



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

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΤΥΠΟΥ VRB ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΓΡΗΓΟΡΙΟΥ Κ. ΚΩΤΣΗ

Επιβλέπων: ΣΤΑΥΡΟΣ ΑΘ. ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ
 ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012



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

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΤΥΠΟΥ VRB ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ VRB ΣΤΟ
ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΓΡΗΓΟΡΙΟΥ Κ. ΚΩΤΣΗ

Επιβλέπων: ΣΤΑΥΡΟΣ ΑΘ. ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την.....2012.

.....
Γ. Κορρές

.....
Σ. Παπαθανασίου

.....
Σ. Καβατζά

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Επικουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

.....
Γρηγόριος Κ. Κώτσης

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

Copyright © Γρηγόριος Κ. Κώτσης, 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

*Στους γονείς μου,
στον αδερφό μου,
στους φίλους
και συμφοιτητές μου*

Περίληψη

Η βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα παρουσιάζει την τάση για απελευθέρωση και απορρύθμιση. Αυτό, σε συνδυασμό με την αύξηση της διεσπαρμένης παραγωγής, δηλαδή τη διείσδυση Μικρών Μονάδων Παραγωγής και κυρίως Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) θέτουν νέες προκλήσεις, καθιστώντας απαραίτητη την δυνατότητα αποθήκευσης της Ηλεκτρικής Ενέργειας. Κατά τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί πολλές τεχνολογίες αποθήκευσης της Ηλεκτρικής Ενέργειας. Ωστόσο μια από τις πιο αποδοτικές μεθόδους αποτελεί η Ηλεκτροχημική Αποθήκευση, δηλαδή οι μπαταρίες. Μία σχετικά νέα και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία αποτελούν οι μπαταρίες Ροής (VRB), οι οποίες παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων αποθήκευσης.

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η παρουσίαση και η περιγραφή των βασικών αρχών λειτουργίας των μπαταριών τύπου VRB και η εξαγωγή ενός μαθηματικού μοντέλου περιγραφής της λειτουργίας τους, ώστε να καταστεί δυνατή η προσομοίωση της ένταξής τους σε Ηλεκτρικά Συστήματα. Αφού λοιπόν παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα των VRB γίνεται αναλυτική περιγραφή τους των υποσυνόλων από τα οποία αποτελείται. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μαθηματικές σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία τους (χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται, διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδιά τους κτλ.). Με βάση τις μαθηματικές αυτές σχέσεις γίνεται δυνατή η δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας τους στην προγραμματιστική γλώσσα του περιβάλλοντος MatLab.

Πραγματοποιούνται λοιπόν κάποιες προσομοιώσεις ενός συστήματος αποθήκευσης Ηλεκτρικής ενέργειας (ESS) και εξάγονται διαγράμματα των σημαντικότερων παραμέτρων τους, όπως η τάση, η ισχύς και ο βαθμός απόδοσής τους. Έτσι γίνεται μελέτη της συμπεριφοράς της μπαταρίας VRB υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Ακόμη σημειώνονται οι συνθήκες υπό τις οποίες οι μπαταρία λειτουργεί παρουσιάζοντας το βέλτιστο συντελεστή απόδοσης, δηλαδή τις μικρότερες απώλειες.

Στη συνέχεια, κάνοντας χρήση κατάλληλου μοντέλου λογιστικής προσομοίωσης στη γλώσσα του περιβάλλοντος MatLab, προσομοιώνεται η λειτουργία ενός υποθετικού Υβριδικού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΥΒΣ), αποτελούμενο από Αιολικό Πάρκο και Σύστημα Αποθήκευσης με Μπαταρίες τύπου VRB, στο Σύστημα της Κρήτης. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει με ωριαίο βήμα προσομοίωσης την ετήσια λειτουργία του ΥΒΣ αλλά και του συστήματος της Κρήτης για χρονικό διάστημα 20 ετών, με έτος αναφοράς το 2015. Εξάγονται έτσι σημαντικά ετήσια ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα για την εσωτερική λειτουργία του ΥΒΣ αλλά και για την επίπτωση της εισαγωγής του στο σύστημα της Κρήτης.

Τέλος πραγματοποιείται οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης σε αυτόν τον Υβριδικό Σταθμό. Με τη χρήση του μοντέλου αυτού σε συνδυασμό με Γενετικούς Αλγορίθμους, αναζητείται η Βέλτιστη διαστασιολόγηση του υποτιθέμενου αυτού ΥΒΣ για το σύστημα της Κρήτης, με γνώμονα την επίτευξη του βέλτιστου Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης

Λέξεις Κλειδιά

Σύστημα Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας (EES) , συσσωρευτές, VRB, Μπαταρίες Ροής, Μπαταρίες Οξειδοαναγωγής, Μοντέλο Προσομοίωσης, Υβριδικός Σταθμός (ΥΒΣ), Πολιτική Διαχείρισης ΥΒΣ, Βελτιστοποίηση

Abstract

Today, the Electrical Power Generation Industry is being liberalized and deregulated. This tendency, combined with the increase in Distributed Generation, i.e. the installation of Small Power Units, mainly consisted of Sustainable Energy Sources, brings new challenges, making the capability of Energy Storage more important than ever. During the last years many Energy Storage technologies have been introduced. However, Electrochemical storage, i.e. batteries, is one of the most effective means to accumulate electrical energy. One relatively recent and promising technology is the Vanadium Redox Flow Batteries (VRB), which presents several important advantages over the other energy storage methods.

The scope of this diploma thesis is the presentation and the description of the fundamentals and principles of the VRB and the creation of a mathematical model describing its function, in order to be used for the simulation of a VRB in an Electrical System. After presenting the advantages of the VRB, a detailed description of its main subsystems follows. Moreover, the mathematical equations describing its function are described. Using these mathematical equations, a Model suitable for simulations is obtained, in the computer programming language of MatLab.

After running some simulations of a Battery Energy Storage System (BESS) consisting of VRB we obtain diagrams in terms of crucial operation parameters, such as the Voltage of the Electrodes, the Power and the Efficiency of the battery. This gives the opportunity to observe the behavior of the battery under several operating conditions of operation, thus revealing the conditions where the battery operates at its maximum efficiency.

Using another suitable simulation model, written in the computer programming language of MatLab, the simulation of the operation of a hypothetical Hybrid Power Station (HPS) in Crete's Electrical System is run. This HPS consists of a Wind Power Farm combined with a BESS with VRBs. The simulation is carried out with an hourly time step, for a time period of 20 years, taking 2015 as the reference year. Therefore, some annual energy and economical results of the HPS's internal function, as well as its effect in the Crete's Power System, are obtained.

Finally, an economical analysis is carried out, considering this HPS as an investment. Using the model described above, combined with Genetic Algorithms, we find the optimum parameters of this hypothetical HPS (Wind Power, BESS Power, BESS Capacity) in terms of the maximum IRR.

Keywords

Battery Energy Storage System (BESS), Vanadium Redox Flow Battery (VRB), Batteries, Simulation Model, Hybrid Power Station (HPS), HPS Management Policies, Optimization

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Παπαθανασίου, για τη δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με ένα θέμα που ανταποκρίνεται πλήρως στα ενδιαφέροντά μου, καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγησή που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η ενασχόληση με την εργασία αυτή μου έδωσε το ερέθισμα και το κίνητρο για την ενασχόλησή μου με τον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και γενικότερα των σύγχρονων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας και γιαυτό τον ευχαριστώ βαθύτατα.

Θα ήθελα επίσης να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Ευάγγελο Βρεττό, μηχανικό και διδακτορικό φοιτητή, για την πολύτιμη βοήθειά του από τα πρώτα ως τα τελευταία στάδια της εργασίας, καθώς επίσης και για τη στήριξη και τις συμβουλές που μου παρείχε, συμβάλλοντας στην επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας.

Επιπλέον ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Ελένη Καραμάνου για τη βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και σε όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου για όλα τα όμορφα χρόνια που μοιράστηκα μαζί τους.

Γρηγόριος Κ. Κώτσης

Σεπτέμβριος 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Κεφάλαιο 1	19
Εισαγωγή	19
1.1 Γενικά.....	19
1.2 Περιεχόμενο της εργασίας	21
1.2.1 Διάρθρωση της εργασίας.....	21
1.3 Κύριοι Προβληματισμοί.....	22
 Κεφάλαιο 2	23
Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	23
2.1 Οφέλη της Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας	23
2.1.1 Αγοραπωλησία (Αρμπιτράζ) Ηλεκτρικής Ενέργειας (Bulk Electricity Price Arbitrage) 23	
2.1.2 Διαχείριση της Ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας στο επίπεδο του καταναλωτή 24	
2.1.3 Επικουρικές υπηρεσίες	25
2.1.4 Αναβολή Αναβάθμισης Μονάδων Ηλεκτροπαραγωγής	26
2.1.5 Υποστήριξη γραμμών μεταφοράς και διανομής.....	26
2.1.6 Αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές και ποιότητα ισχύος	27
2.1.7 Εξασφάλιση παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας και χρονική μετατόπιση της παραγωγής	28
2.2 Πως αποθηκεύεται η Ηλεκτρική Ενέργεια.....	28
2.2.1 Μηχανικά Συστήματα Αποθήκευσης	29
2.2.2 Ηλεκτρικά Συστήματα Αποθήκευσης	37
2.2.3 Θερμικά Συστήματα Αποθήκευσης.....	40
2.2.4 Ηλεκτροχημικά Συστήματα Αποθήκευσης	41
2.2.5 Σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης	56
 Κεφάλαιο 3	62
Συσσωρευτές τεχνολογίας VRB	62
3.1 Εισαγωγή.....	62
3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας VRB	62
3.3 Ηλεκτροχημικό μοντέλο της VRB – περιγραφή των χημικών αντιδράσεων	63

3.3.1	Χημική αντίδραση οξειδοαναγωγής.....	63
3.3.2	Χημική αντίδραση στη VRB	65
3.3.3	Η εξίσωση Nernst και το πρότυπο δυναμικό της αντίδρασης οξειδοαναγωγής	66
3.3.4	Κατάσταση φόρτισης (State of Charge – SoC)	68
3.3.5	Μεταβολή της συγκέντρωσης των ιόντων κατά τη λειτουργία της μπαταρίας 70	
3.3.6	Συγκέντρωση Πρωτονίων στον Ηλεκτρολύτη	73
3.3.7	Εσωτερικές Απώλειες.....	74
3.3.8	Ηλεκτροχημικό μοντέλο της μπαταρίας.....	78
3.4	Χρόνος απόκρισης της μπαταρίας.....	79
3.5	Πυκνότητα Ενέργειας της VRB	79
3.6	Βαθμός Απόδοσης της VRB	80
3.6.1	Βαθμός Απόδοσης Ενέργειας	80
3.6.2	Βαθμός Απόδοσης Φορτίου.....	81
3.6.3	Βαθμός Απόδοσης Τάσης.....	81
3.6.4	Βαθμός Απόδοσης Φόρτισης και Βαθμός Απόδοσης Εκφόρτισης	81
3.7	Μηχανικό Μοντέλο της VRB	82
3.7.1	Κατασκευή της συστοιχίας κελιών.....	82
3.7.2	Ισχύς της αντλίας.....	84
3.8	Συνδυαστικό Μοντέλο της VRB.....	85
3.8.1	Το σύστημα ελέγχου της VRB	86
3.8.2	Το ηλεκτροχημικό μοντέλο	86
3.8.3	Το μηχανικό μοντέλο.....	86
3.9	Ενεργειακή θεώρηση της λειτουργίας της VRB ανάλογα με την παροχή Q	87
3.9.1	Μέγιστη παροχή $Q_{\max}$	89
3.9.2	Ελάχιστη παροχή $Q_{\min}$	90
3.10	Σύγκριση της λειτουργίας με $Q_{\max}$ και της λειτουργίας με $Q_{\min}$	91
3.11	Βέλτιστη τιμή της παροχής Q_{opt} με σταθερό ρεύμα λειτουργίας	92
3.12	Βέλτιστη τιμή της παροχής Q_{opt} με σταθερή ισχύ λειτουργίας.....	94

Κεφάλαιο 497

Μαθηματικό μοντέλο περιγραφής της μπαταρίας VRB.....97

4.1	Εισαγωγή.....	97
4.2	Γενικά για το ενεργειακό μοντέλο συσσωρευτών.....	97
4.3	Γενικά για το μοντέλο περιγραφής της VRB	99
4.4	Εύρεση παραμέτρων και εξισώσεις περιγραφής του μοντέλου	101
4.5	Η μορφή των εξισώσεων ανάλογα με την περίπτωση λειτουργίας.....	103
4.5.1	1 ^η περίπτωση (φόρτιση) :.....	104
4.5.2	2 ^η περίπτωση (εκφόρτιση) :.....	105
4.5.3	3 ^η περίπτωση (το δίκτυο δεν επαρκεί για την κάλυψη των P_{fixed}) :.....	106
4.6	Διαγράμματα από προσομοίωση του μοντέλου	107
4.6.1	Διαγράμματα του $\eta_{roundtrip}$	107
4.6.2	Τάση της VRB συναρτήσει του SoC για σταθερή τιμή ρεύματος	107
4.6.3	Τάση της VRB V_b συναρτήσει του SoC και της ισχύος	108
4.6.4	Ο βαθμός απόδοσης της VRB V_b για διάφορες συνθήκες λειτουργίας ...	110
4.7	Προσομοίωση ένταξης του BESS σε αυτόνομο σύστημα	115
4.7.1	Χαρακτηριστικά του συστήματος	116
4.7.2	Προσομοίωση και παρουσίαση αποτελεσμάτων για διάφορες τιμές χωρητικότητας	118
4.7.3	Υπόλοιπα αποτελέσματα για χωρητικότητα 25h.	120

Κεφάλαιο 5 124

Υβριδικοί Σταθμοί Παραγωγής Ενέργειας 124

5.1	Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας.....	124
5.2	Εφαρμογές Υβριδικών Συστημάτων	124
5.2.1	Συστήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής σε Κεντρικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας	124
5.2.2	Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα	125
5.2.3	Τροφοδότηση απομονωμένων Φορτίων ή Φορτίων Ειδικού Σκοπού	125

Κεφάλαιο 6	126
Προσομοίωση Υβριδικού Σταθμού Με Συσσωρευτές τύπου VRB – Περιγραφή συστήματος Κρήτης	126
6.1 Γενικά για την προσομοίωση	126
6.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Μη Διασυνδεδεμένων Νησιωτικών (ΜΔΝ) Συστημάτων με σταθμούς ΑΠΕ.....	126
6.2.1 Λειτουργία ΜΔΝ με αιολική και Φ/Β διείσδυση	126
6.2.2 Πολιτική Στρεφόμενης Εφεδρείας.....	130
6.2.3 Πολιτική Διαχείρισης ΜΔΝ με ΥΒΣ.....	130
6.3 Εσωτερική Λειτουργία του ΥΒΣ	136
6.3.1 Προσφορά Ενέργειας και Δήλωση Φορτίου	136
6.3.2 Λειτουργία του ΥΒΣ κατά τη διάρκεια του 24ώρου	136
6.3.3 Ισοζύγιο Ισχύος του ΥΒΣ.....	138
6.4 Δεδομένα εισόδου του συστήματος της Κρήτης.....	139
6.4.1 Χαρακτηριστικά του φορτίου	139
6.4.2 Χαρακτηριστικά των Συμβατικών Μονάδων	140
6.4.3 Χαρακτηριστικά Αιολικών Πάρκων εκτός του ΥΒΣ	140
6.4.4 Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί	142
6.5 Τιμολογήσεις Ενέργειας και Ισχύος.....	144
6.6 Δεδομένα για τον ΥΣΑΜ	145

Κεφάλαιο 7 146

Βέλτιστη διαστασιολόγηση του ΥΣΑΜ 146

7.1 Εισαγωγή.....	146
7.2 Υπολογισμός Οικονομικών Δεικτών	146
7.3 Οικονομικές Παραδοχές.....	150
7.4 Βέλτιστη Διαστασιολόγηση του ΥΣΑΜ	152
7.5 Ετήσια Ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα	155
7.6 Στατιστική Ανάλυση Ετησίων Αποτελεσμάτων	162
7.7 Τυπικά Διαγράμματα Λειτουργίας του ΥΣΑΜ	165
7.7.1 Διαγράμματα για την Εβδομάδα Χαμηλού Φορτίου.....	167
7.7.2 Διαγράμματα για την Εβδομάδα Υψηλού Φορτίου	168
7.7.3 Διαγράμματα για την Εβδομάδα Χαμηλής Αιολικής Παραγωγής	169

7.7.4	Διαγράμματα για την Εβδομάδα Υψηλής Αιολικής Παραγωγής.....	170
Κεφάλαιο 8		171
Συμπεράσματα		171
8.1	Γενικά.....	171
8.2	Μελλοντικές Κατευθύνσεις.....	173
Βιβλιογραφία		174

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

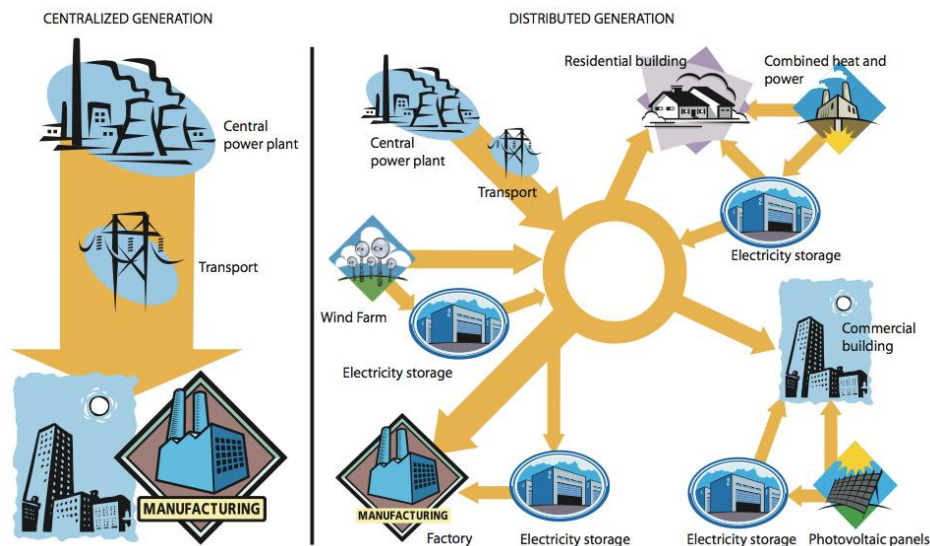
Η απελευθέρωση και η απορρύθμιση στην Βιομηχανία παραγωγής Ηλεκτρικής ενέργειας που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια και αναμένεται να αυξηθεί στο εγγύς μέλλον θέτει νέες προκλήσεις και προβληματισμούς στους Διαχειριστές των συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μεγάλες παραγωγικές μονάδες του υπάρχοντος συγκεντρωτικού συστήματος παραγωγής συμπληρώνονται με τη λεγόμενη διεσπαρμένη παραγωγή. Η ολοένα και αυξανόμενη συμμετοχή της διεσπαρμένης παραγωγής δημιουργεί την ανάγκη για αλλαγές στην τεχνολογία διαχείρισης της μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Τη βασικότερη αλλαγή αποτελεί η δυνατότητα οικονομικής και αποδοτικής αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας που θα δώσει στους διαχειριστές του δικτύου την ευελιξία να ελέγχουν το δίκτυο πιο ενεργά.

Η διεσπαρμένη παραγωγή ορίζεται ως η παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας, με τιμές που κατά κανόνα κυμαίνονται μεταξύ 1kW – 100MW, και είναι μια σχετικά καινούρια τάση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο απλά όταν αναφερόμαστε στη διεσπαρμένη παραγωγή εννοούμε τις μονάδες παραγωγής ενέργειας που έχουν εγκατασταθεί κοντά στο σημείο κατανάλωσης - φορτίο (σχήμα 1.1). Παραδείγματα τέτοιου διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής (distributed generation units – DGU) αποτελούν οι κυψέλες καυσίμου, οι αεριοστρόβιλοι, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι ανεμογεννήτριες.

Στην περίπτωση των αεριοστροβίλων και των κυψελών καυσίμου, η θερμότητα που υπό κανονικές συνθήκες θα χανόταν ως απώλειες, μπορεί εύκολα να αξιοποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί για λειτουργίες, όπως για τη θέρμανση κτηρίων ή για τη λειτουργία ενός boiler. Αυτή μέθοδος είναι γνωστή ως Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ) και βασίζεται στην ταυτόχρονη παραγωγή εκμεταλλεύσιμης ή αξιοποιήσιμης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, από την ίδια ενεργειακή πηγή. Τα συστήματα Συμπαραγωγής μπορούν να εγκατασταθούν σε ενεργοβόρες βιομηχανίες, στον τριτογενή τομέα (νοσοκομεία, ξενοδοχεία, μεγάλα κτίρια, αθλητικά κέντρα, κλπ), ή να καλύψουν τις θερμικές και ηλεκτρικές ανάγκες μιας αστικής περιοχής, μέσω συστημάτων τηλεθέρμανσης / τηλεψύξης.

Τα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής (Distributed Energy Resources – DER) με ΣΗΘ είναι πολύ αποδοτικά, χρησιμοποιώντας μέχρι και το 90% της ενέργειας του καυσίμου που καταναλώνουν. Ακόμη το γεγονός ότι βρίσκονται τοποθετημένα πολύ κοντά στους καταναλωτές εξαλείφει της απώλειες μεταφοράς που έχουν οι μεγάλες γραμμές. Από την άλλη, ενώ το φορτίο που αντιστοιχεί στους μεγάλους σταθμούς μεταβάλλεται πολύ αργά, λόγω ετεροχρονισμού των επιμέρους φορτίων, αφού αντιστοιχούν σε μεγάλο αριθμό καταναλωτών (averaging effect), αυτό δεν ισχύει και σε ένα DER, όπου πολύ μικρότερος αριθμός καταναλωτών συνδέεται σε μία και μόνο μονάδα παραγωγής. Έτσι λοιπόν το φορτίο μπορεί να παρουσιάσει μεγάλες διακυμάνσεις κάτι που απαιτεί πολύ γρήγορη αντίδραση από τις μονάδες παραγωγής, ώστε να τηρείται το ισοζύγιο παραγωγής-κατανάλωσης ενέργειας.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η ποιότητα ισχύος του συστήματος, στην περίπτωση που η μονάδα παραγωγής αδυνατεί να ακολουθήσει τις πολύ γρήγορες αλλαγές στο φορτίο. Τη λύση δίνει η δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας.



Σχήμα 1. 1 Αριστερά : Το σημερινό συγκεντρωτικό σύστημα παραγωγής, Δεξιά σύστημα με διεσπαρμένη παραγωγή.

Η υψηλή απόδοση κατά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας προϋποθέτει τη λειτουργία των γεννητριών στις ονομαστικές τους τιμές. Η μερική τους φόρτιση οδηγεί σε χαμηλότερες αποδόσεις και σε μεγαλύτερη εκπομπή ρύπων. Η χρήση διατάξεων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, (Energy Storage Systems – ESS) μπορεί να εξομαλύνει το φορτίο που «βλέπει» η γεννήτρια, απορροφώντας ή προμηθεύοντας ενέργεια στο σύστημα όποτε χρειάζεται. Έτσι οι γεννήτριες μπορούν να λειτουργήσουν στην ονομαστική τους τιμή και οι διακυμάνσεις της ισχύος να απορροφηθούν από το ESS. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ισοστάθμιση φορτίου (Load Leveling) και περιγράφεται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

Η χρήση των ESS καθίσταται απαραίτητη και για τις διακυμάνσεις στην έξοδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά, λόγω των μεταβολών στην ταχύτητα του ανέμου και στην ηλιακή ένταση αντίστοιχα. Η χρήση τέτοιου είδους πηγών ενέργειας απαιτεί τη χρήση κατάλληλων αποθηκευτικών διατάξεων διότι στην περίπτωση αυτή η προσφορά και η ζήτηση ενέργειας από τους καταναλωτές είναι ασυσχέτιστες, άρα όχι απαραίτητα συγχρονισμένες.

Στην πράξη οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που συνδυάζονται με ESS παρέχουν αξιοπιστία και σταθερότητα σαν τις συμβατικές μονάδες παραγωγής λόγω της μεγάλης διαθεσιμότητας στην προσφορά ενέργειας. Αντίθετα οι ανανεώσιμες πηγές χωρίς ESS παρουσιάζουν μεταβλητότητα στην παραγωγή τους και εφόσον δεν μπορούν να προσαρμοστούν στην εκάστοτε ζήτηση ενέργειας, πρέπει να λειτουργούν μόνο όταν είναι διαθέσιμες.

Τα οφέλη ωστόσο από τη χρήση των ESS δε σταματούν εδώ. Η εγκατάσταση ενός ESS επιτρέπει την αγοραπωλησία (αρμπιτράζ) ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορες τιμές, ώστε να εκμεταλλευτούμε τη διαφορά στην κοστολόγηση και να έχουμε κέρδος (bulk electricity price arbitrage). Ακόμη, όσον αφορά το δίκτυο, παρέχει επιπλέον επικουρικές υπηρεσίες, υποστήριξη της μεταφοράς ενέργειας κτλ.

Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στα Συστήματα Αποθήκεσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (BESS) αποτελούμενα από συσσωρευτές τεχνολογίας VRB.

Η επιλογή της μοντελοποίησης και τηςπροσομοίωσης ενός συσσωρευτή ως αντικείμενο της παρούσας εργασίας έγινε λόγω της καίριας σημασίας που έχουν οι συσσωρευτές σήμερα για την υποστήριξη της διεσπαρμένης παραγωγής και γενικά για την υποστήριξη του υφιστάμενου δικτύου. Συγκεκριμένα οι συσσωρευτές τύπου VRB με τα πλεονεκτήματα που τους διακατέχουν αποτελούν μια φιλόδοξη επιλογή για τη συγκρότηση ενός BESS σήμερα.

1.2 Περιεχόμενο της εργασίας

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ο συσσωρευτής τεχνολογίας VRB που αποτελεί μία σύγχρονη μέθοδο αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, και περιγράφονται οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του. Σκοπός της εργασίας είναι η κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου του συσσωρευτή αυτού το οποίο θα μπορεί να περιγράψει επαρκώς τη συμπεριφορά του συσσωρευτή κάτω από διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Με χρήση του μοντέλου αυτού δύναται η προσομοίωση ενός Υβριδικού Σταθμού παραγωγής ενέργειας (ΥΒΣ), αποτελούμενο από ένα Αιολικό Πάρκο και ένα σύστημα αποθήκευσης με VRB.

1.2.1 Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία αυτή αποτελείται από 8 κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων έχει ως εξής :

- Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι λόγοι που καθιστούν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας αναγκαία στις μέρες μας. Περιγράφονται οι βασικότερες τεχνολογίες αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται είτε βρίσκονται υπό μελέτη σήμερα και γίνεται σύγκρισή τους ως προς τις δυνατότητες και τις εφαρμογές που η κάθε μία μπορεί να έχει.
- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικά ο συσσωρευτής τεχνολογίας VRB. Αφού δοθούν τα πλεονεκτήματά του, παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας του καθώς και όλες οι μαθηματικές εξισώσεις που τη διέπουν. Γίνεται εκτενής αναφορά στα δομικά στοιχεία του συσσωρευτή, καθώς επίσης και στα βασικά μεγέθη που τον χαρακτηρίζουν. Τέλος απεικονίζονται διαγράμματα που προκύπτουν από την προσομοίωση του συσσωρευτή υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας
- Στο Κεφάλαιο 4 αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο περιγραφής του συσσωρευτή VRB κατάλληλο για χρήση του σε ενεργειακή επισκόπηση συστήματος. Το μοντέλο αυτό είναι γραμμένο σε γλώσσα MatLab. Ακόμη περιγράφεται θεωρητική αυτόνομη λειτουργία του VRB και παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προκύπτουν από αυτή.
- Στο Κεφάλαιο 5 ορίζεται ο όρος Υβριδικός Σταθμός Ενέργειας (ΥΒΣ) και γίνεται μια γενική περιγραφή των συστημάτων αυτών.
- Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η πολιτική διαχείρισης ενός ΥΒΣ καθώς και κάποιες εσωτερικές λειτουργίες του. Ακόμη δίνονται τα βασικά στοιχεία του συστήματος της

Κρήτης. Όλα αυτά τα στοιχεία είναι απαραίτητα για την προσομοίωση ενός ΥΒΣ στο σύστημα της Κρήτης, κάτι που γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

- Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται προσομοίωση ενός ΥΒΣ που εντάσσεται στο σύστημα της Κρήτης και παρουσιάζονται σε διαγράμματα και πίνακες οι κυριότερες μεταβλητές του ΥΒΣ αλλά και του συστήματος. Γίνεται ακόμη υπολογισμός της βέλτιστης διαστασιολόγησης του ΥΒΣ, με χρήση γενετικών αλγορίθμων, ώστε να έχουμε τα καλύτερα οικονομικά αποτελέσματα. Τέλος παρουσιάζονται τα ετήσια ενεργειακά αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση αυτή.
- Στο Κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

1.3 Κύριοι Προβληματισμοί

- Ανάπτυξη ενός κατάλληλου αλλά παράλληλα απλού μοντέλου, κάτι που θα κάνει τη χρήση του δυνατή για πληθώρα προσομοιώσεων χωρίς να απαιτείται η γνώση πολύπλοκων μεταβλητών
- Διερεύνηση της λειτουργίας των VRB κάτω από διάφορες συνθήκες λειτουργίας, με χρήση του μοντέλου που εισάγεται.
- Προσπάθεια ελαχιστοποίησης των απωλειών κατά τη φόρτιση, με αποτέλεσμα το μέγιστο βαθμό απόδοσης της αποθήκευσης της ενέργειας.
- Έλεγχος της ισχύος φόρτισης της VRB ώστε παρουσιάζει το μέγιστο δυνατό βαθμό απόδοσης
- Αξιολόγηση των ενεργειακών και των οικονομικών αποτελεσμάτων της εισαγωγής ενός (Υβριδικού Σταθμού Παραγωγής – ΥΒΣ) αποτελούμενο από BESS με VRB στο σύστημα της Κρήτης. Αξιολόγηση δηλαδή του ΥΒΣ ως οικονομική επένδυση και μελέτη της επιρροής στο σύστημα.
- Εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού (Ισχύς Αιολικών, Ισχύς BESS, Χωρητικότητα BESS, Εγγυημένη Ισχύς του ΥΒΣ), ώστε να λάβουμε τα βέλτιστα οικονομικά αποτελέσματα (μεγιστοποίηση του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης – IRR)

Κεφάλαιο 2

Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Οφέλη της Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας

Από τα πρώτα χρόνια χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας έγινε αντιληπτή η ανάγκη εύρεσης τρόπου αποθήκευσής της. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες πηγές ενέργειας, όπως το φυσικό αέριο, το κάρβουνο ή το πετρέλαιο, η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να χρησιμοποιείται ακριβώς τη στιγμή που παράγεται. Αυτό σημαίνει ότι οι τυχόν αλλαγές στη ζήτηση δεν είναι εύκολο να αντιμετωπιστούν, χωρίς να κόβεται η παροχή ενέργειας κάποιες στιγμές ή χωρίς να αποθηκεύεται κάπως το πλεόνασμα. [1]

Τα συστήματα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (ESS) έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι κυριότερες εφαρμογές τους είναι οι εξής:

- Για μικρές χρονικές περιόδους, βασική απαίτηση αποτελεί ο έλεγχος της ποιότητας ισχύος. Τα ESS μπορούν ταχύτατα να απορροφήσουν ή να αποδώσουν στο σύστημα τα αναγκαία ποσά αέργου ισχύος, έτσι ώστε να διατηρηθεί η σταθερότητα της τάσης στο σύστημα μεταφοράς. Παρέχουν επίσης στρεφόμενη εφεδρεία για να διατηρηθεί η συχνότητα του συστήματος.
- Για μεγάλες χρονικές περιόδους, οι βασικές απαιτήσεις είναι η διαχείριση και ανταλλαγή ενέργειας (arbitrage), η πρόβλεψη και αποφυγή απρόοπτων και ανεπιθύμητων γεγονότων και σφαλμάτων που μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία του συστήματος και κατ' επέκταση την παροχή υπηρεσιών στους καταναλωτές. Το ESS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει ενεργό ισχύ στην περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο μεταφοράς ή διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας ή για να τροφοδοτήσει με ενέργεια ένα μέρος του δικτύου αμέσως μετά την εκδήλωση ενός blackout.

2.1.1 Αγοραπωλησία (Αρμπιτράζ) Ηλεκτρικής Ενέργειας (Bulk Electricity Price Arbitrage)

Το αρμπιτράζ (arbitrage) αποτελεί μια επιχειρηματική ουσιαστικά δραστηριότητα που περιλαμβάνει την αγορά ξένου συναλλάγματος, χρυσού, χρηματοοικονομικών τίτλων ή άλλα εμπορεύματα από μια αγορά και τη σχεδόν ταυτόχρονη μεταπώλησή του σε κάποια άλλη αγορά, με σκοπό την απόκτηση κέρδους από την υπάρχουσα διαφορά τιμής μεταξύ των δύο αγορών.

Η εφαρμογή του αρμπιτράζ στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ χαμηλή τιμή, κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης και τη μεταπώλησή της σε περιόδους υψηλής ζήτησης (ώρες αιχμής), σε τιμή πολύ μεγαλύτερη. Κατά συνέπεια το ESS εξισορροπεί τις διακυμάνσεις μεταξύ της παροχής και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. [2]

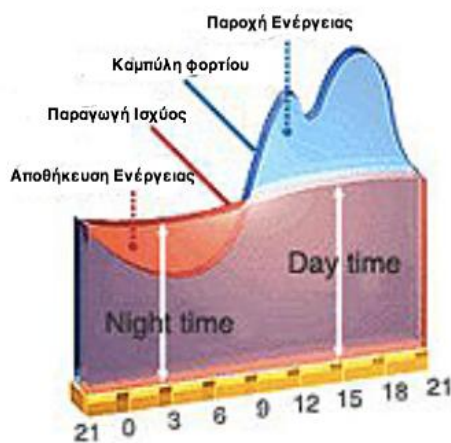
Καθημερινά παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της μέρας σε σχέση με την τιμή της κατά τη διάρκεια της νύχτας. Είναι λοιπόν φανερό ότι το αρμπιτράζ ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μια επένδυση με σχεδόν μηδενικό ρίσκο και αρκετά κερδοφόρα εφόσον η εκμεταλλευόμενη διαφορά στην τιμή της ενέργειας είναι μεγαλύτερη από το κόστος αποθήκευσης.

2.1.2 Διαχείριση της Ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας στο επίπεδο του καταναλωτή

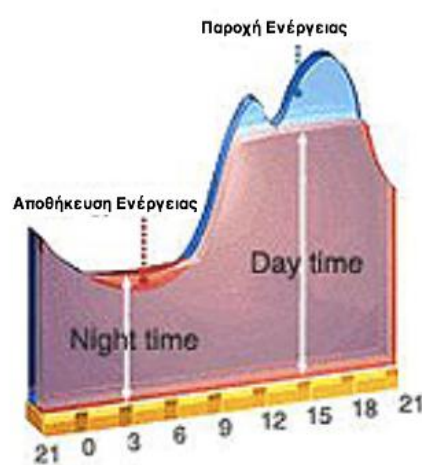
Οι επιχειρήσεις παροχή ηλεκτρικής ενέργειας συχνά χρεώνουν τους εμπορικούς και βιομηχανικούς τους πελάτες με πρόσθετη επιβάρυνση που συνδέεται με το φορτίο αιχμής τους (Peak Load). Προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν το συνολικό κόστος οι καταναλωτές μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα ESS ώστε να μειώσουν το φορτίο αιχμής και τη χρέωση που αυτό συνεπάγεται.

Αυτή η εφαρμογή καλείται εξομάλυνση των αιχμών (γνωστότερη ως Peak Shaving) και συνίσταται από την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και την επαναχρησιμοποίησή της σε περιόδους μεγάλης ζήτησης, με σκοπό τη μείωση της τιμής της κορυφής (αιχμής). Η εξομάλυνση των αιχμών απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 2.1.

● Ισοστάθμιση Φορτίου (Load Leveling)



● Εξομάλυνση Αιχμών (Peak Shaving)



Σχήμα 2. 1 Αριστερά : Ισοστάθμιση φορτίου (Load Leveling) με αποθήκευση παραγόμενης ενέργειας κατά τις νυχτερινές ώρες (χαμηλή ζήτηση) και απόδοσή της κατά τη διάρκεια της μέρας, Δεξιά : Εξομάλυνση Αιχμών με απόδοση αποθηκευμένης ενέργειας κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης

Άλλη μια εφαρμογή ενός ESS σε συντομότερη και πιο επαναλαμβανόμενη χρονική κλίμακα, η εξομάλυνση των αιχμών μπορεί να εφαρμοστεί στα ηλεκτρικά μέσα μεταφοράς. Συγκεκριμένα το ESS θα μπορούσε να εξομαλύνει τις σύντομες «ριπές» ισχύος στο δίκτυο διανομής, που παράγονται όταν το ηλεκτρικό όχημα φρενάρει ή επιταχύνει.

Άλλος ένας τρόπος Διαχείρισης της Ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι η διαχείριση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας κατά την ώρα της χρήσης. Ουσιαστικά οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζονται σε κατηγορίες (εκτός αιχμής-off peak, μέσης mid-peak, αιχμής on-peak) με διαφορετική κοστολόγηση για την κάθε κατηγορία. Έτσι με την ίδια φιλοσοφία όπως στο αρμπιτράζ, οι καταναλωτές μπορούν να επωφεληθούν από τη διαφορά της τιμής, αποθηκεύοντας ενέργεια σε περιόδους που δεν έχουμε αιχμή. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 1.2.

2.1.3 Επικουρικές υπηρεσίες

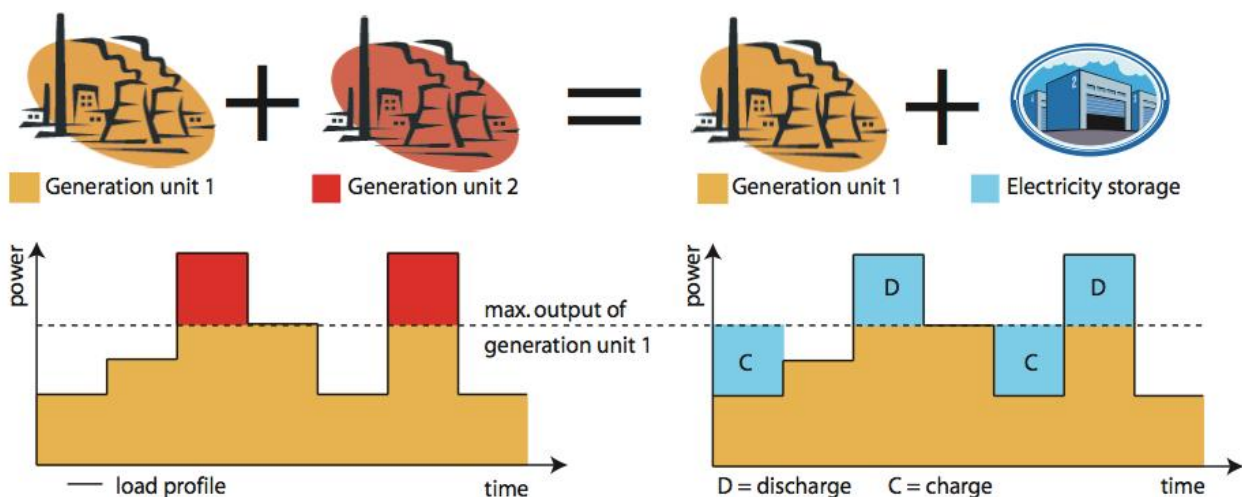
Οι επικουρικές υπηρεσίες είναι όλες οι λειτουργίες που εκτελούνται από τον εγκατεστημένο εξοπλισμό και το προσωπικό που ελέγχει τη διαδικασία παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, προς υποστήριξη της κύριας λειτουργίας του συστήματος που είναι η παροχή ενέργειας και η διανομή της ισχύος. Η ρυθμιστική αρχή του συστήματος ορίζει αυτές τις υπηρεσίες ως απαραίτητες λειτουργίες για την υποστήριξη της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας από τον παραγωγό στον τελικό καταναλωτή, διατηρώντας παράλληλα την ακεραιότητα και την αξιοπιστία του διασυνδεδεμένου συστήματος. Οι επικουρικές υπηρεσίες που μπορεί να παρέχει ο ESS είναι οι εξής:

- **Παροχή αέργου ισχύος και έλεγχος της τάσης:** Γίνεται έγχυση ή απορρόφηση αέργου ισχύος από το ESS με σκοπό να διατηρηθεί η τάση στους ζυγούς του συστήματος μεταφοράς στο απαιτούμενο εύρος τιμών
- **Ρύθμιση:** Εξισορρόπηση παραγωγής/φορτίου κάθε χρονική στιγμή για να πληρούνται οι προδιαγραφές
- **Στρεφόμενη Εφεδρεία Συστήματος:** Δυνατότητα άμεσης παροχής ενεργούς ισχύος στο δίκτυο έτσι ώστε να υπάρχει άμεση απόκριση σε περίπτωση διακοπής της παροχής ισχύος από το δίκτυο λόγω σφάλματος. Συνήθως γίνεται με μονάδες παραγωγής που βρίσκονται σε λειτουργία και είναι συγχρονισμένες με το δίκτυο άλλα δεν είναι ενταγμένες σε αυτό, δηλαδή δεν εξυπηρετούν κάποιο φορτίο
- **Δευτερεύουσα Στρεφόμενη Εφεδρεία Συστήματος:** Δυνατότητα παροχής ενεργούς ισχύος στο δίκτυο έτσι ώστε να υπάρχει απόκριση εντός 10λέπτου σε περίπτωση διακοπής της παροχής ισχύος από το δίκτυο λόγω σφάλματος.
- **Παρακολούθηση φορτίου:** Κάλυψη των ωριαίων και ημερησίων μεταβολών στο φορτίο
- **Εξισορρόπηση Ενέργειας:** Διόρθωση ασυμφωνίας μεταξύ προγραμματισμένης και πραγματικής ανταλλαγής ενέργειας σε ωριαία βάση
- **Στατή Εφεδρεία (Backup):** Δυνατότητα παραγωγής επιπλέον ενεργούς ισχύος Σε διάστημα μιας ώρας από το σφάλμα.
- **Αναπλήρωση απωλειών ενεργούς ισχύος:** Παραγωγή που αναπληρώνει τις απώλειες λόγω του δικτύου μεταφοράς και διανομής
- **Επανεκκίνηση συστήματος (Black start):** Δυνατότητα ενεργοποίησης μέρους του δικτύου μετά από blackout χωρίς τη χρήση εξωτερικής βοήθειας
- **Σταθερότητα δικτύου:** Απόκριση σε πραγματικό χρόνο σε διαταραχές του συστήματος για να διατηρηθεί η σταθερότητά και η ασφάλεια

2.1.4 Αναβολή Αναβάθμισης Μονάδων Ηλεκτροπαραγωγής

Σε περιπτώσεις όπου ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας από τους καταναλωτές απαιτεί την ένταξη καινούργιων μονάδων παραγωγής στο σύστημα, ένα σύστημα ESS μπορεί να χρησιμοποιηθεί αναβάλλοντας ή και εξαλείφοντας την ανάγκη για νέες μονάδες. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 2.2, η αποθήκευση ενέργειας σε χρονικά διαστήματα όπου η ζήτησή είναι μειωμένη και η επανατροφοδότησή της σε περιόδους αιχμής φορτίου υποκαθιστά την προσθήκη νέων μονάδων.

Επιπλέον οφέλη αυτής της μεθόδου είναι η καλύτερη εκμετάλλευση των υπάρχουσών μονάδων, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά τον συντελεστή χρησιμοποίησης του συστήματος. Επιτυγχάνεται ακόμη καλύτερη απόδοση του συστήματος, αφού οι μονάδες παραγωγής θα λειτουργούν περισσότερο στις ονομαστικές τους τιμές και δε θα έχουμε περίσσειμα μονάδων που υπολειπούνται.



Σχήμα 2. 2 Αναβολή της αναβάθμισης των μονάδων παραγωγής. Αριστερά : Το φορτίο καλύπτεται με επιπρόσθετη μονάδα παραγωγής, η οποία χρησιμοποιείται για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα (διαστήματα αυξημένης ζήτησης), Δεξιά : Οι μονάδες παραγωγής συμπληρώνονται από ESS που δίνει τη δυνατότητα καλύτερης αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας.

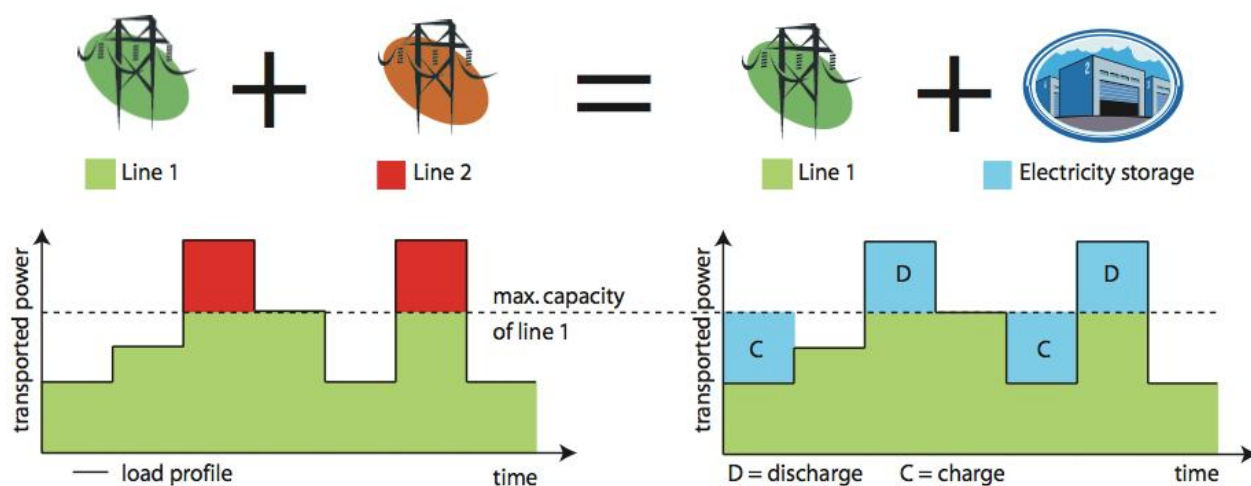
2.1.5 Υποστήριξη γραμμών μεταφοράς και διανομής

Κατ' αντιστοιχία με την ανάγκη για αναβάθμιση των μονάδων παραγωγής, σε πολλές περιοχές η δυνατότητα μεταφοράς ενέργειας των γραμμών δεν συμβαδίζει με την ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τους καταναλωτές, με συνέπεια να δημιουργείται συμφόρηση στο σύστημα. Η εγκατάσταση ενός ESS κοντά στους καταναλωτές μπορεί να απορροφήσει ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και να την τροφοδοτήσει σε περιόδους αιχμής, «ανακουφίζοντας» τις γραμμές μεταφοράς σε διαστήματα μεγάλης ζήτησης ενέργειας.

Επιπλέον το ESS μειώνει την απαίτηση για γραμμή μεγάλης μεταφορικής ικανότητας, αφού οι γραμμές σχεδιάζονται ώστε να εξυπηρετούν το μέγιστο φορτίο, το οποίο όμως

παρουσιάζονται για πολύ μικρές χρονικές περιόδους. Έτσι με την εγκατάσταση ενός ESS γίνεται καλύτερη αξιοποίηση των στοιχείων του δικτύου, ενώ βελτιώνεται η παρεχόμενη ποιότητα ισχύος.

Η συμβολή του ESS απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 2.3 :



Σχήμα 2. 3 Υποστήριξη των γραμμών μεταφοράς και διανομής από επιπρόσθετη γραμμή (Αριστερά) και από ESS (Δεξιά).

2.1.6 Αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές και ποιότητα ισχύος

Η αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές και ταυτόχρονα η διατήρηση καλής ποιότητας στην παρεχόμενη ισχύ αποτελούν δύο πολύ σημαντικές εφαρμογές του ESS

Αξιοπιστία

Οι καταναλωτές που χρίζουν μεγάλης αξιοπιστίας στην παροχή ηλεκτρικής ισχύος μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα ESS για ασφάλεια απέναντι σε μια γενική διακοπή τροφοδοσίας (blackout). Σε αυτήν την περίπτωση το ESS πρέπει να παρέχει αρκετή ενέργεια ώστε

- Να μπορεί να αντεπεξέλθει σε διακοπές τροφοδοσίας εκτεταμένης διάρκειας
- Να μπορεί να ολοκληρώσει την ομαλή διακοπή όλων των διαδικασιών

Ποιότητα Ισχύος

Υψηλή ποιότητα ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με ένα ESS που προστατεύει το φορτίο από συμβάντα μικρής διάρκειας που μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα της ισχύος. Κάποιες εκδηλώσεις κακής ποιότητας ισχύος είναι οι εξής:

- Μεταβολές στην τιμή της τάσης
- Μεταβολές στη συχνότητα
- Χαμηλός συντελεστής ισχύος (το ρεύμα και η τάση έχουν πολύ μεγάλη διαφορά φάσης)
- Εμφάνιση Αρμονικών (ρεύματα ή τάσεις σε συχνότητες διαφορετικές από την κύρια συχνότητα)
- Διακοπές στην παροχή ισχύος, από κλάσματα του δευτερολέπτου έως αρκετά λεπτά

2.1.7 Εξασφάλιση παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας και χρονική μετατόπιση της παραγωγής

Σε μια ανοιχτή και ελεύθερη αγορά, ο παραγωγός προσφέρει συγκεκριμένο ποσό ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Επειδή η προσφορά του είναι σταθερή, του επιβάλλεται πρόστιμο όταν δεν μπορεί να παρέχει την προσυμφωνημένη ισχύ στον καταναλωτή. Έτσι ο παραγωγός πολλές φορές προστατεύει την προσφορά του με εφεδρική μονάδα παραγωγής. Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (International Energy Agency – IEA) αναφέρει ότι σε ακραίες περιπτώσεις, για 100 MW αιολικής παραγωγής, απαιτούνται έως και 100 MW εφεδρείας από συμβατικές ή υδροηλεκτρικές μονάδες για να επιτευχθεί η απαραίτητη αξιοπιστία. Προφανώς τα ESS είναι κατάλληλα για αυτό το έργο.

Τα ESS μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης (και άρα χαμηλής τιμής). Την ενέργεια αυτή ο παραγωγός μπορεί να την πουλήσει σε διαστήματα αυξημένης ζήτησης σε καλύτερη τιμή. Επιτυγχάνει έτσι χρονική μετατόπιση της παραγωγής του, διαφέρει δηλαδή η στιγμή της παραγωγής από τη στιγμή της κατανάλωσης, με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση της ενέργειας και τη μεγιστοποίηση του κέρδους.

2.2 Πως αποθηκεύεται η Ηλεκτρική Ενέργεια

Προηγουμένως παρουσιάστηκε το ευρύ φάσμα εφαρμογών ενός Συστήματος Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (ESS). Τώρα θα παρουσιαστούν κάποιοι από τους σημαντικότερους τρόπους αποθήκευσης της ενέργειας που χρησιμοποιούνται σήμερα. Με την πάροδο των ετών, πολλές τεχνολογίες έχουν εμφανιστεί. Κάποιες από αυτές έχουν ήδη εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία (για παράδειγμα η αντλαιοσταμείωση), ενώ κάποιες άλλες δεν έχουν καταφέρει ακόμη να γίνουν εμπορικά εκμεταλλεύσιμες.

Όλες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, η κάθε μία τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και χρησιμοποιούνται ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να χωριστούν σε 3 κύριες κατηγορίες:

- **Μηχανικά Συστήματα Αποθήκευσης:** Αποθηκεύουν σε μορφή κινητικής ενέργειας (σφόνδυλοι) ή σε μορφή δυναμικής ενέργειας (PHS και CAES)

- **Ηλεκτρικά Συστήματα Αποθήκευσης:** Ηλεκτροστατική αποθήκευση με τη χρήση πυκνωτών και υπερπυκνωτών, καθώς και μαγνητική αποθήκευση ε τη χρήση τεχνολογίας SMES
- **Θερμικά Συστήματα Αποθήκευσης :** Αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα χαμηλής υψηλής θερμοκρασίας
- **Ηλεκτροχημικά Συστήματα Αποθήκευσης:** Αποθηκεύουν με τη μορφή ηλεκτροχημικής ενέργειας (συμβατικές μπαταρίες, μπαταρίες ροής) ή με τη μορφή χημικής ενέργειας (κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες μετάλλου αέρα) ή με τη μορφή θερμοχημικής ενέργειας (τεχνολογία solar fuel)

Οι κατηγορίες αυτές θα αναλυθούν διεξοδικά παρακάτω.

2.2.1 Μηχανικά Συστήματα Αποθήκευσης

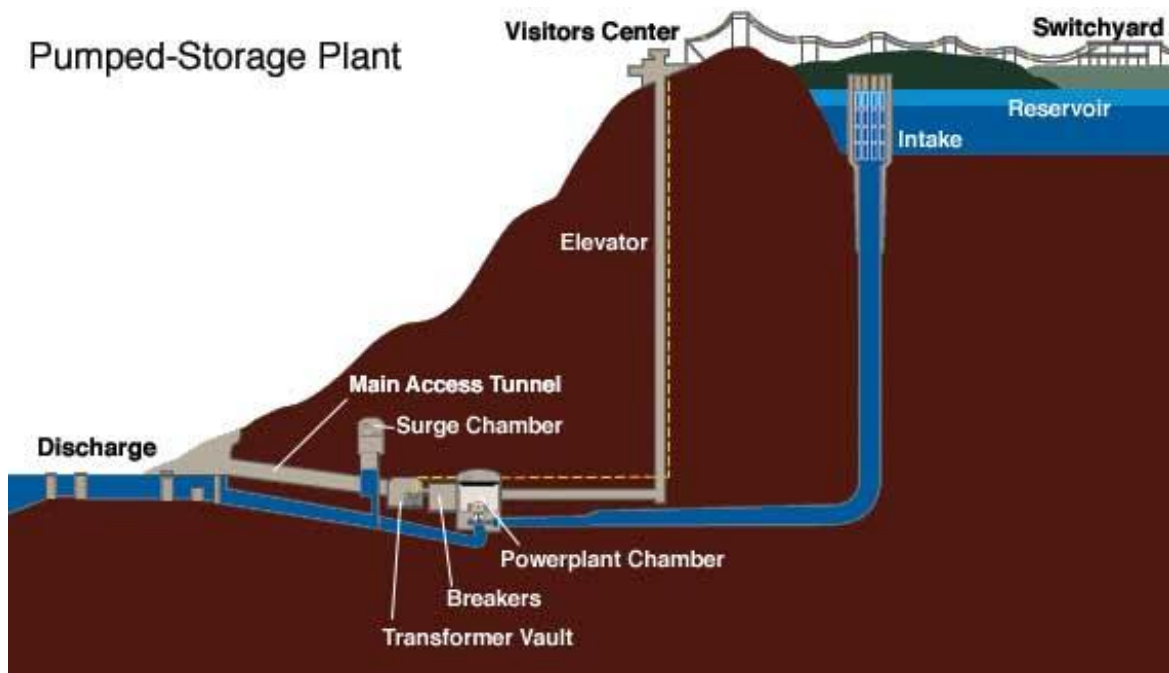
Από τα αρχαία χρόνια οι νερόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν από το ν άνθρωπο για να εκμεταλλευτεί τη μηχανική ενέργεια του νερού. Αργότερα ενσωματώθηκαν συστήματα δεξαμενών και χτίστηκαν φράγματα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αποθήκευση της ενέργειας και η επαναχρησιμοποίησή της όταν χρειαζόταν. Τέλος προστέθηκαν οι σφόνδυλοι, έτσι ώστε να εξομαλυνθεί η ισχύς εξόδου του συστήματος.

Τα σύγχρονα μηχανικά μέσα αποθήκευσης βασίζονται στις ίδιες ακριβώς ιδέες. Ουσιαστικά, η δυναμική ενέργεια του νερού χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις αντλησιοταμίευσης, οι σφόνδυλοι βασίζουν τη λειτουργία τους στην κινητική ενέργεια, και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με συμπίεση αέρα (CAES) αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια συμπιέζοντας είτε αέρα είτε άλλα αέρια, συνήθως άζωτο.

2.2.1.1 Αντλησιοταμίευση (Pumped Hydro Storage - PHS)

Πρόκειται για την παλαιότερη αλλά και την ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδο αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην Ιταλία και την Ελβετία τη δεκαετία του 1890 και ουσιαστικά μέχρι το 1970 ήταν η μόνη εμπορικά διαθέσιμη επιλογή για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Το 2009 η εγκατεστημένη ισχύς των συστημάτων αντλησιοταμίευσης εκτιμήθηκε παγκοσμίως στα 104 GW. Συγκεκριμένα στην Ευρώπη τα συστήματα αντλησιοταμίευσης αποτελούν το 5% των συνολικών μονάδων παραγωγής. Σήμερα η αντλησιοταμίευση αποτελεί την πιο ελκυστική μέθοδο αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας (1000 MW -5000 MW) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με αιολικά πάρκα, τόσο ως διεσπαρμένη παραγωγή, όσο και σε αυτόνομα συστήματα. Η χωρητικότητά της ποικίλει από μερικές ώρες ως και μερικές μέρες.

Η πιο γενική συγκρότηση ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης περιλαμβάνει δύο ταμιευτήρες νερού που έχουν υψομετρική διαφορά της τάξης των εκατοντάδων μέτρων, έναν αριθμό υδροστροβίλων με τις αντίστοιχες ηλεκτρικές γεννήτριες, έναν αριθμό αντλιών με τους αντίστοιχους ηλεκτρικούς κινητήρες, καθώς και ένα σύστημα ελέγχου. Η επικοινωνία μεταξύ του άνω και του κάτω ταμιευτήρα μπορεί να γίνει με έναν ή με δύο αγωγούς πτώσης.



Σχήμα 2. 4 Αναλυτικό διάγραμμα ενός συστήματος Αντλησιοταμίευσης

- Η αρχή λειτουργίας του συστήματος είναι η εξής:

Η περίσσεια ενέργειας που εμφανίζεται κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου και υψηλής παραγωγής ΑΠΕ αξιοποιείται για την άντληση νερού στον άνω ταμιευτήρα και, όπου και αποθηκεύεται με τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Ανάλογα, κατά τις περιόδους αιχμής ελευθερώνεται νερό από τον άνω ταμιευτήρα το οποίο περιστρέφει τους υδροστροβίλους παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια και τελικά καταλήγει στον κάτω ταμιευτήρα. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα μπορεί να καλύψει την έλλειψη ισχύος χρησιμοποιώντας το κατάλληλο ποσό ενέργειας που έχει προηγουμένως αποθηκευτεί.

Με μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές μεταξύ των δύο ταμιευτήρων λιγότερος όγκος νερού παρέχει την ίδια χωρητικότητα και συνεπώς αγωγοί πτώσεως μικρότερης διαμέτρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του ίδιου ποσού ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο διπλός αγωγός πτώσης υπερτερεί έναντι του μονού γιατί παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής ενέργειας από τους υδροστροβίλους και κατανάλωσης ενέργειας από τις αντλίες. Η κατάσταση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή κυκλοφορία του νερού στο σύστημα και πλεονεκτεί ιδιαίτερα όταν συμπίπτει υψηλό φορτίο με μεγάλη παραγωγή ΑΠΕ. Το πλεονέκτημα αυτού του τρόπου λειτουργίας, όπως και οι υπόλοιπες καταστάσεις λειτουργίας, περιγράφεται στην πηγή 3. Οι βασικές μαθηματικές εξισώσεις περιγραφής των αντλιών και των στροβίλων δίνονται στην αναφορά 4.

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης μπορούν να αναλάβουν φορτίο σε λίγα δευτερόλεπτα και το μέγιστο βάθος εκφόρτισής τους είναι έως 95% χωρίς να επηρεάζεται η διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Η τυπική συνολική απόδοση (roundtrip efficiency) του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 65% και 77%, με τους υδροστροβίλους να εμφανίζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από τις αντλίες.

Το βασικότερο πλεονέκτημα της αντλησιοταμίευσης είναι ότι παρέχει εγγυημένη ισχύ, γεγονός που παρέχει τη δυνατότητα υποκατάστασης της συμβατικής ισχύος (capacity credit) δυνατότητα που δεν έχουν οι ΑΠΕ λόγω της στοχαστικής φύσης τους. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα αύξησης της αιολικής διείσδυσης και της διείσδυσης ΑΠΕ γενικότερα σε νησιωτικά συστήματα, που διαφορετικά περιορίζεται από τα όρια τεχνικού ελαχίστου και δυναμικής απόκρισης.

Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της αντλησιοταμίευσης είναι η γεωγραφική, γεωλογική και περιβαλλοντικοί περιορισμοί που τίθενται και που σχετίζονται με τη σχεδίαση των ταμιευτήρων, το υψηλό κόστος επένδυσης και οι μεγάλοι χρόνοι υλοποίησης.

Έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλες λιγότερο συνηθισμένες τεχνικές αντλησιοταμίευσης, όπως εγκαταστάσεις ανοιχτής θάλασσας ή υπόγειος ταμιευτήρας, όπου πλημμυρισμένα ορυχεία ή άλλες κοιλότητες του εδάφους χρησιμοποιούνται ως δεξαμενές. Η πρώτη μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί σε εγκατάσταση στην Ιαπωνία το 1999, όπου χρησιμοποιείται ως κάτω ταμιευτήρας η θάλασσα. Στο σχήμα 2.5 απεικονίζεται ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης με κάτω ταμιευτήρα τη θάλασσα.



Σχήμα 2. 5 Εφαρμογή συστήματος αντλησιοταμίευσης με κάτω ταμιευτήρα τη θάλασσα

Ο παρακάτω πίνακας Περιέχει τις 5 μεγαλύτερες εγκαταστάσεις που λειτουργούν αυτή τη στιγμή παγκοσμίως

Σταθμός Παραγωγής	Χώρα	Δυνατότητα Παραγωγής (MW)
<u>Bath County Pumped Storage Station</u>	ΗΠΑ	3003
<u>Guangdong Pumped Storage Power Station</u>	Κίνα	2400
<u>Ludington Pumped Storage Power Plant</u>	ΗΠΑ	1872
<u>Okutataragi Hydroelectric Power Station</u>	Ιαπωνία	1932
<u>Tianhuangping Pumped Storage Power Station</u>	Κίνα	1836

2.2.1.2 Σφόνδυλοι

Τα συστήματα αποθήκευσης με σφόνδυλο (flywheel) αποθηκεύουν ενέργεια υπό μορφή κινητικής ενέργειας σε μία περιστρεφόμενη μάζα (σχήμα 2.6). Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται σε μία πληθώρα εφαρμογών όπως τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, τα συστήματα UPS σε βιομηχανίες και τα υβριδικά συστήματα ενέργειας. Ο σφόνδυλος τοποθετείται στο εσωτερικό ενός θαλάμου υπό κενό, αιωρούμενος με τη βοήθεια μαγνητικών τριβών, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι μηχανικές απώλειες λόγω τριβών. Η κινητική ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται ή να επαναδιοχετεύεται από το σφόνδυλο μέσω μιας ηλεκτρικής μηχανής μεταβλητών στροφών τεχνολογίας μόνιμων μαγνητών, η οποία μπορεί να λειτουργήσει είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια αντίστοιχα. [5]



Σχήμα 2. 6 Περιγραφή ενός σφονδύλου

Σε λειτουργία κινητήρα, η ηλεκτρική ενέργεια με την οποία τροφοδοτείται ο στάτης μετατρέπεται σε ροπή στον άξονα του δρομέα, με αποτέλεσμα την επιτάχυνσή του και άρα την αύξηση της κινητικής του ενέργειας. Σε λειτουργία γεννήτριας, η αποθηκευμένη ενέργεια στο σφόνδυλο ασκεί ροπή στο δρομέα της μηχανής, η οποία μετατρέπεται σε

ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα αποθήκευσης εκτός από το σφόνδυλο περιλαμβάνει και ηλεκτρονικά ισχύος για τον έλεγχο της εισερχόμενης και εξερχόμενης ισχύος, της ταχύτητας περιστροφής και της συχνότητας. Η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια στο σφόνδυλο (E_k) είναι ανάλογη της ροπής αδράνειάς του (άρα και της μάζας του) και ανάλογη του τετραγώνου της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής.

Το υλικό κατασκευής του σφονδύλου μπορεί να είναι ατσάλι, ανθρακονήματα (carbon fiber), τηγμένο διοξείδιο του πυριτίου (fused silica) και άλλα συνθετικά υλικά. Με βάση την παραπάνω εξίσωση, ο καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας του σφονδύλου είναι η ταχύτητα περιστροφής. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη χωρητικότητα με δεδομένη διάμετρο και πλάτος σφονδύλου, απαιτούνται ανθεκτικότερα και ελαφρύτερα υλικά, ικανά να αντέχουν τα αδρανειακά φορτία που υφίστανται σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής. Η ειδική ενέργεια σε Wh/kg για σφόνδυλο από τηγμένο διοξείδιο του πυριτίου είναι πάνω από 20 φορές μεγαλύτερη από την ειδική ενέργεια ενός σφονδύλου από ατσάλι και περίπου 40 φορές μεγαλύτερη από αυτήν μιας μπαταρίας μολύβδου – οξέως.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των σφονδύλων που τους καθιστούν κατάλληλους για εφαρμογές στα υβριδικά συστήματα είναι τα εξής:

- Υψηλή τιμή ειδικής ισχύος (μεγαλύτερη από 500 W/kg) και ειδικής ενέργειας
- Η χωρητικότητά τους δεν υποβαθμίζεται, σε αντίθεση με τις μπαταρίες
- Η διάρκεια ζωής τους είναι μεγάλη (20 έτη ή 30000 κύκλοι) και είναι ανεξάρτητη από το βάθος φόρτισης και εκφόρτισης
- Υψηλή συνολική απόδοση (85%)
- Μικρές απώλειες σε standby λειτουργία (μικρότερες του 2% της ονομαστικής τους ισχύος)
- Λειτουργούν εξίσου καλά τόσο σε κατάσταση χαμηλής όσο και σε κατάσταση υψηλής εκφόρτισης
- Ο χρόνος που απαιτείται για την επαναφόρτισή τους είναι μικρός
- Δεν επηρεάζονται από τη θερμοκρασία
- Δεν απαιτείται περιοδική συντήρηση
- Κατασκευάζονται από υλικά φιλικά προς το περιβάλλον

Σε γενικές γραμμές οι σφόνδυλοι έχουν ικανότητα αποθήκευσης μικρών ποσοτήτων ενέργειας, αλλά μπορούν να την αποδώσουν σε μεγάλες τιμές ισχύος με καλή ποιότητα και αξιοπιστία. Γιαυτό το λόγο χρησιμοποιούνται τυπικά στα υβριδικά συστήματα για την εξομάλυνση ταχέων διακυμάνσεων ισχύος (στην κλίμακα των δευτερολέπτων ή των λεπτών) και επιπλέον για τη διευκόλυνση του ελέγχου του συστήματος. Ο γρήγορος χρόνος απόκρισης των συστημάτων αποθήκευσης με σφονδύλους τα καθιστά κατάλληλα για ρύθμιση της συχνότητας στα δίκτυα των υβριδικών συστημάτων. Σήμερα είναι διαθέσιμοι σφόνδυλοι με ικανότητα αποθήκευσης περίπου 140 kWh και ικανότητα απόδοσης ισχύος από kW έως GW, δουλεύοντας σε ταχύτητα περιστροφής περίπου 50.000 ΣΑΛ.



Σχήμα 2.7 Εφαρμογή ενός ESS με σφονδύλους από την Beacon Power
(http://www.cleanenergyactionproject.com/CleanEnergyActionProject/CS.Beacon_Power_Stephentown_Advanced_Energy_Storage_Energy_Storage_Case_Study.html)

2.2.1.3 Πνευματικές Τεχνολογίες Αποθήκευσης

Οι πνευματικές τεχνολογίες (pneumatic storage technologies) αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια συμπιέζοντας είτε αέρα είτε άλλα αέρια, συνήθως άζωτο. Αν το χρησιμοποιούμενο αέριο είναι αέρας, τότε γίνεται λόγος για συστήματα CAES (Compressed Air Energy Storage), ενώ αν είναι κάποιο άλλο αέριο μιλάμε για Liquid-Piston technology.

Αποθήκευση Ενέργειας με Συμπίεση Αέρα (CAES)

Η τεχνολογία CAES αποτελεί μαζί με την αντλησιοταμίευση τη μόνη εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία που έχει δυνατότητα αποθήκευσης πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Η βασική αρχή λειτουργίας της είναι απλή : ένας κινητήρας συμπιέζει τον αέρα μέσα σε μια δεξαμενή για να φορτίσει το σύστημα CAES και ύστερα απελευθερώνεται σε ένα στρόβιλο συνδεδεμένο με γεννήτρια για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Τα απλά συστήματα CAES, σε αντίθεση με τα CAES που περιλαμβάνουν και αεροστρόβιλο, βασίζονται στη θερμοδυναμική, κυρίως στον ισόθερμο κύκλο.

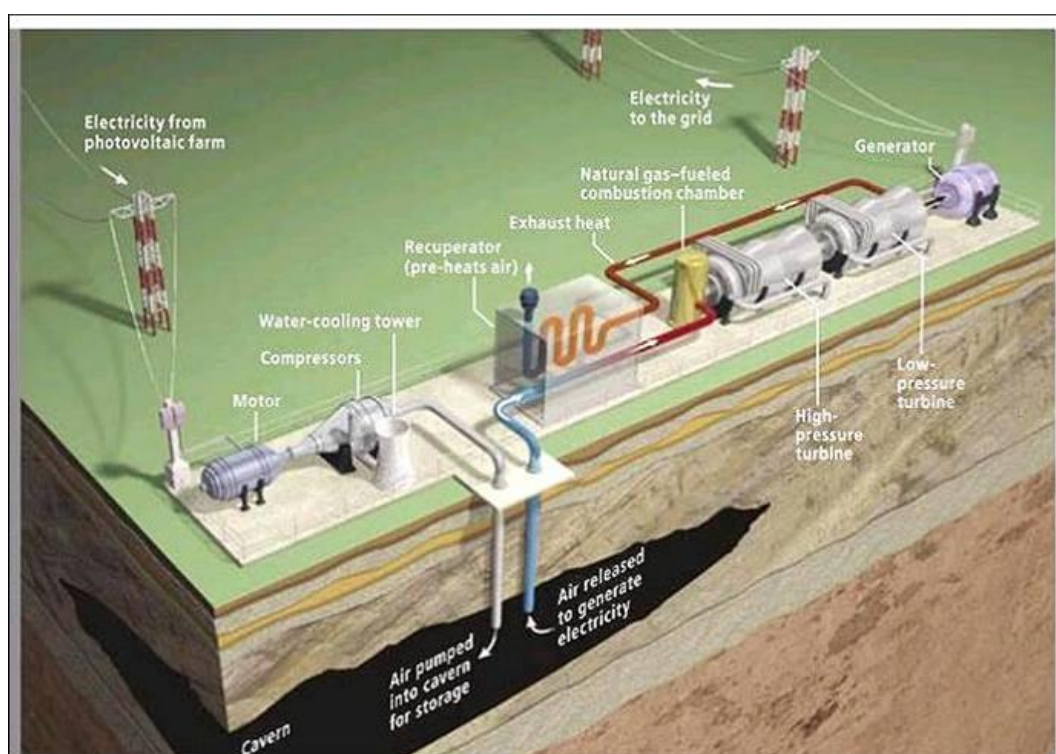
CAES σε συνδυασμό με αεροστρόβιλο

Ο κύκλος παραγωγής σε τέτοιου είδους εγκατάσταση CAES είναι μία παραλλαγή του κύκλου ενός συμβατικού αεροστρόβιλου. Η περίσσεια ενέργειας από ΑΠΕ ή η ενέργεια χαμηλού φορτίου χρησιμοποιείται για τη συμπίεση αέρα (περίπου 75 bar) εντός ενός στεγανού αποθηκευτικού χώρου με τη βοήθεια ενός συμπιεστή, αφού προηγουμένως ψυχθεί ώστε να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή αποθήκευση. Κατά τις ώρες αιχμής η αναγκαία ποσότητα αέρα για την κάλυψη του φορτίου ελευθερώνεται από το χώρο αποθήκευσης, προθερμαίνεται, αναμιγνύεται με μικρή ποσότητα καυσίμου και οδηγείται στο θάλαμο καύσης της εγκατάστασης. Τα αέρια εξόδου του θαλάμου καύσης εκτονώνονται σε έναν αεροστρόβιλο που είναι συνδεδεμένος με γεννήτρια, η οποία παράγει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια. [6] Ως μέσα αποθήκευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί, όπως πετρώδη σπήλαια, σπήλαια άλατος (salt caverns),

εξαντλημένα κοιτάσματα αερίων και αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες, με τους τελευταίους να αποτελούν την πιο οικονομική και συνηθισμένη λύση.

Στο παρακάτω σχήμα 2.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα ενός CAES, που περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία [6]:

- Έναν κινητήρα σε σύμπλεξη με το συμπιεστή και μια γεννήτρια συνδεδεμένη με τους αεροστρόβιλους υψηλής και χαμηλής πίεσης.
- Έναν συμπιεστή που ίσως περιλαμβάνει δύο ή περισσότερα στάδια, ενδιάμεσους ψύκτες (intercoolers) και συμπληρωματικούς ψυκτήρες (after-coolers) ώστε να επιτυγχάνεται οικονομία στη συμπίεση και να μειώνεται το ποσό υγρασίας
- Έναν προθερμαντήρα, έναν αεροστρόβιλο υψηλής και έναν χαμηλής πίεσης
- Εξοπλισμό για τον έλεγχο των στοιχείων του συστήματος καθώς και για τη μετάβαση από λειτουργία παραγωγής σε λειτουργία αποθήκευσης
- Σύστημα αποθήκευσης του καυσίμου και διάφοροι εναλλάκτες θερμότητας



Σχήμα 2. 8 Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος αποθήκευσης CAES

Ο κύριος περιοριστικός παράγοντας αυτής της τεχνολογίας είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, ενώ επιπλέον απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη εγκατάστασης αεροστρόβιλου. Σημαντικό μειονέκτημα συνιστούν και οι διάφοροι γεωλογικοί περιορισμοί. Από την άλλη, οι τυπικές τιμές ονομαστικής ισχύος των συστημάτων CAES κυμαίνονται μεταξύ 50 -300 MW, ενώ επιπλέον υπάρχει δυνατότητα μακράς αποθήκευσης, ίσως και πάνω από ένα έτος, λόγω των χαμηλών απωλειών. Επιπλέον πλεονέκτημα συνιστά ο γρήγορος χρόνος απόκρισης, δεδομένου ότι σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας ένα σύστημα CAES μπορεί να αναλάβει φορτίο μέσα σε 9-12 λεπτά, τη στιγμή που ο ίδιος χρόνος για συμβατικό αεροστρόβιλο κυμαίνεται μεταξύ 20-30 λεπτών. Μη λαμβάνοντας υπόψη το ρόλο του αερίου και με βάση μόνο την απόδοση της

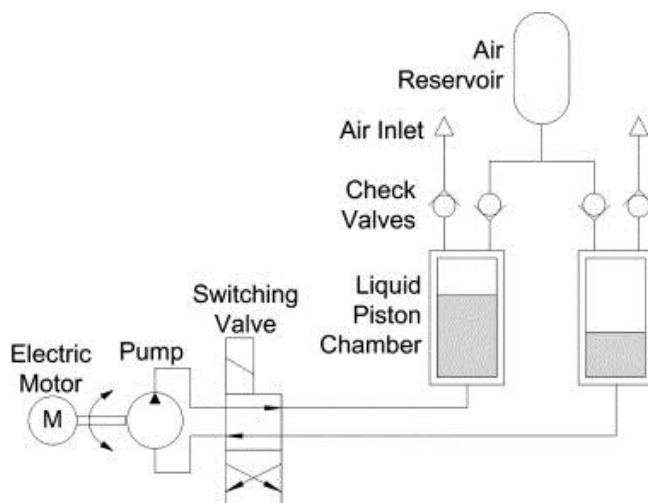
εκτόνωσης και της συμπίεσης, ο ολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, που μπορεί ευθέως να συγκριθεί με τις άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης, είναι περίπου 70%.

Η τεχνολογία CAES δεν είναι πράσινη, αφού κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης – εκφόρτισης 1 kWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί περίπου 0,75 kWh ενέργειας συμπίεσης και 1,25 kWh καυσίμου. Αυτή η απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου αποτελεί το κυριότερο θέμα αντιπαράθεσης σχετικά με την ανεπιφύλακτη αποδοχή τέτοιων συστημάτων. Το κόστος των συστημάτων CAES εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωλογία του υπεδάφους και τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 400 – 800 \$/kWh.

Σήμερα υπάρχουν μόλις δύο μονάδες CAES στον κόσμο , η μία στο Hundorf στη Γερμανία (290 MW – εγκατεστημένη το 1978) και η άλλη στο McIntosh, Alabama των ΗΠΑ (110 MW - εγκατεστημένη το 1991), ενώ σχεδιάζεται και μια επιπλέον μονάδα των 2700 MW στο Norton, Ohio. Πρέπει να σημειωθεί ότι βρίσκεται υπό ανάπτυξη και η τεχνολογία CAES μικρής κλίμακας (Small scale CAES), στην οποία ο πεπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται σε ειδικές δεξαμενές αλλά το σημερινό της κόστος την καθιστά μη βιώσιμη.[7]

Τεχνολογία Liquid – Piston

Η βασική αρχή λειτουργίας αυτής της τεχνολογίας είναι η συμπίεση και η εκτόνωση ενός «παγιδευμένου» όγκου αερίου, το οποίο συνήθως είναι άζωτο, στο εσωτερικό μιας δεξαμενής. Ο έλεγχος του όγκου και της πίεσης του αερίου γίνεται από την ποσότητα του υγρού μέσα στη δεξαμενή, με την πίεση να κυμαίνεται γενικά από 100 bar όταν δεν υπάρχει καθόλου υγρό, μέχρι 250 bar όταν η δεξαμενή είναι κατά το ήμισυ γεμάτη με υγρό. Η διάταξη του συστήματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 1.10



Σχήμα 2. 9 Η βασική διάταξη ενός συστήματος liquid-piston

Όταν αποθηκεύεται ενέργεια, η αντλία ωθεί το υγρό προς το εσωτερικό των δεξαμενών, με αποτέλεσμα να συμπιέζει το αέριο. Κατά τη φάση της εκφόρτισης, το πεπιεσμένο αέριο εκτονώνεται, ωθώντας το υγρό έξω από τις δεξαμενές και προς τις αντλίες, που τώρα λειτουργούν ως στρόβιλοι περιστρέφοντας τις γεννήτριες. [6]

Η τεχνολογία δεν έχει καταστεί ακόμη εμπορικά διαθέσιμη, ωστόσο ελπίζεται ότι μελλοντικά θα μπορέσει να αντικαταστήσει τις μπαταρίες μολύβδου οξέως σε αυτόνομα υβριδικά συστήματα τροφοδότησης ειδικών φορτίων, όπως εργαστήρια, μονάδες επεξεργασίας τροφής και παραγωγής γάλακτος, καθώς και εγκαταστάσεις UPS.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας Liquid – Piston έναντι των μπαταριών μολύβδου οξέως είναι:

- Η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής που δεν εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά φόρτισης εκφόρτισης
- Η λιγότερη συντήρηση
- Η μη υποβάθμιση της χωρητικότητας με τον καιρό
- Η δυνατότητα πλήρους εκφόρτισης
- Η δυνατότητα ελέγχου των υπερφορτίσεων με τη βοήθεια βαλβίδας στο υδραυλικό σύστημα
- Η ανεξαρτησία της ικανότητας ισχύος από τη χωρητικότητα
- Οι χαμηλοί ρυθμοί αυτοεκφόρτισης σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος

Αντίθετα, σημαντικά μειονεκτήματα αποτελούν :

- Οι πολύ χαμηλές τιμές πυκνότητας ενέργειας (3,2 – 5,55 Wh/kW), που εξαρτάται από την πίεση του αερίου
- Η έντονη αυτοεκφόρτιση σε standby κατάσταση
- Ο κίνδυνος διαρροών στο πνευματικό και υδραυλικό σύστημα
- Η ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση (περίπου 73%) συγκριτικά με τις μπαταρίες μολύβδου οξέως.

