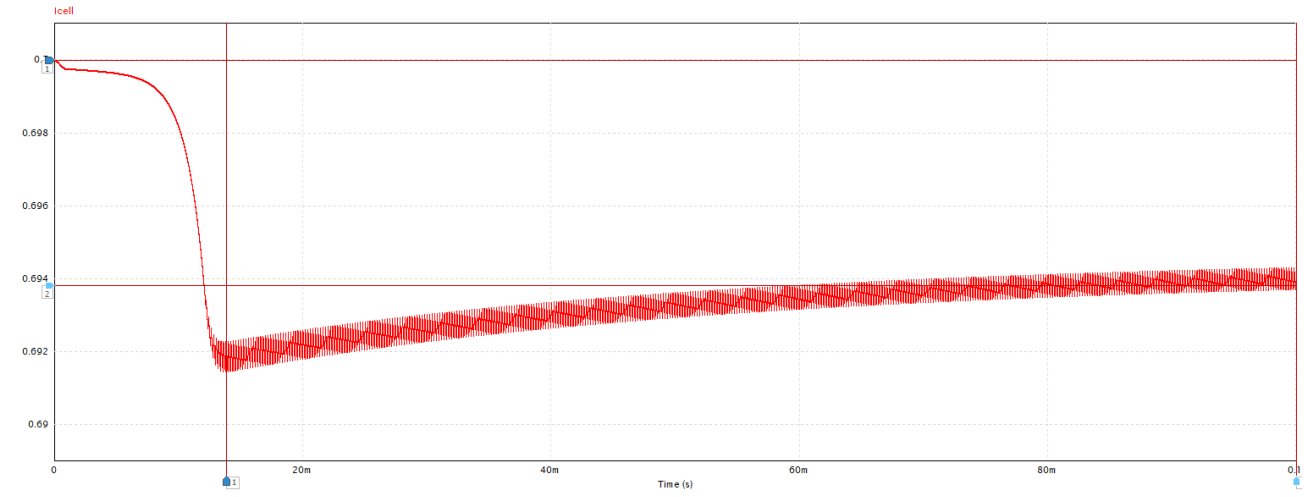


Καμπύλη 44. Γραφική παράσταση της τάσης Vcell.

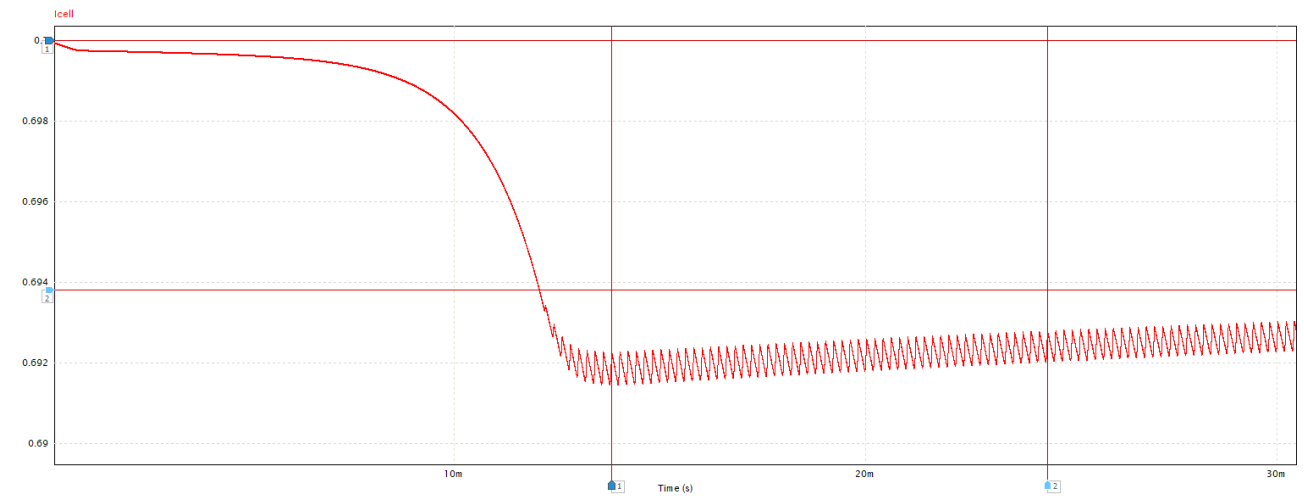
	X1	X2
Time	0.013ms	0.1ms
Vcell	16.43	16.16
Vertical:	Y1	Y2
	16.43	16.16

Εικόνα 68. Πίνακας τιμών της τάσης Vcell.

