



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

**Μελέτη της συμπεριφοράς των Εικονικών Σύγχρονων
Μηχανών στη Στήριξη της Συχνότητας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΒΑΣΙΛΑΚΗ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ

Επιβλέπων : Νίκος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβρης 2012



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

Μελέτη της συμπεριφοράς των Εικονικών Σύγχρονων Μηχανών στη Στήριξη της Συχνότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΒΑΣΙΛΑΚΗ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ

Επιβλέπων : Νίκος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή των Οκτώβριο 2012.

(Υπογραφή)

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

(Υπογραφή)

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

(Υπογραφή)

.....
Παύλος Γεωργιάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβρης 2012

(Υπογραφή)

.....
ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

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

Copyright © Αθανάσιος, Βασιλάκης, 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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Η διαρκής αύξηση της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει αλλάξει σε βάθος την τυπική δομή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, επηρεάζοντας δυσμενώς την ευστάθεια του ηλεκτρικού δικτύου. Μία καινούρια στρατηγική ελέγχου, η οποία δημιουργεί εικονική περιστροφική αδράνεια έχει προταθεί στα διασυνδεδεμένο δίκτυο ως ελπιδοφόρα λύση στο αναδυόμενο αυτό πρόβλημα. Οι εικονικές σύγχρονες μηχανές (*ΕΣΜ*) είναι συσκευές που παρέχουν εικονική αδράνεια. Η βασική ιδέα πίσω από τις *ΕΣΜ* έχει ως στόχο την αναπαραγωγή των στατικών και δυναμικών χαρακτηριστικών μιας πραγματικής σύγχρονης μηχανής (*ΣΜ*) μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, ώστε να κληρονομήσουν τα πλεονεκτήματα που οι σύγχρονες μηχανές έχουν σε σχέση με τη ευστάθεια του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Στην καρδιά των *ΕΣΜ*, βρίσκεται η έννοια της αποθήκευσης ενέργειας, που αποτελεί το ανάλογο της κινητικής ενεργείας που είναι αποθηκευμένη στην περιστρεφόμενη μάζα του δρομέα των *ΣΜ*. Η ανάπτυξη μιας τέτοιας στρατηγικής ελέγχου και η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των *ΕΣΜ* με το δίκτυο, όσον αφορά την ευστάθεια της συχνότητας, είναι από τους πρωταρχικούς στόχους αυτής της εργασίας.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται λόγος για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάζουμε συνοπτικά τις κυριότερες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας καθώς και τις επικουρικές υπηρεσίες ρύθμισης συχνότητας σύμφωνα με το *ENTOS-E* (European Network of Transmission System Operators for Electricity).

Στο κεφάλαιο 2 εξετάζουμε την δυναμική των σύγχρονων μηχανών, από την κατανόηση των οποίων προκύπτουν οι Εικονικές Σύγχρονες Μηχανές.

Η κατανόηση της λειτουργίας των συσσωρευτών είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη μοντέλων που προσομοιώνουν τη συμπεριφορά τους. Για το λόγο αυτό, στο κεφάλαιο 3, περιγράφεται η δομή, η αρχή λειτουργίας και οι διάφοροι τύποι συσσωρευτών. Στη συνέχεια μια επισκόπηση των διαφορετικών μοντέλων μπαταρίας που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία καθώς και η αξιολόγηση τους, πραγματοποιείται στο κεφάλαιο 4.

Στο κεφάλαιο 5 αναπτύσσουμε ένα μοντέλο μπαταρίας, βασισμένο στη συστοιχία συσσωρευτών Μολύβδου - οξέος του εργαστηρίου *ΣΗΕ*. Το μοντέλο είναι ικανό να περιγράψει τόσο την δυναμική συμπεριφορά της κατάστασης φόρτισης των μπαταριών όσο και την δυναμική συμπεριφορά της τερματικής τάσης.

Ο στόχος μιας εικονικής σύγχρονης μηχανής είναι να αλληλεπιδρά με το δίκτυο, εισάγοντας και απορροφώντας ενέργεια από αυτό σύμφωνα με τις διακυμάνσεις και το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας. Αυτό πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μιμείται μια πραγματική σύγχρονη μηχανή. Στο κεφάλαιο 6 περιγράφουμε της λειτουργία των

εικονικών σύγχρονων μηχανών, τόσο για την δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας όσο και για την ρύθμιση τάσης. Η συνεισφορά της εισαγωγής *ΕΣΜ* στη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργεια είναι το αντικείμενο του κεφαλαίου 7. Η επίδραση των *ΕΣΜ* αποτιμάται προσομοιώνοντας διαφορετικά σενάρια ηλεκτρικών συστημάτων με διαφορετικό ποσοστό εισαγωγής *ΕΣΜ*.

Τέλος, στο κεφάλαιο 8 εξετάζουμε την λειτουργία των *ΕΣΜ* για πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, βασισμένη σε δεδομένα συχνότητας που μας παραχώρησε ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Αναπτύσσουμε και συγκρίνουμε διαφορετικούς αλγόριθμους ελέγχου των *ΕΣΜ*, που λαμβάνουν υπόψιν τόσο τους περιορισμούς που προκύπτουν από την κατάσταση φόρτισης όσο και από την μέγιστη χωρητικότητα των συσσωρευτών.

Abstract

The increasing share of Dispersed Generation (*DG*) has changed the typical electric power system structure, causing stability issues. A control strategy of *Virtual Synchronous Generator (VSG)*, which is a device that provides virtual rotational inertia, has been introduced to the grid-connected system as promising solution. Virtual Synchronous Generator is a new type of grid feeding power-electronic based device that emulates the rotational inertia of synchronous generators. The basic idea of the *VSG*, is based on reproducing the static and dynamic properties of a real synchronous machine (SM) on a power electronics interface between a Storage or *DG* unit and the grid, in order to inherit the advantages of SM in consideration of power system stability. In the heart of the *VSG* units, there is the concept of energy storage, which plays the similar role as the kinetic energy of rotating mass of *SG*. The development of such a device and the interaction of a *VSG* unit with the grid is the main objective of this thesis.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Κοτσαμπόπουλο για τη συνεχή βοήθεια, την πολύτιμη καθοδήγηση καθώς και για την πετυχημένη συνεργασία καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησεως της διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Βασίλειο Καραπάνο για τις υποδείξεις του και τις πολύτιμες συμβουλές του.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στο Γιώργη για την συνεισφορά του στα εργαστηριακά πειράματα και στα υπόλοιπα παιδιά του εργαστηρίου ΣΗΕ, Γιώργο, Βασίλη, Αλεξία, Θάνο και Κώστα για την ηθική συμπαράσταση και την βοήθεια τους.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π για την υποστήριξη της πρωτοβουλίας αυτής της διπλωματικής.

Τέλος, θεωρώ χρέος μου να ευχαριστήσω τους γονείς που σε όλη τη διάρκεια της ζωής μου πάντα με στήριζαν ουσιαστικά ώστε να μπορέσω να ολοκληρώσω επιτυχώς τις σπουδές μου.

Περιεχόμενα

1. Δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας	1
1.1. Εισαγωγή	1
1.2. Οριζόντια και κάθετη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	1
1.2.1. Τεχνολογίες Διασπαρμένης Παραγωγής	4
1.2.2. Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας	5
1.3. Επικουρικές υπηρεσίες	8
1.3.1. Στατή εφεδρεία	9
1.3.2. Ρύθμιση τάσης	9
1.3.3. Επανεκκίνηση του συστήματος	9
1.3.4. Ρύθμιση της συχνότητας	9
1.3.5. Πρωτεύουσα ρύθμιση και εφεδρεία	10
2. Ευστάθεια του δικτύου	13
2.1. Ταξινόμηση	13
2.1.1. Ευστάθεια γωνίας δρομέα	14
2.1.2. Ευστάθεια συχνότητας	15
2.1.3. Ευστάθεια τάσης	15
2.2. Δυναμική των σύγχρονων μηχανών	15
2.2.1. Εξίσωση ταλάντωσης	15
2.2.2. Χαρακτηριστικά γωνίας-ισχύος	17
2.2.3. Κριτήριο ίσων εμβαδών	19
2.3. Δείκτες ευστάθειας του συστήματος	21
3. Συσσωρευτές	23
3.1. Τύποι συσσωρευτών	24
3.2. Βασικά μεγέθη μπαταριών	25
3.2.1. Παράγοντες Που επηρεάζουν την Χωρητικότητα	26
3.3. Οι συσσωρευτές του εργαστηρίου	27
3.3.1. Διαχείριση μπαταρίας	28
4. Μοντέλα συσσωρευτών	31
4.1. Ηλεκτροχημικά Μοντέλα	31
4.2. Ηλεκτρικά Μοντέλα Ισοδύναμου Κυκλώματος	32
4.3. Αναλυτικά Μοντέλα	32
4.3.1. Νόμος του Peuker	33
4.3.2. Rakhmatov και Vrudhula	34

4.3.3.	Kinetic Battery model (KiBaM)	36
5.	Μοντελοποίηση των συσσωρευτών του εργαστηρίου	43
5.0.4.	Στόχοι του παρόντος κεφαλαίου	43
5.1.	Πειραματική διάταξη	44
5.2.	Υλοποίηση του μοντέλου	45
5.2.1.	Μοντέλο χωρητικότητας	46
5.2.2.	Μοντέλο τάσης	49
5.3.	Σύγκριση του μοντέλου	51
5.3.1.	Αποφόρτιση υπό σταθερό ρεύμα	52
5.3.2.	Διακοπτόμενη αποφόρτιση σε σταθερό φορτίο	52
5.4.	Συμπεράσματα	56
6.	Εικονικές σύγχρονες μηχανές	59
6.1.	Εικονική αδράνεια	60
6.2.	Λειτουργία των εικονικών σύγχρονων μηχανών	61
6.3.	Υψηλού επιπέδου έλεγχος των ΕΣΜ	62
6.3.1.	Ρύθμιση συχνότητας	63
6.3.2.	Ρύθμιση τάσης	65
6.4.	Χαμηλού επιπέδου έλεγχος των ΕΣΜ	65
7.	Συνεισφορά των ΕΣΜ στην ευστάθεια συχνότητας	69
7.0.1.	Στόχοι του παρόντος κεφαλαίου	69
7.1.	Συμπεριφορά των ΕΣΜ	70
7.1.1.	Γεννήτρια σε άπειρο ζυγό	71
7.1.2.	ΕΣΜ σε άπειρο ζυγό	73
7.1.3.	Παράλληλη λειτουργία ΣΓ και ΕΣΜ στο άπειρο δίκτυο	74
7.1.4.	Σύστημα δύο περιοχών	77
7.1.5.	Σύστημα τριών περιοχών	79
7.2.	Συμπεράσματα	81
8.	ΕΣΜ για πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας	83
8.0.1.	Στόχοι του παρόντος κεφαλαίου	84
8.1.	Ρύθμιση συχνότητας σύμφωνα με το ENTSO-E	84
8.2.	Λειτουργία του BESS-VSG για πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας	86
8.2.1.	Ανάλυση των δεδομένων	86
8.2.2.	Βασικός έλεγχός του BESS-VSG	87
8.2.3.	Μοντέλο Μπαταριών	90
8.2.4.	Μέγεθος του BESS-VSG	90
8.3.	Επίδραση της ρύθμισης συχνότητας στη χωρητικότητα του BESS-VSG	91
8.3.1.	BESS-VSG χωρίς επαναφόρτιση	91
8.3.2.	BESS-VSG με επαναφόρτιση	92
8.3.3.	BESS-VSG με έλεγχο της κατάστασης φόρτισης	94
8.3.4.	BESS-VSG με αναλογικό έλεγχο της κατάστασης φόρτισης	95

8.4. Σύγκρισή των στρατηγικών ελέγχου	97
9. Συμπεράσματα	101
A'. Παράρτημα	103
A.1. Μοντέλο μπαταρίας KiBaM	103
A'.2. Μοντέλο εικονικής σύγχρονης μηχανής	105
A'.3. Δεδομένα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	107
A.3.1. Matlab/Simulink models	108
A'.3.2. Ηλεκτρικές παράμετροι των γεννητριών	109
A'.3.3. Επίλυση ροής φορτίου	109
Βιβλιογραφία	111

1. Δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας

1.1. Εισαγωγή

Από τη βιομηχανική επανάσταση και έπειτα παρατηρείται διαρκής αύξηση στη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι η ζήτηση σε ηλεκτρική ισχύ διπλασιάζεται σχεδόν κάθε δεκαετία. Η παρούσα τάση για την κατασκευή των δικτύων που παρέχουν αυτή την ηλεκτρική ενέργεια χαρακτηρίζεται από ένα δίκτυο γραμμών μεταφοράς που συνδέει πληθώρα γεννητριών και φορτίων. Τα δίκτυα αυτά μπορεί να εκτείνονται σε ολόκληρη ήπειρο με γεννήτριες σε μακρινές αποστάσεις να είναι συνδεδεμένες παράλληλα με σκοπό την αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα φορτία.

Η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο Δίκτυο Διανομής Ενέργειας θεωρείται πλέον επιτακτική. Λόγω των περιβαλλοντικών ανησυχιών και των περιορισμένων αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων είναι αναγκαία η εύρεση πιο συμβατικών μορφών ενέργειας. Η εισαγωγή στο δίκτυο όμως μεγάλων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ξεπεράσει πρώτα τους τεχνολογικούς αλλά και οικονομικούς φραγμούς που παρουσιάζονται.

Η Ηλεκτροπαραγωγή κατατάσσεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το είδος των πηγών ενέργειας που χρησιμοποιεί. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- η ηλεκτροπαραγωγή από συμβατικά καύσιμα, η οποία χρησιμοποιεί σαν πηγή ενέργειας ορυκτά στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα, τα οποία έχουν σχηματιστεί σε παλαιότερες γεωλογικές περιόδους και βρίσκονται αποθηκευμένα στο υπέδαφος, σε μικρότερα ή μεγαλύτερα βάθη σε πεπερασμένες, μη ανανεώσιμες ποσότητες.
- η ηλεκτροπαραγωγή από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, η οποία αντίθετα με την πρώτη, χρησιμοποιεί πηγές διαχρονικές, που δεν εξαντλούν περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα. Η Ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον ήλιο και τα φυσικά φαινόμενα και κατά συνέπεια εξαρτάται από την περιοδικότητα ή την στοχαστικότητα αυτών των φαινομένων.

1.2. Οριζόντια και κάθετη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η πλειοψηφία των ηλεκτρικών δικτύων ανά τον κόσμο δομήθηκε όλες τις προηγούμενες δεκαετίες από την γέννησή τους ακόμη, πάνω στην διαπίστωση ότι το κόστος της

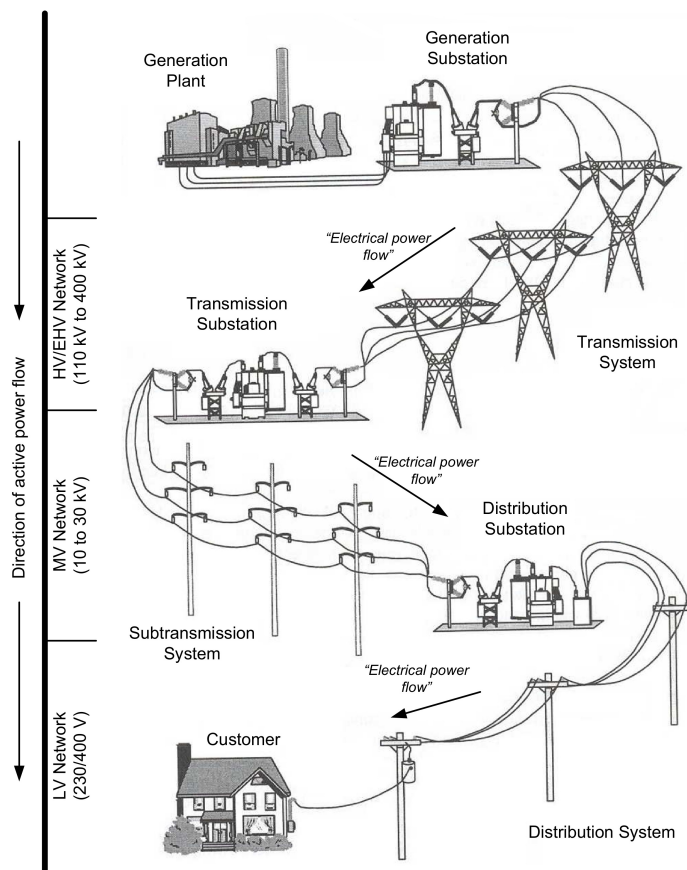
παραγόμενης ενέργειας μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Η διαπίστωση αυτή ήταν καθοριστικός παράγοντας για την δομή των ηλεκτρικών δικτύων, καθώς βασικότερα κριτήρια για την ηλεκτροπαραγωγή ήταν το κόστος και η απόδοση. Έτσι οι νέοι θερμικοί σταθμοί, είτε αυτοί χρησιμοποιούσαν λιγνίτη ή πετρέλαιο, είτε πυρηνικά καύσιμα, κατασκευάζονταν με όλο και μεγαλύτερη ισχύ ώστε να μειωθεί το κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το κριτήριο αυτό άφηγε σε δεύτερη μοίρα άλλους παράγοντες που σχετιζόνταν με το μέγεθος και την τοποθεσία των ηλεκτρικών σταθμών παραγωγής όπως το περιβαλλοντικό κόστος και την εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμότητας. Η πρακτική αυτή είχε ως αποτέλεσμα την γιγάντωση των θερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, παράλληλα με την κατασκευή ολοένα και μεγαλύτερων δικτύων μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας με γραμμές υψηλής και πολύ υψηλής τάσης [2].

Μέχρι και σήμερα λοιπόν, ένα τυπικό ηλεκτρικό δίκτυο, βασίζεται στην κάθετη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, από λίγους και μεγάλης ισχύος σταθμούς, την μεταφορά της σε αστικά κέντρα με γραμμές υψηλής τάσης και στη συνέχεια τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας με γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης. Το μοντέλο αυτό άρχισε να αμφισβητείται σταδιακά, καθώς νέα δεδομένα έπρεπε να ληφθούν υπ όψη.

Μέχρι τώρα βασικότερος παράγοντας καθορισμού της περιοχής εγκατάστασης ενός μεγάλου εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ήταν αφενός η εύκολη μεταφορά της πρώτης ύλης που θα χρησιμοποιεί και κατά δεύτερο η εύκολη απόρριψη της παραγόμενης θερμότητας. Η πρακτική αυτή θεωρείται όχι μόνο σπάταλη, αλλά και επιζήμια για το περιβάλλον. Αυτό διότι έτσι κι αλλιώς η απόδοση των θερμικών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρή (το πολύ 30% έως 35% σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου), καθώς το μεγαλύτερο μέρος της πρωτογενούς ενέργειας χάνεται υπό μορφή θερμότητας (ζεστό νερό ή υδρατμός). Οι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, έχουν το πλεονέκτημα να διοχετεύουν την εκλυόμενη θερμότητα για βιομηχανική χρήση ή οικιακή θέρμανση, αξιοποιώντας έτσι πλήρως την καύσιμη ύλη. Η πρακτική αυτή θεωρείται πολύ φιλικότερη για το περιβάλλον, αφενός γιατί η παραγόμενη θερμότητα δεν πηγαίνει χαμένη, αλλά χρησιμοποιείται για θέρμανση και αφετέρου διότι αποφεύγεται η έκλυση θερμού νερού σε ποτάμια ή θάλασσες επηρεάζοντας έτσι αρνητικά τα οικοσυστήματα. Αντίθετα όμως με τον ηλεκτρισμό, η θερμότητα δεν μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις, πράγμα που καθιστά την συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας δυνατή μόνο κοντά στο σημείο παραγωγής.

Μια λύση στο ζήτημα αυτό έρχεται να δώσει η διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Distributed Generation). Αντίθετα από την συγκεντρωμένη παραγωγή από λίγους και γιγάντιους θερμικούς σταθμούς, ικανούς να τροφοδοτήσουν με ζεστό νερό μόνο την περιοχή που βρίσκονται, η διανεμημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες συμπαραγωγής θα ήταν ικανή να τροφοδοτήσει τόσο με ηλεκτρισμό όσο και με ζεστό νερό για θέρμανση πολύ μεγαλύτερο ποσοστό πληθυσμού καθώς και βιομηχανικές μονάδες.

Παράλληλα με την παροχή ζεστού νερού εκεί όπου απαιτείται, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κοντά στο σημείο κατανάλωσης μειώνει σημαντικά τις απώλειες που συνεπά-



Σχήμα 1.1.: Κάθετη δομή λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

γεται η μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις. Συνακόλουθη είναι και η αποσυμφόρηση των ηλεκτρικών γραμμών μεταφοράς και διανομής, των μετασχηματιστών καθώς και η επιβράδυνση μεγάλων επενδύσεων στα ηλεκτρικά δίκτυα (προσθήκη νέου εξοπλισμού για κάλυψη νέων φορτίων) αφού η ζήτηση καλύπτεται εν μέρει από την τοπικά παραγόμενη ενέργεια. Το οικονομικό κόστος από την αποσυμφόρηση αυτή μπορεί να είναι πολύ σημαντικό, καθώς μειώνονται σημαντικά οι αστοχίες των διατάξεων διανομής λόγω υπερφόρτισης, άρα και η συντήρηση του δικτύου. Αξίζει να σκεφτεί κανείς το αυξημένο ποσοστό βλαβών στις διατάξεις των δικτύων διανομής μέσης και χαμηλής τάσης σε περιόδους μεγάλης ζήτησης, π.χ. το καλοκαίρι στα αστικά κέντρα.

Η διεσπαρμένη παραγωγή λοιπόν, ορίζεται ως η παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας, με τιμές που κατά κανόνα κυμαίνονται από 1 kW μέχρι μερικά MW και είναι μία σχετικά καινούρια τάση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο απλά όταν αναφερόμαστε στη διεσπαρμένη παραγωγή εννοούμε ότι μονάδες παραγωγής ενέργειας έχουν εγκατασταθεί κοντά στο σημείο κατανάλωσης (φορτίο).

Οι πέντε κυριότεροι λόγοι που οδήγησαν σε αυτήν την εξέλιξη είναι:

- Η ανάπτυξη στις τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής,

- Οι περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς,
- Οι αυξημένες απαιτήσεις των καταναλωτών για αξιόπιστη ενέργεια,
- Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι ανησυχίες για τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές.

Η διεύρυνση της εισαγωγής διεσπαρμένης παραγωγής, οδηγεί στη μετατροπή του δικτύου από την κλασική κάθετη μορφή λειτουργία, σε ποιο οριζόντια δομή του συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στην οριζόντια αυτή μορφή έχουμε διττή μεταφορά ενεργείας και την μετατροπή του συστήματος από παθητικό σε ενεργό, μέσω των τοπικών (διεσπαρμένων) μονάδων παραγωγής ενέργειας.