2.2.2 Ηλεκτρικά Συστήματα Αποθήκευσης

2.2.2.1 Υπεραγώγιμη Μαγνητική Αποθήκευση (Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES)

Η τεχνολογία SMES είναι η μοναδική γνωστή τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας άμεσα με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος. Η ενέργεια αποθηκεύεται στο συνεχές ρεύμα που ρέει σε ένα υπεραγώγιμο πηνίο, κυκλικής κατασκευής, ώστε το ρεύμα να το διαρρέει συνεχώς με σχεδόν μηδενικές απώλειες, κάτι που επιτυγχάνεται με τη λειτουργία του συστήματος σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Έτσι ουσιαστικά η κύρια απώλεια ενέργειας του συστήματος οφείλεται στην ενέργεια που καταναλώνεται για τη διατήρηση της θερμοκρασίας των υπεραγώγιμων υλικών σε τόσο χαμηλά επίπεδα.

Η αποθήκευση ενέργειας γίνεται με τη μορφή του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί το ηλεκτρικό ρεύμα. Προκειμένου να διατηρηθεί το πηνίο στην υπεραγώγιμη κατάστασή του είναι βυθισμένο σε ένα κρυοστάτη που περιέχει υγρό ήλιο. Τυπικά, το πηνίο κατασκευάζεται από νιόβιο-τιτάνιο και το ψυκτικό υγρό μπορεί να είναι υγρό ήλιο σε θερμοκρασία 4.3 K ή super fluid ήλιο θερμοκρασίας 1.8 K.

Συνήθως, ένα σύστημα SMES περιλαμβάνει 4 βασικές συνιστώσες :

- Τη μονάδα του υπεραγωγού
- Το κρυογόνο σύστημα ψύξης
- Το μονωμένο δοχείο

- Ένα σύστημα μετατροπής της ισχύος
- Η αποθηκευμένη ενέργεια σε ένα πηνίο SMES δίνεται από την εξίσωση:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

όπου

L : η επαγωγή του πηνίου

I : το ρεύμα που το διαρρέει

Οι διατάξεις SMES παρουσιάζουν πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης ενέργειας (τυπικά μεγαλύτερο του 97%) και ταχεία απόκριση ισχύος σε χρόνο λίγων ms συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης. Ένα πλεονέκτημα έναντι των συσσωρευτών είναι ότι η ικανότητα απόδοσης ενέργειας εξαρτάται σε πολύ μικρότερο βαθμό από το ρυθμό εκφόρτισης. Επιπλέον τα συστήματα SMES χαρακτηρίζονται από υψηλή διάρκεια ζωής και άρα είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν συνεχείς πλήρεις εκφορτίσεις.

Τα παραπάνω στοιχεία καθιστούν ελκυστική την τεχνολογία για εφαρμογές:

- Σταθεροποίησης τάσης (voltage stability)
- Σταθεροποίησης συχνότητας (frequency control)
- Ποιότητας ισχύος (power quality)
- Ανάκτησης ενέργειας σε συστήματα διαμετακόμισης, όπως σε συστήματα ηλεκτρικών σιδηροδρόμων

Τυπικά μεγέθη ικανότητας είναι 1-10 MW για μερικά δευτερόλεπτα, αν και διεξάγεται έρευνα για την ανάπτυξη μεγαλύτερων συστημάτων SMES στο εύρος των 10 - 100 MW για διάστημα μερικών λεπτών.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι οι πολύ μικροί χρόνοι εκφόρτισης, ενώ προβληματισμό προκαλεί το υψηλό επενδυτικό κόστος και τα περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με τα ισχυρά μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται. [7]



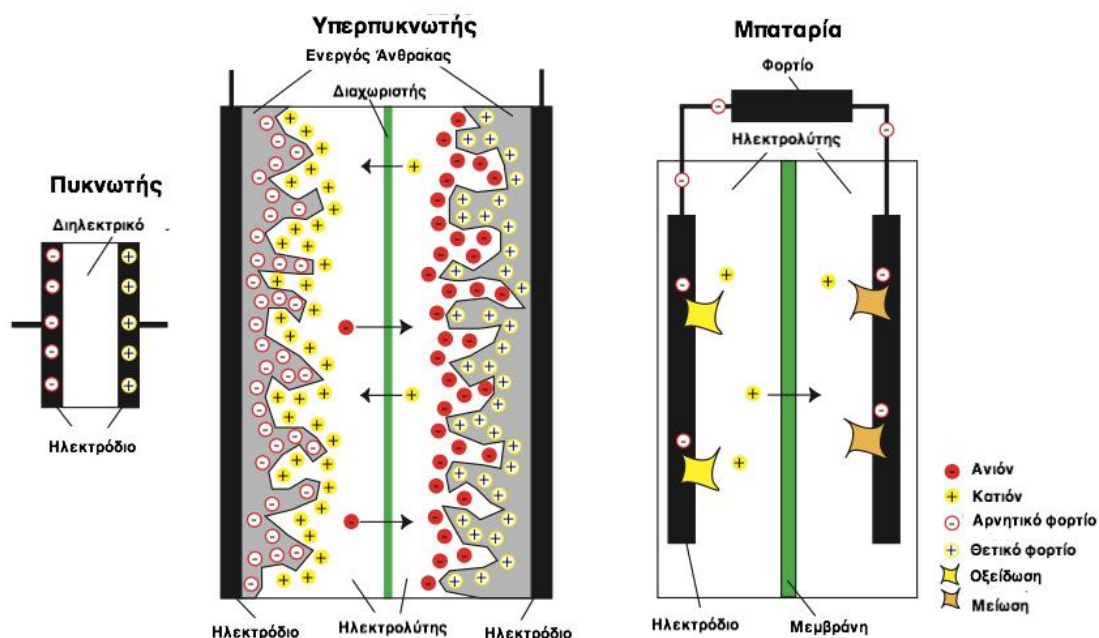
Σχήμα 2. 12 Εμπορικά συστήματα Υπεραγωγικής Μαγνητικής Αποθήκευσης (SMES)

2.2.2.2 Πυκνωτές – Υπερπυκνωτές (Supercapacitors – SC)

Ο πιο άμεσος τρόπος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι χρησιμοποιώντας το ηλεκτρικό πεδίο ενός πυκνωτή. Οι πυκνωτές μπορούν να φορτιστούν σημαντικά ταχύτερα από τις συμβατικές μπαταρίες και να υποστούν δεκάδες χιλιάδες κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης με υψηλό βαθμό απόδοσης. Συμβατικοί πυκνωτές έχουν αναπτυχθεί για κάλυψη αιχμιακού φορτίου της τάξης μεγέθους των λίγων kW για διάστημα μικρότερο της μιας ώρας. Ωστόσο, το κυριότερο πρόβλημα των πυκνωτών είναι η μικρή τιμή πυκνότητας ενέργειας, με συνέπεια μεγάλες χωρητικότητες να απαιτούν εξαιρετικά μεγάλη επιφάνεια διηλεκτρικού υλικού, με αποτέλεσμα το σύστημα να είναι μη οικονομικό.

Η πρόσφατη πρόοδος των ηλεκτροχημικών πυκνωτών ή υπερπυκνωτών (SC) έχει οδηγήσει σε πολύ μεγαλύτερες τιμές πυκνότητας, ενέργειας και χωρητικότητας σε σχέση με τους συμβατικούς πυκνωτές, που κατά προσέγγιση διαφέρουν κατά δύο τάξεις μεγέθους (10 – 100 kW) [7]. Οι SC έχουν χωρητικότητα έως και μερικές χιλιάδες Farads. Ουσιαστικά, οι SC γεφυρώνουν το κενό μεταξύ των συμβατικών πυκνωτών και των μπαταριών όσον αφορά την ισχύ και την πυκνότητα ενέργειας. Αν και μικροί SC αποτελούν ώριμη τεχνολογία, SC με πυκνότητα ενέργειας άνω των 20 kWh/m³ είναι ακόμη σε επίπεδο ανάπτυξης.

Οι SC αντί για στερεό διηλεκτρικό χρησιμοποιούν ως διαχωριστικό μεταξύ των δύο οπλισμών ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη. Αν και η λειτουργία του SC βασίζεται στην κίνηση ιόντων μέσα σε ηλεκτρολυτικό διάλυμα, δεν τον εντάσσουμε στην κατηγορία των ηλεκτροχημικών συστημάτων αποθήκευσης διότι δε συμβαίνει καμία χημική αντίδραση στον ηλεκτρολύτη, κατά τη λειτουργία του SC. Στην πραγματικότητα η αποθήκευση ενέργειας γίνεται μέσω ηλεκτροστατικού φορτίου, ακριβώς όπως σε έναν συμβατικό πυκνωτή.



Σχήμα 2. 3 Σχηματική αναπαράσταση ενός πυκνωτή, ενός υπερπυκνωτή και μιας μπαταρίας. Στον πυκνωτή το φορτίο αποθηκεύεται σε δύο ηλεκτρόδια που χωρίζονται από ένα διηλεκτρικό υλικό. Στον υπερπυκνωτή το φορτίο αποθηκεύεται σε πορώδες ενεργό άνθρακα και σε ιόντα μέσα στον ηλεκτρολύτη. Στη συμβατική μπαταρία, τα ηλεκτρόνια αποθηκεύονται στα ηλεκτρόδια μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης.

Σημαντικό μειονέκτημα των SC αποτελεί η πολύ μικρή διάρκεια εκφόρτισης, καθώς και η υψηλές απώλειες ενέργειας λόγω αυτοεκφόρτισης. Για το λόγο αυτό οι SC δεν πρόκειται να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες, αλλά να συνδυαστούν με αυτές ώστε να βοηθήσουν στην παροχή ισχύος.

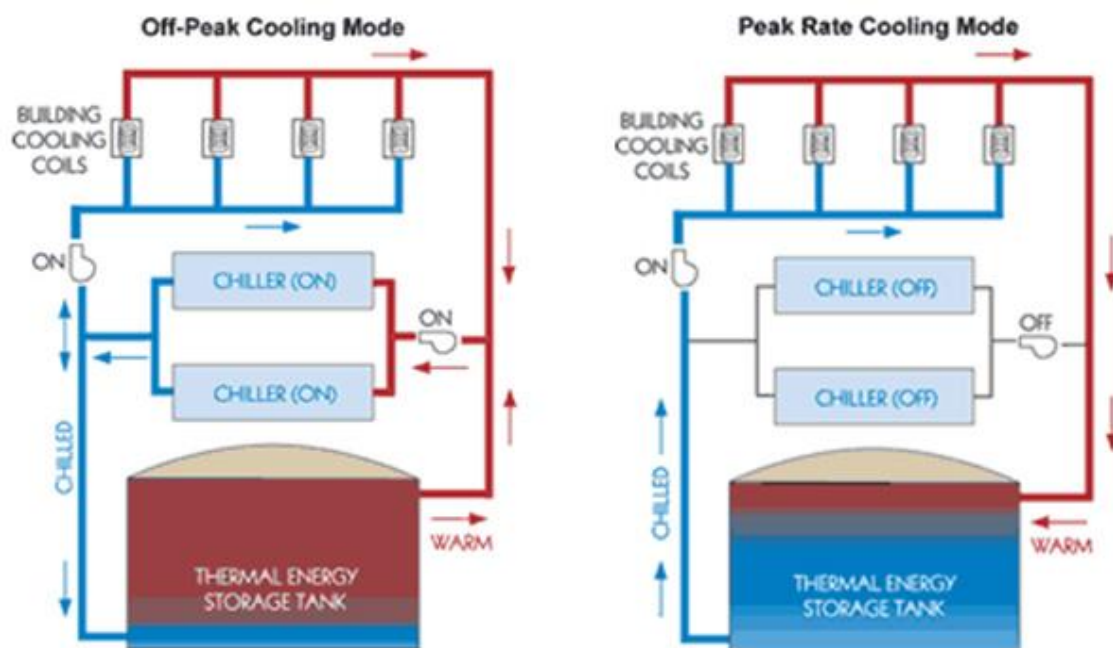


Σχήμα 2. 4 Μονάδα υπερπυκνωτών (SC).

Η χρήση τους είναι ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν υψηλά ποσά ισχύος για χρόνο από λίγα ms έως αρκετά λεπτά. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές ποιότητας ισχύος όπως ride-through και power bridging, καθώς και εφαρμογές ανάκτησης ενέργειας σε εκτεταμένα συστήματα διαμετακόμισης (transit systems).

2.2.3 Θερμικά Συστήματα Αποθήκευσης

Στα συστήματα θερμικής αποθήκευσης (Thermal Energy Storage – TES) χρησιμοποιούνται υλικά που μπορούν να διατηρηθούν σε υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες σε μονωμένα δοχεία (σχήμα 1.13).



Σχήμα 2. 13 Περιγραφή λειτουργίας ενός θερμικού συστήματος αποθήκευσης (TES)

Η θερμότητα ή το ψύχος που αποδίδεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση θερμικών μηχανών. Τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης κατηγοριοποιούνται σε χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας ανάλογα με το αν η θερμοκρασία λειτουργίας του μέσου αποθήκευσης είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία δωματίου. Πιο συγκεκριμένα τα συστήματα TES διακρίνονται σε συστήματα βιομηχανικής ψύξης (-18°C), οικιακής ψύξης ($0 - 12^{\circ}\text{C}$), οικιακής θέρμανσης ($25 - 50^{\circ}\text{C}$) και βιομηχανικής θέρμανσης ($>175^{\circ}\text{C}$).

2.2.4 Ηλεκτροχημικά Συστήματα Αποθήκευσης

Το 1800, ο Alessandro Volta εφευρέ την πρώτη σύγχρονη μπαταρία, τη βολταϊκή στήλη. Από τότε έχει γίνει μεγάλη πρόοδος και οι μπαταρίες έχουν εξελιχθεί από τις πρωτογενείς μη επαναφορτιζόμενες κυψέλες, στις δευτερογενείς επαναφορτιζόμενες. Σήμερα η ηλεκτροχημικές διατάξεις χρησιμοποιούνται ευρέως για την αποθήκευση ενέργειας σε καταναλωτικές συσκευές, ενώ μεγαλύτερες εφαρμογές (υβριδικά πάρκα κτλ) βασίζονται πλέον σε μπαταρίες προηγμένης τεχνολογίας.

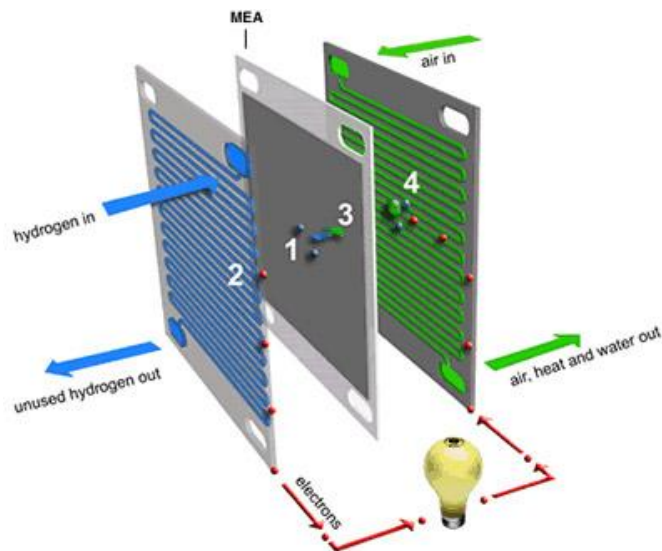
Οι μπαταρίες αποτελούνται από δύο τύπους ηλεκτροχημικών διατάξεων, τα γαλβανικά κελιά (galvanic cells) και τα κελιά ροής (flow cells). Με την πάροδο των ετών έχουν προταθεί πολλά σχέδια και τεχνολογίες βασιζόμενες σε διαφορετικά χημικά στοιχεία, με την κάθε τεχνολογία να παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, καθιστώντας την κατάλληλη για συγκεκριμένη χρήση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα κάποιοι από τους πιο κοινούς τύπους μπαταριών.

Σε γενικές γραμμές, όλες οι μπαταρίες παρουσιάζουν ταχύτατους χρόνους απόκρισης. Επίσης έχουν πολύ μικρές απώλειες κατά τη standby λειτουργία τους και άρα πολύ μικρή αυτοεκφόρτιση. Τέλος τα περισσότερα είδη παρουσιάζουν πολύ υψηλή απόδοση κύκλου φόρτισης – εκφόρτισης.

2.2.4.1 Κυψέλες Καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου είναι μια συσκευή ηλεκτροχημικής μετατροπής ενέργειας. Παράγει ηλεκτρική ενέργεια με την εξωτερική παροχή καυσίμου (άνοδος) και οξειδωτικού (κάθοδος), τα οποία αντιδρούν παρουσία ηλεκτρολύτη. Γενικά, τα αντιδρώντα ρέουν προς την κυψέλη καυσίμου και τα προϊόντα ρέουν εκτός αυτής, ενώ ο ηλεκτρολύτης παραμένει συνεχώς μέσα στο κελί.

Μια αντιστρέψιμη κυψέλη καυσίμου είναι σχεδιασμένη να καταναλώνει ένα χημικό Α παράγοντας ηλεκτρισμό και ένα χημικό Β και αντίστροφα να καταναλώνει ένα ηλεκτρισμό και το χημικό Β παράγοντας το χημικό Α. Οι βασικότερες διαφορές μεταξύ των κυψελών καυσίμου και των μπαταριών είναι ότι οι πρώτες καταναλώνουν αντιδρώντα που πρέπει να αναπληρώνονται καθώς και ότι τα ηλεκτρόδιά τους δε συμμετέχουν στις αντιδράσεις, αλλά έχουν απλά καταλυτικό ρόλο.



Σχήμα 2. 14 Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου.

Η πιο κοινή μορφή κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιεί υδρογόνο σαν καύσιμο και οξυγόνο σαν οξειδωτικό. Άλλοι τύποι κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούν σαν καύσιμα υδρογονάνθρακες, αλκοόλες ή ακόμη και μέταλλα, ενώ σαν οξειδωτικά αέρια, χλώριο ή διοξείδιο του χλωρίου. Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου όπως οι κυψέλες PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells), οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC), οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως (PAFC) και οι Regenerative Fuel Cells (RFC).

Στα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγονται:

- Η υψηλή πυκνότητα ενέργειας (0,6 – 1,2 kWh/kg)
- Η δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλο εύρος εγκατεστημένης ισχύος (από λίγα kW έως πολλά MW)
- Η ευέλικτη επέκταση του συστήματος αποθήκευσης
- Ο βαθμός συνέργειας με άλλους ενεργειακούς τομείς, όπως οι μεταφορές.

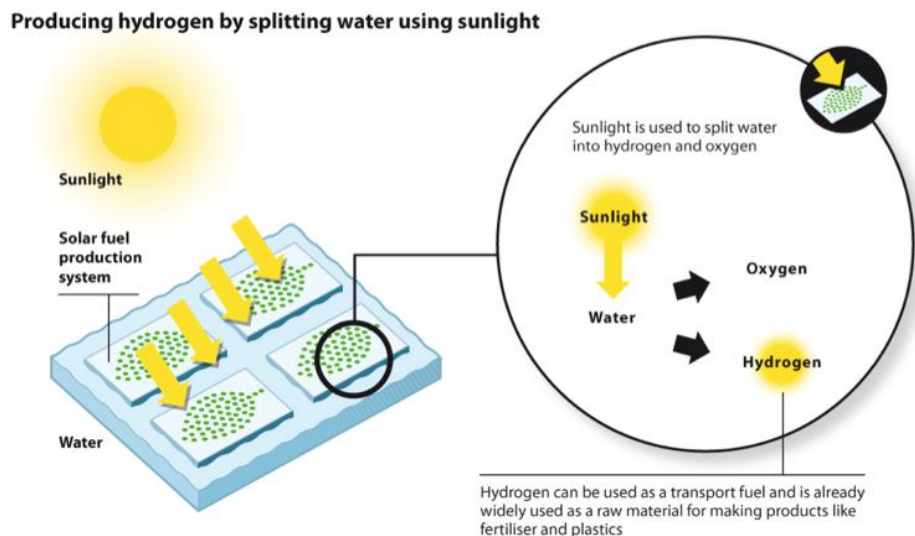
Σημαντικό μειονέκτημά τους αποτελεί ο χαμηλός βαθμός απόδοσης που εν γένει κυμαίνεται από 20 - 50%.

Οι μπαταρίες μετάλλου αέρα μπορούν να θεωρηθούν ως μια ειδική περίπτωση κυψελών καυσίμου, όπου το μέταλλο παίζει το ρόλο του καυσίμου και ο αέρας το ρόλο του οξειδωτικού. Η μπαταρίες αυτές έχουν τα πλεονεκτήματα του ελάχιστου κόστους και της φιλικότητας προς το περιβάλλον, ωστόσο τα μειονεκτήματά τους είναι σημαντικά και αφορούν το βαθμό απόδοσης (εν γένει κάτω από 50%), τους ρυθμούς απόδοσης ισχύος και τη διάρκεια ζωής (μερικές εκατοντάδες κύκλοι). [7]

2.2.4.2 Solar Fuel

Η τεχνολογία των Solar Fuel βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο ερευνητικό στάδιο, αλλά έχουν αρχίσει να τραβούν το ενδιαφέρον πρόσφατα. Ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει κάτοπτρα για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας, ειδικές συσκευές απορρόφησης της προκύπτουσας θερμικής ενέργειας και κατάλληλους χημικούς αντιδραστήρες για την πραγματοποίηση ενδόθερμων αντιδράσεων με αποτέλεσμα την παραγωγή αποθηκεύσιμων καυσίμων. Παράδειγμα προϊόντων αποτελούν το υδρογόνο ή οργανικές ενώσεις που

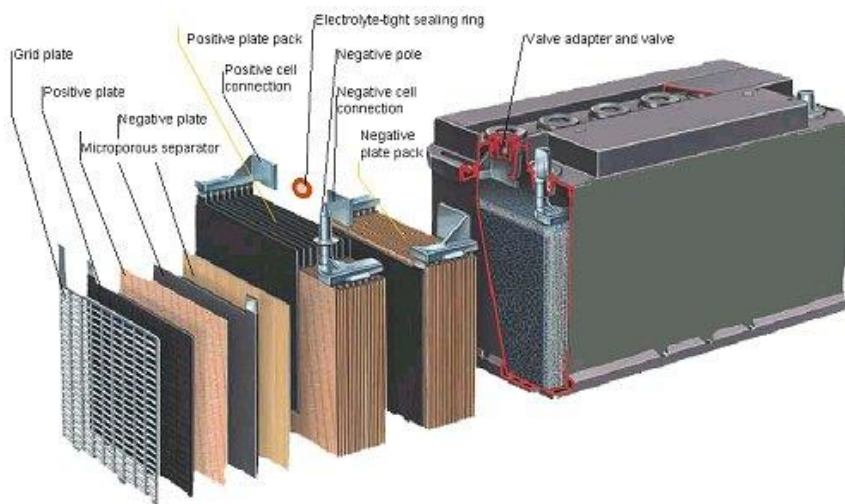
μπορούν αργότερα να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα ή ως πρώτες ύλες στη βιομηχανία [7] (σχήμα 1.16)



Σχήμα 2. 5 Παράδειγμα λειτουργίας του Solar Fuel

2.2.4.3 Μπαταρίες Μολύβδου – Οξέως (Lead Acid Batteries)

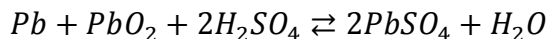
Οι μπαταρίες μολύβδου οξέως (lead - acid), που εφευρέθηκαν το 1859, αποτελούν την παλαιότερη και πιο διαδεδομένη μορφή επαναφορτιζόμενων ηλεκτροχημικών συσκευών. Έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε αυτόνομα υβριδικά συστήματα και αποτελούν πλέον ώριμη τεχνολογία.



Σχήμα 2. 6 Περιγραφή συστήματος μπαταρίας μολύβδου – οξέως

Στην κατάσταση πλήρους φόρτισης αποτελούνται από ένα ηλεκτρόδιο μολύβδου (Pb) που αποτελεί την άνοδο και ένα ηλεκτρόδιο διοξειδίου του μολύβδου (PbO₂) που αποτελεί την κάθοδο, βυθισμένα σε έναν ηλεκτρολύτη με περιεκτικότητα περίπου 37% σε θειικό οξύ. Σε κατάσταση πλήρους εκφόρτισης και τα δύο ηλεκτρόδια αποτελούνται από θειικό μόλυβδο, η τάση στα άκρα του στοιχείου μηδενίζεται και ο ηλεκτρολύτης δεν περιέχει πλέον

θειικό οξύ και ουσιαστικά μετατρέπεται σε νερό. Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την εκφόρτιση και την φόρτιση είναι [7]



Ανάλογα με τον τύπο της ανόδου οι μπαταρίες διακρίνονται σε τύπου Manchex, σωληνωτού τύπου και τύπου λεπτής επίπεδης πλάκας. Η ονομαστική τάση κάθε κελιού είναι 2,1 Volt .

Οι δύο κύριοι τύποι μπαταριών μολύβδου οξέως είναι οι flooded batteries και οι VRLA.

- **Flooded bateries :** Ο ηλεκτρολύτης είναι σε υγρή μορφή και απαιτείται συστηματική προσθήκη αποσταγμένου νερού για σωστή λειτουργία. Σε περίπτωση υπερφόρτισης παρατηρείται υπερβολική ηλεκτρόλυση του νερού με ταυτόχρονη εκπομπή υδρογόνου και οξυγόνου από κάθε κελί, αέρια που συνιστούν ένα εκρηκτικό μίγμα. Για αυτό το λόγο απαιτείται η παρουσία μηχανισμού που σταματά τη διαδικασία φόρτισης όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη (trickle charge) .
- **VRLA :** Οι μπαταρίες VRLA διαφέρουν στο ότι σφραγίζονται με μία βαλβίδα ελέγχου της πίεσης και στο ότι ο ηλεκτρολύτης είναι ακινητοποιημένος σε μορφή gel ή σε απορροφητικό γυαλί (absorbent glass mat). Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των τελευταίων είναι η δραματική μείωση της απαιτούμενης συντήρησης, η μη εκπομπή όξινων αερίων, το μικρότερο βάρος και η πιο εύκολη τοποθέτηση, ενώ μειονέκτημα αποτελεί το μεγαλύτερο κόστος [8]

Τα πλεονεκτήματα των μπαταριών αυτών είναι τα εξής:

- Το μικρό κόστος τους συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες μπαταριών (\$200 - \$400 ανά kWh), σε συνδυασμό με την εμπορική τους διαθεσιμότητα
- Η πολυετής συσσωρευμένη λειτουργική εμπειρία
- Ο υψηλός βαθμός απόδοσης (roundtrip efficiency) της τάξης του 70 - 90%
- Η υψηλή τους αξιοπιστία αφού η εμπειρία έχει δείξει ότι ο ρυθμός αστοχίας των μπαταριών μολύβδου οξέως είναι μικρότερος από 0,25% [9]
- Οι μικροί ρυθμοί αυτοεκφόρτισης που παρουσιάζει
- Η εξαιρετική συμπεριφορά στην παροχή βηματικής τάσης.

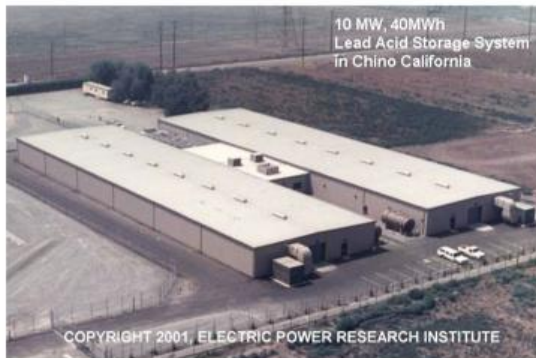
Για τον τελευταίο λόγο οι μπαταρίες αυτές μπορούν να παρακολουθήσουν αποτελεσματικά τις γρήγορες αλλαγές του φορτίου, ιδιότητα που τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος, UPS, διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας και για power bridging σε υβριδικά συστήματα που χρησιμοποιούν ΑΠΕ.

Από την άλλη, οι εφαρμογές τους για διαχείριση ενέργειας μεγάλης κλίμακας είναι πολύ περιορισμένες λόγω των παρακάτω μειονεκτημάτων τους:

- Μικρή διάρκεια ζωής
- Χαμηλή ειδική ενέργεια, που εν γένει κυμαίνεται μεταξύ 25 και 55 Wh/kg
- Μειωμένη απόδοση σε πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές θερμοκρασίες (σύνθετες θερμοκρασιακό εύρος -20° C έως 50° C)

- Χρήση μη φιλικών προς το περιβάλλον υλικών
- Ανάγκη για συχνή αναπλήρωση νερού
- Μικρό συνιστώμενο βάθος εκφόρτισης.

Παρόλα αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί σε μερικές εμπορικές εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας μεγάλης κλίμακας όπως στα BEWAG, Iberdrola, PREPA, Chino [7] Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως είναι ελκυστικές ως διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας για εφαρμογές ισχύος 100 kW έως 10 MW.

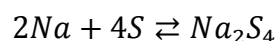


Σχήμα 2. 7 Εφαρμογή των μπαταριών μολύβδου-οξέως σε ESS.

2.2.4.4 Μπαταρίες Νατρίου Θείου (Sodium Sulfur Batteries – NaS)

Οι μπαταρίες Νατρίου - Θείου (NaS) αποτελούν μία νέα τεχνολογία αποθήκευσης που προς το παρόν καταλαμβάνει ένα σχετικά μικρό μερίδιο της αγοράς, αλλά εκτιμάται ότι στο μέλλον θα γίνει εξαιρετικά δημοφιλής.[6] Κατασκευαστικά περιλαμβάνουν ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο με ενεργά στοιχεία τηγμένο θείο και τηγμένο νάτριο αντίστοιχα, τα οποία διαχωρίζονται από έναν στερεό κεραμικό ηλεκτρολύτη από β-οξείδιο του αργιλίου (solid beta alumina ceramic electrolyte), ο οποίος επιτρέπει μόνο στα θετικά ιόντα νατρίου να περάσουν διαμέσου αυτού. Στο σχήμα 1.19 απεικονίζεται ένα κελί της μπαταρίας NaS.

Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης ενός κελιού, το νάτριο δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα παρέχοντας τάση περίπου 2 Volt, ενώ τα κατιόντα νατρίου που προκύπτουν μετακινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη προς το ηλεκτρόδιο τηγμένου θείου σχηματίζοντας πολθειούχο νάτριο. Αυτή η διαδικασία είναι αντιστρέψιμη, καθώς κατά τη φόρτιση το εξωτερικό ρεύμα αναγκάζει το πολθειούχο νάτριο να ελευθερώσει το κατιόν νατρίου στον ηλεκτρολύτη, ώστε να γίνει πάλι στοιχειακό νάτριο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Η συνολική χημική αντίδραση που πραγματοποιείται είναι (προς τα δεξιά η εκφόρτιση):

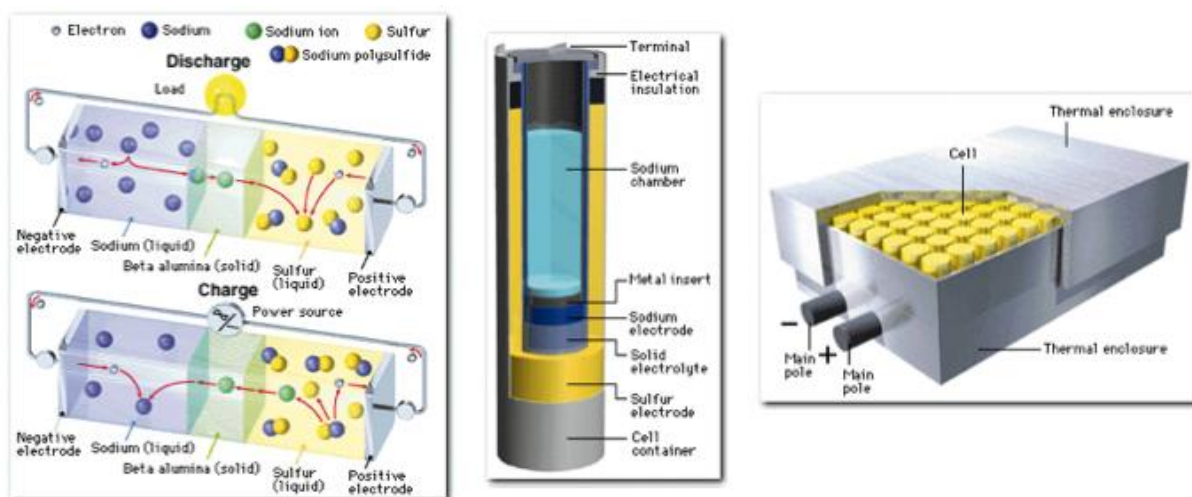


Στα θετικά της τεχνολογίας συμπεριλαμβάνονται τα εξής:

- Οι μεγάλες τιμές πυκνότητας ενέργειας και ισχύος που κυμαίνονται μεταξύ 100-240 Wh/kg και 150-230 W/kg αντίστοιχα
- Η τυπική διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 2500 κύκλοι

- Χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση (75 - 90%)
- Έχουν ικανότητα παροχής βηματικής ισχύος για 30 sec πάνω από έξι φορές μεγαλύτερη από την συνεχή ονομαστική ικανότητα (αυτή η ιδιότητα καθιστά κατάλληλες και οικονομικές τις μπαταρίες NaS σε εφαρμογές που συνδυάζουν ποιότητα ισχύος και κάλυψη φορτίου)
- Εξαλείφεται το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης, εξαιτίας της ύπαρξης του κεραμικού ηλεκτρολύτη που χαρακτηρίζεται από μηδενική αγωγιμότητα ηλεκτρονίων
- Χρησιμοποιούν υλικά φιλικά προς το περιβάλλον
- Το κόστος τους θεωρείται σχετικά χαμηλό (\$350/kWh)
- Οι ανάγκες συντήρησής τους είναι ασήμαντες και η περίοδος λειτουργίας πολύ ικανοποιητική

Από την άλλη μεριά, σημαντικό μειονέκτημα της τεχνολογίας αποτελεί η μη καταλληλότητα της για συγκεκριμένες εφαρμογές, δεδομένης της ανάγκης να διατηρείται η θερμοκρασία λειτουργίας τους σε υψηλά επίπεδα (μεταξύ 300° C και 350° C), ώστε να είναι δυνατή η πραγματοποίηση του ηλεκτροχημικού φαινομένου [7].



Σχήμα 2. 8 Περιγραφή λειτουργίας και απεικόνιση ενός κελιού της μπαταρίας NaS.

Σε γενικές γραμμές οι μπαταρίες NaS είναι περισσότερο κατάλληλες για σταθερές εφαρμογές μεγάλης ισχύος και μέχρι σήμερα έχουν χρησιμοποιηθεί για ισοστάθμιση φορτίου (load leveling), peak shaving, παροχή έκτακτης ισχύος, UPS, βελτίωση ποιότητας ισχύος σε βιομηχανικές μονάδες και υποβοήθηση μονάδων ΑΠΕ.

Στην Ιαπωνία μόνο, έχουν γίνει έργα επίδειξης σε πάνω από 30 εγκαταστάσεις με συνολική ονομαστική ισχύ 20 MW και αποθηκευμένη ενέργεια κατάλληλη για κάλυψη φορτίου για 8 ώρες καθημερινά. Παραδείγματα αποτελούν η μονάδα 6 MW/8h στην επιχείρηση ηλεκτρικής ισχύος του Τόκυο και η μονάδα 8 MW/7,25 h στο εργοστάσιο της Hitachi. Η μεγαλύτερης ισχύος εγκατάσταση μπαταριών NaS είναι 34 MW/245MWh για σταθεροποίηση της ισχύος εξόδου αιολικού πάρκου 51 MW στη βόρεια Ιαπωνία. Το 2002 στις ΗΠΑ ξεκίνησε η πρώτη επίδειξη συστήματος NaS στο Ohio με χωρητικότητα 7,2 MWh και δυνατότητα απόδοσης ισχύος έως 1,2 MW. Επίσης στην Ιαπωνία, το 2001 ο οργανισμός NEDO ανέπτυξε ένα υβριδικό σύστημα αποτελούμενο από μία Α/Γ ισχύος 500 kW και σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες NaS ισχύος 400 kW, με βασικό στόχο την

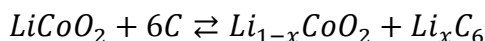
σταθεροποίηση των διαταραχών μικρής και μεγάλης διάρκειας της ισχύος εξόδου αλλά και την ενίσχυση της αξιοπιστίας [10]

2.2.4.5 Μπαταρίες Τεχνολογίας Λιθίου (Lithium-Ions Batteries)

Οι μπαταρίες που βασίζονται στο λίθιο συνιστούν μία σχετικά νέα τεχνολογία η οποία σήμερα εφαρμόζεται κυρίως σε φορητές συσκευές, αλλά στο σύντομο μέλλον αναμένεται η χρήση τους σε υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα. Η τεχνολογία περιλαμβάνει δύο κύριους τύπους μπαταριών, τις ιόντων λιθίου (Li-ion) και τις λιθίου πολυμερούς (Li-poly):

- **Ιόντων λιθίου (Li-ion):** Η κάθοδος κατασκευάζεται από μεταλλικό οξείδιο λιθίου που συνήθως είναι LiCoO_2 , LiMO_2 ή LiNiO_2 , η άνοδος από γραφιτικό άνθρακα με δομή στοιβάδας, ενώ ο ηλεκτρολύτης από τη διάλυση αλάτων λιθίου (όπως το LiPF_6) σε οργανικούς ανθρακικούς διαλύτες. Κατά τη φάση της φόρτισης, τα άτομα λιθίου στην κάθοδο μετατρέπονται σε ιόντα και μετακινούνται διαμέσου του ηλεκτρολύτη προς την άνοδο, όπου συνδυάζονται με ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και τοποθετούνται ως άτομα λιθίου μεταξύ των ανθρακικών στοιβάδων. Αυτή η διαδικασία αντιστρέφεται κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης [6]
- **Λιθίου πολυμερούς (Li-poly):** Η σημαντικότερη διαφορά των μπαταριών Li-poly είναι ότι ο διαλύτης είναι από στερεό πολυμερές και χρησιμοποιείται ταυτόχρονα και ως διαχωριστής

Οι συνολικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στους δύο τύπους μπαταριών είναι (προς τα δεξιά είναι η φόρτιση):



Το βασικότερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι οι πολύ υψηλές τιμές ειδικής ενέργειας που κυμαίνονται μεταξύ 80 - 150 Wh/kg για τις μπαταρίες Li-ion και 100 - 150 Wh/kg για τις Li-poly, καθώς και οι πολύ μεγάλοι βαθμοί απόδοσης που μπορεί να αγγίξουν και το 100% [6]. Πιο συγκεκριμένα, οι μπαταρίες Li-ion εμφανίζουν αξιοσημείωτη διάρκεια ζωής συνδυασμένη με αρκετά βαθιές εκφορτίσεις, καθώς 3000 κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης με βάθος εκφόρτισης 80% αποτελούν τυπικές τιμές. Επιπρόσθετα πλεονεκτήματα αποτελούν ο χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης (<5% ανά μήνα), η μικρή ανάγκη για συντήρηση και η ικανότητα παροχής ρευμάτων πολύ υψηλής τιμής.

Ωστόσο, η διάρκεια ζωής τους επηρεάζεται αρνητικά σε μεγάλο βαθμό από τις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ μπορεί να μειωθεί δραστικά σε περίπτωση υπερβολικά βαθιάς εκφόρτισης, γεγονός που τις καθιστά ακατάλληλες για εφαρμογές εφεδρείας. Επιπλέον αρνητικά στοιχεία αποτελούν ο περιορισμένος ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης για λόγους αποφυγής δημιουργίας metallic lithium plating και η μεγάλη ευαισθησία σε περίπτωση υπερφόρτισης. Οι μπαταρίες Li-poly πλεονεκτούν έναντι των Li-ion από άποψη βάρους και ασφάλειας, καθώς σε αντίθεση με τις τελευταίες δεν εμφανίζουν κίνδυνο αυτανάφλεξης. Από την άλλη μεριά, το σημαντικότερο πρόβλημα που παρουσιάζουν είναι η περιορισμένη

διάρκεια ζωής (περίπου 600 κύκλοι) και το πιο στενό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας σε σχέση με τις μπαταρίες Li-ion.

Κοινό πλεονέκτημα και των δύο τεχνολογιών είναι ότι η ονομαστική τάση του κελιού είναι 3,7 Volt, δηλαδή μεγαλύτερη από τις άλλες τεχνολογίες. Για αυτό το λόγο απαιτείται η σύνδεση μικρότερου αριθμού κελιών σε σειρά ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο τάσης, οδηγώντας ίσως έτσι σε μικρότερο τελικό κόστος κατασκευή. Αντίθετα, σημαντικό κοινό μειονέκτημα συνιστά ο μικρότερος βαθμός αξιοπιστίας συγκριτικά με τις συμβατικές τεχνολογίες μολύβδου οξέως και νικελίου καδμίου.

Σήμερα, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου καλύπτουν το 50% της αγοράς των μικρών φορητών συσκευών αν και υπάρχουν προκλήσεις για την επέκτασή τους σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος. Το μεγαλύτερο εμπόδιο είναι το μεγάλο κόστος εξαιτίας της ακριβής παραγωγής και συσκευασίας, καθώς και της παρουσίας ειδικών κυκλωμάτων προστασίας από υπερφόρτιση [6].

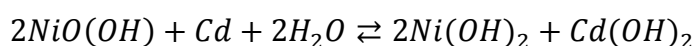


Σχήμα 2. 19 Παράδειγμα εφαρμογής μπαταριών λιθίου σε ESS.

Η έρευνα στις μπαταρίες τεχνολογίας λιθίου επικεντρώνεται κυρίως στη μείωση του κόστους που κυμαίνεται γενικά μεταξύ \$900 - \$1300/kWh με τη χρήση φθηνότερων υλικών, την αύξηση της διάρκειας ζωής και τη μείωση του κινδύνου αυτανάφλεξης στην περίπτωση της τεχνολογίας Li-ion. Αρκετές εταιρίες προσπαθούν να μειώσουν το κόστος παραγωγής των μπαταριών Li-ion με σκοπό την επέκτασή τους στην αγορά μεγάλης κλίμακας ισχύος και προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν παραχθεί μοντέλα επίδειξης ισχύος 3 kW. Το υπουργείο ενέργειας των ΗΠΑ έχει χρηματοδοτήσει ένα έργο των εταιριών SAFT και SatCon για τη σχεδίαση και την κατασκευή συστήματος αποθήκευσης αποτελούμενου από μία μπαταρία Li-ion ικανότητας παροχής ισχύος 100 kW για ένα λεπτό, για χρήση παροχής ποιότητας ισχύος για διασυνδεδεμένες μικροτουρμπίνες [7].

2.2.4.6 Μπαταρίες Νικελίου Καδμίου (Nickel – Cadmium battery)

Οι μπαταρίες νικελίου καδμίου (NiCd) κατατάσσονται μαζί με τις μολύβδου οξέως από άποψη δημοτικότητας και τεχνολογικής ωριμότητας, αφού χρησιμοποιούνται για περίπου εκατό χρόνια. Τα κελιά αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, ηλεκτρολύτη με υδροξείδιο του καλίου και ένα διαχωριστή, ενώ συνήθως περικλείονται σε μεταλλική θήκη που σφραγίζεται με μία πλάκα εφοδιασμένη με βαλβίδα ασφαλείας. Το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο απομονωμένα το ένα από το άλλο μέσω του διαχωριστή τυλίγονται σε σπирάλ σχήμα μέσα στη θήκη. Σε κατάσταση πλήρους φόρτισης το θετικό ηλεκτρόδιο περιέχει υδροξείδιο του νικελίου και το αρνητικό κάδμιο. Η ονομαστική τάση εκφόρτισης του κελιού είναι 1,2 Volt σε ρυθμό εκφόρτισης 0,2C και ελαττώνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας. Η συνολική χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι (με φορά προς τα δεξιά η εκφόρτιση) [7]

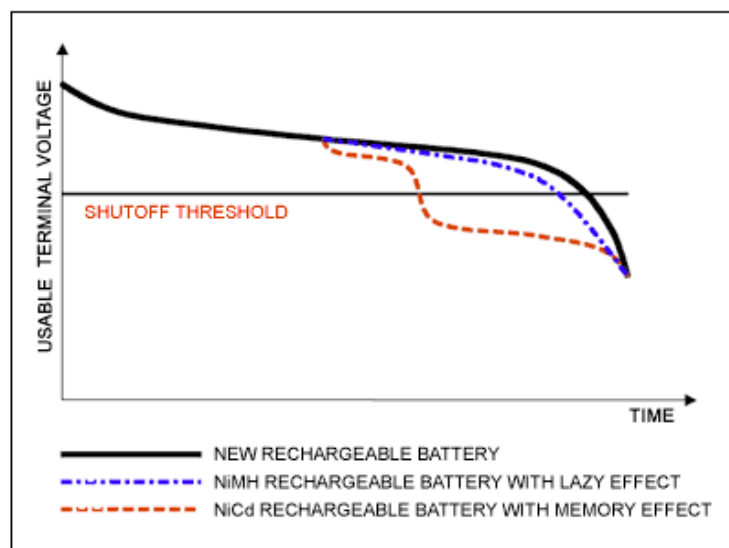


Συγκριτικά με τις μπαταρίες μολύβδου οξέως, οι νικελίου καδμίου έχουν μεγαλύτερες τιμές ειδικής ενέργειας (50-75 Wh/kg), μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (2000 - 2500 κύκλοι), υποστηρίζουν υψηλότερους ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης, αλλά έχουν μικρότερη απόδοση (60 - 75%) είναι και πιο ακριβές. Επιπλέον πλεονεκτήματα τους αποτελούν η αυξημένη αξιοπιστία και οι πολύ μικρές ανάγκες συντήρησης, η δυνατότητα βαθιάς εκφόρτισης και η εξαιρετική παροχή βηματικής τάσης. Για τους λόγους αυτούς είναι γενικά κατάλληλες για φορητές συσκευές, φωτισμό έκτακτης ανάγκης, UPS και εκκίνηση κινητήρων.

Ωστόσο, σήμερα οι φορητές συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί υπολογιστές χρησιμοποιούν άλλες τεχνολογίες ηλεκτροχημικής αποθήκευσης. Η τεχνολογία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί και σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Έχουν εγκατασταθεί υβριδικά συστήματα που διαθέτουν μπαταρίες νικελίου καδμίου ως διατάξεις αποθήκευσης, όπως το υβριδικό σύστημα στο Wales της Αλάσκας. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερης ισχύος σύστημα ηλεκτροχημικής αποθήκευσης παγκοσμίως έχει εγκατασταθεί στο Golden Valley της Αλάσκας και χρησιμοποιεί μπαταρίες NiCd. Αποτελείται από τέσσερις συστοιχίες μπαταριών με 3440 κελιά η καθεμία και έχει ικανότητα απόδοσης ισχύος 40 MW για 7 min ή 27MW για 15 min. [11]

Το βασικό μειονέκτημα τους είναι το σχετικά υψηλό κόστος (\$1000/kWh) εξαιτίας της ακριβούς κατασκευαστικής διαδικασίας. Επιπλέον, το κάδμιο είναι ένα βαρύ τοξικό μέταλλο που εισάγει προβλήματα διάθεσης και ανακύκλωσης των μπαταριών νικελίου καδμίου.

Αρνητικό χαρακτηριστικό αποτελεί και το φαινόμενο μνήμης (memory effect), σύμφωνα με το οποίο όταν μία μπαταρία NiCd φορτίζεται και εκφορτίζεται εκατοντάδες φορές σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ονομαστικής χωρητικότητας, τείνει να το «θυμάται» και τελικά μπορεί να εκφορτιστεί αποτελεσματικά μόνο μέχρι το ποσοστό αυτό (σχήμα 1.21).

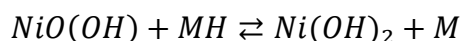


Σχήμα 2. 9 Σύγκριση του *memory effect* στους συσσωρευτές NiCd και του *lazy effect* στους συσσωρευτές NiMH. *Shutoff threshold* είναι το ελάχιστο όριο τάσης για να μπορεί να αποδώσει ισχύ ο συσσωρευτής.

Στην πραγματικότητα, στο σημείο που άρχιζε η επαναφόρτιση παρατηρείται μία δραματική μείωση της τάσης της μπαταρίας, σαν να ήταν πλήρως εκφορτισμένη, ενώ πρωτογενώς η χωρητικότητα δεν μειώνεται σημαντικά. Ωστόσο, εάν το σύστημα που ηλεκτροδοτείται από την μπαταρία δε μπορεί να λειτουργήσει κατά τη διάρκεια της χαμηλής τιμής της τάσης, είναι αδύνατο να αξιοποιήσει όλη την αποθηκευμένη ενέργεια, οπότε πρακτικά η μπαταρία εμφανίζει μειωμένη χωρητικότητα. Αν παρατηρηθεί το *memory effect*, μπορεί να εξαλειφθεί μετά από μία σειρά πλήρων εκφορτίσεων της μπαταρίας.

2.2.4.7 Μπαταρίες Νικελίου Υδριδίου Μετάλλου (NiMH battery)

Οι μπαταρίες Νικελίου υδριδίου μετάλλου (NiMH) αποτελούν επέκταση της τεχνολογίας που εφαρμοζόταν στις μπαταρίες νικελίου καδμίου με την κύρια διαφορά να εντοπίζεται στην πλάκα της ανόδου που κατασκευάζεται από υδρίδιο ενός μετάλλου M. Οι συνολικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την εκφόρτιση (προς τα δεξιά) και κατά τη φόρτιση (προς τα αριστερά) είναι [12]:



Η χρήση υδριδίου του μετάλλου αντί για κάδμιο εκμηδενίζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μπαταριών NiCd, ενώ παράλληλα περιορίζεται η επίδραση του φαινομένου μνήμης, το οποίο εδώ αποκαλείται *lazy effect*. Υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμες μπαταρίες που παρουσιάζουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 1000 κύκλους εκφόρτισης σε βάθος 80%. Η ειδική ενέργεια των μπαταριών NiMH είναι εν γένει 30 - 50% μεγαλύτερη από των μπαταριών NiCd, με μία αντιπροσωπευτική τιμή 70 Wh/kg. [12]

Το σημαντικότερο μειονέκτημα έναντι της τεχνολογίας NiCd είναι τα υψηλότερα ποσοστά αυτοεκφόρτισης που κυμαίνεται μεταξύ 5 - 10% την πρώτη μέρα και

σταθεροποιείται περίπου σε 0,5 - 1% την ημέρα σε θερμοκρασία δωματίου. Επιπλέον μειονεκτήματα είναι η χαμηλή αποδοτικότητα των κελίων τους, ο σχετικά χαμηλός βαθμός αξιοπιστίας, η υψηλή θερμοκρασία που δημιουργείται κατά την φόρτιση και το υψηλό τους κόστος, το οποίο όμως αναμένεται να μειωθεί δραματικά στο μέλλον.

Η τεχνολογία NiMH έχει φτάσει σε μεγάλο βαθμό ωριμότητας για μία ποικιλία εμπορικών εφαρμογών μεταξύ των οποίων εφαρμογές μικρής ισχύος όπως κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές και εργαλεία με κινητήρα, μέχρι εφαρμογές μεγάλης ισχύος όπως αεροδιαστημικές εφαρμογές και υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα. Ακόμα, μέχρι σήμερα έχουν υλοποιηθεί επιτυχώς μερικά αποθηκευτικά συστήματα μεγάλης κλίμακας με τεχνολογία NiMH για σταθερά συστήματα εφεδρείας ηλεκτρικής ισχύος και εφαρμογές διεσπαρμένης παραγωγής. Παράλληλα, γίνονται δοκιμαστικές εφαρμογές της τεχνολογίας ως αποθηκευτικό μέσο σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, ως εφεδρεία σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα, καθώς και σε συστήματα κάλυψης αιχμής (peak shaving). [12]

2.2.4.8 Μπαταρίες Ροής (Redox Flow batteries)

Οι μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής (redox flow batteries), ή πιο απλά μπαταρίες ροής, συνιστούν μία σχετικά νέα τεχνολογία ηλεκτροχημικής αποθήκευσης με δυνατότητα επαναφόρτισης. Σε γενικές γραμμές, αποτελούνται από έναν αριθμό ηλεκτροχημικών κυψελών, δύο ηλεκτρολύτες και δύο δεξαμενές για την αποθήκευσή τους. [13,14,15]

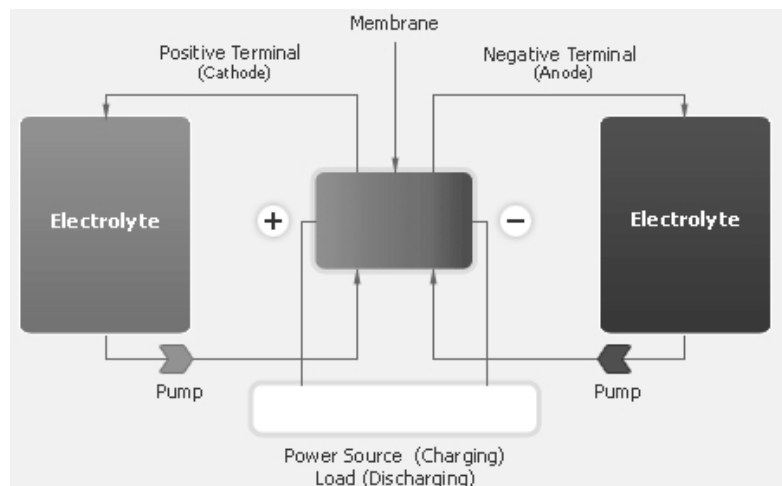
Οι μπαταρίες ροής διαφέρουν από τις συμβατικές μπαταρίες σε δύο σημεία:

- Η αντίδραση γίνεται μεταξύ των δύο ηλεκτρολυτών και όχι μεταξύ του ηλεκτρολύτη και ενός ηλεκτροδίου. Έτσι δεν έχουμε αλλοίωση του ηλεκτροδίου ή απώλειας των ηλεκτρικά ενεργών χημικών στοιχείων όταν η μπαταρία φορτίζεται και εκφορτίζεται κατ'επανάληψη σε μεγάλο βάθος.
- Οι ηλεκτρολύτες αποθηκεύονται σε εξωτερικές δεξαμενές και κυκλοφορούν μέσω αντλιών στην κυψέλη.

Ουσιαστικά οι μπαταρίες ροής αποτελούνται από 3 κύρια μέρη :

- Την κυψέλη, όπου η ηλεκτροχημική αντίδραση λαμβάνει μέρος
- Τις δεξαμενές, όπου αποθηκεύονται οι ηλεκτρολύτες
- Το σύστημα κυκλοφορίας, δηλαδή τις αντλίες που κινούν τους ηλεκτρολύτες, αθώς και το σύστημα ελέγχου τους

Κάθε κυψέλη περιλαμβάνει δύο διαμερίσματα, την άνοδο και την κάθοδο, που χωρίζονται από μία μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων και είναι ένα για κάθε ηλεκτρολύτη. Με τη βοήθεια αντλιών οι δύο ηλεκτρολύτες κυκλοφορούν διαμέσου των κυψελών και καθώς περνάνε από τη μεμβράνη ο ένας ηλεκτρολύτης οξειδώνεται και ο άλλος ανάγεται, με αποτέλεσμα την παραγωγή ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα. Με αυτόν τον τρόπο η αποθηκευμένη χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική κατά τη φάση της εκφόρτισης. Η χρήση των αντλιών έχει σαν συνέπεια κάποιες παρασιτικές απώλειες στη διάταξη, αλλά παράλληλα συνεισφέρει στη διατήρηση της θερμοκρασίας σε επιθυμητά επίπεδα.



Σχήμα 2. 10 Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας των μπαταριών ροής.

Σε αντίθεση με τις συμβατικές μπαταρίες, οι μπαταρίες ροής αποθηκεύουν ενέργεια στο διάλυμα του ηλεκτρολύτη και επιπλέον η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας είναι ανεξάρτητη από την ικανότητα παροχής ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, η χωρητικότητα αποθήκευσης καθορίζεται από την ποσότητα του διαθέσιμου ηλεκτρολύτη και το μέγεθος των δεξαμενών, ενώ η ικανότητα απόδοσης ισχύος εξαρτάται από το ενεργό εμβαδό της στοίβας των κυψελών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μπαταρίες ροής διαφέρουν από τις κυψέλες καυσίμου, αφού στις τελευταίες μόνο τα ηλεκτρικά ενεργά χημικά στοιχεία (υδρογόνο, μεθανόλη, οξυγόνο) ρέουν διαμέσου της κυψέλης, ενώ ο ηλεκτρολύτης παραμένει συνεχώς στο εσωτερικό της. Η σημαντικότερη, βέβαια, διαφορά με τις κυψέλες καυσίμου είναι το γεγονός ότι στις μπαταρίες ροής η χημική αντίδραση είναι αντιστρέψιμη, οπότε είναι secondary αποθηκευτικά μέσα και μπορούν να επαναφορτιστούν χωρίς αντικατάσταση του ηλεκτρικά ενεργού υλικού.

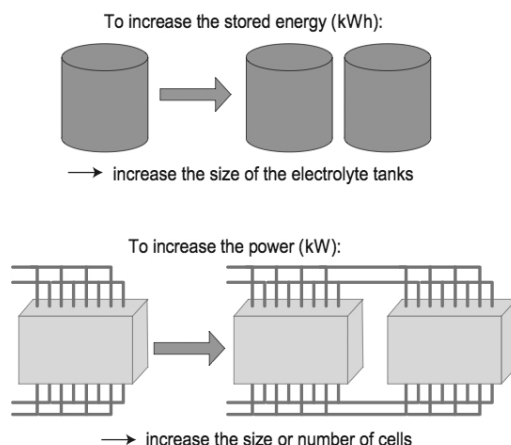
Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι ηλεκτρολυτών που ορίζουν ισάριθμες κατηγορίες μπαταριών ροής:

- ηλεκτρολύτης θειικού οξέως με vanadium redox couples
- ηλεκτρολύτης βρωμιούχου ψευδαργύρου
- ηλεκτρολύτης βρωμιδίου του νατρίου / πολυθειούχου νατρίου

Οι τρεις τύποι μπαταριών ροής παρουσιάζουν κάποια κύρια κοινά χαρακτηριστικά.

- Υπάρχει η δυνατότητα παροχής μεγάλων ποσών ισχύος, αλλά και η δυνατότητα συνεχούς απόδοσης ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα έως και δέκα ώρες
- Επιτρέπεται η ευέλικτη διαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης δεδομένου ότι η χωρητικότητα και η ικανότητα απόδοσης ισχύος είναι ανεξάρτητα μεγέθη
- Εμφανίζουν γρήγορη απόκριση και μπορούν να μεταβούν από λειτουργία φόρτισης σε λειτουργία εκφόρτισης σε περίπου 1 ms επειδή η διάρκεια των αντιδράσεων οξειδοαναγωγής είναι πολύ μικρή
- Οι ηλεκτρολύτες μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα
- Η αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος επιτυγχάνεται απλά με την προσθήκη μεγαλύτερων δεξαμενών και περισσότερου ηλεκτρολύτη (σχήμα 2.22).

- vi. Δεν υφίστανται αυτοεκφόρτιση αφού οι ηλεκτρολύτες είναι αποθηκευμένοι ξεχωριστά και δε μπορούν να αντιδράσουν.



Σχήμα 2. 11 Προσαρμογή χωρητικότητας (πάνω) και ισχύος (κάτω) της μπαταρίας

Στις αρνητικές ιδιότητες της τεχνολογίας συγκαταλέγονται ο χαμηλός βαθμός απόδοσης λόγω των απωλειών από τη χρήση των αντλιών και των απωλειών των χημικών αντιδράσεων, οι χαμηλές τιμές ειδικής ενέργειας και το αυξημένο κόστος κτήσης και λειτουργικό κόστος. [16,17] Στη συνέχεια περιγράφονται οι τρεις κυριότερες τεχνολογίες μπαταριών ροής.

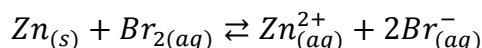
Μπαταρίες Ψευδαργύρου – Βρωμίου (Zinc Bromine - ZnBr)

Οι μπαταρίες ψευδαργύρου βρωμίου (Zinc Bromine - ZnBr) χαρακτηρίζονται ως υβριδικές μπαταρίες ροής γιατί κατά τη λειτουργία της ένα μόνο από τα ηλεκτρόδια συμμετέχει στην αντίδραση. Αυτές οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές ESS καθώς επίσης και σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Το σύστημα προσφέρει καλή πυκνότητα ενέργειας (65-84 Wh/kg) και έχει διάρκεια ζωής 2000 κύκλους.

Σε κάθε κυψέλη δύο διαφορετικοί ηλεκτρολύτες ρέουν κατά μήκος συνθετικών ηλεκτροδίων άνθρακα - πλαστικού σε δύο διαμερίσματα διαχωρισμένα από μεμβράνη πορώδους πολυολεφίνης. Κατά την εκφόρτιση, ο ψευδάργυρος και το βρώμιο αντιδρούν δίνοντας άλας βρωμιούχου ψευδαργύρου και παράγοντας τάση 1,8 Volt σε κάθε κυψέλη. Αυτή η διαδικασία αυξάνει την περιεκτικότητα των ιόντων Zn^{2+} και Br^+ και στους δύο ηλεκτρολύτες.

Κατά τη φόρτιση, μεταλλικός ψευδάργυρος επικάθεται σε μορφή λεπτού στρώματος στη μία πλευρά του ηλεκτροδίου, ενώ στην άλλη μεριά της μεμβράνης το βρώμιο αντιδρά με οργανικές ουσίες με αποτέλεσμα την παραγωγή thick bromine oil το οποίο βυθίζεται στο κάτω μέρος της δεξαμενής.

Η συνολική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι (προς τα δεξιά η εκφόρτιση):

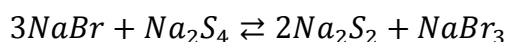


Δεδομένου ότι το ενεργό στοιχείο Zn επικάθεται στο ένα ηλεκτρόδιο της κυψέλης κατά τη φάση της φόρτισης, η πυκνότητα ενέργειας καθορίζεται όχι μόνο από την ποσότητα του ηλεκτρολύτη όπως στις μπαταρίες VRB, αλλά και από το εμβαδό της στοιβάδας των κυψελών. Για το λόγο αυτό, στην τεχνολογία ZnBr η χωρητικότητα και η ικανότητα απόδοσης ισχύος δεν είναι εντελώς ανεξάρτητα μεγέθη [18].

Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε από την εταιρία Exxon στην αρχή της δεκαετίας του 1970 και η καθαρή απόδοση της είναι περίπου 75%. Με την πάροδο των ετών κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν πολλές μπαταρίες ZnBr χωρητικότητας της τάξης των kWh. Το 1991 η εταιρία Meidisha έκανε επίδειξη ενός τέτοιου συστήματος αποθήκευσης ισχύος 1 MW και χωρητικότητας 4 MWh στην εταιρία ηλεκτρικής ισχύος Kyushu. Σήμερα οι κύριες εταιρίες που αναπτύσσουν και παρέχουν μπαταρίες ZnBr είναι η ZBB Energy Corporation και η Premium Power Corporation. Η πρώτη εταιρία παράγει σύστημα ικανότητας 500 kWh για εφαρμογές δικτύου καθώς και συστήματα 50 kWh για εφαρμογές ΑΠΕ. [7]

Μπαταρίες Πολυθειούχου Βρωμιδίου (Polysulphide Bromide Battery - PSB)

Οι μπαταρίες πολυθειούχου βρωμιδίου (polysulphide bromide - PSB - Regenesys) ανήκουν στην τεχνολογία regenerative κυψελών καυσίμου και παρέχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας λόγω της πραγματοποίησης αντιστρέψιμης ηλεκτροχημικής αντίδρασης μεταξύ ενός διαλύματος ηλεκτρολύτη βρωμιδίου του νατρίου και ενός διαλύματος πολυθειούχου νατρίου [17]. Η συνολική αντίδραση είναι (προς τα δεξιά η εκφόρτιση):



Τα ηλεκτρόδια χωρίζονται εντός των κυψελών από πολυμερή μεμβράνη που επιτρέπει μόνο στα κατιόντα νατρίου να περάσουν παράγοντας μία διαφορά δυναμικού περίπου 1,5 Volt κατά μήκος της κυψέλης. Τα κελιά συνδέονται σε σειρά και παράλληλα ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα τάσης και ρεύματος. Η θερμοκρασία λειτουργίας της μπαταρίας PSB είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος και, όπως και στις μπαταρίες ZnBr, ο καθαρός βαθμός απόδοσης είναι περίπου 75%.

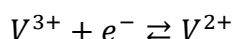
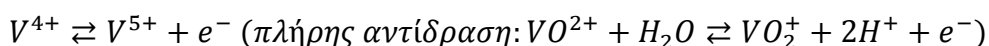
Η εταιρία Regenesys Technologies κατασκευάζει ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες PSB χωρητικότητας 120 MWh και ικανότητας απόδοσης ισχύος 15 MW στον σταθμό παραγωγής του Innogy's Little Barford στο Ηνωμένο Βασίλειο. Το δεύτερο σύστημα επίδειξης από την ίδια εταιρία έχει χωρητικότητα 120 MWh και ικανότητα ισχύος 12 MW και βρίσκεται στο Tennessee Valley Authority (TVA) στο Columbus των ΗΠΑ. [7]

Vanadium Redox Flow Battery (VRB)

Αυτός ο τύπος μπαταρίας ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες μπαταρίες ροής λόγω του πολύ ανταγωνιστικού του κόστους και της απλότητας κατασκευής του. Η απλότητα αυτή

προκύπτει από το γεγονός ότι η VRB χρησιμοποιεί τον ίδιο ηλεκτρολύτη και στις δύο ημι-κυψέλες. Η VRB αποθηκεύει ενέργεια με τη χρήση οξειδοαναγωγικών ζευγών βαναδίου (vanadium redox couples), που είναι V^{2+}/V^{3+} στην άνοδο και V^{4+}/V^{5+} (VO^{2+}/VO_2^+) στην κάθοδο της κυψέλης, και που περιέχονται σε ήπιο διάλυμα ηλεκτρολύτη θειικού οξέως.

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης ανταλλάσσονται κατιόντα υδρογόνου μεταξύ των δύο ηλεκτρολυτών διαμέσου της περατής μεμβράνης πολυμερούς. Η τάση κάθε κυψέλης κυμαίνεται μεταξύ 1,4 - 1,6 Volt και ο βαθμός απόδοσης μπορεί να είναι έως και 85%. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται για το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι αντίστοιχα (η φόρτιση είναι προς τα δεξιά):



Τα πλεονεκτήματα των VRB είναι τα εξής :

- ✓ Η μεγάλη διάρκεια ζωής υπό καθεστώς βαθιών εκφορτίσεων, καθώς έχουν αναφερθεί διάρκειες ζωής έως και πάνω από 10.000 κύκλους (7-15 χρόνια) με βάθος εκφόρτισης 75%. [19]
- ✓ Υψηλή απόδοση, έως και 85%
- ✓ Πολύ γρήγορος χρόνος απόκρισης
- ✓ Απαιτείται μικρή συντήρηση
- ✓ Μπορούν να εκφορτιστούν σε μεγάλα βάθη χωρίς τον κίνδυνο ζημιάς
- ✓ Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι φιλικά προς το περιβάλλον και η θερμοκρασία κανονική

Αρνητικό της τεχνολογίας αποτελεί η χαμηλή πυκνότητα ενέργειας με τιμές μεταξύ 10 - 30 Wh/l και 20 – 25 Wh/kg λόγω της μικρής διαλυτότητας των ενεργών χημικών στοιχείων.

Οι μπαταρίες VRB είναι κατάλληλες για μία γκάμα εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας για επιχειρήσεις ηλεκτρισμού και για βιομηχανικούς καταναλωτές. Αυτές περιλαμβάνουν βελτίωση ποιότητας ισχύος με εξομάλυνση της τάσης, UPS, κάλυψη αιχμής (peak shaving), αύξηση της ασφάλειας τροφοδοσίας και ενσωμάτωση με συστήματα ΑΠΕ. Η πλειονότητα των έργων ανάπτυξης της τεχνολογίας εστιάζει σε σταθερές εφαρμογές εξαιτίας της χαμηλής πυκνότητας ενέργειας [7].

Η τεχνολογία VRB αποτέλεσε καινοτομία του πανεπιστημίου του New South Wales της Αυστραλίας στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος μπαταρίας ροής. Σήμερα, οι κυριότεροι κατασκευαστές μπαταριών VRB είναι οι εταιρίες Sumitomo Electric Industries (SEI), VRB Power Systems και Cellennium limited. Συστήματα VRB ικανότητας ισχύος έως 500 kW για δέκα ώρες, δηλαδή χωρητικότητας 5 MWh, έχουν εγκατασταθεί στην Ιαπωνία από την SEI για το πανεπιστήμιο Kwansei Gakuin. Επίσης, τέτοια συστήματα έχουν εφαρμοστεί για βελτίωση ποιότητας ισχύος, όπως για παράδειγμα το σύστημα ικανότητας ισχύος 3 MW για 1,5 δευτερόλεπτα για την εταιρία Tottori Sanyo Electric. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται παραδείγματα εφαρμογής των VRB σε υβριδικά συστήματα.

2.2.5 Σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης

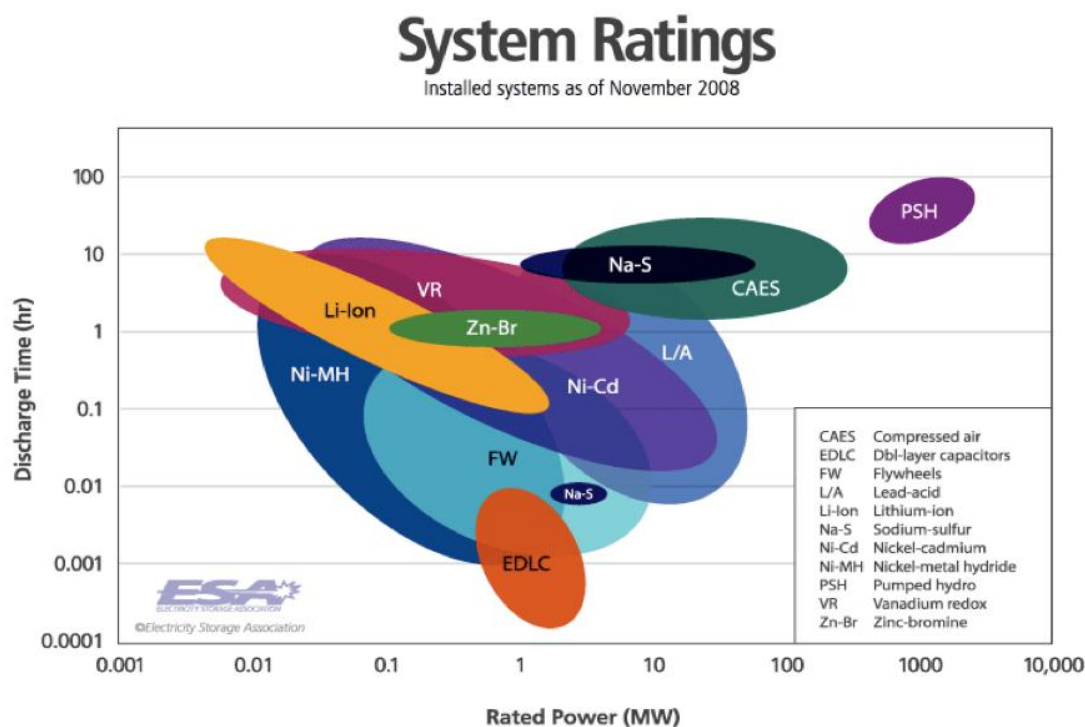
Η σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών είναι αρκετά δύσκολη, για το λόγο ότι η καθεμία από αυτές έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει μια μπαταρία διαφέρουν ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Εδώ παρουσιάζονται 3 συγκρίσεις, βασισμένες στα εξής χαρακτηριστικά:

- Ονομαστική ισχύς και χρόνος εκφόρτισης
- Κόστος κεφαλαίου
- Απόδοση και διάρκεια ζωής

2.2.5.1 Ονομαστική Ισχύς και Χρόνος Εκφόρτισης

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης που είναι σήμερα διαθέσιμες, καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα ονομαστικών τιμών ισχύος και χρόνου εκφόρτισης, από λίγα kW έως χιλιάδες GW και από λίγα δευτερόλεπτα έως μέρες. Με βάση το χρόνο εκφόρτισης οι τεχνολογίες μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες :

- Μικρού χρόνου εκφόρτισης:** Εφαρμογές ποιότητας ισχύος και UPS είναι αποτελούν τυπικές χρήσεις αυτής της κατηγορίας. Υπερπυκνωτές, σφόνδυλοι και SMES μπορούν να αποδώσουν σχεδόν στιγμιαία μεγάλη ποσότητα ενέργεια για περιόδους από μερικά δευτερόλεπτα, έως κάποια λεπτά. Επίσης μπορούν να αντέξουν μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης εκφόρτισης, κάτι που απαιτείται στις εφαρμογές ποιότητας ισχύος.
- Μεγάλου χρόνου εκφόρτισης:** Η διαχείριση ισχύος σε ένα σύστημα αποτελεί βασική εφαρμογή αυτής της κατηγορίας. Οι μπαταρίες ροής, τα CAES και η αντλησιοταμίευση αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι κλασσικές μπαταρίες συνήθως χρησιμοποιούνται για εφαρμογές μικρότερης διάρκειας εκφόρτισης.
- iii)**



Σχήμα 2. 23 Σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών ως προς το χρόνο εκφόρτισης και την τιμή της ισχύος.

2.2.5.2 Κόστος Κεφαλαίου

Το κόστος κεφαλαίου είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά, μαζί με τα πιθανά κέρδη από την επένδυση, για την αποδοχή στην αγορά μιας νέας τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας. Το κόστος των τεχνολογιών αποθήκευσης εξαρτάται από την ονομαστική τιμή της ισχύος και της ενέργειας, γιατί πρέπει να επιτευχθεί ένα ισοζύγιο μεταξύ του αρχικού κόστους και των κερδών που απορρέουν από την επένδυση, ώστε να καθίσταται η επένδυση συμφέρουσα. Είναι, λοιπόν απαραίτητη μια τεχνοοικονομική ανάλυση πριν την επένδυση στην κατασκευή ενός ESS, ώστε να επιλεγεί η σωστή διαστασιολόγηση του συστήματος καθώς επίσης και η κατάλληλη τεχνολογία αποθήκευσης.

Μια αξιολόγηση του αρχικού κόστους επένδυσης ενός ESS πρέπει οπωσδήποτε να περιλαμβάνει τις εξής 3 οικονομικές παραμέτρους και να τις συγκρίνει με τα έσοδα από το υπό μελέτη έργο.

- **Κόστος Κεφαλαίου:** Είναι το συνολικό κόστος που απαιτείται για την κατασκευή ή την αγορά της διάταξης του ESS.
- **Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης (Operation and maintenance cost – O&M):** μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό το συνολικό κόστος
- **Διάρκεια ζωής:** αποτελεί μία εξίσου σημαντική παράμετρο, γιατί ο εξοπλισμός που έχει πολύ μικρή διάρκεια ζωής πρέπει να αντικαθίσταται πιο συχνά

Τα κόστη αυτά αλλάζουν καθώς οι τεχνολογίες εξελίσσονται, κάποιες είναι ήδη πολύ ώριμες, ενώ κάποιες άλλες είναι υπό ανάπτυξη. [20]

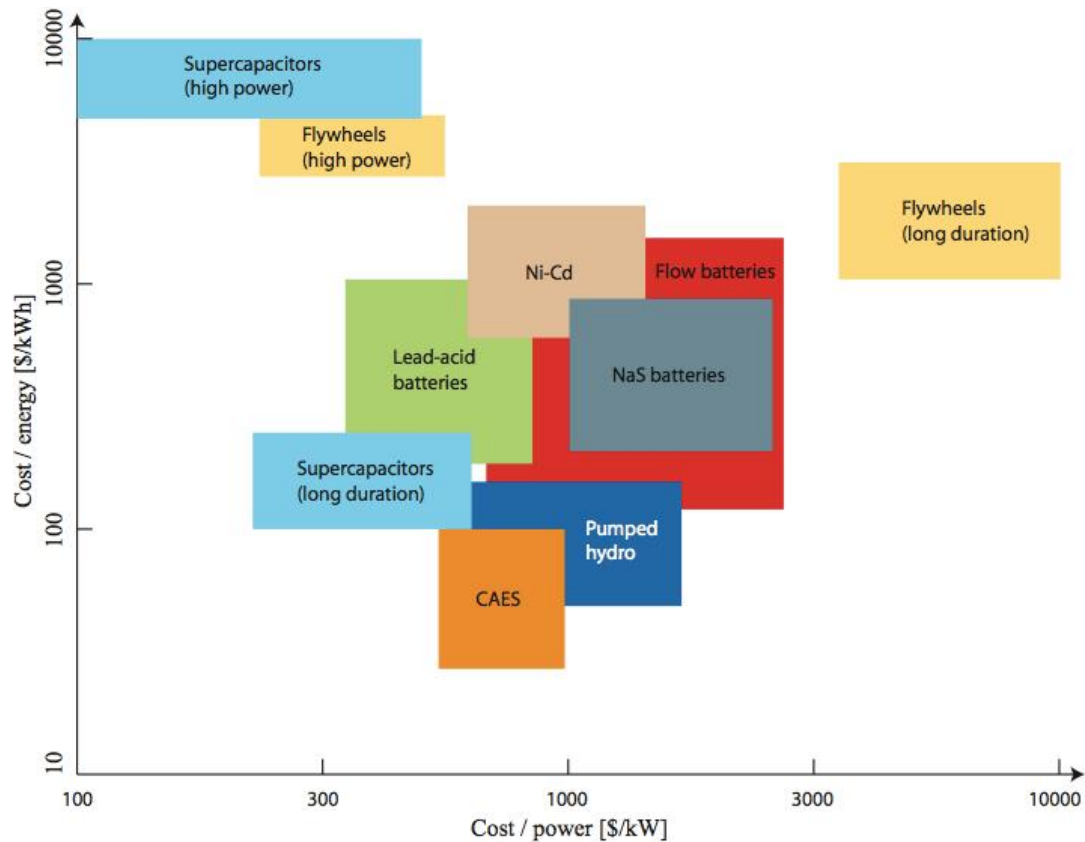
Το παρακάτω διάγραμμα έχει καταρτιστεί από τον Οργανισμό Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (Electricity Storage Association – ESA), δείχνει την ειδική τιμή της κάθε τεχνολογίας ανά μονάδα ισχύος και ανά μονάδα ενέργειας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα επιμέρους κόστη που απαιτεί η εγκατάσταση ενός ESS 2kW, 30 kWh αποτελούμενο από VRB. Παρατηρείται ότι ο ηλεκτρολύτης είναι το πιο ακριβό μέρος της μπαταρίας, αφού αποτελεί περισσότερο από το μισό της τιμής της. [21]

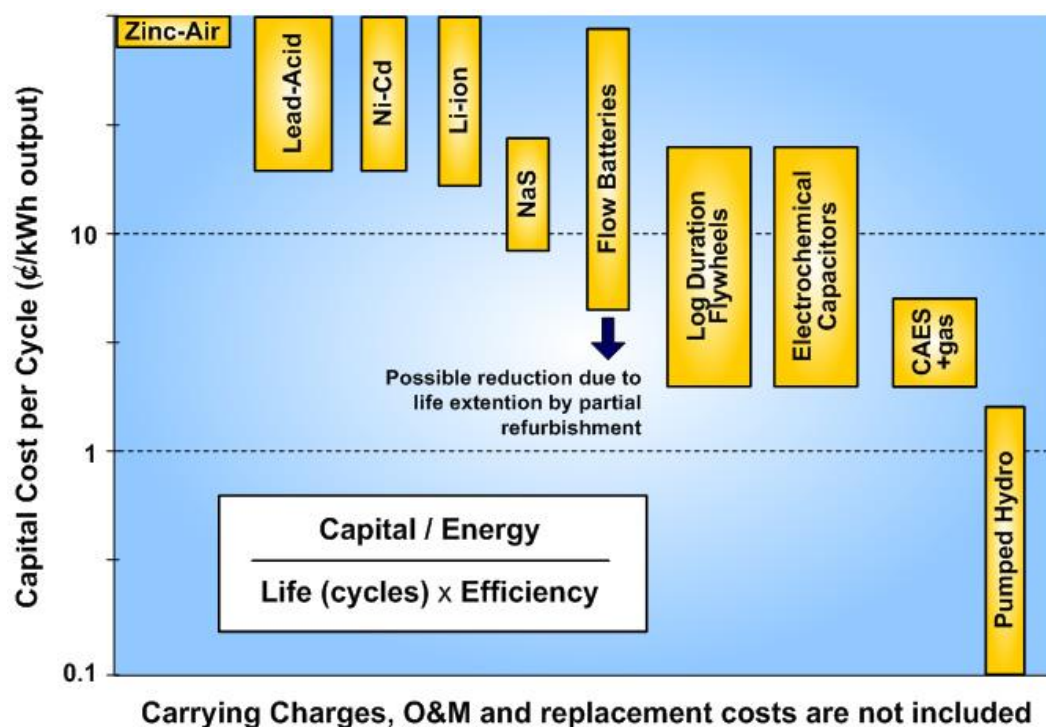
	Quantity	Cost per unit	Cost [€]
Activation felt	3.5 m ² /kW	50 €/m ²	350
Bipolar plates		65 €/kW	130
Flow frames, etc.		435 €/kW	870
Separator	2.1 m ² /kW	25 €/m ²	105
V ₂ O ₅	1800 kg	13.6 €/kg	2448
Electrolyte preparation	for 1800 kg		
	of V ₂ O ₅	3 €/kg	540
Tanks	2 of 5500 l	185 €	370
Pumps	2	160 €	320
Battery management system	1	500 €	500
Total cost			5633

Πίνακας 2. 1 Εκτίμηση κόστους για ένα σύστημα VRB 2kW, 30 kWh.

Στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 2.24) παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ 4 τεχνολογιών για την τιμή ανά MWh ενός συστήματος 1MW. Παρατηρούμε ότι, όσον αφορά το ποσό αποθηκευμένης ενέργειας οι δύο πιο συμφέρουσες τεχνολογίες είναι οι μπαταρίες VRB και οι μολύβδου-οξέως.



Σχήμα 2. 12 Σύγκριση ειδικού κόστους ανά μονάδα ισχύος και ανά μονάδα ενέργειας για τις διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.



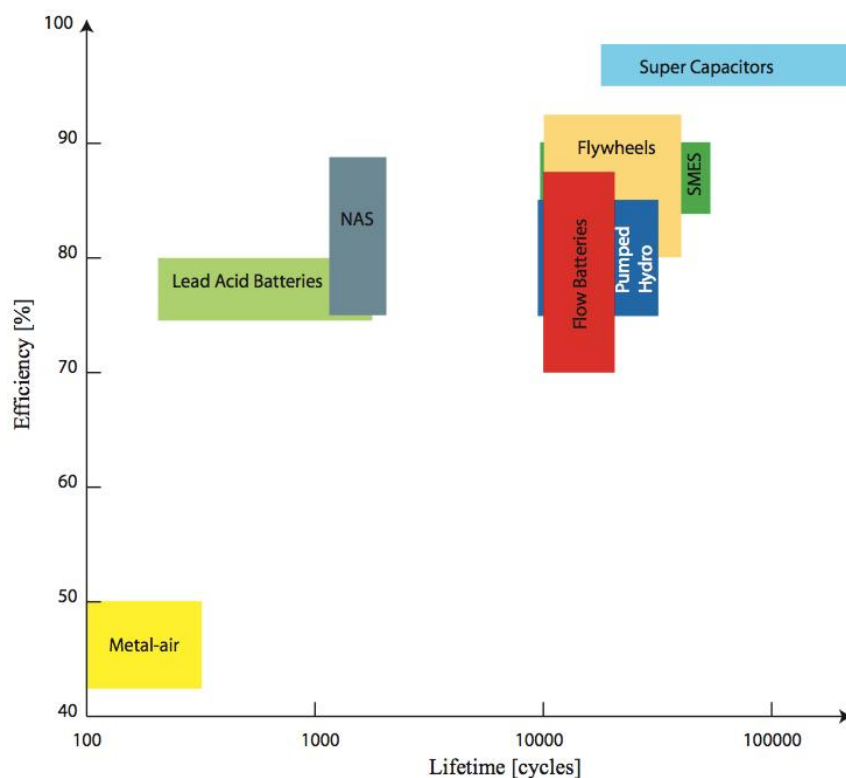
Σχήμα 2. 13 Κόστος της εκάστοτε τεχνολογίας ανά κύκλο (φόρτιση – εκφόρτιση)

2.2.5.3 Απόδοση και Διάρκεια Ζωής

Η άμεση σύγκριση της απόδοσης και της διάρκειας ζωής των διαφόρων τεχνολογιών δεν είναι σαφής και εύκολη, για το λόγο ότι τα χαρακτηριστικά αυτά επηρεάζονται πολύ από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Για παράδειγμα, οι βαθιές εκφορτίσεις, μεταξύ άλλων παραγόντων, τείνουν να μειώσουν την απόδοση και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, με κάποιες τεχνολογίες να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία από τις υπόλοιπες.

Το παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 1.26) παρουσιάζει την απόδοση και τη διάρκεια ζωής για διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης. Οι συμβατικές μπαταρίες, όπως οι μολύβδου οξέως και οι NaS, παρουσιάζουν μικρότερη διάρκεια ζωής, για το λόγο ότι τα ηλεκτρόδιά τους συμμετέχουν στην αντίδραση και έτσι φθείρονται πιο γρήγορα από τις υπόλοιπες τεχνολογίες.

Αν και οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν την υψηλότερη απόδοση και διάρκεια ζωής, δεν χρησιμοποιούνται τόσο ευρέως σε εφαρμογές, λόγω του πολύ μικρού ποσού ενέργειας που μπορούν να αποθηκεύσουν. Ουσιαστικά, χρησιμοποιούνται κυρίως ως συμπλήρωμα σε άλλες τεχνολογίες, για να βοηθήσουν στην απόδοση ισχύος.

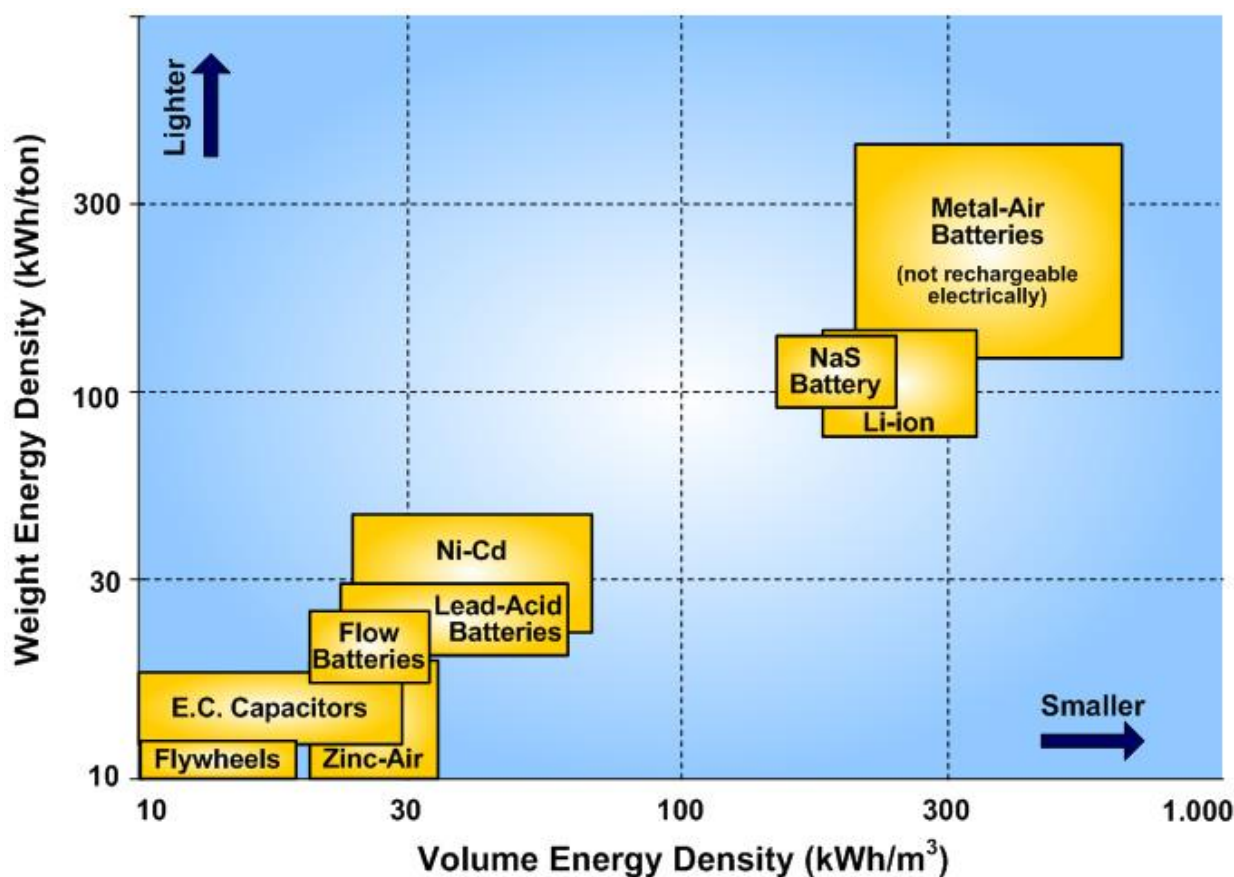


Σχήμα 2. 146 Σύγκριση του βαθμού απόδοσης και της διάρκειας ζωής των διαφόρων τεχνολογιών

Η απόδοση και η διάρκεια ζωής είναι δύο παράγοντες που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το κόστος ενός ESS. Οι τεχνολογίες με μικρή διάρκεια ζωής φθείρονται πολύ πιο γρήγορα και πρέπει να αντικαθίστανται πιο συχνά, αυξάνοντας έτσι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O&M). Όμοια, ένα ESS που παρουσιάζει πολύ μικρή απόδοση, αυξάνει το κόστος καθώς ένα μόνο μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και άρα να εκμεταλλευτεί οικονομικά.

2.2.5.4 Πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου και βάρους

Στο διάγραμμα του σχήματος 2.27 γίνεται σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών ως προς την πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα βάρους και ανά μονάδα όγκου. Παρατηρείται ότι οι συσσωρευτές τύπου Metal – Air παρουσιάζουν την καλύτερη τιμή ενεργειακής πυκνότητας και έπονται οι συσσωρευτές τύπου NaS και Ιόντων Λιθίου.



Σχήμα 2. 27 Σύγκριση της πυκνότητας ενέργειας ανά m^3 και ανά kg των διαφόρων τεχνολογιών

Στον πίνακα της επόμενης σελίδας (πίνακας 2.2) συγκρίνονται οι διάφορες τεχνολογίες ως προς την εμπορική τους ωριμότητα, δηλαδή τη δυνατότητα μαζικής παραγωγής τους ώστε να είναι εμπορικά εκμεταλλεύσιμες και ως προς τη βεβαιότητα στην κοστολόγησή τους (λόγω ύπαρξής τους στην αγορά).

Technology	Commercial Maturity	Cost Certainty
Lead-Acid Batteries	◆	◆
Regenesys®	■	■
Na/S Batteries	■	■
Ni/Cd Batteries	▲	■
Zn/Br Batteries	■	▲
Li-ion Batteries	■	●
Vanadium-redox Batteries	■	■
Superconducting Magnetic Energy Storage (D-SMES)	▲	▲
Flywheel (high-speed)	■	■
Flywheel (low-speed)	▲	◆
Supercapacitor	■	■
Compressed Air Energy Storage (CAES)	■	▲
Compressed Air Energy Storage in surface vessels (CAES-surface)	●	●
Pumped Hydro	◆	◆
Fuel Cells (hydrogen)	■	■
Hydrogen combustion engine	▲	◆

Legend for Figure 4

Symbol	Commercial Maturity	Cost Certainty
◆	Mature products, many sold	Price list available
▲	Commercial products, multiple units in the field	Price quotes available
■	Prototype units ordered, under construction, or in the field	Costs determined for each project
●	Designs available, nothing built	Costs estimated

Πίνακας 2.2 Σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας ως προς την ωριμότητα της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται ανά περίπτωση και ως προς τη βεβαιότητα στην κοστολόγησή τους

Κεφάλαιο 3

Συσσωρευτές τεχνολογίας VRB

3.1 Εισαγωγή

Οι συσσωρευτές τεχνολογίας VRB είναι μεγάλα σταθερά συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με δυνατότητα πολλών εφαρμογών κυρίως σε δίκτυα διεσπαρμένης παραγωγής. Όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο οι μπαταρίες ροής, κατηγορία στην οποία ανήκει και η VRB αποθηκεύουν χημική ενέργεια και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας οξειδοαναγωγικής αντίδρασης μεταξύ ιόντων βαναδίου, διαλυμένων στους ηλεκτρολύτες. Οι μπαταρίες ροής αποτελούνται ουσιαστικά από δύο βασικά στοιχεία:

- Το κελί (κυψέλη) : όπου πραγματοποιείται η αντίδραση οξειδοαναγωγής και η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική, ή αντίστροφα
- Το ντεπόζιτο (δεξαμενές) : ένα για το θετικό και ένα για τον αρνητικό ηλεκτρολύτη, όπου αποθηκεύεται η ενέργεια.

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά της μπαταρίας VRB αποτελεί το γεγονός ότι η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι εντελώς ανεξάρτητη από την ονομαστική της ισχύ. Ουσιαστικά, η ισχύς εξαρτάται από το μέγεθος και τον αριθμό των κελιών, ενώ η χωρητικότητα από την ποσότητα ηλεκτρολυτών που μπορεί να αποθηκευτεί στο σύστημα, δηλαδή από το μέγεθος των δεξαμενών. Έτσι ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, η VRB μπορεί να βελτιστοποιηθεί είτε για διανομή ενέργειας είτε για διανομή ισχύος.

Η κίνηση των ηλεκτρολυτών από τις δεξαμενές προς το κελί γίνεται μέσω ενός βοηθητικού συστήματος αντλιών, η περιγραφή του οποίου μας βοηθά να καταλάβουμε καλύτερα τη συμπεριφορά της μπαταρίας κάτω από κάθε συνθήκη λειτουργίας της, καθώς επίσης και τη φύση των απωλειών που υπεισέρχονται κατά τη λειτουργία της. Έτσι λοιπόν για να περιγραφεί αναλυτικά η λειτουργία της μοντελοποιούμε την μπαταρία κάνοντας χρήση των εξής τριών ξεχωριστών υπο-μοντέλων [23,24]:

- **Το ηλεκτροχημικό μοντέλο**, περιγράφει την οξειδοαναγωγική αντίδραση και το δυναμικό που αναπτύσσεται στα ηλεκτρόδια της μπαταρίας
- **Το μηχανικό μοντέλο**, τη λειτουργία των βοηθητικών αντλιών, καθώς επίσης και την ισχύ που αυτές καταναλώνουν
- **Το μοντέλο των δεξαμενών**, περιγράφει τη μεταβολή της συγκέντρωσης των ηλεκτρολυτών σε ιόντα βαναδίου και κατ'επέκταση το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας

Τα υπο-μοντέλα αυτά θα αναλυθούν περισσότερο στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού.

3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας VRB

Οι μπαταρίες ροής (Redox Flow Batteries – RFB) και κατ'επέκταση και οι VRB έχουν πολλά πλεονεκτήματα συγκρινόμενες με τις υπόλοιπες μπαταρίες. [22, 23]

- Η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι ανεξάρτητη από την ονομαστική της ισχύ και καθορίζεται από το μέγεθος των δεξαμενών και μόνο. Αυτό προσδίδει στο σύστημα

μεγάλη ευελιξία, αφού μπορεί να προσαρμοστεί σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες. Ακόμη η ανεξαρτησία αυτή των δεξαμενών από την ίδια τη μπαταρία (κελί) βοηθά και στην εγκατάσταση, παρέχοντας τη δυνατότητα για παράδειγμα να εγκατασταθούν οι δεξαμενές υπόγεια για εξοικονόμηση χώρου

- Λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου και έτσι τα υλικά της μπαταρίας δεν υφίστανται επιπλέον καταπόνηση
- Απαιτούν λίγη και εύκολη συντήρηση, γιατί οι ηλεκτρολύτες δεν είναι τοξικοί και είναι ασφαλείς και η θερμοκρασία λειτουργίας της μπαταρίας είναι χαμηλή
- Είναι ανεκτικές σε βαθιές εκφορτίσεις χωρίς τον κίνδυνο να καταστραφούν
- Έχουν πολύ γρήγορους χρόνους απόκρισης και μπορούν να αποδώσουν πολύ μεγάλη ισχύ (μεγαλύτερη της ονομαστικής) για σύντομες περιόδους (παλμική απόκριση)
- Λειτουργούν σε μεγάλο εύρος ισχύος πέραν της ονομαστικής με αρκετά καλό βαθμό απόδοσης μέχρι και στο 10% της ονομαστικής ισχύος
- Εφόσον η μπαταρία δε βρίσκεται σε λειτουργία οι θετικοί και αρνητικοί ηλεκτρολύτες φυλάσσονται σε διαφορετικές δεξαμενές και έτσι η μπαταρία δεν υφίσταται αυτοεκφόρτιση. Αποτελεί έτσι ιδανική λύση για μακράς διάρκειας αποθήκευση ενέργειας.
- Η αντίδραση οξειδοαναγωγής περιλαμβάνει μόνο αλλαγή στον αριθμό σθένους των ιόντων βαναδίου. Δεν λαμβάνουν χώρα ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στερεών ουσιών και έτσι ο χρόνος ζωής τους είναι πάρα πολύ μεγάλος εν συγκρίσει με τις υπόλοιπες τεχνολογίες μπαταριών. Έχει αποδειχτεί ότι ξεπερνούν τους 14000 κύκλους φόρτισης - εκφόρτισης, κάτι που αντιστοιχεί σε 7-15 χρόνια ζωής.
- Η απόδοσή τους είναι αρκετά υψηλή αφού επιτυγχάνονται τιμές έως και 85%

Συγκεκριμένα οι μπαταρίες βαναδίου (VRB) δεν βασίζονται σε ουσίες τοξικές όπως ο μόλυβδος, ο ψευδάργυρος ή το κάδμιο, όπως πολλές άλλες συμβατικές μπαταρίες, έχοντας έτσι πολύ μικρή αρνητική επίδραση στο περιβάλλον, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μπαταρίες ροής που μπορεί να περιέχουν και τοξικές ουσίες. Οι ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται αποτελούνται από βανάδιο διαλυμένο σε θειικό οξύ, ένα οξύ που χρησιμοποιείται ευρύτατα και υπάρχει τεχνογνωσία ως προς τη χρήση του από άλλα τμήματα της βιομηχανίας. Τέλος οι ηλεκτρολύτες δεν υφίστανται υποβάθμιση λόγω χρήσης ή με την πάροδο του χρόνου, κάτι που σημαίνει ότι μπορούν να ανακυκλωθούν και να χρησιμοποιηθούν ξανά σε ένα νέο σύστημα VRB, καθιστώντας τους ακόμα πιο οικολογικούς.

Το βασικό μειονέκτημα των VRB είναι η πολύ χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τις άλλες ηλεκτροχημικές μπαταρίες. Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη διαλυτότητα των ενεργών υλικών. Συνήθεις τιμές είναι 15-30 Wh/l ή 20-25 Wh/kg. Η μικρή ωστόσο πυκνότητα δεν αποτελεί σοβαρό μειονέκτημα για στατικές εγκαταστάσεις.

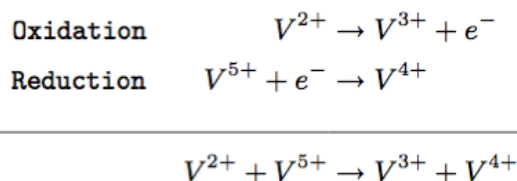
3.3 Ηλεκτροχημικό μοντέλο της VRB – περιγραφή των χημικών αντιδράσεων

3.3.1 Χημική αντίδραση οξειδοαναγωγής

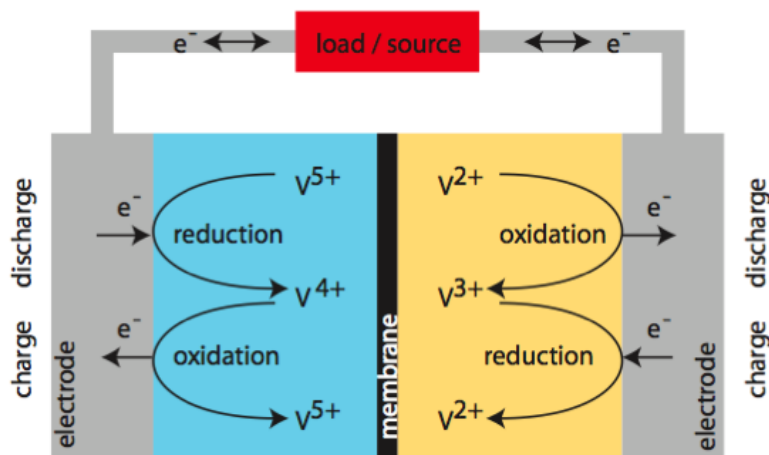
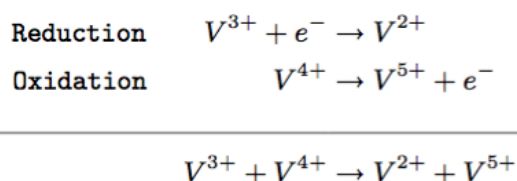
Οι μπαταρίες είναι διατάξεις που αποθηκεύουν χημική ενέργεια και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω αντίδρασης οξειδοαναγωγής. Ουσιαστικά, όλες οι τεχνολογίες μπαταριών βασίζονται σε μια τέτοια αντίδραση. Η αντίδραση οξειδοαναγωγής είναι μια μετατροπή της ύλης σε ατομικό επίπεδο με μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα στοιχείο σε

κάποιο άλλο. Θεωρούμε ότι οξειδώνεται ένα μόριο όταν χάνει ηλεκτρόνια, ενώ ότι μειώνεται όταν κερδίζει ηλεκτρόνια.

Στη μπαταρία VRB η αντίδραση αυτή χωρίζεται σε δύο ταυτόχρονα βήματα που συμβαίνουν σε κάθε πλευρά της μεμβράνης (σχήμα). Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, τα ηλεκτρόνια απομακρύνονται από την άνοδο και μεταφέρονται μέσω του εξωτερικού κυκλώματος στην κάθοδο. Η αντίδραση στην περίπτωση της εκφόρτισης είναι η εξής : [22, 23]



Ο οξειδωτικός παράγοντας V^{5+} παίρνει ένα ηλεκτρόνιο από το μειωτικό παράγοντα V^{2+} . Καθώς η αντίδραση προχωρά από αριστερά προς τα δεξιά, ο V^{5+} μειώνεται και ο V^{2+} οξειδώνεται. Η ροή των ηλεκτρονίων αντιστρέφεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Στην εκφόρτιση η μείωση συμβαίνει στην άνοδο και η οξείδωση στην κάθοδο η αντίδραση τώρα είναι :



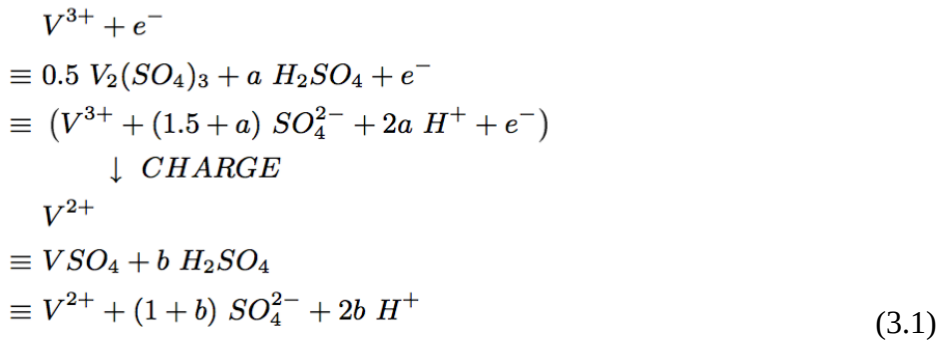
Σχήμα 3.1 Η αντίδραση οξειδοαναγωγής στην VRB κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης

Εφόσον δεν υπάρχει αλλαγή στο συνολικό φορτίο κατά τη διάρκεια μιας αντίδρασης οξειδοαναγωγής, ο αριθμός των επιπλέον ηλεκτρονίων κατά την αντίδραση οξείδωσης πρέπει να ισούται με τον αριθμό των ηλεκτρονίων που δεσμεύονται κατά τη μείωση.

3.3.2 Χημική αντίδραση στη VRB

Στην πραγματικότητα οι χημικές αντιδράσεις κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση της μπαταρίας VRB δεν είναι τόσο απλές όπως φάνηκε παραπάνω. Τα ιόντα του βαναδίου V^{4+} και V^{5+} είναι στην ουσία τα οξειδία του βαναδίου, VO^{2+} και VO_2^+ αντίστοιχα. Επίσης οι ηλεκτρολύτες δεν περιέχουν μόνο ιόντα βαναδίου σε διάφορες φάσεις οξείδωσης, αλλά και πρωτόνια H^+ και θειικά άλατα SO_4^{2-} , τα οποία δε λαμβάνουν ενεργό μέρος στην αντίδραση άλλα συμμετέχουν στο νόμο διατήρησης της μάζας κατά την αντίδραση και ακόμη στην ισορροπία του φορτίου των δύο ηλεκτρολυτών. Έτσι παρακάτω περιγράφονται οι πλήρεις χημικές εξισώσεις. [22]

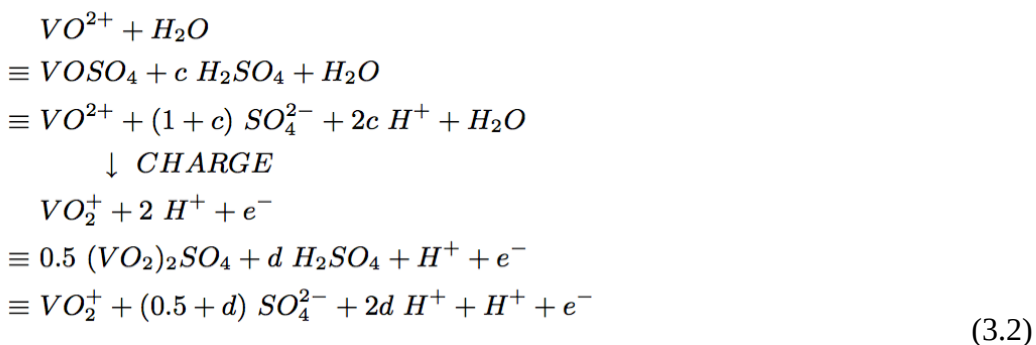
Η αντίδραση που λαμβάνει χώρα στην άνοδο είναι :



Λόγω του νόμου διατήρησης της μάζας και επειδή η ποσότητα του SO_4^{2-} παραμένει σταθερή, προκύπτει ότι

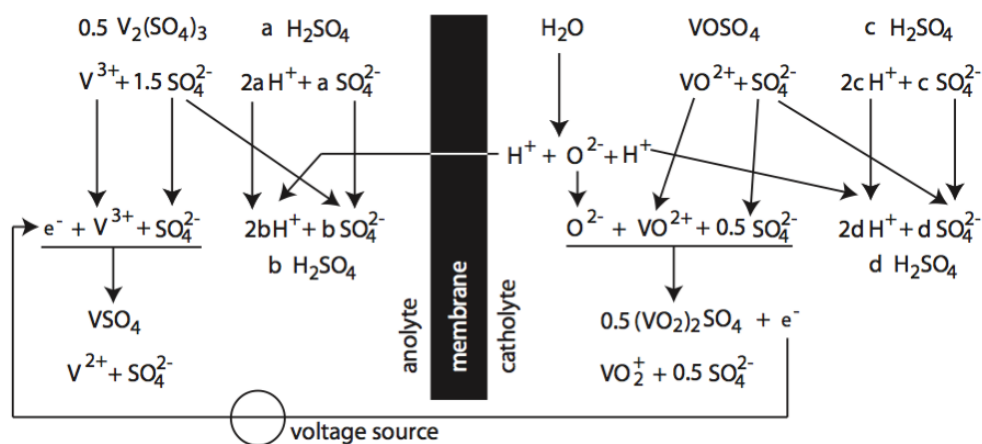
$$b = 0.5 + a$$

Αντίστοιχα η αντίδραση στην κάθοδο είναι :



$$\text{όμοια } d = 0.5 + c$$

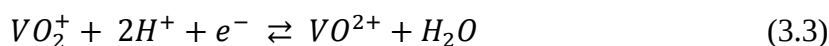
Στο σχήμα 3.2 απεικονίζεται το σύνολο των αντιδράσεων που συμβαίνουν στην άνοδο και την κάθοδο της μπαταρίας κατά τη διάρκεια της φόρτισης. [23]



Σχήμα 3. 2 Απεικόνιση των χημικών αντιδράσεων στη VRB κατά τη διάρκεια της φόρτισης

Οι εξισώσεις (3.1) και (3.2) μπορούν ωστόσο να απλοποιηθούν, ώστε να δείχνουν μόνο τα στοιχεία που λαμβάνουν μέρος στην αντίδραση. Γίνονται έτσι αντίστοιχα :

Στο θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) :

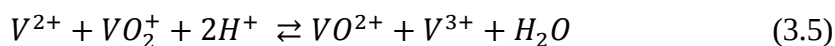


Στο αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) :



(→ εκφόρτιση, ← φόρτιση)

Οι δύο αυτές εξισώσεις μπορούν να συνοψιστούν στην παρακάτω :



3.3.3 Η εξίσωση Nernst και το πρότυπο δυναμικό της αντίδρασης οξειδοαναγωγής

Η λειτουργία των γαλβανικών στοιχείων στηρίζεται σε αυθόρμητες οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις.

Κάθε γαλβανικό στοιχείο αποτελείται από δύο ημιστοιχεία, σε καθένα από τα οποία γίνεται μία ημιαντίδραση (οξείδωσης ή αναγωγής), εξαιτίας της οποίας αναπτύσσεται πάνω στο ηλεκτρόδιο ένα δυναμικό, που ονομάζεται δυναμικό ημιστοιχείου ή ηλεκτροδίου (E).

Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο ημιστοιχεία (ηλεκτρόδια) ενός γαλβανικού στοιχείου, όταν αυτό δε διαρρέεται από ρεύμα ονομάζεται Ηλεκτρεγερτική Δύναμη ή Δυναμικό του στοιχείου (E_{cell}) και μπορεί να μετρηθεί παρεμβάλλοντας ένα βολτόμετρο με πολύ μεγάλη εσωτερική αντίσταση στο εξωτερικό κύκλωμα.

Το δυναμικό ενός γαλβανικού στοιχείου είναι πάντα θετικό, δηλαδή το δυναμικό κάθε αυθόρμητης οξειδοαναγωγικής αντίδρασης είναι θετικό, η τιμή του, όμως, εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση (εφόσον συμμετέχουν αέρια) και τη συγκέντρωση των διαλυμάτων. Έτσι, για να διευκολυνθεί η σύγκριση, τα δυναμικά των διαφόρων γαλβανικών στοιχείων

μετρούνται σε πρότυπες συνθήκες, δηλαδή σε θερμοκρασία 298 K (25° C), πίεση 1 atm και συγκέντρωση διαλυμάτων 1 M. Το δυναμικό που μετριέται κάτω από αυτές τις συνθήκες ονομάζεται πρότυπο δυναμικό στοιχείου και συμβολίζεται με E° . [25]

Το πρότυπο δυναμικό ενός γαλβανικού στοιχείου μπορεί να ληφθεί ως ποσοτικό μέτρο της τάσης των αντιδρώντων να σχηματίζουν προϊόντα. Όσο μεγαλύτερη (θετική) τιμή έχει, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση της αντίδρασης να προχωρήσει προς τα δεξιά, δηλαδή τόσο μεγαλύτερη είναι σχετική ικανότητα των συστατικών της για αποβολή και πρόσληψη ηλεκτρονίων. Με άλλα λόγια, η τιμή του πρότυπου δυναμικού μετράει τόσο την τάση του αναγωγικού να αποβάλλει ηλεκτρόνια όσο και την τάση του οξειδωτικού να προσλαμβάνει ηλεκτρόνια.

Επειδή σε πραγματικές εφαρμογές οι συνθήκες διαφέρουν από τις πρότυπες, απαιτείται μια σχέση μεταξύ του δυναμικού των ηλεκτροδίων και των συνθηκών λειτουργίας. Η σχέση αυτή δίνεται από την εξίσωση Nernst.

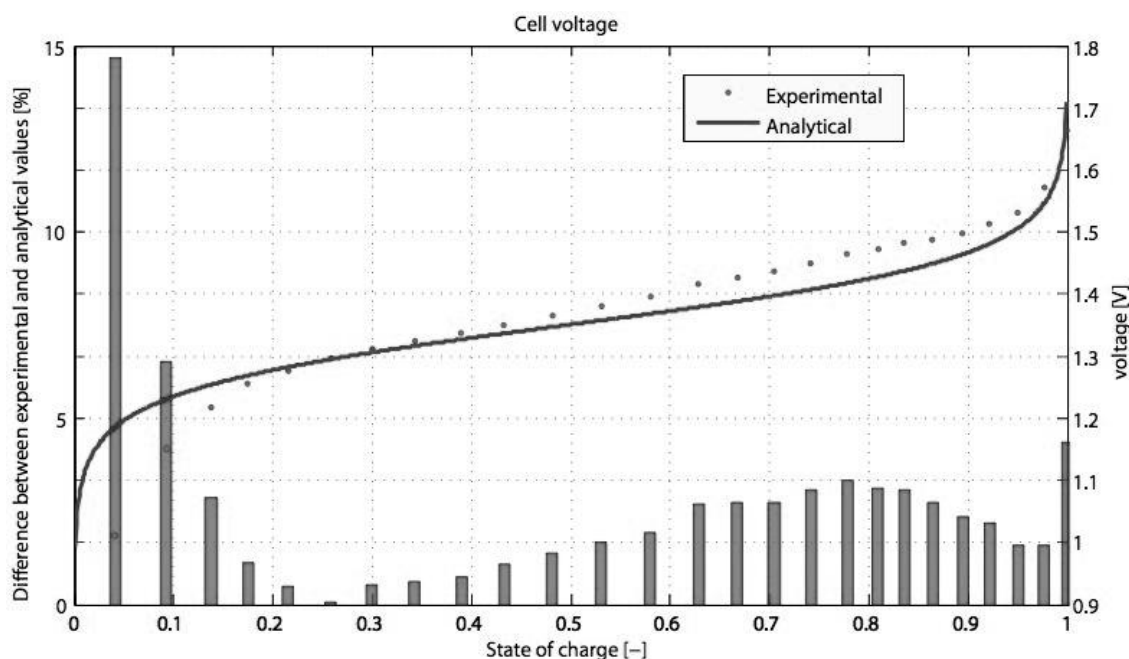
Η εξίσωση Nernst για την VRB είναι:

$$E = E^\circ + \frac{RT}{F} \ln \left\{ \left(\frac{c_{VO_2^+} \cdot c_{H^+}^2}{c_{VO^{2+}}} \right)_{catholyte} \left(\frac{c_{V^{2+}}}{c_{V^{3+}}} \right)_{anolyte} \right\} \quad [V] \quad (3.6)$$

όπου:

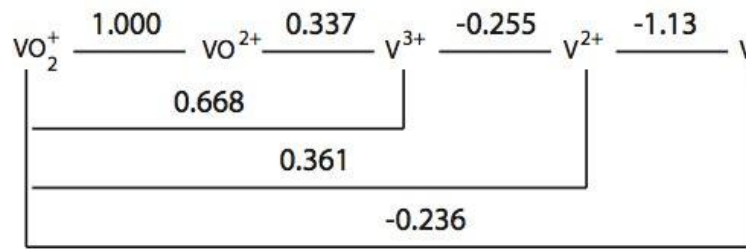
- C_i : οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις των στοιχείων
- R : η παγκόσμια σταθερά των αερίων
- T : η θερμοκρασία
- F : η σταθερά Faraday

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών αποτελεσμάτων της εξίσωσης Nernst και των πειραματικών μετρήσεων [26]



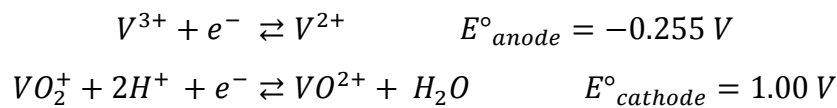
Σχήμα 3.3 Σύγκριση μεταξύ αποτελεσμάτων της εξίσωσης Nernst και των πειραματικών αποτελεσμάτων της [26]. Οι κόκκινες μπάρες δείχνουν τη διαφορά μεταξύ των τιμών.

Το πρότυπο δυναμικό για μια μπαταρία VRB μπορεί να βρεθεί από τα δύο ζευγάρια της αντίδρασης οξειδοαναγωγής, μέσω ηλεκτροχημικών πινάκων, έχουμε έτσι:



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα δυναμικού μεταξύ των διαφόρων ιόντων βαναδίου

Συγκεκριμένα για την οξειδοαναγωγική αντίδραση της VRB:



Άρα τελικά:

$$E^{\circ} = E^{\circ}_{cathode} - E^{\circ}_{anode} = 1.255 \text{ V}$$

3.3.4 Κατάσταση φόρτισης (State of Charge – SoC)

Η κατάσταση φόρτισης (SoC) της μπαταρίας αποτελεί μια ένδειξη της ποσότητας ενέργειας που είναι ανά πάσα στιγμή αποθηκευμένη στην μπαταρία. Η τιμή της μεταβάλλεται από 0→1 (ή αντίστοιχα από 0→100 αν έχει εκφραστεί ως ποσοστό %). Η τιμή 1 αντιστοιχεί σε πλήρως φορτισμένη μπαταρία. Αναλυτικά η τιμή του δίνεται από τις συγκεντρώσεις των διαφόρων ιόντων βαναδίου σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο. [22]

$$SoC = \left(\frac{c_{V^{2+}}}{c_{V^{2+}} + c_{V^{3+}}} \right) = \left(\frac{c_{VO_2^{+}}}{c_{VO^{2+}} + c_{VO_2^{+}}} \right) \quad (3.7)$$

Όταν η συνολική συγκέντρωση του βαναδίου είναι η ίδια και στους δύο ηλεκτρολύτες τότε :

$$c_{V^{3+}} = c_{V_{total}} - c_{V^{2+}} \quad , \quad c_{VO^{2+}} = c_{V_{total}} - c_{VO_2^{+}} \quad (3.8)$$

Έτσι η (3.6) γίνεται :

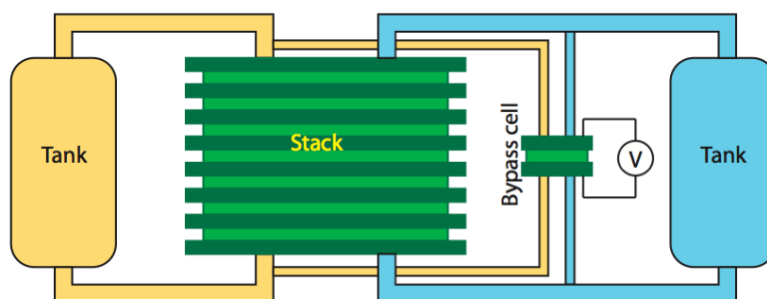
$$SoC = \left(\frac{c_{V^{2+}}}{c_{V_{total}}} \right)_{\text{άνοδος}} = \left(\frac{c_{VO_2^{+}}}{c_{V_{total}}} \right)_{\text{κάθοδος}} \quad (3.9)$$

όπου c_x : η συγκέντρωση σε mol/l του κάθε στοιχείου x

Η μέτρηση των συγκεντρώσεων των ιόντων και κατ επέκταση του SoC της μπαταρίας μπορεί να γίνει με τους εξής δύο τρόπους :

1. Ο πρώτος τρόπος βασίζεται στην εξίσωση Nernst η οποία μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τις συγκεντρώσεις αφού μετρήσουμε την τάση στα άκρα της μπαταρίας. Ειδικά στην περίπτωση ανοιχτοκυκλωμένης μπαταρίας, όπου δεν υπεισέρχονται πτώσεις τάσης λόγω απωλειών, η τάση του κελιού εξαρτάται μόνο από τις συγκεντρώσεις.

Πρακτικά δεν είναι εύκολο να πετύχουμε συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης της μπαταρίας κατά τη λειτουργία της, αφού αυτό θα απαιτούσε τη διακοπή της παροχής ρεύματος από τη μπαταρία. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί εκτρέποντας ένα πολύ μικρό ποσοστό των ηλεκτρολυτών σε ένα παρακαμπτήριο κελί όπως στο σχήμα 3.3. Έτσι το κύριο μέρος των ηλεκτρολυτών περνά μέσα από το βασικό κελί και η μπαταρία συνεχίζει αδιάλειπτα τη λειτουργία της, ενώ το παρακαμπτήριο κελί βρίσκεται σε συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης και η μέτρηση της τάσης του μας δίνει στιγμιαίες τιμές της συγκέντρωσής των ηλεκτρολυτών.



Σχήμα 3.5 Κύριο κελί της VRB με παρακαμπτήριο κελί για τη μέτρηση της συγκέντρωσης των ηλεκτρολυτών

- 2.
3. Ο δεύτερος τρόπος βασίζεται σε μια πολύ ενδιαφέρουσα ιδιότητα του ηλεκτρολύτη : το χρώμα του μεταβάλλεται ανάλογα με το επίπεδο φόρτισής του, δηλαδή ανάλογα με τις συγκεντρώσεις των ιόντων. Όταν είναι πλήρως φορτισμένοι, η κάθοδος είναι κίτρινη και η άνοδος είναι ιώδης. Όσο η μπαταρία εκφορτίζεται, η κάθοδος γίνεται σταδιακά μπλε και η άνοδος πράσινη.

Η ιδιότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του SoC της μπαταρίας. Ωστόσο αποτελεί μια πιο πολύπλοκη μέθοδο σε σχέση με την προηγούμενη, γιατί απαιτεί ένα οπτικό κελί συνδεδεμένο με ένα φασματογράφο UV-VIS.



Σχήμα 3.6 Χρώμα των διαλυμάτων διαφορετικών ιόντων βαναδίου

3.3.5 Μεταβολή της συγκέντρωσης των ιόντων κατά τη λειτουργία της μπαταρίας

Οι εξισώσεις (3.3) και (3.4) δείχνουν τη χημική αντίδραση που γίνεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης. Βλέπουμε ότι καθώς το SoC μεταβάλλεται, αλλάζουν και οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρολυτών. Για παράδειγμα όταν η μπαταρία φορτίζεται, παράγονται V^{2+} και VO_2^+ και οι συγκεντρώσεις τους αυξάνονται, ενώ καταναλώνονται V^{3+} και VO^{2+} και οι συγκεντρώσεις τους μειώνονται. Η διαδικασία αυτή αντιστρέφεται όταν η μπαταρία εκφορτίζεται. Στον πίνακα 3.1 συνοψίζονται οι αλλαγές στις συγκεντρώσεις των ιόντων.

	Charge	Discharge
V^{2+}	↑	↓
V^{3+}	↓	↑
VO^{2+}	↓	↑
VO_2^+	↑	↓

Πίνακας 3. 1 Μεταβολή των συγκεντρώσεων των ιόντων κατά τη φορτίση και εκφόρτιση

Οι μεταβολές στις συγκεντρώσεις είναι ανάλογες του ρυθμού των αντιδράσεων και από τις εξισώσεις (3.3) και (3.4) γνωρίζουμε ότι σε κάθε αντίδραση παράγεται ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι προκύπτει τελικά ότι οι μεταβολές των συγκεντρώσεων είναι ανάλογη του ρεύματος της μπαταρίας, που δείχνει ουσιαστικά το ρυθμό μεταβολής του φορτίου, αφού η ποσότητα των ιόντων βαναδίου που συμμετέχουν στη ν αντίδραση οξειδοαναγωγής είναι και αυτή ανάλογη με το ρεύμα της μπαταρίας.

Το ρεύμα αυτό δημιουργείται από τη ροή φορτίων που μπορεί να είναι είτε θετικά είτε αρνητικά. Στη μπαταρία VRB, τα αρνητικά φορτία είναι τα ηλεκτρόνια που ρέουν προς το εξωτερικό κύκλωμα, ενώ τα θετικά φορτία είναι τα πρωτόνια H^+ που κινούνται μέσα στους ηλεκτρολύτες και διασχίζουν τη μεμβράνη για να διατηρηθεί η ισορροπία του φορτίου. Η σχέση μεταξύ του φορτίου και του ρεύματος είναι

$$i(t) = \frac{dQ_c}{dt} \quad (3.10)$$

και

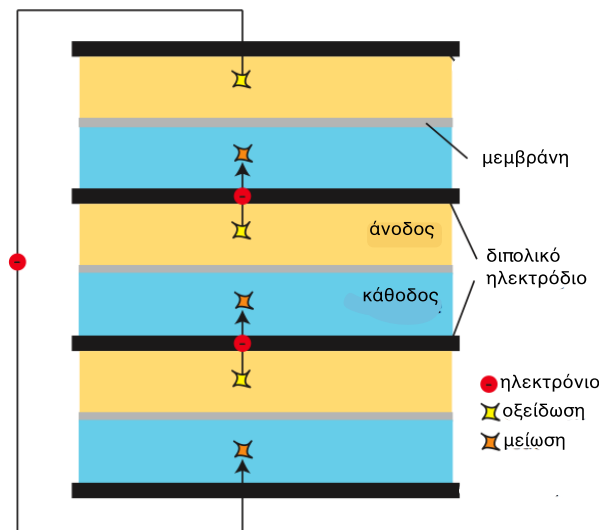
$$Q_c = n_{e-}e = \int i(t)dt \quad (3.11)$$

όπου :

- Q_c : το φορτίο
- i : το ρεύμα
- n_{e-} : ο αριθμός των ηλεκτρονίων
- e : το φορτίο του ηλεκτρονίου

Από σύμβαση, κατά την εκφόρτιση της VRB θεωρούμε το ρεύμα θετικό (+), ώστε να έχουμε θετική την τιμή της ισχύος που δίνει η μπαταρία.

Γενικά τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται από την οξείδωση των ιόντων βαναδίου κινούνται μέσω των ηλεκτροδίων στο εξωτερικό κύκλωμα και στη συνέχεια δεσμεύονται από ένα άλλο ιόν που μειώνεται, στο άλλο μισό του κελιού. Στην περίπτωση που το κελί της μπαταρίας αποτελείται από N_{cell} διαδοχικά κελιά, τα ηλεκτρόνια κινούνται μέσω του διπολικού ηλεκτροδίου σε ένα γειτονικό κελί έτσι για κάθε ηλεκτρόνιο που ρέει προς το εξωτερικό κύκλωμα, στην περίπτωση αυτή, έχουν συμβεί N_{cell} αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3. 7 Απεικόνιση των αντιδράσεων οξειδοαναγωγής που απαιτούνται για να κυκλοφορήσει ένα ηλεκτρόνιο στο εξωτερικό κύκλωμα κατά την εκφόρτιση. Κατά τη φόρτιση η ροή αντιστρέφεται.

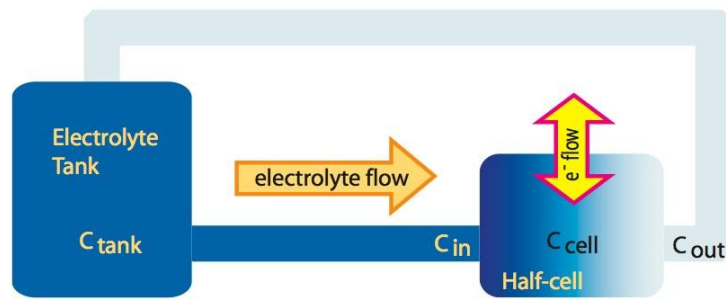
Συγκέντρωσή εισόδου, εξόδου και μέση συγκέντρωση των ιόντων βαναδίου

Οι συγκεντρώσεις των ιόντων δεν κατανέμονται ομοιόμορφα μέσα στο υδραυλικό κύκλωμα του ηλεκτρολύτη. Έτσι μπορούμε να ορίσουμε 4 διαφορετικές συγκεντρώσεις:

- Τη συγκέντρωση στη δεξαμενή c_{tank}
- Τη συγκέντρωση εισόδου στο κελί c_{in}
- Τη συγκέντρωση μέσα στο κελί c_{cell}
- Τη συγκέντρωση εξόδου από το κελί c_{out}

Το μέγεθος της δεξαμενής είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερο, συγκριτικά με τη ροή των ηλεκτρολυτών, έτσι η αλλαγή στη συγκέντρωση των ιόντων λόγω της παροχής του ηλεκτρολύτη που εισέρχεται στο κελί είναι τόσο μικρή, ώστε η συγκέντρωση στη δεξαμενή να μπορεί να θεωρηθεί ομογενής. Έτσι η συγκέντρωση εισόδου στο κελί c_{in} αντιστοιχεί ακριβώς στη c_{tank} .

Οι παρουσία των παραπάνω συγκεντρώσεων στο υδραυλικό κύκλωμα της VRB φαίνονται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3. 8 Απεικόνιση του υδραυλικού συστήματος της VRB και των αντίστοιχων συγκεντρώσεων

Αν θεωρήσουμε το κελί ως ένα κλειστό σύστημα, τότε η ποσότητα των ιόντων που εισέρχονται σε αυτό υπολογίζεται εύκολα από τη συγκέντρωση εισόδου των ιόντων σε αυτό και από την παροχή τους. Η ποσότητα των ιόντων που παράγονται ή καταναλώνονται μέσα στο κελί εξαρτάται από το ρυθμό των αντιδράσεων και κατ'επέκταση από την τιμή του ρεύματος i της μπαταρίας. Λόγω του μεγέθους της δεξαμενής, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η c_{tank} άρα και η c_{in} μεταβάλλονται πολύ αργά, άρα για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (μέχρι να διασχίσει ο ηλεκτρολύτης το κελί) μπορούμε να τις θεωρήσουμε σταθερές. Το ίδιο μπορούμε να κάνουμε και για την παροχή του ηλεκτρολύτη, λόγω της αδράνειάς του. Έτσι η μόνη μεταβλητή που επηρεάζει αρκετά το c_{out} είναι το ρεύμα i .

Η συγκέντρωση μέσα στο κελί c_{cell} είναι αυτή που μας ενδιαφέρει περισσότερο, γιατί είναι απαραίτητη για την επίλυση της εξίσωσης Nernst. Επειδή μέσα στο κελί δεν έχουμε ομοιόμορφη κατανομή των ιόντων υπολογίζουμε προσεγγιστικά τη c_{cell} ως τη μέση τιμή των c_{in} και c_{out} .

$$c_{\text{cell}_i}(t) = c_{\text{av}_i}(t) = \frac{c_{\text{in}_i}(t) + c_{\text{out}_i}(t)}{2} \quad \left[\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right] \quad (3.12)$$

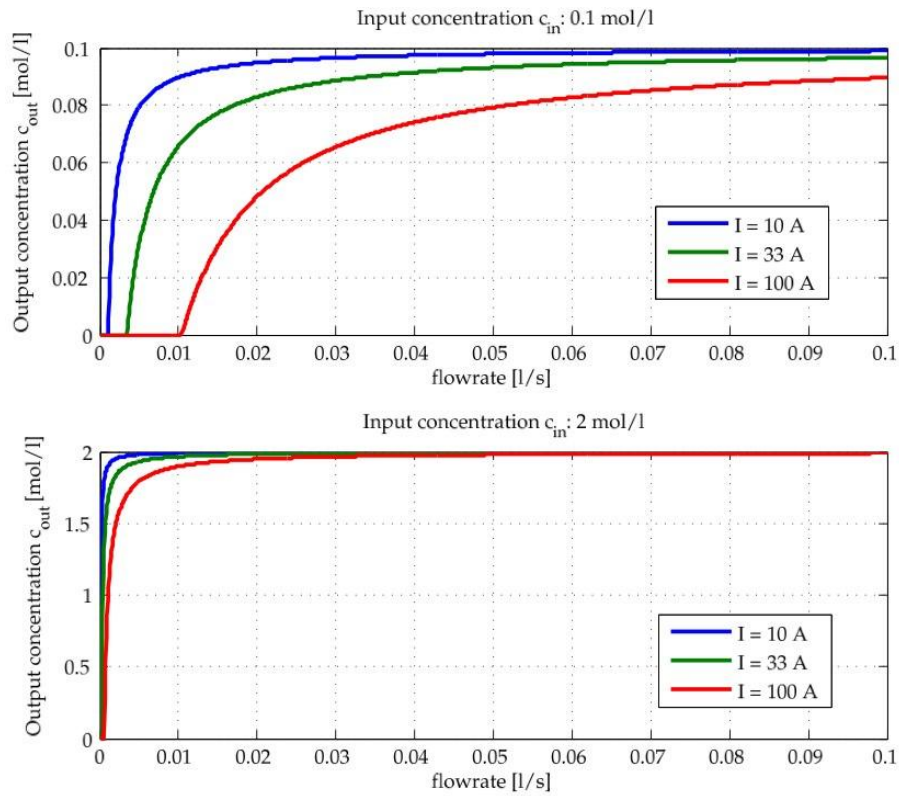
Εξάρτηση της συγκέντρωσης στο κελί από τις συνθήκες λειτουργίας

Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η συγκέντρωση εξόδου από το κελί c_{out} για διάφορες συνθήκες λειτουργία [22]:

- Χαμηλή και υψηλή συγκέντρωση εισόδου στο κελί c_{in} (0.1 και 2 mol αντίστοιχα)
- 3 τιμές ρεύματος i (10, 33, 100 A)
- παροχή από 0 μέχρι 0.1 l/s

Παρατηρείται ότι όταν η c_{in} είναι χαμηλή, τότε η c_{out} επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την παροχή. Σαν αποτέλεσμα, επηρεάζεται και η c_{cell} επιδρώντας έτσι στην τάση του κελιού V_{cell} .

Για μεγάλη τιμή της c_{in} η μεταβολή της παροχής ηλεκτρολυτών, μετά από κάποια τιμή, δεν έχει σχεδόν καμία επίδραση στην c_{out} . Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι για κάθε τιμή ρεύματος, υπάρχει μια βέλτιστη τιμή παροχής, η οποία εξαρτάται και από τις συγκεντρώσεις των ηλεκτρολυτών. Εφόσον η c_{cell} είναι μία από τις παραμέτρους που καθορίζουν την τάση του κελιού, μια καλή τιμή στη συγκέντρωσή αυτή συντελεί στην καλύτερη απόδοση της μπαταρίας.



Σχήμα 3. 9 Συγκέντρωση εξόδου από το κελί για διάφορες συνθήκες λειτουργίας

3.3.6 Συγκέντρωση Πρωτονίων στον Ηλεκτρολύτη

Άλλη μια άγνωστη τιμή συγκέντρωσης που απαιτείται για την επίλυση της εξίσωσης Nernst είναι η συγκέντρωση των πρωτονίων H^+ στον ηλεκτρολύτη. Στην παράγραφο 3.3.1 έχει εξηγηθεί η παραγωγή και η κατανάλωση πρωτονίων, καθώς επίσης και το πως μεταβάλλεται η ποσότητά τους κατά τη διάρκεια της αντίδρασης της οξειδοαναγωγής. Για παράδειγμα, η ποσότητα των H^+ αυξάνεται κατά 1 M όταν 1 M βαναδίου V^{4+} οξειδώνεται.

Υπάρχει λοιπόν μια άμεση σχέση μεταξύ των H^+ και των V^{4+} , τιμές από τις οποίες προκύπτει η συγκέντρωση των πρωτονίων στον ηλεκτρολύτη $c_{H^+,catholyte}$. Όταν η μπαταρία είναι πλήρως αφορτιστη η ποσότητα των H^+ καθορίζεται από την ποσότητα του θεικού οξέως στον ηλεκτρολύτη. Έτσι η συγκέντρωση των H^+ στον ηλεκτρολύτη σε κατάσταση πλήρους εκφόρτισης $c_{H^+,discharged,catholyte}$ είναι γνωστή. Προκύπτει λοιπόν η παρακάτω σχέση για την εύρεση της συγκέντρωσης των H^+ για κάθε κατάσταση φόρτισης:

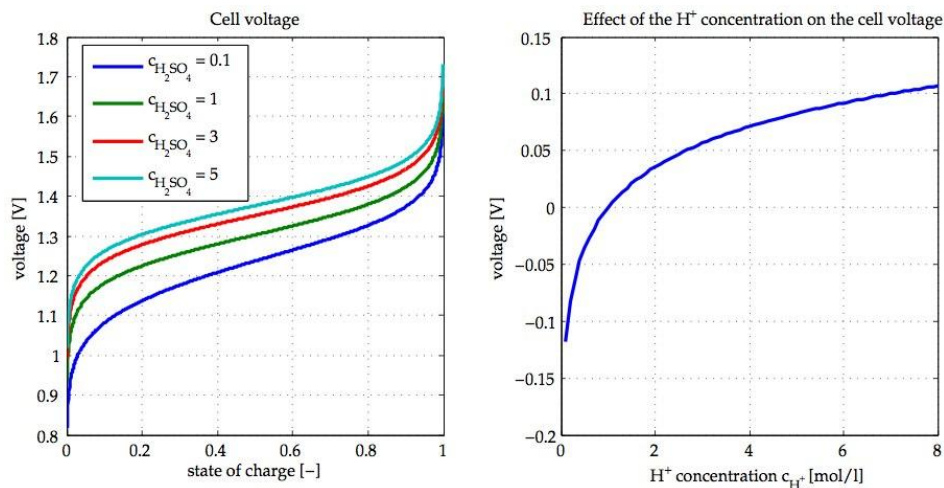
$$c_{H^+,catholyte} = c_{H^+,discharged,catholyte} + c_{VO^{2+}} \quad [M] \quad (3.13)$$

Υπάρχουν δύο κύριες πηγές H^+ στην VRB, το θεικό οξύ H_2SO_4 και το νερό που διασπάται κατά την οξείδωση των ιόντων V^{4+} . Ο μόνος τρόπος για να επηρεάσουμε την ποσότητα των H^+ στον ηλεκτρολύτη είναι να μεταβάλλοντας την ποσότητα του θεικού οξέως, αφού η ποσότητα των H^+ που προέρχεται από τη διάσπαση του νερού, εξαρτάται από το SoC της μπαταρίας.

Η συγκέντρωση των H^+ επηρεάζει αρκετά την τάση της κυψέλης, κάτι που φαίνεται στο σχήμα 3.8 (πρώτο διάγραμμα). Αύξηση της συγκέντρωσης των H^+ συνεπάγεται και αύξηση της απόδοσης κατά την εκφόρτισης της VRB, λόγω της αυξημένης διαθέσιμης ισχύος για το

ίδιο SoC της μπαταρίας. Αυτή η αύξηση, ωστόσο, μετριάζεται λίγο από την υψηλότερη ισχύ που απαιτείται κατά τη φόρτιση της VRB.

Στο δεύτερο διάγραμμα του σχήματος 3.8 απεικονίζεται η συνεισφορά της $c_{H^+,catholyte}$ στην τάση της κυψέλης. Η συνεισφορά αυτή εξάγεται από την εξίσωση του Nernst και αυξάνεται λογαριθμικά με την $c_{H^+,catholyte}$.



Σχήμα 3. 10 Αριστερά: τάση κελιού για 4 διαφορετικές τιμές της συγκέντρωσης H_2SO_4 . Δεξιά: τάση κελιού συναρτήσει της συγκέντρωσης H^+ , από την εξίσωση Nernst

3.3.7 Εσωτερικές Απώλειες

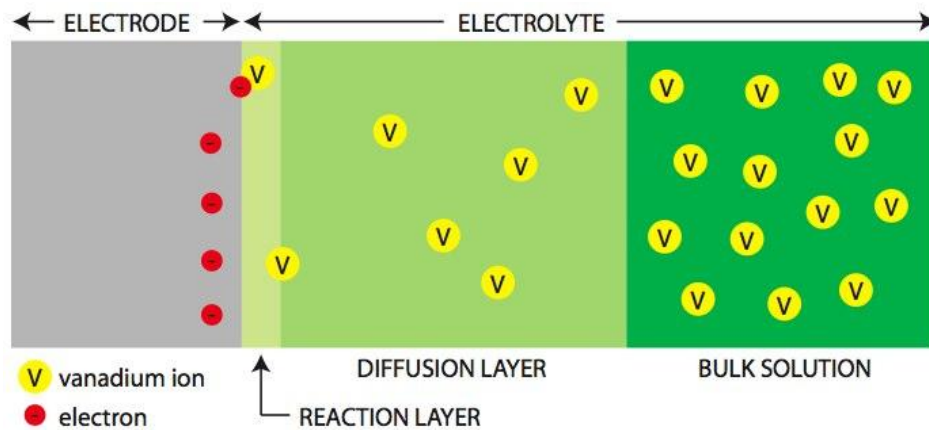
Όταν η μπαταρία διαρρέεται από ρεύμα, βρίσκεται δηλαδή σε λειτουργία, οι συνθήκες ισορροπίας δεν ισχύουν πλέον και η τάση του κελιού διαφέρει από την τάση που δίνει η εξίσωση Nernst. Η διαφορά αυτή αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται για να διατηρηθεί ο απαιτούμενος ρυθμός της αντίδρασης οξειδοαναγωγής και καλείται overpotential [22, 23]

Τα overpotentials είναι ηλεκτρικά φαινόμενα που μπορεί να επηρεάσουν είτε κάποιο από τα ηλεκτρόδια είτε και τα δύο. Ουσιαστικά υπάρχουν διάφοροι τύποι overpotentials :

- **overpotential δραστηριοποίησης:** Σχετίζεται με την ενέργεια που απαιτείται για να ξεκινήσει η μεταφορά φορτίου και είναι απαραίτητο για να διατηρηθεί ο ρυθμός των αντιδράσεων. Το δυναμικό αυτό απαιτείται για να ξεπεραστεί η ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης και εξαρτάται από το ρυθμό των αντιδράσεων. Μία αργή αντίδραση απαιτεί πολύ μεγαλύτερο overpotential από μια γρήγορη αντίδραση
- **overpotential συγκέντρωσης:** Προκαλείται από τη διαφορά στη συγκέντρωση των ιόντων στον κύριο όγκο του διαλύματος και στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Εμφανίζεται όταν τα αντιδρώντα στοιχεία δεν φτάνουν στα ηλεκτρόδια αρκετά γρήγορα.

Ουσιαστικά, σε μία κυψέλη η μεταφορά ηλεκτρονίων μεταξύ των αντιδρώντων στοιχείων και των ηλεκτροδίων συμβαίνει μόνο σε μία πολύ στενή ζώνη (μικρότερο του 1 nm σε πάχος) του διαλύματος που πρόσκειται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου (σχήμα 3.8).

Το overpotential συγκέντρωσης οφείλεται στον πεπερασμένο ρυθμό μεταφοράς μάζας από τον ηλεκτρολύτη στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Προκειμένου να διατηρηθεί σταθερό το ρεύμα, πρέπει να αναπληρώνονται τα αντιδρώντα στοιχεία στη ζώνη αντίδρασης, από τον κύριο όγκο του ηλεκτρολύτη. Το overpotential συγκέντρωσης συμβαίνει, λοιπόν, όταν ο ρυθμός των αντιδράσεων είναι τόσο γρήγορος που τα αντιδρώντα στοιχεία δεν προλαβαίνουν να φτάσουν στα ηλεκτρόδια έγκαιρα.



Σχήμα 3. 11 Αλλαγές στη συγκέντρωση των ηλεκτρολυτών και διάφορα στρώματα που δημιουργούνται στην κυψέλη

Επιπλέον, οι αντιστάσεις των υλικών που εμποδίζουν τη ροή των ηλεκτρικών φορτίων, επηρεάζουν την τάση του κελιού. Σχετίζονται με την κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων και μπορούν να παραλληλιστούν με την τριβή στη μηχανική. Η ηλεκτρική αντίσταση αποτελεί μέτρο της ικανότητας ενός στοιχείου να εμποδίζει τη ροή των φορτίων (ηλεκτρονίων ή ιόντων). Οι ωμικές απώλειες συμβαίνουν στα ηλεκτρόδια, τα διπολικά ηλεκτρόδια και τα καλώδια, ενώ οι ιοντικές απώλειες συμβαίνουν μέσα στον ηλεκτρολύτη και τη μεμβράνη. Οι ωμικές και ιοντικές απώλειες καλούνται συνήθως IR πτώσεις.

Η ωμική αντίσταση R_{ohm} είναι το άθροισμα των ηλεκτρικών αντιστάσεων των ηλεκτροδίων $R_{electrodes}$, των διπολικών ηλεκτροδίων $R_{bipolar}$ και των πλακών συλλογής $R_{collector}$. Οι ολικές εσωτερικές ωμικές απώλειες είναι :

$$n_{ohm} = (R_{electrodes} + R_{bipolar} + R_{collector}) \cdot I = R_{ohm} \cdot I \quad (3.14)$$

Ο ηλεκτρολύτης και μεμβράνη παρουσιάζουν επίσης αντίσταση στη ροή των ιόντων προκαλώντας έτσι το ιοντικό overpotential n_{ionic} . Η αντίσταση των ηλεκτρολυτών $R_{electrolyte}$ ποικίλει ανάλογα με τη σύνθεση και τη συγκέντρωσή τους. Η αντίσταση της μεμβράνης συμβολίζεται $R_{membrane}$. Το ιοντικό overpotential θα είναι :

$$n_{ionic} = (R_{electrolyte} + R_{membrane}) \cdot I = R_{ionic} \cdot I \quad (3.15)$$

Έτσι τελικά :

$$R_{tot} = R_{ohm} + R_{ionic} \quad (3.16)$$

Κοινό στοιχείο όλων των παραπάνω φαινομένων είναι ότι ενισχύονται με το ρεύμα. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης μειώνουν τη διαθέσιμη τάση και συνεπώς και τη διαθέσιμη ισχύ. Ακόμη, κατά τη διάρκεια της φόρτισης πρέπει να ισοσταθμίζονται, δηλαδή πρέπει να εφαρμόζεται ένα επιπλέον ποσό τάσης για να διατηρείται ο ρυθμός των αντιδράσεων. Η σωστή επιλογή των υλικών κατασκευής ωστόσο μπορεί να μειώσει αρκετά τις εσωτερικές αυτές απώλειες.

Η τάση ισορροπίας που υπολογίζεται από την εξίσωση Nernst αντιστοιχεί στην τάση ανοιχτοκύκλωσης. Ωστόσο όταν ρέει ρεύμα από την μπαταρία οι συνθήκες ισορροπίας παύουν να ισχύουν και εμφανίζεται πτώση τάσης στα άκρα της μπαταρίας, οφειλόμενη στα φαινόμενα που περιγράφηκαν παραπάνω.

Προκύπτει τελικά ότι η τάση του κελιού της μπαταρίας U_{stack} θα ισούται με τη διαφορά μεταξύ της E_{stack} που προκύπτει από την εξίσωση Nernst και του αθροίσματος των overpotentials.

$$U_{stack}(t) = N_{cell} \cdot (E_{stack}(t) - \sum n_i(t)) \quad (3.17)$$

Δυστυχώς οι τιμές των overpotentials είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστούν και εξαρτώνται από τη σύνθεση των ηλεκτρολυτών, τη γεωμετρία του κελιού, το υλικό και τις συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, σπάνια βρίσκονται στη βιβλιογραφία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Έτσι η εξίσωση (3.14) δεν μπορεί να εφαρμοστεί πρακτικά.

Στην πραγματικότητα, σε μια μπαταρία τα overpotentials εξαρτώνται κυρίως από το ρεύμα i , τη θερμοκρασία T και τη ροή των ηλεκτρολυτών Q . Το συνολικό overpotential, που αντιστοιχεί στις συνολικές εσωτερικές απώλειες U_{loss} , προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ της τάσης ισορροπίας E και της πραγματικής τάσης του κελιού U_{cell} .

$$U_{loss}(t) = |E(t) - U_{cell}(t)| \quad (3.18)$$

Θεωρώντας τη θερμοκρασία και τη ροή των ηλεκτρολυτών σταθερές, οι εσωτερικές απώλειες μπορούν να περιγραφούν από μια ισοδύναμη αντίσταση R_{eq} και ένα ισοδύναμο overpotential n_{eq} , τα οποία υπολογίζονται πειραματικά.

$$U_{loss}(t) = R_{eq,charge/discharge} \cdot |i(t)| + n_{eq,charge/discharge} \quad (3.19)$$

όπου :

$R_{eq,charge}$ = ισοδύναμη αντίσταση φόρτισης

$R_{eq,discharge}$ = ισοδύναμη αντίσταση εκφόρτισης

$n_{eq,charge}$ = ισοδύναμη overpotential φόρτισης

$n_{eq,discharge}$ = ισοδύναμη overpotential εκφόρτισης

Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, η τάση του κελιού ισούται με την τάση ισορροπίας μείον την πτώση τάσης λόγω των εσωτερικών απωλειών.

$$U_{cell,discharge} = E - U_{loss,discharge} \quad (3.20)$$

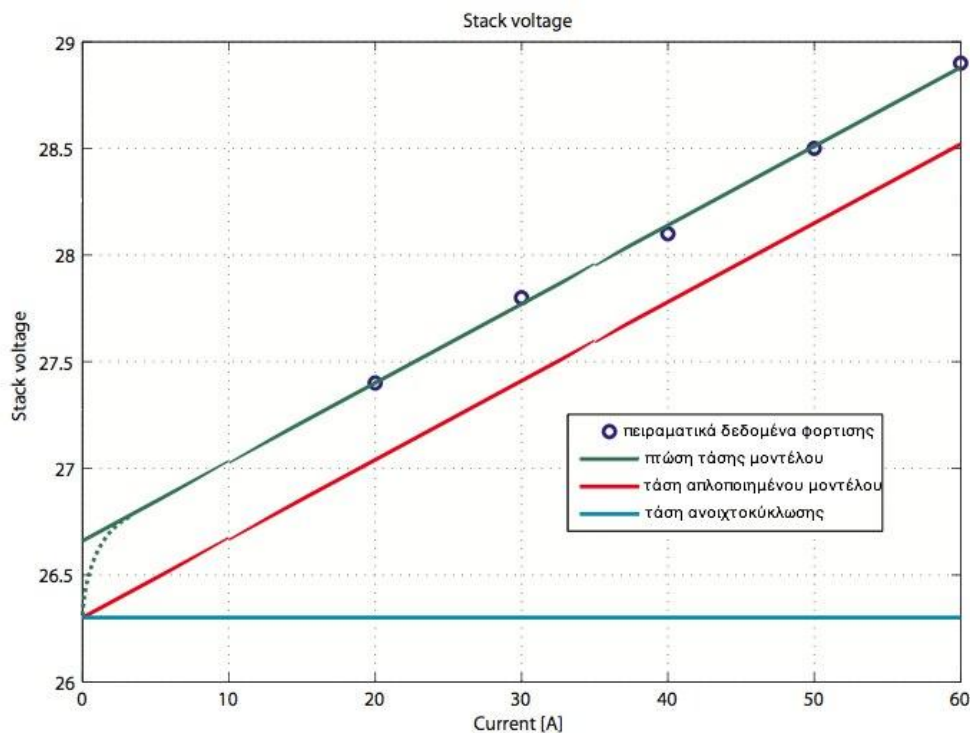
Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, όμως πτώση τάσης λόγω των εσωτερικών απωλειών προστίθεται στην τάση ισορροπίας.

$$U_{cell,charge} = E + U_{loss,charge} \quad (3.21)$$

Η εξίσωση (3.16) περιγράφει με μεγάλη ακρίβεια την τάση του κελιού όταν το ρεύμα είναι πάνω από κάποια συγκεκριμένη τιμή, ωστόσο έχουμε σφάλμα όταν δεν υπάρχει ρεύμα, αφού κανονικά στην περίπτωση αυτή η πτώση τάσης U_{loss} έπρεπε να είναι μηδενική. Το σφάλμα αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6 . Προτείνεται και ένα απλούστερο μοντέλο που δε λαμβάνει υπόψιν το ισοδύναμο overpotential $n_{eq,charge/discharge}$, η τιμή του οποίου είναι πολύ μικρή και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Έτσι η πτώση τάσης λόγω εσωτερικών απωλειών θα είναι :

$$U_{loss}(t) = R_{eq,charge/discharge} \cdot |i(t)| \quad (3.22)$$



Σχήμα 3. 12 Σύγκριση του αρχικού μοντέλου εσωτερικών απωλειών με το απλοποιημένο μοντέλο και με πειραματικά δεδομένα από τη δημοσίευση (76). Με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η αναμενόμενη συμπεριφορά της μπαταρίας

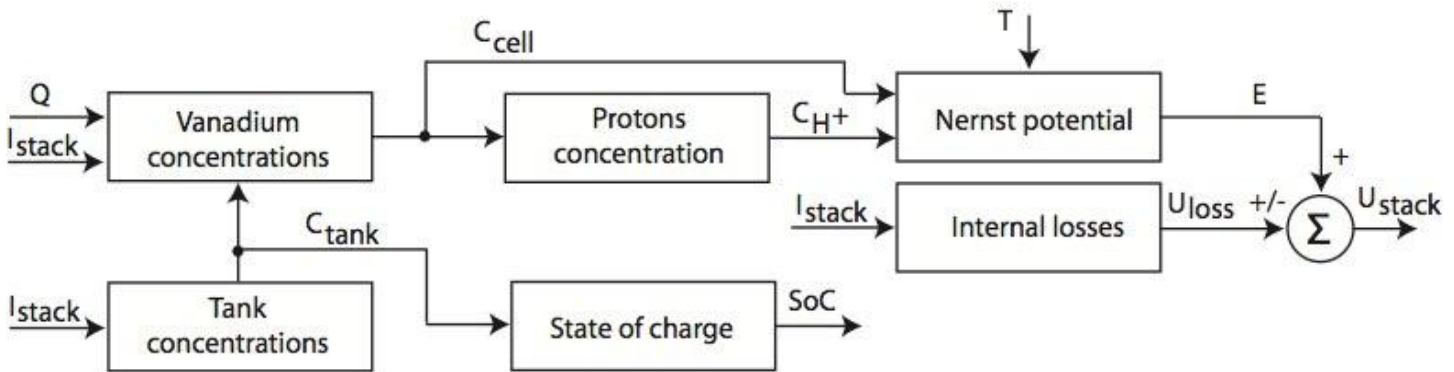
Το παραπάνω μοντέλο εσωτερικών απωλειών είναι μία γραμμική συνάρτηση που περιγράφει με μεγάλη ακρίβεια τη συμπεριφορά της μπαταρίας όταν αυτή διαρρέεται από ρεύμα μιας ορισμένης τιμής και πάνω. Ένα προφανές ωστόσο σφάλμα του μοντέλου αυτού παρατηρείται όταν η μπαταρία δε διαρρέεται από ρεύμα και κανονικά οι εσωτερικές απώλειες θα έπρεπε να είναι 0.

3.3.8 Ηλεκτροχημικό μοντέλο της μπαταρίας

Όλες οι σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία της VRB και περιγράφηκαν παραπάνω μπορούν να συνοψιστούν σε ένα απλοποιημένο ηλεκτροχημικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε επιμέρους δομικές μονάδες (σχήμα 3.13) και υπολογίζει την τάση του κελιού της VRB U_{stack} και το επίπεδο φόρτισης SoC συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας.

Το μοντέλο αρχικά υπολογίζει το SoC από τις τιμές των συγκεντρώσεων των ιόντων, που εξαρτώνται από την τιμή του ρεύματος, μετά υπολογίζει το δυναμικό ισορροπίας E , καθώς επίσης και τα overpotentials n_{act} , n_{conc} , n_{ionic} και n_{ohm} . Αυτές οι τιμές πολλαπλασιάζονται με τον αριθμό των κελιών έτσι ώστε να λάβουμε την τάση ισορροπίας και τα overpotentials της συστοιχίας. Έτσι υπολογίζονται οι εσωτερικές απώλειες και τελικά, η τάση της συστοιχίας U_{stack} δίνεται από τον τύπο:

$$U_{stack} = N_{cell}(E - \sum n_i) \quad [V] \quad (3.23)$$



Σχήμα 3. 13 Διάγραμμα ροής του μοντέλου της συστοιχίας

Στον πίνακα 3.2 δίνονται οι εξαρτήσεις των διαφόρων μεταβλητών του μοντέλου, από τις συνθήκες λειτουργίας. Το σύμβολο ‘•’ δηλώνει άμεση εξάρτηση της μεταβλητής από την εκάστοτε μεταβλητή λειτουργίας, ενώ το ‘ο’ δηλώνει έμμεση εξάρτηση, δηλαδή η μεταβλητή υπολογίζεται μέσω μιας άλλης μεταβλητής, η οποία άμεσα ή έμμεσα, εξαρτάται από την αντίστοιχη μεταβλητή λειτουργίας.

Variable	f(?)	I_{stack}	T	Q
c_{tank}		●		
c_{cell}	c_{tank}	●		●
c_{H^+}	$c_{vanadium}$	○		○
SoC	c_{tank}	○		
E	c_{cell} and c_{H^+}	○	●	○
U_{loss}		●		
U_{stack}	E and U_{loss}	○	○	○

Πίνακας 3. 2 Εξάρτηση των μεταβλητών από τις συνθήκες λειτουργίας. Το ‘●’ δηλώνει άμεση εξάρτηση, ενώ το ‘○’ δηλώνει έμμεση εξάρτηση

3.4 Χρόνος απόκρισης της μπαταρίας

Ο χρόνος απόκρισης ενός συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (ESS) αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά και καθορίζει το απαραίτητο χρονικό διάστημα ώστε να καταφέρει το σύστημα να ανταποκριθεί σε μια μεταβολή. Ο χρόνος απόκρισης καθορίζει ουσιαστικά τις πιθανές εφαρμογές που μπορεί να έχει ένα ESS. Ακόμη ο χρόνος απόκρισης αποτελεί σημαντική μεταβλητή για τον καθορισμό της στρατηγικής ελέγχου του ESS.

Στην περίπτωση της VRB η μετάβαση από μηδενική έξοδο στην ονομαστική ισχύ της μπαταρίας γίνεται σχεδόν ακαριαία, αφού ο χρόνος είναι κάτω από 0.5 ms [28]. Αυτός ο χρόνος είναι δύο τάξης μεγέθους πιο γρήγορος από το χρόνο απόκρισης του συστήματος μετατροπής της ισχύος που χρειάζεται 10 – 30 ms.