Icell



Καμπύλη 45α. Γραφική παράσταση του ρεύματος Icell.



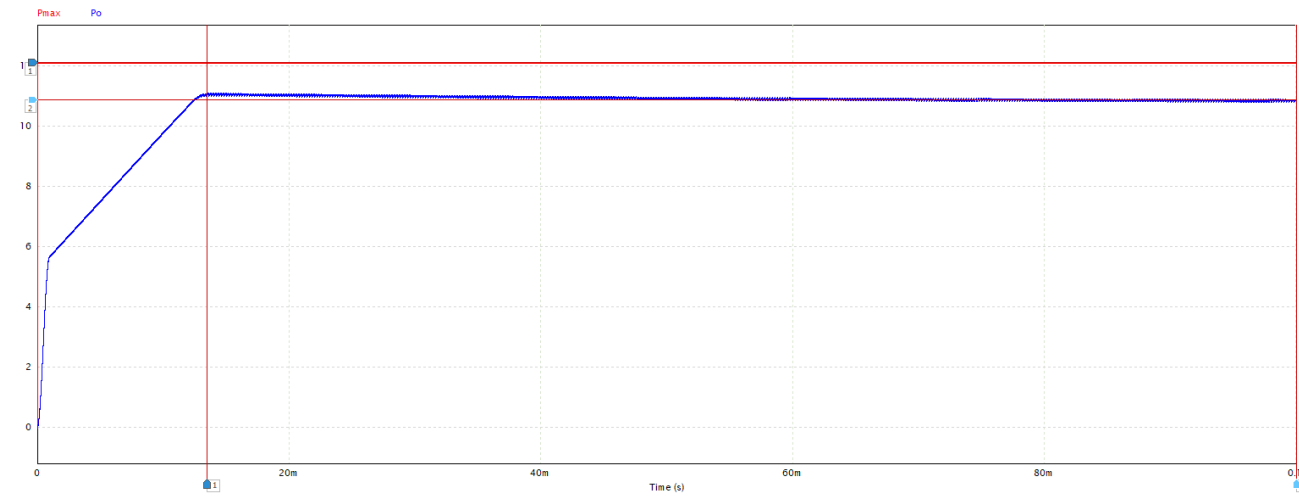
Καμπύλη 45β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση του ρεύματος Icell

	X1	X2
Time	0.013ms	0.10ms
Icell	0.69	0.693
Vertical:	Y1	Y2
	0.699	0.693

Εικόνα 69. Πίνακας τιμών της τάσης Icell.