1.2.1. Τεχνολογίες Διασπαρμένης Παραγωγής

Οι τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής (DER) αποτελούνται κυρίως από συστήματα παραγωγής ενέργειας και συστήματα αποθήκευσης που τοποθετούνται στον τελικό χρήστη ή κοντά σε αυτόν. Περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών όπως κυψέλες καυσίμου, μικροτουρμπίνες, εμβολοφόρους μηχανές και άλλες τεχνολογίες διαχείρισης ενέργειας. Επίσης διαθέτουν διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος και συσκευές επικοινωνίας και ελέγχου για την αποδοτική λειτουργία των ανεξάρτητων μονάδων παραγωγής. Το συνηθέστερο καύσιμο που χρησιμοποιούν τα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής είναι το φυσικό αέριο. Τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή ενέργεια, η βιομάζα και ο άνεμος είναι επίσης διαδεδομένες.

1.2.1.1. Μικροτουρμπίνες

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικρές τουρμπίνες που παράγουν ισχύ μεταξύ 25 kW και 500 kW. Οι μονάδες αυτές είναι μικρού μεγέθους, πολύ υψηλής ταχύτητας και συνήθως συμπεριλαμβάνουν την τουρμπίνα αερίου, το συμπιεστή, της γεννήτρια και τα ηλεκτρονικά ισχύος για τη σύνδεσή τους στο δίκτυο. Τυπικά λειτουργούν με φυσικό αέριο, αλλά δέχονται για λειτουργία και πολλά άλλα βιομηχανικά καύσιμα.

1.2.1.2. Τουρμπίνες εσωτερικής καύσης

Οι παραδοσιακές τουρμπίνες παράγουν ισχύ μεταξύ 500 kW και 25 MW για DER, και μέχρι 250 MW για κεντρική παραγωγή ισχύος. Το καύσιμο που χρησιμοποιούν είναι φυσικό αέριο, πετρέλαιο ή ένας συνδυασμός καυσίμων. Οι σύγχρονες τουρμπίνες έχουν αποδόσεις που κυμαίνονται από 20 % έως 45% στο πλήρες φορτίο.

1.2.1.3. Μηχανές εσωτερικής καύσης

Μια μηχανή εσωτερικής καύσης μετατρέπει την ενέργεια που περιέχεται σε κάποιο καύσιμο σε μηχανική ενέργεια. Αυτή η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την

περιστροφή ενός άξονα μέσα στη μηχανή. Μια γεννήτρια συνδέεται με τη μηχανή εσωτερικής καύσης για τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι διαθέσιμες από μικρά μεγέθη (5 kW για εφεδρική γεννήτρια σε κατοικίες) μέχρι μεγάλες γεννήτριες (7 MW). Οι μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν διαθέσιμα καύσιμα όπως βενζίνη, φυσικό αέριο και diesel.

1.2.1.4. Κυψέλες καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου (fuel cell) είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή, που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρισμό χωρίς τη μεσολάβηση της καύσης. Στη βασική της μορφή λειτουργεί ως εξής: υδρογόνο και οξυγόνο αντιδρούν με την παρουσία ηλεκτρολύτη και παράγουν νερό, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσεται ένα ηλεκτροχημικό δυναμικό που προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα (φορτίο). Καθώς η αντίδραση είναι εξώθερμη, παράγεται θερμότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα. Το απαιτούμενο υδρογόνο παράγεται από ορυκτά καύσιμα και συνήθως μεθάνιο (CH₄), που αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου. Ορισμένοι τύποι κυψελών μπορούν να λειτουργήσουν επίσης και με διοξείδιο του άνθρακα ή υδρογονάνθρακες.

1.2.1.5. Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά κελιά (PV), ή αλλιώς ηλιακά κελιά, μετατρέπουν απευθείας το φως του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεντρώνονται σε επίπεδα πάνελ τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν σε ταράτσες ή άλλες ηλιόλουστες περιοχές. Παράγουν ηλεκτρισμό χωρίς να έχουν κινούμενα μέρη, λειτουργούν ανθόρυβα και χωρίς εκπομπές.

1.2.1.6. Αιολικά συστήματα

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν τον άνεμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μια τουρμπίνα με πτερωτές τοποθετείται στην κορυφή ενός ψηλού πύργου. Ο πύργος είναι ψηλός ούτως ώστε να εκμεταλλευόμαστε τη μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου, απαλλαγμένη από τις αναταράξεις που προέρχονται από τη μεσολάβηση εμποδίων όπως δέντρα, λόφοι και κτίρια. Όπως περιστρέφεται η τουρμπίνα με τον άνεμο, μια γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να ποικίλλει σε μέγεθος από λίγα kW σε οικιακές εφαρμογές έως πάνω από 5 MW.

1.2.2. Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

Η ενέργεια που παράγεται από τις διατάξεις των ΑΠΕ, όπως είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι ανεμογεννήτριες, κυμαίνεται σημαντικά σε ημερήσια, ωριαία και εποχιακή βάση λόγω της μεταβολής στη διαθεσιμότητα του ήλιου, του ανέμου και των άλλων ανανεώσιμων πηγών. Κατά συνέπεια, οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας έχουν

το μειονέκτημα της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής (προσφοράς), η οποία δεν επιδέχεται ανθρώπινο έλεγχο, με την κατανάλωση (ζήτηση) ενέργειας. Η αναντιστοιχία αυτή σημαίνει ότι η ενέργεια μερικές φορές δεν είναι διαθέσιμη όταν απαιτείται, ενώ σε άλλες περιπτώσεις υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας. Δημιουργείται, επομένως, η ανάγκη τη ενσωμάτωσης της ενεργειακής αποθήκευσης στα συστήματα παραγωγής των ΑΠΕ, είτε στις αυτόνομες είτε στις διασυνδεδεμένες στο δίκτυο εγκαταστάσεις.

Γενική πεποίθηση των μελετητών για την αξία των αποθηκευτικών διατάξεων είναι ότι επειδή οι διατάξεις αυτές μπορούν να διαδραματίσουν ταυτόχρονα περισσότερους από ένα ρόλους, η αποτίμησή τους συχνά δεν αποτυπώνει επαρκώς τον πολλαπλό ρόλο που μπορούν να διαδραματίσουν. Για παράδειγμα μία αποθηκευτική διάταξη μπορεί να συνεισφέρει στη στρεφόμενη εφεδρεία του συστήματος αλλά ταυτόχρονα να προσφέρει υπηρεσίες βελτίωσης του επιπέδου της τάσης. Έτσι συχνά οι μελέτες και οι κώδικες που προτείνουν οι ρυθμιστικές αρχές ενέργειας δεν αναγνωρίζουν τον πολλαπλό ρόλο που μπορεί μία αποθηκευτική διάταξη να διαδραματίσει.

Οι διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης είναι προφανώς διαφορετικών τύπων, αφού απαντούν σε συγκεκριμένα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, τα οποία ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τις εφαρμογές και τις ανάγκες. Επομένως, μια συγκριτική μελέτη των τεχνολογιών αυτών καθίσταται δύσκολη, δεδομένου ότι, μεταξύ των άλλων, τα επίπεδα ανάπτυξής τους διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό. Ωστόσο, οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την κλίμακα αποθήκευσης και την εφαρμογή τους

- Διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε κατανεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής (όταν δηλαδή η παραγωγή λαμβάνει χώρα κοντά ή στην ίδια τη θέση της ζήτησης) και έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται στα αιτήματα για μικρά χρονικά διαστήματα.
- Διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες είναι κυρίως μεγάλες, κεντρικές εγκαταστάσεις και έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Τα διάφορα μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζουν τη λειτουργία τους σε μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική, μαγνητική ή δυναμική ενέργεια και στη συνέχεια την εκ νέου μετατροπή της ενέργειας αυτής σε ηλεκτρική. Ο πίνακας 1.1 παρουσιάζει τις διάφορες μορφές ενέργειας στις οποίες μπορεί να μετατραπεί η ηλεκτρική ενέργεια προκειμένου να αποθηκευτεί καθώς και χαρακτηριστικά παραδείγματα διατάξεων για κάθε μορφή μετατροπής.

1.2.2.1. Στρεφόμενες μάζες-Σφόνδυλοι

Οι στρεφόμενες μάζες ή σφόνδυλοι (flywheels), αναμένεται να έχουν εφαρμογές παροχής ισχύος και ενέργειας για μικρά χρονικά διαστήματα και κυρίως για την παροχή εφεδρείας και όχι τόσο για την παροχή ενέργειας. Η ενέργεια που αποθηκεύεται με την περιστροφή μίας στρεφόμενης μάζας σε υψηλή ταχύτητα μπορεί να μετατραπεί ξανά σε

Μορφή μετατροπής	Αντιπροσωπευτική διάταξη
Ηλεκτρική	Πυκνωτές και υπέρ-πυκνωτές
Υπεραγώγιμα Υλικά	Magnetic Energy Storage (SMES)
Χρήση μηχανικής ενέργειας	Αντλησιοταμίευση, Συμπιεσμένος Αέρας, Σφόνδυλοι
Χημικές μέθοδοι	Μπαταρίες, μπαταρίες ροής

Πίνακας 1.1.: Μορφή μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας για τις διάφορες ομάδες αποθηκευτικών διατάξεων.

ηλεκτρική ισχύ, με τη σύνδεση της μάζας σε μια γεννήτρια. Το ποσό ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί στη στρεφόμενη μάζα είναι ανάλογο της μάζας του τροφέα και ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας του τροφέα. Τα τελευταία χρόνια στο σχεδιασμό των στρεφόμενων μαζών η έμφαση έχει μετατοπιστεί από το σχεδιασμό της γεωμετρίας της μάζας στην προσπάθεια να επιτευχθούν υψηλές περιστροφικές ταχύτητες (40000 – 60000 *rpm* είναι το state of the art). Ο χρόνος εκφόρτισης αυτών των διατάξεων κυμαίνεται από λίγα *sec* μέχρι 15 – 30 *min*. Τα συστήματα στρεφόμενων μαζών δεν είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει ως και 80-90% χωρίς ιδιαίτερη πτώση της απόδοσής τους με το χρόνο ζωής τους ο οποίος φτάνει τα 15 – 20 χρόνια.

1.2.2.2. Σύστημα συμπίεσης αέρα (CAES)

Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ότι αέρας μπορεί να συμπιεστεί στα 800 ως 1600 *psi* σε ειδικές γεωλογικές δομές και να αποσυμπιεστεί ώστε, κινώντας αεριοστρόβιλο, να παράγει ηλεκτρισμό. Συμπίεση του αέρα μπορεί να γίνει π.χ κατά τη διάρκεια κοιλάδων φορτίου και αποσυμπίεση κατά τη διάρκεια των αιχμών του φορτίου. Λόγω της ειδικής γεωλογικής δομής που απαιτείται υπόστρωμα ορυκτού άλατος, μόνο δύο τέτοιες εγκαταστάσεις υπάρχουν παγκοσμίως, η μία στις ΗΠΑ και η άλλη στη Γερμανία στο Huntorf.

1.2.2.3. Αντλησιοταμίευση (PHS)

Η αποθήκευση με άντληση υδάτων αποτελεί την παλιότερη από τις τεχνολογίες αποθήκευσης κεντρικού σταθμού, ξεκίνησε να εφαρμόζεται το 1929 και ουσιαστικά μέχρι το 1970 ήταν η μόνη εμπορικά διαθέσιμη επιλογή για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Σήμερα η αντλησιοταμίευση αποτελεί την πιο ελκυστική μέθοδο αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας (100 *MW* – 5000 *MW*) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με αιολικά πάρκα τόσο ως διεσπαρμένη παραγωγή, όσο και σε αυτόνομα συστήματα. Η πιο γενική συγκρότηση ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης (pumped hydro storage system) περιλαμβάνει δύο ταμιευτήρες νερού που έχουν υψομετρική διαφορά της τάξης των εκατοντάδων μέτρων, έναν αριθμό υδροστρόβιλων με τις αντίστοιχες ηλεκτρικές γεννήτριες, έναν αριθμό αντλιών με τους αντίστοιχους ηλεκτρικούς κινητήρες, καθώς και ένα σύστημα ελέγχου.

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος έχει ως εξής: η περίσσεια ενέργειας που εμφανίζεται κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου και υψηλής παραγωγής ΑΠΕ αξιοποιείται για την άντληση νερού στον άνω ταμιευτήρα και άρα 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.

1.2.2.4. Πυκνωτές – Υπερπυκνωτές

Ο πιο άμεσος τρόπος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι στο ηλεκτρικό πεδίο ενός πυκνωτή. Οι πυκνωτές μπορούν να φοριστούν 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 μίας ώρας. Ωστόσο, το κυριότερο πρόβλημα των πυκνωτών είναι η μικρή τιμή πυκνότητας ενέργειας, με συνέπεια μεγάλες χωρητικότητες να απαιτούν εξαιρετικά μεγάλη επιφάνεια διηλεκτρικού υλικού, κατάσταση που είναι εντελώς μη οικονομική. Η πρόσφατη πρόοδος των ηλεκτροχημικών πυκνωτών ή υπερπυκνωτών (supercapacitors) έχει οδηγήσει σε πολύ μεγαλύτερες τιμές πυκνότητας ενέργειας και χωρητικότητας σε σχέση με τους συμβατικούς πυκνωτές. Οι υπερπυκνωτές, αντί για στερεό διηλεκτρικό, χρησιμοποιούν ως διαχωριστικό μεταξύ των οπλισμών ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη. Μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας, αποτελεί η μικρή διάρκεια εκφόρτισης, καθώς και οι υψηλές απώλειες ενέργειας λόγω αυτοεκφόρτισης.

1.3. Επικουρικές υπηρεσίες

Για την ευσταθή και αξιόπιστη λειτουργία του Συστήματος Ενέργειας απαιτούνται βοηθητικές υπηρεσίες, οι οποίες παρέχονται από ορισμένες μονάδες παραγωγής. Οι συγκεκριμένες μονάδες συνάπτουν συμβόλαια με το Διαχειριστή για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών. Οι τιμές των συγκεκριμένων υπηρεσιών καθορίζονται είτε από τη ρυθμιστική αρχή ενέργειας (ΡΑΕ), είτε προκύπτουν με μειοδοτικό διαγωνισμό μεταξύ των παραγωγών. Στη περίπτωση που ο Διαχειριστής δώσει εντολή κατανομής σε μια μονάδα, η οποία δεν έχει ενταχθεί αρχικά στο πλαίσιο της οικονομικής κατανομής φορτίου, έτσι ώστε να διασφαλισθεί η σωστή λειτουργία του Συστήματος, η συγκεκριμένη μονάδα θα αποζημιωθεί για αυτήν της την προσφορά σε επικουρικές υπηρεσίες. Οι επικουρικές Υπηρεσίες διακρίνονται σε:

- Επικουρικές υπηρεσίες ρύθμισης συχνότητας και ενεργού ισχύος
- Στατή εφεδρεία
- Ρύθμιση τάσης

- Επανεκκίνηση του συστήματος

1.3.1. Στατή εφεδρεία

Με τον όρο στατή εφεδρεία νοούμε τη μέγιστη ποσότητα ενεργού ισχύος που μπορεί να δώσει μια μη συγχρονισμένη γεννήτρια, όταν συνδεθεί στο σύστημα (εντολή συγχρονισμού της γεννήτριας), εντός του χρονικού διαστήματος από 20 λεπτά έως 4 ώρες.

1.3.2. Ρύθμιση τάσης

Η συγκεκριμένη επιχειρησιακή υπηρεσία έχει στόχο τη διατήρηση της τάσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μέσα σε αποδεκτά όρια τα οποία ορίζει ο Κώδικας Διαχείρισης του Συστήματος.

1.3.3. Επανεκκίνηση του συστήματος

Η επιχειρησιακή υπηρεσία της επανεκκίνησης του συστήματος τίθεται σε ενεργοποίηση μετά από γενική ή μερική διακοπή λειτουργίας του συστήματος. Παρέχεται από προκαθορισμένες μονάδες, που δεν απαιτούν τροφοδότηση από εξωτερική πηγή για να επανεκκινήσουν και εγχέουν ενέργεια στο σύστημα εντός μιας ώρας από τη στιγμή που συνέβη το σφάλμα.

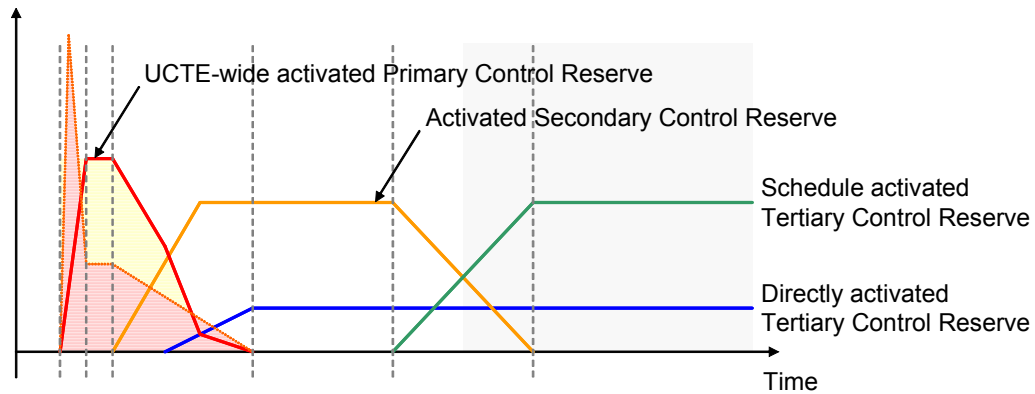
1.3.4. Ρύθμιση της συχνότητας

Η ρύθμιση της συχνότητας διακρίνεται σε τρία στάδια:

- Πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας
- Δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας
- Τριτεύουσα ρύθμιση συχνότητας

Οι επιχειρησιακές υπηρεσίες ρύθμισης συχνότητας και ενεργού ισχύος, ορίζονται από τους κανονισμούς του ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) οι οποίοι μας παρέχουν πλήρη περιγραφή της διατήρησης του επιπέδου της συχνότητας του δικτύου μέσω εφεδρειών, έτσι ώστε να διατηρείται ομαλή η λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και να παρέχεται στο καταναλωτή αδιάλειπτα ηλεκτρική ενέργεια καλής ποιότητας [3].

Ένα τυπικό διάγραμμα που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ρύθμισης συχνότητας σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος στο Δίκτυο είναι το εξής:



Σχήμα 1.2.: Τυπικό διάγραμμα των τριών επιπέδων ρύθμισης της συχνότητας σε περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο, σύμφωνα με το ENTSO-E [3].

1.3.5. Πρωτεύουσα ρύθμιση και εφεδρεία

Πρωτεύουσα Ρύθμιση Συστήματος ορίζεται η συλλογική αυτόματη διορθωτική αντίδραση των Μονάδων Παραγωγής και των Φορτίων στις αποκλίσεις της πραγματικής συχνότητας του συστήματος από τη συχνότητα αναφοράς, με την οποία επιδιώκεται να εξισορροπηθεί η συνολική παραγωγή με τη συνολική απορρόφηση ενέργειας και η σταθεροποίηση της συχνότητας εντός τριάντα 30 δευτερολέπτων από την εκδήλωση της διαταραχής συχνότητας. Ειδικότερα, η αυτόματη διορθωτική αντίδραση μπορεί να είναι το αποτέλεσμα είτε της μεταβολής του φορτίου των κινητήρων λόγω της μεταβολής της συχνότητας (το φορτίο αντιδρά στις μεταβολές της συχνότητας αυτορρυθμιζόμενο), είτε της αυτόματης ρύθμισης της Ενεργού Ισχύος εξόδου των Μονάδων ανάλογα με το στατισμό του ρυθμιστή φορτίου. Στατισμός μίας Μονάδας Παραγωγής ονομάζεται το φυσικό εκείνο μέγεθος το οποίο εκφράζει την % μείωση της συχνότητας για 100% αύξηση του φορτίου της Μονάδας. Επίσης η αυτόματη διορθωτική αντίδραση μπορεί να είναι το αποτέλεσμα άλλων λειτουργιών, όπως η μεγιστοποίηση της παραγωγής των θερμικών στροβίλων, η ανάληψη φορτίου από Μονάδες σε λειτουργία σύγχρονου πυκνωτή ή η αντίδραση των Αντλητικών Μονάδων που ενεργοποιούνται εξαιτίας της μεταβολής της συχνότητας. Οι ανωτέρω ρυθμίσεις είναι πιθανό να μην επαναφέρουν τη συχνότητα στο επίπεδο της συχνότητας αναφοράς καθώς μετά το πέρας της διορθωτικής διαδικασίας εισέρχεται στο σύστημα ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας [3].

Η Εφεδρεία Πρωτεύουσας Ρύθμισης είναι η μεταβολή της παραγόμενης Ενεργού Ισχύος Μονάδας ως αυτόματη αντίδραση του ρυθμιστή στροφών της, έτσι ώστε να λάβει χώρα η Πρωτεύουσα Ρύθμιση Συστήματος, για μια απόκλιση συχνότητας από τη συχνότητα αναφοράς ίση με $\pm 200 \text{ mHz}$. Η μεταβολή της Ενεργού Ισχύος Μονάδας πρέπει να λαμβάνει χώρα εντός τριάντα 30 δευτερολέπτων από την εκδήλωση της διαταραχής της συχνότητας και το επίπεδο παραγωγής Ενεργού Ισχύος Μονάδας πρέπει να διατηρείται, ανάλογα με την τιμή της απόκλισης της συχνότητας, τουλάχιστον για δεκαπέντε 15 λεπτά. Ως Πρωτεύουσα Εφεδρεία Συστήματος ορίζεται η συλλογική συνεισφορά των Μονάδων του Συστήματος σε Εφεδρεία Πρωτεύουσας Ρύθμισης, ώστε, συνεπι-

κουρούμενη από τα Φορτία που συμμετέχουν στην Επιχειρησιακή Υπηρεσία, να λαμβάνει χώρα η Πρωτεύουσα Ρύθμιση Συστήματος.

Το ελάχιστο επίπεδο παροχής Πρωτεύουσας Εφεδρείας για κάθε περιοχή ελέγχου του διασυνδεδεμένου συστήματος της ENTSO-E υπολογίζεται με βάση την καθαρή ετήσια παραγωγή του και την θέσπιση του κανόνα της μη μεταβολής της συχνότητας της ENTSO-E περισσότερο από $\pm 200 \text{ mHz}$ σε περιπτώσεις συμβάντων 3000 MW (αώλεια παραγωγής ή φορτίου) [3].