Ουσιαστικά ο χρόνος απόκρισης της μπαταρίας ισούται με το χρόνο που απαιτείται ώστε η παροχή των ιόντων να λάβει την απαραίτητη τιμή. Ο χρόνος της ίδιας της αντίδρασης είναι πάρα πολύ μικρός και δεν επηρεάζει καθόλου το χρόνο απόκρισης της VRB.

3.5 Πυκνότητα Ενέργειας της VRB

Η θεωρητική τιμή της χωρητικότητας μιας μπαταρίας εκφράζεται ως η συνολική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Η τιμή αυτή μετράται σε Coulomb ή συνήθως σε αμπερώρες (Ah). Στην περίπτωση της VRB το διαθέσιμο φορτίο Q_c εξαρτάται από τη συνολική συγκέντρωση ιόντων βαναδίου στον ηλεκτρολύτη, καθώς επίσης και από το μέγεθος της δεξαμενής (V_{tank}):

$$Q_c = c_{vanadium_{total}} \cdot V_{tank} \cdot N_A \cdot e \quad [C] \quad (3.24)$$

Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον ηλεκτρολύτη βρίσκεται από το γινόμενο του διαθέσιμου φορτίου Q_c και την τάση της κυψέλης (U_{cell}). Επειδή η τιμή της τάσης δεν είναι σταθερή, χρησιμοποιούμε αντ’ αυτής τη μέση τιμή της $U_{cell,average}=1.35V$. Ακόμη ο όγκος του

ηλεκτρολύτη διαιρείται με το 2 διότι και οι δύο ηλεκτρολύτες (θετικός – αρνητικός) συμμετέχουν ταυτόχρονα στην αντίδραση [22]. Προκύπτει λοιπόν η ενέργεια του ηλεκτρολύτη:

$$E_{electrolyte} = \frac{1}{2} \frac{U_{cell,av} Q_c}{3600} \quad [Wh] \quad (3.25)$$

Η πυκνότητα ενέργειας ισούται με το λόγο της αποθηκευμένης ενέργειας προς τον όγκο ή τη μάζα του συστήματος:

$$U_{electrolyte} = \frac{E_{electrolyte}}{V_{tank}} \quad \left[\frac{Wh}{l}\right] \quad (3.26)$$

Στην πράξη η πυκνότητα ενέργειας του συστήματος $U_{VRB,system}$ θα είναι λίγο μικρότερη από την πυκνότητα ενέργειας του ηλεκτρολύτη $U_{electrolyte}$ για το λόγο ότι στον όγκο του συστήματος θα πρέπει να συνυπολογίσουμε και τον όγκο των αντλιών, των σωλήνων, της κυψέλης και των ηλεκτρονικών ισχύος. Αντίστοιχα για τη μάζα του συστήματος. Ακόμη η μπαταρία δεν μπορεί να εκφορτιστεί εντελώς, άρα δεν χρησιμοποιείται όλη της η αποθηκευμένη ενέργεια, κάτι ου μειώνει κι άλλο την πυκνότητα ενέργειάς της.

Έτσι ένα τυπικό σύστημα VRB έχει τιμή πυκνότητας ενέργειας που κυμαίνεται στο εύρος 15 – 25 Wh/l [29]

3.6 Βαθμός Απόδοσης της VRB

Ο βαθμός απόδοσης αποτελεί ένα πολύ καλό κριτήριο της επίδοσης ενός συστήματος. Εξ' ορισμού ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται από το λόγο της ενέργειας εξόδου E_{output} του συστήματος, προς την ενέργεια εισόδου σε αυτό E_{input} .

$$n = \frac{E_{output}}{E_{input}} \quad (3.27)$$

Μπορούν να ορισθούν 3 τύπου βαθμού απόδοσης :

- Βαθμός Απόδοσης Ενέργειας
- Βαθμός Απόδοσης Φορτίου
- Βαθμός Απόδοσης Τάσης

3.6.1 Βαθμός Απόδοσης Ενέργειας

Ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού ποσού ενέργειας που παρέχεται από τη μπαταρία κατά την εκφόρτιση, προς το συνολικό ποσό ενέργειας ου προσκομίζει η μπαταρία κατά τη φόρτιση:

$$n_{energy} = \frac{\int P_{discharge}(t) dt}{\int |P_{charge}(t)| dt} \quad (3.28)$$

3.6.2 Βαθμός Απόδοσης Φορτίου

Ορίζεται ως ο λόγος του φορτίου που παρέχεται από το σύστημα κατά την εκφόρτιση, προς το φορτίο που προσδίδεται στο σύστημα κατά τη φόρτιση:

$$n_{coulombic} = \frac{Q_{discharge}}{Q_{charge}} = \frac{\int i_{discharge}(t)dt}{\int |i_{charge}(t)|dt} \quad (3.29)$$

3.6.3 Βαθμός Απόδοσης Τάσης

Ορίζεται για ένα κύκλο φόρτισης – εκφόρτισης με σταθερό ρεύμα και αποτελεί ένα μέτρο των ωμικών απωλειών κατά τη διάρκεια του κύκλου. Η τιμή του μπορεί να μεγιστοποιηθεί μειώνοντας τις αντιστάσεις των ηλεκτροδίων, του ηλεκτρολύτη, της μεμβράνης και των καλωδίων ή χρησιμοποιώντας ειδικά ηλεκτρόδια από υλικό που δρα καταλυτικά στην αντίδραση.

Εφόσον εξ' ορισμού το ρεύμα διατηρείται σταθερό, ο βαθμός απόδοσης εκφράζεται και ως ο λόγος του βαθμού απόδοσης ενέργειας προς το βαθμό απόδοσης φορτίου:

$$n_{voltage} = \frac{\int U_{discharge}(t)dt}{\int |U_{charge}(t)|dt} = \frac{n_{energy}}{n_{coulombic}} \quad (3.30)$$

3.6.4 Βαθμός Απόδοσης Φόρτισης και Βαθμός Απόδοσης Εκφόρτισης

Οι βαθμοί απόδοσης που περιγράφηκαν προηγουμένως, έχουν φυσική έννοια μόνο όταν η μπαταρία ξεκινάει τη λειτουργία της από μια συγκεκριμένη τιμή του SoC και μετά καταλήξει και πάλι στην αρχική τιμή, αφού έχει κάνει ένα κύκλο φόρτισης – εκφόρτισης (ή εκφόρτισης – φόρτισης). Ορίζουμε λοιπόν δύο νέους βαθμούς απόδοσης:

➤ **Το Βαθμό Απόδοσης Φόρτισης (n_{charge}):**

Ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που αποθηκεύεται τελικά στον ηλεκτρολύτη της μπαταρίας E_{stored} , προς την ενέργεια που αποδόθηκε αρχικά στην μπαταρία E_{VRB} . Η E_{stored} αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ της E_{VRB} και της ενέργειας που χάθηκε σε απώλειες E_{loss} .

$$n_{charge} = \frac{\int |P_{VRB}(t)|dt - \int |P_{loss}(t)|dt}{\int |P_{VRB}(t)|dt} \quad (3.31)$$

➤ **Το Βαθμό Απόδοσης Εκφόρτισης (n_{charge}):**

Ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας προς την ενέργεια που αποδίδεται από την μπαταρία στο σύστημα E_{VRB} , προς την ενέργεια που αποσπάστηκε από τον ηλεκτρολύτη της μπαταρίας $E_{extracted}$. Η $E_{extracted}$ αντιστοιχεί στα άθροισμα της E_{VRB} και της ενέργειας που χάθηκε σε απώλειες E_{loss} .

$$n_{discharge} = \frac{\int |P_{VRB}(t)| dt}{\int |P_{VRB}(t)| dt + \int |P_{loss}(t)| dt} \quad (3.32)$$

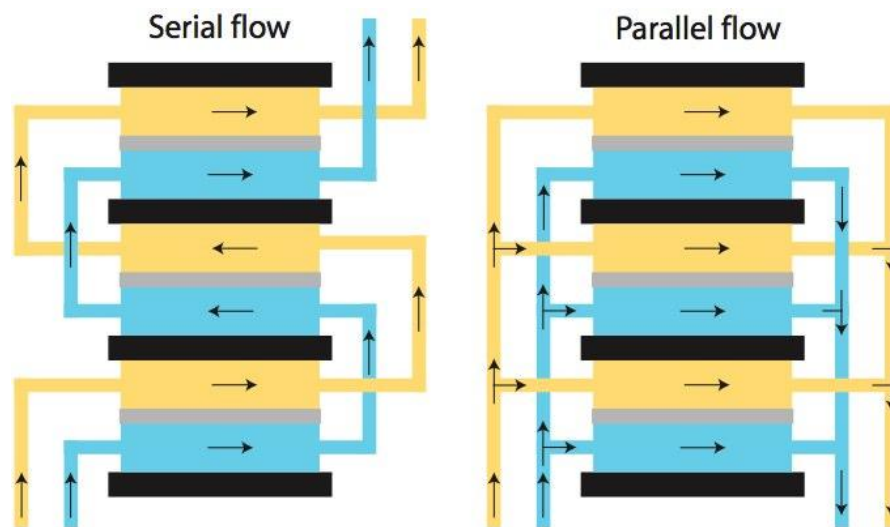
3.7 Μηχανικό Μοντέλο της VRB

Η μηχανική ενέργεια που απαιτείται για την κίνηση των ηλεκτρολυτών στο υδραυλικό κύκλωμα της μπαταρίας αποτελεί στην ουσία απώλειες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης της μπαταρίας. Προκειμένου να καθοριστεί η επίδοση της μπαταρίας, είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθεί η λειτουργία της αντλίας, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός των μηχανικών απωλειών για κάθε συνθήκη λειτουργίας. [23, 24]

3.7.1 Κατασκευή της συστοιχίας κελιών

Υπάρχουν δύο τρόποι κατασκευής της συστοιχίας (σχήμα 3.14):

- ο ένας με τα κελιά να συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους, δηλαδή η ροή των ηλεκτρολυτών να διαμοιράζεται μεταξύ των κελιών
- ο άλλος με τα κελιά συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους, δηλαδή οι ηλεκτρολύτες να περνάνε από το ένα κελί στο άλλο.



Σχήμα 3. 14 Σχηματική αναπαράσταση των δύο διαφορετικών συνδεσμολογιών. Αριστερά: Συνδεσμολογία σε Σειρά, Δεξιά: Παράλληλη Συνδεσμολογία

Το βασικό πλεονέκτημα της συνδεσμολογίας σε σειρά είναι ότι περιορίζεται το ρεύμα διαρροής I_{leak} που ρέει στον ηλεκτρολύτη. Ουσιαστικά το I_{leak} μπορεί να διαρρεύσει μόνο δύο γειτονικά κελιά, ενώ στην παράλληλη συνδεσμολογία το ρεύμα αυτό μπορεί να διαρρεύσει όλα τα κελιά.

Ωστόσο στη συνδεσμολογία σε σειρά απαιτείται μεγαλύτερο ποσό ισχύος για τη ροή των ηλεκτρολυτών, επειδή κάθε κελί πρέπει να συντηρήσει ολόκληρη τη ροή, ενώ στην παράλληλη συνδεσμολογία η ροή διαμοιράζεται. Ακόμη στη συνδεσμολογία σε σειρά, η

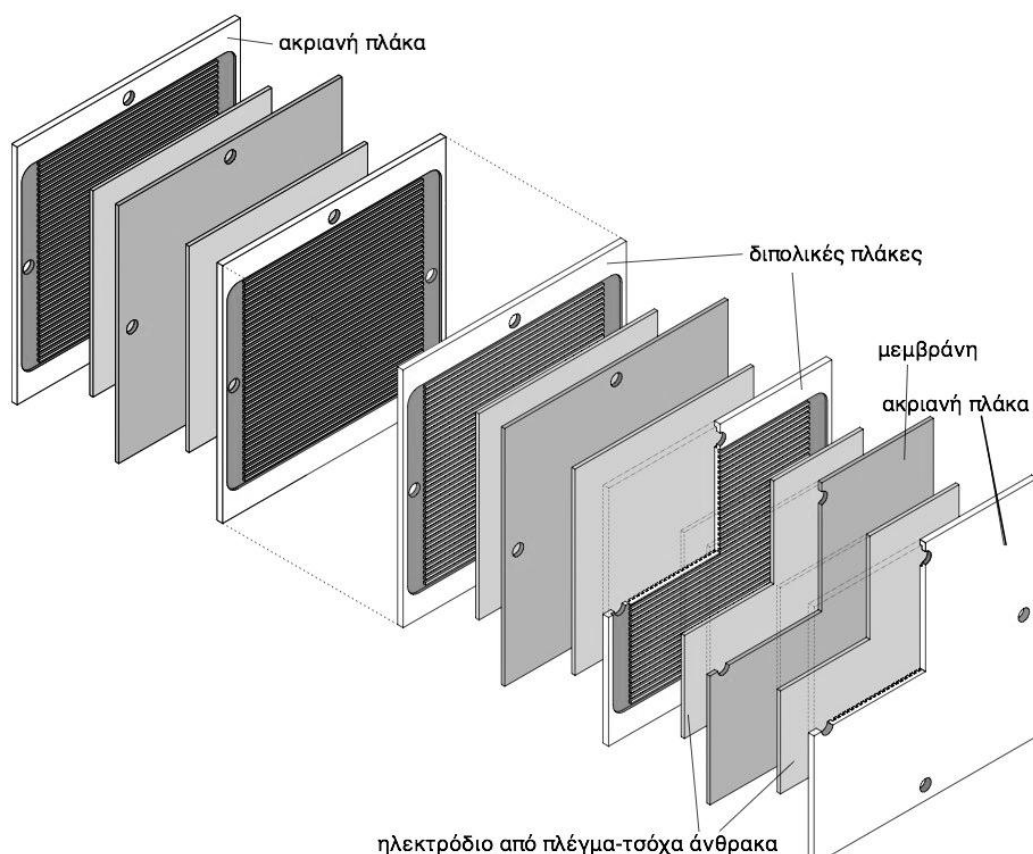
συγκέντρωση εισόδου μεταβάλλεται από κελί σε κελί, αφού κατά την κίνηση των ηλεκτρολυτών, τα αντιδρώντα στοιχεία καταναλώνονται. Έτσι κάθε κελί έχει τη δική του c_{cell} , ενώ η c_{out} του ενός ισούται ε τη c_{in} του αμέσως επόμενου. Έτσι η τάση U_{cell} δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στο εσωτερικό της συστοιχίας, κάτι που μπορεί να επιφέρει υποβάθμιση των συνθηκών λειτουργίας.

Η συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των VRB είναι η παράλληλη.

Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζεται μία συστοιχία κελιών χωρισμένη στα στοιχεία από τα οποία αποτελείται. Ένα κελί αποτελείται από τα εξής:

- Διπολική πλάκα
- Πορώδες ηλεκτρόδιο από υφασμάτινο πλέγμα-τσόχα άνθρακα (carbon felt)
- Μembrάνη
- Πορώδες ηλεκτρόδιο από υφασμάτινο πλέγμα-τσόχα άνθρακα (carbon felt)
- Διπολική πλάκα

Τα κελιά στοιβάζονται έτσι ώστε να σχηματιστεί η συστοιχία. Δύο γειτονικά κελιά μοιράζονται την ίδια διπολική πλάκα, ή οποία αποτελεί ηλεκτρικό αγωγό. Η κίνηση των ηλεκτρολυτών μεταξύ των κελιών επιτυγχάνεται με κανάλια που έχουν ανοιχτεί στις διπολικές πλάκες.



Σχήμα 3. 15 Παρουσίαση των επιμέρους εξαρτημάτων που συνθέτουν μια συστοιχία της VRB. Με μπλε φαίνονται οι επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη της ανόδου, ενώ με πορτοκαλί αυτές που έρχονται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη της καθόδου.

3.7.2 Ισχύς της αντλίας

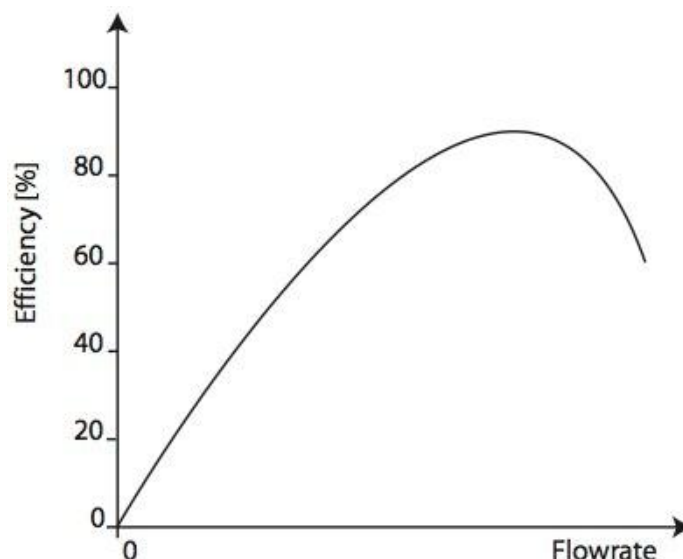
Η αντλία είναι απαραίτητη για τη λειτουργία της VRB καθώς παρέχει στους ηλεκτρολύτες την απαιτούμενη ενέργεια, ώστε να ρέουν μέσα σε όλο το υδραυλικό σύστημα της μπαταρίας. Η ισχύς που απορροφάται από την αντλία αποτελεί σημαντική μεταβλητή του συστήματος, γιατί καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το βαθμό απόδοσης της μπαταρίας.

Η ισχύς της αντλίας P_{pump} εξαρτάται από το βαθμό απόδοσης της αντλίας η_{pump} , το ύψος αναρρόφησης της αντλίας h_p , την πυκνότητα του υγρού γ και την παροχή Q . Ακόμη μπορούμε να τη συσχετίσουμε με την πτώση της πίεσης Δp κατά μήκος του υδραυλικού κυκλώματος.

$$P_{\text{pump}} = \eta_{\text{pump}} \cdot \gamma \cdot h_p \cdot Q = \eta_{\text{pump}} \cdot \Delta p \cdot Q \quad [W] \quad (3.33)$$

Ο βαθμός απόδοσης μιας αντλίας είναι συνήθως 80 – 90 %. Ωστόσο ο βαθμός απόδοσης δεν έχει σταθερή τιμή (αν και συνήθως τον χρησιμοποιούμε ως σταθερό), αλλά εξαρτάται από την παροχή και μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από την τιμή της ονομαστικής παροχής της αντλίας, όπως στο σχήμα 3.16 [22]. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας η_{pump} επηρεάζεται από τις εξής απώλειες: τις υδραυλικές απώλειες στην αντλία, τις μηχανικές απώλειες στα ρουλεμάν και τα σφραγίσματα της αντλίας και τις ογκομετρικές απώλειες, λόγω διαρροών μέσα στην αντλία. Έτσι η ισχύς που απαιτείται από την αντλία P_{mech} είναι:

$$P_{\text{mech}} = \frac{P_{\text{pump}}}{\eta_{\text{pump}}} \quad [W] \quad (3.34)$$

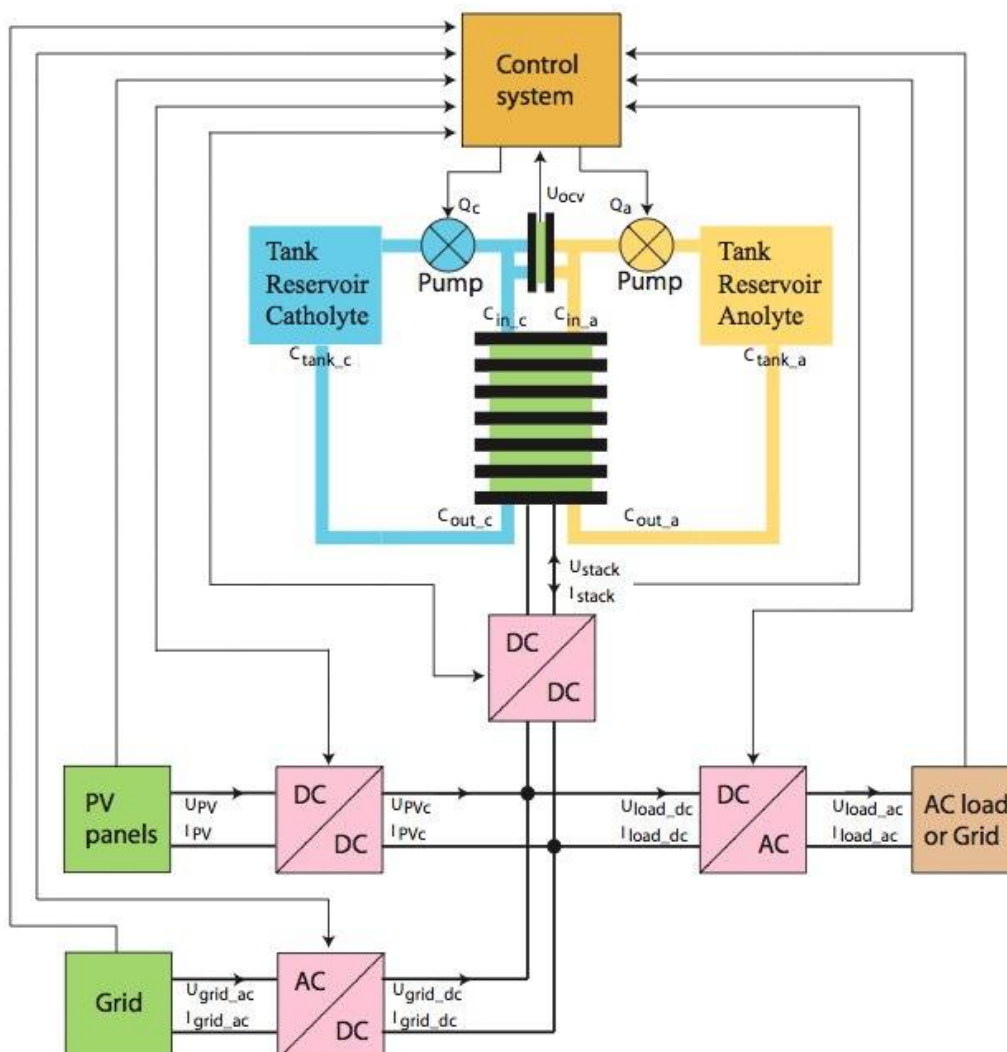


Σχήμα 3. 16 Τυπική συμπεριφορά του βαθμού απόδοσης της αντλίας.

3.8 Συνδυαστικό Μοντέλο της VRB

Ο συνδυασμός του ηλεκτροχημικού και του μηχανικού μοντέλου που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια οδηγεί σε ένα συνδυαστικό και πιο ολοκληρωμένο μοντέλο της VRB. Το μοντέλο αυτό συνδυάζει όλες τις αρχές και τις σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία της μπαταρίας, δίνοντας μας τη δυνατότητα καλύτερης κατανόησης της συμπεριφοράς της μπαταρίας κάτω από διάφορες συνθήκες. [22, 23, 24]

Φυσικά η μπαταρία δεν λειτουργεί ποτέ μόνη της, άλλα πάντα συνδέεται με μία ηλεκτρική πηγή, όπως φωτοβολταϊκά στοιχεία, ανεμογεννήτριες ή με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι απαιτούνται μετατροπές ισχύος, ώστε να προσαρμόζουν το ρεύμα και την τάση στις εκάστοτε συνθήκες. Ακόμη είναι απαραίτητο και ένα σύστημα ελέγχου, ώστε να ελέγχεται η λειτουργία της μπαταρίας αλλά και των επιμέρους στοιχείων της [22]. Ουσιαστικά, το σύστημα ελέγχου ελέγχει την παροχή των ηλεκτρολυτών Q και το ρεύμα της μπαταρίας I_{stack} . Στο σχήμα 3.17 φαίνεται το σχεδιάγραμμα της μπαταρίας με τα ηλεκτρονικά ισχύος και το σύστημα ελέγχου.



Σχήμα 3. 17 Σχεδιάγραμμα της VRB με τα ηλεκτρονικά ισχύος και το σύστημα ελέγχου.

3.8.1 Το σύστημα ελέγχου της VRB

Το σύστημα αυτό εποπτεύει τη λειτουργία της μπαταρίας, έτσι να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, ενώ βοηθάει όπου είναι δυνατό, στην βελτίωση της απόδοσης της μπαταρίας, ελέγχοντας την παροχή ηλεκτρολύτη. Σε βασικές εφαρμογές, ο διαχειριστής της VRB θέτει το ρεύμα αναφοράς I_{ref} ή την τάση αναφοράς P_{ref} , που πρέπει να παρέχει ή να αποθηκεύει η μπαταρία. Σε πιο σύνθετες και εξελιγμένες εφαρμογές το σύστημα ελέγχου μπορεί να περιλαμβάνει και άλλες λειτουργίες, όπως η ρύθμιση της συχνότητας, της ποιότητας ισχύος, λειτουργίες UPS, κτλ.

Το σύστημα ελέγχου δέχεται ως δεδομένα της μεταβλητές της λειτουργίας της μπαταρίας και προσαρμόζει το ρεύμα της μπαταρίας I_{stack} και την παροχή Q στις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας: την κατάσταση φόρτισης SoC, την τάση του κελιού U_{stack} , την ισχύ της μπαταρίας P_{stack} και τη μηχανική ισχύ P_{mech} .

3.8.1.1 Το μοντέλο των δεξαμενών

Το μοντέλο αυτό έχει περιγραφεί νωρίτερα ως επιμέρους κομμάτι του ηλεκτροχημικού μοντέλου, για διευκόλυνση όμως εδώ διαχωρίζεται. Το μοντέλο αυτό υπολογίζει τις συγκεντρώσεις των ηλεκτρολυτών στη δεξαμενή c_{tank} καθώς επίσης και στην είσοδο του κελιού c_{in} . Ακόμη το μοντέλο αυτό υπολογίζει την κατάσταση φόρτισης SoC της μπαταρίας. Τέλος υπολογίζει κάποιες βασικές μεταβλητές των ηλεκτρολυτών, όπως η πυκνότητα και το ιξώδες, που απαιτούνται για υπολογισμούς στο μηχανικό μοντέλο. Ωστόσο ο υπολογισμός και η χρήση των μεταβλητών αυτών παραλείπονται στην παρούσα μελέτη.

3.8.2 Το ηλεκτροχημικό μοντέλο

Το μοντέλο αυτό, όπως έχει περιγραφεί και στο κεφάλαιο 3.3, υπολογίζει την τάση της VRB ως συνάρτηση των συνθηκών λειτουργίας, δηλαδή της παροχής ηλεκτρολυτών Q και του ρεύματος της μπαταρίας I_{stack} που καθορίζονται από το σύστημα ελέγχου και της συγκέντρωσης ηλεκτρολυτών, που εξαρτώνται από το SoC της μπαταρίας.

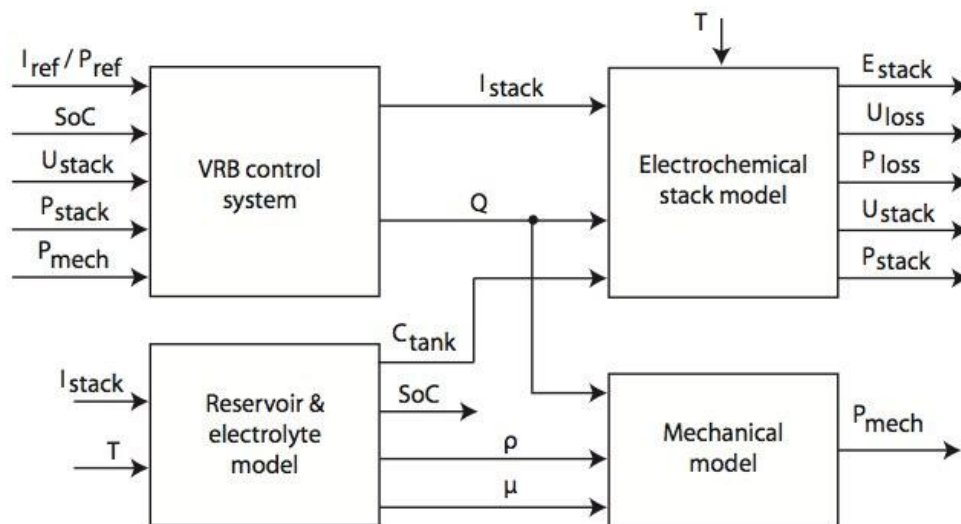
Ακόμη, το μοντέλο αυτό υπολογίζει και κάποιες άλλες εσωτερικές μεταβλητές, που χρησιμοποιούνται από το σύστημα ελέγχου. Αυτές οι μεταβλητές περιλαμβάνουν: την τάση ισορροπίας της VRB E_{stack} , τις εσωτερικές απώλειες P_{loss} και την αντίστοιχη πτώση τάσης U_{loss} καθώς επίσης και την ισχύ της VRB.

3.8.3 Το μηχανικό μοντέλο

Βασίζεται στις αρχές και τις σχέσεις της μηχανικής των ρευστών. Βασικός του σκοπός είναι ο καθορισμός της μηχανικής ενέργειας P_{mech} που απαιτείται για τη ροή του ηλεκτρολύτη από τη δεξαμενή στα κελιά. Η τιμή της εξαρτάται από την τιμή της παροχής ηλεκτρολυτών Q , τις ιδιότητες των ηλεκτρολυτών καθώς και την κατασκευή του υδραυλικού κυκλώματος, που περιλαμβάνει τους σωλήνες, τις δεξαμενές και τα κελιά [22]. Η

αναλυτικότερη περιγραφή του μοντέλου αυτού ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας μελέτης.

Τα 4 παραπάνω μοντέλα καθώς και οι σχέσεις μεταξύ τους παρουσιάζονται στο σχήμα 3.18:



Σχήμα 3. 18 Διάγραμμα περιγραφής του συνδυαστικού μοντέλου της VRB.

3.9 Ενεργειακή θεώρηση της λειτουργίας της VRB ανάλογα με την παροχή Q

Εδώ εξετάζεται η λειτουργία της VRB σε σταθερό ρεύμα και η επιρροή της τιμής της παροχής των ηλεκτρολυτών στην απόδοση της μπαταρίας. Αρχικά η μπαταρία λειτουργεί με τη μέγιστη δυνατή παροχή, $Q_{\max}$, με την οποία μεταφέρονται αρκετά ηλεκτρικά ενεργά στοιχεία για να τροφοδοτηθεί η αντίδραση, για κάθε κατάσταση λειτουργίας. Ως κατάσταση λειτουργίας ορίζεται ο συνδυασμός μιας συγκεκριμένης τιμής ρεύματος I_{stack} , για μια συγκεκριμένη κατάσταση φόρτισης SoC. [22, 30]

Κατόπιν καθορίζεται η ελάχιστη δυνατή παροχή $Q_{\min}$ που απαιτείται σε κάθε κατάσταση λειτουργίας, έτσι ώστε να διατηρείται η λειτουργία της VRB. Αυτή η τιμή εξαρτάται μόνο από το ρεύμα της μπαταρίας I_{stack} και την κατάσταση φόρτισης SoC. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι υπάρχει μία βέλτιστη τιμή για την παροχή Q_{opt} για την οποία μεγιστοποιείται η απόδοση της μπαταρίας. Η εύρεση της βέλτιστης αυτής τιμής περιγράφεται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.

Η ισχύς ρέει στο κύκλωμα της μπαταρίας και στο εξωτερικό φορτία όπως ακριβώς δείχνει το σχήμα 3.19. Οι μετατροπές ισχύος είναι απαραίτητοι για την προσαρμογή της τάσης κελιού U_{stack} στα επίπεδα της τάσης του δικτύου U_{grid} καθώς επίσης και για την παροχή μηχανικής ισχύος P_{mech} για την τροφοδοσία των αντλιών. Η μηχανική ισχύς P_{mech} παρέχεται από τη συστοιχία κελιών κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης και από το δίκτυο κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Κανονικά έχουμε και απώλειες των βοηθητικών συστημάτων (σύστημα ελέγχου, ηλεκτρονικά ισχύος) άλλα στην παρούσα φάση τα θεωρούμε αμελητέα. Άρα κατά τη διάρκεια της φόρτισης, η μηχανική ισχύς των αντλιών παρέχεται από εξωτερική πηγή ισχύος και άρα θα πρέπει να προστεθεί στην ισχύ που παρέχεται στα κελιά P_{stack} .

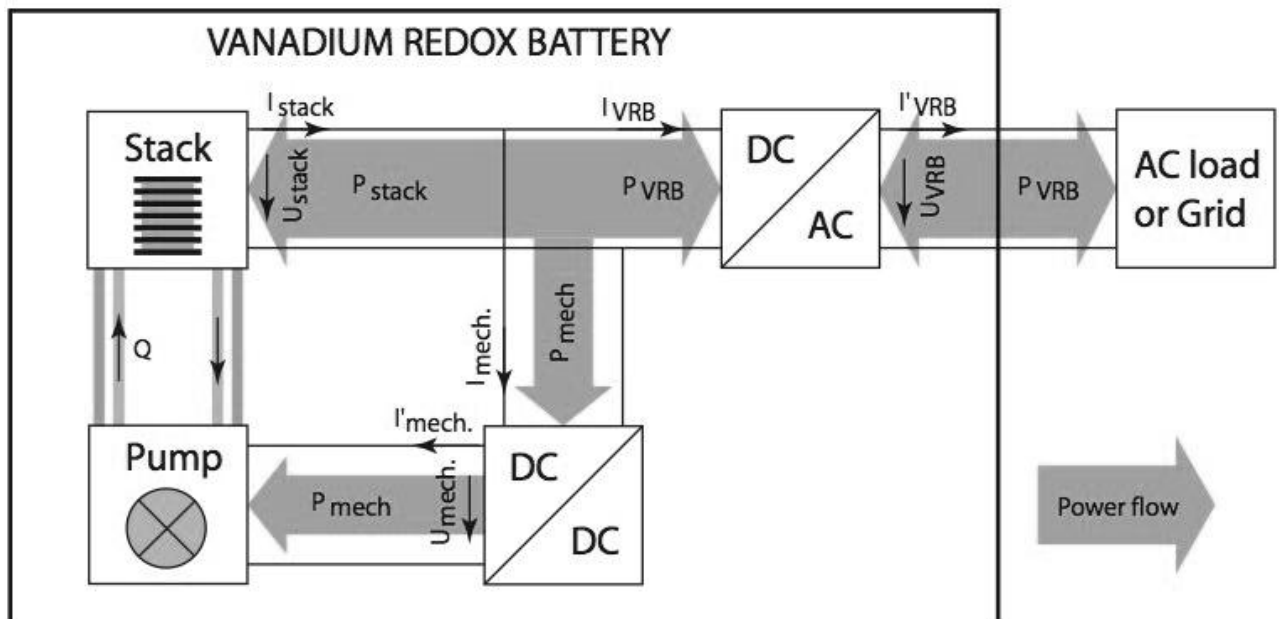
$$|P_{VRB,charge}| = |P_{stack}| + P_{mech} \quad (3.35)$$

Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, η μηχανική ισχύς παρέχεται από την ίδια τη μπαταρία, άρα πρέπει να αφαιρεθεί από την ισχύ που χορηγείται από τα κελιά της VRB.

$$P_{VRB,discharge} = P_{stack} - P_{mech} \quad (3.36)$$

Από σύμβαση θεωρούμε την ισχύ της VRB $P_{battery}$ και την ισχύ των κελιών P_{stack} θετικές κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης και αρνητικές κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Έτσι οι σχέσεις (3.35) και (3.36) συνδυάζονται ως εξής:

$$P_{VRB} = P_{stack} - P_{mech} \quad (3.37)$$



Σχήμα 3. 19 Διάγραμμα της ροής ισχύος της VRB. Σε από το παράδειγμα, οι μετατροπείς ισχύος θεωρούνται ιδανικοί, άρα έχουμε μόνο P_{mech}

3.9.1 Μέγιστη παροχή $Q_{\max}$

Η λειτουργία της μπαταρίας με τη μέγιστη δυνατή παροχή $Q_{\max}$ είναι μια πολύ απλή πολιτική ελέγχου. Ωστόσο τα αποτελέσματα της πολιτικής αυτής στην απόδοση της VRB δε θα είναι τα βέλτιστα, λόγω πολύ μεγάλης μηχανικής ισχύος που απαιτείται από τις αντλίες. Ενώ δηλαδή με την $Q_{\max}$ επιτυγχάνεται η μέγιστη παροχή ηλεκτρικά ενεργών σωματιδίων στα κελιά, άρα και καλύτερος ρυθμός αντιδράσεων, η πολύ μεγάλες απώλειες λόγω της αντλίας υποβαθμίζουν πολύ την απόδοση της μπαταρίας.

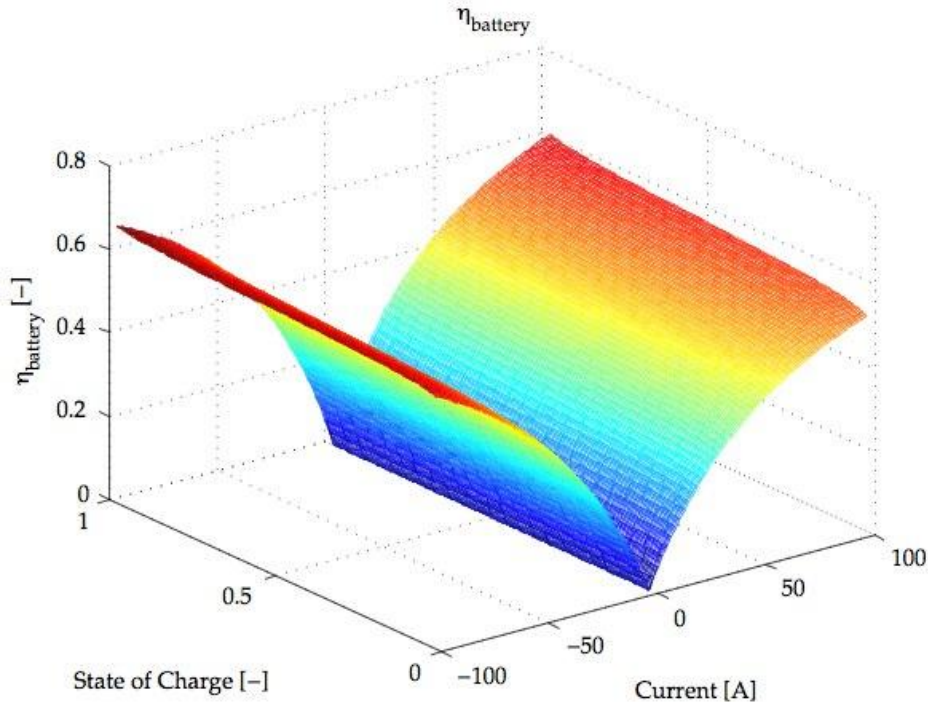
Προκειμένου να αξιολογήσουμε την απόδοση της μπαταρίας ορίζουμε τη στιγμιαία απόδοση της μπαταρίας ως εξής:

$$\eta_{battery} = \frac{|P_{stack}|}{|P_{stack}| + P_{mech}} \quad (3.37)$$

Η επίδραση της παροχής στο βαθμό απόδοσης της μπαταρίας θα φανεί στο παράδειγμα όπου χρησιμοποιείται μια μπαταρία 2.5 kW, 15 kWh που έχει τα χαρακτηριστικά του πίνακα 3.3. Ο βαθμός απόδοσης της VRB υπολογίστηκε με τον τύπο (3.37) και τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 3.20. [22]

Name	Value
number of cells N_{cells}	19
R_{charge}	0.037 Ω
$R_{discharge}$	0.039 Ω
electrolyte flowrate Q	2 l/s
electrolyte vanadium concentration	2 M
tank size V_{tank}	200 l
initial concentration of vanadium species	1 M

Πίνακας 3. 3 Τεχνικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας του παραδείγματος.



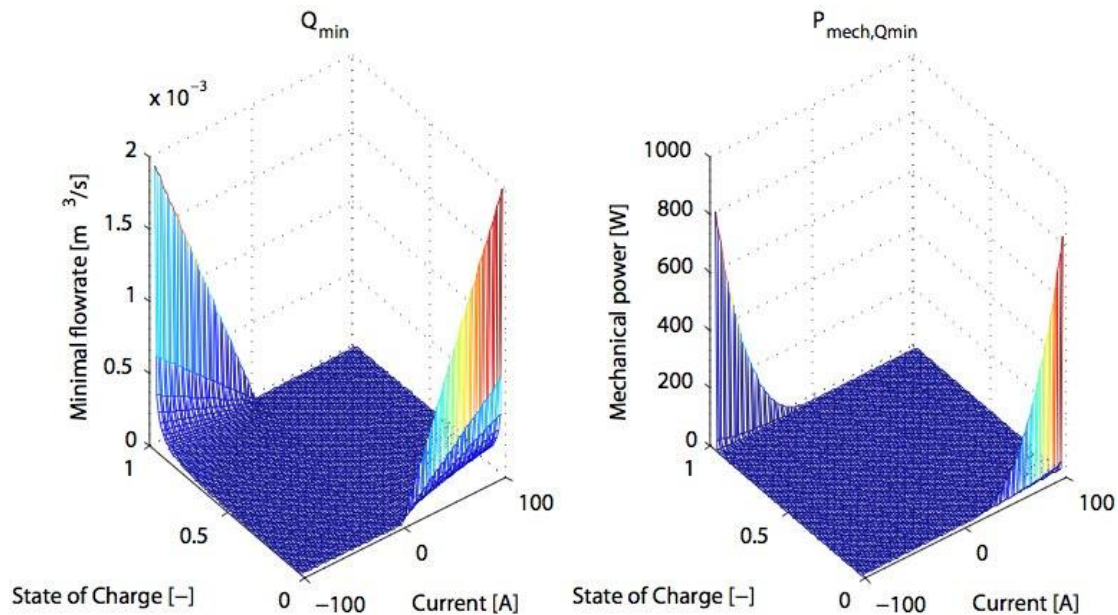
Σχήμα 3. 20 Βαθμός απόδοσης της VRB για σταθερή μέγιστη παροχή ηλεκτρολύτη $Q_{\max}$ συναρτήσει της κατάστασης φόρτισης SoC και του ρεύματος I .

Παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης της μπαταρίας είναι πολύ μικρός όταν έχουμε σταθερή μέγιστη παροχή. Αυτό οφείλεται στις αυξημένες απώλειες λόγω της ισχύος που καταναλώνεται από τις αντλίες. Η λειτουργία λοιπόν της μπαταρίας με αυτόν τον τρόπο αποτελεί λάθος πολιτική.

3.9.2 Ελάχιστη παροχή $Q_{\min}$

Αυτή η μέθοδος προτείνει τη λειτουργία της μπαταρίας με την ελάχιστη δυνατή παροχή ηλεκτρολυτών $Q_{\min}$, η τιμή της οποίας προσαρμόζεται στις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας (SoC και I_{stack}), έτσι ώστε να παρέχονται τα απαραίτητα ιόντα για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων.

Στο σχήμα 3.21 παρουσιάζονται οι τιμές της $Q_{\min}$ καθώς επίσης και της P_{mech} για την μπαταρία του προηγούμενου παραδείγματος.



Σχήμα 3. 21 Ελάχιστη παροχή $Q_{\min}$ (αριστερά) και μηχανική ενέργειας (για μία αντλία) $P_{\text{mech},Q_{\min}}$ (δεξιά) συναρτήσει του SoC και του I. [22]

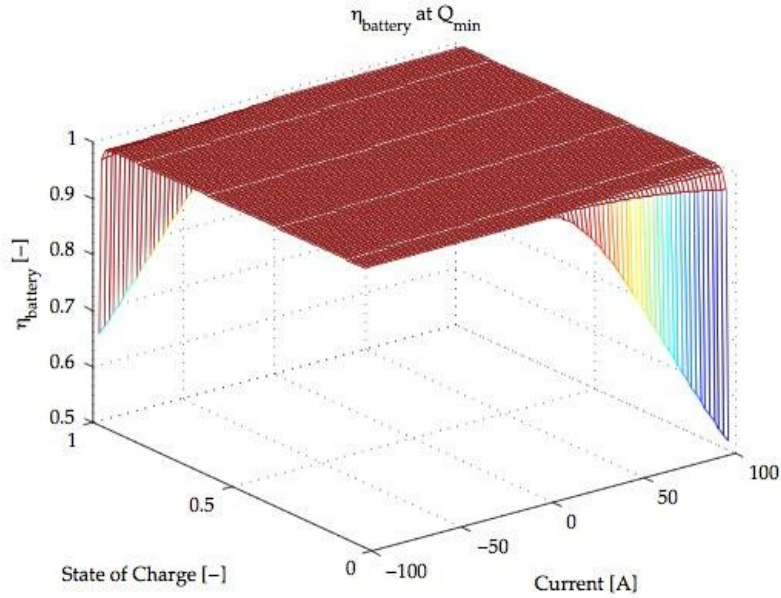
Παρατηρείται ότι η εξάρτηση του $Q_{\min}$ από το I είναι γραμμική, ενώ από το SoC είναι εκθετική. Οι μέγιστες τιμές της $Q_{\min}$ σημειώνονται στις κρίσιμες περιοχές :

- Χαμηλό επίπεδο φόρτισης SoC και υψηλό ρεύμα I_{stack} κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης
- Υψηλό επίπεδο φόρτισης SoC και υψηλό ρεύμα I_{stac} κατά τη διάρκεια της φόρτισης

Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις παρατηρείται πολύ μικρή τιμή για το $Q_{\min}$.

Όσον αφορά λοιπόν την ισχύ που καταναλώνεται από τις αντλίες P_{mech} η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μεγάλο όφελος έναντι της λειτουργίας της VRB με $Q_{\max}$.

Στο σχήμα 3.22 υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης της μπαταρίας με τη μέθοδο αυτή. Παρατηρούμε πολύ μεγαλύτερες τιμές από ότι είδαμε προηγουμένως στη λειτουργία με $Q_{\max}$.

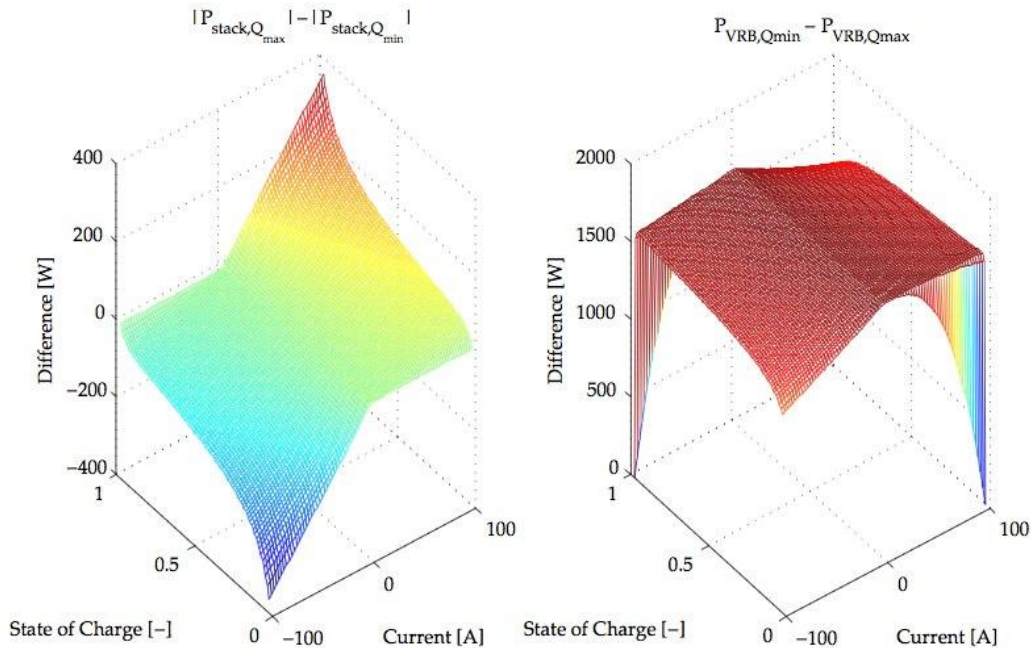


Σχήμα 3. 22 Βαθμός απόδοσης της VRB με Q_{min} συναρτήσει των SoC και I_{stack} .

3.10 Σύγκριση της λειτουργίας με Q_{max} και της λειτουργίας με Q_{min}

Είναι γνωστό ότι η τιμή της παροχής ηλεκτρολυτών επηρεάζει πολύ και την τάση U_{stack} και κατά συνέπεια την ισχύ της συστοιχίας των κελιών P_{stack} . Έτσι η P_{stack} αυξάνεται όσο αυξάνεται και η παροχή Q στην εκφόρτιση, έως ότου φτάσει στη μέγιστη τιμή όταν η παροχή γίνει Q_{max} . Το αντίθετο συμβαίνει κατά τη φόρτιση, η P_{stack} ελαχιστοποιείται όταν η παροχή γίνει Q_{max} . Η διαφορά μεταξύ της $|P_{stack, Q_{max}}|$ και της $|P_{stack, Q_{min}}|$ φαίνεται στο σχήμα 3.23:

Η συνολική ισχύς που ανταλλάζει η VRB με το δίκτυο P_{VRB} εξαρτάται και από την ισχύ στη συστοιχία των κελιών P_{stack} και από τη μηχανική ισχύ P_{mech} που αποτελεί απώλειες. Το κέρδος λοιπόν της λειτουργίας της VRB με Q_{min} έναντι της λειτουργίας με Q_{max} φαίνεται στο σχήμα 3.23 (δεξιά). [22, 30]



Σχήμα 3. 23 Αριστερά: Διαφορά μεταξύ της $|P_{stack, Q_{max}}|$ και της $|P_{stack, Q_{min}}|$, Δεξιά: διαφορά μεταξύ της $P_{VRB, Q_{min}}$ και της $P_{VRB, Q_{max}}$

Στη λειτουργία με $Q_{\max}$ η P_{stack} παίρνει την υψηλότερη τιμή. Ωστόσο και η P_{mech} που απαιτείται για την κίνηση των ηλεκτρολυτών παίρνει πολύ υψηλή τιμή, μειώνοντας έτσι το βαθμό απόδοσης της μπαταρίας. Αντίστοιχα, στη λειτουργία με $Q_{\min}$ η P_{mech} μειώνεται στο ελάχιστο, όμως μαζί της μειώνεται και η P_{stack} . Πρέπει λοιπόν να βρεθεί μια βέλτιστη τιμή Q_{opt} μεταξύ των $Q_{\min}$ και $Q_{\max}$ έτσι ώστε η μπαταρία να λειτουργεί με τη βέλτιστη απόδοση. Αυτή η μέθοδος περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

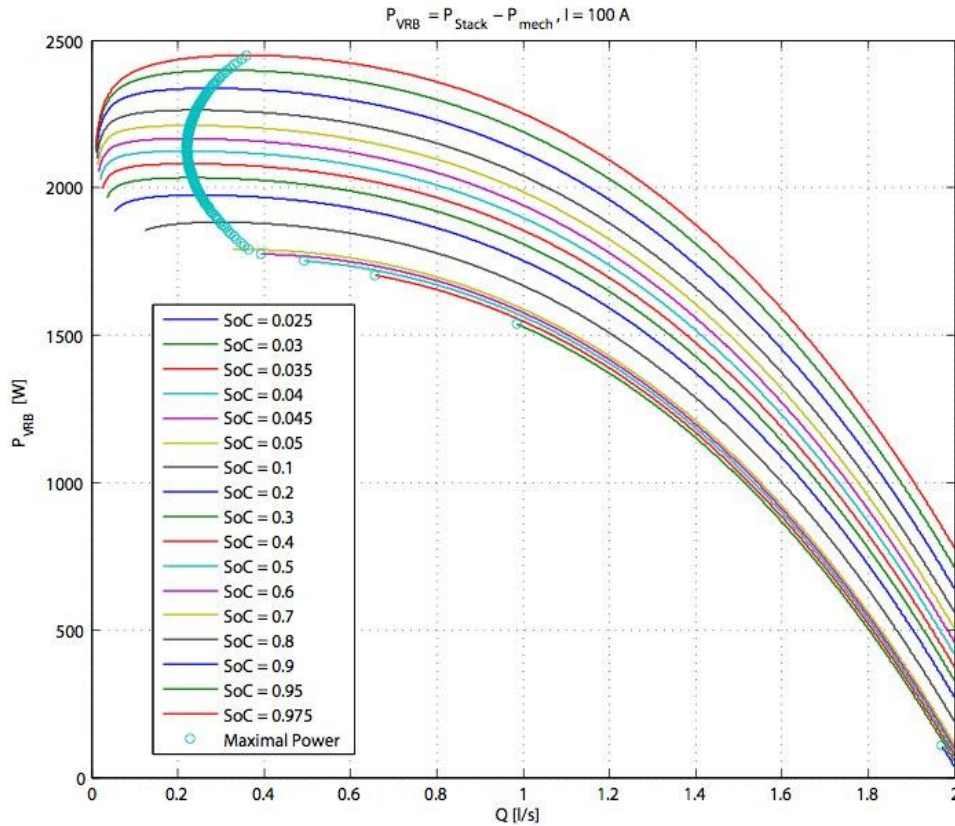
3.11 Βέλτιστη τιμή της παροχής Q_{opt} με σταθερό ρεύμα λειτουργίας

Εκφόρτιση

Η τιμή της βέλτιστης παροχής Q_{opt} είναι αυτή, για την οποία η P_{stack} μεγιστοποιείται, ενώ η P_{mech} ελαχιστοποιείται. Όταν ικανοποιείται αυτή η συνθήκη βελτιστοποιείται η P_{VRB} . Η συνθήκη αυτή περιγράφεται με τη σχέση 3.38:

$$\max \left(\underbrace{P_{\text{VRB}}}_{f(U_{\text{stack}}, I_{\text{VRB}})} \right) = \max \left(\underbrace{P_{\text{stack}}}_{f(I_{\text{stack}}, Q, \text{SoC})} - \underbrace{P_{\text{mech}}}_{f(Q, \mu, \rho)} \right) \quad [w] \quad 3.38$$

Στο σχήμα 3.24 παρουσιάζεται η P_{VRB} της μπαταρίας που παρουσιάστηκε στον πίνακα 3.3 συναρτήσει της Q για διάφορες τιμές του SoC και για ρεύμα με τιμή 100 A. [30]



Σχήμα 3. 24 Βέλτιστη τιμή παροχής ηλεκτρολυτών Q_{opt} συναρτήσει της Q και του SoC για σταθερό $I_{\text{stack}} = 100$ A (εφόρτιση).

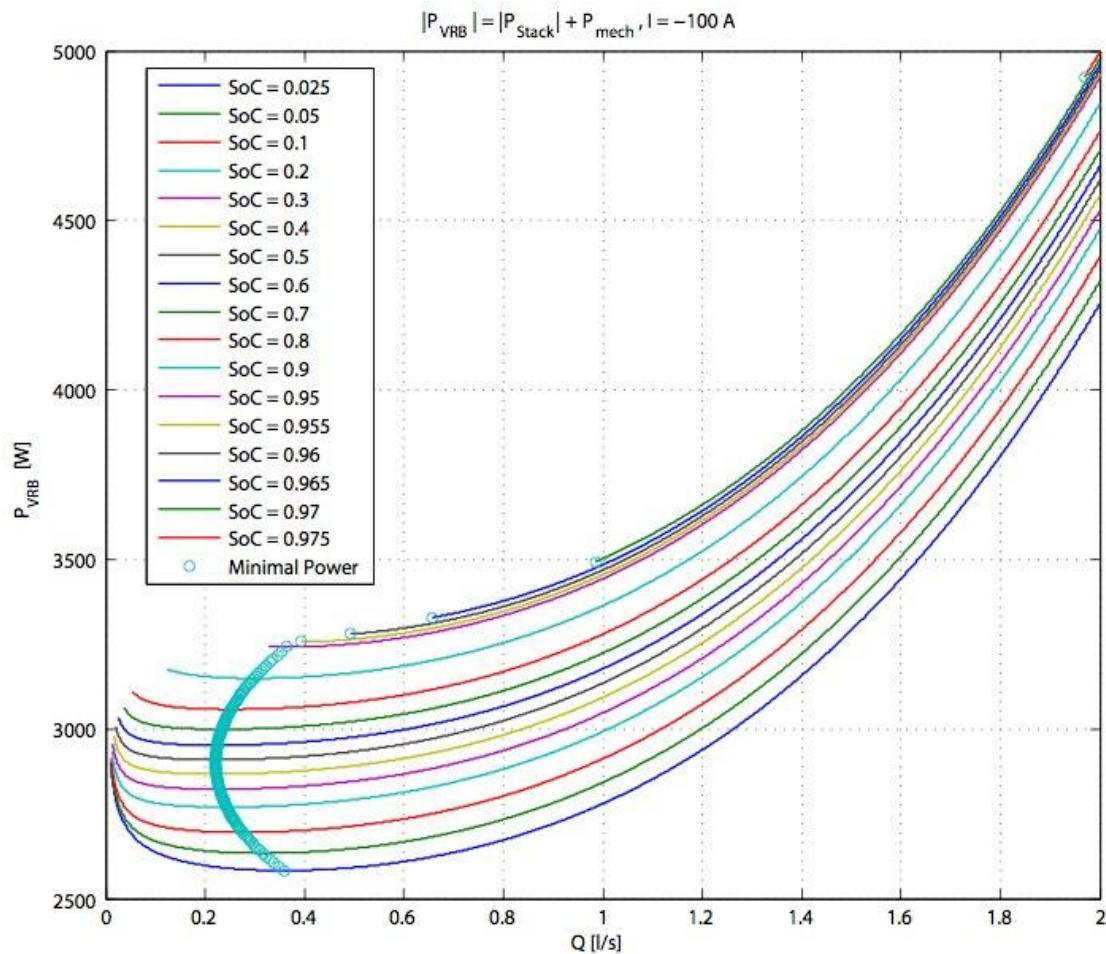
Η καμπύλη αυτή μπορεί να γενικευτεί και για άλλες τιμές του ρεύματος ($I_{stack} > 0$ αφού έχουμε εκφόρτιση). Μόνο στην περίπτωση που το I_{stack} είναι πάρα πολύ μικρό, η P_{VRB} θα μπορούσε να γίνει αρνητική όταν η παροχή (άρα και η μηχανική τιμή) έχει πολύ μεγάλη τιμή.

Φόρτιση

Όταν η μπαταρία λειτουργεί με σταθερό ρεύμα, η ποσότητα των ηλεκτρονίων που αποθηκεύονται στον ηλεκτρολύτη δεν εξαρτάται από την ισχύ της συστοιχίας P_{stack} άλλα αποκλειστικά από το ρεύμα I_{stack} , δε μας ενδιαφέρει λοιπόν να έχουμε μεγάλη P_{stack} . Έτσι η βέλτιστη παροχή Q_{opt} είναι αυτή, για την οποία έχουμε ελάχιστο P_{stack} και P_{mech} . Αυτό εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

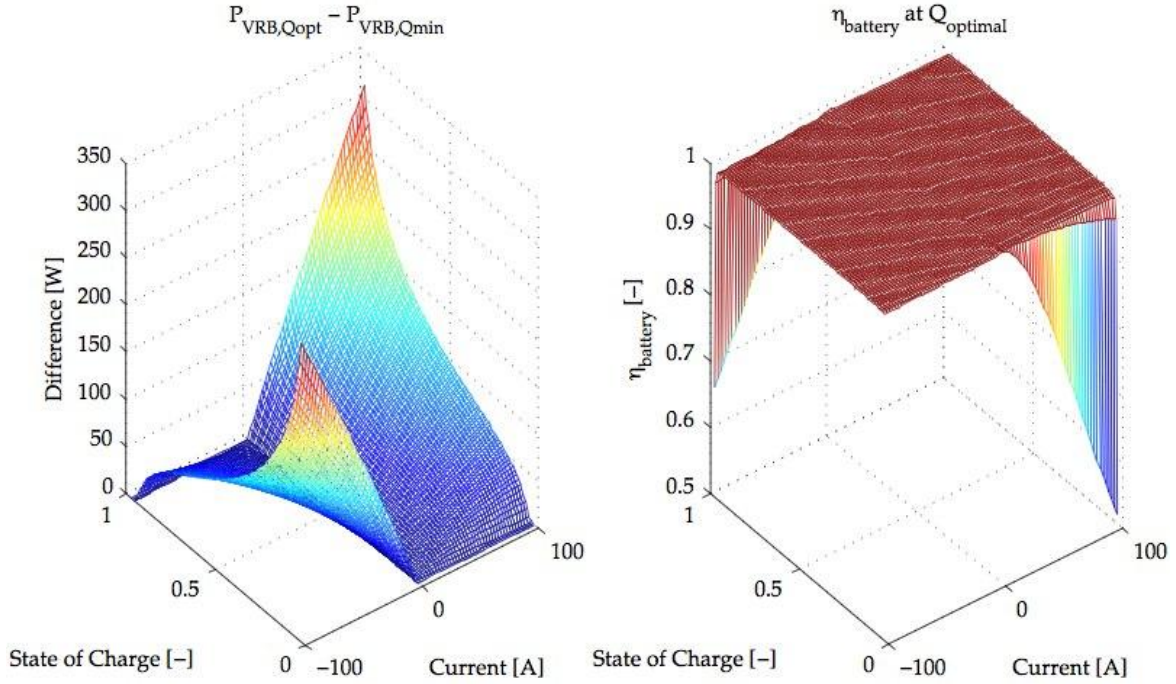
$$\min \left(\left| P_{VRB} \right| \right)_{f(U_{stack}, I_{VRB})} = \min \left(\left| P_{stack} \right|_{f(I_{stack}, Q, SoC)} - P_{mech} \right)_{f(Q, \mu, \rho)} \quad [w] \quad (3.39)$$

Στο σχήμα 3.25 παρουσιάζεται η Q_{opt} πάνω στις καμπύλες της P_{VRB} συναρτήσει της Q για διάφορα SoC. Η καμπύλη αυτή μπορεί να γενικευτεί και για άλλες τιμές του ρεύματος ($I_{stack} < 0$ αφού έχουμε φόρτιση). [30]



Σχήμα 3. 25 Βέλτιστη τιμή παροχής ηλεκτρολυτών Q_{opt} συναρτήσει της Q και του SoC για σταθερό $I_{stack} = -100$ A (φόρτιση).

Στο σχήμα 3.26 γίνεται μια σύγκριση της λειτουργίας της VRB με την ελάχιστη παροχή $Q_{\min}$ και με τη βέλτιστη παροχή Q_{opt} .



Σχήμα 3. 26 Αριστερά: Διαφορά μεταξύ της ισχύος της μπαταρίας όταν λειτουργεί με Q_{opt} και όταν λειτουργεί με $Q_{\min}$. Δεξιά: βαθμός απόδοσης της VRB που λειτουργεί με Q_{opt} .

3.12 Βέλτιστη τιμή της παροχής Q_{opt} με σταθερή ισχύ λειτουργίας

Οι μπαταρίες στην πράξη πρέπει να παρέχουν ένα συγκεκριμένο ποσό ισχύος στο φορτίο, άρα συνήθως ελέγχονται από μία τιμή ισχύος αναφοράς P_{ref} . Έτσι, το βέλτιστο σημείο λειτουργίας είναι το ζευγάρι Q_{opt} και I_{opt} που μεγιστοποιούν το ποσό ενέργειας που αποθηκεύεται στις μπαταρίες κατά τη φόρτιση, ενώ ελαχιστοποιούν το ποσό των απωλειών κατά την εκφόρτιση. Αυτές οι συνθήκες σχετίζονται άμεσα με το I_{stack} και εκφράζονται με τις παρακάτω σχέσεις.

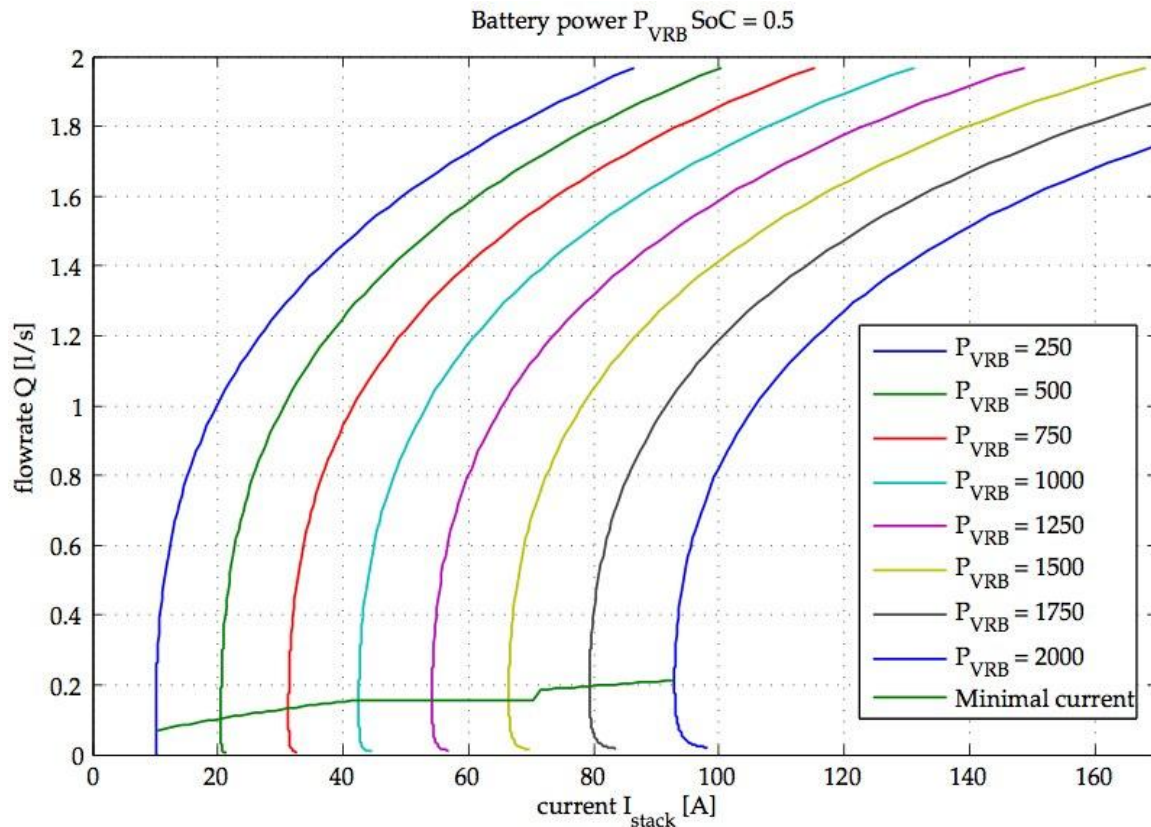
$$\underbrace{P_{VRB}}_{\text{constant}} = \underbrace{P_{\text{stack}}}_{f(I_{\text{stack}}, Q, SoC)} - \underbrace{P_{\text{mech}}}_{f(Q, \mu, \rho)} \quad [\text{W}] \quad (3.40)$$

- Κατά τη φόρτιση ισχύει: $\max(|I_{\text{stack}}|)$ [A]
- Κατά την εκφόρτιση ισχύει: $\min(I_{\text{stack}})$ [A]

Εκφόρτιση

Κατά τη βέλτιστη λειτουργία Q_{opt} η μπαταρία παρέχει την ίδια ισχύ P_{VRB} , καταναλώνοντας ωστόσο λιγότερα ενεργά ιόντα βαναδίου. Η τιμή της βέλτιστης παροχής Q_{opt} αυξάνεται όσο αυξάνεται η P_{VRB} μέχρι μια μέγιστη τιμή.

Στην πραγματικότητα, η τιμή του ρεύματος I_{stack} αυξάνεται όταν η παροχή είναι πάνω από την Q_{opt} ώστε να καλύψει την πρόσθετη μηχανική ισχύ. Κάτω από την τιμή της Q_{opt} η τάση U_{stack} μειώνεται πολύ, λόγω των χαμηλότερων συγκεντρώσεων ιόντων. Στο σχήμα 3.27 παρουσιάζεται η Q_{opt} για την περίπτωση της εκφόρτισης.

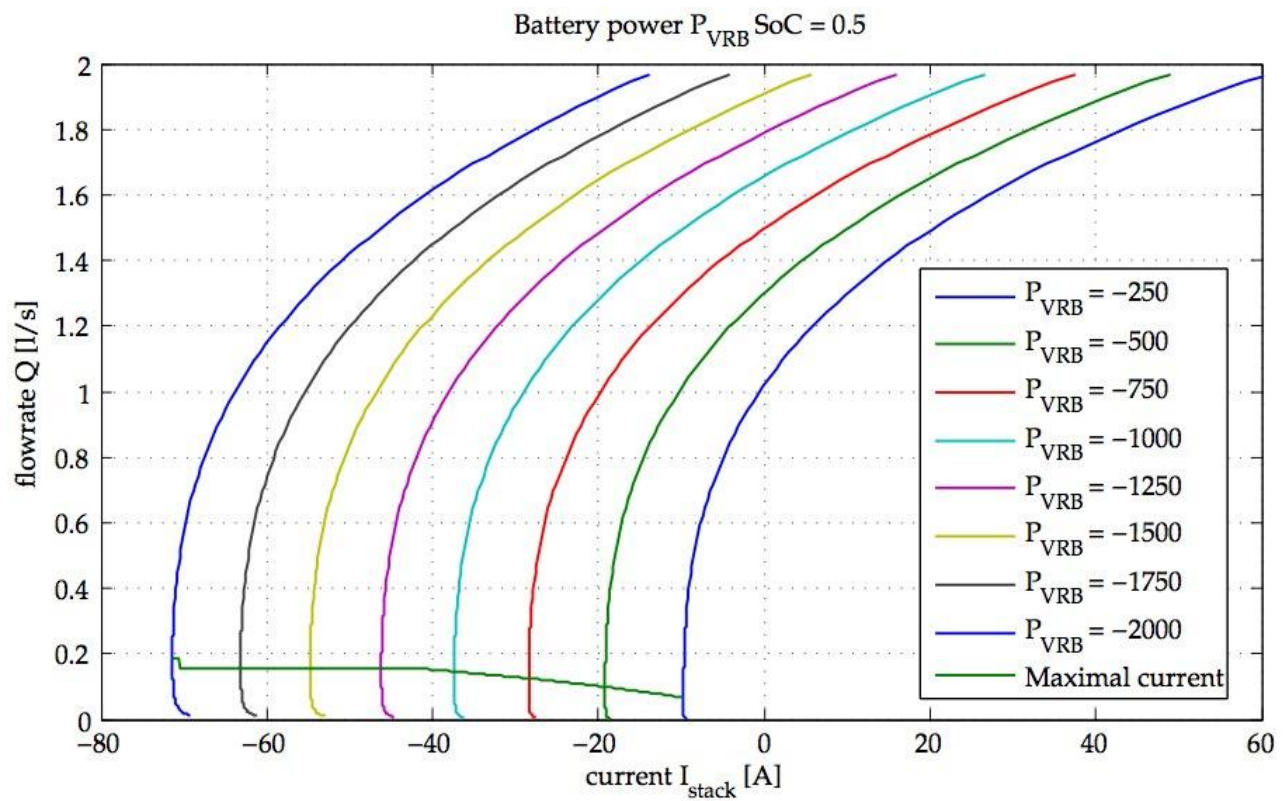


Σχήμα 3.27 Ισχύς μπαταρίας P_{VRB} συναρτήσει του ρεύματος εκφόρτισης I_{stack} και της παροχής ηλεκτρολυτών, για SoC = 0.5. Η βέλτιστη τιμή της παροχής Q_{opt} προκύπτει όταν το I_{stack} ελαχιστοποιείται.

Φόρτιση

Κατά τη βέλτιστη λειτουργία, δηλαδή όταν η τιμή της παροχής των ηλεκτρολυτών είναι Q_{opt} , το ρεύμα που παρέχεται στην μπαταρία $|I_{stack}|$ παίρνει τη μέγιστη τιμή. Έτσι με σταθερή τη P_{VRB} που παρέχεται στην μπαταρία, αποθηκεύεται ο μέγιστος αριθμός ηλεκτρονίων στον ηλεκτρολύτη. Όπως και στην εκφόρτιση, η τιμή της βέλτιστης παροχής Q_{opt} αυξάνεται όσο αυξάνεται η P_{VRB} μέχρι μια μέγιστη τιμή.

Στο σχήμα 3.28 παρουσιάζεται η Q_{opt} για την περίπτωση της φόρτισης. Παρατηρείται ότι για πολύ μεγάλες τιμές της παροχής Q , το I_{stack} αλλάζει πρόσημο. Αυτό συμβαίνει γιατί λόγω των πολύ μεγάλων μηχανικών απωλειών, η μπαταρία ενώ βρίσκεται σε λειτουργία φόρτισης, ουσιαστικά εκφορτίζεται.



Σχήμα 3. 28 Ισχύς μπαταρίας P_{VRB} συναρτήσει του ρεύματος εκφόρτισης I_{stack} και της παροχής ηλεκτρολυτών, για $SoC = 0.5$. Η βέλτιστη τιμή της παροχής Q_{opt} προκύπτει όταν το $|I_{stack}|$ μεγιστοποιείται.

Κεφάλαιο 4

Μαθηματικό μοντέλο περιγραφής της μπαταρίας VRB

4.1 Εισαγωγή

Το συνδυαστικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, επιτυγχάνει μια πολύ καλή προσομοίωση της λειτουργίας της VRB3. Βασίζεται ωστόσο στην ύπαρξη πολλών μεταβλητών, οι οποίες πολλές φορές είναι δύσκολο να μετρηθούν, καθώς επίσης και στην γνώση τεχνικών στοιχείων της μπαταρίας που πολλές φορές δε δίνονται από τους κατασκευαστές.

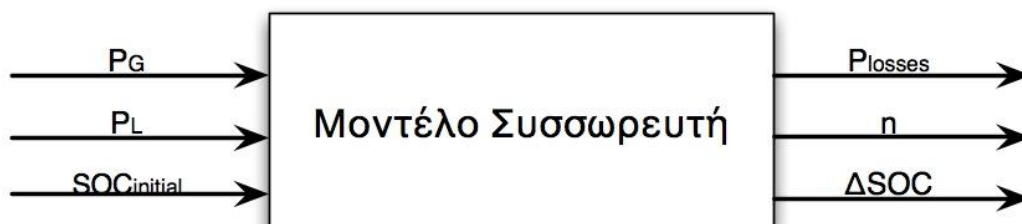
Για να μπορέσουμε λοιπόν να τρέξουμε διάφορες προσομοιώσεις είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός απλούστερου προσεγγιστικού μοντέλου, που να παρέχει αποδεκτά αποτελέσματα, χωρίς ωστόσο να απαιτεί πολύ εξειδικευμένες μετρήσεις. Ειδικά για την ενεργειακή επισκόπηση ενός συστήματος, μας ενδιαφέρουν σαν μεταβλητές εξόδου ο βαθμός απόδοσης και το SoC της μπαταρίας. Είναι λοιπόν περιττό να υπολογίσουμε όλες τις εσωτερικές μεταβλητές που απαιτεί η χρήση του προηγούμενου μοντέλου.

Η παρουσίαση ενός νέου απλούστερου μοντέλου γίνεται εδώ.

4.2 Γενικά για το ενεργειακό μοντέλο συσσωρευτών

Η περιγραφή και η προσομοίωση ενός αυτόνομου υβριδικού ενεργειακού συστήματος απαιτεί τη χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου που να περιγράφει σε ικανοποιητικό βαθμό τη λειτουργία των συσσωρευτών του συστήματος. Το μοντέλο αυτό θα πρέπει να περιγράφει από ενεργειακή σκοπιά τη λειτουργία των συσσωρευτών, θα πρέπει δηλαδή δεδομένης της ισχύος που ανταλλάσσει ο συσσωρευτής με το δίκτυο, να υπολογίζει τις απώλειες, το επίπεδο φόρτισης (SOC), καθώς και το βαθμό απόδοσης του συσσωρευτή. Η ισχύς των απωλειών καθώς και ο βαθμός ενεργειακής απόδοσης του συσσωρευτή δεν έχουν σταθερή τιμή. Αντίθετα είναι δυναμικές παράμετροι και εξαρτώνται κάθε στιγμή από το ρυθμό φόρτισης/εκφόρτισης καθώς και από το εκάστοτε επίπεδο φόρτισης (SOC) του συσσωρευτή. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι το μαθηματικό μοντέλο θα πρέπει να μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά τις δυναμικές αυτές παραμέτρους για κάθε χρονική στιγμή που εξετάζουμε το σύστημα.

Στη γενικότερη του μορφή το σύστημα περιγράφεται από το παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 4. 1 : Σχηματική αναπαράσταση εισόδων και εξόδων του μοντέλου

Όπου :

- P_G : Η ισχύς που παράγεται από όλο το σύστημα
- P_L : Η ισχύς του φορτίου του συστήματος
- SOC : (State of Charge) το επίπεδο φόρτισης του συσσωρευτή

$$SOC = \frac{\text{Διαθέσιμη Ενέργεια Μπαταρίας}}{\text{Συνολική χωρητικότητα μπαταρίας}}$$

- P_{losses} : Η συνολική ισχύς των απωλειών του συσσωρευτή (BESS)
- η : Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης του συσσωρευτή. Είναι διαφορετικός για τη φόρτιση και την εκφόρτιση

Η καθαρή ισχύς που ανταλλάσσει το δίκτυο με την μπαταρία προκύπτει από την αφαίρεση της P_L με την P_w και τη συμβολίζω ως P_{net} .

$$\text{Έχουμε λοιπόν : } P_{net} = P_L - P_G$$

- Αν $P_{net} > 0$, τότε το φορτίο δεν καλύπτεται από την παραγωγή του συστήματος και η μπαταρία πρέπει να καλύψει τη διαφορά. Άρα στην περίπτωση αυτή η μπαταρία λειτουργεί σε φάση εκφόρτισης
- Αν $P_{net} < 0$, τότε υπάρχει πλεόνασμα παραγόμενης ισχύος στο σύστημα το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί στη μπαταρία. Άρα στην περίπτωση αυτή η μπαταρία λειτουργεί σε φάση φόρτισης.

Φυσικά αυτή η θεώρηση αποτελεί απλουστευμένη περίπτωση, αφού σε έναν πραγματικό υβριδικό σταθμό παραγωγής η λειτουργία της μπαταρίας εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως πολιτική λειτουργίας, οικονομικούς παράγοντες κτλ.

Η μεταβολή του SOC ισούται με τη συνολική ενέργεια που διακινήθηκε από ή προς την μπαταρία προς τη συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας.

$$\Delta SOC = \frac{\Delta E}{E_{capacity}} = \frac{P_{stack} \cdot Time_{step}}{E_{capacity}} = \frac{I_{stack} \cdot V_b \cdot Time_{step}}{E_{capacity}}$$

Όπου :

- P_{stack} : Η ισχύς που διακινείται από ή προς το κελί της μπαταρίας, δηλαδή ουσιαστικά ο ρυθμός με τον οποίο δεσμεύεται ή αποδεσμεύεται χημική ενέργεια στην μπαταρία.
- $Time_{step}$: Το χρονικό βήμα κατά το οποίο υπολογίζουμε τις τιμές
- I_{stack} : Το ρεύμα που διαρρέει το κελί της μπαταρίας
- V_b : Η τάση στα άκρα της μπαταρίας

Άρα τελικά έχουμε :

$$SOC_t = SOC_{t-1} + \Delta SOC$$

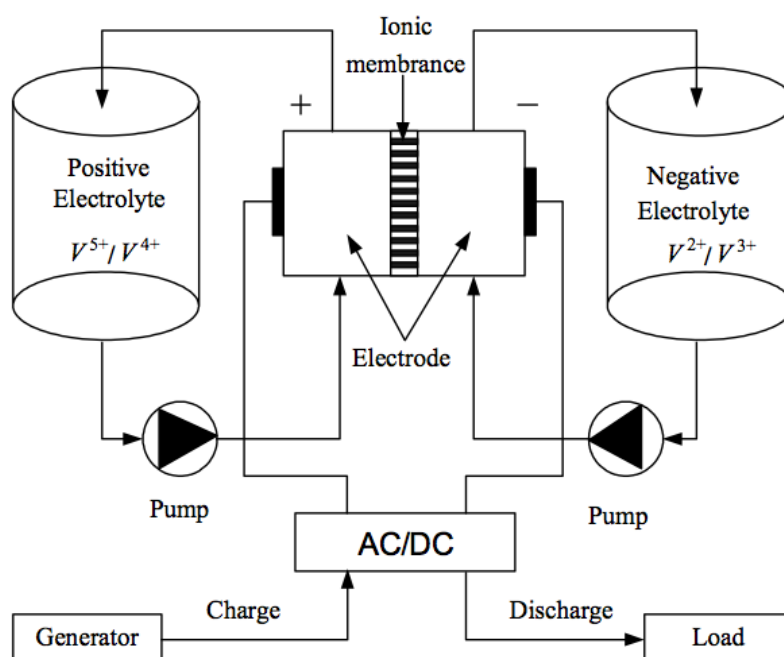
Το $Time_{step}$ λόγω του γεγονότος ότι εξετάζουμε το σύστημα από ενεργειακή σκοπιά, παίρνει σχετικά μεγάλες τιμές από 10 λεπτά και πάνω και συνήθως το διάστημα αυτό είναι 1

ώρα. Έτσι όλες οι παραπάνω παράμετροι του μοντέλου, υπολογίζονται ως μέσες ωριαίες τιμές.