XII. Ακτινοβολία $200\text{W}/\text{m}^2$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος -10°C .

P_{max} & P_o

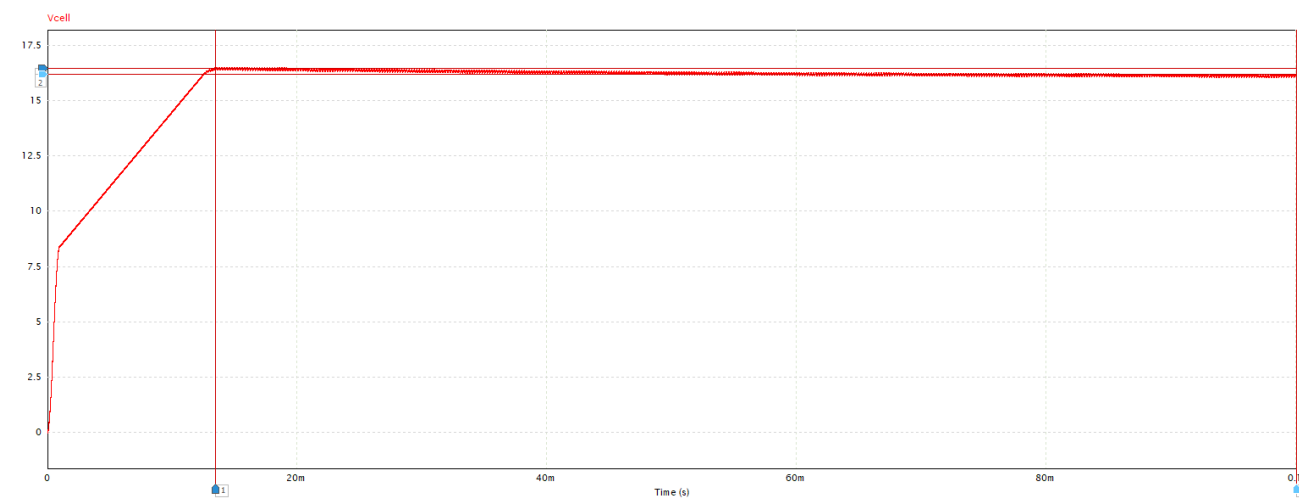


Καμπύλη 46. Γραφική παράσταση των ισχύων P_{max} και P_o.

	X1	X2
Time	0.013ms	0.10ms
P_{max}	12.13	12.13
P_o	11.03	10.88
Vertical:	Y1	Y2
	12.10	10.88

Εικόνα 70. Πίνακας τιμών των ισχύων P_{max} και P_o.

V_{cell}

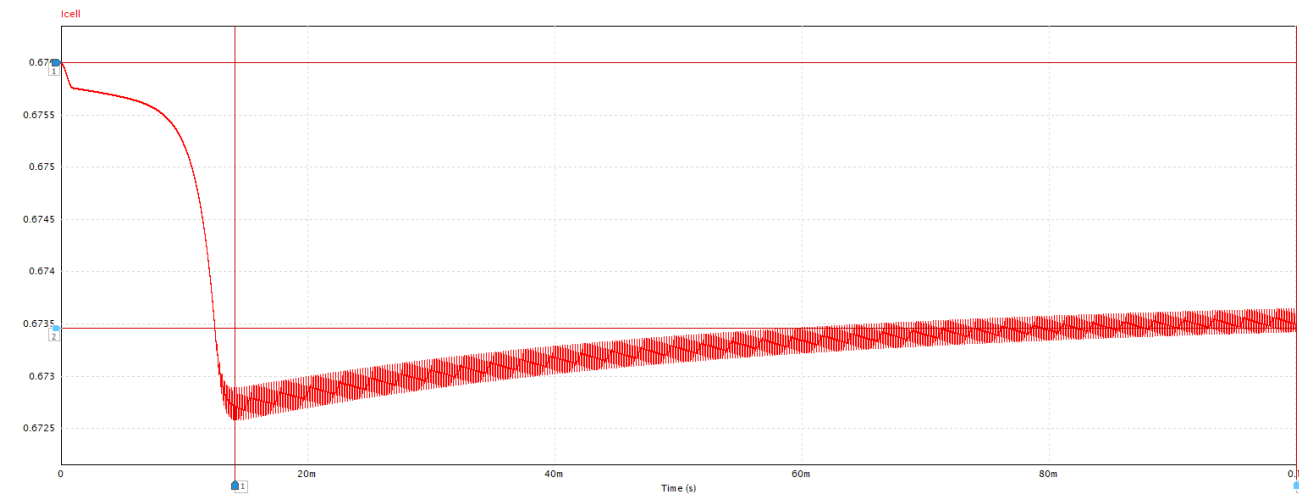


Καμπύλη 47. Γραφική παράσταση της τάσης Vcell.