2. Ευστάθεια του δικτύου

Μία προϋπόθεση για τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος είναι να διατηρείται το ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτείται και καταναλώνεται κάθε στιγμή, συμπεριλαμβάνοντας τις απώλειες του δικτύου. Ένα σωστά σχεδιασμένο και λειτουργικό σύστημα πρέπει να είναι ικανό να συντηρεί αυτές τις μεταβολές τόσο κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας (*μόνιμη κατάσταση*) όσο και μετά από διαταραχές.

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι πάντα δυναμικό. Ακόμα και κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος συνεχώς μεταβάλλεται. Καθώς ένα σύστημα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτει μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, συχνά υπόκειται σε διαταραχές. Για να μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο, είναι πρωτεύον, το σύστημα να έχει την ικανότητα να επιστρέφει σε ευσταθή κατάσταση λειτουργίας. Αυτή η ικανότητα ενός ηλεκτρικού συστήματος ενέργειας να λειτουργεί σε κατάσταση ισορροπίας κάτω από κανονικές συνθήκες και να μπορεί να αναχτά ένα νέο σημείο ισορροπίας αφού υποστεί κάποια διαταραχή, ορίζεται ως *ευστάθεια* του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [17].

2.1. Ταξινόμηση

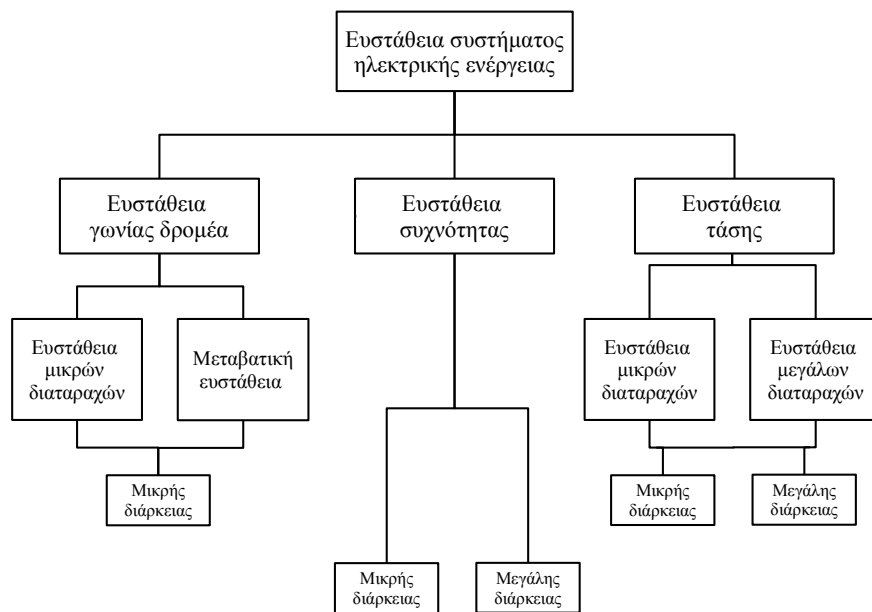
Όλα τα μετρήσιμα φυσικά μεγέθη, όπως το πλάτος και η φάση της τάσης σε κάθε ζυγό και η ροή ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε γραμμή, περιγράφουν την κατάσταση λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος. Αν διατηρούνται σταθερές στο χρόνο, το σύστημα λέμε ότι βρίσκεται σε *μόνιμη κατάσταση*. Όταν αυτή η *μόνιμη κατάσταση* υπόκειται σε μια ξαφνική μεταβολή ή σε μια ακολουθία μεταβολών, το σύστημα διαταράσσεται σε σχέση με τη *μόνιμη κατάσταση* [5].

Ανάλογα με την προέλευση και το μέγεθος, διακρίνουμε τις διαταραχές σε *μικρές και μεγάλες*. Για τις *μικρές διαταραχές*, η μεταβολή από τη *μόνιμη κατάσταση* μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας γραμμικοποιημένα δυναμικά συστήματα και αλγεβρικές εξισώσεις. Μικρές μεταβολές στο φορτίο και στις γεννήτριες αποτελούν παραδείγματα τέτοιων διαταραχών. Διαταραχές όπως βραχυκυκλώματα στις γραμμές μεταφοράς, απώλεια μιας γεννήτριας, μεγάλες μεταβολές του φορτίου, αποτελούν παραδείγματα μεγάλων διαταραχών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι γραμμικές και αλγεβρικές εξισώσεις δεν είναι πλέον έγκυρες.

Ένα σύστημα λέμε ότι βρίσκεται σε *μόνιμη κατάσταση* λειτουργίας, εάν είναι ικανό να επιστρέφει ουσιαστικά στο ίδιο σημείο λειτουργίας αφού υποστεί μια μικρή διαταραχή.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, κυρίως υπό την επίδραση μεγάλων διαταραχών, ένα σύστημα μεταβαίνει σε μια νέα ισορροπία διαφορετική από την αρχική. Αυτού του τύπου η ευστάθεια ονομάζεται *μεταβατική*.

Μπορούμε να διακρίνουμε τρεις τύπους αστάθειας ανάλογα με το ποια παράμετρος λειτουργίας επηρεάζεται περισσότερο από την διαταραχή: *συχνότητα*, *τάση* και *γωνία δρομέα*. Επιπλέον, η ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να ταξινομηθεί περαιτέρω ανάλογα με τη χρονική διάρκεια της απόκρισης του συστήματος, σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1.: Ταξινόμηση της ευστάθειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας [17].

2.1.1. Ευστάθεια γωνίας δρομέα

Η ευστάθεια γωνίας δρομέα (rotor angle stability) αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών, ενός διασυνδεδεμένου συστήματος, να παραμένουν σε συγχρονισμό τόσο κάτω από συνθήκες κανονικής λειτουργίας όσο και μετά από μια διαταραχή. Αυτό εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να συντηρήσει ή να αποκαταστήσει την ισορροπία μεταξύ ηλεκτρομαγνητικής και μηχανικής ροπής της κάθε σύγχρονης μηχανής. Η αστάθεια που προκύπτει εκδηλώνεται στη μορφή των αυξανόμενων ταλαντώσεων της γωνίας του δρομέα, που οδηγούν σε απώλεια του συγχρονισμού [17].

Όταν η διαταραχή είναι σχετικά μικρή, η ευστάθεια (που τότε ονομάζεται ευστάθεια μικρών διαταραχών) του συστήματος μπορεί να αναλυθεί χρησιμοποιώντας ένα σετ γραμ-

μικροποιημένων εξισώσεων κατάστασης. Στην περίπτωση της μεταβατικής ευστάθειας ωστόσο, η προκύπτουσα απόκριση του συστήματος συνεπάγεται μεγάλες διακυμάνσεις στη γωνία του δρομέα, και περιγράφεται από μη-γραμμικές σχέσεις γωνίας-ισχύος.

2.1.2. Ευστάθεια συχνότητας

Η ευστάθεια συχνότητας (frequency stability) είναι η ικανότητα του συστήματος ισχύος να συντηρεί τη συχνότητα σε ένα εύρος γύρω από την ονομαστική της τιμή, ακολουθώντας μια σοβαρή διαταραχή του συστήματος η οποία μπορεί να οδηγήσει σε έλλειψη ισορροπίας το ισοζύγιο μεταξύ παραγωγής και φορτίου [17]. Η αστάθεια που μπορεί να προκύψει εμφανίζεται με τη μορφή επαναλαμβανόμενων ταλαντώσεων της συχνότητας. Η διατάραξη της ισορροπίας μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια γεννητριών, υπερφόρτιση των γραμμών μεταφοράς και πιο συχνά στην υποδιαίρεσή του σε μικρότερα υποσυστήματα. Η ευστάθεια συχνότητας μπορεί να σχετίζεται με κάθε διαταραχή του συστήματος και γι' αυτό δεν ταξινομείται σε ευστάθεια μικρών και μεγάλων διαταραχών. Σε αντίθεση με την ευστάθεια γωνίας δρομέα, η ευστάθεια συχνότητας καθορίζεται από τη συνολική απόκριση του συστήματος (ή σε κάθε υποσύστημα, σε περίπτωση που έχει διαιρεθεί σε ανεξάρτητα υποσυστήματα).

2.1.3. Ευστάθεια τάσης

Η ευστάθεια της τάσης αναφέρεται στην ικανότητα του ηλεκτρικού συστήματος να διατηρεί σταθερές όλες τις τάσεις στις γραμμές μεταφοράς του συστήματος κάτω από κανονικές συνθήκες και αφού έχει υποστεί μια διαταραχή από ένα αρχικό σημείο λειτουργίας [17]. Η αστάθεια εμφανίζεται με τη μορφή μιας σταδιακής πτώσης ή αύξησης των τάσεων σε κάποιες γραμμές. Ο κύριος παράγοντας που ευθύνεται για την αστάθεια, είναι η αδυναμία του συστήματος να ανταποκριθεί στη ζήτηση άεργου ισχύος. Η καρδιά του προβλήματος είναι συνήθως η πτώση της τάσης, που συμβαίνει όταν ενεργός ισχύς και άεργος ισχύς ρέουν μέσα από επαγωγικές αντιστάσεις που σχετίζονται με το δίκτυο μεταφοράς.

2.2. Δυναμική των σύγχρονων μηχανών

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στις σύγχρονες μηχανές για την παραγωγή ενέργειας, η διατήρηση του συγχρονισμού μεταξύ των γεννητριών αποτελεί προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

2.2.1. Εξίσωση ταλάντωσης

Η εξίσωση που διέπει την κίνηση του δρομέα μιας σύγχρονης μηχανής είναι βασισμένη στη στοιχειώδη αρχή της μηχανικής η οποία αναφέρει ότι η ροπή επιταχύνσεως T_a είναι

το γινόμενο της συνολικής ροπής αδράνειας του δρομέα J και της γωνίας επιταχύνσεως:

$$J \frac{d\theta_m^2}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.1)$$

όπου

θ_m η γωνία μετατόπισης του δρομέα σε σχέση με το σταθερό πλαίσιο αναφοράς.
 T_m, T_e είναι η μηχανική ροπή της κινητήριας δύναμης και η ηλεκτρομαγνητική ροπή, αντίστοιχα.

Η μηχανή λέμε ότι λειτουργεί σε σύγχρονη ταχύτητα (ή σε συγχρονισμό) όταν $T_a = 0$ ή ομοίως $T_m = T_e$.

Για δεδομένη ταχύτητα του σύγχρονου περιστρεφόμενου πλαισίου αναφοράς ω_{sm} , η γωνία μετατόπισης του δρομέα μπορεί να ξαναγραφεί ως:

$$\theta_m = \omega_{sm} \cdot t + \delta_m \quad (2.2)$$

όπου

δ_m είναι η γωνιακή μετατόπιση του δρομέα από το περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς.

Εισάγοντας την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα από το περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς $\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$ και παραγωγίζοντας δύο φορές ως προς χρόνο την (2.2), αντικαθιστώντας στην (2.1) και υπενθυμίζοντας ότι ροπή T επί γωνιακή ταχύτητα ω μας δίνει ισχύ, προκύπτει ότι:

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.3)$$

όπου

$M = J \cdot \omega_m$ είναι η σταθερά αδράνειας της μηχανής

P_a είναι η ισχύς επιταχύνσεως και

P_m, P_e είναι η μηχανική και ηλεκτρική ισχύς, αντίστοιχα.

Η εξίσωση (2.3) μπορεί να κανονικοποιηθεί περαιτέρω ορίζοντας ως συντελεστή αδράνειας H την κινητική ενέργεια στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής προς την φαινόμενη ισχύ της γεννήτριας S_{mach}

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_{sm}^2}{S_{mach}} \quad (2.4)$$

δίνοντας

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.5)$$

Επιπλέον, παρατηρώντας ότι τόσο το δ_m όσο και το ω_{sim} εκφράζονται ως μηχανική ταχύτητα, υπό την προϋπόθεση ότι τα δύο μεγέθη ω_s (η σύγχρονη ταχύτητα του δρομέα) και δ (η γωνιακή μετατόπιση του δρομέα από το σύγχρονο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς) έχουν συνεπή μονάδες. Η (2.5) μπορεί να γραφεί ως:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.6)$$

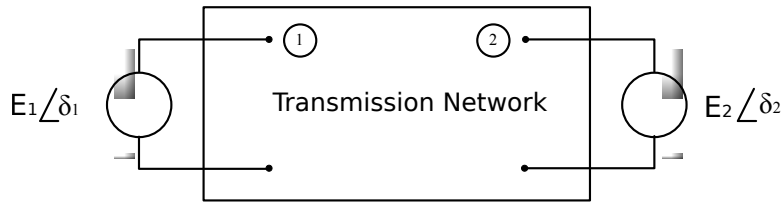
Η σχέση (2.6) ονομάζεται εξίσωση ταλάντωσης της μηχανής (swing equation). Αποτελεί την θεμελιώδη εξίσωση στην μελέτη ευστάθειας των συστημάτων και διέπει τη δυναμική κίνησης των σύγχρονων μηχανών [36].

2.2.2. Χαρακτηριστικά γωνίας-ισχύος

Κατά τη χρήση της εξίσωσης ταλάντωσης (2.6) οι H και ω_s είναι γνωστές παράμετροι της σύγχρονης μηχανής. Συνεπώς, η συμπεριφορά της γωνίας του δρομέα των σύγχρονων μηχανών δ υπαγορεύεται μόνο από τα P_m και P_e για μια δεδομένη μηχανή και φυσικά την ονομαστική συχνότητα του συστήματος. Λόγω των χαρακτηριστικών του κινητήρα και των συναφών ελεγκτών, η μηχανική ισχύς P_m μπορεί να θεωρηθεί σταθερή κατά τη διάρκεια μιας μεταβατικής διαταραχής. Η υπόθεση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι, ενώ το ηλεκτρικό δίκτυο αντιδρά σχεδόν στιγμιαία μετά από μία διαταραχή, η τουρμπίνα έχει κάποια καθυστέρηση πριν ο μηχανισμός ελέγχου της αντιδράσει. Επομένως, μόνον το P_e είναι απαραίτητο για την επίλυση της εξίσωσης ταλάντωσης. Αυτό ισχύει για χρονικά πλαίσια μικρότερα από 10 sec [36].

Η μηχανή θα λειτουργεί πάντα στη μόνιμη κατάσταση σύγχρονης περιστροφής αν $P_e = P_m$. Αν για παράδειγμα το $P_e \neq P_m$, σε μια διαταραχή, ο δρομέας θα αποκλίνει από τη σύγχρονη ταχύτητα.

Η συμπεριφορά του P_e εξηγείται καλύτερα χρησιμοποιώντας ένα γενικό σύστημα δύο-μηχανών όπως φαίνεται στο σχήμα . Αυτό το σύστημα αποτελείται από μία σύγχρονη γεννήτρια (1), συνδεδεμένη με ένα μεγάλο εξωτερικό σύστημα (2), που μοντελοποιείται ως μία μηχανή με πολύ μεγάλη αδράνεια, το λεγόμενο άπειρο ζυγό. Σε αυτό το παράδειγμα, ένα απλό μοντέλο που αποτελείται από μια σταθερή τάση πίσω από μία μεταβατική αντίδραση χρησιμοποιείται, για να παραστήσει τις δύο μηχανές.



Σχήμα 2.2.: Σχηματικό διάγραμμα των δύο μηχανών, Οι αντιδράσεις των δύο μηχανών E_1 και E_2 συμπεριλαμβάνονται στο δίκτυο μεταφοράς.

Ο πίνακας αγωγιμοτήτων αναπαριστά το δίκτυο μεταφοράς μεταξύ του ζυγού 1 και 2, συμπεριλαμβανομένων των αντιδράσεων των δύο ισοδύναμων μηχανών.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} |Y_{11}| \angle \theta_{11} & |Y_{12}| \angle \theta_{12} \\ |Y_{21}| \angle \theta_{21} & |Y_{22}| \angle \theta_{22} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Η ηλεκτρική ισχύς εξόδου P_e της γεννήτριας (1) θα προσδιορίζεται από:

$$P_e = P_c + P_{max} \cdot \sin(\delta - \gamma) \quad (2.8)$$

όπου

$$P_e = E_1^2 R_e(Y_{11}), \quad P_{max} = E_1 E_2 |Y_{12}|$$

και

$$\delta = \delta_1 + \delta_2$$

όπου

δ_1, δ_2 είναι οι γωνίες του δρομέων από το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς.

Επιπλέον, $\gamma_1 = \theta_{12} - \pi/2$, με $\theta_{12} = \arg(Y_{12})$. Αν παραλείψουμε τις αντιστάσεις του δικτύου έτσι ώστε όλα τα στοιχεία της Y_{bus} να είναι αμιγώς φανταστικοί αριθμοί, τότε $P_c = 0$ και $\gamma = 0$, και η σχέση (2.8) γίνεται:

$$P_e = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \sin(\delta) \quad (2.9)$$

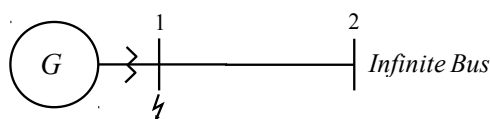
όπου

X_{12} η αντίδραση μεταξύ του E_1 και E_2 .

2.2.3. Κριτήριο ίσων εμβαδών

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2.6) και (2.9) της προηγούμενης παραγράφου, προκύπτει η μη γραμμική εξίσωση:

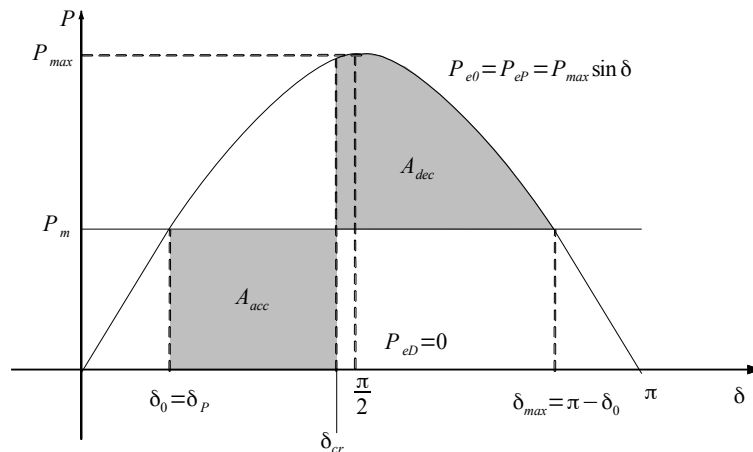
$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s P_m}{2H} - \frac{\omega_s E'_1 E'_2}{2HX_{12}} \quad (2.10)$$



Σχήμα 2.3.: Παράδειγμα ενός συστήματος μίας μηχανής συνδεδεμένης σε άπειρο ζυγό. Ένα σφάλμα παρουσιάζεται στον ζυγό-1.

Η λύση μιας τέτοιας εξίσωσης μπορεί να γίνει με αριθμητικές μεθόδους. Το σύστημα μίας μηχανής σε άπειρο ζυγό του σχήματος 2.3 χρησιμοποιείται πολύ συχνά για λόγους παρουσίασης. Σε αυτή την περίπτωση, η εξέταση της ευστάθειας του συστήματος μπορεί να γίνει άμεσα, χωρίς την επίλυση της εξίσωσης ταλάντωσης. Υποθέτουμε ότι μια προσωρινή τριφασική βλάβη παρουσιάζεται στο ζυγό-1 (σχήμα 2.3). Το σφάλμα μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα εκκαθαρίζεται απαλείφεται. Στο διάγραμμα της καμπύλης γωνίας-ισχύος του σχήματος 2.4, οι πιο κρίσιμες καταστάσεις παρουσιάζονται [36].

Η αρχική γωνία λειτουργίας (μόνιμη κατάσταση), πριν το σφάλμα πραγματοποιηθεί, είναι δ_0 και βρίσκεται στη συμβολή του οριζόντιου άξονα P_m με την καμπύλη P_{e0} . Για λόγους απλοποίησης, αγνοούμε την αντίσταση σφάλματος στο τριφασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη του ζυγού-1. Το σύστημα μετάδοσης παραμένει αμετάβλητο, μέχρι το σφάλμα να παρουσιαστεί. Το βραχυκύκλωμα πραγματοποιείται στον ζυγό-1, με αποτέλεσμα η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας P_{eD} να γίνει μηδέν μέχρι το σφάλμα να εκκαθαριστεί. Κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος η καμπύλη P_{eD} είναι ίση με το μηδέν, και η καμπύλη μετά το βραχυκύκλωμα P_{eP} θα ισούται με την αρχική (πριν το σφάλμα) καμπύλη P_{e0} . Το σημείο ευσταθούς ισορροπίας πριν το σφάλμα πραγματοποιηθεί, καθορίζεται από την τομή του P_m με την P_{eP} (ίση με την P_{e0}), και δίνει την γωνία λειτουργίας δ_P (ίση με την δ_0). Αντίστοιχα, το ασταθές σημείο ισορροπίας θα ισούται με $\delta_{max} = \pi - \delta_0$. Εάν η γωνία δ προσεγγίσει τιμές μεγαλύτερες από το ασταθές σημείο ισορροπίας, δεν θα υπάρχει επαρκής ενέργεια επιβράδυνσης για να επαναφέρει το σύστημα, και συνεπώς οδηγείται σε αστάθεια.



Σχήμα 2.4.: Καμπύλη $P - \delta$ και μεταβολές της δ .

Το κριτήριο ίσων εμβαδών αναγνωρίζει απλώς το γεγονός ότι ένα σύστημα που υπόκειται σε σφάλμα εξακολουθεί να είναι σε θέση να ανακτήσει τη σταθερότητά του όσο το γραμμοσκιασμένο εμβαδόν A_{acc} είναι μικρότερο του εμβαδού A_{dec} . Η οριακή περίπτωση αντιστοιχεί σε

$$A_{dec} = A_{acc} \quad (2.11)$$

Λαμβάνοντας υπόψη το βραχυκύκλωμα και την καμπύλη γωνίας-ισχύος (Εικόνα 3,4), η περιοχή επιτάχυνσης A_{acc} και η περιοχή επιβράδυνσης A_{dec} μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$A_{acc} = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_m d\delta, \quad A_{dec} = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta \quad (2.12)$$

Επιλύοντας τις εξισώσεις (2.12) σε συνδυασμό με την (2.11), βρίσκουμε την κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης

$$\delta_{cr} = \arccos((\pi - 2\delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0) \quad (2.13)$$

Ολοκληρώνουμε τώρα δύο φορές την εξίσωση ταλάντωσης (2.6), με την προϋπόθεση ότι το $P_a = P_m$ (P_e είναι μηδέν κατά τη διάρκεια της διαταραχής). Κατά την κρίσιμη στιγμή της εκκαθάρισης του σφάλματος, η αύξηση στην ταχύτητα του δρομέα και η γωνία μεταξύ της γεννήτριας και του άπειρου ζυγού γίνονται

$$\delta(t) |_{t=t_{cr}} = \frac{\omega_s P_m}{4H} t_{cr}^2 + \delta_0 \quad (2.14)$$

Η αντίστοιχη κρίσιμη στιγμή εκκαθάρισης, υπολογίζεται ως

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}} \quad (2.15)$$

2.3. Δείκτες ευστάθειας του συστήματος

Για να αξιολογηθεί η λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται να ορίσουμε δείκτες. Όπως έχει προκύψει από το κριτήριο ίσων εμβαδών, η κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης (ΚΓΕ) και ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης (ΚΧΕ), δείχνουν μια οριακή κατάσταση, όπου το σύστημα είναι σε θέση να ανακάμψει τη σταθερότητά του εφόσον η γωνία της σύγχρονης μηχανής είναι μικρότερη από την ΚΓΕ ή ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος είναι μικρότερο από το ΚΧΕ.