4.3 Γενικά για το μοντέλο περιγραφής της VRB

Η λειτουργία της μπαταρίας VRB απαιτεί την κυκλοφορία δύο διαφορετικών ηλεκτρολυτών, ενός θετικού και ενός αρνητικού, από τις δεξαμενές όπου είναι αποθηκευμένοι, στο κελί όπου και αλληλεπιδρούν προκαλώντας τη διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται ένα απλοποιημένο σχεδιάγραμμα των τμημάτων της μπαταρίας.

Η ταχύτητα ροής των ηλεκτρολυτών στο υδραυλικό σύστημα της μπαταρίας δεν είναι σταθερή άλλα εξαρτάται κάθε χρονική στιγμή από την ισχύ που πρέπει να διακινήσει η μπαταρία. Η κυκλοφορία αυτή διασφαλίζεται από τη λειτουργία των αντλιών, η ισχύς των οποίων καθορίζεται από σύστημα ελέγχου και μεταβάλλεται ανάλογα με την απαιτούμενη ταχύτητα ροής των ηλεκτρολυτών. Προκύπτει λοιπόν ότι η ισχύς που καταναλώνεται στις αντλίες είναι ανάλογη του ρεύματος και κατ' επέκταση της ισχύος που περνά από το κελί της μπαταρίας. Αυτό γίνεται για να βελτιωθεί η απόδοση της μπαταρίας, αφού αν η κυκλοφορία των ηλεκτρολυτών παρέμενε σταθερή η απόδοση θα μειωνόταν σημαντικά.

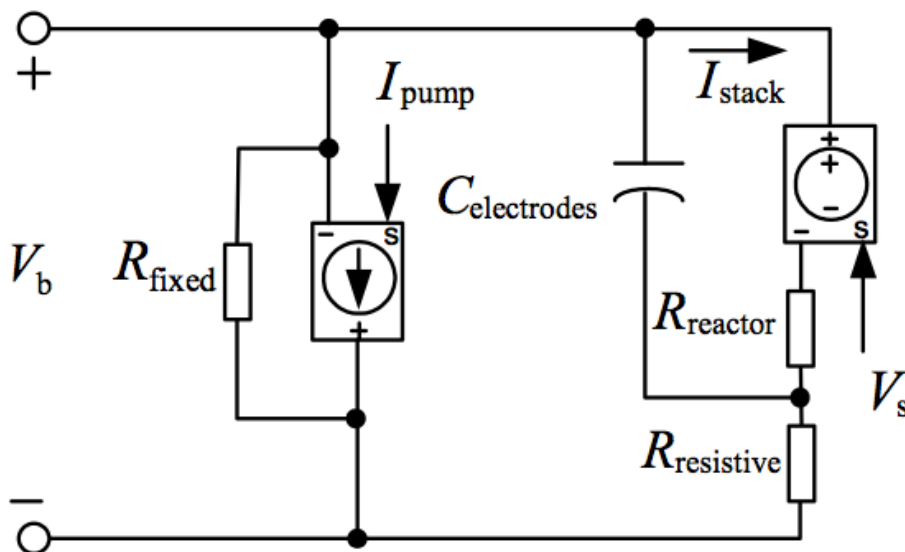


Σχήμα 4. 2 : Σχεδιάγραμμα διάταξης της VRB

Επειδή η ισχύς που καταναλώνεται στις αντλίες αποτελεί πολύ σημαντικό ποσοστό των συνολικών απωλειών, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης της μπαταρίας. Γι' αυτό και είναι απαραίτητη μια καλή προσέγγιση των απωλειών λόγω των αντλιών από το μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία βασίζεται στο ισοδύναμο κύκλωμα και τη μαθηματική περιγραφή των δημοσιεύσεων [31, 32, 33]

Το ισοδύναμο κύκλωμα λαμβάνει υπόψη τα φυσικά και μαθηματικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας και δίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4. 3 Ισοδύναμο κύκλωμα της VRB

Το προτεινόμενο αυτό μοντέλο έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

- i. Το SOC (State of Charge) μοντελοποιείται ως μια δυναμικά μεταβαλλόμενη μεταβλητή
- ii. Η τάση του κελιού V_{stack} μοντελοποιείται σαν μια ελεγχόμενη πηγή τάσης
- iii. Η ισχύς των γεννητριών μοντελοποιείται σαν μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος που ελέγχεται από το ρεύμα I_{pump} που σχετίζεται άμεσα με το ρεύμα του κελιού I_{stack} και το SOC
- iv. Οι απώλειες στην εσωτερική αντίσταση $R_{internal}$ εκφράζουν τις απώλειες που οφείλονται στο ρυθμό χημικών αντιδράσεων, στην αντίσταση μεταφοράς μάζας των ηλεκτρολυτών και στην αντίσταση της μεμβράνης, των ηλεκτροδίων και της διπολικής πλάκας.
- v. Οι απώλειες στην παρασιτική αντίσταση $R_{parasitic}$ εκφράζουν την κατανάλωση των αντλιών, του συστήματος ελέγχου καθώς και άλλες μικρότερες απώλειες
- vi. Ο κλάδος του πυκνωτή αγνοείται στο παρόν μοντέλο, αφού σχετίζεται με μεταβατικές καταστάσεις της μπαταρίας κατά τη δυναμική εξέτασή της. Εμείς όμως στο παρόν μοντέλο εξετάζουμε καταστάσεις μόνιμης λειτουργίας. Έτσι η εσωτερική αντίσταση θα είναι : $R = R_{reactor} + R_{resistive}$

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία εύρεσης των τιμών των παραπάνω παραμέτρων. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί για οποιοδήποτε μέγεθος μπαταρίας, δοθέντων των βασικών κατασκευαστικών χαρακτηριστικών. Έτσι το μοντέλο αυτό μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά οποιαδήποτε μπαταρία σε κάθε μέγεθος.

4.4 Εύρεση παραμέτρων και εξισώσεις περιγραφής του μοντέλου

Οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος υπολογίζονται θεωρώντας απώλειες 21%, εκ των οποίων 15% εσωτερικές απώλειες και 6% παρασιτικές απώλειες, για το χειρότερο σημείο λειτουργίας, όταν το SOC είναι γύρω στο 20%. Έτσι για να μπορέσει η μπαταρία να αποδώσει την ονομαστική της ισχύ με αυτές τις απώλειες, θα πρέπει η ισχύς εξόδου του κελιού να είναι :

$$P_{stack} = \frac{P_N}{(100 - 21)\%}$$

Έχουν λοιπόν προκύψει, σύμφωνα με τη δημοσίευση [32] οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος που δίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 4. 1 Παράμετροι της VRB που προσομοιώνεται

Σύνθεση κελιού n	648
Χωρητικότητα Ενέργειας E_N	270*8 kWh
Ονομαστική Ισχύς P_N	270 kW
Αρχική τιμή Τάσης V_N	810 V
$R_{reaction}$	0.174 Ω
$R_{resistive, losses}$	0.116 Ω
R	0.29 Ω
R_{fixed}	60.5 Ω

Η τάση των επιμέρους μικρότερων κελιών της VRB συνδέεται με το SOC της σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$$V_{cell} = V_{equilibrium} + 2 \cdot k \cdot \ln\left(\frac{SOC}{1 - SOC}\right)$$

- $V_{equilibrium} = 1.25$ V, είναι σταθερά που αντιστοιχεί στο κανονικό δυναμικό του οξειδοαναγωγικού ζεύγους (ηλεκτροχημική ιδιότητα)
- $k = 0.059$, είναι σταθερά που συνδέεται με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος της μπαταρίας

Ενώ η τάση του κελιού της VRB προκύπτει από το άθροισμα των τιμών τάσης των επιμέρους κελιών αφού αυτά, λόγω διάταξης, είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Άρα :

$$V_{stack} = n \cdot V_{cell}$$

Οι σχέσεις που συνδέονται με το ισοδύναμο κύκλωμα είναι οι εξής :

$$\Rightarrow P_b = I_b \cdot V_b \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow V_b &= n \left(V_{equilibrium} + 2 \cdot k \cdot \ln\left(\frac{SOC}{1 - SOC}\right) \right) \pm I_{stack} \cdot R \\ &\rightarrow V_b(I_{stack}, SOC) \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\Rightarrow I_b = I_{stack} \pm I_{parasitic} \quad (4.3)$$

$$\Rightarrow I_{parasitic} = I_{fixed} + I_{pump}$$

$$\Rightarrow I_{pump} = k' \frac{I_{stack}}{SOC} \cdot \frac{1}{V_b} \quad (4.4)$$

$$\Rightarrow I_{fixed} = \frac{V_b}{R_{fixed}} \quad (4.5)$$

Τα πρόσημα των παραπάνω σχέσεων καθορίζονται από την εκάστοτε λειτουργία της μπαταρίας και αναλύονται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Με επίλυση του παραπάνω συστήματος των 4 εξισώσεων (4.1), (4.2), (4.3), (4.4) βρίσκονται οι 4 άγνωστοι που είναι οι : V_b , I_b , I_{stack} , I_{pump}

Έτσι μπορώ να υπολογίσω τις απώλειες της μπαταρίας από τις παρακάτω σχέσεις :

$$\Rightarrow P_{fixed} = \frac{V_b^2}{R_{fixed}} = \frac{(V_b(I_{stack}))^2}{R_{fixed}} \quad (4.6)$$

$$\Rightarrow P_{pump} = k' \left(\frac{I_{stack}}{SOC} \right) \quad (4.7)$$

$$\Rightarrow P_{parasitic} = P_{fixed} + P_{pump} \quad (4.8)$$

$$\Rightarrow P_{internal} = I_{stack}^2 \cdot R \quad (4.9)$$

Άρα οι συνολικές απώλειες της VRB θα είναι :

$$P_{total} = P_{internal} + P_{parasitic} \quad (4.10)$$

Το k' είναι μια σταθερά αναλογίας που καθορίζει τη σχέση των απωλειών της αντλίας με το I_{stack} και το SOC. Η τιμή της έχει υπολογιστεί από πειραματικές μετρήσεις [34] και είναι:

$$\blacksquare \quad k' = 7.08$$

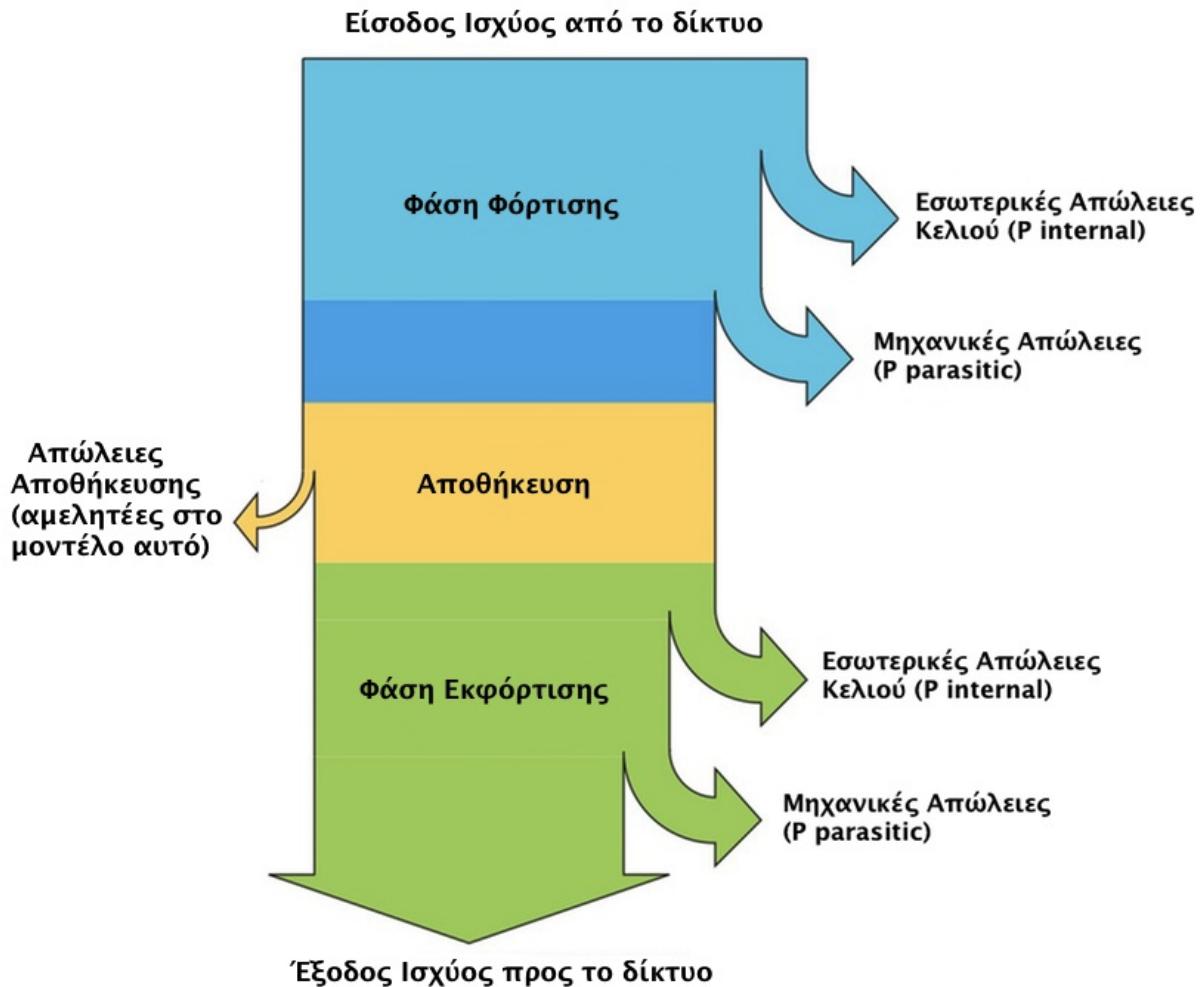
Κατά σύμβαση στη φάση της φόρτισης, όταν η ροή της ισχύος γίνεται από το δίκτυο στην μπαταρία, τότε τη θεωρούμε αρνητική $P_{net} < 0$. Για τους υπολογισμούς στις εξισώσεις παίρνω κάθε φορά την απόλυτη τιμή. Έτσι η P_{stack} υπολογίζεται πάντα θετική και ανάλογα με τη λειτουργία της μπαταρίας τη θεωρώ αρνητική ή θετική ώστε να υπολογιστεί το ΔSOC

Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται η ροή της ισχύος και οι απώλειες σε ένα κύκλο φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Είναι φανερό ότι η τελική ενέργεια που θα δώσει η μπαταρία στο δίκτυο θα είναι μικρότερη από αυτή που δέχτηκε κατά τη φόρτισή της, αφού θα έχει χαθεί μέρος της με τη μορφή απωλειών τόσο στη φόρτιση, όσο και στην εκφόρτιση.

Το ποσοστό που χάνεται σε έναν κύκλο φόρτισης, εκφόρτισης υπολογίζεται μέσω του βαθμού απόδοσης ολόκληρου κύκλου (n round trip) ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο της ενέργειας που απέδωσε τελικά η μπαταρία προς την ενέργεια που απορρόφησε αρχικά.

$$n_{\text{round trip}} = \frac{E_{\text{discharge}}}{E_{\text{charge}}} = \frac{P_{\text{discharge}}}{P_{\text{charge}}} = \frac{P_{\text{stack}} - P_{\text{total}}}{P_{\text{stack}} + P_{\text{total}}}$$

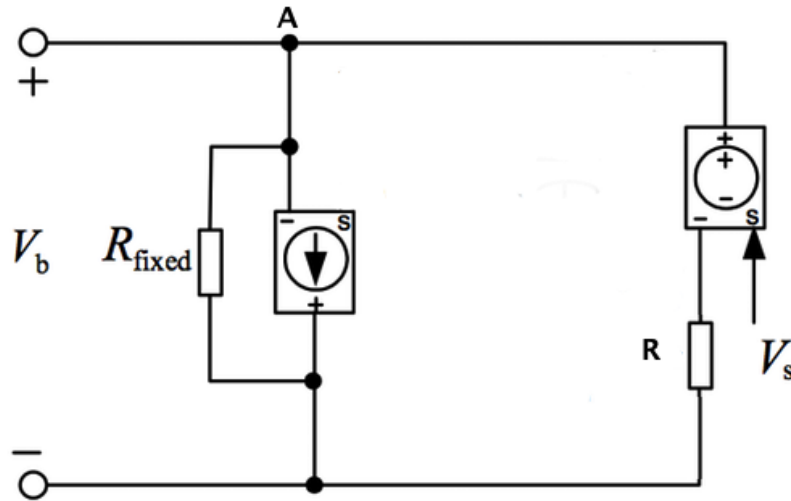
Διάγραμμα Ισχύος και απωλειών της VRB



Σχήμα 4. 4 Διάγραμμα ροής ισχύος της VRB

4.5 Η μορφή των εξισώσεων ανάλογα με την περίπτωση λειτουργίας

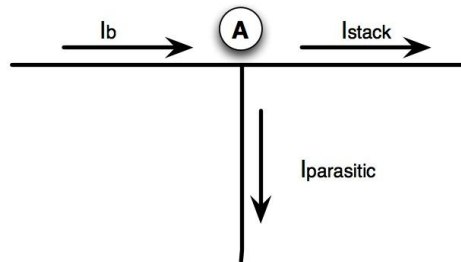
Διακρίνουμε δύο βασικές περιπτώσεις λειτουργίας της μπαταρίας, τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε ροή ισχύος από το δίκτυο προς την μπαταρία, ενώ αντίθετα στη δεύτερη περίπτωση η ροή ισχύος είναι από τη μπαταρία προς το δίκτυο. Λόγω της διαφορετικής φοράς των ρευμάτων στο ισοδύναμο πρέπει να ορίσουμε τα κατάλληλα πρόσημα στις εξισώσεις.



Σχήμα 4. 5 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα VRB

4.5.1 1^η περίπτωση (φόρτιση) :

Στην περίπτωση αυτή το δίκτυο δίνει ισχύ P_b μέρος της οποίας καλύπτει τις ανάγκες των αντλιών και η υπόλοιπη αποθηκεύεται στο κελί της μπαταρίας. Άρα η φορά των ρευμάτων στον κόμβο A του παραπάνω ισοδύναμου μοντέλου θα είναι :



- $V_b = V_s + I_{stack} \cdot R$

Άρα οι εξισώσεις (4.1), (4.2), (4.3) θα πάρουν την εξής μορφή :

- $I_b = I_{stack} + I_{parasitic}$
- $|P_{net}| = I_b \cdot V_b$
- $V_b = n \left(V_{equilibrium} + 2 \cdot k \cdot \ln \left(\frac{SOC}{1-SOC} \right) \right) + I_{stack} \cdot R$
- $I_{pump} = k' \cdot \frac{I_{stack}}{SOC} \cdot \frac{1}{V_b}$

Όλες οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να συνδυαστούν σε μία εξίσωση με άγνωστο μόνο το I_{stack} η οποία είναι πιο εύκολο να λυθεί με επαναληπτικές μεθόδους στον υπολογιστή. Η εξίσωση αυτή είναι η εξής :

$$\rightarrow f(I_{stack}) \rightarrow f = (V_s + I_{stack} \cdot R) \cdot \left(I_{stack} + \frac{V_b}{R_{fixed}} + k' \cdot \frac{I_{stack}}{SOC} \cdot \frac{1}{V_b} \right) - |P_{net}|$$

Αφού υπολογιστεί το I_{stack} είναι πολύ εύκολο να υπολογιστούν οι απώλειες με χρήση των εξισώσεων (4.6), (4.7), (4.8), (4.9), (4.10).

Έτσι τελικά θα είναι :

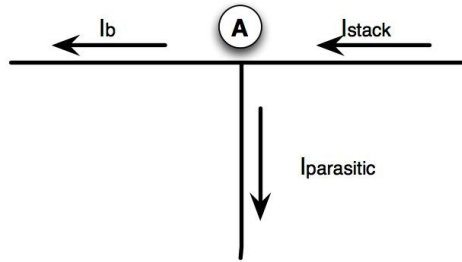
- $P_{stack} = |P_{net}| - P_{total}$
- $E_{stored}(t + 1) = E_{stored}(t) + P_{stack}(t) \cdot \Delta t$

Όπου :

- E_{stored} : η ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στη μπαταρία κάθε χρονική στιγμή t
- Δt : το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η μπαταρία φορτίζεται με την ισχύ αυτή

4.5.2 2^η περίπτωση (εκφόρτιση) :

Στην περίπτωση αυτή η μπαταρία δίνει ισχύ P_b μέρος της οποίας καλύπτει τις ανάγκες των αντλιών και η υπόλοιπη πηγαίνει προς το δίκτυο. Άρα η φορά των ρευμάτων στον κόμβο A του παραπάνω ισοδύναμου μοντέλου θα είναι :



- $V_b = V_s - I_{stack} \cdot R$

Άρα οι εξισώσεις (4.1), (4.2), (4.3) θα πάρουν την εξής μορφή :

- $I_b = I_{stack} - I_{parasitic}$
- $P_{net} = I_b \cdot V_b > 0$
- $V_b = n \left(V_{equilibrium} + 2 \cdot k \cdot \ln \left(\frac{SOC}{1-SOC} \right) \right) - I_{stack} \cdot R$
- $I_{pump} = k' \cdot \frac{I_{stack}}{SOC} \cdot \frac{1}{V_b}$

Όλες οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να συνδυαστούν στην εξής:

$$\rightarrow f(I_{stack}) \rightarrow f = (V_s - I_{stack} \cdot R) \cdot \left(I_{stack} - \frac{V_b}{R_{fixed}} - k' \cdot \frac{I_{stack}}{SOC} \cdot \frac{1}{V_b} \right) - P_{net}$$

Υπολογίζεται το I_{stack} και οι απώλειες όμοια με την 1^η περίπτωση.

Έτσι τελικά θα είναι :

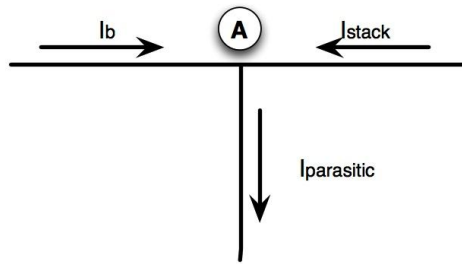
- $P_{stack} = |P_{net}| + P_{total}$
- $E_{stored}(t+1) = E_{stored}(t) - P_{stack}(t) \cdot \Delta t$

4.5.3 3^η περίπτωση (το δίκτυο δεν επαρκεί για την κάλυψη των P_{fixed}) :

Κατά την περίπτωση αυτή η μπαταρία βρίσκεται ουσιαστικά σε κατάσταση αδράνειας και το δίκτυο δεν δίνει τίποτα ή δίνει ισχύ P_b ώστε να καλύψει μέρος της ισχύος που απαιτούνται για την κάλυψη των απωλειών. Οι υπόλοιπες απώλειες καλύπτονται με αυτοεκφόρτιση της μπαταρίας, η οποία χάνει ποσοστό της αποθηκευμένης ενέργειάς της για να καλυφθούν οι απώλειες της και να παραμείνει σε λειτουργία.

Ουσιαστικά αυτή η περίπτωση συναντάται μόνο σε απομονωμένα συστήματα, όπου δεν έχει γίνει προγραμματισμός της λειτουργίας της μπαταρίας. Η μπαταρία στα συστήματα αυτά ωστόσο δεν μπορεί να παραμείνει σε λειτουργία αν υπάρχουν μεγάλα διαστήματα χωρίς συνεισφορά από το δίκτυο.

Η φορά των ρευμάτων στον κόμβο A του παραπάνω ισοδύναμου μοντέλου θα είναι :



- $V_b = V_s - I_{stack} \cdot R$

Αρα οι εξισώσεις (4.1), (4.2), (4.3) θα πάρουν την εξής μορφή :

- $I_b = I_{parasitic} - I_{stack}$
- $|P_{net}| = I_b \cdot V_b$
- $V_b = n \left(V_{equilibrium} + 2 \cdot k \cdot \ln \left(\frac{SOC}{1-SOC} \right) \right) - I_{stack} \cdot R$
- $I_{pump} = k' \cdot \frac{I_{stack}}{SOC} \cdot \frac{1}{V_b}$

Όλες οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να συνδυαστούν στην εξής:

$$\rightarrow f(I_{stack}) \rightarrow f = (V_s - I_{stack} \cdot R) \cdot \left(\frac{V_b}{R_{fixed}} + k' \cdot \frac{I_{stack}}{SOC} \cdot \frac{1}{V_b} - I_{stack} \right) - |P_{net}|$$

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις υπολογίζεται το I_{stack} και μετά οι απώλειες.

Έτσι τελικά θα είναι :

- $P_{stack} = P_{total} - |P_{net}|$
- $E_{stored}(t+1) = E_{stored}(t) - P_{stack}(t) \cdot \Delta t$

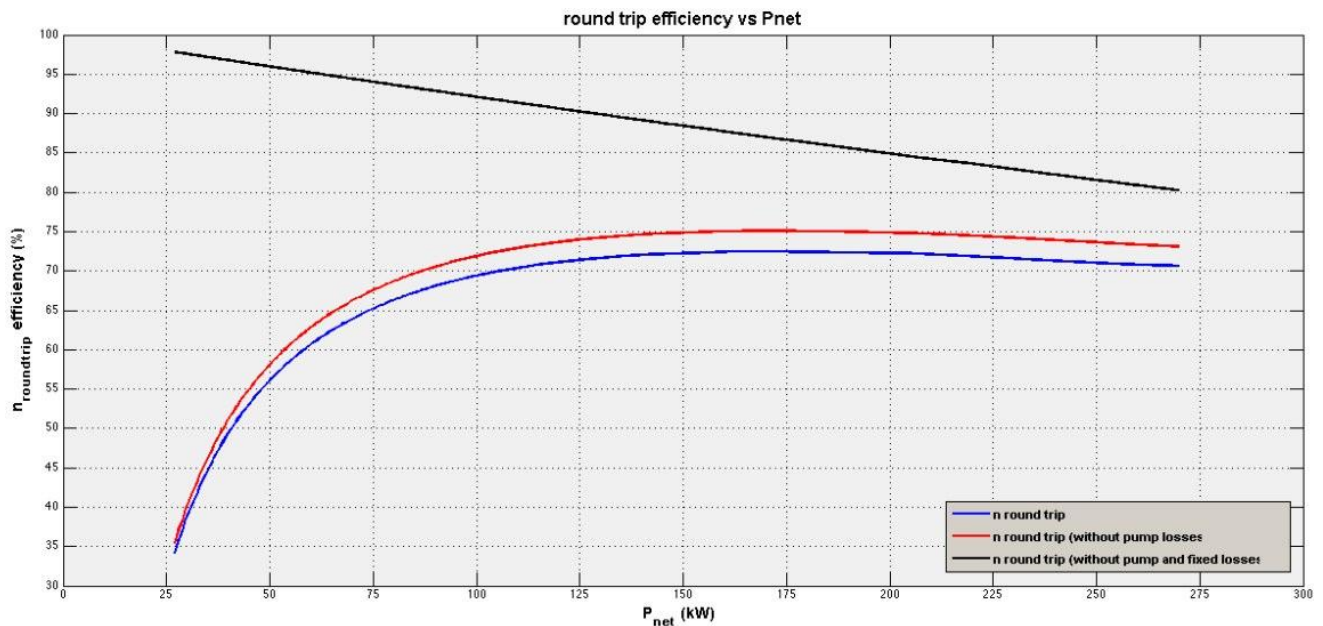
4.6 Διαγράμματα από προσομοίωση του μοντέλου

Προσμοιώνοντας το μοντέλο στο λογισμικό MatLab προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα που αφορούν το βαθμό απόδοσης της VRB και την τιμή της τάσης για διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

4.6.1 Διαγράμματα του $n_{\text{roundtrip}}$

Αρχικά υπολογίστηκε ο βαθμός απόδοσης ενός κύκλου φόρτισης – εκφόρτισης με σταθερή τιμή ισχύος της μπαταρίας. Αυτό έγινε για 3 περιπτώσεις που φαίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 4.6.

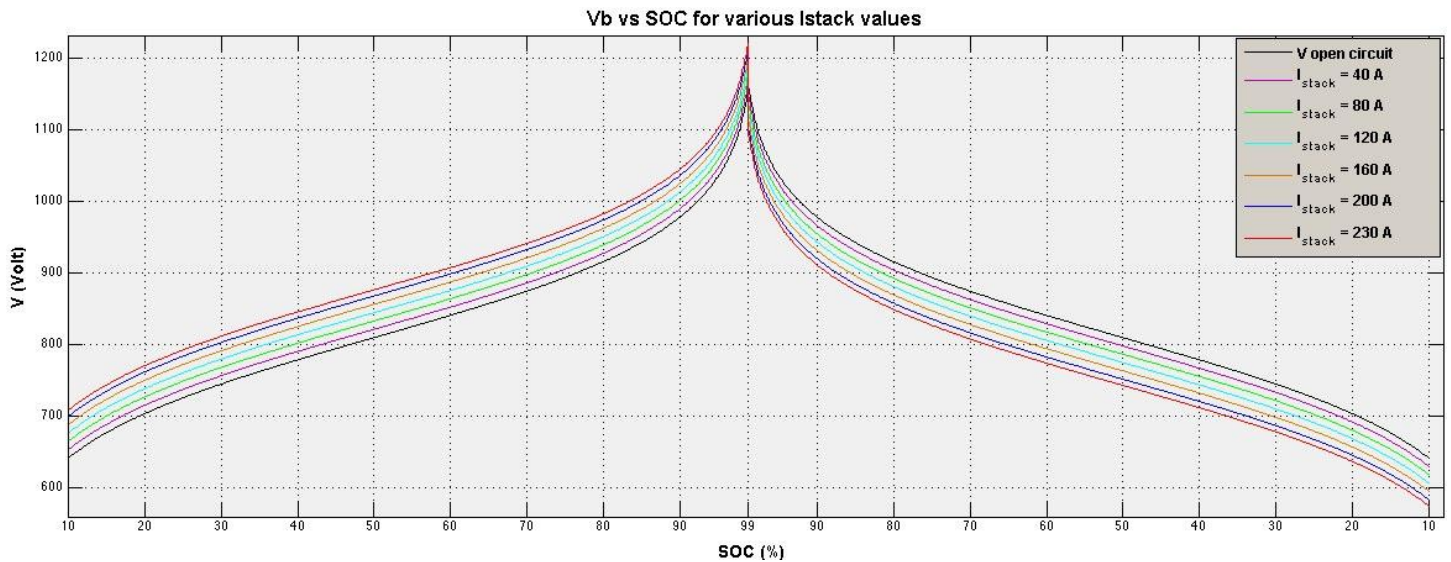
- Χωρίς να υπολογιστούν οι απώλειες της αντλίας και των λοιπών βοηθητικών συστημάτων, παρά μόνο οι εσωτερικές απώλειες
- Χωρίς να υπολογιστούν οι απώλειες της αντλίας, παρά μόνο οι εσωτερικές απώλειες και οι απώλειες των λοιπών συστημάτων
- Με όλες τις απώλειες υπολογισμένες



Σχήμα 4. 6 Διάγραμμα του $n_{\text{roundtrip}}$ συναρτήσει της P_{net}

4.6.2 Τάση της VRB συναρτήσει του SoC για σταθερή τιμή ρεύματος

Υπολογίζεται εδώ η μεταβολή της τάσης της μπαταρίας με το SoC για λειτουργία της μπαταρίας με σταθερό ρεύμα I_{stack} . Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4. 7 Τάση της μπαταρίας V_b συναρτήσει του SoC για διάφορες τιμές του I_{stack}

Παρατηρούμε ότι στη φόρτιση, όσο αυξάνεται το ρεύμα, τόσο αυξάνεται και η τάση στα άκρα της μπαταρίας. Αντίθετα στην εκφόρτιση η αύξηση του ρεύματος προκαλεί πτώση στην τάση της μπαταρίας. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη των εσωτερικών απωλειών. Κατά τη φόρτιση λοιπόν απαιτείται επιπλέον ενέργεια για την κάλυψη των απωλειών αυτών και αυτό φαίνεται στην αύξηση της τάσης που «βλέπει» το δίκτυο. Αντίστοιχα στην εκφόρτιση η μπαταρία καλύπτει τις εσωτερικές απώλειες και γι' αυτό παρουσιάζεται πτώση τάσης στα άκρα της.

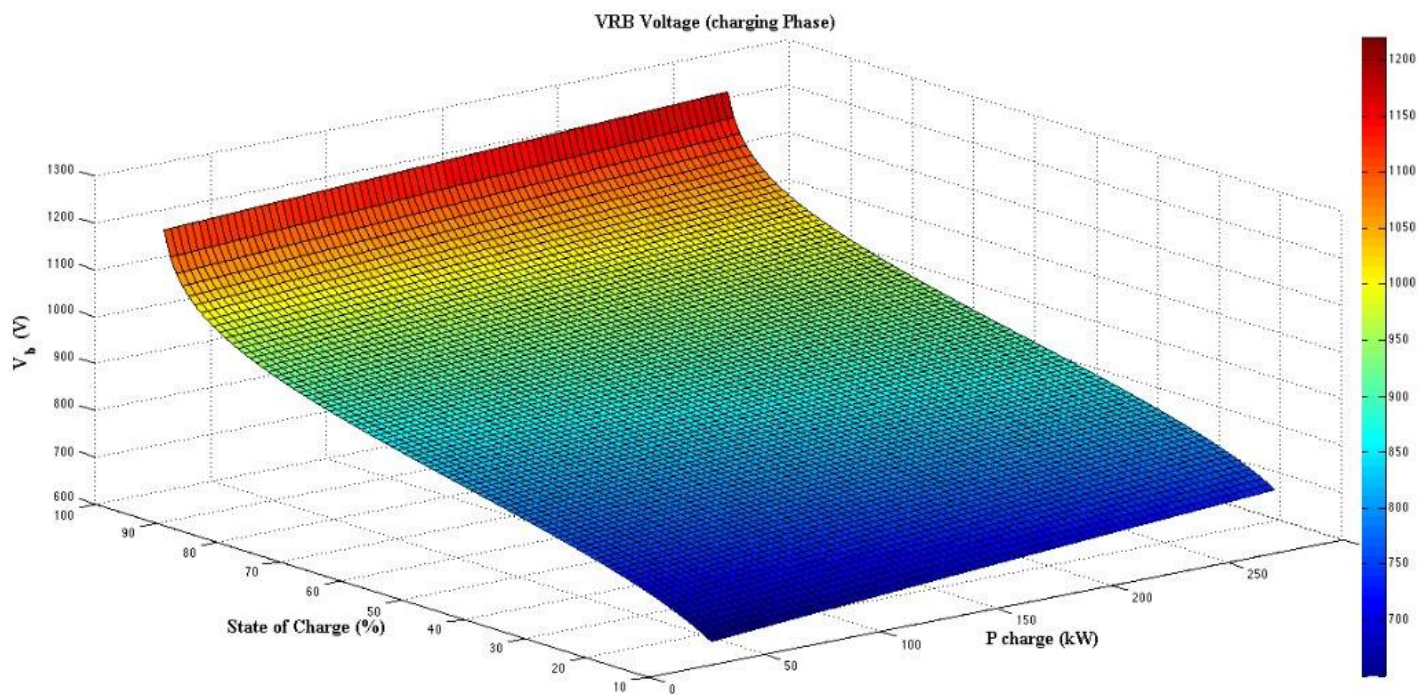
4.6.3 Τάση της VRB V_b συναρτήσει του SoC και της ισχύος

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης της VRB για διάφορες τιμές ισχύος φόρτισης ή εκφόρτισης καθώς επίσης και για διάφορα SoC της μπαταρίας.

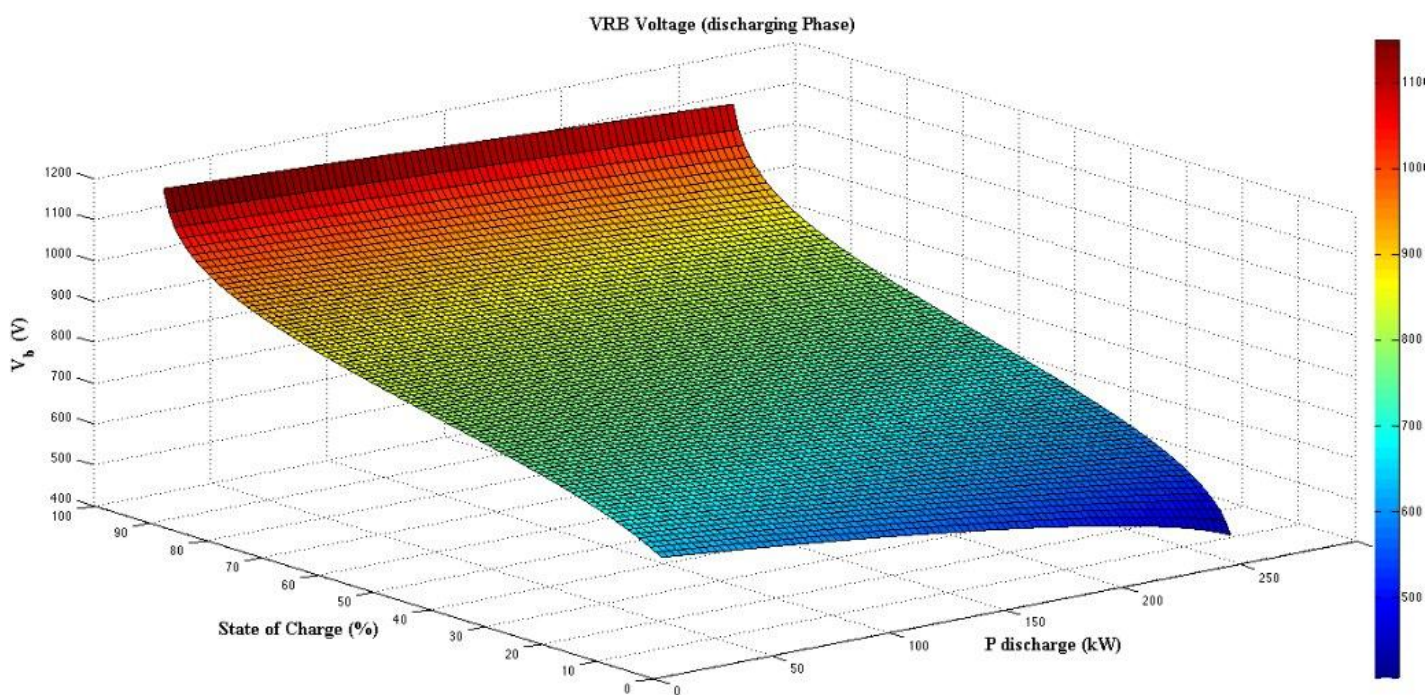
Παρατηρούμε ότι η μεταβολή της τάσης για μεταβολή της ισχύος είναι μικρή και γραμμική, αφού οφείλεται μόνο στις εσωτερικές απώλειες της μπαταρίας. Η αύξηση της ισχύος, άρα και του ρεύματος της μπαταρίας επιφέρει αύξηση της τάσης κατά τη διάρκεια της φόρτισης (σχήμα 4.8) και μείωση της τάσης κατά την εκφόρτιση (σχήμα 4.9).

Η μεταβολή της τάσης ανάλογα με το SoC είναι εκθετική. Όσο αυξάνεται το SoC τόσο αυξάνεται και η τάση της μπαταρίας, σύμφωνα με τον τύπο :

$$V_b = n \left(V_{equilibrium} + 2 \cdot k \cdot \ln \left(\frac{SOC}{1 - SOC} \right) \right) \pm I_{stack} \cdot R$$



Σχήμα 4. 8 Η τάση της μπαταρίας κατά τη φόρτιση



Σχήμα 4. 9 Η τάση της μπαταρίας κατά την εκφόρτιση

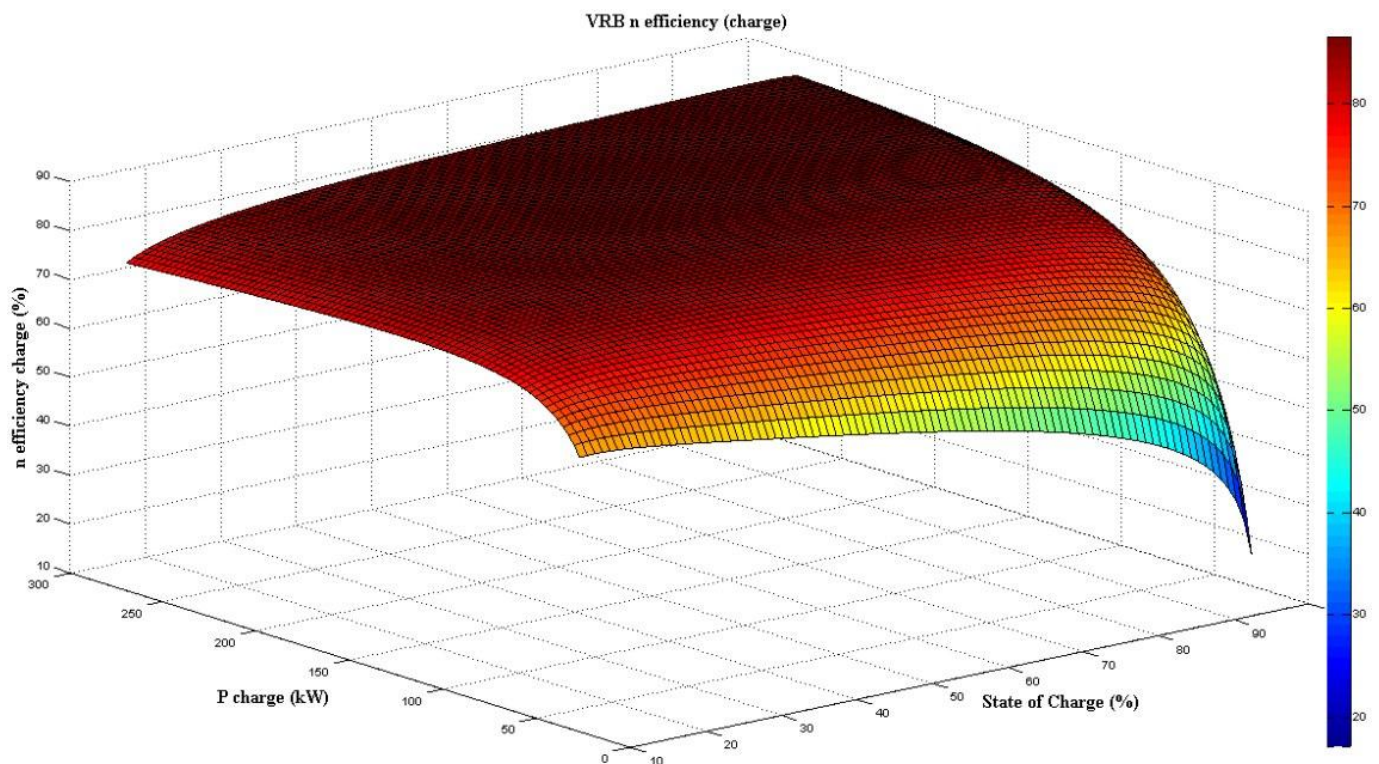
4.6.4 Ο βαθμός απόδοσης της VRB V_b για διάφορες συνθήκες λειτουργίας

Ο βαθμός απόδοσης της μπαταρίας αποτελεί ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της, καθώς μας δείχνει το ποσοστό της ισχύος που αξιοποιείται κάθε στιγμή από την μπαταρία, είτε αποθηκεύεται στον ηλεκτρολύτη είτε αποδίδεται στο δίκτυο, από τη συνολική ισχύ που διαρρέει τη μπαταρία. Αποτελεί δηλαδή ο βαθμός απόδοσης ένα μέτρο των απωλειών που έχουμε τη δεδομένη χρονική στιγμή.

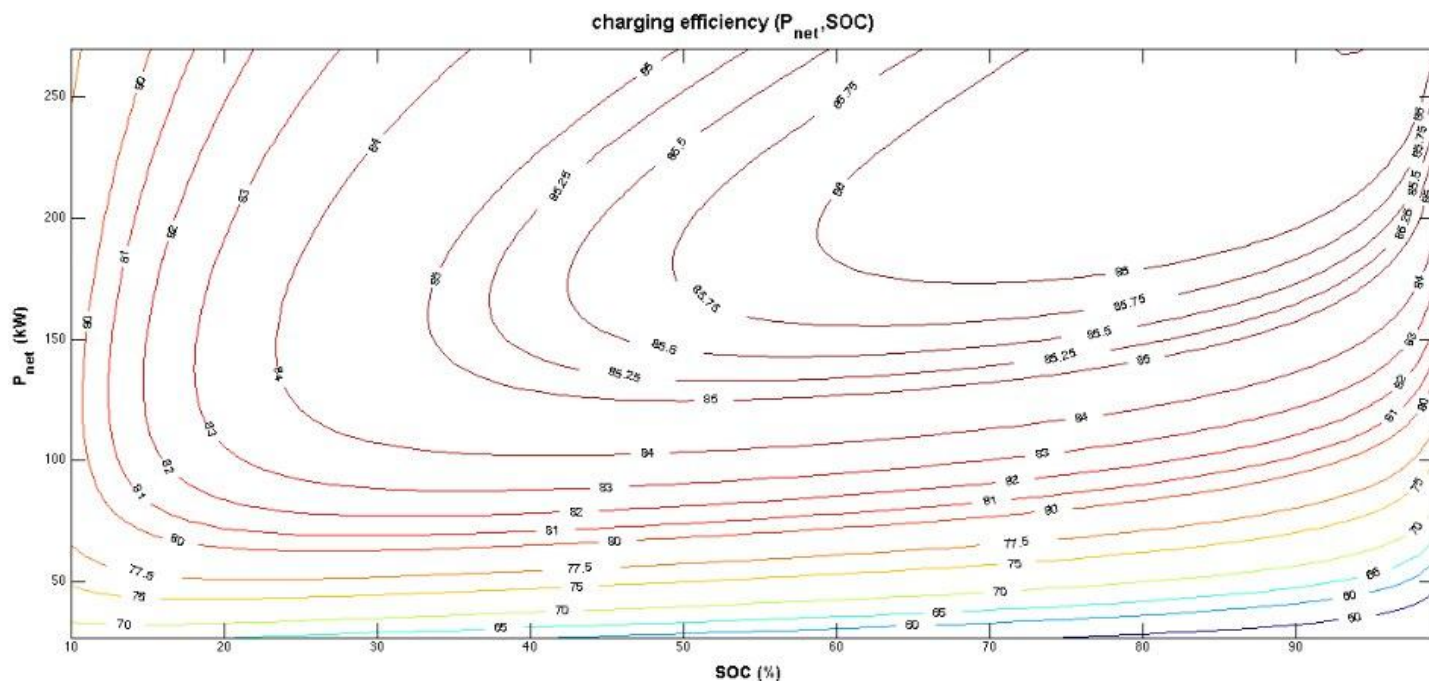
Η αναλυτική εξέταση του βαθμού απόδοσης μας δείχνει τις συνθήκες λειτουργίας για τις οποίες η μπαταρία παρουσιάζει τη βέλτιστη απόδοση, καθώς επίσης και της συνθήκες για τις οποίες η λειτουργία της μπαταρίας κρίνεται μη αποδεκτή. Μπορούμε λοιπόν, εξετάζοντας το βαθμό απόδοσης να καθορίσουμε την πολιτική με την οποία θα φορτίζουμε ή θα εκφορτίζουμε την μπαταρία για να έχουμε τις ελάχιστες δυνατές απώλειες, άρα και την πιο συμφέρουσα λειτουργία της VRB.

4.6.4.1 Βαθμός απόδοσης για τη φόρτιση

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται ο βαθμός απόδοσης της VRB συναρτήσει των SoC και της ισχύος. Το δεύτερο διάγραμμα (σχήμα 4.11) αποτελεί ουσιαστικά μια δισδιάστατη προβολή του πρώτου διαγράμματος (σχήμα 4.10), με τις γραμμές να αντιστοιχούν σε σημεία με ίδια τιμή βαθμού απόδοσης, έτσι ώστε να είναι πιο ευανάγνωστες οι τιμές του βαθμού απόδοσης, αφού το πρώτο διάγραμμα βοηθάει περισσότερο στην ποιοτική εκτίμηση των τιμών.



Σχήμα 4. 10 Ο βαθμός απόδοσης της VRB συναρτήσει των SoC και P_{charge} (φόρτιση)



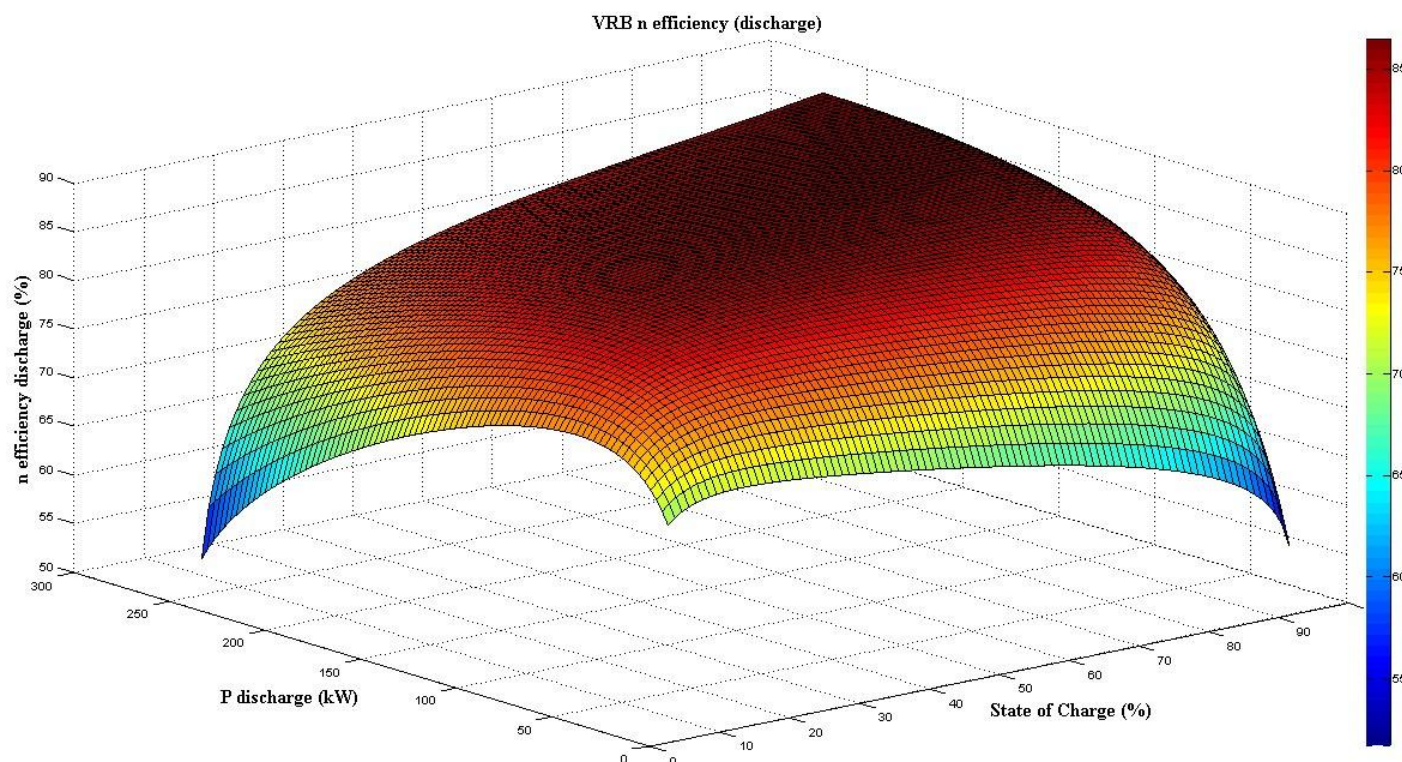
Σχήμα 4. 11 Δισδιάστατη απεικόνιση του παραπάνω διαγράμματος

Παρατηρούμε ότι για τιμές της ισχύος πάνω από τα 20 kW (περίπου 10% επί της ονομαστικής ισχύος) ο βαθμός απόδοσης παίρνει πολύ καλές τιμές (70 – 86 %). Για πολύ χαμηλά SoC ο βαθμός απόδοσης παίρνει τιμές κοντά στο 70% ενώ για όλες τις υπόλοιπες τιμές του SoC ο βαθμός απόδοσης είναι πάνω από 77.5%.

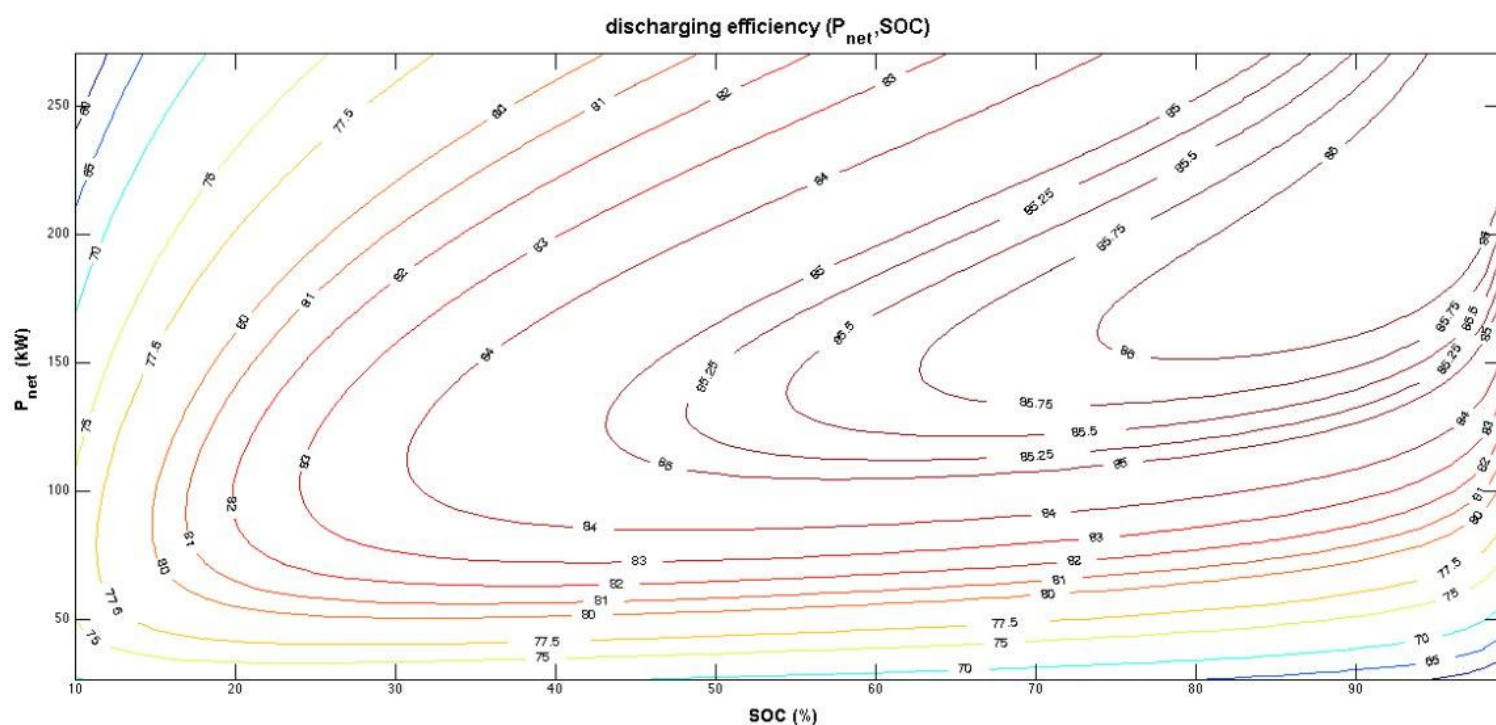
Ωστόσο για τιμές της ισχύος κάτω από τα 50 kW (18% επί της ονομαστικής ισχύος) και κυρίως για SoC πάνω από 50 % ο βαθμός απόδοσης πέφτει τόσο πολύ που καθιστά εντελώς ασύμφορη τη λειτουργία της μπαταρίας. Ειδικά στις κρίσιμες (μπλε) περιοχές του διαγράμματος 4.10 το μεγαλύτερο ποσό της ενέργειας που απορροφά η μπαταρία χάνεται σε απώλειες και μόνο.

4.6.4.2 Βαθμός απόδοσης για την εκφόρτιση

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται ο βαθμός απόδοσης της VRB συναρτήσει των SoC και της ισχύος για τη φάση της εκφόρτισης. Και εδώ το δεύτερο διάγραμμα (σχήμα 4.13) αποτελεί μια δισδιάστατη προβολή του πρώτου διαγράμματος (σχήμα 4.12), με τις γραμμές να αντιστοιχούν σε σημεία με ίδια τιμή βαθμού απόδοσης, έτσι ώστε να είναι πιο ευανάγνωστες οι τιμές του βαθμού απόδοσης, αφού το πρώτο διάγραμμα βοηθάει περισσότερο στην ποιοτική εκτίμηση των τιμών.



Σχήμα 4. 12 Ο βαθμός απόδοσης της VRB συναρτήσει των SoC και P_{charge} (εκφόρτιση)



Σχήμα 4. 13 Λισδιάστατη απεικόνιση του παραπάνω διαγράμματος

Παρατηρούμε ότι για τιμές της ισχύος πάνω από τα 20 kW (περίπου 10% επί της ονομαστικής ισχύος) ο βαθμός απόδοσης παίρνει πολύ καλές τιμές (70 – 86 %), με εξαίρεση την περιοχή λειτουργίας για $SoC < 20\%$ και $P_{net} > 200$ kW (75% επί της ονομαστικής), όπου ο βαθμός απόδοσης πέφτει πολύ.

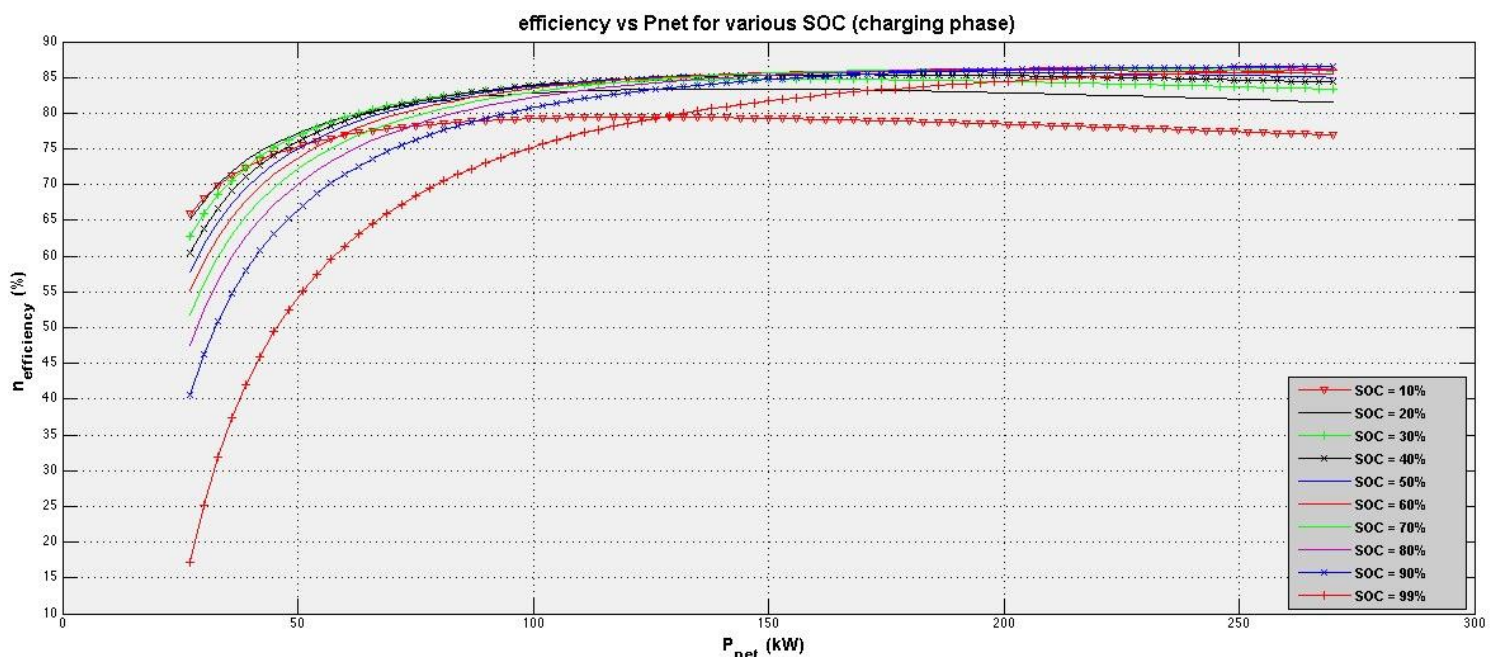
Ωστόσο για τιμές της ισχύος κάτω από τα 50 kW (18% επί της ονομαστικής ισχύος) και κυρίως για SoC πάνω από 50 % ο βαθμός απόδοσης πέφτει τόσο πολύ που καθιστά εντελώς ασύμφορη τη λειτουργία της μπαταρίας. Ειδικά στις κρίσιμες (μπλε) περιοχές του διαγράμματος 4.12 το μεγαλύτερο ποσό της ενέργειας που δίνει η μπαταρία χάνεται σε απώλειες και μόνο.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η μπαταρία πρέπει κατά την εκφόρτωση να υποφορτίζεται μέχρι το 18% γιατί από εκεί και κάτω η λειτουργία της δεν είναι αποδοτική. Ακόμη πρέπει να αποφεύγεται η εκφόρτισή της με πολύ μεγάλες τιμές ισχύος, (πάνω από 75 % επί της ονομαστικής τιμής), όταν το SoC είναι πολύ μικρό.

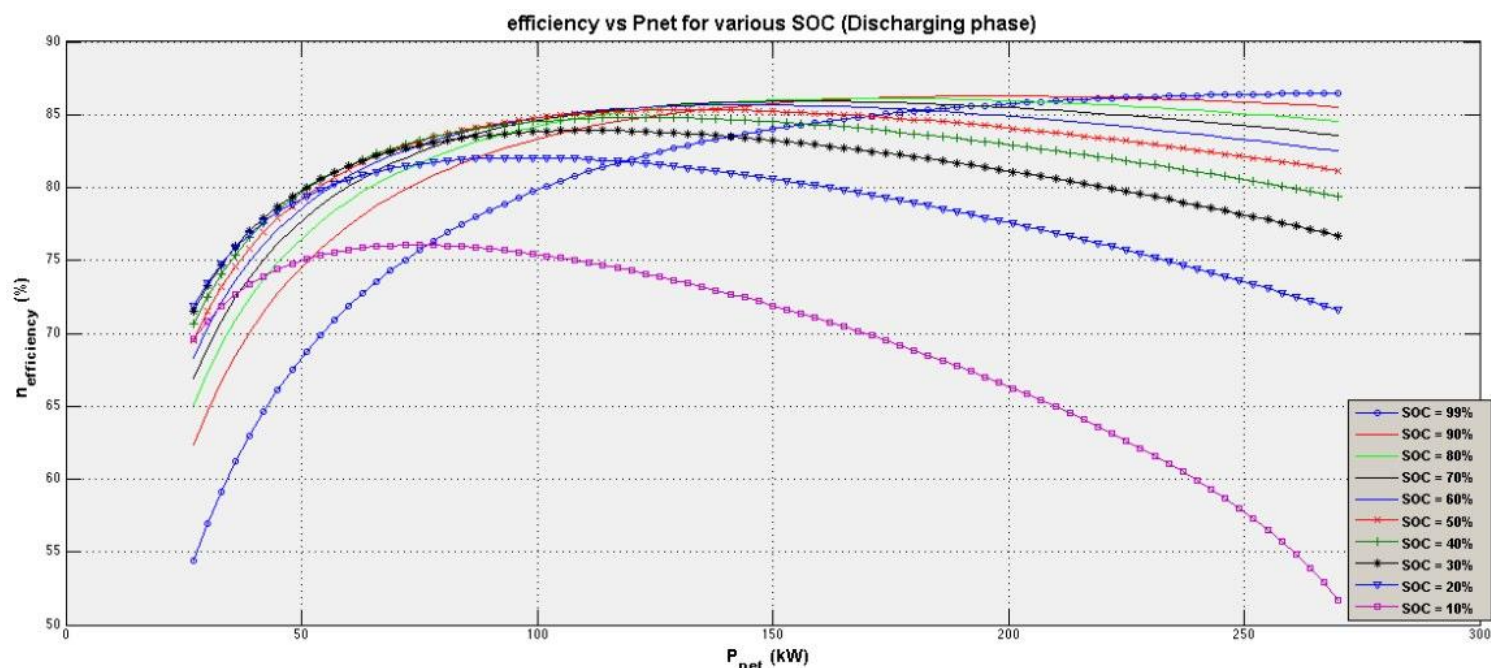
Η σωστή λειτουργία της μπαταρίας με σωστή ρύθμιση του συστήματος ελέγχου δίνει τη δυνατότητα βέλτιστης εκμετάλλευσης της ενέργειας που αποθηκεύει η μπαταρία.

4.6.4.3 Επίτευξη βέλτιστου βαθμού απόδοσης με ρύθμιση της ισχύος

Στα παρακάτω σχήματα (4.14) και (4.15) παρουσιάζεται και πάλι η μεταβολή του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της ισχύος φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας αντίστοιχα. Εδώ όμως έχουν επιλεγεί 10 τιμές για το SoC και η κάθε καμπύλη περιγράφει τη μεταβολή απόδοσης μόνο για τη συγκεκριμένη τιμή του SoC . Αυτό μας βοηθάει να βρούμε τις μέγιστες τιμές του η για κάθε SoC ώστε να επιλέξουμε σωστή πολιτική λειτουργίας.

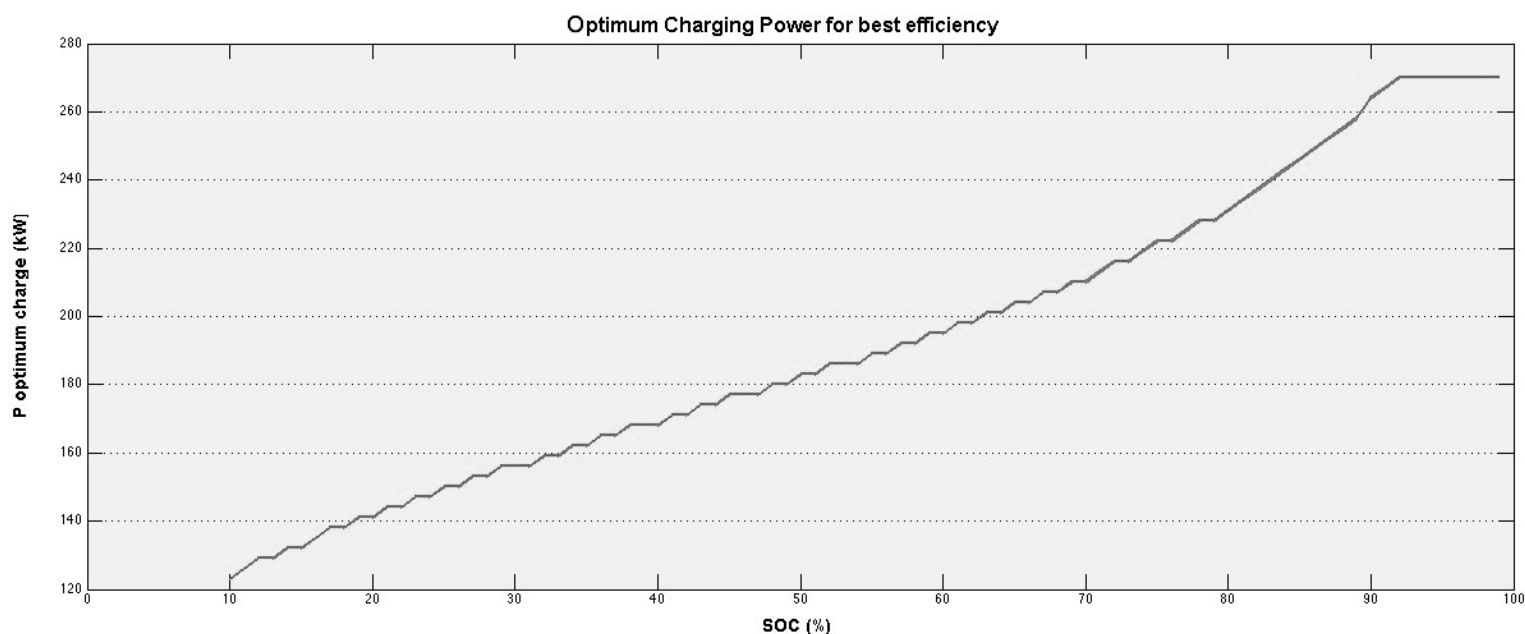


Σχήμα 4. 14 Μεταβολή του $\eta_{efficiency}$ συναρτήσει του P_{net} για 10 τιμές SoC (φόρτιση)



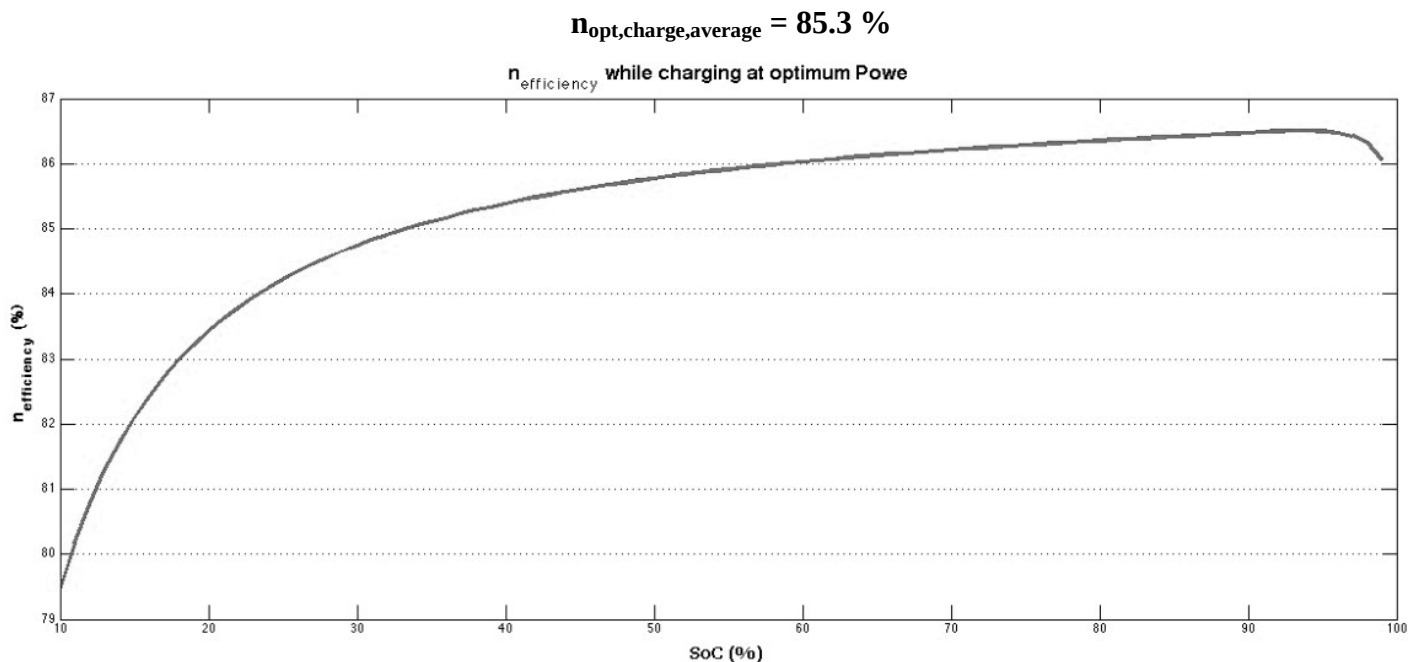
Σχήμα 4. 15 Μεταβολή του $\eta_{\text{efficiency}}$ συναρτήσει του P_{net} για 10 τιμές του SoC (εκφόρτιση)

Λαμβάνοντας τις μέγιστες τιμές για το βαθμό απόδοσης καθώς επίσης και σε ποια τιμή της ισχύος αντιστοιχεί, για κάθε τιμή του SoC. Σχεδιάζουμε την καμπύλη του σχήματος 4.16, που απεικονίζει τη μεταβολή του P_{charge} κατά τη διάρκεια της φόρτισης ώστε η VRB να λειτουργεί πάντα με τη βέλτιστη απόδοση. Η καμπύλη αυτή παρουσιάζει μεγαλύτερο πρακτικό ενδιαφέρον για τη φάση της φόρτισης και όχι για την εκφόρτιση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η φόρτιση μπορεί να προγραμματιστεί καλύτερα, ενώ η εκφόρτιση εξαρτάται άμεσα από τη ζήτηση των φορτίων.



Σχήμα 4. 16 Βέλτιστη ισχύς φόρτισης για επίτευξη της μέγιστης απόδοσης

Έτσι λοιπόν, επιτυγχάνεται η παρακάτω καμπύλη του βαθμού απόδοσης (σχήμα 4.17), ενώ τελικά η μέση τιμή του βαθμού απόδοσης είναι:



Σχήμα 4. 17 Καμπύλη βαθμού απόδοσης κατά τη φόρτιση με τη βέλτιστη ισχύ

4.7 Προσομοίωση ένταξης του BESS σε αυτόνομο σύστημα

Στο παρόν υποκεφάλαιο γίνεται χρήση του παραπάνω μοντέλου της VRB για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός BESS σε ένα αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούμενο από:

- Το φορτίο του νησιού
- Αιολικό Πάρκο
- Φ/Β σταθμό
- Ελεγχόμενο φορτίο για την απορριπτόμενη ενέργεια
- Ένα σταθμό παραγωγής ενέργειας με συμβατικές μονάδες για την κάλυψη του φορτίου όταν οι ΑΠΕ και το BESS δεν επαρκούν.

Το σύστημα αυτό αποτελεί μια θεωρητική εξιδανικευμένη προσέγγιση ενός αυτόνομου συστήματος, αφού ουσιαστικά οι ΑΠΕ λειτουργούν αυτόνομα για την εξυπηρέτηση του φορτίου, ενώ οι συμβατικές μονάδες συνδέονται μόνο όταν η υπάρχουσα ισχύς δεν επαρκεί. Δεν τηρείται δηλαδή καμία εφεδρεία πέρα από αυτή που παρέχει το BESS.

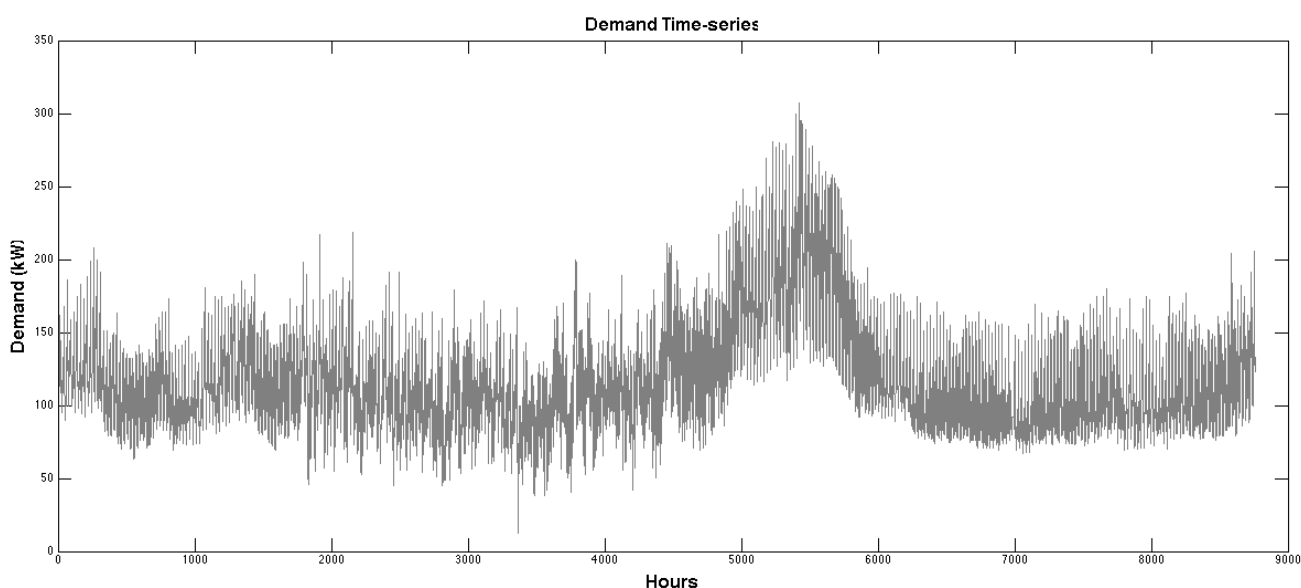
Το σύστημα λοιπόν που περιγράφεται εδώ δεν αντιστοιχεί σε πραγματική εφαρμογή, αλλά χρησιμοποιείται εδώ για να περιγραφεί η λειτουργία ενός BESS αποτελούμενου από VRBs.

4.7.1 Χαρακτηριστικά του συστήματος

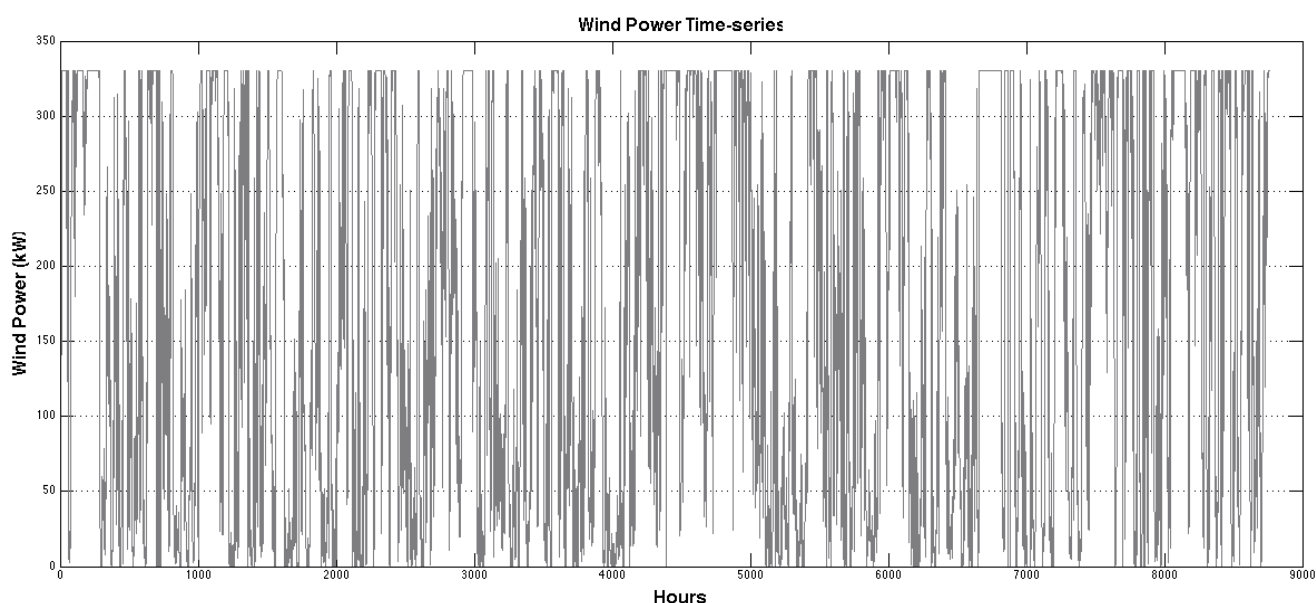
Εφόσον πρόκειται για μη πραγματικό σύστημα, τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για τη χρονοσειρά του φορτίου, της αιολικής παραγωγής και της παραγωγής των Φ/Β, είναι τα αντίστοιχα δεδομένα για το νησί του Αγίου Ευστρατίου, από τη δημοσίευση [35]

Έτσι λοιπόν η χρονοσειρά του φορτίου του συστήματος είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.18 με αιχμή στα 307 kW.