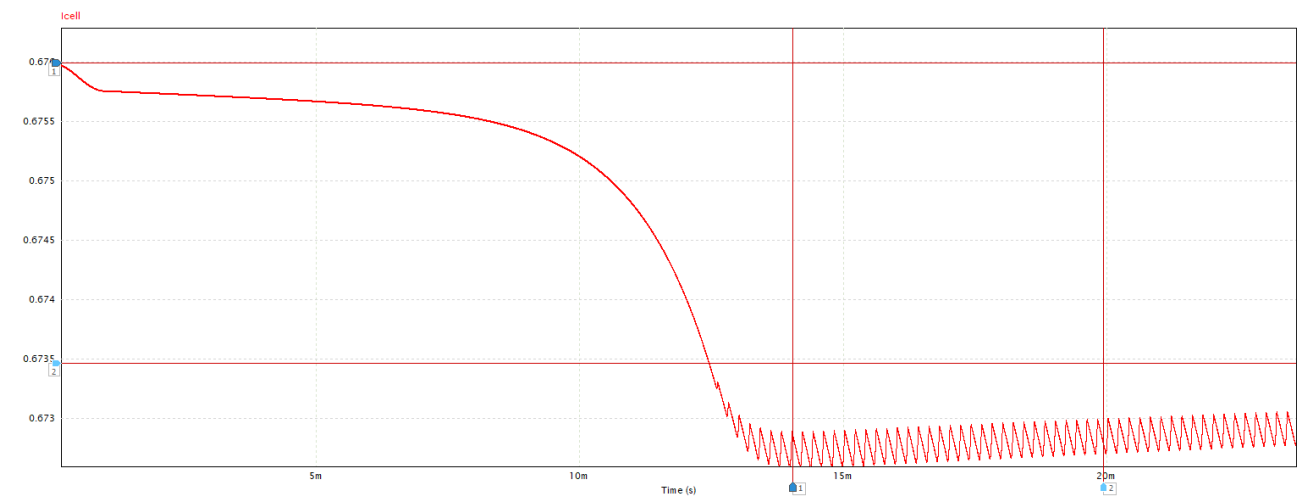
	X1	X2
Time	0.13ms	0.10ms
Vcell	16.39	16.16
Vertical:	Y1	Y2
	16.43	16.16

Εικόνα 71. Πίνακας τιμών της τάσης Vcell.

Icell



Καμπύλη 48α. Γραφική παράσταση του ρεύματος Icell.



Καμπύλη 48β. Γραφική παράσταση σε μεγέθυνση του ρεύματος Icell.

	X1	X2
Time	0.014ms	0.019ms
I_{cell}	0.670	0.672
Vertical:	Y1	Y2
	0.675	0.673

Εικόνα 72. Πίνακας τιμών του ρεύματος I_{cell}.

Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων

T (°C)	S (W/m ²)					
	1000 (W/m ²)		500 (W/m ²)		200 (W/m ²)	
	<i>P_{max} (W) - P_o (W)</i>		<i>P_{max} (W) - P_o (W)</i>		<i>P_{max} (W) - P_o (W)</i>	
40	56.5	56.5	27.9	27.6	10.9	10.2
25	60.53	59.8	29.8	29.8	11.4	11.4
0	67.1	59.6	32.6	29.3	11.91	11.21
-10	69.7	58.9	33.7	29.1	12.3	10.88

Πίνακας 3. Συγκεντρωτικός πίνακας των ισχύων P_{max} και P_o αντίστοιχα.

T (°C)	S (W/m ²)					
	1000 (W/m ²)		500 (W/m ²)		200 (W/m ²)	
	<i>V_{cell} (V) - I_{cell} (A)</i>		<i>V_{cell} (V) - I_{cell} (A)</i>		<i>V_{cell} (V) - I_{cell} (A)</i>	
40	15.8	3.55	16.03	1.73	16.03	0.64
25	15.8	3.7	16.04	1.83	16.0	0.71
0	15.9	3.72	16.0	1.83	16.1	0.69
-10	15.9	3.71	16.0	1.81	16.1	0.67

Πίνακας 4. Συγκεντρωτικός πίνακας τάσεων και ρευμάτων V_{cell} και I_{cell} αντίστοιχα.

Συμπεράσματα

- **Συμπεράσματα προσομοιώσεων**

Στο συγκεντρωτικό **πίνακα 3** φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο μειώνεται η παραγωγή ενέργειας.

Αυτό συμβαίνει γιατί ένας ηλιακός συλλέκτης απορροφά το ηλιακό φως και το μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια όλο το ηλιακό φως που απορροφά. Αντίθετα, ένα μέρος του ηλιακού φωτός θα μετατραπεί σε θερμότητα και, ως αποτέλεσμα, ο ηλιακός συλλέκτης θα θερμανθεί. Οι υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος μπορούν να μειώσουν την παραγωγή ενέργειας. Δεν ισχύει ότι όσο περισσότερη θερμότητα υπάρχει στο περιβάλλον τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγωγή ενέργειας από τους ηλιακούς συλλέκτες.