Από την άλλη πλευρά, όταν τόσο η ΚΓΕ και ο ΚΧΕ ξεπερνιέται, ο δρομέας των μηχανών επιταχύνεται, και η γωνία του δρομέα αυξάνει χωρίς όριο. Ως εκ τούτου, λαμβάνοντας υπόψη αυτή τη σαφή σχέση μεταξύ των ΚΓΕ/ΚΧΕ και της ευστάθειας του συστήματος, η ΚΓΕ και ΚΧΕ χρησιμοποιούνται συχνά ως δείκτες της σταθερότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν ένα σφάλμα εφαρμόζεται σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η διαφορά μεταξύ της πραγματικής γωνίας εκκαθάρισης και του πραγματικού χρόνου εκκαθάρισης σε σχέση με τις αντίστοιχες κρίσιμες τιμές (ΚΓΕ και ΚΧΕ) ορίζει το «περιθώριο ευστάθειας» του συστήματος.

Ωστόσο, όταν πρέπει να προσομοιώσουμε μεγάλα δίκτυα ή η πολυπλοκότητα των μοντέλων είναι μεγάλη, η κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης (ΚΓΕ) και ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης (ΚΧΕ) δεν γίνεται να υπολογιστούν χωρίς τη χρήση υπολογιστή. Πρακτικά ο υπολογισμός γίνεται με βήμα προς βήμα προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου. Για το λόγο αυτό πιο πρακτικοί δείκτες ευστάθειας έχουν προταθεί [8], όπως

- η μέγιστη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα και
- η διάρκεια ταλάντωσης του συστήματος

Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας ως δείκτες για την αποτίμηση της ευστάθειας του συστήματος, από την πλευρά της συχνότητας, χρησιμοποιούμε την *Μέγιστη Μεταβολή της Συχνότητας* και τον *Χρόνο Αποκατάστασης* των ταλαντώσεων του συστήματος

Η μέγιστη μεταβολή της συχνότητας, προτείνεται για την αξιολόγηση της ευστάθειας ενός συστήματος όπου η αδράνεια είναι περιορισμένη. Όσο πιο μεγάλες είναι οι μεταβολές της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή, όταν μια διαταραχή πραγματοποιείται, τόσο πιο ασταθές γίνεται το σύστημα. Έτσι, όταν δύο περιπτώσεις συγκρίνονται, και για την ίδια διαταραχή, η μεταβολή της συχνότητας σε μία από τις δύο είναι μεγαλύτερη, τότε θεωρούμε ότι το σύστημα έχει μικρότερα περιθώρια ευστάθειας.

Η διάρκεια ταλάντωσης ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από την έναρξης της διαταραχής μέχρι την στιγμή μετά την οποία η μεταβολή της συχνότητας παραμένει εντός ενός ελάχιστου εύρους ζώνης. Όταν η αδράνεια ενός συστήματος είναι μικρή, η ταλάντωση γύρω από την ονομαστική τιμή της συχνότητας θα συνεχίζεται. Ο δείκτης της διάρκειας ταλάντωσης συνεπάγεται ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια ταλάντωσης του συστήματος όταν μία διαταραχή εμφανίζεται, τόσο πιο ασταθές είναι το σύστημα.

3. Συσσωρευτές

Στον απλούστερο ορισμό της, η μπαταρία είναι μια συσκευή η οποία έχει την δυνατότητα να μετατρέπει χημική ενέργεια σε ηλεκτρική και το αντίστροφο. Η χημική ενέργεια αποθηκεύεται στα ηλεκτροχημικά στοιχεία από δύο ηλεκτρόδια στο εσωτερικό των μπαταριών. Ειδικότερα αυτή η μετατροπή της ενέργειας γίνεται μέσω ηλεκτροχημικής οξειδοαναγωγής (redox) ή ηλεκτροχημικής αντίδρασης σύνθεσης [23]. Ο όρος οξειδοαναγωγή περιγράφει όλες τις χημικές αντιδράσεις κατά τις οποίες τα άτομα των στοιχείων που συμμετέχουν αλλάζουν αριθμό οξείδωσης. Οι αντιδράσεις αυτές περιλαμβάνουν την ανταλλαγή των ηλεκτρονίων μεταξύ των ηλεκτροχημικών στοιχείων στα δύο ηλεκτρόδια μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος εξωτερικό με την μπαταρία. Η αντίδραση λαμβάνει χώρα στην αλληλεπίδραση μεταξύ ηλεκτροδίων και ηλεκτρολύτη. Όταν το ρεύμα ρέει μέσω της μπαταρίας, μία αντίδραση οξείδωσης θα λάβει χώρα στο ηλεκτρόδιο ανόδου και μια αντίδραση αναγωγής στην κάθοδο. Η αντίδραση οξείδωσης παράγει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα, ενώ η αντίδραση αναγωγής δεσμεύει τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα. Ο ηλεκτρολύτης λειτουργεί ως ενδιάμεσος μεταξύ των ηλεκτροδίων. Προσφέρει ένα μέσο για τη μεταφορά των ιόντων. Οι μπαταρίες λοιπόν, αποθηκεύουν ενέργεια σχηματίζοντας χημικούς δεσμούς, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των ορυκτών καυσίμων όπου η ενέργεια εμπεριέχεται στους χημικούς δεσμούς του υλικού. Σε αντίθεση με τη χημική αποθήκευση στα ορυκτά καύσιμα, η ηλεκτροχημική αποθήκευση μετατρέπει τη χημική ενέργεια των δεσμών απευθείας σε ηλεκτρική. Τα βασικά δομικά στοιχεία μίας μπαταρίας είναι τα ηλεκτροχημικά στοιχεία ή απλώς στοιχεία. Κάθε στοιχείο αποθηκεύει ενέργεια σε σχετικά χαμηλό δυναμικό, της τάξης των μερικών *Volts*, παρόλα αυτά οι περισσότερες πρακτικές εφαρμογές απαιτούν υψηλότερα δυναμικά. Έτσι κάθε μπαταρία αποτελείται από περισσότερα του ενός στοιχεία συνδεδεμένα σε διάφορους συνδυασμούς σειράς-παραλληλίας προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση και ισχύς λειτουργίας για κάθε ενεργειακή εφαρμογή [37].

Ανάλογα με την δυνατότητα επαναφόρτισης τους οι μπαταρίες μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

- σε εκείνες που δεν έχουν την δυνατότητα επαναφόρτισης, είτε γιατί ο τύπος της ηλεκτροχημείας τους δεν το επιτρέπει, είτε γιατί η επαναφόρτιση δεν μπορεί να γίνει με αξιόλογο βαθμό απόδοσης. Οι μπαταρίες αυτές κατασκευάζονται, εκφορτίζονται μία μόνο φορά και στην συνέχεια απορρίπτονται.
- σε μπαταρίες στις οποίες υπάρχει δυνατότητα επαναφόρτισης. Η ηλεκτροχημική αντίδραση σε αυτού του είδους τις μπαταρίες είναι αντιστρεπτή. Μετά την αποφόρτιση μπορούν να επαναφορτιστούν με χρήση συνεχούς ρεύματος από μια εξωτερική πηγή. Στην φάση φόρτισης μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια σε χημι-

κή ενώ στην φάση της εκφόρτισης συμβαίνει ακριβώς το αντίστροφο. Ωστόσο και στις δύο φάσεις, ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα που μεταφέρεται στο μέσον που περιβάλλει την μπαταρία. Ο συντελεστής απόδοσης για έναν κύκλο φόρτισης εκφόρτισης είναι μεταξύ 70 % και 80 %.

3.1. Τύποι συσσωρευτών

Ο τρόπος με τον οποίο μπορούμε να διακρίνουμε τους συσσωρευτές, εξαρτάται από τα δομικά χαρακτηριστικά των ίδιων των συσσωρευτών. Ανάλογα με το υλικό των ηλεκτροδίων και το είδος του ηλεκτρολύτη μπορούμε να διακρίνουμε μια μεγάλη γκάμα μπαταριών. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται οι μολύβδου - οξέος (Lead Acid), νικελίου - σιδήρου, νικελίου-καδμίου (*NiCd*), νικελίου - υδριδίου μετάλλου (*NiMH*), λιθίου - πολυμερούς (*LiPo*) και λιθίου - σιδήρου (*LiFePO4*), νατρίου - θείου (*NaS*) και νατρίου - μεταλλικού χλωριδίου.

3.1.0.1. Μπαταρίες ιόντων λιθίου

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου κατασκευάζονται με μία κάθοδο οξειδίου του λιθίου και μία άνοδο ένωσης άνθρακα, με ένα διαχωριστικό από πολυμερές και έναν μη υδατικό ηλεκτρολύτη ανάμεσα στους πόλους. Ανάμεσα στο υλικό των ηλεκτροδίων σχηματίζονται πάρα πολύ μικρά διαστήματα, όπου εισχωρούν τα ιόντα λιθίου. Η χημική τους σταθερότητα εγγυάται μεγαλύτερη ασφάλεια, καθώς και αυξημένο κύκλο ζωής. Λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου προτιμώνται για χρήση σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα, παρά την ελαφρώς χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα που εμφανίζουν σε σχέση με τις μεταλλικού λιθίου μπαταρίες.

3.1.0.2. Νικελίου-καδμίου

Αποτελούνται από θετικές πλάκες νικελίου υδροξυλίου (*NiO(OH)*) και αρνητικές από κάδμιο (*Cd*). Ο ηλεκτρολύτης τους είναι διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (*KOH*). Έχουν σημαντικές ικανότητες, όπως αντοχή σε βαθιές εκφορτίσεις, μεγάλη διάρκεια ζωής, αντοχή στην υπερφόρτιση και απαιτούν λίγη έως καθόλου συντήρηση. Ωστόσο το υψηλό κόστος τους τις κάνει απαγορευτικές για χρήση σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα.

3.1.0.3. Μολύβδου – οξέος

Πρόκειται για τον πλέον διαδεδομένο τύπο επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Οι μπαταρίες αυτές θεωρούνται οι πλέον διαδεδομένες λόγω της ωριμότητας της τεχνολογίας τους και της πολύ καλής σχέση απόδοσης τιμής που παρουσιάζουν, παρόλο που η

αποθηκεύσιμη ενέργεια ανά μονάδα μάζας είναι χαμηλότερη από αυτή των άλλων μπαταριών [21]. Κατά την εκφόρτιση καταναλώνεται μολύβδος και οξείδιο του μολύβδου και σχηματίζεται νερό και θειικός μολύβδος. Ο ηλεκτρολύτης τους είναι υδατικό διάλυμα θειικού οξέος. Εν γένει βρίσκουν εφαρμογή τόσο στην αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (τύπος βαθιάς εκφόρτισης) και στην αυτοκίνηση (μπαταρίες μικρής εκφόρτισης).

3.1.0.4. Μολύβδου-αντιμονίου

Η προσθήκη αντιμονίου στις πλάκες μολύβδου προσδίδει μεγάλη μηχανική αντοχή, πράγμα που επιτρέπει βαθιές εκφορτίσεις ενώ παράλληλα αυξάνει το χρόνο ζωής τους. Συνήθως οι συσσωρευτές μολύβδου – αντιμονίου έχουν μεγάλο πάχος πλακών πράγμα που επιτρέπει εκφορτίσεις έως και 80%. Είναι πολύ ανθεκτικοί και στην υπερφόρτιση και μπορούν να δώσουν πάνω από 1200 κύκλους φόρτισης εκφόρτισης με βάθος 80%. Επίσης δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από την άνοδο της θερμοκρασίας, καθώς έχουν μεγάλη τάση για ηλεκτρόλυση.

3.2. Βασικά μεγέθη μπαταριών

Παρακάτω περιγράφουμε συνοπτικά τα κυριότερα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τις λειτουργικές δυνατότητες των συσσωρευτών.

3.2.0.5. Χωρητικότητα

Η χωρητικότητα είναι ουσιαστικά το φορτίο το οποίο μπορεί να συκρατήσει και να αποδώσει η μπαταρία κατά την διάρκεια της εκφόρτισης της. Η χωρητικότητα κάθε στοιχείου, η οποία συμβολίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία με C , μετράται σε Ah (αμπερώρια). Μία μπαταρία έχει χωρητικότητα $C Ah$ αν μπορεί να αποδίδει ρεύμα C Amperes για μία ώρα ή ρεύμα C/n Amperes για n ώρες. Είναι προφανές ότι η χωρητικότητα ουσιαστικά εκφράζει το ηλεκτρικό φορτίο το οποίο έχει αποθηκευτεί. Στην πράξη η μπαταρία σταματά την λειτουργία της αρκετά πριν εκφορτιστεί πλήρως (όταν η τάση της πέσει κάτω από την τάση αποκοπής) οπότε δεν μπορεί να αποδώσει όλο το φορτίο το οποίο έχει αποθηκεύσει.

3.2.0.6. Ενέργεια

Είναι η ενέργεια την οποία αποδίδει η μπαταρία κατά την διάρκεια μίας πλήρους εκφόρτισης της. Καθορίζεται όπως γνωρίζουμε από την τάση εκφόρτισης και το φορτίο το οποίο έχει αποδώσει. Εξαρτάται βέβαια από όλους τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την τάση και το αποθηκευμένο φορτίο (χωρητικότητα). Η αποθηκευμένη ενέργεια στον συσσωρευτή μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την χωρητικότητά του σε Ah επί την ονομαστική τάση αυτού.

3.2.0.7. Ενεργειακή πυκνότητα όγκου (Wh/m^3)

Καθορίζει το συνολικό φορτίο που μπορεί να αποθηκεύσει μία μπαταρία ανά μονάδα του όγκου της. Ισχύει για συγκεκριμένη περίοδο φόρτισης/εκφόρτισης και καθορίζει το μέγεθος, όσο μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα τόσο μικρότερος ο όγκος της μπαταρίας.

3.2.0.8. Ρυθμός φόρτισης (ή εκφόρτισης)

Πρόκειται για το ρυθμό με τον οποίο λαμβάνεται ή εισάγεται ρεύμα στην μπαταρία, δηλαδή το ρεύμα το οποίο ρέει από αυτήν η προς αυτήν. Προφανώς ο ρυθμός θα μετράται σε Amp. Προκειμένου ωστόσο να μπορούμε να κάνουμε συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών μπαταριών ο ρυθμός φόρτισης της μπαταρίας μπορεί να δοθεί και ως κλάσμα της χωρητικότητάς της. Έτσι “ρυθμός φόρτισης (ή εκφόρτισης) C/n ” σημαίνει ότι στην μπαταρία μπαίνει (ή από την μπαταρία αποδίδεται) ρεύμα σε amperes αριθμητικά ίσο με το $1/n$ της χωρητικότητας σε Ah , με άλλα λόγια φορτίζεται με ρυθμό τέτοιο ώστε να φτάσει σε πλήρη φόρτιση (ή να αποφορτιστεί) σε n ώρες.

3.2.0.9. Κατάσταση φόρτισης

Ορίζεται ως το πηλίκο του αποθηκευμένου στην μπαταρία φορτίου σε Ah προς την ονομαστική χωρητικότητα,

$$SOC = \frac{\text{αποθηκευμένο στην μπαταρία φορτίο}}{\text{ονομαστική χωρητικότητα}}$$

3.2.0.10. Βάθος εκφόρτισης

Είναι το επί τοις εκατό ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία, προς την ονομαστική χωρητικότητα,

$$DOC = \frac{\text{φορτίο που έχει αποδώσει η μπαταρία}}{\text{ονομαστική χωρητικότητα}}$$

3.2.1. Παράγοντες Που επηρεάζουν την Χωρητικότητα

3.2.1.1. Θερμοκρασία

Όλη η συμπεριφορά ενός συσσωρευτή επηρεάζεται σημαντικά από τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Όσο πιο μικρή αυτή είναι τόσο μικρότερη είναι και η χωρητικότητα

κάτι που εξηγείται από ένα συνδυασμό παραγόντων όπως η αυξημένη αντίσταση και ο μειωμένος ρυθμός διάχυσης του ηλεκτρολύτη. Γενικά οι ονομαστικές χωρητικότητες αναφέρονται σε θερμοκρασία των 25°C , έτσι θα πρέπει να ληφθεί υπόψη μια μεγαλύτερη χωρητικότητα από την προβλεπόμενη για μέρη με αρκετά μικρότερες θερμοκρασίες, ενώ για μέρη με μεγαλύτερες θερμοκρασίες, το φαινόμενο δεν επιδρά σημαντικά στην αύξηση της χωρητικότητας.

Πολλοί ρυθμιστές φόρτισης συσσωρευτών έχουν ειδικό κύκλωμα που μετρά την θερμοκρασία του συσσωρευτή ώστε να ρυθμίζουν κατάλληλα τη στάθμη φόρτισης του. Η ρύθμιση αυτή αντιστοιχεί σε $0.005\text{ V}/^{\circ}\text{C}$, πέρα από το σημείο των 25°C . Όσο μειώνεται η θερμοκρασία προσθέτουμε αυτή την τάση στα όρια φόρτισης, ενώ όσο αυξάνεται τη μειώνουμε.

3.2.1.2. Ρυθμός εκφόρτισης

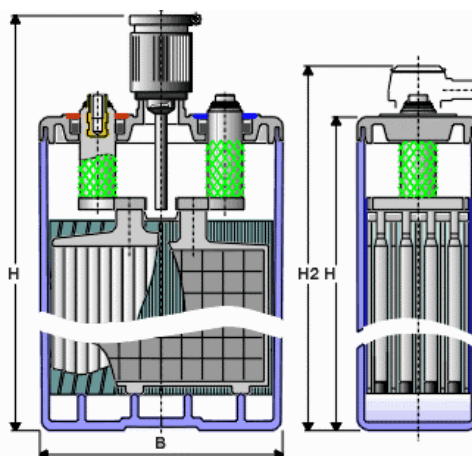
Η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή επηρεάζεται σε σχέση με το ρεύμα εκφόρτισης. Όταν ο συσσωρευτής εκφορτίζεται με ένα ρεύμα μικρής έντασης μπορεί υπό κανονικές συνθήκες να δώσει μέχρι και το 80% της αποθηκευμένης του ενέργειας. Το ποσοστό αυτό μειώνεται όσο το ρεύμα που η μπαταρία αποδίδει μεγαλώνει. Ο περιορισμός αυτός έχει να κάνει με τη δομή του συσσωρευτή. Μια μεγάλη εκφόρτιση αυτού, προκαλεί σημαντική μεταβολή στη μάζα των πλακών του, πράγμα που με τη σειρά του συντελεί στη διάβρωση των πλακών και στην επικάλυψη μέρους του υλικού που σχηματίζεται από την εκφόρτιση στο κάτω μέρος του δοχείου. Ουσιαστικά, ο συσσωρευτής χάνει μέρος του ενεργού υλικού του μολύβδου που υπάρχει στη σχάρα των πλακών του. Αποτέλεσμα είναι η μείωση τόσο της ζωής όσο και της χωρητικότητάς του, καθώς λιγότερο υλικό παραμένει για να συμβάλει στη χημική αντίδραση της φόρτισης

3.3. Οι συσσωρευτές του εργαστηρίου

Στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου ΣΗΕ είναι εν σειρά εγκατεστημένοι 30 συσσωρευτές Ergon OPzS των 2 V , και ονομαστικής χωρητικότητας $C_{10} = 250\text{ Ah}$ ή $C_{120} = 375\text{ Ah}$, δίνοντας συνολικά μια τάση εξόδου 60 V . Οι τιμές αυτές αναφέρουν την μέγιστη χωρητικότητα του κάθε στοιχείου των 2 V , όπως προκύπτει από την εξίσωση Peukert για χρόνο εκφόρτισης 10 και 120 ωρών αντίστοιχα. Στην πρώτη δηλαδή περίπτωση, εννοείται ότι το στοιχείο μπορεί να δίνει 25 A για 10 ώρες, ενώ στη δεύτερη, ότι το στοιχείο μπορεί να δίνει ρεύμα 3 A για 120 ώρες. Προφανές είναι ότι η χωρητικότητα των στοιχείων μειώνεται συναρτήσει του ρεύματος εξόδου. Έτσι, η συνολική ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν είναι $60 \cdot 250 = 15\text{ KWh}$ για ρεύματα εκφόρτισης 25 A , ή $60 \cdot 370 = 22,2\text{ KWh}$ για ρεύματα εκφόρτισης 3 A [2].

Είναι τεχνολογίας μολύβδου-αντιμονίου και περιέχουν σαν ηλεκτρολύτη διάλυμα θειικού οξέος. Από όσες κατηγορίες συσσωρευτών αναφέρθηκαν, είναι οι πιο κατάλληλες για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα, λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής τους και

της ικανότητάς τους να εκφορτίζονται βαθιά. Οι θετικές πλάκες αποτελούνται από συμπαγείς χοντρές σωληνες μολύβδου (tubular plates) πάνω σε πλαστικό υλικό ενώ οι αρνητικές, από σχέςρες μολύβδου.



Σχήμα 3.1.: Συσσωρευτές σωληνοειδών πλακών

Οι προδιαγραφές τους αναφέρουν διάρκεια ζωής 15 έτη, όταν χρησιμοποιούνται σαν εφεδρικοί (stand-by use), δηλαδή χωρίς να εκφορτίζονται/φορτίζονται διαρκώς.

Για κυκλική χρήση, οι προδιαγραφές τους αναφέρουν ότι μπορούν να πραγματοποιήσουν το λιγότερο 1200 κύκλους για ένα βαθμό εκφόρτισης έως και 80% με ρεύμα $C/10$, δηλαδή $250/10 = 25 A$, για την περίπτωση των συσσωρευτών του εργαστηρίου. Για βαθμούς εκφόρτισης μέχρι και 50% οι κύκλοι μπορούν να φτάσουν και τους 3000. Οι τιμές αυτές βάθους εκφόρτισης και ρεύματος είναι οι μέγιστες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό τον τύπο συσσωρευτών.