Στα σχήματα 4.19 και 4.20 παρουσιάζονται η αιολική παραγωγή και η παραγωγή των Φ/Β στοιχείων αντίστοιχα. Η αιολική παραγωγή έχει μέγιστη τιμή τα 330 kW, ενώ η παραγωγή των Φ/Β τα 100 kW.

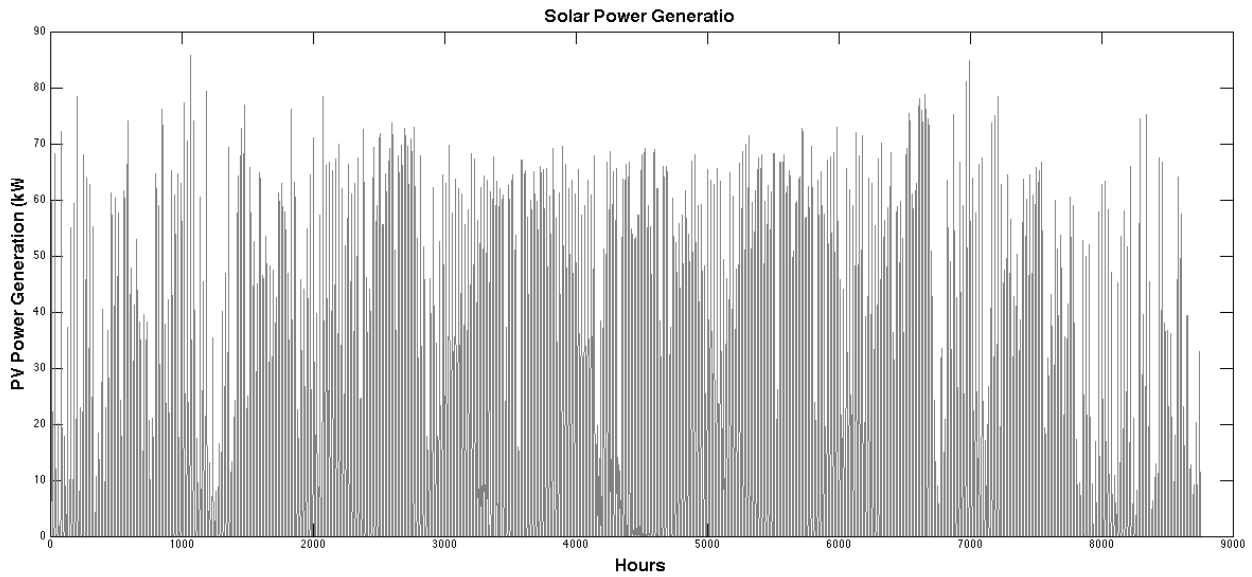


Σχήμα 4. 18 Χρονοσειρά ζήτησης του συστήματος



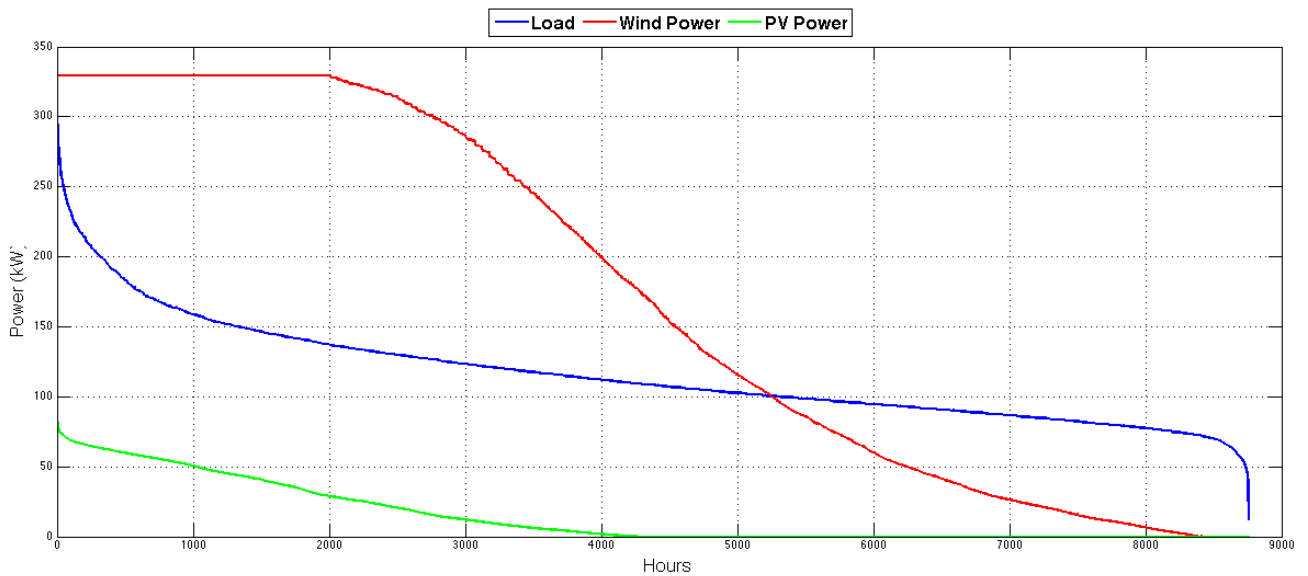
Σχήμα 4. 19 Χρονοσειρά αιολικής παραγωγής

- Αιχμή φορτίου : 307 kW
- Ετήσια ζήτηση ενέργειας : 1021 MWh



Σχήμα 4. 20 Χρονοσειρά παραγωγής των Φ/Β στοιχείων

Στο σχήμα 4.21 φαίνεται η καμπύλη διάρκειας της ζητούμενης ισχύος, της ισχύος από το Α/Π και της ισχύος από τα Φ/Β στοιχεία αντίστοιχα.



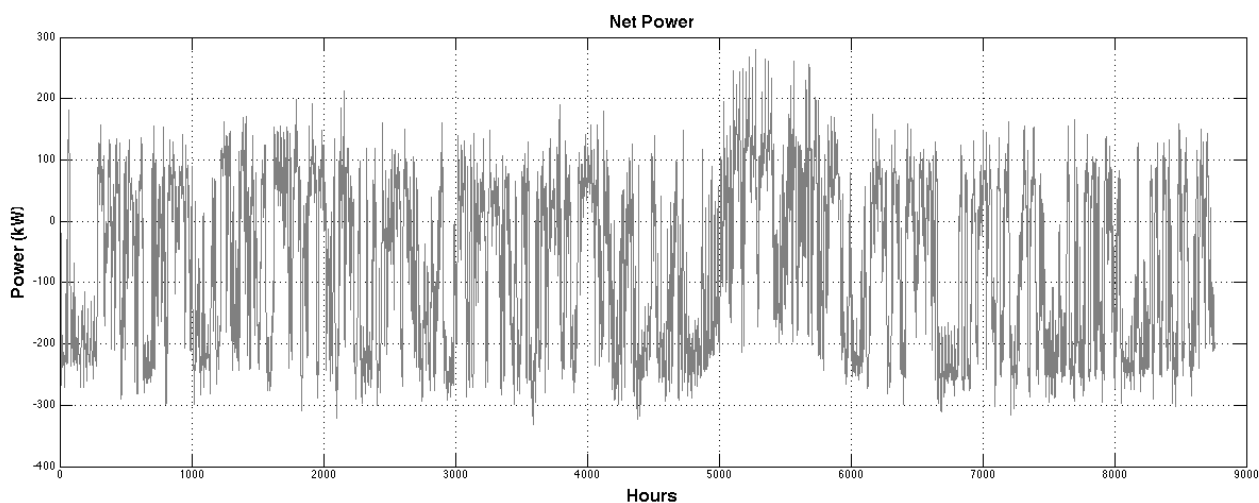
Σχήμα 4. 21 Καμπύλη διάρκειας των παραπάνω χρονοσειρών

Χρησιμοποιώντας τις πρωτογενείς χρονοσειρές μέσω των τιμών μίας ώρας για το φορτίο, την αιολική και τη φωτοβολταϊκή παραγωγή υπολογίζουμε την ωριαία χρονοσειρά της καθαρής ζήτησης ισχύος του συστήματος με βάση τη σχέση :

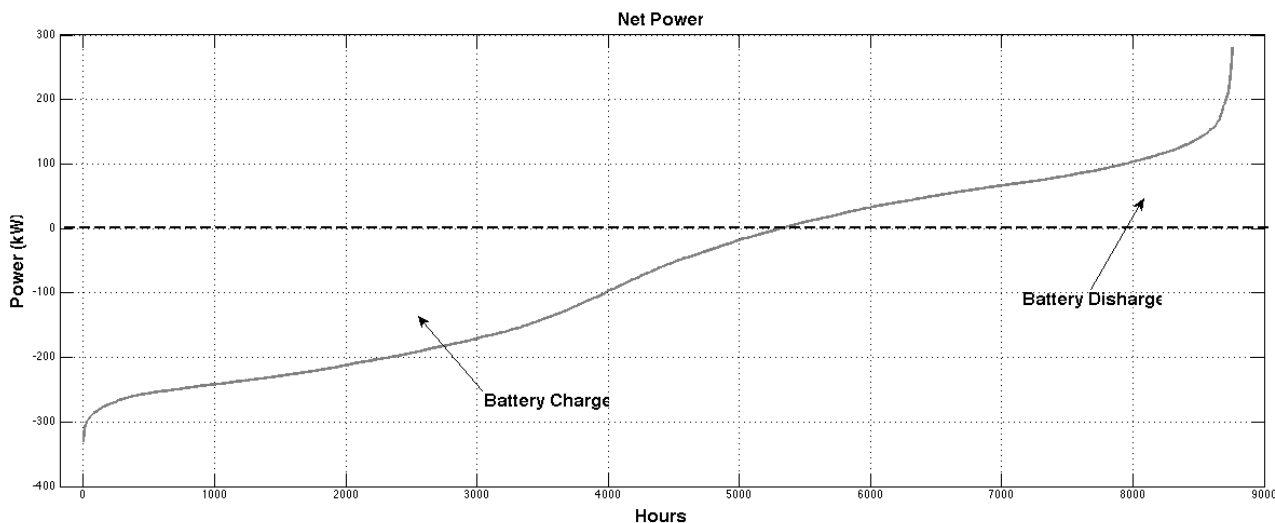
$$P_{net} = P_{load} - P_w - P_{PV}$$

Η χρονοσειρά καθαρής ζήτησης του δικτύου φαίνεται στο σχήμα 4.22.

- Όταν $P_{\text{net}} < 0$, τότε έχουμε πλεόνασμα ισχύος, το οποίο μπορεί είτε να αποθηκευτεί στις μπαταρίες, είτε να απορριφθεί στο ελεγχόμενο φορτίο, όταν η αποθήκευσή του δεν είναι δυνατή.
- Όταν $P_{\text{net}} > 0$, τότε έχουμε έλλειψη ισχύος στο σύστημα και το φορτίο δεν μπορεί να καλυφθεί. Την απαιτούμενη ισχύ την αποδίδει το BESS όταν το επίπεδο φόρτισής του είναι επαρκές, αλλιώς οι συμβατικές μονάδες που αποτελούν την εφεδρεία του συστήματος.



Σχήμα 4. 22 Χρονοσειρά καθαρής ζήτησης ισχύος του συστήματος



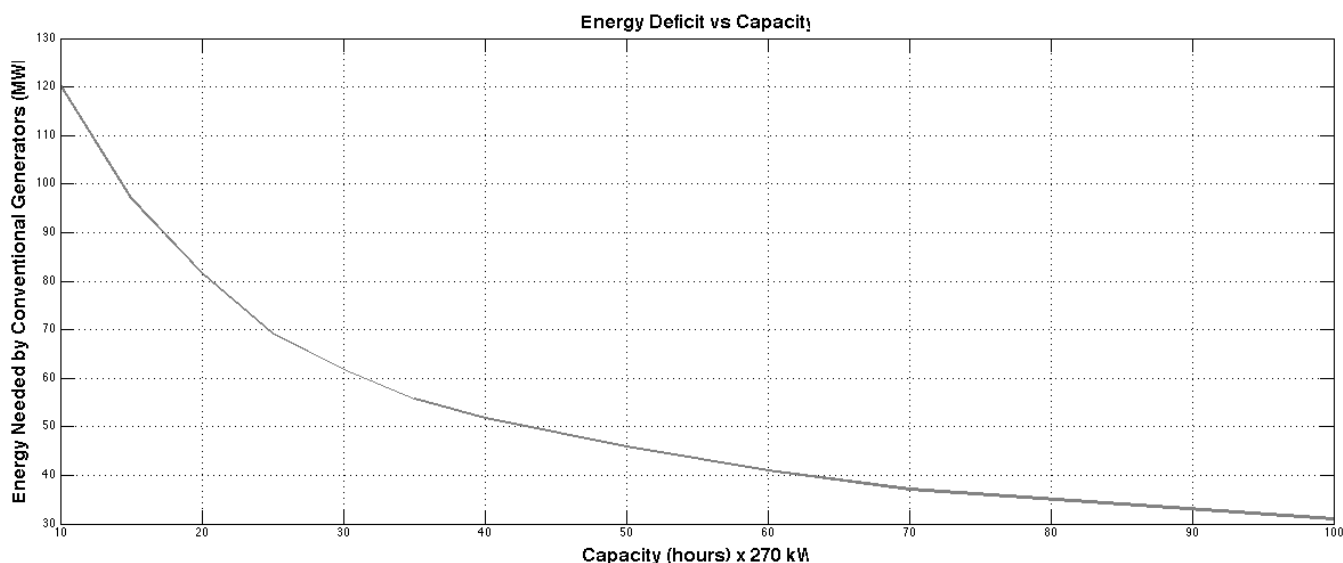
Σχήμα 4. 23 Καμπύλη διάρκειας της καθαρής ζήτησης ισχύος του συστήματος

4.7.2 Προσομοίωση και παρουσίαση αποτελεσμάτων για διάφορες τιμές χωρητικότητας

Είναι αδύνατο να επιτευχθεί 100% αυτονομία στο σύστημα με παραγωγή ισχύος μόνο από ΑΠΕ και μπαταρίες. Αυτό οφείλεται κυρίως στη στοχαστικότητα που παρουσιάζει η

παραγωγή των ΑΠΕ και ο ετεροχρονισμός της με τη ζήτηση ισχύος του φορτίου. Έτσι ενώ στο μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου το σύστημα μπορεί να αντεπεξέλθει στη ζήτηση χωρίς έγχυση ενέργειας από συμβατικές μονάδες παραγωγής, σε περιόδους υψηλής ζήτησης και χαμηλής παραγωγής από τις ΑΠΕ το BESS θα βρίσκεται συνεχώς σε πολύ χαμηλό επίπεδο φόρτισης, αδυνατώντας έτσι να συνεισφέρει.

Στην παρούσα προσομοίωση δοκιμάστηκαν διάφορα μεγέθη χωρητικότητας, προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις. Στο σχήμα 4.24 παρουσιάζεται το συνολικό ετήσιο έλλειμμα ενέργειας που παρουσιάζεται στο σύστημα, συναρτήσει της χωρητικότητας του BESS, το οποίο έλλειμμα πρέπει να καλυφθεί με παραγωγή ενέργειας από θερμικές μονάδες.



Σχήμα 4. 24 Συνολικό ετήσιο έλλειμμα ενέργειας του συστήματος για διάφορες τιμές της χωρητικότητας του BESS.

Όπως είναι αναμενόμενο, όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα του συστήματος BESS τόσο μικρότερο είναι το έλλειμμα ενέργειας που παρουσιάζεται λόγω μικρότερης παραγωγής από τη ζήτηση. Άρα τόσο μικρότερη είναι αντίστοιχα η ανάγκη χρησιμοποίησης θερμικών μονάδων για κάλυψη του φορτίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα του BESS δηλαδή, τόσο μεγαλύτερη είναι και η αυτονομία του συστήματος.

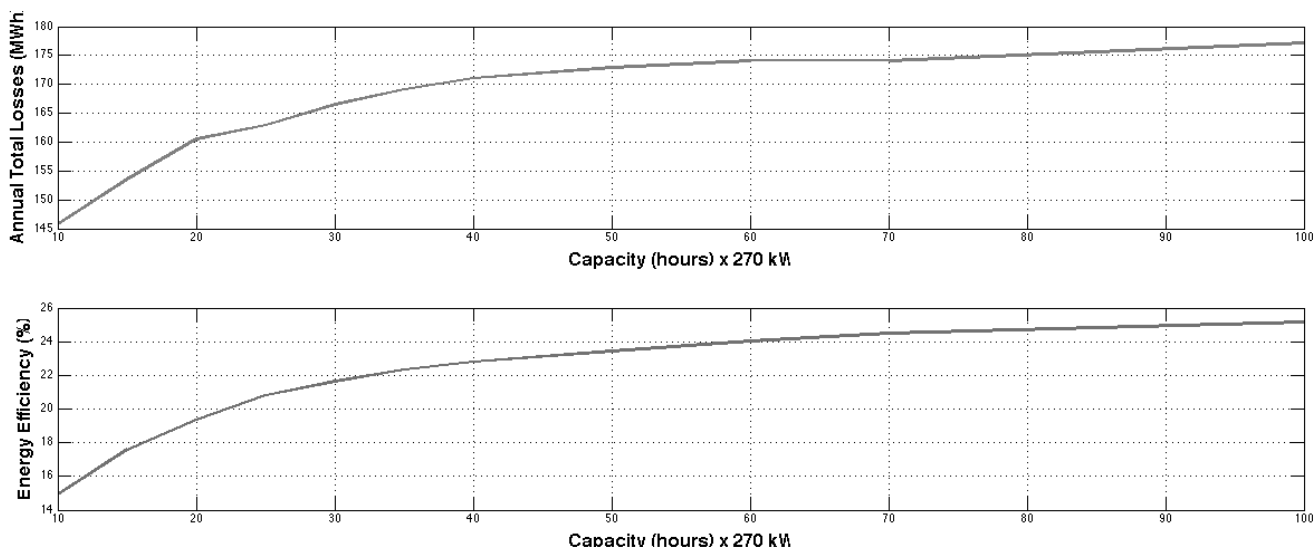
Αυτό ωστόσο δε σημαίνει ότι θα επιλέξουμε τη μέγιστη δυνατή χωρητικότητα, καθώς αυτό θα οδηγήσει σε υπερδιαστασιολόγηση του συστήματος με πολύ αρνητικές συνέπειες στο συνολικό κόστος κατασκευής.

Στο σχήμα 4.24 παρατηρείται πολύ μεγάλη μείωση του ελλείμματος ενέργειας για μεταβολή της χωρητικότητας από τις 10h στις 20h. Αντίθετα, από εκεί και πέρα και γενικά όσο αυξάνεται η χωρητικότητα, η μεταβολή του ελλείμματος είναι πολύ μικρότερη.

Στο σχήμα 4.25 δίνεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης των μπαταριών συναρτήσει της χωρητικότητας, καθώς επίσης και της τιμής των ετήσιων συνολικών απωλειών του VRB. Η απόδοση της μπαταρίας υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$n_{energy} = \frac{\int P_{discharge}(t) dt}{\int P_{charge}(t) dt}$$

Ισούται δηλαδή με το πηλίκο της ενέργειας που έδωσε η μπαταρία προς την ενέργεια που απορρόφησε η μπαταρία από το δίκτυο κατά τη διάρκεια του έτους προσομοίωσης.



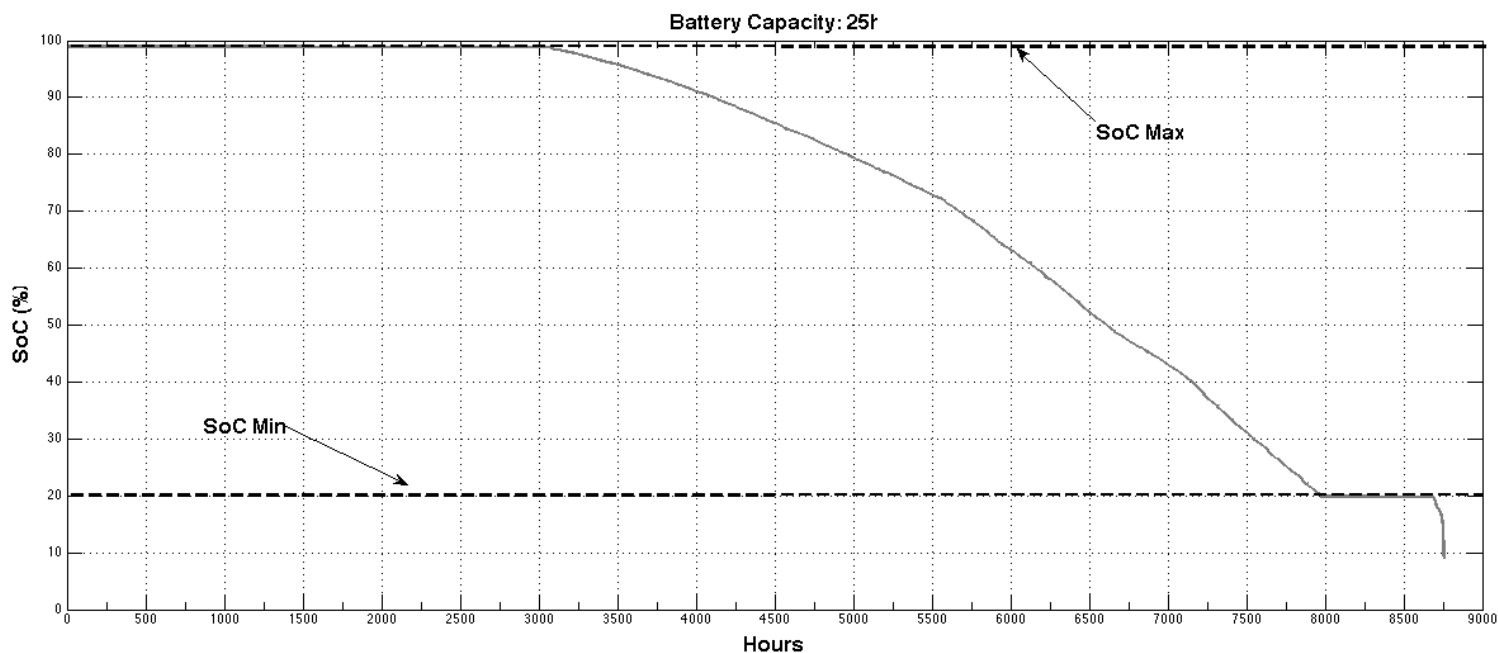
Σχήμα 4. 25 (πάνω) Συνολικές ετήσιες απώλειες του BESS συναρτήσει της χωρητικότητάς του , (κάτω) βαθμός απόδοσης του BESS για τη συγκεκριμένη λειτουργία του.

Παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης για οποιαδήποτε τιμή της χωρητικότητας παραμένει υπερβολικά μικρός. Μάλιστα παρουσιάζει πολύ μεγάλη διαφορά από την τιμή του roundtrip βαθμού απόδοσης που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Αυτό οφείλεται στον τρόπο λειτουργίας της μπαταρίας μέσα στο σύστημα. Επειδή δεν υπάρχει σαφής πολιτική λειτουργίας, δηλαδή δεν υπάρχει καθόλου προγραμματισμός παραγωγής των επιμέρους μονάδων και του BESS, παρατηρείται λειτουργία του σε τιμές φόρτισης και εκφόρτισης μη αποδοτικές. Ακόμη η VRB δε λειτουργεί συνεχώς άλλα παραμένει για μεγάλο διάστημα σε κατάσταση idling, άρα καταναλώνει ενέργεια με τη μορφή απωλειών, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά το βαθμό απόδοσης της μπαταρίας, ακόμη και αν αυτή δε λειτουργεί.

Για εξέταση και των υπολοίπων μεγεθών της λειτουργίας του συστήματος θα επιλεγεί BESS με χωρητικότητα 25h. Για το λόγο ότι παρουσιάζει καλά ενεργειακά αποτελέσματα, και επίσης δεν αποτελεί υπερβολικά μεγάλη τιμή για τα πραγματικά δεδομένα.

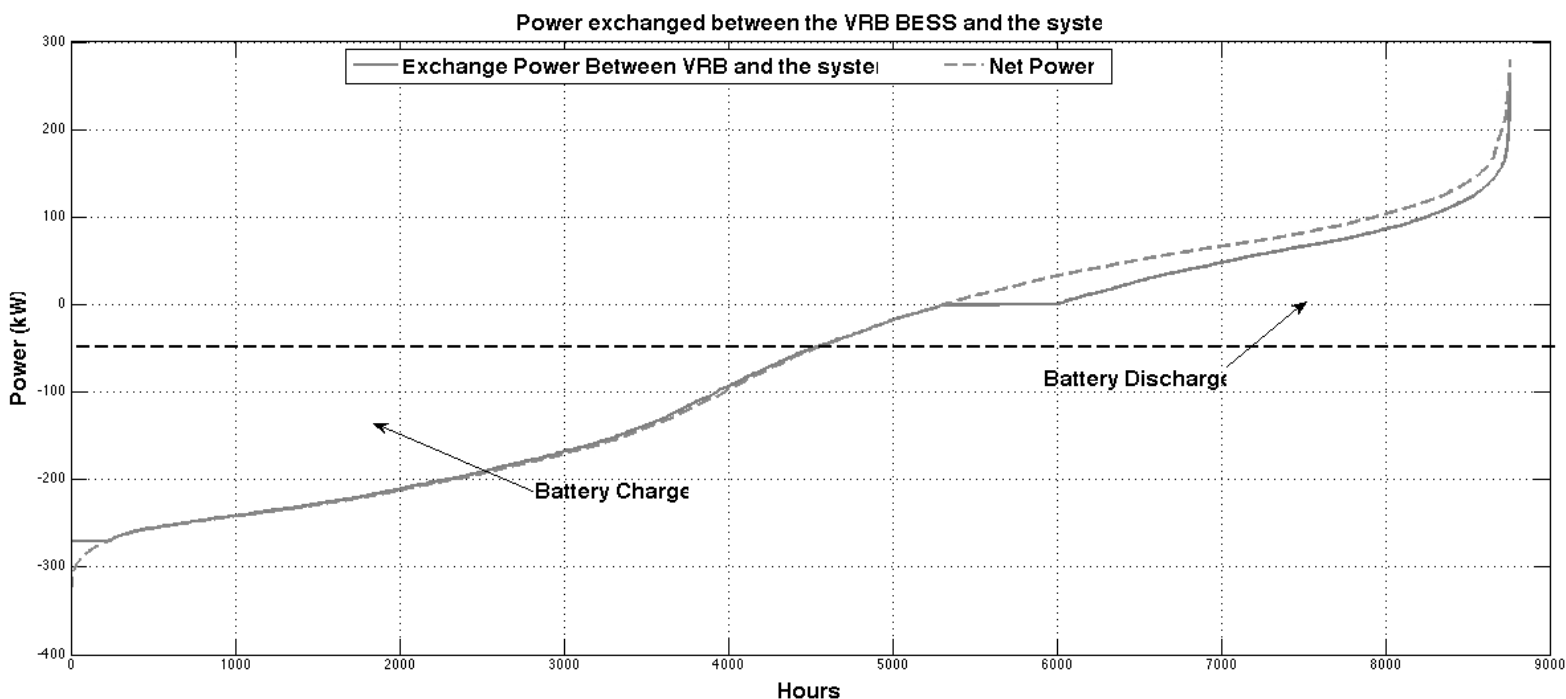
4.7.3 Υπόλοιπα αποτελέσματα για χωρητικότητα 25h.

Στο σχήμα 4.26 παρουσιάζεται η καμπύλη διάρκειας του επιπέδου φόρτισης της VRB για χωρητικότητα ίση με 25 hours. Παρατηρούμε ότι για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα (≈ 3000 hours) η μπαταρία βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους φόρτισης, ενώ για περίπου 550 hours βρίσκεται στο 20% του SoC , τιμή που θεωρείται το κάτω όριο του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας. Για πάρα πολύ μικρό διάστημα (ελάχιστες ώρες ο χρόνο), η τιμή του SoC πέφτει μέχρι περίπου το 10%, κάτι που είναι αποδεκτό για τόσες λίγες ώρες.



Σχήμα 4. 26 Καμπύλη διάρκειας του SoC της μπαταρίας

Στο παρακάτω σχήμα (4.27) δίνεται η καμπύλη διάρκειας της καθαρής ζήτησης ισχύος του δικτύου (αρνητικές τιμές παίρνει η ισχύς που προορίζεται για αποθήκευση ή απόρριψη, ενώ θετικές τιμές η ισχύς που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου). Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η καμπύλη διάρκειας της ανταλλαγής ισχύος μεταξύ της VRB και του δικτύου.

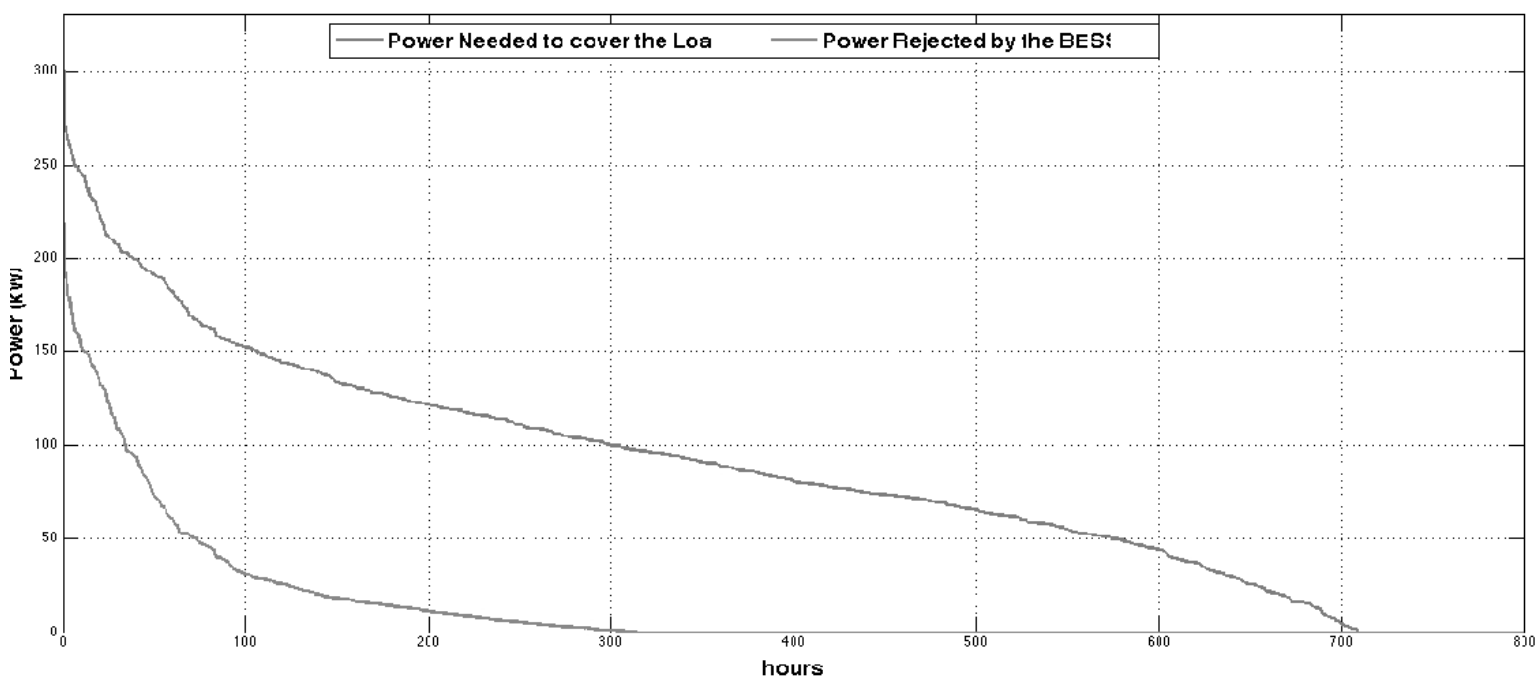


Σχήμα 4. 27 Καμπύλη διάρκειας της καθαρής ζήτησης ισχύος και της ανταλλαγής ισχύος μεταξύ της VRB και του δικτύου

Παρατηρείται μια μικρή διαφορά στα εμβαδά που περικλείεται μεταξύ της κάθε καμπύλης και του δικτύου αντίστοιχα. Η τιμή του εμβαδού αυτού αντιστοιχεί στο συνολικό ποσό ενέργειας. Η διαφορά μεταξύ των εμβαδών των δύο καμπυλών απεικονίζει:

- Για τις αρνητικές τιμές τη διαφορά μεταξύ της ενέργειας που προσφέρεται για αποθήκευση από το δίκτυο και της ενέργειας ου τελικά περνάει στη μπαταρία. Το εμβαδόν αυτό δηλαδή απεικονίζει την απορριπτόμενη ενέργεια που καταναλώνεται στο ελεγχόμενο φορτίο/
- Για τις θετικές τιμές η διαφορά αυτή δείχνει το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών του φορτίου και παρόλα αυτά δε μπορεί να τροφοδοτηθεί από την μπαταρία. Δείχνει δηλαδή ουσιαστικά την ενέργεια που απαιτείται να δοθεί από τις θερμικές μονάδες παραγωγής.

Αναλυτικότερα, η διαφορά αυτή μεταξύ των δύο καμπυλών, δηλαδή το πλεόνασμα ή το έλλειμμα ενέργειας παρουσιάζεται στο σχήμα 4.28. Εδώ απεικονίζεται η καμπύλη διάρκειας της απορριπτόμενης ενέργειας (πλεόνασμα) και της ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη του φορτίου (έλλειμμα).

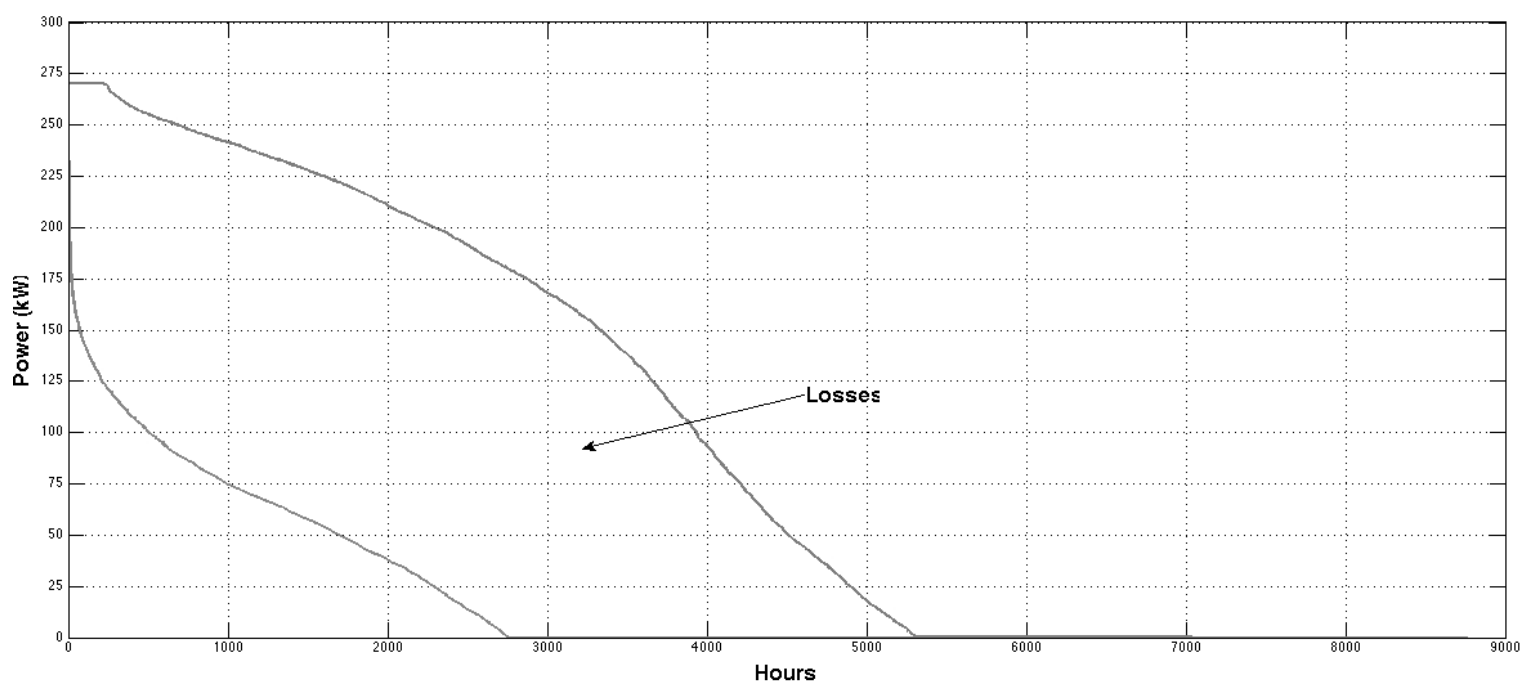


Σχήμα 4. 28 Καμπύλη διάρκειας του πλεονάσματος και του ελλείμματος ενέργειας αντίστοιχα.

Παρατηρούμε ότι η απορριπτόμενη ενέργεια είναι πολύ λίγη και αντιστοιχεί σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (≈ 300 hours). Το ίδιο ισχύει και για το έλλειμμα ενέργειας, το οποίο μπορεί να έχει μεγαλύτερες τιμές αλλά είναι ουσιαστικά μικρής διάρκειας (≈ 700 hours). Πρόκειται για τις ώρες που πρέπει να τεθούν σε λειτουργία οι θερμικές μονάδες για την κάλυψη του φορτίου και αντιστοιχούν σε περίοδο πολύ υψηλής ζήτησης με ταυτόχρονη χαμηλή παραγωγή και χαμηλό SoC στο BESS.

Στο σχήμα 4.29 απεικονίζεται η καμπύλη διάρκειας της ισχύος φόρτισης και της ισχύος εκφόρτισης της VRB. Η διαφορά στο εμβαδόν που περικλείει η κάθε καμπύλη με τον άξονα x αντιστοιχεί στις απώλειες που παρουσιάζει το σύστημα της VRB για τη λειτουργία του.

Έτσι λοιπόν, για να δώσει η μπαταρία την απαιτούμενη ενέργεια εκφόρτισης, θα πρέπει να έχει λάβει από το δίκτυο ενέργεια ίση με την ενέργεια εκφόρτισης και επιπλέον ενέργεια ίση με τις απώλειες.



Σχήμα 4. 29 Καμπύλη διάρκειας ισχύος φόρτισης και εκφόρτισης αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 5

Υβριδικοί Σταθμοί Παραγωγής Ενέργειας

5.1 Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας

Ο όρος «Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας», ή πιο απλά «Υβριδικά Συστήματα», αναφέρεται σε συστήματα όπου χρησιμοποιούνται πολλαπλές διατάξεις ενεργειακής μετατροπής, ή περισσότερα του ενός καύσιμα για την ίδια διάταξη, με σκοπό την παραγωγή ενέργειας. Ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει μία συμβατική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με μία τουλάχιστον μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, διατάξεις αποθήκευσης, συστήματα εποπτείας και ελέγχου, καθώς και σύστημα διαχείρισης φορτίου. Με αυτήν την έννοια, τα υβριδικά συστήματα αποτελούν μία εναλλακτική επιλογή αντί των συμβατικών συστημάτων, τα οποία τυπικά βασίζονται στην παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Σύμφωνα με το νόμο 3468/2006, ως υβριδικό σύστημα ή αλλιώς υβριδικός σταθμός ορίζεται κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που [35]:

- Χρησιμοποιεί μία, τουλάχιστον, μορφή ΑΠΕ.
- Η συνολική ενέργεια που απορροφά από το δίκτυο, σε ετήσια βάση, δεν υπερβαίνει το 30% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσης του σταθμού αυτού. Ως ενέργεια που απορροφά ο υβριδικός σταθμός από το δίκτυο ορίζεται η διαφορά μεταξύ της ενέργειας που μετράται κατά την είσοδό της στο σταθμό και της ενέργειας που αποδίδεται απευθείας στο δίκτυο από τις μονάδες ΑΠΕ του υβριδικού σταθμού. Η διαφορά αυτή υπολογίζεται, για τα μη διασυνδεδεμένα νησιά, σε ωριαία βάση. Αν για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας εφαρμόζεται τεχνολογία διαφορετική από αυτή των φωτοβολταϊκών, μπορεί να χρησιμοποιείται και συμβατική ενέργεια που δεν απορροφάται στο δίκτυο, εφόσον η χρήση της ενέργειας αυτής κρίνεται αναγκαία για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Η χρησιμοποιούμενη συμβατική ενέργεια δεν μπορεί να υπερβαίνει το 10% της συνολικής ενέργειας που παράγεται, σε ετήσια βάση, από τις μονάδες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας.
- Η μέγιστη ισχύς παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ του σταθμού δε μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού αυτού, προσαυξημένη κατά ποσοστό μέχρι 20%.

5.2 Εφαρμογές Υβριδικών Συστημάτων

Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να βρουν εφαρμογή σε διάφορες περιπτώσεις οι πιο σημαντικές από τις οποίες είναι [35] :

5.2.1 Συστήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής σε Κεντρικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα απαρτίζονται από τα συστήματα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών είναι ότι διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα και ότι η τάση και η συχνότητα δεν επηρεάζονται από την παρουσία επιπρόσθετων γεννητριών ή φορτίων, είναι δηλαδή δίκτυα άπειρου ζυγού. Αν ένας υβριδικός σταθμός συνδεθεί σε ένα τέτοιο δίκτυο,

τότε γίνεται λόγος για διεσπαρμένη παραγωγή. Δεδομένου ότι το κεντρικό δίκτυο έχει την ευθύνη για τον έλεγχο της τάση και της συχνότητας, αλλά και για την παραγωγή αέργου ισχύος, ο σχεδιασμός του υβριδικού συστήματος απλοποιείται καθώς δεν απαιτούνται συστήματα ελέγχου. Όταν ζητείται περισσότερη ενέργεια από αυτήν που μπορεί να παράγει ο σταθμός, το έλλειμμα ενέργειας παρέχεται από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Παρομοίως, τυχούσα περίσσεια ενέργειας που παράγεται από το υβριδικό σύστημα μπορεί να απορροφηθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο, ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι τίθενται περιορισμοί σχετικά με τη συμμετοχή του υβριδικού σταθμού στη στιγμιαία παραγωγή ισχύος. Σε μερικές περιπτώσεις η παρουσία του υβριδικού σταθμού επηρεάζει την ικανότητα του κεντρικού δικτύου να διατηρεί σταθερή τάση και συχνότητα, οπότε γίνεται λόγος για ασθενές δίκτυο και συνήθως απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός και διατάξεις ελέγχου.

5.2.2 Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα (ΑΥΣ) χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων ή νησιωτικών περιοχών που δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε δεν υπάρχει σύστημα μεταφοράς παρά μόνο σύστημα διανομής. Η μετατροπή ενός συμβατικού αυτόνομου σταθμού σε υβριδικό αποσκοπεί κατά κύριο λόγο στην ελάττωση της κατανάλωσης καυσίμου και των ωρών λειτουργίας των συμβατικών γεννητριών. Η σημαντικότερη διαφορά του αυτόνομου σε σχέση με ένα διασυνδεδεμένο υβριδικό σύστημα είναι ότι πρέπει να μπορεί να παρέχει όλη την ενέργεια που ζητείται οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή να κάνει αποκοπή φορτίου όταν αυτό δεν είναι εφικτό. Επιπλέον, πρέπει να έχει την ικανότητα ρύθμισης συχνότητας και παραγωγής αέργου ισχύος ώστε να ρυθμίζει την τάση του δικτύου. Όταν η ηλεκτρική παραγωγή από τις μονάδες ΑΠΕ του συστήματος ξεπερνά το φορτίο, η περίσσεια ενέργειας πρέπει να αποθηκευτεί ή και να απορριφθεί με κάποιον τρόπο ώστε να μην προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Τα αυτόνομα δίκτυα δεν έχουν άπειρο ζυγό, οπότε επηρεάζονται έντονα από την σύνδεση επιπρόσθετου φορτίου ή γεννήτριας. Για τους παραπάνω λόγους, τα περισσότερα αυτόνομα συστήματα περιλαμβάνουν διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας και συστήματα ελέγχου και διαχείρισης φορτίου.

5.2.3 Τροφοδότηση απομονωμένων Φορτίων ή Φορτίων Ειδικού Σκοπού

Υβριδικά συστήματα χωρίς δίκτυο διανομής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδότηση απομονωμένων φορτίων ή φορτίων ειδικού σκοπού, τα οποία μπορεί να είναι συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, ή ακόμα και μεταβλητής τάσης και συχνότητας. Παραδείγματα τέτοιων φορτίων αποτελούν οι ηλεκτρικοί φάροι, ο φωτισμός της σήμανσης στους αυτοκινητόδρομους, η άντληση νερού, τα συστήματα αφαλάτωσης καθώς και οι ηλεκτρικοί μύλοι. Μία εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος θα μπορούσε να περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά στοιχεία σε συνδυασμό με μπαταρίες και ηλεκτρονικά ισχύος. Σε αυτά τα συστήματα ο έλεγχος συχνότητας και τάσης καθώς και η διαχείριση της περίσσειας ισχύος δεν αποτελούν τις κύριες παραμέτρους σχεδίασης. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα χρησιμοποίησης και συμβατικής γεννήτριας που λειτουργεί όποτε η παραγωγή ΑΠΕ δεν επαρκεί, αλλά συνήθως δεν λειτουργεί παράλληλα με τις γεννήτριες ΑΠΕ.

Κεφάλαιο 6

Προσομοίωση Υβριδικού Σταθμού Με Συσσωρευτές τύπου VRB – Περιγραφή συστήματος Κρήτης

6.1 Γενικά για την προσομοίωση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια προσομοίωση ένταξης ενός νέου Υβριδικού Σταθμού Αιολικών-Μπαταριών (ΥΣΑΜ) με μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (αιολική ενέργεια) και σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές τεχνολογίας VRB, στο υπάρχον σύστημα της Κρήτης. Για την προσομοίωση αυτή χρησιμοποιήθηκε που βασίζεται στο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιωτικού συστήματος της Κρήτης, με χρήση απλουστευμένων ενεργειακών μοντέλων για τις μονάδες παραγωγής του νησιού και αγνοώντας τα δυναμικά φαινόμενα. Η περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος συσσωρευτών στηρίχτηκε στο μοντέλο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3. Η προσομοίωση είναι ετήσιας διάρκειας και πραγματοποιείται με ωριαίο χρονικό βήμα.

Από την προσομοίωση αυτή που επαναλαμβάνεται για διάφορες τιμές των κρίσιμων παραμέτρων του ΥΣΑΜ (εγκατεστημένη ισχύς μπαταριών, εγκατεστημένη ισχύς αιολικού κτλ.) εξάγονται αναλυτικά ωριαία και ετήσια συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναφορικά τη λειτουργία των συνιστωσών του υβριδικού σταθμού τα οποία παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο. Ακόμη εξετάζεται η ενεργειακή και η οικονομική αποδοτικότητα της ένταξης του ΥΣΑΜ.

6.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Μη Διασυνδεδεμένων Νησιωτικών (ΜΑΝ) Συστημάτων με σταθμούς ΑΠΕ

Εδώ περιγράφεται η λειτουργία ενός αυτόνομου νησιωτικού συστήματος που διαθέτει αιολικούς, φωτοβολταϊκούς και υβριδικούς σταθμούς παραγωγής. Οι πολιτικές λειτουργίας των υβριδικών σταθμών βασίζονται στο υφιστάμενο νομικό πλαίσιο.

6.2.1 Λειτουργία ΜΑΝ με αιολική και Φ/Β διείσδυση

Σε ό,τι αφορά τη Φ/Β παραγωγή, ο καταλληλότερος τρόπος διαχείρισής της είναι η απευθείας έγχυση αυτής στο δίκτυο χωρίς περιορισμούς διείσδυσης. Συνεπώς, αντιμετωπίζεται πρακτικά ως ενσωματωμένη στο φορτίο του νησιού.

Αντίθετα, στην περίπτωση των αιολικών πάρκων που συνδέονται σε ηλεκτρικά συστήματα περιορισμένου μεγέθους, όπως αυτά των μη διασυνδεδεμένων νησιών, το σύστημα εισάγει σημαντικούς περιορισμούς στη λειτουργία των Α/Γ, για τεχνικούς λόγους που συνδέονται κυρίως με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Οι περιορισμοί διείσδυσης των Α/Π δεν αφορούν άμεσα την εγκατεστημένη ισχύ σταθμών ΑΠΕ, αλλά την αποδιδόμενη

από αυτούς ισχύ κατά τη λειτουργία του συστήματος και η τιμή τους δεν είναι δεδομένη, αλλά εξαρτάται από την εκάστοτε λειτουργική κατάσταση του συστήματος (κυρίως από το φορτίο).

Διακρίνονται [36, 37] :

A. Στον περιορισμό τεχνικού ελαχίστου

Ο περιορισμός τεχνικού ελαχίστου αποσκοπεί στην αποφυγή καταστάσεων υποφόρτισης των συμβατικών μονάδων κάτω από ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ονομαστικής τους ισχύος, ορισμένη από τον κατασκευαστή τους και εξαρτάται σημαντικά από το είδος και την παλαιότητα της μονάδας και καθορίζεται κατά περίπτωση

Για τον περιορισμό τεχνικού ελαχίστου πρέπει να ισχύει:

$$P_{Cmin} = \sum c_T P_{Cn} \leq P_c \quad (6.1)$$

όπου : P_C η παραγόμενη ισχύς από το σύνολο των συμβατικών μονάδων

P_{Cn} η ονομαστική ισχύς της κάθε μονάδας

C_T ο συντελεστής τεχνικού ελαχίστου της κάθε μονάδας, ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος

P_{Cmin} το συνολικό τεχνικό ελάχιστο των εν λειτουργία μονάδων

Οι τιμές που γενικά χρησιμοποιούνται για τον συντελεστή τεχνικού ελαχίστου κυμαίνονται στο 30%- 60%, με χαμηλότερες τιμές για μονάδες ελαφρού πετρελαίου και σχετικά υψηλότερες για μονάδες με καύσιμο μαζούτ.

Προκειμένου να τηρείται πάντα το ισοζύγιο ισχύος του συστήματος για μηδενική εγκατεστημένη ισχύ Φ/B , ο περιορισμός του τεχνικού ελαχίστου οδηγεί σε αντίστοιχο περιορισμό της αιολικής διείσδυσης βάσει της σχέσης (6.2).

$$P_C \geq P_{Cmin} \Rightarrow P_W \leq P_L - \sum c_T P_{Cn} = P_{Wmax,T} \quad (6.2)$$

Προφανώς, όσο υψηλότερα τα τεχνικά ελάχιστα (δηλ. μεγαλύτερος ο συντελεστής c_T) και η ονομαστική ισχύς των εν λειτουργία συμβατικών γεννητριών, τόσο χαμηλότερο το προκύπτον όριο διείσδυσης αιολικής ισχύος.

Παρουσία Φ/B διείσδυσης, ο περιορισμός τεχνικού ελαχίστου υπολογίζεται επί του «φαινόμενου» φορτίου του νησιού, δηλαδή του πραγματικού φορτίου μειωμένου κατά την αναμενόμενη Φ/B παραγωγή. Η παραπάνω σχέση (6.2) δηλαδή διαμορφώνεται ως εξής:

$$P_{Wmax,T} = (P_L - P_{PV}) - \sum c_T P_{Cn} \quad (6.3)$$

B. Στον δυναμικό περιορισμό διείσδυσης

Ο δυναμικός περιορισμός διείσδυσης που τίθεται στα Α/Π αποσκοπεί στην αποφυγή λειτουργικών καταστάσεων υψηλής στιγμιαίας διείσδυσης αιολικής ισχύος, οι οποίες ενδέχεται να προκαλέσουν διακυμάνσεις στη συχνότητα των αυτόνομων συστημάτων ή να

θέσουν σε κίνδυνο την ευστάθεια του συστήματος σε περίπτωση απότομης απώλειας της αιολικής παραγωγής.

Οι αποκλίσεις συχνότητας οφείλονται στο ότι οι ρυθμιστές στροφών των συμβατικών μονάδων του σταθμού, που αναλαμβάνουν τη ρύθμιση συχνότητας του συστήματος, δεν μπορούν να παρακολουθήσουν τις ταχείες μεταβολές μεγάλου μεγέθους της αιολικής παραγωγής. Η απότομη απώλεια της αιολικής παραγωγής μπορεί να προέλθει κυρίως εξαιτίας σφαλμάτων επί του δικτύου, αλλά δυνητικά και ως αποτέλεσμα υψηλών ταχυτήτων ανέμου που υπερβαίνουν την ταχύτητα αποσύνδεσης των ανεμογεννητριών, όταν στο δίκτυο συνδέεται μικρός αριθμός γεωγραφικά συγκεντρωμένων αιολικών σταθμών.

Η έντονη διακύμανση της ισχύος εξόδου των ανεμογεννητριών σε κλίμακα χρόνου δευτερολέπτων προκαλεί αντίστοιχες μεταβολές στην ισχύ που παράγεται από τις συμβατικές μονάδες, αφού η ισχύς του φορτίου $P_L = P_C + P_W$ είναι περίπου σταθερή.

Όταν οι μεταβολές αυτές είναι μεγάλου μεγέθους προκαλούνται διακυμάνσεις στη συχνότητα των αυτόνομων συστημάτων, η οποία ρυθμίζεται από τους ρυθμιστές στροφών των συμβατικών μονάδων. Ιδιαίτερα σημαντικές αποκλίσεις συχνότητας ή ακόμη και κίνδυνος για την ευστάθεια του συστήματος μπορεί να προκύψει στην περίπτωση απότομης απώλειας της αιολικής παραγωγής. Το ενδεχόμενο αυτό μπορεί να προέλθει κυρίως εξαιτίας σφαλμάτων επί του δικτύου τα οποία προκαλούν ταυτόχρονη αποσύνδεση αιολικών σταθμών, όταν αυτοί δεν διαθέτουν δυνατότητα αδιάλειπτης λειτουργίας υπό χαμηλή τάση (Low Voltage Ride Through – LVRT). Δυνητικά, η απότομη απώλεια αιολικής παραγωγής μπορεί να προκύψει και ως αποτέλεσμα υψηλών ταχυτήτων ανέμου που υπερβαίνουν την ταχύτητα αποσύνδεσης των ανεμογεννητριών, όταν στο δίκτυο συνδέεται μικρός αριθμός γεωγραφικά συγκεντρωμένων αιολικών σταθμών.

Κατ' αντιστοιχία με τους περιορισμούς τεχνικών ελαχίστων, οι δυναμικοί περιορισμοί γενικά διατυπώνονται ως ποσοστό επί της ικανότητας των εν λειτουργία συμβατικών μονάδων:

$$P_W \leq \sum c_D P_{Cn} = P_{W_{\max,D}} \quad (6.4)$$

όπου c_D ο συντελεστής μέγιστης διείσδυσης αιολικής ισχύος.

Αν και είναι ορθότερος ο τρόπος υπολογισμού του δυναμικού περιορισμού επί της ικανότητας των εν λειτουργία μονάδων, εφόσον συναρτάται με τα χαρακτηριστικά τους, η πρακτική που ακολουθείται μέχρι σήμερα από το Διαχειριστή στην πλειονότητα των νησιωτικών συστημάτων είναι η εφαρμογή του συντελεστή διείσδυσης c_D επί της ισχύος ζήτησης του φορτίου:

$$P_W \leq P_{W_{\max}} = \min\{P_{W_{\max,T}}, P_{W_{\max,D}}\} \quad (6.5)$$

Το αποδεκτό όριο «στιγμιαίας» διείσδυσης της αιολικής ισχύος, c_D , εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των συμβατικών μονάδων και των ρυθμιστών τους, το είδος και τη γεωγραφική διασπορά των αιολικών πάρκων και τις ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας κάθε

συστήματος και συνεπώς δεν υπάρχει κάποιο όριο γενικής εφαρμογής. Από τη μέχρι σήμερα εμπειρία γίνονται αποδεκτά στιγμιαία όρια διείσδυσης της τάξης του 30-35%.

Η εφαρμογή του δυναμικού περιορισμού επί της ικανότητας των μονάδων δεν επηρεάζεται από την παρουσία Φ/Β. Εναλλακτικά, μπορεί να εφαρμοστεί είτε επί του πραγματικού είτε επί του φαινόμενου φορτίου του νησιού.

Ο συνολικός περιορισμός απορρόφησης αιολικής ισχύος προκύπτει από τον αυστηρότερο εκ των δύο περιορισμών, βάσει της σχέσης:

$$P_W \leq P_{W\max} = \min\{P_{W\max,T}, P_{W\max,D}\} \quad (6.6)$$

Η εφαρμογή των περιορισμών διείσδυσης στα αιολικά πάρκα μπορεί να υλοποιείται σε πραγματικό χρόνο, αντί εκ των προτέρων, στη βάση του 24ωρου προγραμματισμού, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι πραγματικές τιμές φορτίου και Φ/Β παραγωγής του νησιού. Η συγκεκριμένη πολιτική διαχείρισης ενδείκνυται σε περιπτώσεις αυξημένης Φ/Β διείσδυσης, στις οποίες η εσφαλμένη πρόβλεψη της αναμενόμενης Φ/Β παραγωγής μπορεί να προκαλέσει εμφάνιση υποφορτίσεων των συμβατικών μονάδων κάτω από τα τεχνικά τους ελάχιστα, ή σημαντικές περικοπές αιολικής ισχύος. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη Κέντρων Ελέγχου Ενέργειας στα νησιωτικά συστήματα για τη διαβίβαση των εντολών.

Ο επιμερισμός του ορίου απορρόφησης της αιολικής παραγωγής από το σύστημα, $P_{W\max}$, επιμερίζεται στα αιολικά πάρκα αναλογικά προς την εγκατεστημένη ισχύ τους. Έτσι, ο περιορισμός που τίθεται για την ισχύ εξόδου του αιολικού πάρκου k είναι:

$$P_{Wk} \leq P_{W\max,k} = \left(\frac{P_{Wn,k}}{P_{Wn,tot}} \right) P_{W\max} \quad (6.7)$$

όπου $P_{Wn,tot} = \sum_j P_{Wn,j}$ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αιολικών στο σύστημα

Η εφαρμογή των παραπάνω ορίων συνεπάγεται την απόρριψη της πλεονάζουσας αιολικής ισχύος, που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το δίκτυο. Η απόρριψη αυτή υλοποιείται μέσω των συστημάτων ελέγχου των σύγχρονων ανεμογεννητριών, π.χ. με μείωση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα για Α/Γ μεταβλητών στροφών ή με αλλαγή της κλίσης των πτερυγίων για μηχανές τύπου pitch ή active stall.

Οι Συμβατικές Ανηγμένες Ωρες Λειτουργίας (ΣΑΩΛ) ενός αιολικού πάρκου ορίζονται ως το πηλίκο της μέγιστης δυνατής ετήσιας παραγωγής του, $E_{W\max,k}$, προς την ονομαστική του ισχύ:

$$\Sigma\Lambda\Omega\Lambda_k = \frac{E_{W\max,k}}{P_{Wn,k}} \quad (6.8)$$

Οι ΣΑΩΛ εκφράζουν τον ισοδύναμο χρόνο λειτουργίας του πάρκου υπό πλήρη ισχύ, ώστε να παράγει την ίδια συνολική ενέργεια $E_{W\max,k}$.

Προκύπτουν άμεσα από την άθροιση (χρονική ολοκλήρωση) των περιορισμών διείσδυσης που λαμβάνει το Α/Π κατά τη διάρκεια του έτους και έχουν την ίδια τιμή για τα επί μέρους Α/Π και το σύνολο του συστήματος.

6.2.2 Πολιτική Στρεφόμενης Εφεδρείας

Ο προγραμματισμός ένταξης συμβατικών μονάδων πραγματοποιείται στο πλαίσιο ημερήσιου (24ωρου) προγραμματισμού, ο οποίος είναι αναγκαίος όταν στο νησιωτικό σύστημα συνδέονται υβριδικοί σταθμοί, όπως εξηγείται σε επόμενη παράγραφο. Η ένταξη μονάδων γίνεται βάσει λίστας προτεραιότητας, η οποία καθορίζεται από τον Διαχειριστή του ΜΔΝ και αντανakλά την οικονομικότητα των μονάδων και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους (παλαιότητα, αξιοπιστία κλπ.). [36, 37]

Η επιλογή των προς ένταξη μονάδων πραγματοποιείται βάσει του εναπομείναντος φορτίου μετά την αφαίρεση της αναμενόμενης Φ/Β παραγωγής, το οποίο θα κληθούν να καλύψουν οι συμβατικές μονάδες, διατηρώντας επαρκές περιθώριο στρεφόμενης εφεδρείας. Η πολιτική στρεφόμενης εφεδρείας που ακολουθείται στην παρούσα εργασία είναι η εξής:

- Τηρείται εφεδρεία μεγαλύτερης μονάδας και συγκεκριμένα εφεδρεία ίση με την αναμενόμενη παραγωγή της μεγαλύτερης συμβατικής μονάδας, όπως αυτή υπολογίζεται από την οικονομική κατανομή του φορτίου, αγνοώντας την αιολική παραγωγή.
- Τηρείται μερική εφεδρεία για την αιολική παραγωγή, ίση με το 80% της αναμενόμενης αιολικής παραγωγής. Δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιείται στην προσομοίωση μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, ακολουθείται η θεώρηση τέλειας πρόβλεψης (perfect forecasting), δηλαδή η εφεδρεία υπολογίζεται επί της πραγματικής αιολικής παραγωγής.
- Δεν τηρείται πρόσθετη εφεδρεία για τη Φ/Β παραγωγή, αφενός λόγω της υψηλής συνολικής εφεδρείας, και αφετέρου λόγω της ουσιαστικής ενσωμάτωσης της Φ/Β παραγωγής στο φορτίο του νησιού. Έτσι, για τον προσδιορισμό της «φαινόμενης» ζήτησης, βάσει της οποίας πραγματοποιείται ο προγραμματισμός της ένταξης των συμβατικών μονάδων παραγωγής για το επόμενο 24ωρο ακολουθείται η εξής θεώρηση: Αρχικά εκτιμάται η αναμενόμενη ωριαία ζήτηση φορτίου για την επόμενη ημέρα κατανομής. Από αυτήν αφαιρείται η μέση αναμενόμενη Φ/Β παραγωγή για την αντίστοιχη ώρα, χρησιμοποιώντας απλουστευμένο αλγόριθμο πρόβλεψης.

Κατά τη φάση της λειτουργίας, η συνολική στρεφόμενη εφεδρεία του συστήματος κατανέμεται μεταξύ των ενταγμένων μονάδων κατά τρόπο ώστε η εφεδρεία να παρέχεται κατά προτεραιότητα από τις λιγότερο οικονομικές μονάδες, χωρίς βέβαια να παραβιάζεται το τεχνικό τους ελάχιστο.

6.2.3 Πολιτική Διαχείρισης ΜΔΝ με ΥΒΣ

Η υιοθετηθείσα πολιτική διαχείρισης του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής ενός ΜΔΝ με ενταγμένο έναν ΥΒΣ βασίζεται στον 24ωρο προγραμματισμό λειτουργίας του συστήματος

παραγωγής του νησιού. Η υλοποίηση του προγραμματισμού περιγράφεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος και αποτελείται από τα εξής βήματα που βασίζονται στην περιγραφή των δημοσιεύσεων [36, 37]:

➤ **Βήμα 1^ο: Απαίτηση Εγγυημένης Ισχύος και Ενέργειας**

Ο Διαχειριστής ΜΔΝ (ΔΜΔΝ) μπορεί να απαιτήσει από τον Διαχειριστή του ΥΒΣ (ΔΥΒΣ) ένα συγκεκριμένο ποσό **εγγυημένης ισχύος και ενέργειας** για το επόμενο 24ωρο, εφόσον κρίνει ότι αυτό είναι σκόπιμο ή απαραίτητο, ώστε να καλυφθεί αξιόπιστα η προβλεπόμενη ζήτηση.

Εγγυημένη παροχή ζητείται όταν το ημερήσιο φορτίο του συστήματος υπερβαίνει την ετήσια αιχμή, μειωμένη κατά την εγγυημένη ισχύ του ΥΒΣ. Για ΥΒΣ μικρού σχετικά μεγέθους, αυτό συμβαίνει για πολύ μικρό διάστημα του έτους, με αποτέλεσμα η ζήτηση εγγυημένης παροχής και η συνεπακόλουθη άντληση από το δίκτυο να περιορίζονται δραστικά, σε πρακτικώς αμελητέα ή και μηδενικά επίπεδα.

➤ **Βήμα 2^ο: Προσφορά Ενέργειας από τον Παραγωγό**

Ο ΔΥΒΣ, λαμβάνοντας υπόψη το ενεργειακό απόθεμα των μπαταριών του ΥΒΣ, υποβάλλει προσφορά ενέργειας για τις επόμενες 24 ώρες, τηρώντας απόθεμα ασφαλείας ίσο με 25% της εγγυημένης ενέργειας. Επιπλέον, η προσφορά ενέργειας του ΔΥΒΣ λαμβάνει υπόψη και την προβλεπόμενη παραγωγή του αιολικού πάρκου του ΥΒΣ. Η ημερήσια προσφορά ενέργειας πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την εγγυημένη ενέργεια που ζητείται από τον Διαχειριστή.

➤ **Βήμα 3^ο: Δήλωση Φορτίου από τον Παραγωγό**

Εάν ο ΔΥΒΣ διαπιστώνει ότι η διαθέσιμη προς απόδοση ενέργεια υπολείπεται της ζητηθείσας από τον ΔΜΔΜ εγγυημένης ενέργειας του επόμενου 24ωρου, τότε υποβάλλει στον ΔΜΔΝ Δήλωση Φορτίου, δηλαδή αιτείται την απορρόφηση ορισμένης ποσότητας ενέργειας από το δίκτυο ώστε να φορτίσει τις μπαταρίες με την απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας για τη διασφάλιση της εγγυημένης παροχής.

Προκειμένου να ελαχιστοποιείται η απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο, δεν επιτρέπεται ο ΔΥΒΣ να υποβάλει προσφορά ενέργειας μεγαλύτερη από την εγγυημένη, εφόσον υποβάλει ταυτόχρονα και δήλωση φορτίου. Επιπλέον, η δήλωση φορτίου δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την εγγυημένη ενέργεια δια τον προκαθορισμένο συντελεστή απόδοσης του κύκλου φόρτισης-παραγωγής του ΥΒΣ.

➤ **Βήμα 4^ο: Κατάρτιση Προγράμματος Παραγωγής και Φόρτισης του ΥΒΣ από τον ΔΜΔΝ**

Ο ΔΜΔΝ, με βάση την **Προσφορά Ενέργειας** και τη **Δήλωση Φορτίου** του ΔΥΒΣ, καταρτίζει αντίστοιχα προγράμματα παραγωγής και φόρτισης. Η προσφερόμενη ενέργεια του

ΥΣΑΜ προσαρμόζεται στην ημερήσια καμπύλη φορτίου έτσι ώστε να αποκόπτονται/εξομαλύνονται οι αιχμές και να διευκολύνεται και να καθίσταται οικονομικότερη η λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αντίστοιχα, η φόρτιση από το δίκτυο για εξασφάλιση της εγγυημένης ενέργειας προσαρμόζεται στην κοιλάδα της καμπύλης φορτίου.

Η κατάρτιση του προγράμματος παραγωγής και άντλησης του ΥΒΣ πραγματοποιείται από τον ΔΜΔΝ, συνεκτιμώντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη τις μέγιστες τιμές της ισχύος παραγωγής και τα ταехνικά ελάχιστα των μπαταριών. Ως ημερήσια καμπύλη φορτίου για τον προγραμματισμό της λειτουργίας των υδροστροβίλων χρησιμοποιείται η καμπύλη του «φαινόμενου» φορτίου μετά την αφαίρεση της προβλεπόμενης μέσης Φ/Β παραγωγής.

➤ **Βήμα 5^ο: Κατάρτιση Προγράμματος Ένταξης των Συμβατικών Μονάδων από τον Διαχειριστή**

Αφού έχει καθοριστεί το πρόγραμμα ένταξης και λειτουργίας των μπαταριών του ΥΒΣ σε κατάσταση φόρτισης και παραγωγής, ο ΔΜΔΝ πραγματοποιεί από την προηγούμενη της ημέρα κατανομή τον προγραμματισμό ένταξης των συμβατικών μονάδων του συστήματος για κάθε ώρα. Με βάση την πρόβλεψη φορτίου και το κατάλληλο ποσοστό εφεδρείας ε , η συνολική ικανότητα των συμβατικών μονάδων την i ώρα του επόμενου 24ώρου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση της ισχύος P'_L ,

$$P'_{L,i} = (1 + \varepsilon) \cdot [(P_{L,i} - P_{PV,i}) + P_{D,i} - P_{E,i}] \quad (6.9)$$

όπου $P_{L,i}$: η ισχύς του φορτίου που προβλέπεται για την ώρα i
 $P_{PV,i}$: η προβλεπόμενη φωτοβολταϊκή παραγωγή για την ώρα i
 $P_{D,i}$: η απορροφούμενη ισχύς από το δίκτυο για φόρτιση για την ώρα i
 $P_{E,i}$: η προγραμματισμένη ισχύς παραγωγής του ΥΒΣ για την ώρα i

Η σειρά ένταξης και η φόρτιση των συμβατικών μονάδων παραγωγής καθορίζεται κατά τον καθιερωμένο τρόπο, με βάση τη δεδομένη σειρά ένταξής τους, ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος παραγωγής και να ικανοποιούνται οι λειτουργικοί περιορισμοί.

➤ **Βήμα 6^ο: Καθορισμός Ορίων Διείσδυσης των Αιολικών εκτός ΥΣΑΜ**

Ο ΔΜΔΝ υπολογίζει τον περιορισμό τεχνικού ελαχίστου ($P_{Wmax,T}$) και τον δυναμικό περιορισμό διείσδυσης της αιολικής ισχύος ($P_{Wmax,D}$) για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις και κοινοποιεί τον αυστηρότερο από τους δύο στους αιολικούς παραγωγούς εκτός ΥΣΑΜ.

$$P_{W,i} \leq (P_{L,i} - P_{PV,i}) + P_{D,i} - \sum P_{Cmin,i} - \sum c_{BT,c} \cdot P_{Hn,i} = P_{Wmax,T,i} \quad (6.10)$$

$$P_{W,i} \leq c_D P_{L,i} = P_{Wmax,D,i} \quad (6.11)$$

$$P_{W\max,i} = \min\{P_{W\max,T,i}, P_{W\max,D,i}\} \quad (6.12)$$

- όπου $P_{Cmin,i}$: το τεχνικό ελάχιστο των συμβατικών μονάδων που προγραμματίζονται για ένταξη την ώρα i
- $P_{Hn,i}$: η ονομαστική ισχύς των μπαταριών που προγραμματίζονται για ένταξη την ώρα i
- $P_{E,i}$: η προγραμματισμένη ισχύς παραγωγής του ΥΒΣ την ώρα i
- c_D : ο συντελεστής τεχνικού ελαχίστου της κάθε συμβατικής μονάδας, % της ονομαστικής της ισχύος
- c_T : ο συντελεστής του δυναμικού περιορισμού, % του φορτίου της ώρας i
- $c_{BT,c}$: το «συμβατικό» τεχνικό ελάχιστο των μπαταριών, το οποίο λαμβάνεται ίσο με 40% της ονομαστικής τους ικανότητας
- $P_{W\max,T,i}$: η μέγιστη επιτρεπόμενη αιολική ισχύς την ώρα i λόγω του περιορισμού τεχνικού ελαχίστου
- $P_{W\max,D,i}$: η μέγιστη επιτρεπόμενη αιολική ισχύς την ώρα i λόγω του δυναμικού περιορισμού
- $P_{W\max,i}$: η μέγιστη επιτρεπόμενη αιολική ισχύς την ώρα i

Σημειώνεται, ότι στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός των περιορισμών διείσδυσης των Α/Π υλοποιήθηκε σε πραγματικό χρόνο, αντί εκ των προτέρων στη βάση του ημερήσιου προγραμματισμού του συστήματος. Η πολιτική δυναμικού επαναπροσδιορισμού των περιορισμών διείσδυσης σε πραγματικό χρόνο ενδείκνυται στην περίπτωση υψηλής διείσδυσης Φ/Β ισχύος.

➤ **Βήμα 7^ο: Καθορισμός Ορίων Διείσδυσης του Α/Π του ΥΣΑΜ**

Στο βήμα αυτό υπολογίζονται τα όρια διείσδυσης του Α/Π του ΥΒΣ. Το συγκεκριμένο βήμα δεν αφορά τον ημερήσιο προγραμματισμό της λειτουργίας του συστήματος, αλλά τη λειτουργία του σε πραγματικό χρόνο, και γιαυτό δεν πραγματοποιείται την προηγούμενη της ημέρας κατανομή.

Εκτός από την παροχή εγγυημένης ισχύος, σύμφωνα με τα όσα αναπτύχθηκαν στο Βήμα 4, ο ΥΒΣ μπορεί να διαθέτει απευθείας την αιολική του παραγωγή στο δίκτυο συμμετέχοντας στο set-point του συστήματος. Η πολιτική που γενικά ακολουθείται για υβριδικούς σταθμούς είναι η περίσσεια set-point να διατίθεται στο Α/Π του σταθμού για απευθείας έγχυση αιολικής παραγωγής στο δίκτυο, όταν ο συνολικός περιορισμός απορρόφησης αιολικής ισχύος υπερβαίνει την εγκατεστημένη (ή συμφωνημένη) ισχύ των Α/Π εκτός του υβριδικού σταθμού, σύμφωνα με την εξίσωση 6.13 για την ώρα i :

$$P_{Wsp,i}^{Y\Sigma} = \max\{(P_{W\max,i} - P_{W,inst}) \cdot 0\} \quad (6.13)$$

όπου $P_{Wsp,i}^{Y\Sigma}$: το περιθώριο συμμετοχής στο set-point για Υβριδικούς Σταθμούς

$P_{W,inst}$: η εγκατεστημένη ή συμφωνημένη ισχύς των Α/Π εκτός του Υβριδικού Σταθμού

Εκμετάλλευση του περιθωρίου τεχνικού ελαχίστου του ΥΒΣ

Ο ΥΒΣ διαθέτει μπαταρίες VRB οι οποίες παρουσιάζουν εξαιρετικά ταχεία απόκριση, ιδίως συγκρινόμενες με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης όπως οι υδροστρόβιλοι στους αντλησιοταμιευτικούς υβριδικούς σταθμούς. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι το σύστημα αποθήκευσης των μπαταριών VRB μπορεί να παρακολουθεί την κυμαινόμενη ισχύ εξόδου του Α/Π σε πραγματικό χρόνο και να αντισταθμίζει απότομες μεταβολές της ή ακόμα και ενδεχόμενη απότομη απώλεια του συνόλου της αιολικής παραγωγής (π.χ. λόγω σφάλματος).

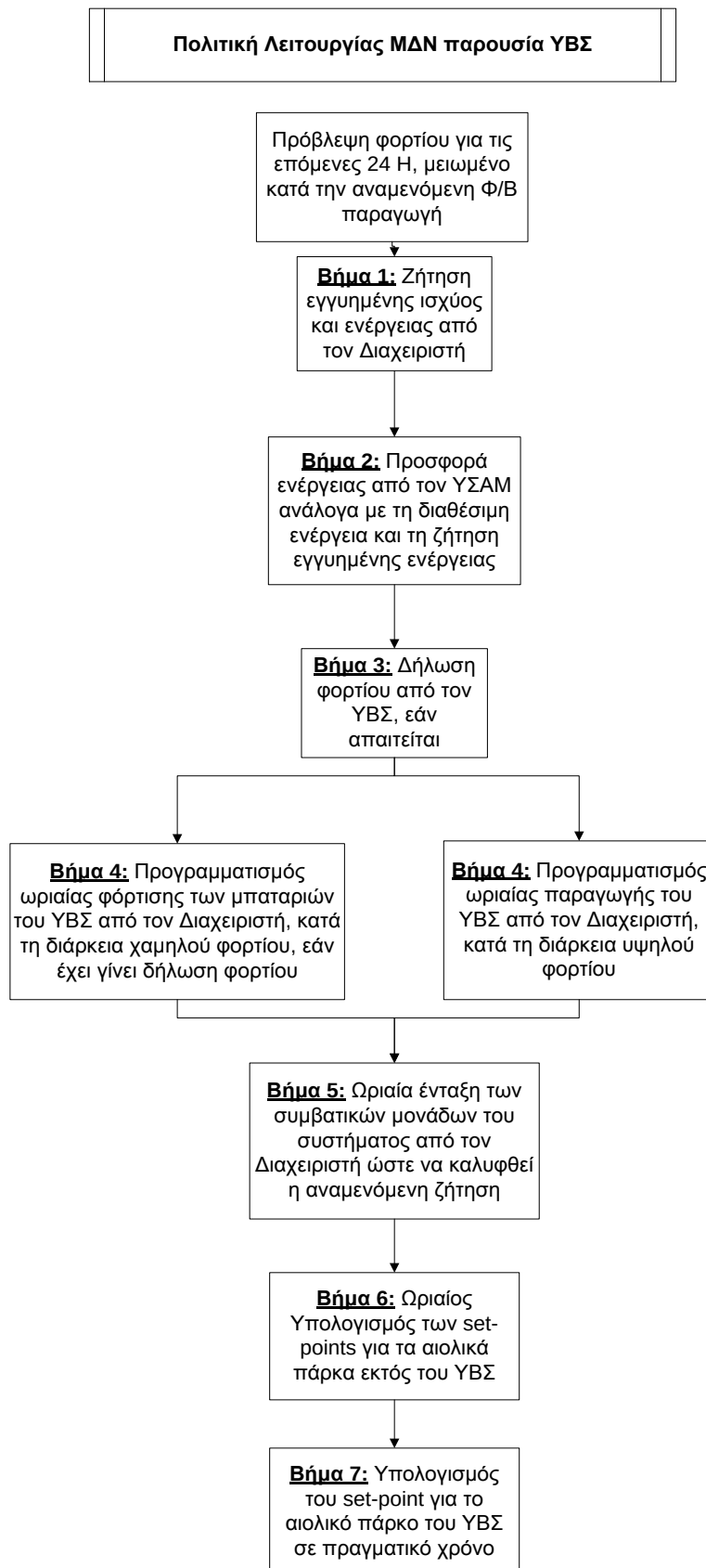
Σε αντίθεση λοιπόν με τα υπόλοιπα Α/Π του συστήματος, ο δυναμικός περιορισμός δεν είναι αναγκαίο να εφαρμόζεται για το Α/Π ενός ΥΒΣ με VRB, αφού οι ταχείες μεταβολές της παραγωγής του μπορούν να αντισταθμιστούν από το σύστημα αποθήκευσης, το οποίο παρέχει την απαιτούμενη πρωτεύουσα εφεδρεία για την κάλυψή τους.