Στον **πίνακα 3**, φαίνεται, επίσης, ότι η θερμοκρασία δεν επηρεάζει σημαντικά την παραγωγή ενέργειας αλλά περισσότερο η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Καθώς, λοιπόν, μειώνεται από τα 1000W/m² στα 200 W/m² τόσο περισσότερο μειώνεται και η απόδοση του πάνελ.

Οι ψυχρότερες περιοχές είναι πιο κατάλληλες για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας. Οι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία της ημέρας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια εξαιρετικά αξιόπιστη μορφή ενέργειας στις ψυχρότερες περιοχές. Η απόδοση των πάνελ στις περιοχές αυτές είναι καλύτερη από εκείνη στις θερμότερες.

Έτσι, οι σημερινοί συλλέκτες έχουν σχεδιαστεί για να συλλαμβάνουν διαφορετικά τμήματα του ηλιακού φάσματος χρησιμοποιώντας ένα σύστημα φακών και κατόπτρων. Αυτές οι τεχνολογικές εξελίξεις μάς έχουν επιτρέψει να αξιοποιήσουμε την ηλιακή ενέργεια και σε ψυχρότερα κλίματα.

Όμως, αυτές οι περιοχές έχουν και τα μειονεκτήματά τους:

- Η γωνία του ηλιακού συλλέκτη χρειάζεται προσαρμογή για να συλλάβει περισσότερο φως.
- Καθαρισμός του χιονιού που καλύπτει πλήρως τα πάνελ και εμποδίζει το φως.
- Οι σύντομες ημέρες και τα σύννεφα μειώνουν επίσης την ποσότητα του ηλιακού φωτός.

Στο συγκεντρωτικό **πίνακα 4**, η επίδραση της θερμοκρασίας δεν είναι σημαντική στην παραγωγή του ρεύματος Icell αλλά, αντιθέτως, η ένταση της ακτινοβολίας είναι ο ουσιαστικός παράγοντας που καθορίζει την παραγωγή του ρεύματος. Καθώς μειώνεται η ένταση της ακτινοβολίας (από τα 1000W/m^2 στα 200W/m^2) το ρεύμα μειώνεται αντίστοιχα. Η έντονη θερμότητα πάνω στον ηλιακό συλλέκτη επηρεάζει αρνητικά την παραγωγή του ρεύματος (μειώνει την τιμή της έντασής του). Στον ίδιο πίνακα, φαίνεται ότι (αν ξεκινήσουμε από τις χαμηλές θερμοκρασίες προς τις υψηλές) υπάρχει μία ελαφρά μείωση της έντασης, χωρίς κάποια ουσιαστική αλλαγή. Ενώ η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή και στις τρεις περιπτώσεις διαφορετικής ακτινοβολίας (για τις αντίστοιχες τιμές της έντασης της).

Ορισμένες λύσεις για την καλύτερη απόδοση των πάνελ είναι οι εξής:

- Μετακίνηση των ηλεκτρικών μερών όπως π.χ., το inverter, στη σκιασμένη περιοχή πίσω από τη συστοιχία των πάνελ.
- Εγκατάσταση των πάνελ λίγα εκατοστά πάνω από την οροφή, ώστε η ροή του αέρα να μπορεί να ψύχει τα πάνελ.

Στην πράξη οι ηλιακοί συλλέκτες μπορεί να φτάσουν το 22% της απόδοσης ή και λίγο περισσότερο, οι περισσότεροι παράγουν ένα επίπεδο μεταξύ 15 και 20%. Ορισμένοι πειραματικοί ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να φθάσουν ακόμη και το 40% της απόδοσης.

Οι αλγόριθμοι MPPT βοηθούν στην μεγαλύτερη αξιοποίηση της ακτινοβολίας. Ο αλγόριθμος P&O είναι ένας από αυτούς. Υλοποιείται σχετικά εύκολα και με μικρό κόστος. Το κυριότερο μειονέκτημά του (όπως αναφέρθηκε και παραπάνω) είναι ότι χρειάζεται ομοιόμορφη πρόσπτωση της ακτινοβολίας πάνω στο πάνελ, κάτι που είναι δύσκολο σε πραγματικές εφαρμογές,