Τάση μέγιστης φόρτισης (Voltage regulation, VR)	2.40 – 2.44 V/cell
Τάση συντήρησης (float charge)	2.23 V/cell
Τάση βελτιστοποίησης φόρτισης (equalizing charge)	2.50 V/cell
Συνιστώμενη θερμοκρασία λειτουργίας	10 – 20 ⁰ C
Πυκνότητα ηλεκτρολύτη	1.25 gr/cm ³

3.3.1. Διαχείριση μπαταρίας

Ο αντιστροφέας των μπαταριών έχει ένα πολύ εξελιγμένο σύστημα διαχείρισης. Χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο βασισμένο στη γραμμική σχέση μεταξύ τάσης ανοιχτοκύκλωσης και βαθμού φόρτισης των συσσωρευτών (SOC%). Η σχέση αυτή που υπολογίζεται από τον αντιστροφέα για τους συσσωρευτές που ελέγχει, εξάγεται από τις μετρήσεις που παίρνει κατά τη διάρκεια λειτουργίας του, ενώ οι συσσωρευτές φορτίζονται και εκφορτίζονται. Αφού καθοριστεί από τον χειριστή η τάση ανοιχτοκύκλωσης των συσσωρευτών στην κατάσταση πλήρους φόρτισης, ο αντιστροφέας υπολογίζει συνεχώς

την χωρητικότητα των συσσωρευτών με βάση τη σχέση που έχει υπολογίσει προηγουμένως βάσει των μετρήσεων. Έτσι, αποφεύγεται η τεχνική της βαθιάς εκφόρτισης (τεστ χωρητικότητας) που συνήθως χρησιμοποιείται βάσει του ρεύματος που εξάγεται μέχρι η τάση να φτάσει στο ελάχιστο επιτρεπτό σημείο, εξαντλώντας τους συσσωρευτές [2].

Ο κατασκευαστής του Sunny Island καθορίζει τέσσερις διαδικασίες φόρτισης των μπαταριών. Τα επίπεδα φόρτισης και τάσης κάθε φορά καθορίζονται από τον τύπο της μπαταρίας και την θερμοκρασία λειτουργίας. Οι τέσσερις τρόποι φόρτισης είναι οι εξής:

- κανονική φόρτιση που πρέπει να γίνεται όσο πιο συχνό γίνεται.
- πλήρης φόρτιση που πρέπει να γίνεται τουλάχιστον μία φορά τον μήνα.
- Εξισωτική φόρτιση που πρέπει να γίνεται κάθε δύο ή τρεις μήνες.
- Υποστηρικτική φόρτιση που πρέπει να γίνεται μετά από κάθε διαδικασία φόρτισης.

4. Μοντέλα συσσωρευτών

Η λειτουργία διατάξεων για τη στήριξη του δικτύου συχνά περιορίζεται από τη χωρητικότητα των χρησιμοποιούμενων μπαταριών. Ο χρόνος φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητά και την χρονική διάρκεια που δύναται να χρησιμοποιηθούν οι διατάξεις. Η μοντελοποίηση των συσσωρευτών μπορεί να διευκολύνει την πρόβλεψη και επομένως μας βοηθάει να διευρύνουμε τους χρόνους λειτουργίας των μπαταριών. Πολλά διαφορετικά μοντέλα μπαταριών έχουν χρησιμοποιηθεί στη διάρκεια του χρόνου.

Ανάλογα με το σκοπό της προσομοίωσης που θέλουμε να διεξάγουμε, ενδείκνυται η χρήση μοντέλων προσομοίωσης με διαφορετικούς βαθμούς αφάιρεσης. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσής λαμβάνει υπόψη διαφορετικές και σε πολλές περιπτώσεις αντικρουόμενες μεταξύ τους παραμέτρους, όπως η υπολογιστική πολυπλοκότητα, η ακρίβεια της προσομοίωσης και η ευκολία παραμετροποίησης του μοντέλου.

Διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώνουν με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά των μπαταριών [12, 13, 16, 21], και ποικίλλουν από τα πολύ λεπτομερή ηλεκτροχημικά μοντέλα μέχρι τα υψηλού επιπέδου στοχαστικά μοντέλα. Παρακάτω θα προσπαθήσουμε να παρουσιάσουμε όσο πιο συνοπτικά και κατανοητά γίνεται, τα κυριότερα μοντέλα μπαταριών που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία.

4.1. Ηλεκτροχημικά Μοντέλα

Τα ηλεκτροχημικά μοντέλα είναι βασισμένα στις χημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα εντός των στοιχείων της μπαταρίας. Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν τις χημικές αυτές διαδικασίες με μεγάλη λεπτομέρεια και μπορούν να θεωρηθούν τα πιο ακριβή.

Οι Doyle, Fuller και Newman [11] ανέπτυξαν ένα ευρύτατα χρησιμοποιούμενο μοντέλο για μπαταρίες λιθίου και ιόντων λιθίου βασισμένο στις ηλεκτροχημικές ιδιότητες των μπαταριών αυτών. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από έξι συζευγμένες μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, η επίλυση των οποίων μας δίνει την τάση και το ρεύμα ως συνάρτηση του χρόνου. Περισσότερες από 50 παράμετροι, όπως π.χ. το πάχος των ηλεκτροδίων, η αρχική συγκέντρωση αλατιού στον ηλεκτρολύτη, η ταχύτητα αντίδρασης και η συνολική θερμοχωρητικότητα πρέπει να δοθούν στο μοντέλο. Η ρύθμιση όλων αυτών των παραμέτρων, προϋποθέτει λεπτομερή γνώση της μπαταρίας που θέλουμε να μοντελοποιήσουμε. Από την άλλη, η ακρίβεια του μοντέλου είναι εξαιρετικά υψηλή. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο συχνά χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν άλλα μοντέλα, αντί να χρησιμοποιηθούν πειραματικά δεδομένα.

Συνοψίζοντας, παρότι τα ηλεκτροχημικά μοντέλα είναι τα λεπτομερέστερα και τα πιο ακριβή από μία σειρά άλλων, μειονεκτήματα δεύτερης τάξης κάνουν την εφαρμογή τους ακατάλληλη σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, από την κίνηση έως τη διασυνδεδεμένη λειτουργία τους στο δίκτυο.

- Η λεπτομέρεια των μοντέλων αυτών, προϋποθέτει μοντέλα με πολλές παραμέτρους. Σε συνήθεις εφαρμογές, όπου χρησιμοποιούνταν εμπορικές μπαταρίες, οι παράμετροι αυτές είναι δύσκολο έως αδύνατο να προσδιοριστούν.
- Τα μοντέλα αυτά είναι εξαιρετικά εξειδικευμένα και δεν επιδέχονται γενίκευση. Ένα μοντέλο κατασκευασμένο για μπαταρίες λιθίου όπως αυτό των Doyle, Fuller και Newman δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλο τύπο μπαταρίας.
- Η υπολογιστική πολυπλοκότητα των μοντέλων αυτών είναι υψηλή, γεγονός που τα καθιστά απαγορευτικά για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

4.2. Ηλεκτρικά Μοντέλα Ισοδύναμου Κυκλώματος

Αυτά αναπαριστούν, συχνά με χρήση κατανεμημένων στοιχείων, τις πιο σημαντικές φυσικές και χημικές διεργασίες που καθορίζουν τη συμπεριφορά της μπαταρίας. Τα πρώτα μοντέλα που βασίστηκαν σε ηλεκτρικά κυκλώματα υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια προγραμμάτων προσομοίωσης Spice. Ο πυρήνας των μοντέλων για τους διάφορους τύπους μπαταριών είναι κοινός [13].

- Ένας πυκνωτής αναπαριστά τη χωρητικότητα της μπαταρίας.
- Ένας αντιστάτης αναπαριστά την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας.
- Ένα κύκλωμα προσομοιώνει την αποφόρτιση της χωρητικότητας της μπαταρίας.
- Ένας πίνακας αναφοράς συσχετίζει την τάση με την κατάσταση φόρτισης (SOC) των μπαταριών.

Τα ηλεκτρικά μοντέλα έχουν το πλεονέκτημα ότι χωρίς να μεταβληθεί η βασική τοπολογία τους, μπορούν εύκολα να παραμετροποιηθούν ώστε να προσομοιώσουν οποιαδήποτε τεχνολογία μπαταρίας. Παρόλα αυτά η υλοποίηση τους προϋποθέτει αρκετή προσπάθεια, ιδιαίτερα κατά την εξαγωγή του πίνακα αναφοράς. Πειραματικά δεδομένα σε όλο το εύρος λειτουργίας της μπαταρίας είναι απαραίτητα.

4.3. Αναλυτικά Μοντέλα

Τα αναλυτικά μοντέλα περιγράφουν την μπαταρία σε ένα πιο αφαιρετικό επίπεδο από ότι τα ηλεκτροχημικά και ηλεκτρικά μοντέλα κυκλωμάτων. Οι σημαντικότερες ιδιότητες της μπαταρίας μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας μόνο μερικές εξισώσεις. Αυτό, κάνει αυτό τον τύπο μοντέλου πολύ ευκολότερο στη χρήση από τα ηλεκτροχημικά και ηλεκτρικά μοντέλα κυκλωμάτων.

4.3.1. Νόμος του Peuker

Το απλούστερο μοντέλο για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής της μπαταρίας, το οποίο λαμβάνει υπόψη τις μη γραμμικές ιδιότητες της μπαταρίας, είναι ο νόμος του Peukert. Παίρνει τις μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ του χρόνου ζωής της μπαταρίας και το χρόνο αποφόρτισης, αλλά χωρίς να μοντελοποιεί το φαινόμενο ανάκτησης. Σύμφωνα με το νόμο του Peukert, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μπορεί να προσεγγιστεί με τον τύπο

$$T = \frac{C}{I^b} \quad (4.1)$$

όπου

I είναι το ρεύμα αποφόρτισης, και τα

C, b είναι σταθερές πειραματικά υπολογισμένες.

Ο συντελεστής C χαρακτηρίζει την χωρητικότητα, ενώ το b είναι σταθερά που έχει συγκεκριμένη τιμή για κάθε τύπο μπαταρίας. Στην πραγματικότητα το C έχει μία τιμή περίπου ίση με τη χωρητικότητα της μπαταρίας και το b παίρνει τιμές μεταξύ 1.2 και 1.7 [13] και ονομάζεται συντελεστής Peukert.

Για να υπολογίσουμε το συντελεστή Peukert απαιτείται να γνωρίζουμε τις τιμές χωρητικότητας C_1 και C_2 που αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικούς χρόνους εκφόρτισης T_1 και T_2 . Από εκεί προκύπτει ότι ο συντελεστής Peukert θα είναι:

$$b = \frac{\log T_2 - \log T_1}{\log I_1 - \log I_2}$$

Έχοντας προσδιορίσει την τιμή του b , προσδιορίζουμε και το μέγεθος της χωρητικότητας Peukert για τη συγκεκριμένη μπαταρία, από την εξίσωση (4.1), ή αντίστροφα λύνοντας ως προς T το χρόνο λειτουργίας της μπαταρίας για οποιαδήποτε τιμή του ρεύματος εκφόρτισης.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του νόμου του Peukert για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής της μπαταρίας είναι αρκετά ικανοποιητικά υπό συνεχές σταθερό φορτίο. Αλλά δεν λειτουργούν ικανοποιητικά με μεταβαλλόμενο ή διακοπτόμενο φορτίο. Για το λόγο αυτό μία εκτεταμένη εκδοχή του νόμου του Peukert για μη σταθερές φορτίσεις αναπτύχθηκε [13] από τους Rakhmatov και Vrudhula.

Στο νόμο του Peukert (4.1) το ρεύμα I έχει αντικατασταθεί από το μέσο ρεύμα μέχρι το σημείο όπου $t = T$. Για ένα τμηματικά συνεχές προφίλ αποφόρτισης, με t_k να αναπαριστά τα σημεία όπου το ρεύμα αλλάζει τιμή, ο νόμος του Peukert μετασχηματίζεται:

$$T = \frac{C}{\left[\frac{\sum_{k=1}^n I_k(t_k - t_{k-1})}{T} \right]^b} \quad (4.2)$$

Η παραπάνω εξίσωση δεν είναι τόσο απλή όσο δείχνει. Είναι αδύνατο να απομονωθεί εύκολα η παράμετρος T στην εξίσωση, αφού το T εμφανίζεται επίσης μέσα στο άθροισμα του n -όρου ($t_n = T$). Για $n = 1$ η εξίσωση (4.2) καταλήγει στο νόμο του Peukert (4.1). Παρόλο που ο εκτεταμένος νόμος του Peukert μπορεί να χειριστεί περιπτώσεις μη-συνεχούς αποφόρτισης, εξακολουθεί να μην μοντελοποιεί το φαινόμενο ανάκτησης των μπαταριών. Παρόλα αυτά το μοντέλο είναι πολύ απλό στην εφαρμογή του. Μόνο ο μέσος όρος του ρεύματος αποφόρτισης λαμβάνεται υπόψιν.

4.3.2. Rakhmatov και Vrudhula

Μετά τον εκτεταμένο νόμο του Peukert, οι Rakhmatov και Vrudhula παρουσίασαν ένα νέο αναλυτικό μοντέλο μπαταρίας [25]. Το μοντέλο περιγράφει την διαδικασία διάχυσης του ενεργού υλικού στην μπαταρία. Η διάχυση θεωρείται ότι είναι μονοδιάστατη σε μία περιοχή μήκους w . $C(x, t)$ είναι η συγκέντρωση του ενεργού υλικού σε χρόνο t και απόσταση $x \in [0, w]$ από το ηλεκτρόδιο. Για να προσδιορίσει κανείς την διάρκεια ζωής της μπαταρίας πρέπει να υπολογίσει το χρόνο στον οποίο η συγκέντρωση στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου $C(0, t)$ πέφτει κάτω από το επίπεδο διακοπής C_{cutoff} . Η μονοδιάστατη διαδικασία διάχυσης περιγράφεται από το νόμο του Fick:

$$\begin{cases} -J(x, t) = D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \\ \frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} \end{cases}$$

όπου

$J(x, t)$ είναι η ροή του ενεργού υλικού σε χρόνο t και θέση x , και

D είναι η σταθερά διάχυσης

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, η ροή στο αριστερό όριο της περιοχής διάχυσης ($x = 0$) είναι ανάλογη με το ρεύμα $I(t)$ ενώ στο δεξί όριο ($x = w$) είναι μηδέν. Αυτό δίνει τις ακόλουθες οριακές συνθήκες:

$$\begin{cases} D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{i(t)}{\nu F A} \\ D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=w} = 0 \end{cases}$$

όπου

A είναι η περιοχή της επιφάνειας του ηλεκτροδίου,

Φ είναι η σταθερά Φάραντεν ($96485.31 \text{ C mol}^{-1}$), και

ν είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην ηλεκτροχημική αντίδραση στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου.

Είναι πιθανόν να επιτύχει κάποιος μία αναλυτική επίλυση από τις παραπάνω διαφορικές εξισώσεις και τις οριακές συνθήκες, χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό Laplace. Από την λύση μπορεί κανείς να πετύχει την παρακάτω έκφραση σχετίζοντας το φορτίο, τη διάρκεια ζωής L και τις παραμέτρους της μπαταρίας:

$$\alpha = \int_0^L \frac{i(t)}{\sqrt{L-\tau}} d\tau + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^L \frac{i(t)}{\sqrt{L-\tau}} e^{-\frac{\beta^2 m^2}{L-\tau}} d\tau$$

όπου

$$\alpha = \nu F A \sqrt{\pi D C^*} \rho(L), \quad \beta = \frac{w}{\sqrt{L-\tau}}$$

C^* είναι η συγκέντρωση σε χρόνο $t = 0$, και

$$\rho(L) = 1 - \frac{C(0, L)}{C^*}$$

Στην ειδική περίπτωση ενός συνεχούς ρεύματος αποφόρτισης I η έκφραση για το α μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$\alpha = 2I\sqrt{L} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(\sqrt{L} e^{-\frac{\beta^2 m^2}{L}} - \beta m \sqrt{\pi} \Phi\left(\frac{\beta m}{\sqrt{L}}\right) \right)$$

όπου

$$\Phi(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

Μπορούμε να πάρουμε μία ικανοποιητική προσέγγιση για το α παίρνοντας τους πρώτους δέκα όρους του άπειρου αθροίσματος. Μαζί με μία προσέγγιση του Φ αυτό δίνει :

$$\alpha = 2I\sqrt{L} \left(1 + 2 \sum_{m=1}^{10} \left(e^{-\frac{\beta^2 m^2}{L}} - \frac{\pi e^{-\frac{\beta^2 m^2}{L}}}{\pi - 1 + \sqrt{1 + \pi \frac{L}{\beta^2 m^2}}} \right) \right) \quad (4.3)$$

Από την εξίσωση (4.3) κάποιος μπορεί να προβλέψει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας για ένα δεδομένο ρεύμα αποφόρτισης. Για να μπορέσουν να πραγματοποιηθούν αυτές οι προβλέψεις πρέπει πρώτα να υπολογιστούν τα α και β από τα πειραματικά δεδομένα.

Οι συγγραφείς, για να αποτιμήσουν την αποτελεσματικότητα του μοντέλου, το συνέκριναν με το πρόγραμμα προσομοίωσης μπαταρίας Dualfoil, και με την εκτεταμένη έκδοση της μεθόδου του Peukert που περιγράψαμε παραπάνω [25]. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Dualfoil χρησιμοποιούνται ως μέτρο σύγκρισης, λόγω της πολύ μεγάλης ακρίβειάς τους. Για σταθερά συνεχόμενα φορτία, το μοντέλο των Rakhmatov και Vrudhula προβλέπει διάρκεια ζωής με ένα μέσο όρο απόκλισης 3% και μέγιστο λάθος 6% συγκρινόμενο με τις προβλέψεις του προγράμματος Dualfoil. Αντιθέτως, η μέθοδος Peukert παρουσιάζει μέσο όρο απόκλισης 14% και μέγιστης 43%. Η μέθοδος Peukert λειτουργεί ικανοποιητικά για μικρά φορτία, αλλά τα λάθη γίνονται πολύ μεγάλα όσο το φορτίο μεγαλώνει. Για τις διακοπτόμενες και μεταβαλλόμενες φορτίσεις στα πειράματα, το αναλυτικό μοντέλο λειτουργεί ακόμα καλύτερα, με ένα μέγιστο λάθος απόκλισης 2.7% και μέσο όρο απόκλισης λιγότερο από 1%. Ακόμα μια φορά η μέθοδος του Peukert λειτουργεί πολύ χειρότερα. Αυτό βέβαια γίνεται κατανοητό όταν επισημαίνουμε ότι η μέθοδος Peukert δεν λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο ανάκτησης των μπαταριών.

4.3.3. Kinetic Battery model (KiBaM)

Ένα τρίτο αναλυτικό μοντέλο είναι το Kinetic Battery model (KiBaM) των Manwell και McGowan [18]. Το KiBaM είναι ένα πολύ διασθητικό μοντέλο και αναπτύχθηκε με σκοπό να προβλέπει τη λειτουργία των μπαταριών βασιζόμενο σε τόσες παραμέτρους όσες μπορείς να βρει κανείς στο προσέκτους του κατασκευαστή. Καμία εκτεταμένη μέτρηση του ρεύματος και της τάσης δεν είναι απαραίτητη. Το KiBaM κατά κύριο λόγο συσχετίζει την χωρητικότητα αποθήκευσης με το ρυθμό εκφόρτισης του συσσωρευτή.

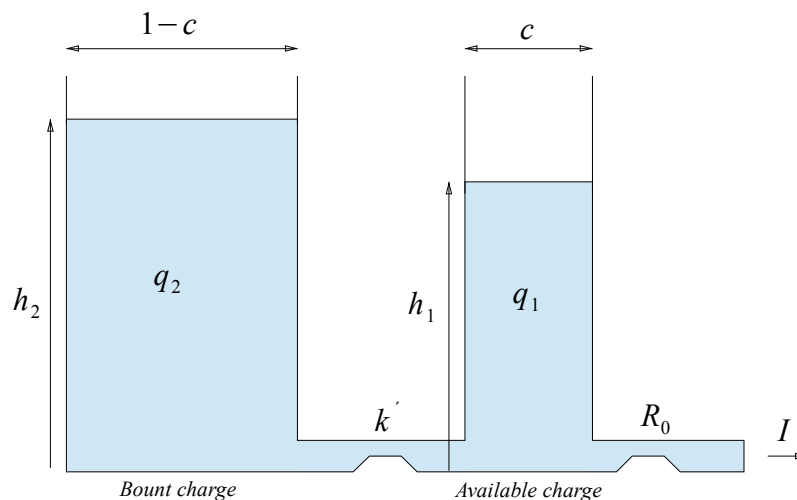
Το μοντέλο περιγράφεται από δυο κυρία μέρη:

- το μοντέλο υπολογισμού της χωρητικότητας
- το μοντέλο υπολογισμού της τάσης

4.3.3.1. Μοντέλο χωρητικότητας

Η κύρια παραδοχή αυτού του μοντέλου είναι ότι ένα μέρος της χωρητικότητας της μπαταρίας είναι άμεσα διαθέσιμο για κατανάλωση στο φορτίο, ενώ το υπόλοιπο είναι δεσμευμένο στους χημικούς δεσμούς των στοιχείων. Μπορούμε να φανταστούμε το φορτίο της μπαταρίας να μοιράζεται σε δύο δεξαμενές δυναμικού, τη δεξαμενή με το άμεσα διαθέσιμο φορτίο και τη δεξαμενή με το δεσμευμένο φορτίο, όπως στο σχήμα 4.1.

Η διαθέσιμη δεξαμενή φόρτισης προμηθεύει ηλεκτρόνια απευθείας στο φορτίο ενώ η δεσμευμένη μόνο στην άμεσα διαθέσιμη δεξαμενή φόρτισης. Ο ρυθμός με τον οποίο η φόρτιση ρέει μεταξύ των δύο δυναμικών, εξαρτάται από την διαφορά ύψους μεταξύ τους και από την παράμετρο k' . Αυτό σημαίνει ότι εάν ($h_1 = h_2$), δεν υπάρχει ροή



Σχήμα 4.1.: Σχηματική αναπαράσταση του KiBaM.

μεταξύ των δυο δεξαμενών. Η παράμετρος c δίνει το κλάσμα της συνολικής φόρτισης στην μπαταρία που αποτελεί μέρος της άμεσα διαθέσιμης δεξαμενής φόρτισης.

Η μέγιστη χωρητικότητά των δεξαμενών περιγράφεται από το q_{max} και αντιστοιχεί στο φορτίο που μπορεί να αποδοθεί όταν ο συσσωρευτής αποφορτιστεί με πολύ αργό ρυθμό.