Έτσι, το Α/Π του ΥΒΣ μπορεί να διαθέτει απευθείας στο δίκτυο την αιολική του παραγωγή σε καταστάσεις όπου ο περιορισμός τεχνικών ελαχίστων είναι περισσότερο χαλαρός από τον δυναμικό περιορισμό. Δηλαδή μπορεί να εκμεταλλεύεται το πρόσθετο περιθώριο set-point που δίνεται από την εξίσωση 6.14 (επιπλέον της ενδεχομένως διαθέσιμης περίσσειας set-point από την εξίσωση 6.13)

$$P_{Wextrasp,i}^{Y\&AM} = \max\{ (P_{Wmax,T,i} - P_{Wmax,D,i}) \ 0 \} \quad (6.14)$$

όπου $P_{Wextrasp,i}^{Y\&AM}$ είναι το πρόσθετο περιθώριο set-point για τον υπό μελέτη ΥΣΑΜ.

Στην απέναντι σελίδα παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας που ακολουθείται κατά τη διαμόρφωση της πολιτικής λειτουργίας ενός ΥΒΣ σε ΜΔΝ. Ουσιαστικά το διάγραμμα απεικονίζει τα βήματα που περιγράφηκαν παραπάνω.



Σχήμα 6. 1 Διάγραμμα ροής του ημερήσιου προγραμματισμού λειτουργίας συστήματος ΜΔΝ

6.3 Εσωτερική Λειτουργία του ΥΒΣ

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η λογική με βάση την οποία ο Διαχειριστής του ΥΒΣ υποβάλλει Προσφορά Ενέργειας και Δήλωση Φορτίου κατά τη διάρκεια της προηγούμενης ημέρας, καθώς επίσης και τους περιορισμούς οι οποίοι επιβάλλονται. Επιπλέον περιγράφεται η εσωτερική λειτουργία του ΥΒΣ κατά τη διάρκεια του 24ώρου [36, 37].

6.3.1 Προσφορά Ενέργειας και Δήλωση Φορτίου

Ο ΔΥΒΣ στο τέλος κάθε ημέρας, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση φόρτισης των μπαταριών και την προβλεπόμενη παραγωγή του Α/Π του ΥΒΣ για τις επόμενες ώρες, υποβάλλει προσφορά ενέργειας τουλάχιστον ίση με την εγγυημένη ενέργεια που ζητείται από τον ΔΜΔΝ. Εφόσον ο ΔΥΒΣ έχει υποβάλει δήλωση φορτίου για να εξασφαλίσει την εγγυημένη ενέργεια του επόμενου 24ωρου, τότε η προσφερόμενη ενέργεια θα είναι υποχρεωτικά ίση με την εγγυημένη ενέργεια.

Η προσφερόμενη ενέργεια των υβριδικών σταθμών βασίζεται στη διαθέσιμη ενέργεια στα συστήματα αποθήκευσης. Η πολιτική λειτουργίας του σταθμού προβλέπει τη διατήρηση ελάχιστου ενεργειακού αποθέματος ίσου με το 25% της ελάχιστης εγγυημένης ενέργειάς του και μέγιστου ίσου με 95% της ονομαστικής του χωρητικότητας. Έτσι υπάρχει πάντα η δυνατότητα ο BESS να παρέχει εφεδρεία στο σύστημα.

Λόγω της πολύ μεγάλης χωρητικότητας των VRB του ΥΣΑΜ είναι δυνατός ο υπολογισμός της προσφοράς ενέργειας αποκλειστικά και μόνο με τα διαθέσιμα αποθέματα ενέργειας, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η αναμενόμενη αιολική παραγωγή. Για να αυξηθεί ωστόσο ο βαθμός αξιοποίησης της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής γίνεται συνεκτίμηση της αναμενόμενης αιολικής παραγωγής στις ημερήσιες προσφορές ενέργειας. Η συνεκτίμηση αυτή εισάγει σημαντικές αβεβαιότητες (σφάλμα πρόβλεψης του ανέμου, ετεροχρονισμός της αναμενόμενης αιολικής παραγωγής με τον προγραμματισμό ένταξης του ΥΒΣ για παραγωγή). Έτσι, στον αλγόριθμο προσομοίωσης που χρησιμοποιείται, υιοθετήθηκε συντηρητική λογική συνυπολογισμού της αναμενόμενης αιολικής παραγωγής.

Η δήλωση φορτίου υποβάλλεται για την εξασφάλιση της εγγυημένης ενέργειας που απαιτεί ο ΔΜΔΝ για το επόμενο 24ωρο, εφόσον η διαθέσιμη ενέργεια του ΥΒΣ δεν επαρκεί.

6.3.2 Λειτουργία του ΥΒΣ κατά τη διάρκεια του 24ώρου

6.3.2.1 Παροχή Εγγυημένης Ισχύος

Αφού ο ΔΥΒΣ υποβάλει την Προσφορά Ενέργειας και τη Δήλωση Φορτίου για το επόμενο 24ωρο, ο ΔΜΔΝ καταρτίζει το πρόγραμμα παραγωγής και φόρτισης και ανακοινώνει στον ΔΥΒΣ την ανά ώρα προγραμματισμένη ισχύ παραγωγής των μπαταριών και την προγραμματισμένη ισχύ φόρτισης από το δίκτυο, όταν έχει υποβληθεί Δήλωση Φορτίου.

Ο ΔΥΒΣ, γνωρίζοντας την ισχύ κατανομής των μονάδων ανά ώρα, πραγματοποιεί ωριαίο προγραμματισμό ένταξης των μπαταριών. Η προγραμματισμένη ισχύς παραγωγής για την ώρα i , $P_{E,i}$, επιμερίζεται ισότιμα στα διαθέσιμα blocks των μπαταριών ώστε κάθε block να λειτουργεί στο ίδιο ποσοστό της ονοματικής ισχύος του.

Η ισχύς $P_{H,i}$ που παράγει ο ΥΒΣ μπορεί μερικώς να προέρχεται από το Α/Π του ΥΒΣ, οπότε οι Α/Γ υποκαθιστούν ισχύ των μπαταριών με υποφόρτιση των τελευταίων, λειτουργία που αποκαλείται «**συνεργασία μπαταριών-αιολικών**». Η λειτουργία αυτή αυξάνει την πολυπλοκότητα ελέγχου του συστήματος και προϋποθέτει την ταχεία δυναμική απόκριση των μπαταριών, ώστε να μπορούν να αντισταθμίσουν τις διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής ή την απώλειά της, χωρίς να τεθεί σε κίνδυνο η ασφαλής λειτουργία του συστήματος.

Στον ΥΒΣ της παρούσας μελέτης δεν πραγματοποιείται σε καμία περίπτωση ταυτόχρονη παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας από τις μπαταρίες, όπως συμβαίνει σε έναν αντλησιοταμιευτικό υβριδικό σταθμό παραγωγής. Η στρατηγική αυτή αν και θα μπορούσε να είναι αποδεκτή, απαιτεί αυξημένη πολυπλοκότητα διαμόρφωσης και λειτουργίας του σταθμού.

6.3.2.2 Διαχείριση της Αιολικής Παραγωγής του ΥΒΣ

Όταν ο ΥΣΑΜ βρίσκεται σε κατάσταση προγραμματισμένης παραγωγής, τότε η διαθέσιμη αιολική παραγωγή έχει πάντα προτεραιότητα.

1. **Συμμετοχή στην προγραμματισμένη ισχύ:** Μέρος της ισχύος κατανομής του ΥΣΑΜ παρέχεται από το Α/Π, ενώ το υπόλοιπο παράγεται από τις μπαταρίες, οι οποίες αντισταθμίζουν τη μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής.

Εάν το Α/Π διαθέτει αρκετή περίσσεια αιολικής ισχύος, επιπλέον της προγραμματισμένης παραγωγής, τότε η σειρά προτεραιότητας είναι η εξής:

2. **Τροφοδότηση των αντλιών:** Εάν οι μπαταρίες βρίσκονται σε κατάσταση εκφόρτισης, όταν η διαθέσιμη αιολική παραγωγή του ΥΒΣ δεν επαρκεί για την κάλυψη της προγραμματισμένης ισχύος παραγωγής, τότε οι αντλίες τροφοδοτούνται από τις μπαταρίες μειώνοντας την καθαρή ενέργεια εξόδου. Εάν η παραγωγή του Α/Π είναι μηδενική ή δεν επαρκεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των αντλιών και τα ενεργειακά αποθέματα της μπαταρίας είναι στο ελάχιστο, τότε αυτές τροφοδοτούνται απευθείας από το δίκτυο.
3. **Συμμετοχή στο set-point:** Οι μπαταρίες παρέχουν το σύνολο της εγγυημένης ισχύος, ενώ το Α/Π του ΥΣΑΜ εγχέει απευθείας την παραγωγή του στο δίκτυο με βάση την περίσσεια set-point
4. **Φόρτιση από το Α/Π:** Αυτή η δυνατότητα υπάρχει μόνο εάν το Α/Π υποκαθιστά πλήρως τις μπαταρίες. Σε αυτήν την περίπτωση, η περίσσεια αιολικής ισχύος χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των VRB

6.3.3 Ισοζύγιο Ισχύος του ΥΒΣ

Σε όλες τις χρονικές περιόδους του έτους και για οποιαδήποτε πιθανή κατάσταση λειτουργίας του ΥΣΑΜ, θα πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση 6.15 [36, 37]. Η εξίσωση αυτή εκφράζει το ισοζύγιο ισχύος του σταθμού, ώστε η λειτουργία του να ανταποκρίνεται στον ημερήσιο προγραμματισμό που έχει προηγηθεί, αλλά και στους περιορισμούς που τίθενται στην απευθείας έγχυση αιολικής παραγωγής στο δίκτυο:

$$P_{B,i} + P_{W,i} = P_{H,i} + P_{MS,i} \quad (6.15)$$

όπου:

$P_{B,i}$: η ισχύς των μπαταριών του ΥΒΣ την ώρα i , θετική εάν παράγεται και αρνητική εάν απορροφάται

$P_{W,i}$: η ισχύς εξόδου του Α/Π του ΥΣΑΜ την ώρα i

$P_{H,i}$: η ολική ισχύς του ΥΒΣ την ώρα i , θετική όταν παράγει και αρνητική όταν απορροφά από το δίκτυο.

$P_{MS,i}$: η ισχύς εξόδου του ΥΒΣ που εγχέεται απ' ευθείας στο δίκτυο, μέσω εκμετάλλευσης set-point του συστήματος την ώρα i

Σε διαστήματα προγραμματισμένης παραγωγής, η εξ. (25) εκφράζει την απαίτηση η ισχύς εξόδου των μπαταριών, μαζί με την αιολική παραγωγή, να ισούται με την ολική ισχύ του ΥΒΣ συν τη συμμετοχή στο διαθέσιμο set-point του συστήματος. Σε κατάσταση φόρτισης από το δίκτυο, η ισχύς φόρτισης των μπαταριών οφείλει να ισούται με την προγραμματισμένη ισχύ απορρόφησης από το δίκτυο, συν την ενδεχόμενη πρόσθετη απορρόφηση αιολικής παραγωγής για φόρτιση, ενώ μέρος της αιολικής παραγωγής μπορεί επίσης να εγχέεται στο δίκτυο μέσω της διαθέσιμης περίσσειας set-point. Σε διαστήματα μη προγραμματισμένης παραγωγής ή φόρτισης, η αιολική παραγωγή πρέπει να ισούται με την ισχύ φόρτισης των μπαταριών συν τη συμμετοχή στο διαθέσιμο set-point του συστήματος.

Μη τήρηση του ισοζυγίου κατά τη φάση της λειτουργίας έχει ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση του συνολικού φορτίου του συστήματος από το φορτίο για το οποίο έγινε ο προγραμματισμός λειτουργίας του συστήματος από τον ΔΜΔΝ (π.χ. όταν η ισχύς φόρτισης υπερβαίνει σημαντικά την παραγωγή του Α/Π του ΥΒΣ, χωρίς να έχει υποβληθεί δήλωση φορτίου). Αυτό μπορεί να έχει σαν συνέπεια την εμφάνιση ελλείμματος ή πλεονάσματος παραγωγής, καταστάσεις κατ' αρχήν μη αποδεκτές όταν οι σχετικές αποκλίσεις είναι σημαντικές.

Η τήρηση του παραπάνω ισοζυγίου ισχύος, ώστε να μην προκαλούνται προβλήματα στο σύστημα του νησιού, επιβάλλει την εξασφάλιση ισορροπίας μεταξύ της αιολικής παραγωγής και της ισχύος των μπαταριών. Αν η διαθέσιμη αιολική παραγωγή μειωμένη κατά την απευθείας εγχέομενη στο δίκτυο είναι μεγαλύτερη από την ισχύ των ενταγμένων VRB, τότε περιορίζεται η ισχύς εξόδου των ανεμογεννητριών μέσω κατάλληλης εντολής. Αν αντίθετα η διαθέσιμη αιολική παραγωγή μειωμένη κατά την απευθείας εγχέομενη στο δίκτυο είναι

μικρότερη από τα τεχνικά ελάχιστα των ενταγμένων VRB, τότε τίθεται θέμα απένταξης των μπαταριών.

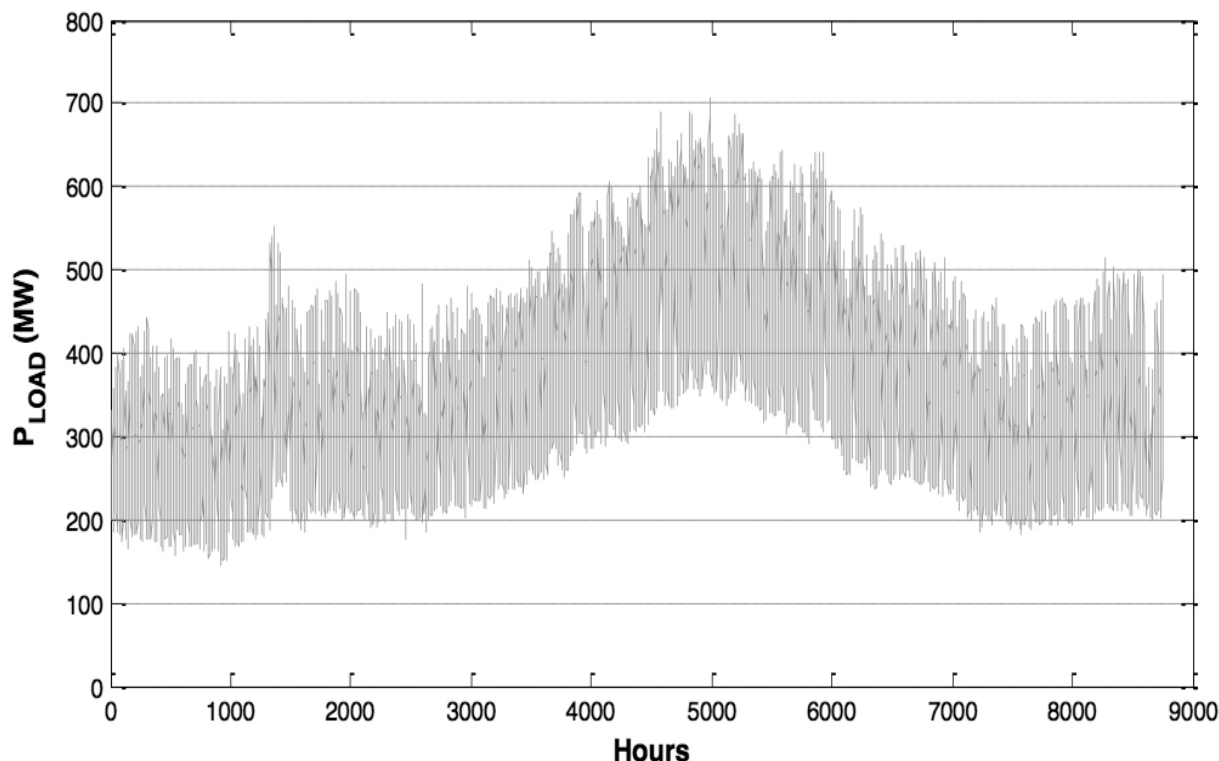
6.4 Δεδομένα εισόδου του συστήματος της Κρήτης

Εδώ παρατίθενται τα δεδομένα εισόδου των προσομοιώσεων, που περιλαμβάνουν τα αναλυτικά στοιχεία των ηλεκτρικών συστημάτων της Κρήτης καθώς και του εξεταζόμενου ΥΒΣ. Αναλυτικά στοιχεία του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης

Ως έτος αναφοράς επελέγη το έτος 2015, κατά το οποίο εξετάζονται διάφορα σενάρια Φ/Β και αιολικής διείσδυσης. Για το έτος αυτό μελετάται η περίπτωση της αδειοδοτημένης αιολικής ισχύος 220 MW. Η Φ/Β ισχύς ελήφθη ίση με 102.042 MW, ώστε να προσεγγίζει το ισχύον περιθώριο. Δεν λαμβάνονται υπόψη άλλες τεχνολογίες σταθμών παραγωγής του νησιού (π.χ άλλοι αδειοδοτημένοι υβριδικοί και ηλιοθερμικοί σταθμοί). [36, 37]

6.4.1 Χαρακτηριστικά του φορτίου

Στο παρακάτω σχήμα 6.2 απεικονίζεται η ετήσια χρονοσειρά φορτίου που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης για το έτος αναφοράς 2015. Βασίζεται σε διαθέσιμες προηγούμενων ετών, προσαρμοσμένες για τις προβλεπόμενες τιμές αιχμής και ενέργειας για το έτος αυτό, θεωρώντας δηλαδή μέση ετήσια αύξηση της αιχμής και της ζήτησης ενέργειας ίση με 2.5%. Η αιχμή του φορτίου της Κρήτης αναμένεται για το 2015 να φτάσει τα 705 MW.



Σχήμα 6. 2 Ετήσια χρονοσειρά φορτίου της Κρήτης για το έτος 2015.

6.4.2 Χαρακτηριστικά των Συμβατικών Μονάδων

Η προβλεπόμενη σύνθεση και σειρά ένταξης των συμβατικών μονάδων παραγωγής του συστήματος της Κρήτης για τα έτη αναφοράς, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

ΤΥΠΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΜΙΚΤΗ ΙΣΧΥΣ (kW)	ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟ (kW)	ΣΕΙΡΑ ΕΝΤΑΞΗΣ
ST No 1	46500	19000	1
ST No2	46500	19000	2
ST No 3 & 4	25000	18000	3,4
ST No 5	25000	18000	5
ST No 6 & 7	15000	8000	6,7
CC	132300	25000/46000	8
ICE No 1	51120	25000	9
No 2	51120	35000	10
No 3	51120	25000	11
No 4	51120	25000	12
No 5	12280	3000	13
No 6	12280	3000	14
No 7	12280	6000	15
No 8	12280	3000	16
GT No 1	59368	10000	17
No 2	59368	10000	18
No 3	43300	5000	19
No 4	27950	5000	20
No 5	27950	5000	21
No 6	14720	3000	22
No 7	30000	3000	23
No 8	16250	3000	24
No 10	16200	3000	25
No 11	24000	5000	26
No 12	16250	3000	27

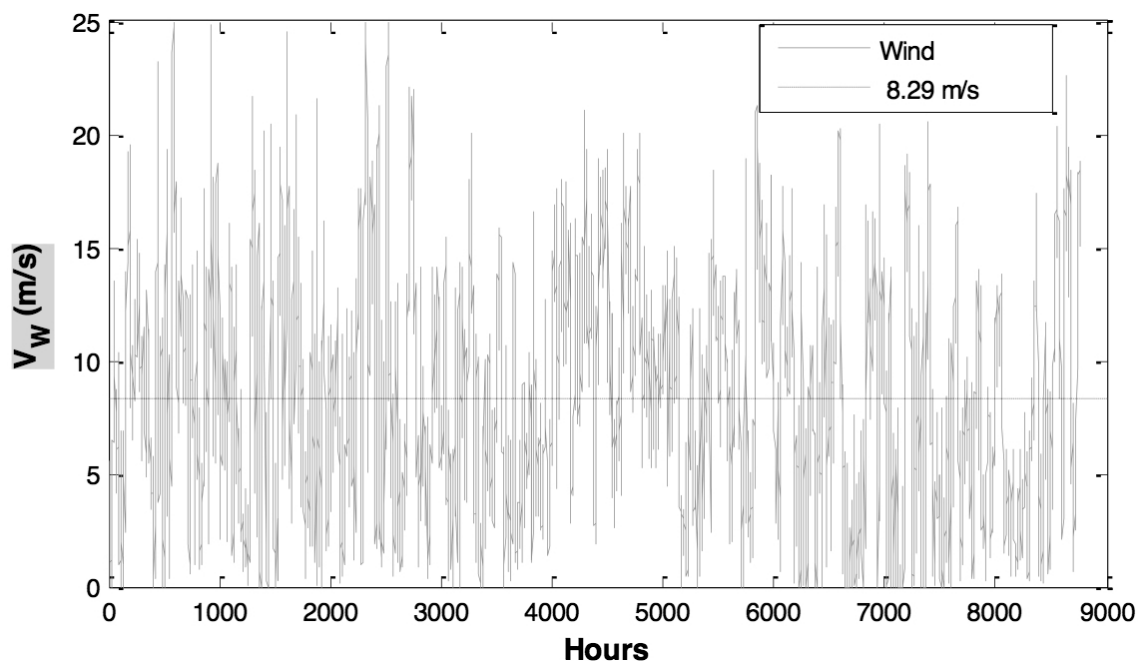
ST: Steam turbine, GT: Gas Turbine, ICE: Internal combustion engine, CC: Combined Cycle

Πίνακας 6. 1 Ονομαστική ισχύς και τεχνικό ελάχιστο των μονάδων παραγωγής της Κρήτης κατά σειρά ένταξης για το έτος 2015.

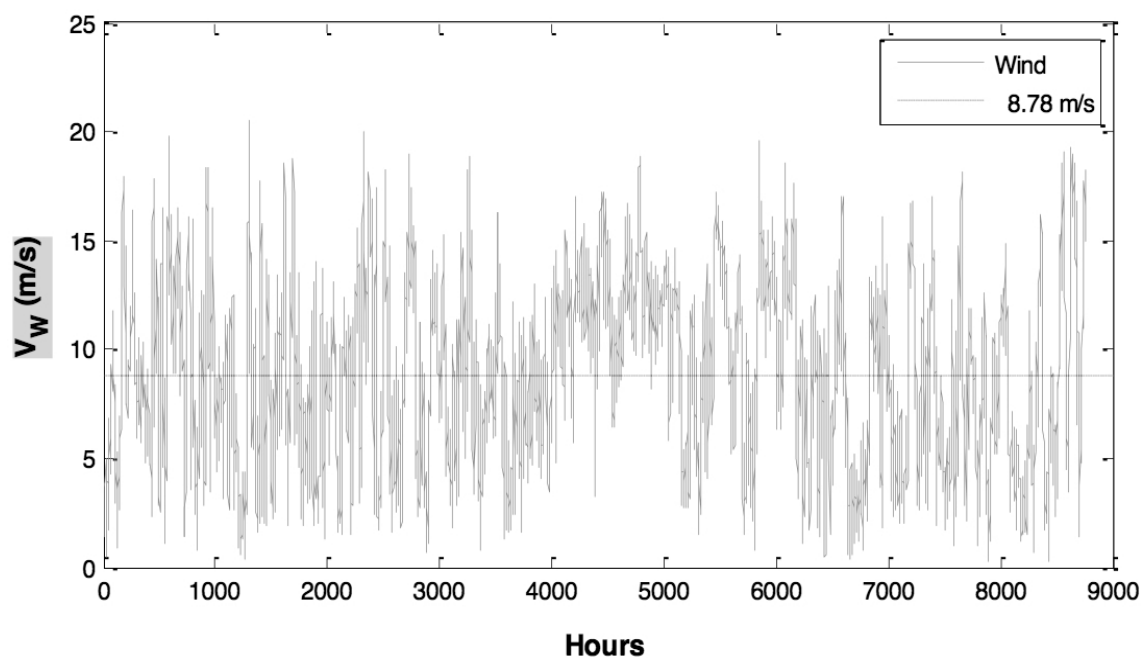
6.4.3 Χαρακτηριστικά Αιολικών Πάρκων εκτός του ΥΒΣ

Για τον υπολογισμό της ανά ώρα παραγόμενης ενέργειας των αιολικών πάρκων της Κρήτης χρησιμοποιήθηκαν τρεις ωριαίες και ταυτοχρονισμένες χρονοσειρές ανέμου από τις τοποθεσίες των νομών Ηρακλείου, Λασιθίου και Χανίων, προκειμένου να αναπαρασταθεί ορθότερα η γεωγραφική διασπορά των αιολικών σταθμών της Κρήτης. Σε κάθε περίπτωση, οι αιολικοί σταθμοί κατανέμονται στις τρεις τοποθεσίες κατ' αναλογία με την κατανομή των υφιστάμενων πάρκων του έτους 2010: Ν. Ηρακλείου: 41.4 MW, Ν. Λασιθίου: 98.7 MW, Ν. Χανίων: 26.45 MW. Θεωρείται ότι το σύνολο των Α/Π του νησιού λειτουργούν με καθεστώς ΣΑΩΛ.

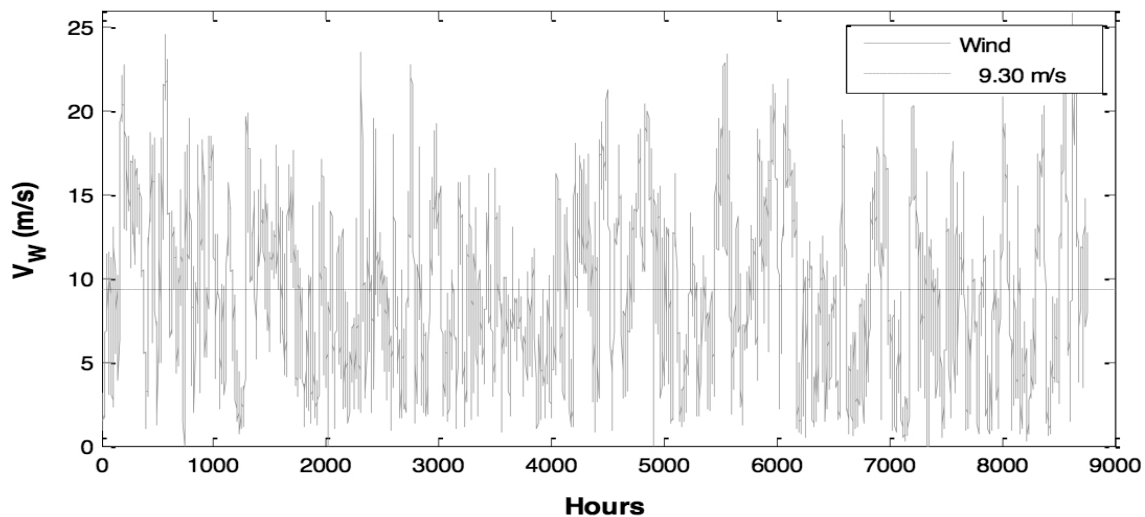
Στα σχήματα 6.3 έως 6.6 φαίνονται οι τρεις διαθέσιμες χρονοσειρές ανέμου και η αντιπροσωπευτική καμπύλη ισχύος Α/Γ (Vestas V52). Οι χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου θεωρούνται ανηγμένες στο ύψος της πλήμνης των Α/Γ. Σε κάθε περίπτωση θεωρείται ότι τα αιολικά πάρκα μπορούν να αποδώσουν μέγιστη ισχύ ίση με την ονομαστική τους, μείον τις απώλειες, που θεωρούνται της τάξης του 10% και αφαιρούνται από την ενεργειακή απόδοση των πάρκων.



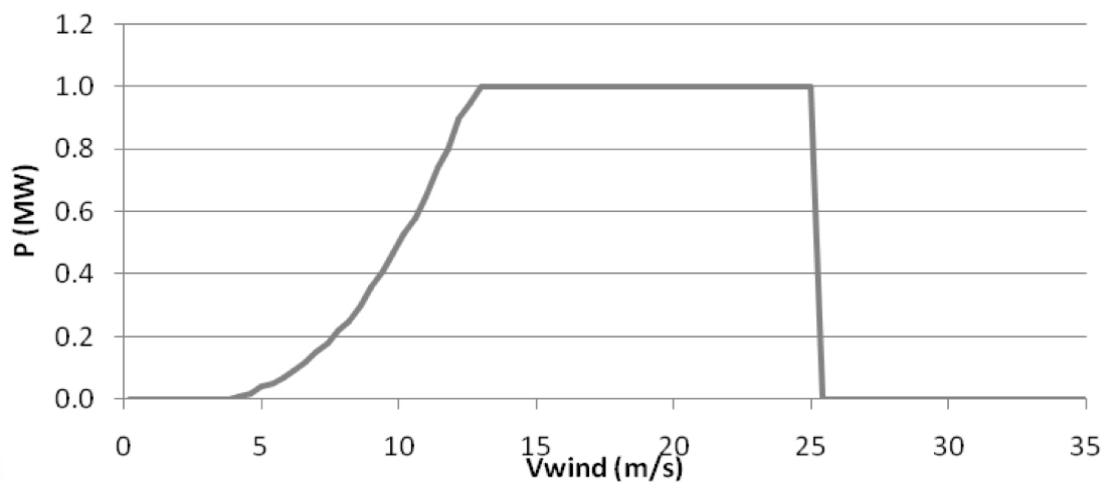
Σχήμα 6. 3 Ετήσια χρονοσειρά ανέμου για το Ν. Ηρακλείου (μέση ετήσια ταχύτητα : 8.29 m/s)



Σχήμα 6. 4 Ετήσια χρονοσειρά ανέμου για το Ν. Λασιθίου (μέση ετήσια ταχύτητα : 8.78 m/s)



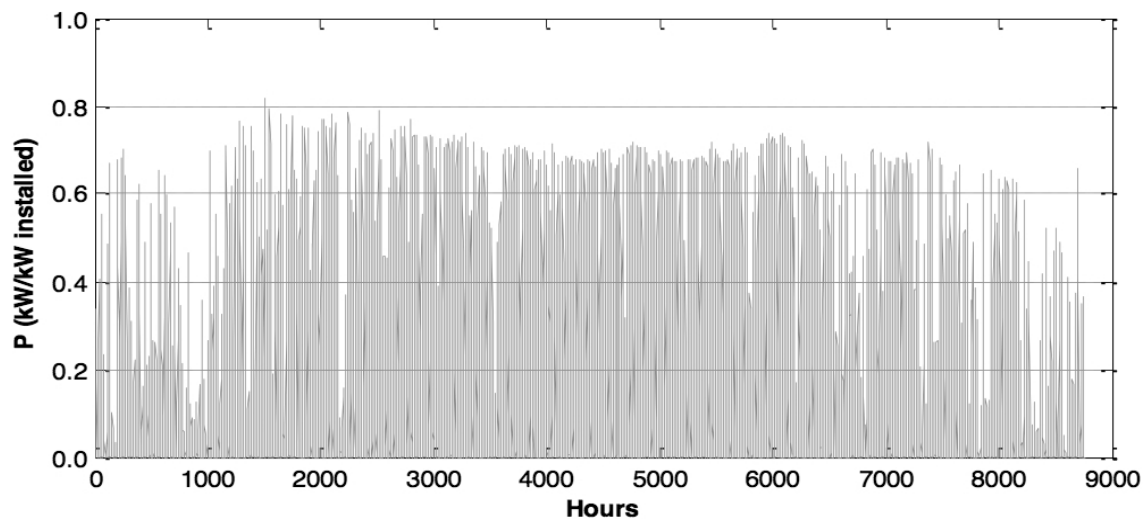
Σχήμα 6. 5 Ετήσια χρονοσειρά ανέμου για το Ν. Χανίων (μέση ετήσια ταχύτητα : 9.30 m/s)



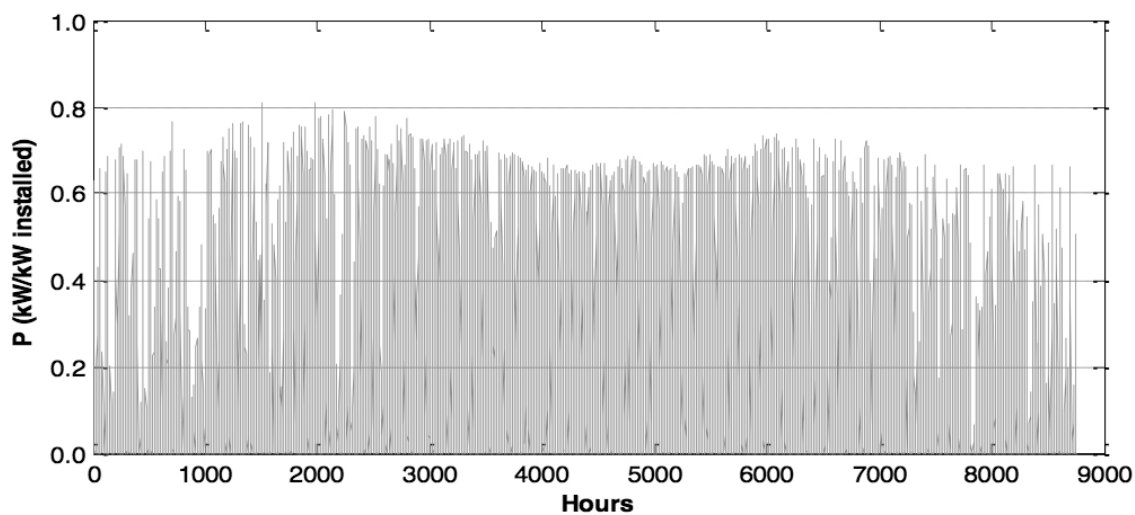
Σχήμα 6. 6 Τυπική καμπύλη ισχύος Α/Γ, ανά μονάδα επί της ονομαστικής της ισχύος.

6.4.4 Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί

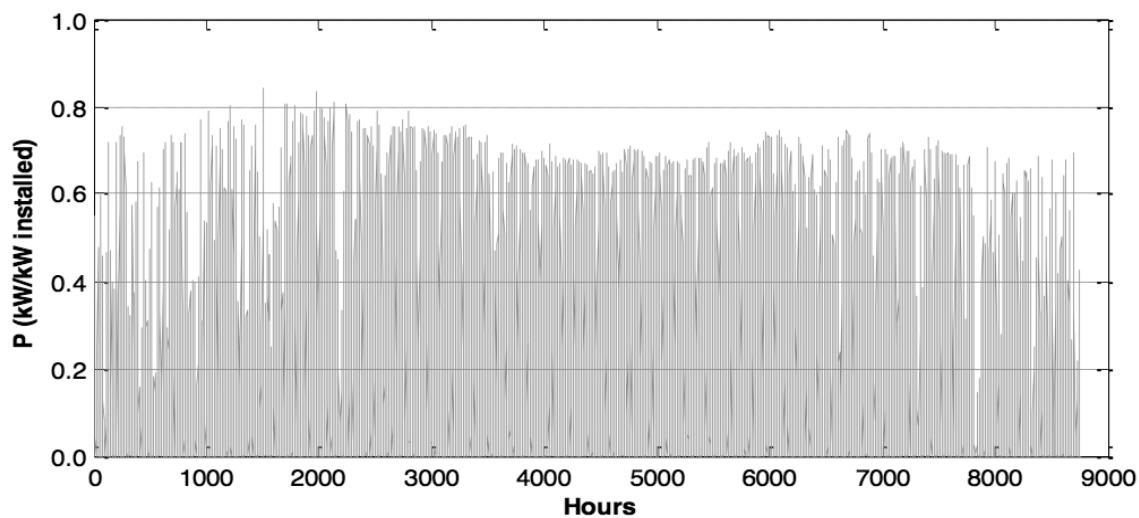
Για τον υπολογισμό της ανά ώρα παραγόμενης ενέργειας των φωτοβολταϊκών σταθμών της Κρήτης χρησιμοποιήθηκαν 3 ταυτοχρονισμένες χρονοσειρές ηλιακής ακτινοβολίας (από το μοντέλο ηλιακών δεδομένων SoDa [36, 37], για κάθε μία από τις τρεις γεωγραφικές περιοχές της Κρήτης που θεωρήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο (Χανιά, Ηράκλειο και Λασιθί). Με βάση τις χρονοσειρές αυτές και χρησιμοποιώντας μοντέλο προσομοίωσης που έχει αναπτυχθεί στον Τομέα Ηλεκτρικής ισχύος του ΕΜΠ [38] υπολογίζονται οι αντίστοιχες χρονοσειρές παραγόμενης ισχύος των Φ/Β που φαίνονται στα σχήματα 6.7 - 6.9. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β του νησιού θεωρείται ισοκαταμεμημένη στις τρεις γεωγραφικές περιοχές. Με τη θεώρηση αυτή προκύπτει μέση ετήσια ενεργειακή απόδοση των Φ/Β σταθμών του νησιού ίση με 1449.04 kWh ανά εγκατεστημένο kW.



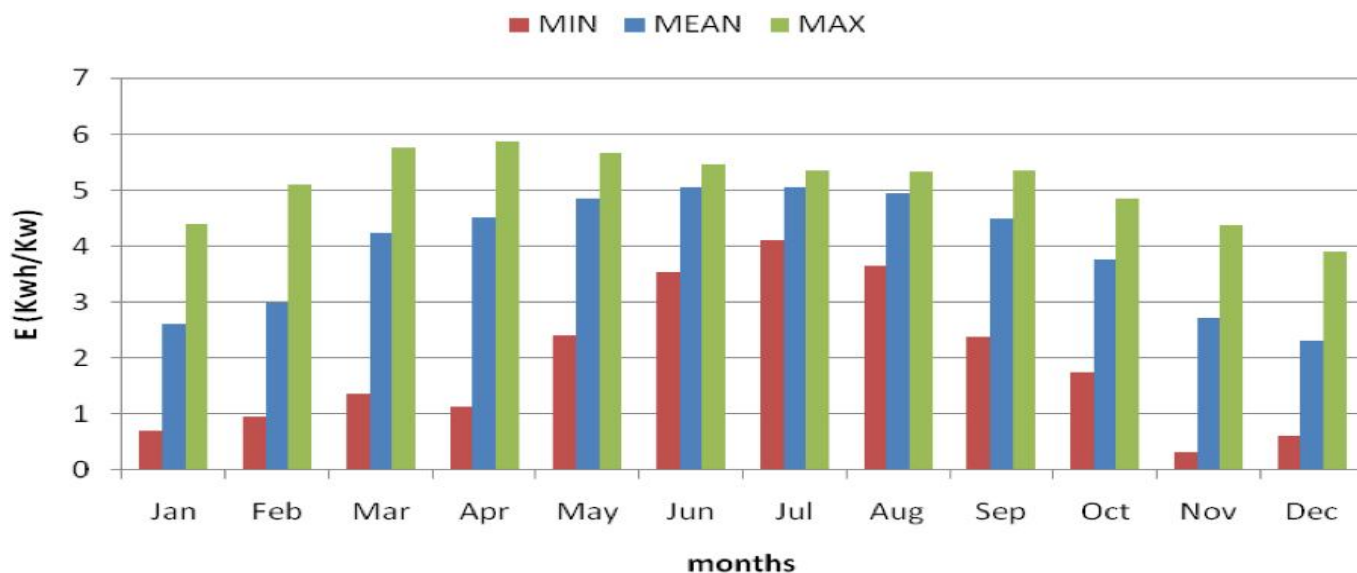
Σχήμα 6. 7 Χρονοσειρά παραγόμενης ισχύος ανά εγκατεστημένο kW Φ/Β (Χανιά)



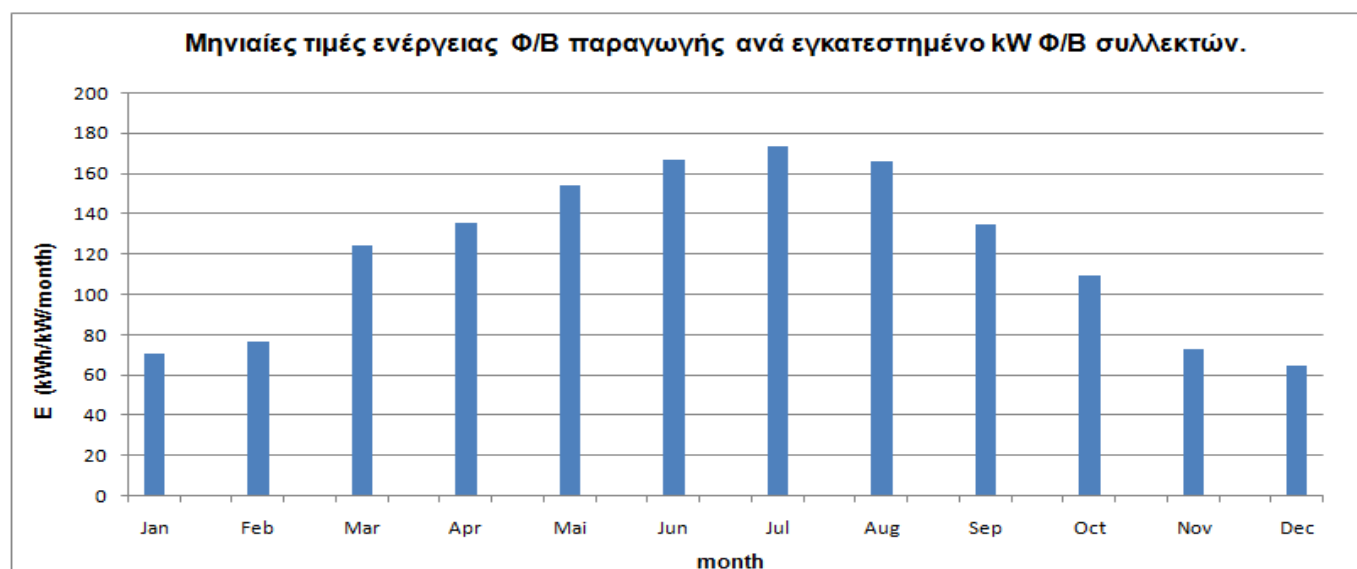
Σχήμα 6. 8 Χρονοσειρά παραγόμενης ισχύος ανά εγκατεστημένο kW Φ/Β (Ηράκλειο)



Σχήμα 6. 9 Χρονοσειρά παραγόμενης ισχύος ανά εγκατεστημένο kW Φ/Β (Σητεία)



Σχήμα 6. 10 Μέγιστη, ελάχιστη και μέση ημερήσια Φ/Β παραγωγή για τις ωριαίες χρονοσειρές των παραπάνω σχημάτων, για κάθε μήνα του έτους.



Σχήμα 6. 11 Μηνιαίες τιμές παραγόμενης ενέργειας ανά εγκατεστημένο kW Φ/Β συλλεκτών, για κάθε μήνα του έτους. Συνολική ετήσια ενέργεια 1449.04 kWh.

6.5 Τιμολογήσεις Ενέργειας και Ισχύος

Για τον υπολογισμό στοιχείων κόστους λειτουργίας του συστήματος της Κρήτης χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες τιμολογήσεις για τους σταθμούς ΑΠΕ και τους ΥΒΣ [36, 37]:

- ❖ Τιμή παραγόμενης ενέργειας από τις μπαταρίες του υβριδικού σταθμού: 236 €/MWh
- ❖ Τιμή απορροφούμενης από το δίκτυο ενέργειας για φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης του υβριδικού σταθμού: 186 €/MWh

- ❖ Τιμή παραγόμενης ενέργειας από το Α/Π του υβριδικού σταθμού¹ : 119.34 €/MWh
- ❖ Αποζημίωση διαθεσιμότητας ισχύος του υβριδικού σταθμού: 127 €/MW/έτος

6.6 Δεδομένα για τον ΥΣΑΜ

- Το αιολικό πάρκο που ΥΣΑΜ της συγκεκριμένης προσομοίωσης αποτελείται από ανεμογεννήτριες των 2 MW η καθεμία. Έτσι το τελικό μέγεθος του αιολικού πάρκου δεν μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή αλλά κάποια τιμή πολλαπλάσια του 2.
- Το μοντέλο περιγραφής του BESS που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτό που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4. Θεωρείται ότι αποτελείται από μπαταρίες VRB των 270 kW. Άρα η συνολική τιμή ισχύος του BESS είναι κβαντισμένο μέγεθος, πολλαπλάσιο του 0,27 MW.
- Η διαστασιολόγηση του αιολικού πάρκου και του BESS γίνεται με γνώμονα τη μεγιστοποίηση του Κέρδους. Στο κεφάλαιο 6 περιγράφεται η μέθοδος εύρεσης της βέλτιστης διαστασιολόγησης του ΥΣΑΜ.
- Για δεδομένη εγγυημένη ισχύ του ΥΣΑΜ, P_G , η απαιτούμενη ονομαστική ισχύς των μπαταριών, $P_{BESS,nom}$, θεωρήθηκε ότι είναι:

$$P_{BESS,nom} \geq \frac{8}{6} \cdot P_G \quad (7)$$

- Η ονομαστική ισχύς των μπαταριών συνδέεται με τη μέγιστη ισχύ εξόδου του Α/Π με τη σχέση:

$$P_{BESS,nom} \geq \frac{P_{W,max}}{1.2} \quad (8)$$

¹ Ειδικά η αιολική ενέργεια που εγχέεται στο δίκτυο, υποκαθιστώντας μέρος της προγραμματισμένης παραγωγής των μπαταριών, τιμολογείται κατά το ήμισυ στην τιμή διάθεσης της ενέργειας των μονάδων ελεγχόμενης παραγωγής (236 €/MWh) και κατά το υπόλοιπο ήμισυ στη συνήθη τιμή διάθεσης της αιολικής παραγωγής (119.34 €/MWh). Η θεώρηση αυτή οδηγεί σε μεσοσταθμική τιμολόγηση 177.67 €/MWh για την απ' ευθείας εγχεόμενη στο δίκτυο αιολική παραγωγή μέσω υποκατάστασης της προγραμματισμένης παραγωγής των μπαταριών.

Κεφάλαιο 7

Βέλτιστη διαστασιολόγηση του ΥΣΑΜ

7.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό αρχικά ορίζονται οι οικονομικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της επένδυσης του ΥΣΑΜ, καθώς και οι οικονομικές παραδοχές που έγιναν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της διαστασιολόγησης των συνιστωσών του ΥΣΑΜ. Η μέθοδος αξιολόγησης επενδύσεων που περιγράφεται βασίζεται στη δημοσίευση [39]

Για την οικονομική αξιολόγηση μιας επένδυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι δείκτες με πιο συνηθισμένους την Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV-ΚΠΑ), τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR-EBA), την Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής (DPP-ΕΠΑ) και το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (LCOE). Οι πιο αντιπροσωπευτικοί από αυτούς τους δείκτες, είναι ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) και η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV). Για την εύρεση της βέλτιστης διαστασιολόγησης του ΥΣΑΜ της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο IRR.

7.2 Υπολογισμός Οικονομικών Δεικτών

Η αξιολόγηση επενδύσεων βασίζεται στην έννοια των Καθαρών Ταμειακών Ροών (KTP). Σε γενικές γραμμές, η KTP κάθε έτους είναι η διαφορά μεταξύ των εσόδων της επιχείρησης από τις πωλήσεις (ταμειακές εισροές) και των πληρωμών για τους διάφορους συντελεστές παραγωγής και τη διάθεση των προϊόντων, καθώς επίσης και για την πληρωμή του φόρου εισοδήματος (ταμειακές εκροές). Για την περίπτωση του ΥΣΑΜ, υιοθετούνται οι εξής συμβολισμοί για τα οικονομικά μεγέθη κάθε έτους t :

E_t : Τα συνολικά έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο και την αποζημίωση για την παροχή εγγυημένης ισχύος.

$\Lambda\Delta_t$: Οι λειτουργικές δαπάνες της επένδυσης που περιλαμβάνουν τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης (Operation and Maintenance - O&M), τα ασφαλιστικά κόστη, τα μισθολογικά κόστη και την καταβολή ποσοστού 3% των ετήσιων ακαθάριστων εσόδων ενέργειας στην τοπική αυτοδιοίκηση, σύμφωνα με το υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο.

A_t : Οι προβλεπόμενες αποσβέσεις για την επένδυση.

$\Phi\Sigma$: Ο φορολογικός συντελεστής για τον υπολογισμό του φόρου εισοδήματος.

Φ_t : Οι φόροι που καταβάλλει η επιχείρηση

$\Delta\Delta_t$: Η δόση του δανείου σε περίπτωση ύπαρξης δανειακών κεφαλαίων

T_t: Ο τόκος που καταβάλλεται ετησίως σε περίπτωση ύπαρξης δανειακών κεφαλαίων.

X_t: Το χρεολύσιο που καταβάλλεται ετησίως σε περίπτωση ύπαρξης δανειακών κεφαλαίων.

Οι KTP και της επένδυσης διαφοροποιείται εάν οι υπολογισμοί γίνονται ως προς το σύνολο της επένδυσης ή ως προς τα ίδια κεφάλαια της επένδυσης. Στην περίπτωση αξιολόγησης ως προς τα ίδια κεφάλαια, ο επενδυτής λαμβάνει ως επιτόκια αναγωγής για τον υπολογισμό της NPV την ελάχιστη απόδοση που κρίνει ικανοποιητική για τα ίδια κεφάλαιά του. Από την άλλη πλευρά, μπορεί να αξιολογηθεί μια επένδυση στο σύνολό της, οπότε ως επιτόκιο αναγωγής λαμβάνεται το μέσο σταθμισμένο κόστος του συνολικού επενδύμενου κεφαλαίου που συντίθεται από το κόστος των ιδίων και των δανειακών κεφαλαίων της επιχείρησης.

Για τον υπολογισμό των KTP κάθε έτους γίνεται αφαίρεση των εξόδων της επιχείρησης από τα ετήσια έσοδά της.

$$KTP_t = E_t - \Lambda\Delta_t - \Phi_t - \Delta\Delta_t = E_t - \Lambda\Delta_t - \Phi_t - T_t - X_t \quad (7.1)$$

Ο υπολογισμός των τόκων (**T_t**) και των χρεολυσίων (**X_t**) της εξίσωσης 7.1 διαφοροποιείται ανάλογα με την εφαρμοζόμενη μέθοδο εξόφλησης του δανείου. Σε κάθε περίπτωση η δόση του δανείου του έτους *t* (**ΔΔ_t**), ή αλλιώς το τοκοχρεολύσιο, ισούται με το άθροισμα των τόκων και των χρεολυσίων, ήτοι:

$$\Delta\Delta_t = X_t + T_t \quad (7.2)$$

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος εξόφλησης με σταθερά τοκοχρεολύσια, δηλαδή στο τέλος κάθε έτους καταβάλλεται μία σταθερή **ΔΔ_t**. Από έτος σε έτος ο τόκος μειώνεται ενώ το χρεολύσιο αυξάνει ώστε η δόση να παραμένει σταθερή. Τα χρεολύσια (**X_t**) κάθε έτους υπολογίζονται ως εξής:

$$X_t = \frac{k_d}{(1+k_d)^{N_d-1}} \cdot K_d \cdot (1+k_d)^{t-1} \quad (7.3)$$

όπου **k_d**: το επιτόκιο του δανείου

N_d: η περίοδος εξόφλησης του δανείου σε έτη

K_d: το δανειακό κεφάλαιο (Loan Capital)

Τα τοκοχρεολύσια κάθε έτους (**ΔΔ_t**) είναι ίσα μεταξύ τους και υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$\Delta\Delta_t = (k_d + \frac{k_d}{(1+k_d)^{N_d-1}} \cdot K_d \quad (7.4)$$

Οι τόκοι κάθε έτους (**T_t**) μπορούν να υπολογιστούν με απλή αφαίρεση:

$$T_t = \Delta\Delta_t - X_t \quad (7.5)$$

Ο υπολογισμός των φόρων που πληρώνει η επιχείρηση γίνεται αφού από τα ακαθάριστα έσοδα της επιχείρησης αφαιρεθούν οι λειτουργικές δαπάνες, οι αποσβέσεις και οι τόκοι των δανείων. Έτσι οι φόροι στην εξίσωση 7.1 δίνονται από τον τύπο :

$$\Phi_t = (E_t - \Lambda\Delta_t - A_t - T_t) \cdot \Phi\Sigma \quad (7.6)$$

Συνήθως, η απόσβεση των επενδύσεων γίνεται γραμμικά σε N_A έτη, δηλαδή κάθε χρόνο οι αποσβέσεις θα είναι το $1/N_A$ του αρχικού κόστους της επένδυσης.

$$A_t = \frac{K_{0,total}}{N_A} \quad (7.7)$$

Από τις εξισώσεις 7.1 και 7.6 προκύπτει τελικά :

$$KTP_t = (E_t - \Lambda\Delta_t - A_t - T_t) \cdot (1 - \Phi\Sigma) + A_t - X_t \quad (7.8)$$

Αφού υπολογιστούν οι χρηματορροές της επένδυσης ακολουθεί ο υπολογισμός της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ – NPV) και του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR).

Η επίδραση του πληθωρισμού στον υπολογισμό της NPV μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικές μεθόδους, τη μέθοδο των σταθερών τιμών και τη μέθοδο των τρεχουσών τιμών. Σύμφωνα με τη μέθοδο των σταθερών τιμών, για τον υπολογισμό των KTP χρησιμοποιούνται οι τιμές του πρώτου έτους της αξιολόγησης για όλη τη διάρκεια της αξιολόγησης του επενδυτικού σχεδίου. Σε αυτήν την περίπτωση, τόσο για το επιτόκιο αναγωγής (k) όσο και για το επιτόκιο δανεισμού (ir) δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται οι ονομαστικές τιμές στις παραπάνω εξισώσεις, αλλά οι αποπληθωρισμένες, δηλαδή το πραγματικό επιτόκιο αναγωγής και το πραγματικό επιτόκιο δανεισμού. Η σχέση μεταξύ ονομαστικών και πραγματικών επιτοκίων υπό την επίδραση του πληθωρισμού είναι:

$$k_r = \frac{k_n - ir}{1 + ir} \quad (7.9)$$

όπου

k_r : το πραγματικό επιτόκιο

k_n : το ονομαστικό επιτόκιο

ir : ο ρυθμός πληθωρισμού

Αντίθετα, όταν ο υπολογισμός των KTP πραγματοποιείται με τη μέθοδο των τρεχουσών τιμών, τα οικονομικά μεγέθη εκφράζονται σε αξίες του έτους στο οποίο πραγματοποιούνται, χρησιμοποιώντας για τα επιμέρους μεγέθη (π.χ. τιμή πώλησης, κόστος μισθοδοσίας κλπ.) τους σχετικούς δείκτες πληθωρισμού. Σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να δηλώνεται σαφώς ο δείκτης πληθωρισμού που έχει χρησιμοποιηθεί για κάθε μέγεθος. Όταν χρησιμοποιούνται KTP εκφραζόμενες σε τρέχουσες τιμές θα πρέπει και τα επιτόκια της αξιολόγησης (αναγωγής και δανεισμού) να εκφράζονται σε τρέχουσες τιμές, δηλαδή να χρησιμοποιούνται τα ονομαστικά επιτόκια. Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος των τρεχουσών τιμών για την ενσωμάτωση της επίδρασης του πληθωρισμού.

Ο δείκτης NPV (Net Present Value) λαμβάνει υπόψη τη χρονική αξία του χρήματος με την αναγωγή των ετήσιων KTP σε παρούσα αξία, δηλαδή στη χρονική στιγμή έναρξης της εμπορικής λειτουργίας του ΥΣΑΜ. Εν γένει, η εξίσωση υπολογισμού της ΚΠΑ είναι:

$$NPV = -K_0 + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1+k)^t} + \frac{YA_N}{(1+k)^N} \quad (7.10)$$

όπου **K₀** : το αρχικό κόστος της επένδυσης

KTP_t : οι καθαρές ταμειακές ροές του έτους t

k : το επιτόκιο αναγωγής, που ισούται με την ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση των κεφαλαίων που επενδύονται

N : η διάρκεια αξιολόγησης της επένδυσης σε έτη

YA_N : η υπολειπόμενη αξία της επένδυσης στο τέλος της περιόδου αξιολόγησης

Ανάλογα με την τιμή της NPV που προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης 7.10 αξιολογείται το επενδυτικό σχέδιο. Εάν εξετάζονται σε συνδυασμό περισσότερα του ενός εναλλακτικά επενδυτικά σχέδια επιλέγεται εκείνο που έχει την μεγαλύτερη NPV, με την προϋπόθεση η διάρκεια ζωής όλων των σχεδίων να είναι η ίδια. Πιο συγκεκριμένα για ένα σχέδιο:

- Εάν $NPV > 0$ το επενδυτικό σχέδιο μπορεί να επιλεγεί.
- Εάν $NPV < 0$ το επενδυτικό σχέδιο απορρίπτεται.
- Εάν $NPV = 0$ υπάρχει αδιαφορία του επενδυτή ως προς την αποδοχή ή την απόρριψη του επενδυτικού σχεδίου (οριακή κατάσταση).

Για την όσο το δυνατόν πιο ασφαλή αξιολόγηση μίας επένδυσης, είναι απαραίτητος και ο υπολογισμός του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR).

Ο δείκτης IRR (Internal Rate of Return) είναι η τιμή του επιτοκίου αναγωγής σε παρούσα αξία που κάνει την NPV της επένδυσης, για τη διάρκεια οικονομικής αξιολόγησης της, ίση με το μηδέν. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης εκφράζει την απόδοση κεφαλαίου της αρχικής επένδυσης κατά τη διάρκεια του οικονομικού κύκλου ζωής της. Συνεπώς, ο IRR της επένδυσης προσδιορίζεται από τη λύση της εξίσωσης:

$$\text{Εάν } NPV(k)=0, \quad \text{τότε } IRR=k \quad (7.11)$$

Ανάλογα με την προκύπτουσα τιμή του IRR και την ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση των κεφαλαίων του επενδυτή ($k_{\min}$) αξιολογείται η επένδυση. Στην περίπτωση που αξιολογείται ένα μόνο επενδυτικό σχέδιο ισχύουν τα εξής:

- Εάν $IRR > k_{\min}$ το επενδυτικό σχέδιο μπορεί να επιλεγεί.
- Εάν $IRR < k_{\min}$ το επενδυτικό σχέδιο απορρίπτεται.
- Εάν $IRR = k_{\min}$ υπάρχει αδιαφορία του επενδυτή ως προς την αποδοχή ή την απόρριψη του επενδυτικού σχεδίου (οριακή κατάσταση).

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη και αρνητικών KTP ενδέχεται να οδηγήσει σε παραπάνω από μία λύσεις της εξίσωσης 7.11, δηλαδή σε περισσότερους από έναν IRR για το ίδιο επενδυτικό σχέδιο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για τιμές του k μικρότερες από το μεγαλύτερο από τα IRR της επένδυσης έχουμε αρνητικό NPV. Κατά συνέπεια, σε αυτές τις περιπτώσεις για να εφαρμοστεί σωστά το κριτήριο αξιολόγησης του IRR θα πρέπει να εφαρμόζεται σε συνδυασμό με αυτό της NPV.

Ωστόσο, εκ των πραγμάτων η ύπαρξη αρνητικών KTP συνήθως οδηγεί σε απόρριψη του εν λόγω επενδυτικού σχεδίου, εάν υπάρχει αρχικό δανειακό κεφάλαιο. Ο λόγος είναι ότι αρνητική ετήσια KTP σημαίνει ότι το καθαρό κέρδος μετά φόρων της επιχείρησης είναι αρνητικό και συνεπώς δεν επαρκεί για την πλήρη εξυπηρέτηση των τρεχουσών δανειακών αναγκών.

Στην αξιολόγηση επενδύσεων τίθεται ο περιορισμός το ετήσιο καθαρό κέρδος μετά φόρων να είναι μεγαλύτερο από τις τρέχουσες ετήσιες δόσεις δανείων της επιχείρησης κατά ένα συντελεστή, ο οποίος συνήθως κυμαίνεται στο εύρος 1.15-1.35 (τυπική τιμή είναι το 1.25). Το μέγεθος αυτό είναι γνωστό ως Λόγος Κάλυψης Χρέους (DSCR – Debt Service Coverage Ratio) και ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση για κάθε έτος t . Οποσδήποτε πρέπει να ισχύει $DSCR_t > 1$, για κάθε t .

$$DSCR_t = \frac{E_t - \Delta\Delta_t - [(E_t - \Delta\Delta_t - A_t - T_t) \cdot \Phi\sigma]}{\Delta\Delta_t} \quad (7.12)$$

7.3 Οικονομικές Παραδοχές

Στον πίνακα 7.1 συνοψίζονται οι οικονομικές παραδοχές που έγιναν για την αξιολόγηση της επένδυσης του ΥΣΑΜ.

Οικονομικές Παραδοχές		
Περίοδος Εξέτασης		20 χρόνια
Οικονομικά Στοιχεία της Επένδυσης	Κεφαλαιουχικές Δαπάνες (CapEx)	Αιολικό Πάρκο : 1 M€/MW
		BESS
		• 350 k€/MWh για το κύριο σύστημα (8 ώρες χωρητικότητα)
		• 100 k€/MWh για κάθε έξτρα MWh
		Διάφορα κόστη : 0.1 M€/MW
		Κόστος γης : 0.1 M€/MW
Ετήσιο Κόστος	Επενδυτικό Σχήμα	Δάνειο : 75%
		Ίδια Κεφάλαια : 25 %
	Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης - O&M (€/MW ανά έτος	Αιολικό Πάρκο: 13900
		BESS: 20500
	Εργατικό κόστος (αμοιβές)	120000 € / έτος
	Ασφαλιστικές Εισφορές	0.5% of CapEx / έτος

Ετήσιο Κέρδος	Τιμολόγηση Ενέργειας (€/MWh)	BESS: 236
		Αγορά Ενέργειας από το δίκτυο : 186
		Αιολικό Πάρκο (setpoint): 119.34
		Αιολικό Πάρκο (Εγγυημένη Παραγωγή): 177. 67
	Capacity Credit	127 €/kW· ανά έτος
Λοιπά Ποσοστά	Πληθωρισμός	3%
	Φορολογικός Συντελεστής	25%
	Επιτόκιο Αναγωγής Ιδίων Κεφαλαίων	8%
	Απόσβεση	5 % ανά έτος (γραμμική)
	Λόγος Κάλυψης Χρέους (DSCR)	> 1.00

Πίνακας 7. 1 Οικονομικές παραδοχές για την αξιολόγηση του ΥΣΑΜ της Παρούσας εργασίας

Επισημαίνεται ότι εφαρμόζεται ο ίδιος ρυθμός πληθωρισμού (3%) για τα Ο&Μ κόστη, τις μισθολογικές δαπάνες και τα ασφαλιστικά κόστη.

Ειδικότερα περί της τιμολόγησης της εξερχόμενης ενέργειας του ΥΣΑΜ, της ενέργειας φόρτισης και της ενέργειας για τα βοηθητικά φορτία ισχύουν τα εξής:

- Η ενέργεια που παράγεται από τις μπαταρίες τιμολογείται σε 236 €/MWh.
- Η ενέργεια που απορροφάται από το δίκτυο για φόρτιση των μπαταριών τιμολογείται σε 186 €/MWh.
- Η αιολική ενέργεια που αξιοποιείται για φόρτιση των μπαταριών συμψηφίζεται με την αντίστοιχη ενέργεια φόρτισης σε ωριαία βάση.
- Η αιολική ενέργεια που εγχέεται στο δίκτυο μέσω συμμετοχής στο set-point τιμολογείται σε 119.34 €/MWh.
- Η αιολική ενέργεια που εγχέεται στο δίκτυο μέσω υποκατάστασης της παραγωγής των μπαταριών τιμολογείται κατά 50% στην τιμή των 236 €/MWh και κατά 50% στην τιμή των 119.34 €/MWh. Άρα η τιμή της είναι : 177. 67 €/MWh.

Για την τιμολόγηση του BESS έγινε η εξής θεώρηση: Το κύριο σύστημα θεωρήθηκε ότι κοστίζει 350 k€/MWh. Το κύριο σύστημα αποτελείται στην ουσία από το συνολικό σύστημα του BESS με χωρητικότητα μέχρι και 8 ώρες. Για κάθε επιπλέον MWh πέραν της αρχικής χωρητικότητας το επιπλέον κόστος θεωρήθηκε ότι είναι 100k€/MWh. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιπλέον χωρητικότητα επιτυγχάνεται με μεγαλύτερες δεξαμενές και μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρολυτών. Το σύστημα ελέγχου, οι αντλίες, η συστοιχία κελιών και τα ηλεκτρονικά ισχύος παραμένουν τα ίδια, αφού εξαρτώνται καθαρά και μόνο από την ισχύ του BESS και το κόστος τους έχει συνυπολογιστεί στην τιμή του βασικού συστήματος.

7.4 Βέλτιστη Διαστασιολόγηση του ΥΣΑΜ

Η επιλογή της διαστασιολόγησης των συνιστωσών του ΥΣΑΜ προέκυψε μετά από τη διενέργεια βελτιστοποιήσεων με κριτήριο την μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης, τηρώντας παράλληλα τους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς. Οι περιορισμοί που εφαρμόστηκαν κατά την αναζήτηση της βέλτιστης συγκρότησης του υβριδικού σταθμού αναπτύχθηκαν στην Παράγραφο 5.7. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση κατάλληλου κώδικα στη γλώσσα MatLab.

Η βελτιστοποίηση της διαστασιολόγησης του ΥΣΑΜ πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων (ΓΑ), οι οποίοι συνδυάστηκαν κατάλληλα με το λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης, παρουσία του υβριδικού σταθμού. Οι ΓΑ είναι από τους πιο κοινά χρησιμοποιούμενους ευριστικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης που βασίζονται στη διατήρηση ενός πληθυσμού λύσεων, και έχουν χρησιμοποιηθεί σε μία ποικιλία διαφορετικών προβλημάτων.

Ο ΓΑ μιμείται τη διαδικασία της φυσικής επιλογής. Η βασική λογική είναι ότι ένας πληθυσμός χρωμοσωμάτων ή ατόμων (λύσεων) βαθμιαία προσεγγίζει τη βέλτιστη λύση καθώς εξελίσσεται ο αριθμός των γενεών. Μία συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function) χρησιμοποιείται για την μέτρηση της απόδοσης κάθε ατόμου, δηλαδή κάθε συγκεκριμένης λύσης, και την επιλογή των ατόμων που θα παράγουν την επόμενη γενιά χρωμοσωμάτων, δηλαδή τους απογόνους. Στη συνέχεια, εφαρμόζονται οι γενετικοί τελεστές (ελιτισμός, διασταύρωση και μετάλλαξη) ώστε να παραχθούν οι απόγονοι, εξασφαλίζοντας ότι οι καλές ιδιότητες (γονίδια) των ήδη δοκιμασμένων λύσεων θα περάσουν στην επόμενη γενιά. Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΓΑ είναι η ικανότητα τους να εξερευνούν τον χώρο αναζήτησης ενώ ταυτόχρονα εκμεταλλεύονται την ήδη συσσωρευμένη πληροφορία, καθώς και η καταλληλότητα τους για προβλήματα όπου η αντικειμενική συνάρτηση είναι ασυνεχής, μη διαφορίσιμη, στοχαστική ή έντονα μη γραμμική. Για αυτούς τους λόγους, οι ΓΑ μπορούν να επιλύσουν δύσκολα προβλήματα για τα οποία οι κλασικές τεχνικές βελτιστοποίησης είναι ανεπαρκείς ή μη αποδοτικές.

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 6, λόγω του γεγονότος ότι ο χρόνος απόκρισης της VRB και κατά συνέπεια και του BESS είναι πολύ μικρός, μπορούμε να παρακάμψουμε το δυναμικό περιορισμό του συστήματος και να δώσουμε στον ΥΣΑΜ τη δυνατότητα εκμετάλλευσης του περιθωρίου Τεχνικού Ελαχίστου (ΤΕ) του συστήματος της Κρήτης. Τότε αυξάνεται η απευθείας έγχυση αιολικής παραγωγής στο δίκτυο και μειώνονται οι απορρίψεις αιολικής ενέργειας. Έτσι λοιπόν η προσομοίωση έδειξε, όπως ήταν αναμενόμενο, καλύτερα αποτελέσματα για ΥΣΑΜ με δυνατότητα εκμετάλλευσης του ΤΕ και αυτά συμπεριελήφθησαν τελικά στο παρόν κεφάλαιο.

Στον πίνακα 7.2 παρουσιάζονται οι ενδεδειγμένες βέλτιστες διαστασιολογήσεις που προέκυψαν από την εφαρμογή των ΓΑ, καθώς και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (20ετίας) που επιτυγχάνεται.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6, εάν ο ΥΣΑΜ επιτρέπεται να εκμεταλλεύεται την περίσσεια τεχνικού ελαχίστου του συστήματος τότε η ενδεδειγμένη προτεραιότητα για την αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής είναι κατά σειρά:

- Συμμετοχή στην προγραμματισμένη ισχύ παραγωγής
- Συμμετοχή στο set-point
- Φόρτιση των μπαταριών

Αντίθετα, στην περίπτωση που δεν δοθεί η δυνατότητα εκμετάλλευσης του επιπλέον set-point, τότε με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων η βέλτιστη σειρά προτεραιότητας είναι:

- Συμμετοχή στο set-point
- Συμμετοχή στην προγραμματισμένη ισχύ παραγωγής
- Φόρτιση των μπαταριών

Εγκατεστημένη ισχύς Α/Π (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς μπαταριών (MW)	Εγγυημένη ισχύς ΥΣΑΜ (MW)	Χωρητικότητα (hours)	IRR (%)
16.28	12.11	8.96	14.97	18.03
21.75	16.01	12.09	15.09	17.93
31.36	23.48	21.82	19.76	17.88
37.42	27.40	22.30	17.67	17.36
48.24	31.82	26.72	17.49	18.74
50.16	32.93	28.16	17.31	18.65
51.55	32.47	26.28	17.71	18.69
60.04	37.06	32.20	15.48	18.15
80.87	54.33	43.84	20.81	16.55
90.05	61.20	51.38	21.81	16.09

Πίνακας 7. 2 Βέλτιστες διαμορφώσεις του υβριδικού σταθμού για καθένα από τα σενάρια που εξετάστηκαν, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

Επειδή ωστόσο το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε περιγράφει ένα BESS αποτελούμενο από συνδυασμό VRB μεγέθους 270 kW, προκύπτει ουσιαστικά ότι το μέγεθος του BESS είναι κβαντισμένο και αποτελεί πολλαπλάσιο της τιμής 270 kW. Το ίδιο ισχύει και για τις τιμές της εγκατεστημένης ισχύος Α/Π, αφού όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 6 το μοντέλο περιλαμβάνει αιολικό πάρκο αποτελούμενο από ανεμογεννήτριες των 2 MW η κάθε μία.

Άρα στον πίνακα 7.3 φαίνονται οι διαστάσεις του ΥΣΑΜ που επιλέγονται τελικά και πλησιάζουν στις βέλτιστες διαστάσεις που υπολόγισαν οι ΓΑ.

Εγκατεστημένη ισχύς Α/Π (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς μπαταριών (MW)	Εγγυημένη ισχύς ΥΣΑΜ (MW)	Χωρητικότητα (hours)	IRR (%)
16	12.15	8.96	14.97	17.88
22	15.93	12.09	15.09	17.98
32	23.49	21.82	19.76	17.24
38	27.27	22.3	17.67	17.41
48	31.86	26.72	17.49	18.74
50	32.94	28.16	17.31	18.64
52	32.4	26.28	17.71	18.69
60	36.99	32.2	15.48	15.58
80	54.27	43.84	20.81	15.16
90	61.29	51.38	21.81	14.84

Πίνακας 7. 3 Βέλτιστες διαμορφώσεις του υβριδικού σταθμού για καθένα από τα σενάρια του πίνακα 7.2 τροποποιημένες για τις απαιτήσεις του μοντέλου της εργασίας

Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή της εγγυημένης ισχύος προκύπτει αρκετά χαμηλή, συγκριτικά με το μέγεθος του Α/Π και την εγκατεστημένη ισχύ των μπαταριών. Αυτό συμβαίνει διότι η υιοθέτηση μειωμένης εγγυημένης ισχύος μεγιστοποιεί τα ενεργειακά έσοδα που προέρχονται από την αιολική ενέργεια (τα οποία αντιπροσωπεύουν περίπου το 80% της προγραμματισμένης παραγωγής του ΥΣΑΜ σε ετήσια βάση, λόγω του υψηλού βαθμού συνεκτίμησης της αιολικής παραγωγής στις ημερήσιες προσφορές ενέργειας), υπερκαλύπτοντας την απώλεια εσόδων λόγω μειωμένη αποζημίωσης διαθεσιμότητας ισχύος.

Πιο συγκεκριμένα, η υψηλή συνεκτίμηση της αιολικής ενέργειας σε συνδυασμό με χαμηλή εγγυημένη ισχύ συνεπάγεται κατανομή της λειτουργίας του σταθμού σε κατάσταση παραγωγής για περισσότερες ώρες ημερησίως, ώστε να απορροφηθεί η υποβαλλόμενη προσφορά ενέργειας, γεγονός που με τη σειρά του οδηγεί σε υψηλό βαθμό αξιοποίησης της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής με απευθείας έγχυση στο δίκτυο και υποκατάσταση των μπαταριών, χωρίς προηγούμενη αποθήκευσή της. Ταυτόχρονα, η επιλογή χαμηλής εγγυημένης ισχύος οδηγεί και σε μείωση των υποφορτίσεων που δέχεται ο ΥΣΑΜ προκειμένου να παράσχει στρεφόμενη εφεδρεία στο σύστημα του νησιού για την απορρόφηση αιολικής παραγωγής εκτός υβριδικού σταθμού, γεγονός που επίσης αυξάνει τα ενεργειακά του έσοδα.

Με κριτήριο επιλογής της βέλτιστης διαστασιολόγησης τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης της επένδυσης επιλέγεται τελικά ο συνδυασμός με:

- Αιολικό Πάρκο: 48 MW
- Εγκατεστημένη ισχύ μπαταριών (BESS): 31.86 MW
- Εγγυημένη ισχύ: 26.72 MW
- Χωρητικότητα: 17,49 hours

7.5 Ετήσια Ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα συνολικά ετήσια αποτελέσματα από την ένταξη του υβριδικού σταθμού, για κάθε συνδυασμό διαστάσεων του πίνακα 7.3, στο σύστημα του νησιού. Για να είναι δυνατή η μελέτη της επίδρασης του ΥΣΑΜ στο σύστημα δίνονται στους πίνακες και τα στοιχεία του συστήματος πριν την ένταξη του ΥΣΑΜ. Οι πίνακες 7.4 7.5 7.6 έχουν διαιρεθεί σε ενότητες που αφορούν τις επιμέρους κατηγορίες σταθμών και το σύστημα συνολικά. Για κάθε τύπο σταθμών παρατίθενται τα ετήσια ενεργειακά αποτελέσματα καθώς επίσης και τα αντίστοιχα οικονομικά στοιχεία. Οι πίνακες 7.7 και 7.8 παρουσιάζουν ενδιαφέροντα μεγέθη από τη λειτουργία του ΥΣΑΜ.

Στους πίνακες 7.9 και 7.10 παρουσιάζονται τα ίδια στοιχεία για τον ΥΣΑΜ με τη βέλτιστη διαστασιολόγηση που επιλέχθηκε.

	Μέγεθος	Μονάδα	χωρίς ΥΣΑΜ	ΥΣΑΜ με Α/Π: 16 MW και BESS: 12.15 MW	ΥΣΑΜ με Α/Π: 22 MW και BESS: 15.93 MW	ΥΣΑΜ με Α/Π: 32 MW και BESS: 23.49 MW
Συμβατικές Μονάδες	Συνολική παραγόμενη ενέργεια συμβατικών μονάδων	GWh	2649.72	2594.38	2576.34	2537.42
	Κατανάλωση καυσίμου	tn mazut	564110.98	553414.09	550000.60	542838.16
		tn diesel	77133.38	75812.78	75377.17	74289.66
	Εκπομπές CO ₂	tn	1997.72	1960.28	1948.29	1922.59
	Συνολικό κόστος συμβατικών μονάδων παραγωγής	Μ€	381.44	374.36	372.08	367.11
Αιολικά Πάρκα	Διαθέσιμη ενέργεια	GWh	682.83	682.83	682.83	682.83
	Απορριπτόμενη ενέργεια	GWh	147.30	147.15	146.95	145.71
	Παραγόμενη ενέργεια	GWh	535.53	535.68	535.87	537.12
	ΣΑΩΛ	h/y	5025.13	5022.01	5023.09	5032.39
	Συντελεστής χρησιμοποίησης (συνολικός)	%	27.79	27.80	27.81	27.87
Φ/Β	Παραγόμενη ενέργεια	GWh	147.86	147.86	147.86	147.86
	Συντελεστής χρησιμοποίησης	%	16.54	16.54	16.54	16.54
Ποσοστά κάλυψης ζήτησης	Συμβατικές μονάδες	%	79.50	77.84	77.30	76.13
	Φ/Β	%	4.44	4.44	4.44	4.44
	Α/Π	%	16.07	16.07	16.08	16.11
	Υβριδικός Σταθμός	%	-	1.66	2.19	3.32

Πίνακας 7. 4 Συγκεντρωτικά ετήσια ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα για το σύστημα της Κρήτης, χωρίς τον ΥΣΑΜ και με τον ΥΣΑΜ με τον συνδυασμούς διαστάσεων του πίνακα 6.3

	Μέγεθος	Μονάδα	χωρίς ΥΣΑΜ	ΥΣΑΜ με Α/Π: 38 MW και BESS: 27.27 MW	ΥΣΑΜ με Α/Π: 50 MW και BESS: 32.94 MW	ΥΣΑΜ με Α/Π: 52 MW και BESS: 32.4 MW
Συμβατικές Μονάδες	Συνολική παραγόμενη ενέργεια συμβατικών μονάδων	GWh	2649.72	2521.70	2487.69	2484.14
	Κατανάλωση καυσίμου	tn mazut	564110.98	539714.57	533098.82	532203.58
		tn diesel	77133.38	74103.27	73370.65	73532.77
	Εκπομπές CO ₂	tn	1997.72	1912.29	1889.40	1887.13
Αιολικά Πάρκα	Συνολικό κόστος συμβατικών μονάδων παραγωγής	M€	381.44	365.27	360.99	360.71
	Διαθέσιμη ενέργεια	GWh	682.83	682.83	682.83	682.83
	Απορριπτόμενη ενέργεια	GWh	147.30	146.29	146.15	146.35
	Παραγόμενη ενέργεια	GWh	535.53	536.53	536.67	536.47
	ΣΑΩΛ	h/y	5025.13	5026.36	5028.37	5027.49
Φ/Β	Συντελεστής χρησιμοποίησης (συνολικός)	%	27.79	27.84	27.85	27.84
	Παραγόμενη ενέργεια	GWh	147.86	147.86	147.86	147.86
Ποσοστά κάλυψης ζήτησης	Συντελεστής χρησιμοποίησης	%	16.54	16.54	16.54	16.54
	Συμβατικές μονάδες	%	79.50	75.66	74.64	74.53
	Φ/Β	%	4.44	4.44	4.44	4.44
	Α/Π	%	16.07	16.10	16.10	16.10
Υβριδικός Σταθμός	Υβριδικός Σταθμός	%	-	3.81	4.83	4.94

Πίνακας 7. 5 Συγκεντρωτικά ετήσια ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα για το σύστημα της Κρήτης, χωρίς τον ΥΣΑΜ και με τον ΥΣΑΜ με του συνδυασμούς διαστάσεων του πίνακα 6.3

	Μέγεθος	Μονάδα	χωρίς ΥΣΑΜ	ΥΣΑΜ με Α/Π: 60 MW και BESS: 36.99 MW	ΥΣΑΜ με Α/Π: 80 MW και BESS: 54.27 MW	ΥΣΑΜ με Α/Π: 90 MW και BESS: 61.29 MW
Συμβατικές Μονάδες	Συνολική παραγόμενη ενέργεια συμβατικών μονάδων	GWh	2649.72	2484.75	2393.47	2359.89
	Κατανάλωση καυσίμου	tn mazut	564110.98	533332.90	514999.11	508504.25
		tn diesel	77133.38	72919.64	71719.04	71194.45
	Εκπομπές CO ₂	tn	1997.72	1888.70	1827.91	1806.06
Υβριδικός Σταθμός	Συνολικό κόστος συμβατικών μονάδων παραγωγής	M€	381.44	360.58	349.68	345.70

Αιολικά Πάρκα	Διαθέσιμη ενέργεια	GWh	682.83	682.83	682.83	682.83
	Απορριπτόμενη ενέργεια	GWh	147.30	146.21	147.96	148.21
	Παραγόμενη ενέργεια	GWh	535.53	536.62	534.87	534.61
	ΣΑΩΛ	h/y	5025.13	5027.05	5009.84	5007.22
	Συντελεστής χρησιμοποίησης (συνολικός)	%	27.79	27.84	27.75	27.74
Φ/B	Παραγόμενη ενέργεια	GWh	147.86	147.86	147.86	147.86
	Συντελεστής χρησιμοποίησης	%	16.54	16.54	16.54	16.54
Ποσοστά κάλυψης ζήτησης	Συμβατικές μονάδες	%	79.50	74.55	71.81	70.80
	Φ/B	%	4.44	4.44	4.44	4.44
	Α/Π	%	16.07	16.10	16.05	16.04
	Υβριδικός Σταθμός	%	-	4.92	7.71	8.72

Πίνακας 7. 6 Συγκεντρωτικά ετήσια ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα για το σύστημα της Κρήτης, χωρίς τον ΥΣΑΜ και με τον ΥΣΑΜ με τον συμβατικούς διαστάσεων του πίνακα 6.3

	Μέγεθος	Μονάδα	ΥΣΑΜ με Α/Π: 16 MW και BESS: 12.15 MW	ΥΣΑΜ με Α/Π: 22 MW και BESS: 15.93 MW	ΥΣΑΜ με Α/Π: 32 MW και BESS: 23.49 MW	ΥΣΑΜ με Α/Π: 38 MW και BESS: 27.27 MW
Παραγωγή του ΥΣΑΜ	Καθαρή έγχυση ενέργειας στο σύστημα από τον ΥΣΑΜ	GWh	55.19	73.04	110.71	127.02
	Καθαρή έγχυση ενέργειας ΥΣΑΜ στο σύστημα / Πραγματική παραγωγή του Α/Π	%	92.30	92.06	90.56	91.20
	Καθαρή έγχυση ενέργειας ΥΣΑΜ στο σύστημα / Δυναμική (διαθέσιμη) παραγωγή του Α/Π	%	80.90	79.53	82.32	80.43
	Απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο	GWh	0	0	0	0
Αιολικό Πάρκο του ΥΣΑΜ	Παραγωγή Α/Π για υποκατάσταση των μπαταριών	GWh	33.88	45.71	70.02	82.51
	Παραγωγή Α/Π για φόρτιση μπαταριών	GWh	13.50	18.30	33.56	35.52
	Παραγωγή Α/Π για συμμετοχή στο set-point	GWh	12.41	15.31	18.67	21.24
	Ολική παραγωγή Α/Π ΥΣΑΜ	GWh	59.78	79.32	122.25	139.28
	Απορριπτόμενη ενέργεια Α/Π	GWh	8.43	12.51	12.23	18.64
	Συντελεστής χρησιμοποίησης Α/Π	%	42.66	41.17	43.61	41.84
Αντλίες ΥΣΑΜ	Συνολική κατανάλωση αντλιών	GWh	0.0699	0.0899	0.0243	0.0203
	Ενέργεια αντλιών από τις μπαταρίες	GWh	0.0583	0.0762	0.0209	0.0193
	Ενέργεια αντλιών από το Α/Π	GWh	0.0116	0.0137	0.0034	0.0010

BESS του ΥΣΑΜ	Ενέργεια μπαταριών για προγραμματισμένη παραγωγή	GWh	8.90	12.01	22.02	23.26
	Ποσοστό χρόνου με επίπεδο φόρτισης κάτω του 25%	%	5.34	5.06	5.32	4.08
	Μέσος βαθμός απόδοσης μπαταριών	%	66.06	65.75	65.62	65.50
Αξιολόγηση Επένδυσης ΥΣΑΜ	Επενδυτικό κόστος	Μ€	61.69	82.30	131.80	148.33
	Ετήσια έσοδα ΥΣΑΜ (1ο έτος)	Μ€	10.74	14.32	22.64	25.52
	Ετήσια έξοδα ΥΣΑΜ (1ο έτος)	Μ€	2.57	3.38	5.33	5.99
	NPV 20ετίας (discount rate 8%)	Μ€	14.17	19.07	27.89	32.10
	IRR ιδίων κεφαλαίων 20ετίας	%	17.88	17.98	17.24	17.41

Πίνακας 7. 7 Ενεργειακοί και οικονομικοί δείκτες του ΥΣΑΜ για τους συνδυασμούς διαστάσεων του πίνακα 6.3, σύμφωνα με τις ετήσιες προσομοιώσεις της λειτουργίας του συστήματος της Κρήτης.