- **Μετάβαση σε μεγαλύτερη κλίμακα (On grid)**

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάσαμε πώς ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκό πάνελ και μπαταρία βαθέως κύκλου για την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας, παρέχοντας ένα πλήρες αυτόνομο σύστημα ηλιακής ενέργειας. Ωστόσο, αυτός ο τύπος ηλιακού συστήματος λειτουργεί άψογα υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει αρκετή ηλιακή ακτινοβολία (μέθοδος P&O) κατά τη διάρκεια της ημέρας για να επαναφορτιστούν οι μπαταρίες για χρήση κατά τη διάρκεια της νύχτας

Τα αυτόνομα ηλιακά συστήματα είναι σταθερά ή φορητά ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα που δεν είναι συνδεδεμένα με κανένα τοπικό δίκτυο κοινής ωφέλειας ή ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς χρησιμοποιούνται γενικά σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές. Αυτό γενικά σημαίνει ότι οι ηλεκτρικές συσκευές βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από την πλησιέστερη σταθερή ηλεκτρική παροχή. Αυτό κάνει τη χρήση των συσσωρευτών απαραίτητη για τη λειτουργία της εφαρμογής.

Σε πραγματικές εφαρμογές ένα φωτοβολταϊκό σύστημα συνδέεται με το δίκτυο παροχής, όπου τα φωτοβολταϊκά πάνελ ή η συστοιχία (των πάνελ) συνδέονται με το δίκτυο κοινής ωφέλειας μέσω μιας μονάδας μετατροπής ισχύος που τους επιτρέπει να λειτουργούν παράλληλα με το ηλεκτρικό δίκτυο κοινής ωφέλειας.

Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, ο αριθμός των σπιτιών που λειτουργούν με ηλιακή ενέργεια και είναι συνδεδεμένα με το τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας έχει αυξηθεί. Αυτά τα συνδεδεμένα με το

δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα διαθέτουν ηλιακούς συλλέκτες που παρέχουν ένα μικρό μέρος ή και το μεγαλύτερο μέρος των αναγκών τους σε ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ εξακολουθούν να είναι συνδεδεμένα με το τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν μερικές φορές να παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από όση πραγματικά χρειάζεται ή καταναλώνεται, ιδίως κατά τους μεγάλους ζεστούς καλοκαιρινούς μήνες. Αυτή η επιπλέον ή πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια είτε αποθηκεύεται σε μπαταρίες είτε, διοχετεύεται απευθείας πίσω στο ηλεκτρικό δίκτυο.

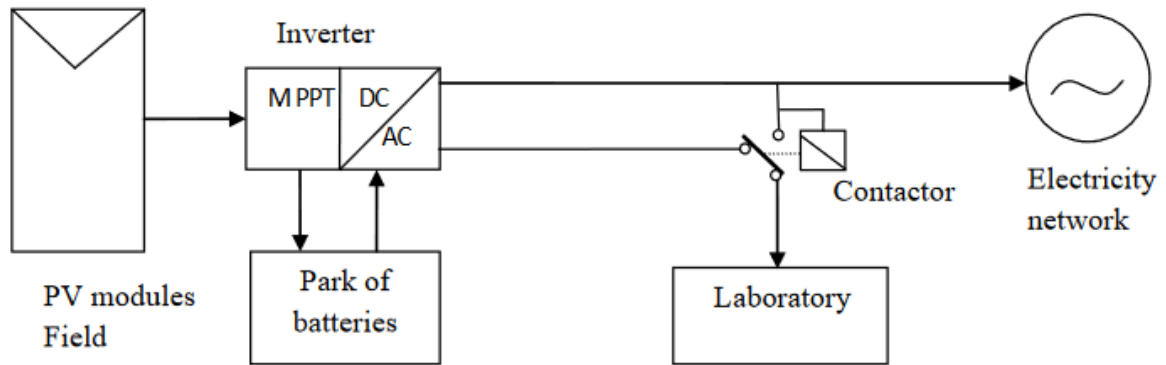
Σε ένα συνδεδεμένο με το δίκτυο φωτοβολταϊκό σύστημα, γνωστό και ως on-grid ηλιακό σύστημα, τα φωτοβολταϊκά ηλιακά πάνελ ή η συστοιχία αυτών, διαθέτουν μπαταρίες αποθήκευσης στο σχεδιασμό τους, λειτουργώντας επίσης σε συνδυασμό με την τοπική εταιρεία ηλεκτρισμού. Η βραχυπρόθεσμη ζήτηση αιχμής καλύπτεται από τις μπαταρίες χωρίς να αντλείται από το δίκτυο ενέργεια.