Το ύψος της στάθμης κάθε δεξαμενής σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή προκύπτει οπτικά από το σχήμα 4.1 και είναι

$$\begin{cases} h_1 = \frac{q_1}{c} \\ h_2 = \frac{q_2}{1-c} \end{cases}$$

Η μεταβολή στη φόρτιση των δύο δεξαμενών δίνεται από το ακόλουθο σύστημα διαφορικών εξισώσεων

$$\begin{cases} \frac{dq_1}{dt} = -I - k(1-c)q_1 + kcq_2 \\ \frac{dq_2}{dt} = k(1-c)q_1 - kcq_2 \end{cases} \quad (4.4)$$

όπου $k = k'/c(1-c)$

Τα ιδιοδιανύσματα του συστήματος θα είναι $\lambda_1 = 0$ και $\lambda_2 = k$, και οι τιμές τους σχετίζονται με την 'ταχύτητα απόκρισης' της κάθε δεξαμενής. Για να γίνουν τα άνωθεν ακόμα πιο διαισθητικά αρκεί να πούμε ότι τα ιδιοδιανύσματα έχουν μονάδα μέτρησης $time^{-1}$ και το ένα από αυτά αντιπροσωπεύει έναν ολοκληρωτή ενώ το άλλο εξαρτάται από τη σταθερά k . Η δεξαμενή 2 λοιπόν μπορεί να θεωρηθεί ως ολοκληρωτής αφού δεν ελέγχεται από εξωτερικές διεγέρσεις [12].

Με αρχικές συνθήκες $q_1(0) = c \cdot q_0$ και $q_2(0) = (1 - c) \cdot q_0$. Όταν μια κατανάλωση I εφαρμόζεται στην μπαταρία, το άμεσα διαθέσιμο φορτίο μειώνεται και η διαφορά ύψους μεταξύ των δύο δεξαμενών δυναμικού αυξάνεται. Όταν το φορτίο απομακρύνεται, η φόρτιση ρέει από τη δεξαμενή δεσμευμένου φορτίου στο διαθέσιμο μέχρι το h_1 και το h_2 να γίνουν ίσα ξανά. Έτσι, κατά τη διάρκεια μιας αδρανούς περιόδου, μεγαλύτερη ποσότητα φορτίου γίνεται διαθέσιμη και η μπαταρία διαρκεί περισσότερο από όταν το φορτίο εφαρμόζεται συνεχόμενα. Οι διαφορικές εξισώσεις επιλύονται μέσω του μετασχηματισμού La Place και μας δίνουν

$$\begin{cases} q_1 = q_{1,0} \cdot e^{-kt} + \frac{(q_0 \cdot k \cdot c - I)(1 - e^{-kt})}{k} - \frac{I \cdot c(kt - 1 + e^{-kt})}{k} \\ q_2 = q_{2,0} \cdot e^{-kt} + q_0(1 - c)(1 - e^{-kt}) - \frac{I(1 - c)(kt - 1 + e^{-kt})}{k} \end{cases} \quad (4.5)$$

όπου

$q_{1,0}, q_{2,0}$ είναι το συνολικό διαθέσιμο και δεσμευμένο φορτίο, αντίστοιχα, στο χρόνο $t = 0$.

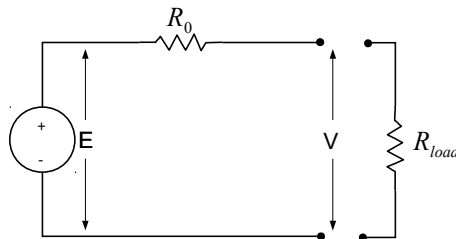
Για q_0 έχουμε έχουμε ότι $q_0 = q_{1,0} + q_{2,0}$.

4.3.3.2. Μοντέλο τάσης

Εκτός από το φορτίο της μπαταρίας, το KiBaM μοντελοποιεί επίσης την τάση του συσσωρευτή, όπως αυτή επηρεάζεται από τη φόρτιση και την αποφόρτιση σε διαφορετικά βήθη με διαφορετικούς ρυθμούς. Το μοντέλο είναι ικανό να προβλέψει την συμπεριφορά της μπαταρίας, τόσο όταν η τάση της μειώνεται αργά κατά το πρώτο στάδιο αποφόρτισης, όσο και όταν πέφτει απότομα όταν η μπαταρία είναι σχεδόν άδεια.

Η μπαταρία εν προκειμένω μοντελοποιείται ως μία πηγή τάσης σε σειρά με μία εσωτερική αντίσταση, σχήμα 4.2. Η τάση δίνεται από τον τύπο

$$V = E - I \cdot R_0 \quad (4.6)$$



Σχήμα 4.2.: Μοντέλο μπαταρίας σύμφωνα με το KiBaM.

όπου

I είναι το ρεύμα αποφόρτισης και

R_o είναι η εσωτερική αντίσταση.

E είναι η εσωτερική τάση η οποία με τη σειρά της δίνεται από την:

$$E = E_0 + A \cdot X + \frac{C \cdot X}{D - X} \quad (4.7)$$

όπου:

E_0 είναι η εσωτερική τάση της ολικά φορτισμένης μπαταρίας για μηδενικό ρεύμα,

A είναι μία παράμετρος που αναπαριστά την αρχική γραμμική μεταβολή της εσωτερικής τάσης της μπαταρίας σε σχέση με την κατάσταση φόρτισης,

C, D είναι παράμετροι που αναπαριστούν την μείωση της τάσης της μπαταρίας όταν η μπαταρία βρίσκεται στο τελικό στάδιο αποφόρτισης και

X είναι το κανονικοποιημένο φορτίο που απομακρύνεται από την μπαταρία για συγκεκριμένο ρεύμα αποφόρτισης.

$$X = \frac{q_{out}}{q_{max}(I)} \cdot q_{max} \quad (4.8)$$

Όπου

$q_{max}(I)$ η χωρητικότητά της μπαταρίας για ρυθμό αποφόρτισης I

q_{out} το σύνολο του φορτίου που έχει αποβάλει η μπαταρία

$$q_{out} = \int I dt = q_{max} - q_1 - q_2$$

Αυτές οι παράμετροι μπορούν να αναζητηθούν από δεδομένα αποφόρτισης μέσω μη γραμμικής προσαρμογής της καμπύλης χωρητικότητας - ρεύματος αποφόρτισης στα πραγματικά δεδομένα. Το KiBaM αναπτύχθηκε για να μοντελοποιήσει μεγάλου μεγέθους μολύβδου-οξέος μπαταρίες αποθήκευσης. Αυτές οι μπαταρίες έχουν ένα χαρακτηριστήρα επίπεδης αποφόρτισης, το οποίο αναπαριστάται πολύ καλά. Το KiBaM λαμβάνει υπόψη τόσο τη μη γραμμική συμπεριφορά της χωρητικότητας όσο και το φαινόμενο ανάκτησης των συσσωρευτών. Παρόλα αυτά, δεν καταφέρνει να περιγράψει ικανοποιητικά τις χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης ($V - I$). Συνεπώς, αν κάποιος ενδιαφέρεται μόνο για τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και όχι τόσο για την πραγματική της τάση κατά την αποφόρτιση, μπορεί να χρησιμοποιήσει το μοντέλο του KiBaM.

4.3.3.3. Μοντέλο Απωλειών

Σύμφωνα με το KiBaM το φορτίο της μπαταρίας διατηρείται οπότε οι απώλειες που υφίστανται κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση οφείλονται στην μεταβολή της τάσης

κατά τις διαδικασίες αυτές [39]. Οι απώλειες ενέργειας υφίστανται τόσο στη φόρτιση όσο και στην εκφόρτιση και για τον υπολογισμό τους η τιμή της τερματικής τάσης συγκρίνεται με την ονομαστική τιμή. Η τιμή της τερματικής τάσης υπολογίζεται από τις εξισώσεις (4.6) και (4.7) γνωρίζοντας την τιμή του ρεύματος και το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας. Όταν η μπαταρία είναι σχεδόν άδεια και το ρεύμα λαμβάνει πολύ μικρές τιμές, τότε η τερματική τάση θα προσεγγίζει την τιμή της ΗΕΔ άδειας μπαταρίας, δηλαδή $E_{c,0}$ για τη φόρτιση και $E_{d,0}$ για την εκφόρτιση. Η απώλεια ισχύος θα είναι ελαφρά μεγαλύτερη από το γινόμενο του ρεύματος επί τη διαφορά μεταξύ της εσωτερικής ΗΕΔ και της ονομαστικής τάσης. Στην περίπτωση της φόρτισης όταν η μπαταρία προσεγγίζει την ονομαστική χωρητικότητα ή το ρεύμα φόρτισης είναι μεγάλο, η τερματική τάση θα είναι αρκετά διαφορετική από την ΗΕΔ και συνεπώς οι απώλειες θα είναι σχετικά υψηλές. Οι απώλειες ενέργειας σε αυτήν την περίπτωση δίνονται από το γινόμενο του ρεύματος φόρτισης επί τη διαφορά μεταξύ ονομαστικής και τερματικής τάσης, όπως φαίνεται στην επόμενη σχέση :

$$L_{ch} = I \cdot [V(q, I) - V_{nom}] \quad (4.9)$$

όπου

$V(q, I)$ είναι η εξαρτώμενη από το επίπεδο φόρτισης και το ρεύμα τερματική τάση.

Οι απώλειες της μπαταρίας κατά την εκφόρτιση υπολογίζονται επίσης από την εξ. 4.9, ενώ οι συνολικές απώλειες είναι το άθροισμα των απωλειών φόρτισης και εκφόρτισης, δηλαδή:

$$L_{total} = L_{ch} + L_{dch}$$

4.3.3.4. Μοντέλο Διάρκειας Ζωής

Για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής των συσσωρευτών χρησιμοποιείται η καμπύλη κύκλων ζωής – βάθους εκφόρτισης. Σύμφωνα με το KiBaM ως κύκλος φόρτισης εκφόρτισης μίας μπαταρίας ορίζεται η εκφόρτιση της μπαταρίας από ένα αρχικό επίπεδο SOC, σε ένα τελικό επίπεδο και στη συνέχεια επαναφόρτιση στο αρχικό επίπεδο [39].

Η εξάρτηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας από το βάθος εκφόρτισης μοντελοποιείται με μία διπλοεκθετική σχέση:

$$C_F = \alpha_1 + \alpha_2 e^{\alpha_3 R} + \alpha_4 e^{\alpha_5 R}$$

όπου

C_F ο αριθμός των κύκλων φόρτισης - εκφόρτισης μέχρι τη βλάβη

α_i οι σταθερές προσαρμογής

R το βάθος εκφόρτισης στο οποίο υποβάλλεται η μπαταρία

Για τον προσδιορισμό των σταθερών προσαρμογής χρειάζονται πειραματικά δεδομένα κύκλων μέχρι τη βλάβη για διάφορα βάθη εκφόρτισης. Το ποσοστό της συνολικής διάρκειας ζωής της μπαταρίας που καταναλώνεται σε έναν κύκλο φόρτισης - εκφόρτισης είναι $1/C_F$. Δεδομένου ότι κάθε επόμενος κύκλος με το ίδιο εύρος επιβαρύνει την μπαταρία κατά το ίδιο ποσοστό, μετά από C_F κύκλους ο αθροιστικός λόγος θα γίνει ίσος με τη μονάδα και η μπαταρία θα θεωρείται άδεια. Εάν θεωρήσουμε ότι σε ένα έτος μία μπαταρία υφίσταται N_1 κύκλους με βάθος εκφόρτισης R_1 και επιβάρυνση $C_{F,1}$, N_2 κύκλους με βάθος εκφόρτισης R_2 και επιβάρυνση $C_{F,2}$ και ούτω καθεξής, τότε η αθροιστική επιβάρυνση θα δίνεται από τη σχέση

$$D = \sum_i N_i \cdot \frac{1}{C_{F,i}}$$

Έτσι, εάν για παράδειγμα στο τέλος της ετήσιας προσομοίωσης προκύψει $D = 0.5$ τότε αυτό σημαίνει ότι έχει δαπανηθεί η μισή διάρκεια ζωής των μπαταριών και άρα αυτές οι μπαταρίες θέλουν αλλαγή κάθε δύο χρόνια.

5. Μοντελοποίηση των συσσωρευτών του εργαστηρίου

Η δυνατότητα σχεδιασμού και λειτουργίας συσκευών που στηρίζονται στις μπαταρίες προϋποθέτει ένα κατάλληλο μοντέλο για αυτές. Για παράδειγμα τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (BESS), όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια, βασίζονται σε ακριβή μοντέλα μπαταριών για την πρόβλεψη της κατάστασης φόρτισης (SOC) ώστε να μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά. Αυτό προϋποθέτει ότι τα μοντέλα μπορούν με ακρίβεια να καταγράψουν διάφορες μη γραμμικές συμπεριφορές της χωρητικότητας των μπαταριών.

Τα περισσότερα μοντέλα μπαταριών επικεντρώνονται στο να περιγράψουν τρία διαφορετικά χαρακτηριστικά που έχουν καθοριστικό ρόλο στην λειτουργία των μπαταριών. Το πρώτο και πιο συχνά χρησιμοποιούμενο είναι το μοντέλο φόρτισης και στοχεύει στην μοντελοποίηση της κατάστασης φόρτισης (SOC) της μπαταρίας, η οποία αποτελεί την σημαντικότερη παράμετρο ενός συστήματος. Ο δεύτερος τύπος μοντέλου είναι το μοντέλο τάσης, που υπολογίζει την τάση ακροδεκτών ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πιο λεπτομερή μοντέλα για την διαχείριση των μπαταριών ή για πιο λεπτομερή υπολογισμό των απωλειών σε αυτές. Ο τρίτος τύπος μοντέλου είναι τα μοντέλα για την διάρκεια ζωής, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των επιπτώσεων ενός συγκεκριμένου τρόπου λειτουργίας στην αναμενόμενη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

5.0.4. Στόχοι του παρόντος κεφαλαίου

Η υπό-εργασία αυτού του κεφαλαίου επικεντρώθηκε στη δημιουργία ενός εργαλείου προσομοίωσης που μας δίνει την δυνατότητα να προσδιορίσουμε την συμπεριφορά των συσσωρευτών ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας κάτω από διαφορετικά σενάρια λειτουργίας. Χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο προσομοίωσης μπορούμε να πετύχουμε ακριβείς υπολογισμούς διαφόρων παραμέτρων του συστήματος, όπως την κατάσταση φόρτισης *SOC* ή την τερματική τάση *V* των μπαταριών, όχι μόνο κάτω από στατικές συνθήκες, αλλά επίσης κάτω από δυναμικές συνθήκες λειτουργίας.

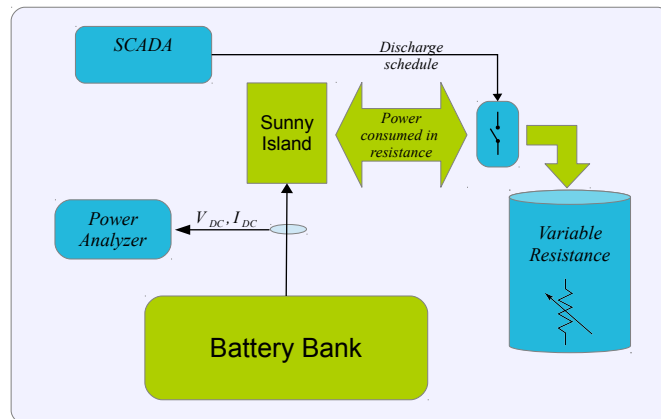
Στόχος είναι το μοντέλο των συσσωρευτών να χρησιμοποιηθεί σε συνεργασία με το μοντέλο των εικονικών σύγχρονων μηχανών, που αναπτύσσεται σε επόμενο κεφάλαιο, για να αποτιμήσουμε την δυνατότητα στήριξης του δικτύου, από ένα ρεαλιστικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Για το σκοπό αυτό η συστοιχία μπαταριών που βρίσκεται εγκατεστημένη στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου ΣΗΕ χρησιμοποιείται. Δύο μοντέλα

αναπτύσσονται, ένα σύμφωνα με τις προδιαγραφές των μπαταριών (*DIN 40737 – 3*) και ένα βάσει των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε.

5.1. Πειραματική διάταξη

Για την μοντελοποίηση των μπαταριών μια σειρά πειραματικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα αυτά είναι σχετικά απλή και παρουσιάζεται στο δομικό διάγραμμα του σχήματος 5.1.

- Οι μπαταρίες συνδέονται με το φορτίο μέσω του αντιστροφέα (sunny island) και ενός ρελέ, ελεγχόμενο από το SCADA.
- Τα μετρητικά όργανα (power analyzer) καταγράφουν τις ενδείξεις ρεύματος και τάσης κάθε 5 sec.
- Το φορτίο αποτελείται από μια χειροκίνητα μεταβαλλόμενη αντίσταση ισχύος.



Σχήμα 5.1.: Δομικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης.

Το σύστημα SCADA που χρησιμοποιήσαμε έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εργαστηρίου ΣΗΕ. Με την βοήθεια του προγράμματος Labview έχουμε την δυνατότητα να ελέγχουμε το ρελέ που συνδέει τη συστοιχία μπαταριών με το φορτίο, μέσω ενός PLC, απομακρυσμένα. Αυτό μας δίνει την ευχέρεια να δημιουργούμε, εύκολα και με ακρίβεια, χρονοσειρές αποφόρτισης σύμφωνα με τις ανάγκες μας.

Η διαχείριση των μπαταριών (κεφάλαιο 3.3) από τον ελεγκτή του αντιστροφέα (sunny island) δεν μας επέτρεψε να μελετήσουμε τις μπαταρίες σε όλο το εύρος λειτουργίας τους. Η μέγιστη και η ελάχιστη επιτρεπτή τάση εκφόρτισης σύμφωνα με το *DIN 40737 – 3* είναι $E_{max} = 2.23 V$ και $E_{min} = 1.56 V$ αντίστοιχα, που σημαίνει ότι για το σύνολο των 30 μπαταριών είναι $E_{max} = 66.9 V$ και $E_{min} = 46.8 V$. Αυτή η τάση απέχει αρκετά από την ελάχιστη τάση εκφόρτισης που επιτρέπει ο αλγόριθμος

του αντιστροφέα. Η ελάχιστη τάση ανοιχτοκύκλωσης που επιτρέπει ο αντιστροφέας είναι 1.93 V [2].

Επιπλέον, η λειτουργία του αντιστροφέα δεν μας επιτρέπει να κάνουμε ελεγχόμενη φόρτιση των μπαταριών υπό σταθερό ρεύμα. Ο ελεγκτής των μπαταριών φορτίζει τις μπαταρίες κλιμακωτά, ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης των μπαταριών. Συνεπώς, στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με την μοντελοποίηση της διαδικασίας αποφόρτισης, ενώ για τις ανάγκες των προσημειώσεων το ίδιο μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση της φόρτισης των μπαταριών.

5.2. Υλοποίηση του μοντέλου

Το μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε για την προτυποποίηση της διάταξης των μπαταριών του εργαστηρίου είναι γνωστό με το όνομα Kinetic Battery Model (KiBaM) και αποτελείται από τα δύο βασικά μοντέλα (παράγραφος 4.3.3):

- Το μοντέλο χωρητικότητας, που περιγράφει την κατάσταση του SOC των μπαταριών
- Το μοντέλο τάσης, που αποτυπώνει την τερματική τάση των μπαταριών

Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε φυσικά χαρακτηριστικά της υποκείμενης δομής των μπαταριών και χρησιμοποιεί λίγους μόνο συντελεστές, που υπολογίζονται πειραματικά, για να προσαρμόσει τη συμπεριφορά του. Το μοντέλο φόρτισης, είναι βασισμένο στην παραδοχή ότι η χημική διαδικασία περιγράφεται ικανοποιητικά από πρώτης τάξης διαφορικές εξισώσεις. Το μοντέλο τάσης, προσαρμόζεται σύμφωνα με την χωρητικότητα που υπολογίζεται από το μοντέλο φόρτισης.

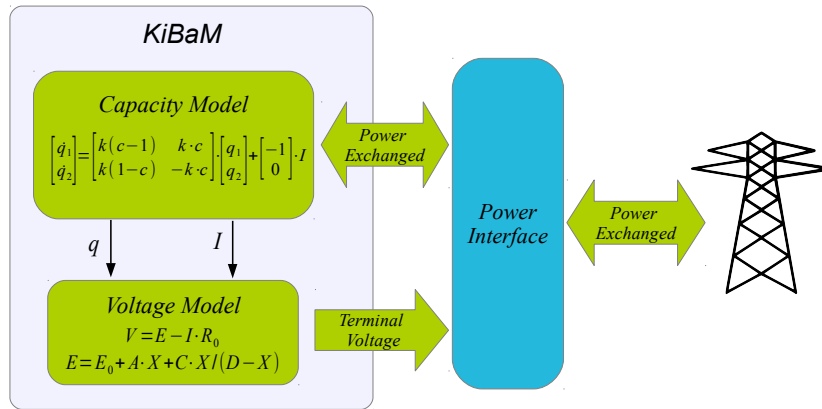
Τα μοντέλα χωρητικότητας και τάσης αντιλαμβάνονται την μπαταρία σαν μια πηγή τάσης E σε σειρά με μια εσωτερική αντίσταση, R_0 , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 στη σελίδα 38. Συνεπώς η τάση ακροδεκτών θα είναι:

$$V = E - I \cdot R_0 \quad (5.1)$$

Η εικόνα του σχήματος 5.2 παρουσιάζει σε επισκόπηση την δομή του KiBaM μοντέλου μπαταρίας και τον τρόπο σύνδεσής του με το εξωτερικό δίκτυο.

Για την μοντελοποίηση των μπαταριών έχουν γίνει οι εξής παραδοχές:

- Η συστοιχία μπαταριών του εργαστηρίου μελετάται και μοντελοποιείται σαν μια μοναδική μπαταρία.
- Θεωρούμε ότι κατά τη διάρκεια λειτουργίας (εκφόρτιση), οι μπαταρίες διατηρούν τη θερμοκρασία τους σταθερή.
- Στο μοντέλο δεν λαμβάνεται υπόψιν η γήρανση των μπαταριών, μετά από κάθε κύκλο λειτουργίας.



Σχήμα 5.2.: Επισκόπηση του τρόπου λειτουργίας και σύνδεσης του KiBaM μοντέλου μπαταρίας.

- Η στατική αποφόρτιση των μπαταριών επίσης δεν λαμβάνεται υπόψιν.
- Η εσωτερική αντίσταση R_0 της μπαταρίας θεωρούμε ότι είναι σταθερή και δεν επηρεάζεται από την κατάσταση φόρτισης και τη θερμοκρασία των μπαταριών.