	Μέγεθος	Μονάδα	ΥΣΑΜ με Α/Π: 50 MW και BESS: 32.94 MW	ΥΣΑΜ με Α/Π: 52 MW και BESS: 32.4 MW	ΥΣΑΜ με Α/Π: 60 MW και BESS: 36.99 MW	ΥΣΑΜ με Α/Π: 80 MW και BESS: 54.27 MW	ΥΣΑΜ με Α/Π: 90 MW και BESS: 61.29 MW
Παραγωγή του ΥΣΑΜ	Καθαρή έγχυση ενέργειας στο σύστημα από τον ΥΣΑΜ	GWh	160.89	164.64	163.88	256.91	290.74
	Καθαρή έγχυση ενέργειας ΥΣΑΜ στο σύστημα / Πραγματική παραγωγή του Α/Π	%	91.21	91.62	90.83	90.31	90.01
	Καθαρή έγχυση ενέργειας ΥΣΑΜ στο σύστημα / Δυνητική (διαθέσιμη) παραγωγή του Α/Π	%	81.25	82.72	71.84	79.70	80.00
	Απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο	GWh	0	0	0	0	0
Αιολικό Πάρκο του ΥΣΑΜ	Παραγωγή Α/Π για υποκατάσταση των μπαταριών	GWh	102.96	106.32	113.94	176.34	200.45
	Παραγωγή Α/Π για φόρτιση μπαταριών	GWh	44.04	42.67	46.88	77.84	91.03
	Παραγωγή Α/Π για συμμετοχή στο set-point	GWh	29.39	30.70	19.59	30.28	31.53
	Ολική παραγωγή Α/Π ΥΣΑΜ	GWh	176.40	179.69	180.41	284.46	323.01
	Απορριπτόμενη ενέργεια Α/Π	GWh	21.63	19.34	47.71	37.88	40.42
	Συντελεστής χρησιμοποίησης Α/Π	%	40.27	39.45	34.33	40.59	40.97
Αντλίες ΥΣΑΜ	Συνολική κατανάλωση αντλιών	GWh	0.0165	0.0126	0.0164	0.0164	0.0219
	Ενέργεια αντλιών από τις μπαταρίες	GWh	0.0143	0.0113	0.0131	0.0143	0.0181
	Ενέργεια αντλιών από το Α/Π	GWh	0.0022	0.0013	0.0034	0.0020	0.0039

BESS του ΥΣΑΜ	Ενέργεια μπαταριών για προγραμματισμένη παραγωγή	GWh	28.53	27.62	30.35	50.29	58.76
	Ποσοστό χρόνου με επίπεδο φόρτισης κάτω του 25%	%	3.71	3.39	3.14	2.77	3.16
	Μέσος βαθμός απόδοσης μπαταριών	%	64.79	64.74	64.74	64.61	64.56
Αξιολόγηση Επένδυσης ΥΣΑΜ	Επενδυτικό κόστος	Μ€	182.90	184.58	203.24	317.48	364.25
	Ετήσια έσοδα ΥΣΑΜ (1ο έτος)	Μ€	32.11	32.41	33.83	52.38	59.77
	Ετήσια έξοδα ΥΣΑΜ (1ο έτος)	Μ€	7.38	7.45	8.13	12.64	14.47
	NPV 20ετίας (discount rate 8%)	Μ€	45.10	45.85	34.88	51.37	56.12
	IRR ιδίων κεφαλαίων 20ετίας	%	18.64	18.69	15.58	15.16	14.84

Πίνακας 7. 8 Ενεργειακοί και οικονομικοί δείκτες του ΥΣΑΜ για τους συνδυασμούς διαστάσεων του πίνακα 6.3, σύμφωνα με τις ετήσιες προσομοιώσεις της λειτουργίας του συστήματος της Κρήτης.

	Μέγεθος	Μονάδα	χωρίς ΥΣΑΜ	ΥΣΑΜ με Α/Π: 48 MW και BESS: 31.86 MW
Συμβατικές Μονάδες	Συνολική παραγόμενη ενέργεια συμβατικών μονάδων	GWh	2649.72	2492.07
	Κατανάλωση καυσίμου	tn mazut	564110.98	533877.97
		tn diesel	77133.38	73509.44
	Εκπομπές CO ₂	tn	1997.72	1892.26
	Συνολικό κόστος συμβατικών μονάδων παραγωγής	Μ€	381.44	361.55
Αιολικά Πάρκα	Διαθέσιμη ενέργεια	GWh	682.83	682.83
	Απορριπτόμενη ενέργεια	GWh	147.30	146.31
	Παραγόμενη ενέργεια	GWh	535.53	536.51
	ΣΑΩΛ	h/y	5025.13	5027.96
	Συντελεστής χρησιμοποίησης (συνολικός)	%	27.79	27.84
Φ/B	Παραγόμενη ενέργεια	GWh	147.86	147.86
	Συντελεστής χρησιμοποίησης	%	16.54	16.54
Ποσοστά κάλυψης ζήτησης	Συμβατικές μονάδες	%	79.50	74.77
	Φ/B	%	4.44	4.44
	Α/Π	%	16.07	16.10
	Υβριδικός Σταθμός	%	-	4.70

Πίνακας 7. 9 Συγκεντρωτικά ετήσια ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα για το σύστημα της Κρήτης, χωρίς τον ΥΣΑΜ και με ΥΣΑΜ με τη βέλτιστη διαστασιολόγηση

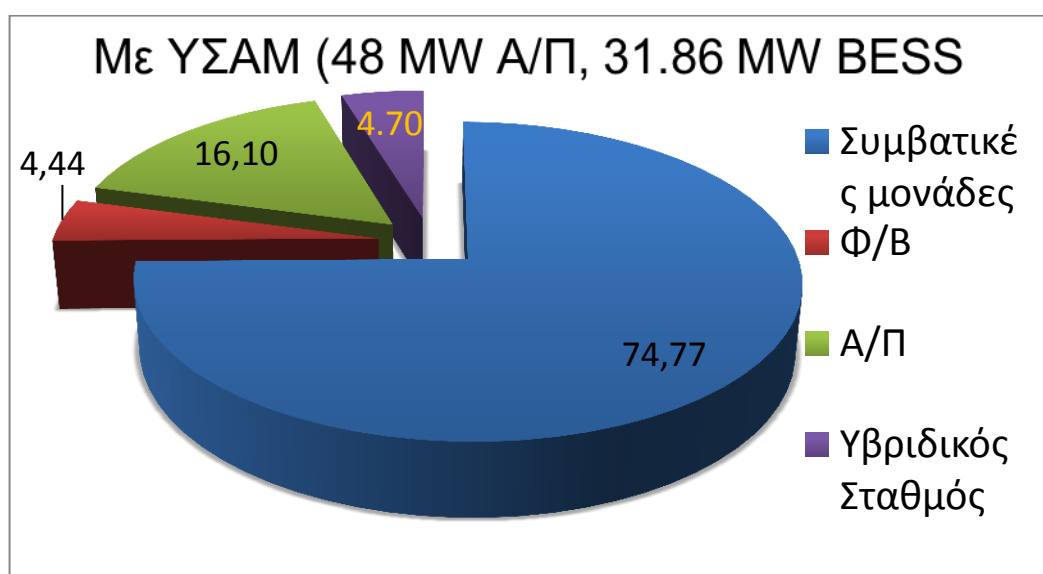
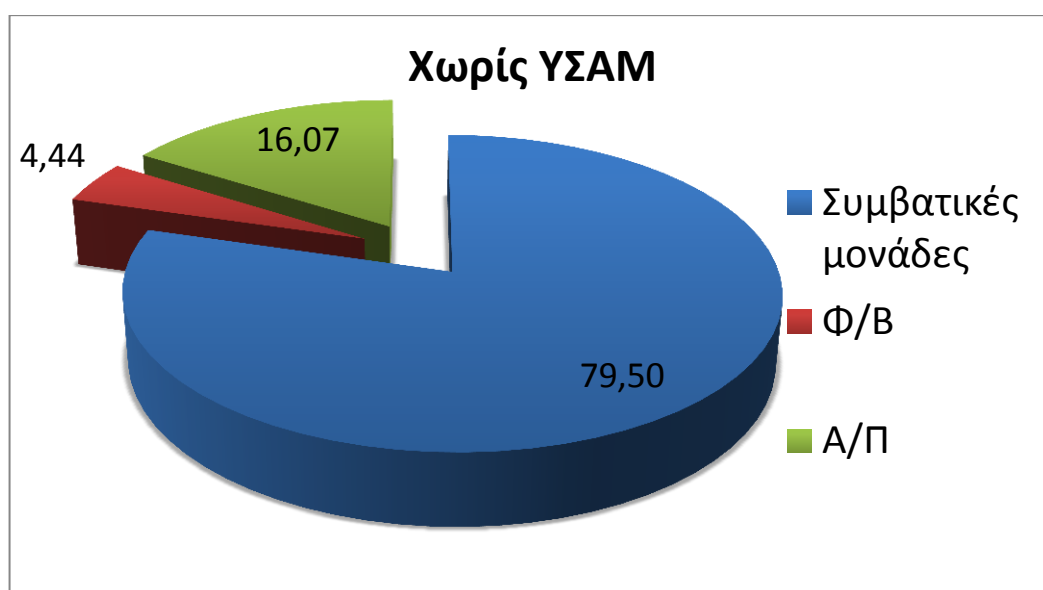
	Μέγεθος	Μονάδα	ΥΣΑΜ με Α/Π: 48 MW και BESS: 31.86 MW
Παραγωγή του ΥΣΑΜ	Καθαρή έγχυση ενέργειας στο σύστημα από τον ΥΣΑΜ	GWh	156.67
	Καθαρή έγχυση ενέργειας ΥΣΑΜ στο σύστημα / Πραγματική παραγωγή του Α/Π	%	91.29
	Καθαρή έγχυση ενέργειας ΥΣΑΜ στο σύστημα / Δυνητική (διαθέσιμη) παραγωγή του Α/Π	%	82.05
	Απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο	GWh	0
Αιολικό Πάρκο του ΥΣΑΜ	Παραγωγή Α/Π για υποκατάσταση των μπαταριών	GWh	100.05
	Παραγωγή Α/Π για φόρτιση μπαταριών	GWh	42.44
	Παραγωγή Α/Π για συμμετοχή στο set-point	GWh	29.13
	Ολική παραγωγή Α/Π ΥΣΑΜ	GWh	171.61
	Απορριπτόμενη ενέργεια Α/Π	GWh	19.33
	Συντελεστής χρησιμοποίησης Α/Π	%	40.81
Αντλίες ΥΣΑΜ	Συνολική κατανάλωση αντλιών	GWh	0.0160
	Ενέργεια αντλιών από τις μπαταρίες	GWh	0.0138
	Ενέργεια αντλιών από το Α/Π	GWh	0.0022
BESS του ΥΣΑΜ	Ενέργεια μπαταριών για προγραμματισμένη παραγωγή	GWh	27.49
	Ποσοστό χρόνου με επίπεδο φόρτισης κάτω του 25%	%	3.69
	Μέσος βαθμός απόδοσης μπαταριών	%	64.78
Αξιολόγηση Επένδυσης ΥΣΑΜ	Επενδυτικό κόστος	Μ€	177.04
	Ετήσια έσοδα ΥΣΑΜ (1ο έτος)	Μ€	31.13
	Ετήσια έξοδα ΥΣΑΜ (1ο έτος)	Μ€	7.15
	NPV 20ετίας (discount rate 8%)	Μ€	44.10
	IRR ιδίων κεφαλαίων 20ετίας	%	18.74

Πίνακας 7. 10 Ενεργειακοί και οικονομικοί δείκτες του ΥΣΑΜ για το βέλτιστο συνδυασμό διαστάσεων που επιλέχθηκε, σύμφωνα με τις ετήσιες προσομοιώσεις της λειτουργίας του συστήματος της Κρήτης.

Από τη μελέτη των παραπάνω πινάκων 7.9 και 7.10 εξάγονται οι εξής βασικές διαπιστώσεις:

- Ο ΥΣΑΜ καλύπτει ποσοστό 4,7 % της ετήσιας ζήτησης ενέργειας του συστήματος. Η συμβολή των θερμικών μονάδων περιορίζεται από 79.5 % σε 74.77 %. Η συμβολή των Φωτοβολταϊκών παραμένει σταθερή με την ένταξη του ΥΣΑΜ, ενώ η συμβολή των υπολοίπων Αιολικών Πάρκων αυξάνεται ελαφρώς κατά 0.03 %. Η μείωση των θερμικών μονάδων συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, εκπομπών CO₂ και του κόστους.

Η σύγκριση αυτή διακρίνεται καλύτερα στα παρακάτω σχήματα:



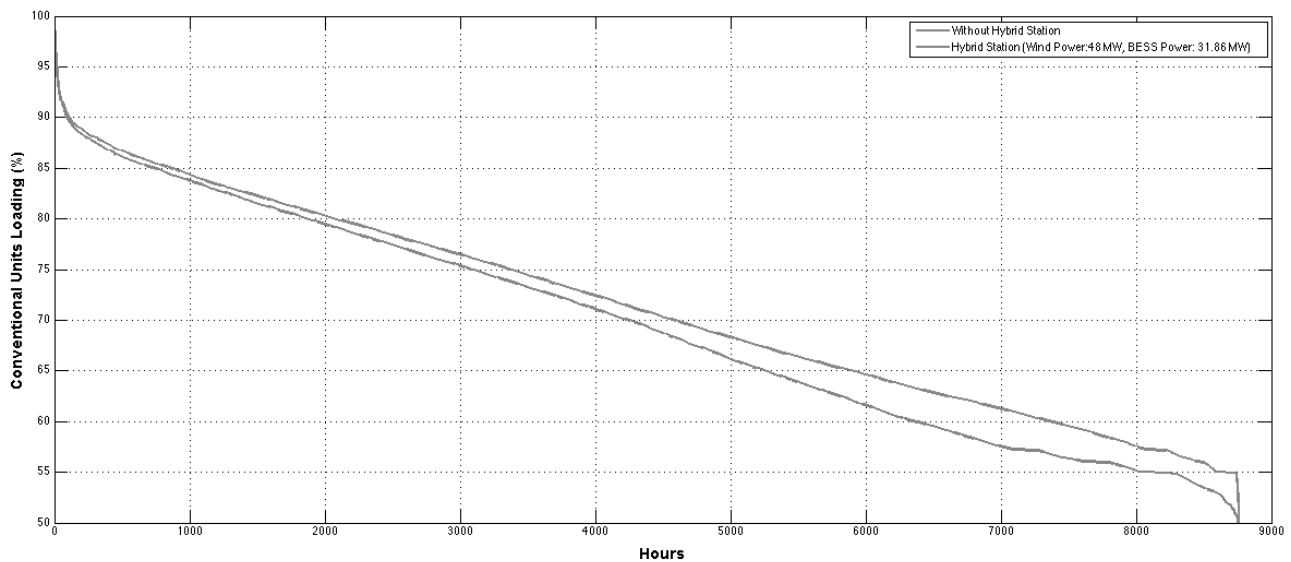
Σχήμα 7. 1 Ποσοστά συμμετοχής των συμβατικών μονάδων, των Φ/Β και των Αιολικών πάρκων πριν και μετά την είσοδο του ΥΣΑΜ με τη βέλτιστη επιλεχθείσα διαστασιολόγηση.

- Ο ΥΣΑΜ δεν απορροφά καθόλου ενέργεια από το δίκτυο. Οι ανάγκες της μπαταρίας κατά τη λειτουργία της αλλά και κατά τη φάση idling, καλύπτονται από την ίδια την μπαταρία ή από το αιολικό πάρκο του ΥΣΑΜ.
- Οι ήδη λειτουργούντες αιολικοί σταθμοί δεν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την ένταξη του ΥΣΑΜ. Οι ετήσιες ΣΑΩΛ και ο συντελεστής χρησιμοποίησής τους παραμένουν πρακτικά αμετάβλητοι. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται οριακή αύξηση στις ΣΑΩΛ κατά 0.056% ενώ ο συνολικός συντελεστής χρησιμοποίησης των Α/Π εκτός του ΥΣΑΜ αυξάνεται κατά 0.05%. Η λειτουργία των Φ/Β σταθμών δεν μεταβάλλεται καθόλου, όπως είναι αναμενόμενο, αφού δεν επιδέχονται περιορισμούς διείσδυσης κατά τη λειτουργία τους.
- Ο βαθμός απόδοσης των μπαταριών είναι λίγο πιο χαμηλός συγκριτικά με τις τιμές της roundtrip απόδοσης των μπαταριών, με τιμή 64.78% έναντι του 70-75% που έχουμε υπολογίσει στο κεφάλαιο 4 για τη roundtrip απόδοση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μπαταρία λειτουργεί κάτω από διάφορες συνθήκες, δηλαδή σε μεγάλο εύρος τιμών ισχύος και SoC. Για ορισμένες τιμές της ισχύος η μπαταρία έχει χαμηλότερο βαθμό απόδοσης, έτσι ο συνολικός βαθμός απόδοσης προκύπτει λίγο χαμηλότερος από το θεωρητικό μέγιστο.
- Οι μπαταρίες δε φορτίζονται ποτέ πάνω από το 95%. Αυτό γίνεται για να υπάρχει επαρκές περιθώριο ισχύος ρύθμισης, κυρίως όταν το Α/Π του ΥΣΑΜ συμμετέχει στο πρόσθετο setpoint. Αντίθετα, οι μπαταρίες βρίσκονται για χρονικό διάστημα 3.68% του έτους, σε SoC κάτω από το 25%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ενεργειακό απόθεμα ασφαλείας που τηρείται στην κατάρτιση των προσφορών, αξιοποιείται μερικώς στη φάση της λειτουργίας, ώστε να αντισταθμίζονται σφάλματα από τη συνεκτίμηση της αιολικής παραγωγής στις ημερήσιες προσφορές ενέργειας και να διασφαλίζεται η τήρηση των προσφορών ενέργειας του σταθμού.
- Η κατανάλωση ενέργειας της VRB όταν βρίσκεται σε κατάσταση Idling είναι πάρα πολύ μικρή αφού ισούται με το 0.01% της καθαρής έγχυσης ενέργειας στο δίκτυο. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας είναι 0.016 GWh, εκ των οποίων οι 0.0138 GWh λαμβάνονται από την ίδια τη VRB, ενώ οι υπόλοιπες 0.0022 GWh λαμβάνονται από το Α/Π του ΥΣΑΜ. Το δίκτυο δε συμβάλει καθόλου για την κάλυψη των απωλειών λόγω Idling. Συμπεραίνουμε ότι στην κατάσταση Idling η VRB δεν καταναλώνει σχεδόν καθόλου ενέργεια.

7.6 Στατιστική Ανάλυση Ετησίων Αποτελεσμάτων

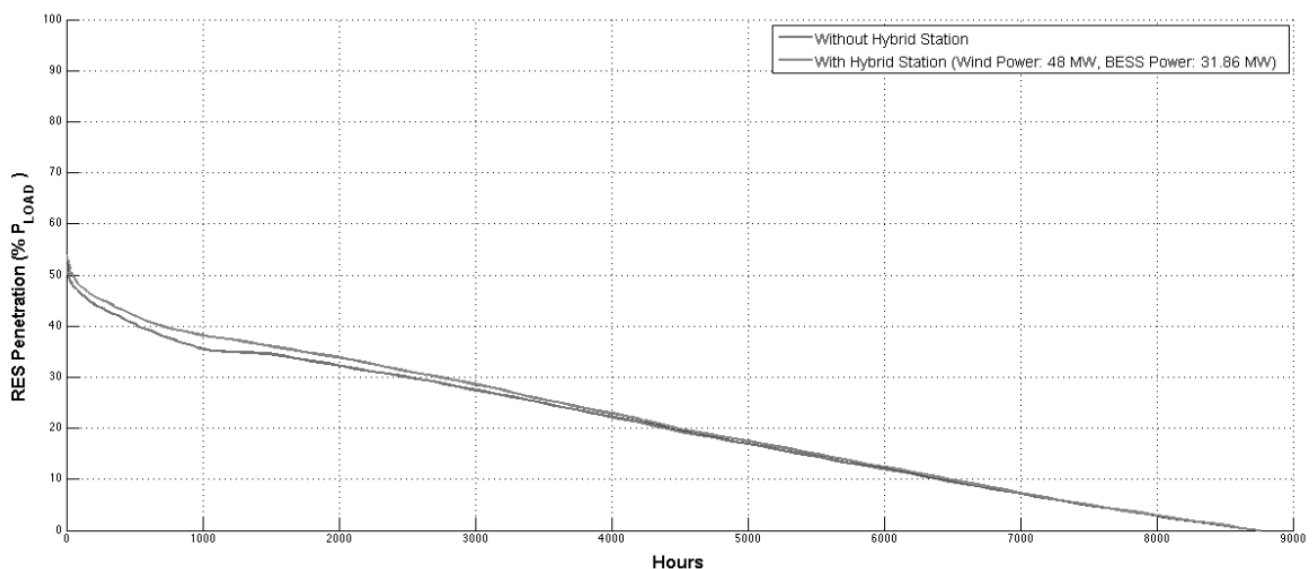
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι καμπύλες διάρκειας κάποιων βασικών δεικτών, που παρουσιάστηκαν στους παραπάνω πίνακες και ποσοτικοποιούν την επίπτωση της ένταξης του ΥΣΑΜ στο σύστημα της Κρήτης.

Το σχήμα 7.1 δίνει τις καμπύλες φόρτισης των συμβατικών μονάδων του συστήματος σε 2 περιπτώσεις: χωρίς την παρουσία του ΥΣΑΜ, παρουσία ΥΣΑΜ με Α/Π 48 MW και BESS 31.86 MW. Παρατηρούμε ότι η εισαγωγή του ΥΣΑΜ συνεπάγεται μικρή και σχεδόν ομοιόμορφη μετατόπιση της καμπύλης φόρτισης προς τα κάτω, συμβάλλοντας στην απεξάρτηση από την συμβατική παραγωγή.



Σχήμα 7.1 Η καμπύλη φόρτισης των συμβατικών μονάδων του συστήματος χωρίς τον ΥΣΑΜ (πάνω) και παρουσία του ΥΣΑΜ (κάτω).

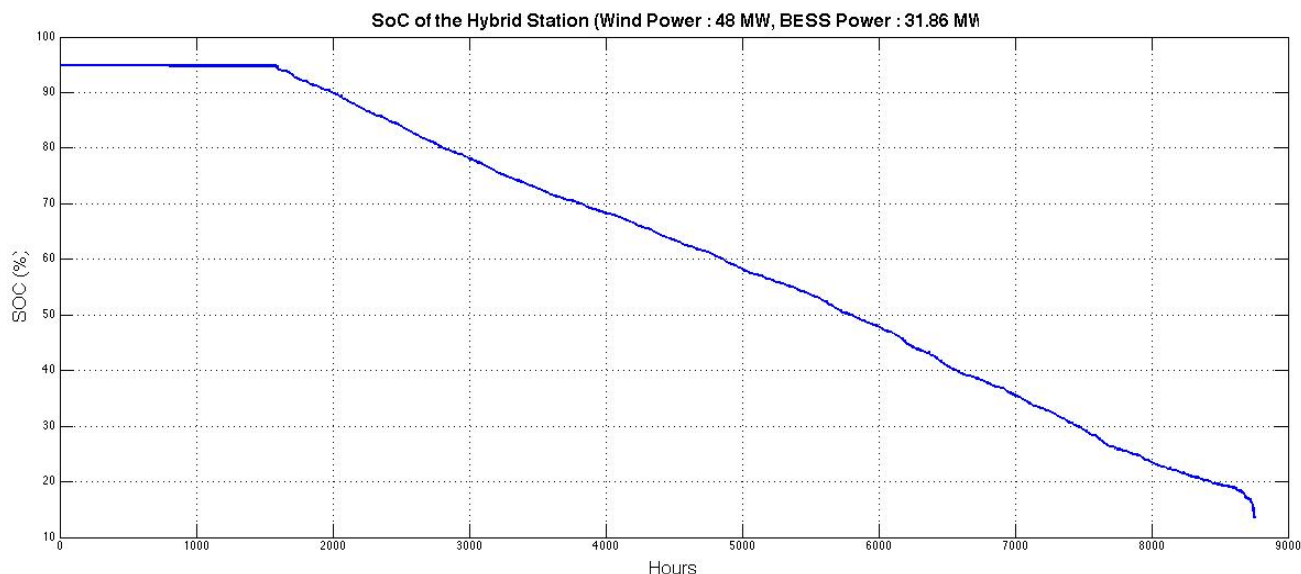
Όπως είδαμε στους πίνακες 7.9 και 7.10, η ένταξη του ΥΣΑΜ επηρεάζει ελάχιστα τη λειτουργία των υπολοίπων σταθμών ΑΠΕ στην Κρήτη. Ωστόσο λόγω της ένταξής του μεταβάλλει την τιμή της συνολικής διείσδυσης ισχύος στο σύστημα. Το σχήμα 7.2 παρουσιάζει τις καμπύλες διάρκειας της διείσδυσης ισχύος ΑΠΕ στην κάλυψη του φορτίου του συστήματος, περιλαμβανομένης της απ' ευθείας έγχυσης αιολικής παραγωγής του ΥΣΑΜ μέσω της διατιθέμενης περίσσειας set-point. Με την ένταξη του ΥΣΑΜ παρατηρείται μικρή αύξηση της διείσδυσης ισχύος ΑΠΕ λόγω ακριβώς της εκμετάλλευσης του πρόσθετου set-point από τον ΥΣΑΜ. Επισημαίνεται ότι οι η καμπύλη του σχήματος 7.2 δεν περιλαμβάνει την αιολική ισχύ που αποδίδεται στο δίκτυο ως εγγυημένη.



Σχήμα 7.2 Καμπύλη διάρκειας της συνολικής διείσδυσης ισχύος ΑΠΕ στην κάλυψη της ζήτησης του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της ισχύος συμμετοχής του Α/Π του ΥΣΑΜ (συμμετοχή στο set-point μόνο, όχι εγγυημένη ισχύς).

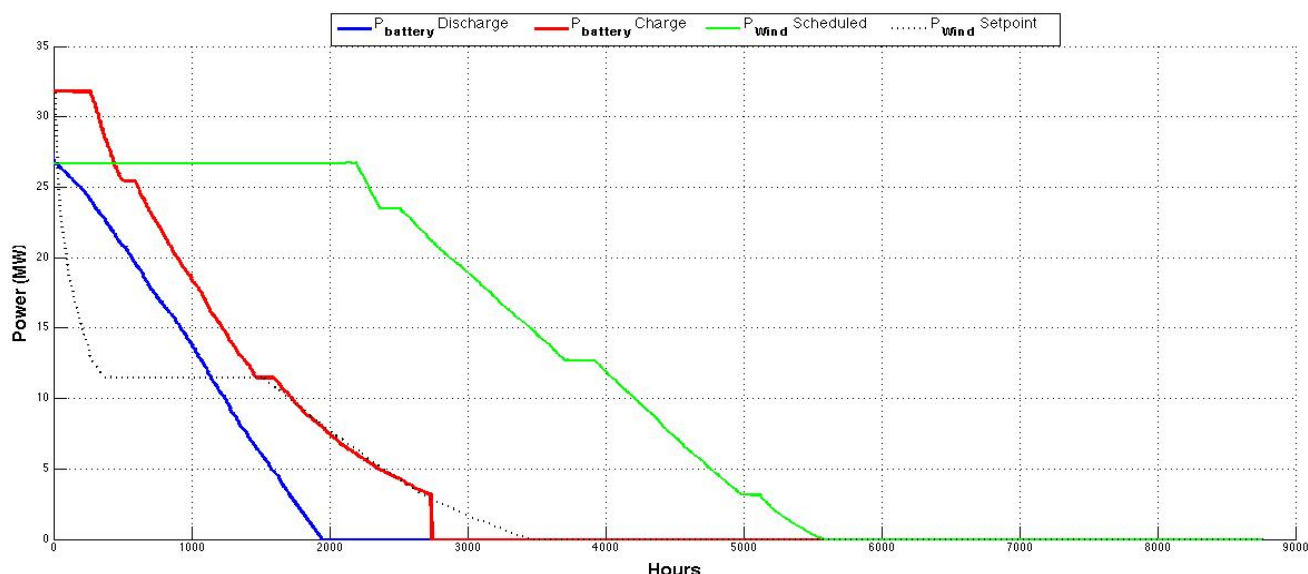
Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα που αφορούν την εσωτερική λειτουργία του σταθμού.

Το σχήμα 7.3 απεικονίζει την καμπύλη διάρκειας του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών VRB για τον ΥΣΑΜ. Παρατηρούμε ότι οι μπαταρίες πρακτικά φορτίζονται έως το 95% της χωρητικότητάς τους, και ότι ο σταθμός εκμεταλλεύεται συστηματικά το ενεργειακό απόθεμα του 25% (σε ποσοστό 3.69% όπως φαίνεται στον πίνακα 7.10), ώστε να διασφαλίζεται η τήρηση των προσφορών ενέργειας κατά τη λειτουργία.



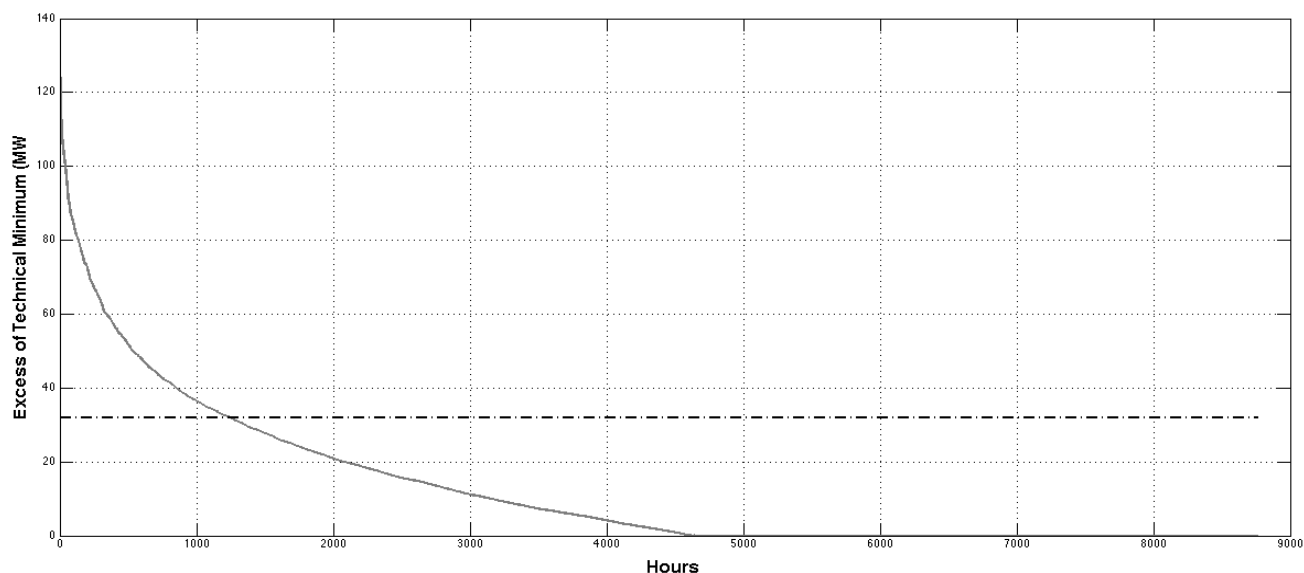
Σχήμα 7.3 Καμπύλη διάρκειας του επιπέδου φόρτισης (SoC) των μπαταριών VRB του ΥΣΑΜ.

Το σχήμα 7.4 παρουσιάζει τις καμπύλες διάρκειας της αποδιδόμενης ισχύος και της ισχύος φόρτισης των μπαταριών VRB και της συμμετοχής του Α/Π του ΥΣΑΜ στην προγραμματισμένη ισχύ παραγωγής και στο διαθέσιμο set-point. Το εμβαδόν που περικλείεται μεταξύ της καμπύλης φόρτισης (κόκκινη γραμμή) και της καμπύλης εκφόρτισης (μπλε γραμμή) αντιστοιχεί στην ισχύ που χάνεται με τη μορφή απωλειών.



Σχήμα 7.4 Η καμπύλη διάρκειας των βασικών μεγεθών του ΥΣΑΜ: αποδιδόμενη ισχύς μπαταριών, ισχύς φόρτισης μπαταριών, συμμετοχή του Α/Π στην εγγυημένη ισχύ, συμμετοχή του Α/Π στο διαθέσιμο set-point

Το σχήμα 7.5 παρουσιάζει την καμπύλη διάρκειας του πρόσθετου set-point (περίσσεια τεχνικού ελαχίστου) στο σύστημα της Κρήτης, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί από τον ΥΣΑΜ με απευθείας έγχυση αιολικής παραγωγής. υπάρχει η δυνατότητα ο ΥΣΑΜ να συμμετέχει στο πρόσθετο set-point για περίπου 4500 ώρες ετησίως. Με οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές υποδηλώνεται το πραγματικά αξιοποιήσιμο set-point λόγω του μεγέθους των μπαταριών (31.86).



Σχήμα 7.5 Καμπύλη διάρκειας πρόσθετου set-point (περίσσεια τεχνικού ελαχίστου καθ' υπέρβαση του δυναμικού περιορισμού) στο σύστημα της Κρήτης, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί από τον ΥΣΑΜ με απευθείας έγχυση αιολικής παραγωγής. Με διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται το πραγματικά αξιοποιήσιμο από τον ΥΣΑΜ set-point λόγω μεγέθους των μπαταριών (31.86 MW).

7.7 Τυπικά Διαγράμματα Λειτουργίας του ΥΣΑΜ

Στα σχήματα 7.6 έως 7.9 παρουσιάζεται η ημερήσια λειτουργία του ΥΣΑΜ, για 4 τυπικές εβδομάδες, στις οποίες επικρατούν συνθήκες υψηλού ή χαμηλού φορτίου και χαμηλής ή υψηλής αιολικής παραγωγής. Στα δύο πρώτα διαγράμματα (α) και (β) του κάθε σχήματος παρουσιάζεται η εσωτερική λειτουργία του ΥΣΑΜ.

- ❖ Στα διαγράμματα (α) παρουσιάζεται η προγραμματισμένη παραγωγή των μπαταριών (Pbattery), η συμμετοχή του Α/Π του ΥΣΑΜ στην προγραμματισμένη παραγωγή υποκαθιστώντας την ισχύ των μπαταριών (PwindH), η αξιοποίηση της περίσσειας set-point του συστήματος από τον ΥΣΑΜ (Set-point), καθώς και το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών (SOC).

Η δυνατότητα συμμετοχής στο set-point παριστάνεται με τη διακεκομμένη μαύρη γραμμή, πάνω από τη συνεχή μαύρη, η οποία απεικονίζει την προγραμματισμένη παραγωγή των μονάδων του ΥΣΑΜ (Scheduled generation). Παρατηρείται ότι, η δυνατότητα αξιοποίησης του πρόσθετου περιθωρίου τεχνικού ελαχίστου (λόγω της ταχύτατης απόκρισης των μπαταριών VRB, η οποία επιτρέπει την υπέρβαση του

δυναμικού περιορισμού του συστήματος), οδηγεί σε υψηλή συμμετοχή στο set-point και στις 4 τυπικές εβδομάδες.

Αναφορικά με τη συμμετοχή των αιολικών στην προγραμματισμένη παραγωγή, από τα διαγράμματα (α) είναι φανερό ότι το Α/Π του ΥΣΑΜ συμμετέχει στον μέγιστο βαθμό στην προγραμματισμένη ισχύ, με τις μπαταρίες να συμπληρώνουν ισχύ όποτε αυτό χρειάζεται. Ως εκ τούτου, υπάρχουν μεγάλα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία οι μπαταρίες λειτουργούν ελάχιστα έως και καθόλου σε κατάσταση εκφόρτισης

Το επίπεδο φόρτισης SoC των μπαταριών VRB, παραμένει εν γένει εντός των επιθυμητών ορίων 25-95%. Στις τυπικές εβδομάδες των Σχ. 7.6 και 7.7, το SOC παραμένει συνεχώς άνω του 25% λόγω της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής. Κατά τη διάρκεια της εβδομάδας υψηλής αιολικής παραγωγής του Σχ. 7.9, το SOC παραμένει σε πολύ υψηλά επίπεδα, καθώς για μεγάλο χρονικό διάστημα οι μπαταρίες παραμένουν πλήρως φορτισμένες και το σύνολο της ενέργειας κατανομής του σταθμού παρέχεται απ' ευθείας από το Α/Π του. Μόνο κατά την τυπική εβδομάδα χαμηλής αιολικής παραγωγής παρατηρούνται πιο χαμηλά επίπεδα φόρτισης, λόγω της σύμπτωσης με σχετικά υψηλές τιμές φορτίου. Ενδεικτικά, το SOC παραμένει κάτω του 25% για το 3.69 % του χρόνου, δηλαδή για περίπου 320 ώρες, ενώ όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3 πέφτει κάτω από το 20% για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό, ωστόσο, δεν αποτελεί πρόβλημα, δεδομένου ότι οι μπαταρίες VRB σύμφωνα με πληροφορίες του κατασκευαστή μπορούν να εκφορτιστούν ακόμη και πλήρως για περιορισμένη χρονική διάρκεια.

❖ Στα διαγράμματα (β) απεικονίζεται η λειτουργία φόρτισης από το Α/Π ή και από το δίκτυο, σε περίπτωση που έχει υποβληθεί δήλωση φορτίου. Σε καμία από τις 4 τυπικές εβδομάδες δεν απαιτείται απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο. Επίσης, είναι εμφανές ότι η αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής για φόρτιση των μπαταριών έχει χαμηλή προτεραιότητα και συμβαίνει σε σχετικά λίγες περιπτώσεις, με εξαίρεση ίσως την εβδομάδα χαμηλής αιολικής παραγωγής.

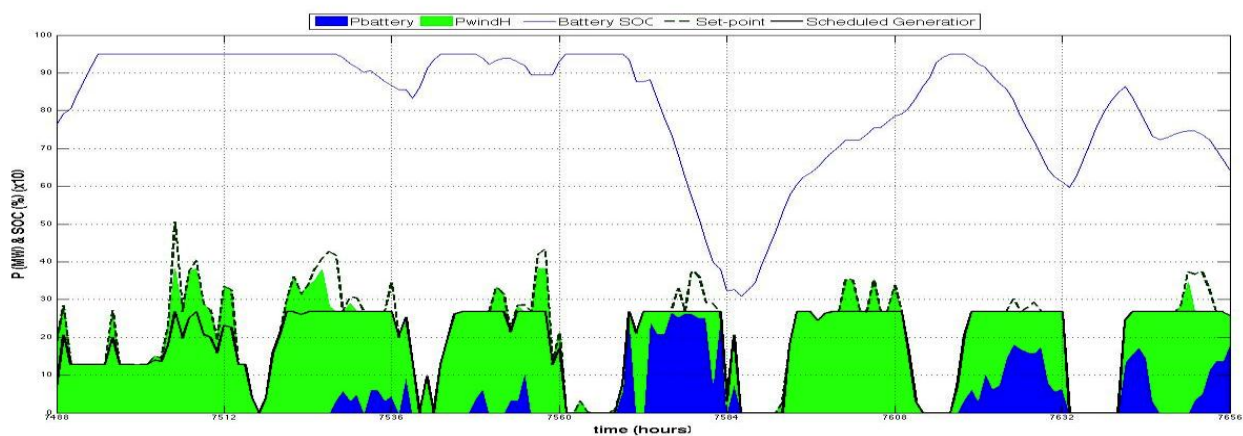
❖ Στα διαγράμματα (γ), παρουσιάζεται ο τρόπος διάθεσης της αιολικής παραγωγής του σταθμού μεταξύ των εναλλακτικών δυνατοτήτων:

- Συμμετοχή στο set-point (κίτρινο χρώμα)
- Συμμετοχή στην προγραμματισμένη παραγωγή του ΥΣΑΜ (ανοιχτό πράσινο)
- Φόρτιση των μπαταριών (σκούρο πράσινο)
- Απόρριψη (πορτοκαλί).

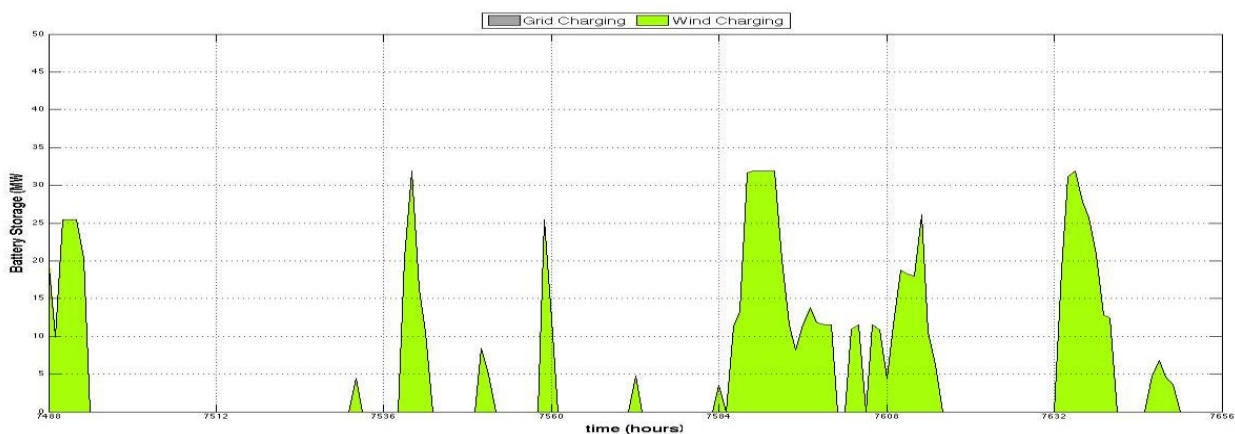
Από το διάγραμμα είναι σαφείς οι προτεραιότητες στη διάθεση της παραγωγής του Α/Π, με τη συμμετοχή στην προγραμματισμένη ισχύ του σταθμού να προηγείται, την τροφοδότηση των θερμαντήρων και τη συμμετοχή στο set-point να ακολουθούν και τη φόρτιση των μπαταριών να αποτελεί την τελευταία προτεραιότητα. Στο ίδιο σχήμα με διακεκομμένη μαύρη γραμμή παριστάνεται το διαθέσιμο set-point για τον ΥΣΑΜ, που παίρνει υψηλές τιμές λόγω της αξιοποίησης της διαθέσιμης περίσσειας τεχνικού ελαχίστου του συστήματος. Με εξαίρεση την εβδομάδα χαμηλής αιολικής παραγωγής, γενικά απορρίπτονται μεγάλες ποσότητες αιολικής ενέργειας, οι οποίες θα ήταν ακόμα μεγαλύτερες εάν δεν υπήρχε η δυνατότητα συμμετοχής του ΥΣΑΜ στην περίσσεια τεχνικού ελαχίστου του συστήματος.

7.7.1 Διαγράμματα για την Εβδομάδα Χαμηλού Φορτίου

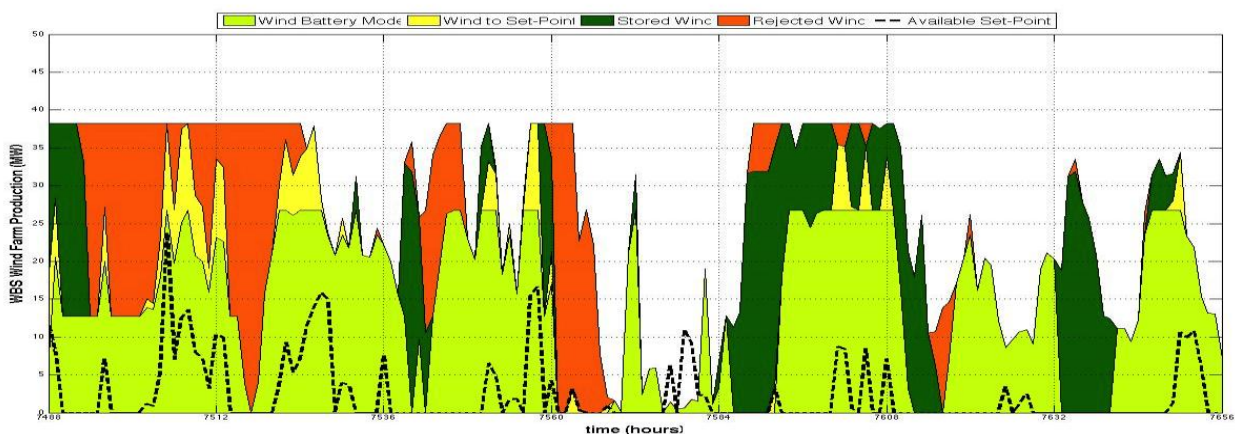
Λειτουργία του συστήματος της Κρήτης κατά τη διάρκεια τυπικής εβδομάδας Χαμηλού Φορτίου.



(α) Παραγωγή Μπαταριών, έγχυση αιολικής ισχύος στο δίκτυο μέσω υποκατάστασης ισχύος των μπαταριών ή αξιοποίησης περίσσειας set-point και SoC μπαταριών



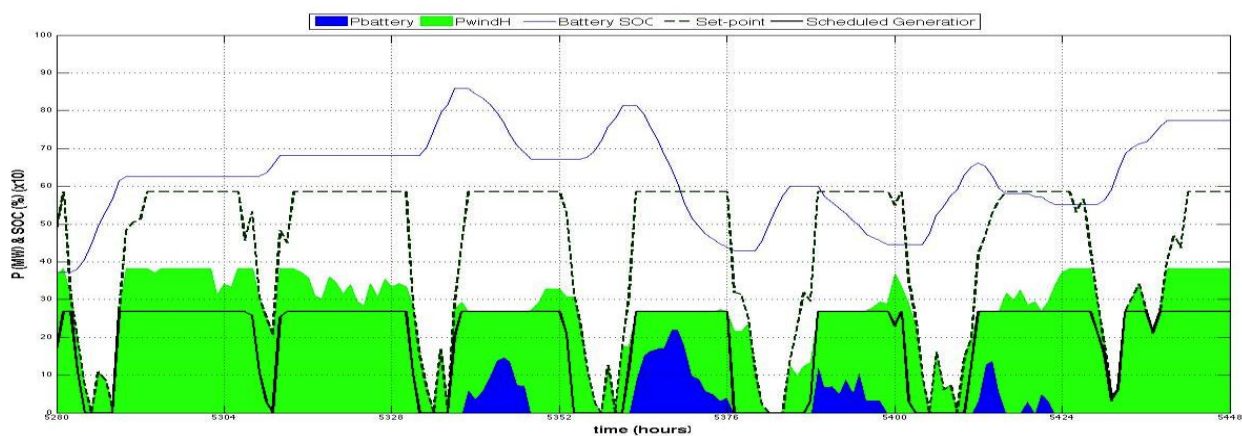
(β) Φόρτιση Μπαταριών



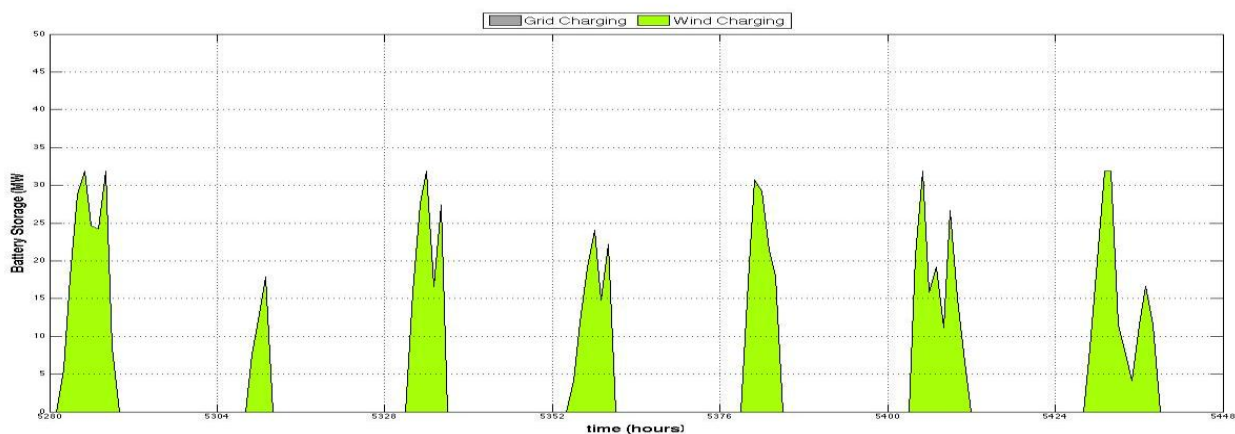
(γ) Αξιοποίηση Αιολικού Δυναμικού: Συμμετοχή στην προγραμματισμένη παραγωγή και στο setpoint, φόρτιση μπαταριών, απόρριψη παραγωγής

7.7.2 Διαγράμματα για την Εβδομάδα Υψηλού Φορτίου

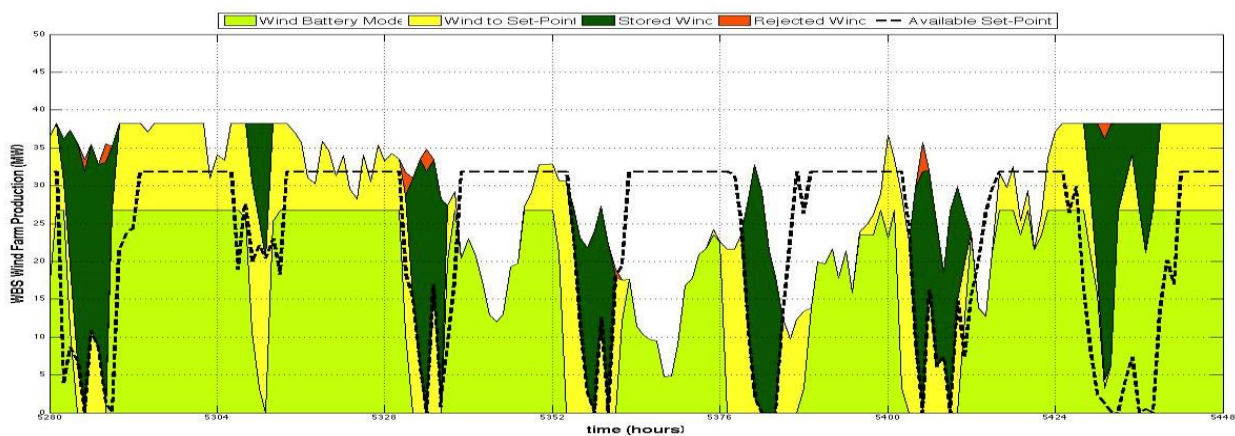
Λειτουργία του συστήματος της Κρήτης κατά τη διάρκεια τυπικής εβδομάδας Υψηλού Φορτίου.



(α) Παραγωγή Μπαταριών, έγχυση αιολικής ισχύος στο δίκτυο μέσω υποκατάστασης ισχύος των μπαταριών ή αξιοποίησης περισσεύας setpoint και SoC μπαταριών



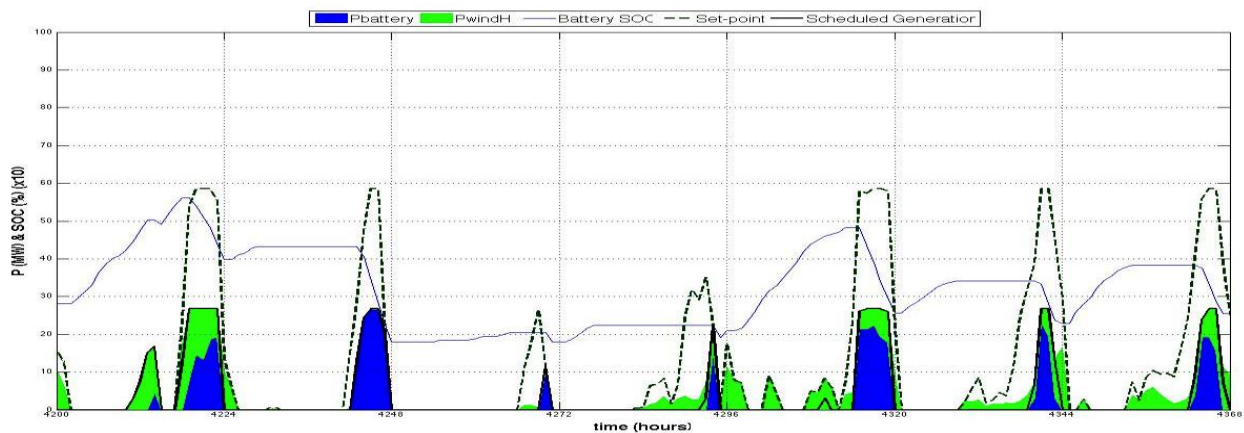
(β) Φόρτιση Μπαταριών



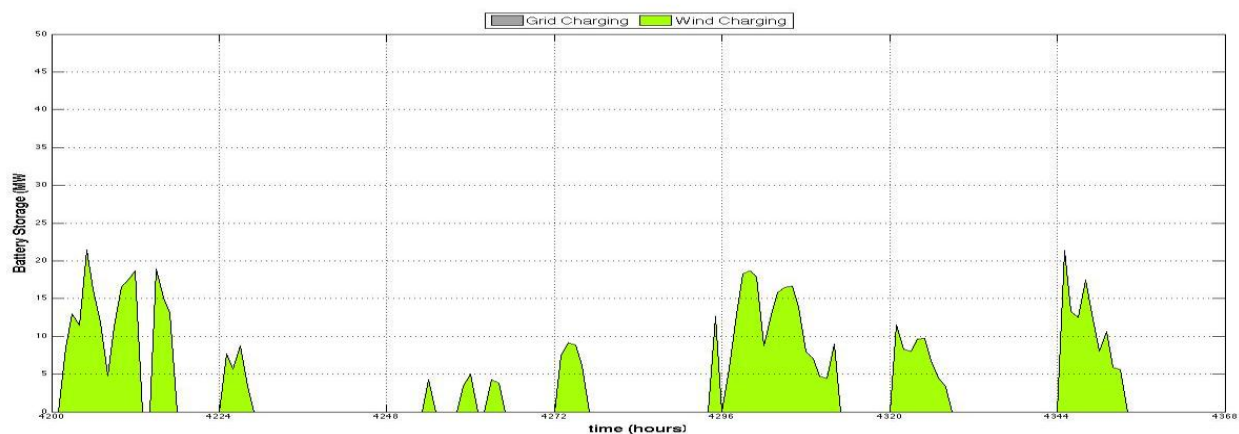
(γ) Αξιοποίηση Αιολικού Δυναμικού: Συμμετοχή στην προγραμματισμένη παραγωγή και στο setpoint, φόρτιση μπαταριών, απόρριψη παραγωγής

7.7.3 Διαγράμματα για την Εβδομάδα Χαμηλής Αιολικής Παραγωγής

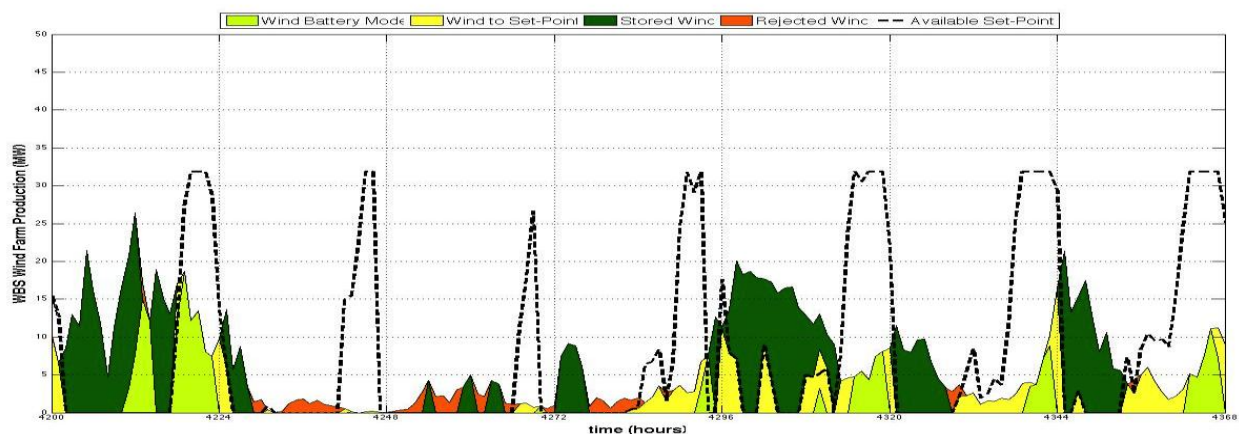
Λειτουργία του συστήματος της Κρήτης κατά τη διάρκεια τυπικής εβδομάδας Χαμηλής Αιολικής Παραγωγής.



(α) Παραγωγή Μπαταριών, έγχυση αιολικής ισχύος στο δίκτυο μέσω υποκατάστασης ισχύος των μπαταριών ή αξιοποίησης περίσσειας setpoint και SoC μπαταριών



(β) Φόρτιση Μπαταριών



γ) Αξιοποίηση Αιολικού Δυναμικού: Συμμετοχή στην προγραμματισμένη παραγωγή και στο setpoint, φόρτιση μπαταριών, απόρριψη παραγωγής

7.7.4 Διαγράμματα για την Εβδομάδα Υψηλής Αιολικής Παραγωγής

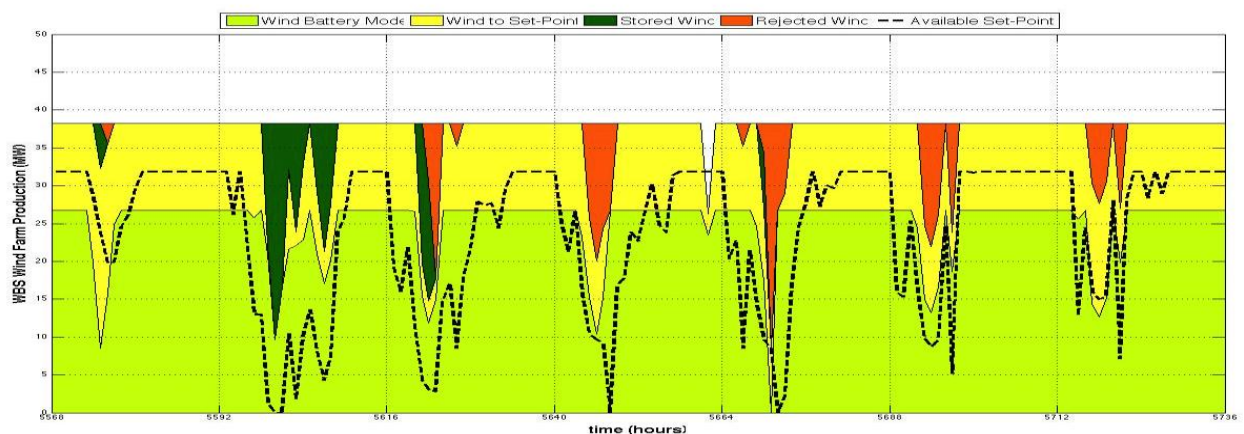
Λειτουργία του συστήματος της Κρήτης κατά τη διάρκεια τυπικής εβδομάδας Υψηλής Αιολικής Παραγωγής.



(α) Παραγωγή Μπαταριών, έγχυση αιολικής ισχύος στο δίκτυο μέσω υποκατάστασης ισχύος των μπαταριών ή αξιοποίησης περισσεύς setpoint και SoC μπαταριών



(β) Φόρτιση Μπαταριών



(γ) Αξιοποίηση Αιολικού Δυναμικού: Συμμετοχή στην προγραμματισμένη παραγωγή και στο setpoint, φόρτιση μπαταριών, απόρριψη παραγωγής

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

8.1 Γενικά

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η λειτουργία ενός συσσωρευτή τεχνολογίας VRB υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας (Διάφορες τιμές ισχύος φόρτισης ή εκφόρτισης, διάφορες τιμές της κατάστασης φόρτισης (SoC) κτλ.). Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν εξυπηρετούν περισσότερο την ενεργειακή επιθεώρηση ενός συστήματος και όχι τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συσσωρευτή. Η ανάλυση αυτή της λειτουργίας του συσσωρευτή οδήγησε στη δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου περιγραφής του, με τη χρήση του λογισμικού MatLab, το οποίο δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης της λειτουργίας ενός BESS αποτελούμενο από μονάδες VRB.

Αρχικά προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός BESS σε αυτόνομο σύστημα, με παραγωγή ενέργειας μόνο από ΑΠΕ, κάτι που έγινε κυρίως για μελέτη της συμπεριφοράς του συσσωρευτή και δεν έχει ουσιαστικά πρακτική σημασία παρά μόνο θεωρητική. Στη συνέχεια θεωρήθηκε ένας Υβριδικός Σταθμός (ΥΒΣ) με Αιολικά Πάρκα και BESS αποτελούμενο από VRB και μελετήθηκε η λειτουργία του στο ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης. Για το σύστημα αυτό ελήφθησαν υπόψη τα υφιστάμενα συστήματα συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής (καθώς και την προβλεπόμενη ανάπτυξή τους), η προβλεπόμενη εγκατεστημένη και αδειοδοτημένη ισχύς των αιολικών σταθμών και των Φ/Β για το έτος 2015

Τα κυριότερα ζητήματα που εξετάστηκαν ομαδοποιούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:

❖ Μοντέλο περιγραφής και προσομοίωσης της VRB

Στο κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο της VRB που παρουσιάζεται στη δημοσίευση [22]. Το μοντέλο αυτό ωστόσο, αν και πολύ αναλυτικό και ακριβές, απαιτεί σαν είσοδο πολλές μεταβλητές που αντιστοιχούν στην εσωτερική λειτουργία της VRB η γνώση των οποίων είναι συνήθως αδύνατη. Τίθεται λοιπόν ζήτημα περί της ευχρηστίας του μοντέλου αυτού.

Προτείνεται αντί' αυτού ένα νέο προσεγγιστικό και κατ' επέκταση πολύ απλούστερο μοντέλο, το οποίο δέχεται σαν είσοδο την ισχύ του συστήματος (P_{ent}), το πρόσημο της οποίας καθορίζει τη λειτουργία της VRB (φόρτιση/εκφόρτωση), και του αρχικού Sock της Μπαταρίας. Οι μεταβλητές αυτές είναι άμεσα μετρήσιμες, καθώς το Sock καθορίζεται πριν τη λειτουργία ενός BESS, ενώ η ισχύς P_{net} προκύπτει άμεσα από το ισοζύγιο ενέργειας του συστήματος. Συγκεκριμένα η P_{net} δίνεται από τη διαφορά της ισχύος που απαιτείται από το φορτίο P_{load} , από την παραγόμενη ισχύ (P_G). Εξόδους του μοντέλου αποτελούν η ισχύς απωλειών του συσσωρευτή και κατ' επέκταση ο βαθμός απόδοσής του σε έναν ή πολλούς κύκλους φόρτισης εκφόρτισης και η μεταβολή της κατάστασης φόρτισής του. Με τη χρήση λοιπόν του προτεινόμενου αυτού μοντέλου μπορεί να περιγραφεί η λειτουργία ενός BESS, αποτελούμενο από συστοιχία μπαταριών VRB.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι ο συσσωρευτής VRB μπορεί να αποδώσει την αποθηκευμένη ενέργειά του με πολύ μικρές απώλειες, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλό στιγμιαίο βαθμό απόδοσης (φόρτισης ή εκφόρτισης για) έως και περίπου 86%, ενώ ο βαθμός απόδοσης ενός πλήρους κύκλου παραμένει πολύ ψηλά με τιμή γύρω στο 76%. Αυτές ωστόσο οι τιμές αντιστοιχούν στη βέλτιστη λειτουργία της VRB, με ισχύ φόρτισης ή εκφόρτισης συγκεκριμένη ανάλογα με το SoC.

Προτείνεται, μάλιστα, και μια πολιτική διαχείρισης της VRB κατά τη φόρτιση, μεταβάλλοντας την τιμή της ισχύος έτσι ώστε ο μέσος βαθμός απόδοσης πλήρους κύκλου να φτάσει το 85.3 %. Μελετώντας λοιπόν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής μπορούμε ελέγχοντας την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης να μειώσουμε τις απώλειες της αποθήκευσης ενέργειας σε VRB στο ελάχιστο.

❖ Προσομοίωση και βέλτιστη διαστασιολόγηση του ΥΒΣ στην Κρήτη

Το μοντέλο της VRB ενσωματώθηκε σε κατάλληλο κώδικα περιγραφής του συστήματος της Κρήτης και της πολιτικής διαχείρισης ενός ΥΒΣ με BESS. Έτσι κατέστη δυνατή η προσομοίωση της ένταξης ενός ΥΣΑΜ στο σύστημα αυτό και η εξαγωγή ετήσιων ενεργειακών και οικονομικών αποτελεσμάτων. Μελετήθηκε δηλαδή και η ενεργειακή εισφορά του ΥΣΑΜ στο σύστημα της Κρήτης, αλλά και ο ίδιος ο ΥΣΑΜ ως οικονομική επένδυση.

Με χρήση γενετικών αλγορίθμων και έχοντας ως κριτήριο βελτιστοποίησης τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης της επένδυσης (του ΥΣΑΜ), επιλέχθηκαν κάποιοι συνδυασμοί διαστάσεων Αιολικού Πάρκου και BESS, για τους οποίους και έγινε η μελέτη των ετήσιων αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν δείχνουν ότι σε κάθε περίπτωση, για κάθε συνδυασμό διαστάσεων από αυτούς που προσομοιώθηκαν, η ενσωμάτωση του ΥΣΑΜ στην Κρήτη αυξάνει τη διείσδυση ενέργειας από ΑΠΕ στο σύστημα, μειώνοντας την παραγωγή των συμβατικών μονάδων, χωρίς ωστόσο να επηρεάζει τις ήδη εγκατεστημένες μονάδες ΑΠΕ. Σε κάποιες περιπτώσεις μάλιστα επιτρέπει τη μείωση της απορριπτόμενης ενέργειας των Α/Π. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτατη απόκριση και προσαρμογή της VRB στις απαιτήσεις του συστήματος επιτρέπει στον ΥΣΑΜ να παρέχει στρεφόμενη εφεδρεία στο σύστημα, υποστηρίζοντας τις υπόλοιπες μονάδες ΑΠΕ.

Όσον αφορά την εσωτερική λειτουργία του ΥΣΑΜ, παρατηρείται ότι η ύπαρξη του BESS με την ταχεία απόκριση στις εκάστοτε απαιτήσεις ισχύος, δίνει τη δυνατότητα στον ΥΣΑΜ να εκμεταλλευτεί το περιθώριο τεχνικού ελαχίστου του συστήματος, παρακάμπτοντας το δυναμικό περιορισμό που εφαρμόζεται στα υπόλοιπα Α/Π. Έτσι επιτυγχάνεται συντελεστής χρησιμοποίησης πάνω από 40% σχεδόν σε κάθε περίπτωση. Ακόμη ο λόγος της καθαρής έγχυσης ενέργειας στο σύστημα προς την πραγματική παραγωγή του ΥΣΑΜ διατηρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις πάνω από το 90%.

Ο βαθμός απόδοσης του BESS είναι αρκετά χαμηλότερος (περίπου 65%) από το μέγιστο δυνατό που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πολιτική διαχείρισης του ΥΣΑΜ που χρησιμοποιήθηκε, δε λαμβάνει υπόψη τις βέλτιστες συνθήκες

λειτουργίας των συσσωρευτών, παρά μόνο τα τεχνικά τους ελάχιστα. Έτσι με υιοθέτηση βελτιωμένης πολιτικής διαχείρισης, είναι δυνατή η περαιτέρω αύξηση του βαθμού απόδοσης του BESS με ότι αυτό συνεπάγεται για τα ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα του ΥΣΑΜ.

8.2 Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Στην παρούσα εργασία η βελτιστοποίηση της διαστασιολόγησης του ΥΣΑΜ πραγματοποιείται με γνώμονα μόνο τη βελτιστοποίηση του IRR. Προκύπτει ωστόσο πληθώρα συνδυασμών με παραπλήσιες τιμές για το μέγεθος αυτό. Θα μπορούσε λοιπόν η μια μελλοντική αναζήτηση του βέλτιστου συνδυασμού (Ισχύος Α/Π, Ισχύος και χωρητικότητας BESS και εγγυημένης ισχύος του ΥΣΑΜ) να λαμβάνει υπόψη και τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης ενέργειας από ΑΠΕ στο σύστημα.

Η κοστολόγηση που χρησιμοποιήθηκε για το BESS βασίζεται σε προσεγγιστικές τιμές των τωρινού κόστους των VRB. Ωστόσο, όσο η τεχνολογία ωριμάζει και όσο περισσότερο αυξάνεται η υιοθέτηση των συστημάτων αυτών σε εμπορικές εφαρμογές, τόσο θα μειώνεται το κόστος τους. Έτσι λοιπόν Μια μελλοντική μελέτη με προσαρμοσμένη τιμή για το κόστος της VRB θα έδινε προφανώς καλύτερο Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης.

Ακόμη η διερεύνηση και υιοθέτηση βελτιωμένης πολιτικής διαχείρισης του ΥΣΑΜ θα μπορούσε να πετύχει υψηλότερο βαθμό απόδοσης του BESS, μειώνοντας τις απώλειες κατά την αποθήκευση της ενέργειας. Αυτό θα επιτευχθεί με προσπάθεια λειτουργίας των VRB κοντά στις βέλτιστες συνθήκες ανάλογα με την εκάστοτε κατάσταση φόρτισής τους. Έτσι θα γίνει δυνατή η βέλτιστη αξιοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας.

Βιβλιογραφία

- [1] Eyer, J. Iannucci, and G. Corey, “Energy storage benefits and market analysis handbook,” Sandia Report, vol. SAND2004-6177, 2004.
- [2] Price, G. Thijssen, and P. Symons, “Electricity storage, a solution in network operation?,” Distributech Europe 2000, 2000.
- [3] S. Papaeuthimiou, E. Karamanou, S. Papathanasiou, M Papadopoulos: Operating policies for wind-pumped storage hybrid power stations in island grids, IET Renewable Power Generation, Vol. 3, No. 3 (2009)
- [4] K. PROTOPAPAS, S. PAPATHANASSIOU, Application of pumped storage to increase wind penetration in isolated island grids. In Proceedings of European wind Energy Conference – EWEC, 2006, Athens, Greece.
- [5] JOHN R. HULL, Flywheels, Encyclopedia of Energy, Vol. 2 (2004)
- [6] I. HADJIPASCHALIS, A. POULIKKAS, V. EFTHIMIOU, Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13 (2009)
- [7] HAISHENG CHEN et al, Progress in electrical energy storage system: A critical review, Progress in Natural Science, Vol. 19 (2009)
- [8] K.C. DIVYA, JACOB OSTERGAARD, Battery energy storage technology for power systems – An overview, Electric Power Systems Research, Vol. 79 (2009)
- [9] MARCO SEMADENI, Storage of energy, Overview, Encyclopedia of Energy, Vol. 5(2004)
- [10] ZHAOYIN WEN et al, Research on sodium sulfur battery for energy storage, Solid State Ionics, Vol. 179 (2008)
- [11] J. McDowall, High power batteries for utilities – the world’s most powerful battery and other developments, In Proceedings of Power Engineering Society General Meeting – IEEE, Denver, USA, 2004
- [12] JOHN J.C. KOPERA, inside the nickel metal hydride battery, Cobasys, 25 June 2004.
- [13] The Energy Blog – Vanadium Redox Flow Batteries (2006)
- [14] VRB Power Systems Incorporated – The VRB Energy Storage System (VRB – ESS)

(2007)

- [15] Energy Storage Technologies and Policies Needed to Support California's RPS Goals of 2020 – California Energy Commission Staff Workshop (Prudent Energy Inc.) (2009)
- [16] SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, Vanadium Redox-Flow Battery (VRB) for a Variety of Applications.
- [17] K.C. DIVYA, JACOB OSTERGAARD, Battery energy storage technology for power systems – An overview, Electric Power Systems Research, Vol. 79 (2009):
- [18] ANDREAS JOSSEN, DIRK UWE SAUER, Advances in redox-flow batteries, First International Renewable Energy Storage Conference, Gelsenkirchen, Germany, October 2006.
- [19] C. Lotspeich, "A Comparative Assessment of Flow Battery Technologies," EESAT 2002, 2002.
- [20] Electricity Storage Association. www.electricitystorage.org.
- [21] F. Abou Chacra, "Valorisation et optimisation du stockage d'énergie dans un réseau d'énergie électrique," Thèse Supélec, 2005.
- [22] Modeling of a Vanadium Redox Flow Battery Electricity Storage System - Christian Blanc (Suisse, 2009)
- [23] Multiphysics and Energetic Modeling of a Vanadium Redox Flow Battery – Christian Blanc, Alfred Rufer (EPFL - 2008)
- [24] Understanding the Vanadium Redox Flow Batteries – Christian Blanc and Alfred Rufer (EPFL)
- [25] Αυθόρμητες και μη οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις (http://users.sch.gr/marbagana/kef08/page08_1.html)
- [26] A. Heintz and C. Illenberger, "Thermodynamics of vanadium redox flow batteries - electrochemical and calorimetric investigations," Ber. Bunsenges. Phys. Chem., vol. 102, 1998.
- [27] M. Skyllas-Kazacos and C. Menictas, "The vanadium redox battery for emergency back-up applications," Intelec 97, 1997.
- [28] T. Kaizuka and T. Sasaki, "Evaluation of control maintaining electric power quality by use of rechargeable battery system," IEEE, 2001.
- [29] Energy on Demand (En-O-De), "Vanadium instant energy, white paper," 2005.

- [30] Optimization of the operating Point of a Vanadium Redox Flow Battery – Christian Blanc, Alfred Rufer (EPFL - 2009)
- [31] VRB Modeling for the Study of Output Terminal Voltages, Internal Losses and performance – J. Chahwan, C. Abbey, G. Joos (McGill University, Canada – 2007)
- [32] Grid-Connected Wind Farm Power Control using VRB-Based Energy Storage System – Wenliang Wang, Baoming Ge, Daqiang Bi, Dongsun Sun (2010)
- [33] A New Control Method for VRB SOC Estimation in Stand-Alone Wind Energy Systems – L. Barote, C Marinescu (2009)
- [34] Επικοινωνία με το Tsinghua University, Beijin China και συγκεκριμένα με το Laboratory on Power Electronics and Electric Machine Control (Bi Daqiang, Ge Baoming)
- [35] «Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών – Υδρογόνου» - Διπλωματική εργασία (Ευάγγελος Ι. Βρεττός – 2010)
- [36] «Διερεύνηση των Περιθωρίων Διείσδυσης Φ/Β και Αιολικών Σταθμών σε Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά» - Διπλωματική Εργασία (Ελένη Ι. Καπόλου - 2011)
- [37] «Διερεύνηση Πολιτικών Λειτουργίας Μη Διασυνδεδεμένων Νησιωτικών Συστημάτων με Διείσδυση ΑΠΕ» - Διπλωματική Εργασία (Σοφία Π. Κορκιζόγλου – 2011)
- [38] Ε. Καραμάνου, «Διερεύνηση Δυνατοτήτων Διείσδυσης Φωτοβολταϊκή Παραγωγής σε Αυτόνομα Νησιωτικά Συστήματα με Εγκατεστημένη Αιολική Ισχύ». Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ 2006
- [39] Σημειώσεις Οικονομικής αξιολόγησης Επενδύσεων Ηλεκτροπαραγωγής ΑΠΕ – Στ. Παπαθανασίου, ΕΜΠ 2012