Όταν χρησιμοποιούνται σε συνδεδεμένα στο δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα, οι μπαταρίες αποθήκευσης μπορούν να ταξινομηθούν σε βραχυπρόθεσμη αποθήκευση για λίγες ώρες ή ημέρες για την κάλυψη περιόδων κακοκαιρίας και σε μακροπρόθεσμη αποθήκευση για αρκετές εβδομάδες για την αντιστάθμιση των εποχιακών διακυμάνσεων της ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ των καλοκαιρινών και των χειμερινών μηνών.

Η ενσωμάτωση μπαταριών σε ένα σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο απαιτεί περισσότερα εξαρτήματα (εικόνα 72), είναι ακριβότερη και μειώνει τη συνολική απόδοση του συστήματος. Αλλά για πολλούς ιδιοκτήτες σπιτιού σε απομακρυσμένες περιοχές που αντιμετωπίζουν τακτικά απώλεια της παροχής του δικτύου τους κατά τη διάρκεια κακών καιρικών συνθηκών ή έχουν κρίσιμα ηλεκτρικά φορτία που δεν μπορούν να διακοπούν, η ύπαρξη κάποιας μορφής εφεδρικής αποθήκευσης ενέργειας στο συνδεδεμένο με το δίκτυο σύστημά τους μπορεί να αποτελέσει μεγάλο πλεονέκτημα. [7.6]

Οι μπαταρίες πρέπει να παρέχουν ενέργεια για ένα δεδομένο αριθμό διακοπών παροχής του δικτύου. απαιτούν εξειδικευμένους μετατροπείς και συστήματα μπαταριών αρκετά μεγάλα ώστε να αποθηκεύουν ενέργεια για 2 ή περισσότερες ημέρες. Τα υβριδικά συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο χρησιμοποιούν υβριδικούς μετατροπείς χαμηλότερου κόστους και απαιτούν μόνο μια μπαταρία αρκετά μεγάλη ώστε να παρέχει ενέργεια για 5 έως 10 ώρες (κατά τη διάρκεια της νύχτας) ανάλογα με την εφαρμογή.

Τα σύγχρονα υβριδικά συστήματα συνδυάζουν την ηλιακή ενέργεια και την αποθήκευση μπαταριών σε ένα και είναι πλέον διαθέσιμα σε πολλές διαφορετικές μορφές και διαμορφώσεις. Λόγω της μείωσης του κόστους των μπαταριών, τα συστήματα που είναι ήδη συνδεδεμένα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν επίσης να αρχίσουν να επωφελούνται από την αποθήκευση ενέργειας (με τη χρήση μπαταριών). Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να αποθηκεύουν την ηλιακή ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και να τη χρησιμοποιούν τη νύχτα. Όταν η αποθηκευμένη ενέργεια εξαντληθεί, το δίκτυο είναι εκεί ως εφεδρεία, επιτρέποντας στους καταναλωτές να έχουν αδιάκοπη ηλεκτρική ενέργεια. Τα υβριδικά συστήματα είναι επίσης σε θέση να φορτίζουν τις μπαταρίες χρησιμοποιώντας φθηνή ηλεκτρική ενέργεια εκτός των ωρών αιχμής.[7.7]



Εικόνα 72. Φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες) βασισμένο σε έναν αντιστροφέα (inverter). (Πηγή: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/29/1/012015/pdf>)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1.1 <https://www.newmoney.gr/roh/palmos-oikonomias/energeia/ape-paramenoun-antagonistikes-para-tin-ektoxefsi-tou-koustous-kataskevis-pinakes/>

1.2 https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CF%8E%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B5%CF%82_%CF%80%CE%B7%CE%B3%CE%AD%CF%82_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82

1.3 <https://www.newmoney.gr/roh/palmos-oikonomias/energeia/afta-ine-ta-dio-nea-fotovoltaika-mega-projects-tou-1gw/>

1.4 http://archive.eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHXB122/Enotita_5.pdf

1.5 <https://eletaen.gr/wind-with-storage-tselepi-sunlight/>

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2.1 https://www.imerisia.gr/epiheiriseis/energeia/16637_apothikeysi-energeias-rali-ton-big-6-gia-ton-throno-stis-ape