5.2.1. Μοντέλο χωρητικότητας

Όπως έχουμε περιγράψει στο κεφάλαιο 4.3.3, το συνολικό εξερχόμενο φορτίο $q_{out} = q_{max,0} - (q_1 + q_2)$ περιγράφεται από τις μεταβολές των επιμέρους φορτίων q_1, q_2 (άμεσα διαθέσιμο και δεσμευμένο φορτίο) σύμφωνα με το παρακάτω σύστημα διαφορικών εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k(c-1) & k \cdot c \\ k(1-c) & -k+c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot I \quad (5.2)$$

Το μοντέλο, που περιγράφει την χωρητικότητα σε συνάρτηση με το ρεύμα, $q_{max}(I)$ έχει την παρακάτω μορφή:

$$q_{max}(I) = \frac{k \cdot c \cdot T \cdot q_{max,0}}{1 - e^{-kT} + c \cdot (kT - 1 + e^{-kT})} \quad (5.3)$$

Με

$$T = \frac{q_{max}(I)}{I}$$

Όπου

- $q_{max,0}$ η μέγιστη χωρητικότητα (όταν η αποφόρτιση πραγματοποιείται με απειροελάχιστο ρεύμα), σε Ah
- c αντανακλά το ποσοστό του συνολικού φορτίου της μπαταρίας που είναι άμεσα διαθέσιμο
- k υποδεικνύει το ρυθμό με τον οποίο το δεσμευμένο φορτίο γίνεται διαθέσιμο, σε hrs^{-1}

Το μοντέλο χωρητικότητας χαρακτηρίζεται από τις τρεις σταθερές k , c και $q_{max,0}$. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να προσδιοριστούν είτε από τα δεδομένα αποφόρτισης που παρέχει το εγχειρίδιο του κατασκευαστή, είτε από πειραματικά δεδομένα μέσω μη γραμμικής προσαρμογής στην καμπύλη χωρητικότητας - χρόνου αποφόρτισης. Τα πειράματα πρέπει να έχουν πραγματοποιηθεί σε σταθερό ρεύμα εκφόρτισης.

Οι μπαταρίες του εργαστηρίου είναι κατασκευασμένες σύμφωνα με το πρότυπο *DIN 40737-3* του γερμανικού οργανισμού προτυποποίησης. Ο πίνακας 5.1 παρουσιάζει δεδομένα εκφόρτισης σύμφωνα με τον κατασκευαστή των μπαταριών [24].

Χρόνος εκφόρτισης	Ρεύμα εκφόρτισης	Συνολικό φορτίο
1.00 h	133 A	133 Ah
3.00 h	64 A	192 Ah
5.00 h	42.5	212.5 Ah
10.00 h	25 A	250 Ah
120.00 h	3.125 A	375 Ah

Πίνακας 5.1.: Χωρητικότητα των μπαταριών για διαφορετικές τιμές του ρεύματος εκφόρτισης, σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

Από τα δεδομένα του κατασκευαστή υπολογίζουμε τους συντελεστές k , c και $q_{max,0}$ μέσω μη γραμμικής προσαρμογής της σχέσης 5.3 στα δεδομένα του πίνακα 5.1.

Οι εκτιμώμενες παράμετροι σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή είναι:

$$k = 0.4219 \text{ 1/h}$$

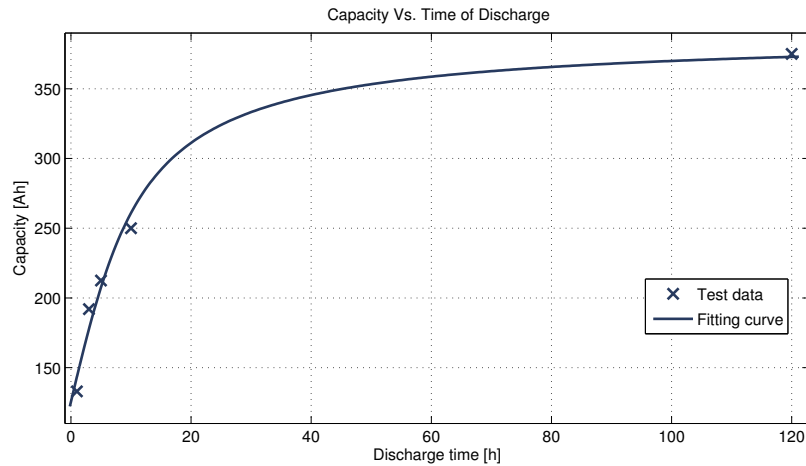
$$c = 0.3236$$

$$q_{max,0} = 388.3 \text{ Ah}$$

Η καμπύλη προσαρμογής για τους συντελεστές k , c και $q_{max,0}$, παρουσιάζεται σε αντιπαραβολή με τα δεδομένα του πίνακα 5.1, στο γράφημα του σχήματος 5.3. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μοντέλο KiBaM καταφέρνει να περιγράψει την μη γραμμική σχέση χωρητικότητας - ρεύματος αποφόρτισης με μεγάλη συνέπεια.

Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία υπολογισμού του μοντέλου χωρητικότητας, αυτή τη φορά για τα πραγματικά δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο. Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων.

Οι εκτιμώμενες παράμετροι σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία είναι:



Σχήμα 5.3.: Καμπύλη χωρητικότητας - χρόνου αποφόρτισης, προσαρμοσμένη στα δεδομένα του κατασκευαστή.

Χρόνος εκφόρτισης	Ρεύμα εκφόρτισης	Συνολικό φορτίο
23.8722 h	8.0849 A	193.0048 Ah
6.0972 h	22.0466 A	134.4228 Ah
2.7111 h	30.0513 A	81.4725 Ah
2.3528 h	33.3178 A	78.3894 Ah

Πίνακας 5.2.: Χωρητικότητα των μπαταριών για διαφορετικές τιμές του ρεύματος εκφόρτισης, πειραματικά δεδομένα.

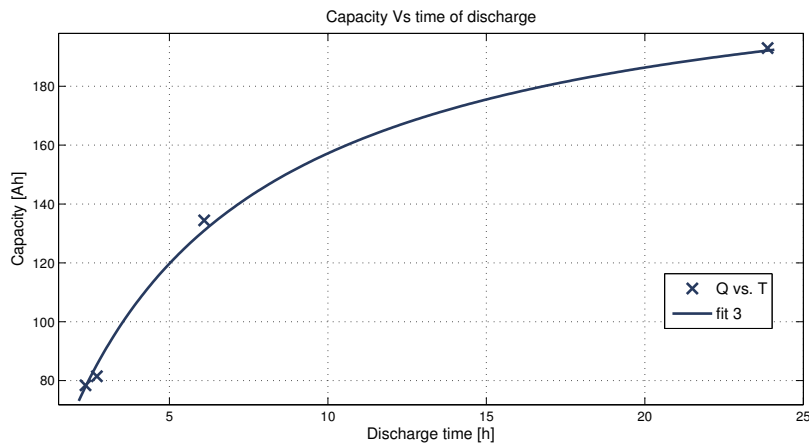
$$k = 4.784 \text{ }^1/\text{h}$$

$$c = 0.0439$$

$$q_{max,0} = 228.8 \text{ Ah}$$

Το γράφημα του σχήματος 5.4 παρουσιάζει την καμπύλη προσαρμογής μαζί με τα πειραματικά δεδομένα.

Από τα αποτελέσματα της εκτίμησης των παραμέτρων, παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο των μπαταριών $q_{max,0} = 228.8 \text{ Ah}$, είναι πολύ μικρότερο από το αντίστοιχο μέγιστο φορτίο που υπολογίσαμε από τα δεδομένα του κατασκευαστή. Αυτό δεν συνεπάγεται ότι η γήρανση των μπαταριών είναι δεδομένη. Ο υπολογισμός του μέγιστου φορτίου στο μοντέλο χωρητικότητας βασίζεται σε δεδομένα με μεγάλο χρόνο αποφόρτισης. Δεδομένα μετρήσεων που εμείς δεν παράγαμε στο εργαστήριο. Επιπλέον, ο υπολογισμός της χωρητικότητας λαμβάνει υπόψιν όλο το εύρος λειτουργίας των μπαταριών, από την πλήρη φόρτιση μέχρι τη βαθιά εκφόρτισή τους. Η διαχείριση της κατάστασης των μπαταριών από τον αντιστροφέα περιόρισε σε σημαντικό βαθμό το εύρος εκφόρτισης. Αυτός είναι πιθανότατα και ο σημαντικότερος παράγοντας για την μικρή τιμή του μέγιστου φορτίου.



Σχήμα 5.4.: Καμπύλη χωρητικότητας - χρόνου αποφόρτισης, προσαρμοσμένη στα πειραματικά δεδομένα.

5.2.2. Μοντέλο τάσης

Όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.3.3, το KiBaM μοντέλο τάσης περιγράφει την εσωτερική τάση των μπαταριών E στηριζόμενο στην παρατήρηση ότι η θερμοκρασιακή τάση V της μπαταρίας εξαρτάται από:

- Την κατάσταση φόρτισης SOC της μπαταρίας
- Την εσωτερική αντίσταση R_0 της μπαταρίας
- Το ρεύμα φόρτισης ή αποφόρτισης I της μπαταρίας

Το μοντέλο τάσης λοιπόν έχει τη μορφή:

$$E = E_0 + A \cdot X + \frac{C \cdot X}{(D - X)} \quad (5.4)$$

Η εσωτερική τάση E δίνεται σαν συνάρτηση της κανονικοποιημένης χωρητικότητας που έχει αποβάλει η μπαταρία για ένα δεδομένο ρεύμα αποφόρτισης. Η κανονικοποιημένη χωρητικότητα X και η κατάσταση φόρτισης εκφράζονται ως εξής:

$$X = q_{out} \cdot \frac{q_{max,0}}{q_{max}(I)}$$

όπου

$q_{max,0}$ είναι η μέγιστη δυνατή χωρητικότητα των μπαταριών για $I = 0$, και

$q_{max}(I)$ είναι η μέγιστη χωρητικότητα για το τρέχον ρεύμα αποφόρτισης

και

$$SOC = \frac{q_{max,0} - q_{out}}{q_{max,0}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{max,0}}$$

Η χωρητικότητα που έχει αποδώσει η μπαταρία είναι:

$$q_{out} = \int I \cdot dt = q_{max} - q_1 - q_2 = q_{max} - q \quad (5.5)$$

όπου

q_1, q_2 είναι το άμεσα διαθέσιμο και δεσμευμένο φορτίο, αντίστοιχα.

Είναι εμφανές ότι η κανονικοποιημένη χωρητικότητα X είναι συνάρτηση της χωρητικότητας q_{out} που έχει αποδώσει η μπαταρία, και συνεπώς συνάρτηση της συνολικής χωρητικότητας q της μπαταρίας.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων E_0, A, C και D του μοντέλου, εφαρμόζουμε μη γραμμική προσαρμογή της εξίσωσης (5.4) στα πειραματικά δεδομένα.

Οι εκτιμώμενες παράμετροι σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία είναι:

$$E_0 = 58.56 V$$

$$A = -0.01939 V/Ah$$

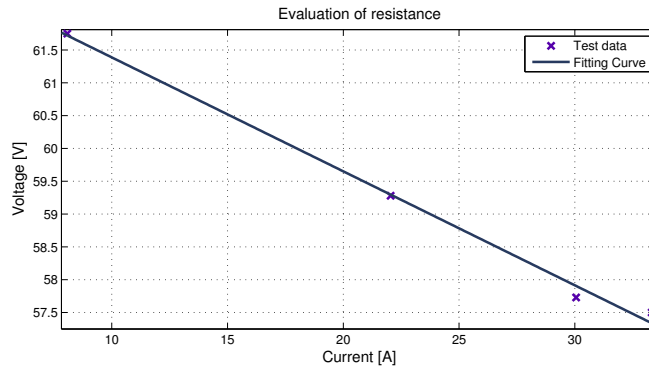
$$C = -0.3635 V$$

$$D = 281.2 Ah$$

5.2.2.1. Εσωτερική αντίσταση

Για τον υπολογισμό της εσωτερικής αντίστασης, θεωρούμε ότι η τιμή της παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από το βάθος και την δυναμική της εκφόρτισης [18]. Για διαφορετικές τιμές του ρεύματος εξόδου βρίσκουμε την τερματική τάση των μπαταριών. Οι μετρήσεις αφορούν το σύνολο των 30 μπαταριών και συνεπώς η εσωτερική αντίσταση που υπολογίζουμε είναι η συνολική. Στη συνέχεια εφαρμόζουμε γραμμική προσαρμογή στα ζεύγη τιμών, και από την κλίση της ευθείας εξάγουμε την τιμή της αντίστασης. Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζουμε της προσαρμογή της καμπύλης σε αντιπαραβολή με τα δεδομένα. Η συνολική εσωτερική αντίσταση υπολογίζεται ότι είναι:

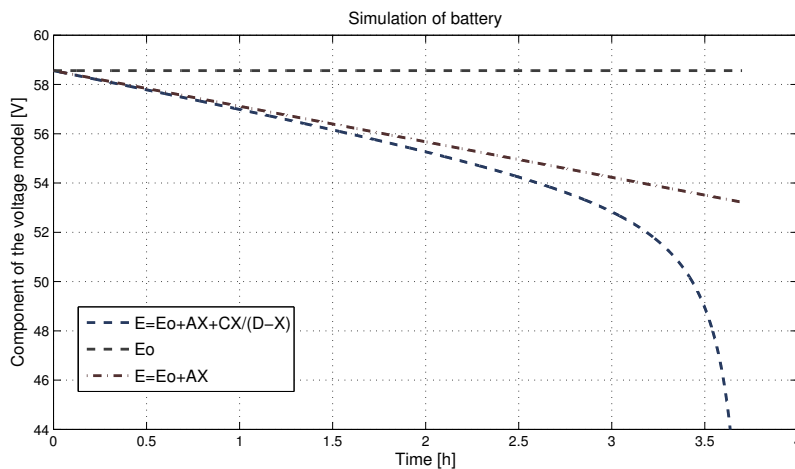
$$R_0 = 0.1037 \Omega$$



Σχήμα 5.5.: Υπολογισμός της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας.

5.3. Σύγκριση του μοντέλου

Αρχικά πραγματοποιούμε μια απλή προσομοίωση του *KiBaM* μοντέλου, ώστε να κά-
 νουμε εμφανή την συνεισφορά κάθε παράγοντα στο μοντέλο τάσης. Για να το πετύ-
 χουμε αυτό, θεωρούμε μια περίπτωση αποφόρτισης με σταθερό ρεύμα $I = 30\text{ A}$. Στο
 γράφημα του σχήματος 5.6 παρουσιάζουμε την διαφορετική επιρροή των παραμέτρων
 E_0 , A , C και D στο μοντέλο τάσης του *KiBaM*. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο
 4.3.3, το μοντέλο μπαταρίας είναι ικανό να προβλέψει τόσο την αργή μείωση της τάσης
 της μπαταρίας στην αρχή της αποφόρτισης, όσο και την απότομη μεταβολή της τάσης
 κατά το τέλος της αποφόρτισης.



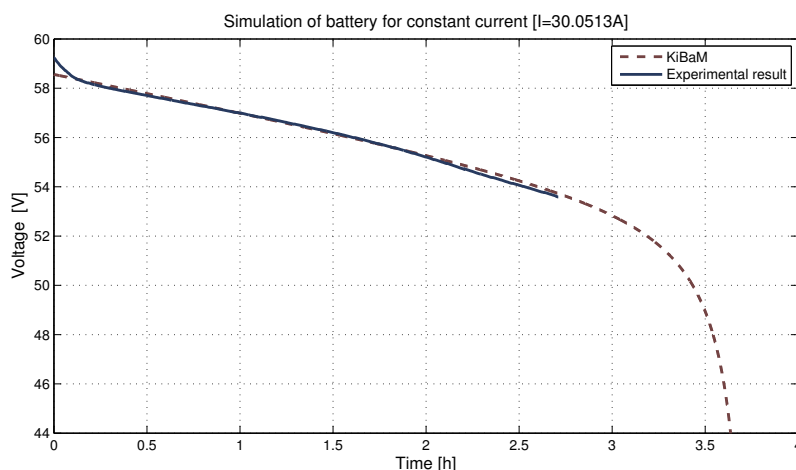
Σχήμα 5.6.: Συνεισφορά κάθε παράγοντα στο μοντέλο τάσης του *KiBaM*

Η παράμετρος E_0 υποδηλώνει την τάση ανοιχτού κυκλώματος της μπαταρίας όταν αυτή
 είναι πλήρως φορτισμένη, ενώ ο όρος AX αντανακλά τη γραμμική μεταβολή της εσωτε-
 ρικής τάσης της μπαταρίας. Μπορούμε να δούμε ότι καθώς η αποφόρτιση συνεχίζεται
 και η κανονικοποιημένη χωρητικότητα X αποδίδεται από την μπαταρία, το $X \rightarrow D$, και
 ο όρος $CX/(D-X)$ δημιουργεί την απότομη μεταβολή στην εσωτερική τάση της μπαταρίας

[12].

5.3.1. Αποφόρτιση υπό σταθερό ρεύμα

Συνεχίζουμε την παρουσίαση, πραγματοποιώντας μια προσομοίωση για να επαληθεύσουμε την εγκυρότητα του μοντέλου. Για σταθερό ρεύμα $I = 30.0513 A$ αφήνουμε το μοντέλο να εκφορτίσει, αντίστοιχα με τον τρόπο που πραγματοποιήσαμε τα εργαστηριακά πειράματα. Η ακρίβεια του μοντέλου αναπαριστάται στο γράφημα του σχήματος 5.7.



Σχήμα 5.7.: Σύγκριση του KiBaM μοντέλου με πειραματικά αποτελέσματα αποφόρτισης, για σταθερό ρεύμα $I = 30.0513 A$.

Η μπλε γραμμή παρουσιάζει την πειραματική καμπύλη των δεδομένων που πήραμε από τους συσσωρευτές του εργαστηρίου, ενώ η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά την καμπύλη εκφόρτισης του μοντέλου. Παρατηρούμε ότι η καμπύλη προσομοίωσης ακολουθεί με αρκετή συνέπεια την πειραματική καμπύλη.

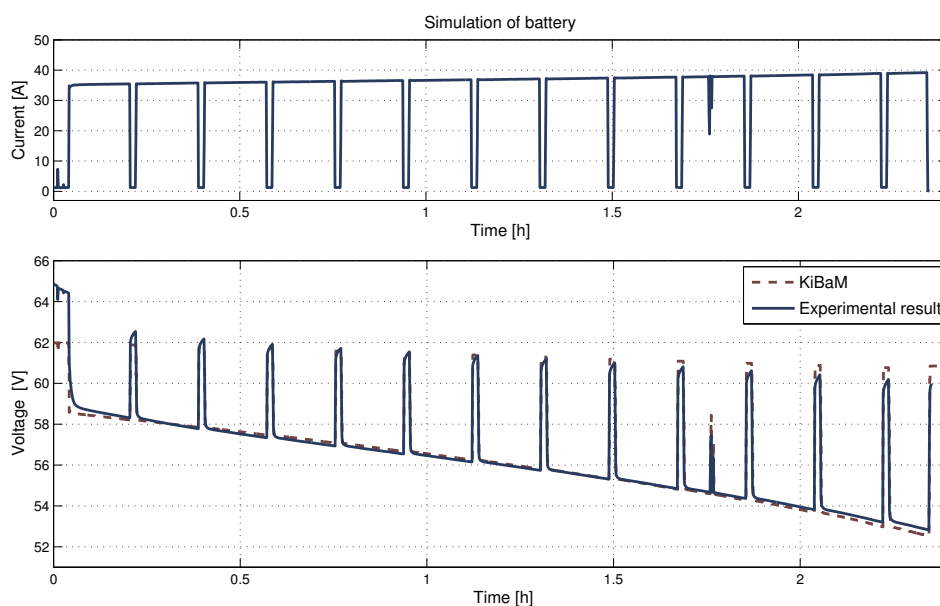
Είναι ενδιαφέρον αρχικά να παρατηρήσουμε ότι το μοντέλο τάσης δεν είναι ικανό να ακολουθήσει την απότομη μεταβολή της τάσης ακριβώς μετά το ξεκίνημα της αποφόρτισης. Επιπλέον, τα πειραματικά δεδομένα από τις εργαστηριακές εκφορτίσεις, έχουν μικρό βάθος εκφόρτισης. Το γεγονός αυτό δεν μας επιτρέπει να επιβεβαιώσουμε την εγκυρότητα του μοντέλου κατά το τελικό στάδιο αποφόρτισης.

5.3.2. Διακοπτόμενη αποφόρτιση σε σταθερό φορτίο

Το επόμενο βήμα είναι να παρουσιάσουμε, σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα, τον τρόπο με τον οποίο το KiBaM μοντέλο προβλέπει την συμπεριφορά των μπαταριών. Για το λόγο αυτό μια στρατηγική αποφόρτισης χρησιμοποιείται, για την καταγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς των μπαταριών για διάφορες τιμές της στάθμης φόρτισης. Η στρατηγική έχει ως εξής:

- η μπαταρία είναι αρχικά πλήρως φορτισμένη
- κατά την διάρκεια του πειράματος οι μπαταρίες δεν επαναφορτίζονται
- η εκφόρτιση διακόπτεται ανά 10 λεπτά, από παύσεις διάρκειας 1 λεπτού.
- το πείραμα πραγματοποιείται υπό σταθερό φορτίο 2 KW, και τα δεδομένα εκφόρτισης ύστερα τροφοδοτούνται στο μοντέλο KiBaM.

Στα γραφήματα του σχήματος 5.8 παρουσιάζουμε σε αντιπαραβολή τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, με τα πραγματικά πειραματικά δεδομένα. Το ρεύμα αποφόρτισης για τη στρατηγική που ακολουθήσαμε και οι αντίστοιχες τάσεις των μπαταριών φαίνονται στις δύο εικόνες.

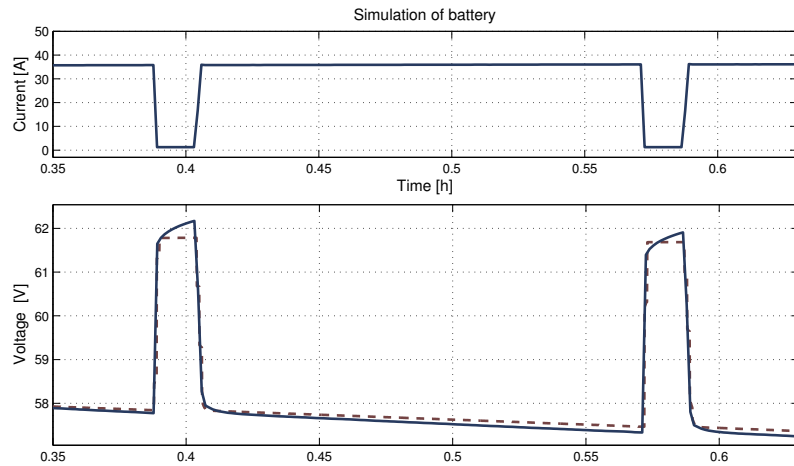


Σχήμα 5.8.: Σύγκριση του KiBaM μοντέλου με πειραματικά αποτελέσματα, για διακοπτόμενη αποφόρτιση σε σταθερό φορτίο.