2.2 https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2021/07/Eisigisi_ODE_Apothikeysis-xwris-FEK-kai-praktika.pdf
Εισήγηση της ΟΔΕ

2.3 ό.π.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3.1 https://www.itia.ntua.gr/el/getfile/2050/10/documents/10_EnergyStorage.pdf

3.2 **Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing -**

Patrick T. Moseley, Jurgen Garche - ELSEVIER – 2015

3.3 https://www.researchgate.net/publication/253768576_Lithium-Ion_Battery_Separators1

3.4 https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CF%80%CE%B1%CF%84%CE%B1%CF%81%CE%AF%CE%B1_%CE%B9%CF%8C%CE%BD%CF%84%CF%89%CE%BD_%CE%BB%CE%B9%CE%B8%CE%AF%CE%BF%CF%85

3.5 <https://www.lithium-battery-factory.com/el/pros-and-cons-of-lithium-ion-battery/>

3.6 https://www.engineersedge.com/battery/specific_gravity_battery.htm

3.7 <https://www.aimspress.com/fileOther/PDF/energy/energy-07-02-186.pdf>

3.8 https://www.hioki.com/in-en/learning/usage/resistance-meters_2.html

3.9 <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/a-closer-look-at-state-of-charge-and-state-health-estimation-techniques.pdf>

3.10 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X17304437>

3.11 <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/lead-acid-batteries>

4° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4.1 Overview of Battery Models for Sustainable Power and Transport Applications Marian

Tomasov*, Martina Kajanova, Peter Bracinik, David Motyka *University of Zilina, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Department of Power Systems and Electric Drives, Univerzitna 8215/1, 010 26 Zilina, Slov*

4.2 A Parameter Extraction Method for the Thevenin Equivalent Circuit Model of Li-ion Batteries

Monowar Hossain, Student Member, IEEE, S.Saha, Member, IEEE, M. E. Haque, Senior Member, IEEE, M.T Arif, Member, IEEE, AMT.Oo, Senior Member, IEEE.

Deakin University, VIC 3220, Australia.

hossainm@deakin.edu.au

5° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

5.1 https://en.wikipedia.org/wiki/PSIM_Software

5.2 <https://www.mpoweruk.com/chargers.htm#rates>

5.3 <https://evreporter.com/understanding-charge-discharge-curves-of-li-ion-cells/>

5.4 <file:///C:/Users/decibel/Downloads/batteries-08-00008-v2-2.pdf>

6° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

6.1 <https://www.mathworks.com/help/simulink/>

6.2 <https://ewh.ieee.org/r1/ct/sps/PDF/MATLAB/chapter8.pdf>

6.3 <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/134041/Gong%20Dissertation%20Final.pdf>

6.4 <https://www.cedgreentech.com/article/how-does-temperature-affect-battery-performance>

6.5 https://www.researchgate.net/figure/Battery-cell-thermal-model-in-Simulink_fig3_339049054)

6.6 https://www.researchgate.net/publication/339049054_Lithium-Ion_Polymer_Battery_for_12-Voltage_Applications_Experiment_Modelling_and_Validation#pf6

7° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

7.1 https://www.researchgate.net/publication/290996280_A_Review_on_Perturb_and_Observe_Maximum_Power_Point_Tracking_in_Photovoltaic_System

7.2 https://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter

7.3 Σχολή Μηχανικών, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης
ΠΜΣ «Εφαρμοσμένα Συστήματα Αυτοματοποίησης. Σημειώσεις DC/DC μετατροπείς, αναπλ. Καθ.
Φώτης Στεργιόπουλος.

7.4 https://www.researchgate.net/profile/Almoataz-Abdelaziz/publication/281684328_Implementation_of_perturb_and_observe_MPPT_of_PV_system_with_direct_control_method_using_buck_and_buck_boost_converters/links/55f42c3208ae1d980394b984/Implementation-of-perturb-and-observe-MPPT-of-PV-system-with-direct-control-method-using-buck-and-buck-boost-converters.pdf

7.5 <https://www.sunrun.com/go-solar-center/solar-articles/do-solar-panels-work-in-cold-weather>

7.6 <https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/grid-connected-pv-system.html>

7.7 <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2014/5/4/how-solar-works>