Παρακάτω συνοψίζουμε μια σειρά από παρατηρήσεις σχετικά με το μοντέλο KiBaM.

Αρχικά, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μοντέλο KiBaM καταφέρνει με μεγάλη ακρίβεια να ακολουθεί τη συμπεριφορά των μπαταριών σε ένα αρκετά δύσκολο σενάριο αποφόρτισης. Οι μεγάλες μεταβολές της τάσης πραγματοποιούνται πάνω στην εσωτερική αντίσταση των μπαταριών όταν η τιμή του ρεύματος μεταβάλλεται ($V = E - I \cdot R_0$).

Αν προσέξουμε λίγο καλύτερα θα παρατηρήσουμε ότι το μοντέλο δεν αντικατοπτρίζει την διαδικασία ανάκτησης, που παρατηρείται στην τάση της μπαταρίας, κατά τη διάρκεια των παύσεων (όταν το ρεύμα γίνεται μηδέν). Αμέσως μετά το στάδιο αποφόρτισης, η βηματική μεταβολή του ρεύματος, στην τιμή μηδέν, επιφέρει αντίστοιχα μεταβολή στην τάση των μπαταριών. Μια ελαφρά άνοδος της τιμής της τάσης τότε πραγματοποιείται. Αυτό γίνεται καλύτερα αντιληπτό στο διάγραμμα του σχήματος 5.9.



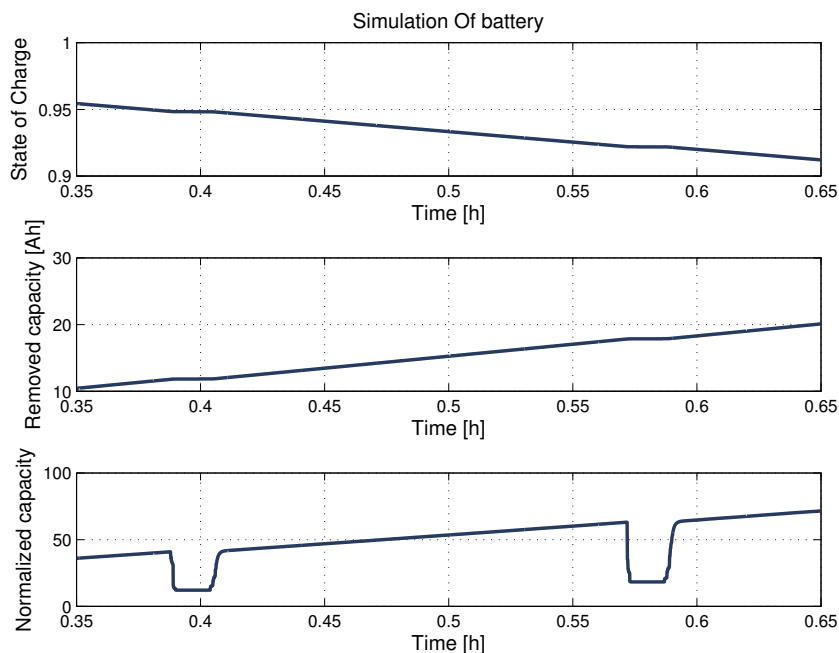
Σχήμα 5.9.: Στιγμιότυπο, όπου μπορούμε να διακρίνουμε τη διαδικασία ανάκτησης της τάσης, όταν το $I = 0 A$.

Επιπλέον, φαίνεται πως το μοντέλο μπαταρίας μπορεί να προβλέψει τα διαφορετικά επίπεδα τάσης ('σκαλοπάτια') που αντιστοιχούν σε διαφορετικό επίπεδο ανάκτησης. Αυτό σημαίνει ότι η κατάσταση φόρτισης SOC γίνεται μικρότερη σε κάθε περίοδο αποφόρτισης. Το γράφημα του σχήματος 5.10 δείχνει τον τρόπο με τον οποίο μειώνεται η κατάσταση φόρτισης κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης, ενώ παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της ανάκτησης. Η χωρητικότητα q_{out} που έχει εξάγει η μπαταρία όπως είναι φυσικό αυξάνεται, αφού ορίζεται ως το ολοκλήρωμα του ρεύματος αποφόρτισης, εξ. (5.5). Η κανονικοποιημένη χωρητικότητα $X = q_{out} \cdot \frac{q_{max}}{q_{max}(I)}$ ακολουθεί την εξερχόμενη χωρητικότητα q_{out} :

- κατά τη διάρκεια της ανάκτησης το ρεύμα αποφόρτισης είναι μηδενικό $I = 0$, και το $q_{max}(I) = q_{max}$, συνεπώς η κανονικοποιημένη χωρητικότητα θα είναι $X = q_{out}$.
- κατά τη διάρκεια αποφόρτισης το ρεύμα αποφόρτισης παραμένει σχεδόν σταθερό, λόγω του σταθερού φορτίου, έτσι ο λόγος $\frac{q_{max}}{q_{max}(I)}$ θα έχει σταθερή τιμή και η κανονικοποιημένη χωρητικότητα θα ακολουθεί την q_{out} - βλέπε σχήμα 5.10.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι η κατάσταση φόρτισης SOC αντικατοπτρίζεται από τα διαφορετικά επίπεδα στην τάση της μπαταρίας, ενώ η κανονικοποιημένη χωρητικότητα σχετίζεται με την απόκριση του $q_{max}(I)$ στις μεταβολές του ρεύματος [12].

Στο KiBaM μοντέλο, μπορεί να γίνει αντιληπτή μόνο η εξωτερική δυναμική συμπεριφορά των μπαταριών. Η εσωτερική δυναμική συμπεριφορά της μπαταρίας είναι κρυμμένη, αντικατοπτρίζεται για παράδειγμα στην άμεσα διαθέσιμη q_1 και στη δεσμευμένη χωρητικότητα q_2 . Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η εσωτερική τάση E της μπαταρίας είναι συνάρτηση της κανονικοποιημένης χωρητικότητας X , και αυτή συνάρτηση της

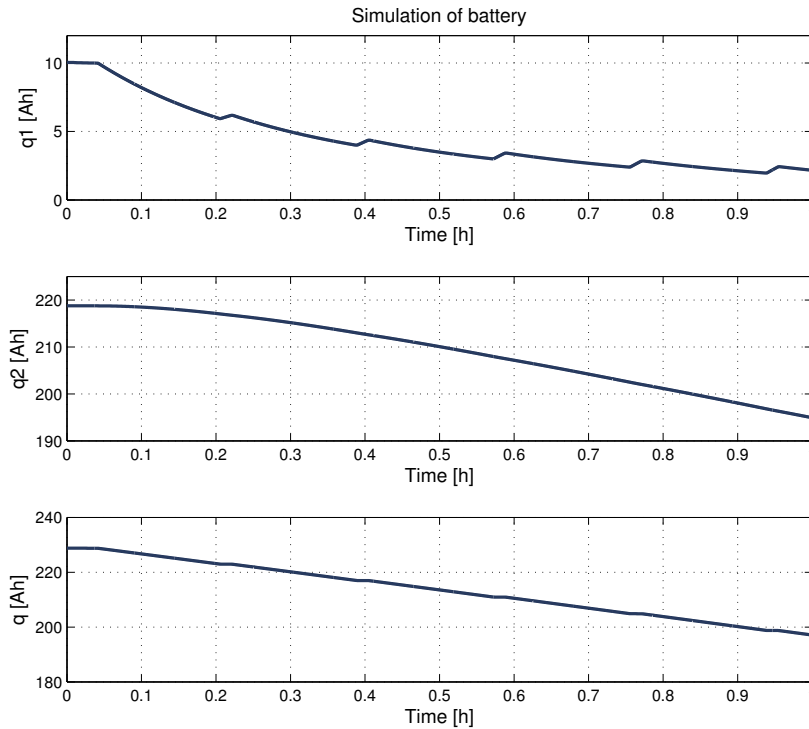


Σχήμα 5.10.: Προσομοιώσεις της κατάστασης φόρτισης SOC , της χωρητικότητας που αποδίδει η μπαταρία q_{out} και της κανονικοποιημένης χωρητικότητας X .

συνολικής χωρητικότητας q της μπαταρίας, και όχι των q_1 και q_2 .

Στα γραφήματα του σχήματος 5.11 παρουσιάζουμε τις μεταβολές της άμεσα διαθέσιμης χωρητικότητας q_1 , της δεσμευμένης χωρητικότητας q_2 και της συνολικής χωρητικότητας q του *KiBaM* μοντέλου. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ενώ, τόσο το q_1 όσο και το q_2 , έχουν δυναμική συμπεριφορά, η συνολική χωρητικότητα q (που είναι το άθροισμα των δύο χωρητικότητων) δεν παρουσιάζει δυναμική συμπεριφορά [12]. Μπορούμε να δούμε πως η άμεσα διαθέσιμη χωρητικότητα q_1 μειώνεται κατά τη διάρκεια αποφόρτισης και τη διαδικασία ανάκτησης της χωρητικότητας τις περιόδους παύσης. Η δυναμική συμπεριφορά του q_1 είναι αντίστοιχη με την συμπεριφορά που παρατηρούμε στα πειραματικά δεδομένα της τάσης των μπαταριών, που δεν παρουσιάζεται στην προσομοίωση (σχήμα 5.9). Η δεσμευμένη χωρητικότητα q_2 δεν επηρεάζεται από το εξωτερικό κύκλωμα, λειτουργεί σαν ολοκληρωτής της διαφοράς των $h_1 = \frac{q_1}{c}$ και $h_2 = \frac{q_2}{1-c}$ (βλέπε σχήμα 4.1). Φαίνεται ότι τα q_1 και q_2 συμπληρώνουν το ένα το άλλο, καθώς το άθροισμά τους δεν περιέχει καμιά εσωτερική δυναμική.

Συνεπώς, η εσωτερική δυναμική της μπαταρίας παραμένει κρυφή και μόνο η εξωτερική δυναμική της μπαταρίας γίνεται ορατή στο μοντέλο *KiBaM*. Η τάση της μπαταρίας δεν θα έπρεπε να περιγράφεται μόνο βάσει της ροής ρεύματος από την μπαταρία, αλλά και από την εσωτερική δυναμική. Η παρούσα δομή του μοντέλου είναι επαρκής μόνο για μεγάλης διάρκειας προσομοιώσεις. Για μικρής διάρκειας προσομοιώσεις, όπου η δυναμική συμπεριφορά της τάσης των μπαταριών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, μπορούμε



Σχήμα 5.11.: Προσομοιώσεις της άμεσα διαθέσιμης χωρητικότητας q_1 , της δεσμευμένης χωρητικότητας q_2 και της συνολικής χωρητικότητας q .

να πούμε ότι το μοντέλο KiBaM που χρησιμοποιήσαμε εδώ δεν είναι επαρκές.

5.4. Συμπεράσματα

Η δυνατότητα να μοντελοποιείς ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που αποτελείται από μεγάλο αριθμό μπαταριών, σαν μία μοναδική μπαταρία είναι μια σημαντική απλοποίηση. Το βάρος κάθε απλοποίησης όμως, κρίνεται από τις ανάγκες του εκάστοτε προβλήματος. Στην παράγραφο 5.2 παραθέσαμε μια σειρά παραδοχών που χρησιμοποιήσαμε για την απλοποίηση του μοντέλου στην παρούσα εργασία.

Για να αποτιμήσουμε την εγκυρότητα του KiBaM μια σειρά προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν σε αντιπαραβολή με τα πραγματικά δεδομένα. Σε αυτές τις προσομοιώσεις βρήκαμε το KiBaM να ανταποκρίνεται με μεγάλη ακρίβεια, ακολουθώντας τα πειραματικά δεδομένα.

Μελετώντας την συμπεριφορά του μοντέλου λεπτομερέστερα, διαπιστώσαμε ότι το μοντέλο είναι ικανό να προβλέψει την μεταβολή της τάσης σε σχέση με την κατάσταση φόρτισης των μπαταριών καθώς και την απότομη πτώση της τερματικής τάσης όταν

βρίσκεται κοντά στην πλήρη εκφόρτισή της. Επίσης, βρήκαμε το μοντέλο χωρητικότητας να λειτουργεί με μεγάλη ακρίβεια προσομοιώνοντας την εσωτερική δυναμική του φαινομένου ανάκτησης των μπαταριών. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, η δυναμική συμπεριφορά της τάσης των μπαταριών (φαινόμενο ανάκτησης τάσης) φαίνεται να αγνοείται τελείως από το KiBaM μοντέλο.

Οι παρατηρήσεις αυτές μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο είναι αξιόπιστο σε μεγάλης διάρκειας προσομοιώσεις όπου η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών είναι κεντρικής σημασίας. Ενώ σε μικρού χρόνου προσομοιώσεις, όπου η δυναμική συμπεριφορά της τάσης διαδραματίζει εξίσου σημαντικό ρόλο, το μοντέλο αξιολογείται ως μη επαρκές.

6. Εικονικές σύγχρονες μηχανές

Η σταθερότητα των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται παραδοσιακά χρησιμοποιώντας μεγάλες σύγχρονες μηχανές με μεγάλη μηχανική αδράνεια ώστε να απορροφούν τις διαταραχές του συστήματος.

Η διαρκής εισαγωγή μεγάλης κλίμακας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έχουν επηρεάσει δυσμενώς την σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου. Από την μια πλευρά, η ισχύς που παρέχουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει μεγάλες διακυμάνσεις που εξαρτώνται από συνθήκες εξωτερικές του δικτύου (ηλιοφάνεια, άνεμος κτλ.), ενώ από την άλλη είναι διασυνδεδεμένες μέσω ηλεκτρονικών ισχύος που δεν παρέχουν σύγχρονη αδράνεια. Όσο η εισαγωγή θα συνεχίζεται τα επόμενα χρόνια, κάποιες από τις μεγάλες σύγχρονες γεννήτριες θα περιορίσουν την λειτουργία τους ή ακόμα και θα την διακόψουν σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής αδράνειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργώντας μεγάλες διαταραχές στη συχνότητα και στην ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος.

Μία προτεινόμενη λύση στο αναδυόμενο αυτό πρόβλημα, λαμβάνοντας υπόψη τους παρόντες περιορισμούς στις στρατηγικές ελέγχου του συστήματος, είναι να παρέχουμε εναλλακτικά της σύγχρονης αδράνειας, εικονική περιστροφική αδράνεια. Αρχικώς, αυτό μπορεί να επιτευχθεί τοποθετώντας σύστημα αποθήκευσης σε κάθε μονάδα ανανεώσιμης ενέργειας μαζί με τον απαραίτητο έλεγχο στη διασύνδεση των ηλεκτρονικών ισχύος. Οι μονάδες DG τότε θα λειτουργούν σαν εικονικές σύγχρονες μηχανές (*ΕΣΜ*), υιοθετώντας μερικές από τις επιθυμητές ιδιότητες των σύγχρονων μηχανών (*ΣΜ*) για μικρά χρονικά διαστήματα όταν αυτό είναι επιθυμητό. Η αποθήκευση ενέργειας σε αυτή την περίπτωση παίζει το ρόλο της κινητικής ενέργειας των σύγχρονων μηχανών, με αυτό τον τρόπο η δυναμική σταθερότητα του δικτύου μπορεί να βελτιωθεί.

Η έννοια των σύγχρονων εικονικών μηχανών περιγράφει ένα νέου τύπου αντιστροφέα, ο οποίος μαζί με την αποθήκευση λειτουργεί σαν μια ηλεκτρομηχανική σύγχρονη μηχανή. Η χρήση των αντιστροφέων επιτρέπει μεγάλη ευελιξία στον έλεγχο της ισχύος, καθώς και στην μορφή των κυματομορφών του ρεύματος εξόδου, οι *ΕΣΜ* εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα αυτά για να προσαρμόσουν την συμπεριφορά λειτουργίας τους σε αντιστοιχία με την λειτουργία των σύγχρονων γεννητριών.

Η ιδέα των εικονικών σύγχρονων μηχανών, παρουσιάστηκε και μελετήθηκε κατά τη διάρκεια του προγράμματος VSYNC που συντονίστηκε από το ερευνητικό κέντρο ECN της Ολλανδίας. Η σκοπιμότητα της συσκευής ερευνήθηκε αρχικώς μέσω προσομοιώσεων σε διάφορα σενάρια λειτουργίας [28, 27, 31, 32]. Μεγάλος αριθμός αλγορίθμων προτάθηκαν για τη λειτουργία των συσκευών [27, 33, 35], ενώ μικρού και μεσαίου

μεγέθους E_{SM} αναπτύχθηκαν (5 kW και 100 kW αντίστοιχα) για να αποδείξουν την λειτουργικότητα των συσκευών [29].

6.1. Εικονική αδράνεια

Ο στόχος μιας εικονικής σύγχρονης μηχανής (E_{SM}) είναι να αλληλεπιδρά με το δίκτυο, εισάγοντας και απορροφώντας ενέργεια από αυτό σύμφωνα με τις διακυμάνσεις και το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας. Αυτό πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μιμείται μια πραγματική σύγχρονη μηχανή. Η κινητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο ρότορα μιας σύγχρονης μηχανής, που έχει ροπή αδράνειας J και περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω_m είναι:

$$E_{kin} = \frac{J \cdot \omega_m^2}{2}$$

Σε περίπτωση μεταβολής στο ισοζύγιο μεταξύ της ενέργειας που παράγεται και καταναλώνεται στο δίκτυο, η κινητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην περιστρεφόμενη μάζα της γεννήτριας χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει αυτές τις παρεκκλίσεις. Καθώς η συχνότητα του δικτύου καθορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής της σύγχρονης γεννήτριας, έχει ως αποτέλεσμα αυτή να μεταβάλλεται από την ονομαστική της τιμή.

Γενικά, τα μοντέλα που αναλύουν μια σύγχρονη γεννήτρια ($\Sigma\Gamma$) αποτελούνται από τις εξισώσεις ταλάντωσης που περιγράφουν την περιστροφική κίνηση του ρότορα και τις εξισώσεις τάσης που περιγράφει την τάση των ακροδεκτών και το ρεύμα κάθε φάσης. Αν θεωρήσουμε ότι η γεννήτρια λειτουργεί κοντά στην ονομαστική της ταχύτητα, και ΔP_e είναι η μεταβολή της ενεργού ηλεκτρικής ισχύος γύρω από ένα στατικό σημείο ισορροπίας ενώ ΔP_m μια μεταβολή της μηχανικής ισχύος η οποία παρέχεται στον άξονα της γεννήτριας, η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την επιτάχυνση του δρομέα θα είναι [17]:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = 2H \cdot \frac{d\Delta\omega}{\Delta t} \quad (6.1)$$

όπου

H είναι η χρονική σταθερά αδράνειας της γεννήτριας

$\Delta\omega$ η απόκλιση από τη σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα

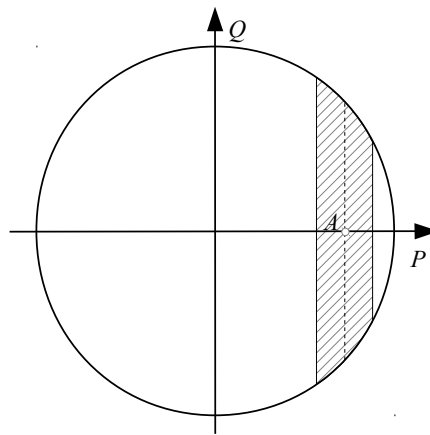
Σύμφωνα με την εξίσωση (6.1) φαίνεται ότι η ισχύς εξόδου, σχετίζεται με το ρυθμό μεταβολής του $d\omega/dt$. Η εικονική περιστροφική αδράνεια μπορεί να επιτευχθεί ελέγχοντας την διασύνδεση των ηλεκτρονικών ισχύος με τέτοιο τρόπο ώστε να ανταλλάσσει πραγματική ισχύ με το δίκτυο σύμφωνα με την σχέση (6.1). Θέτοντας $P_{VSG} = P_m - P_e$

στην εξίσωση ταλάντωσης (6.1) παίρνουμε την εξίσωση ελέγχου για την δημιουργία εικονικής αδράνειας:

$$P_{VSG} = K_d \frac{d\omega}{dt} \quad (6.2)$$

6.2. Λειτουργία των εικονικών σύγχρονων μηχανών

Προκειμένου, η συμπεριφορά των σύγχρονων μηχανών (σχέση 6.1) να αποτυπωθεί στον έλεγχο των *ΕΣΜ* πρέπει να υπολογιστεί η ποσότητα της ενεργού και άεργου ισχύος που θα ανταλλαχθεί με το δίκτυο. Αυτή η ποσότητα ενέργειας εξαρτάται αρχικά από την συχνότητα. Το είδος της πηγής ενέργειας που τροφοδοτεί η *ΕΣΜ* παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο. Για παράδειγμα, στην περίπτωση μιας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, η κύρια προτεραιότητα του ελέγχου θα είναι να παρέχει ενεργό ισχύ στο δίκτυο, αφήνοντας μόνο ένα μικρό μέρος ενέργειας για την αντιστάθμιση της μεταβολής της συχνότητας. Ανάλογα με την φύση της πηγής, ένα μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας θα χρησιμοποιηθεί για να δοθεί στο δίκτυο, ενώ το υπόλοιπο θα χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει εικονική αδράνεια.



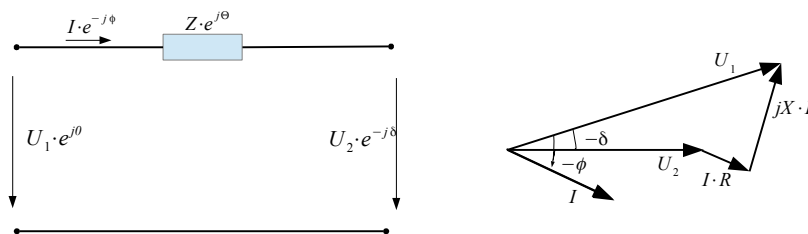
Σχήμα 6.1.: Περιοχή λειτουργίας, ενεργού και άεργου ισχύος, των εικονικών σύγχρονων μηχανών [40].

Η λειτουργία των *ΕΣΜ*, λοιπόν, είναι περιορισμένη σε μια μικρή περιοχή γύρω από το σημείο λειτουργίας που καθορίζει η πραγματική ισχύς που η πηγή παρέχει στο δίκτυο. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο σχήμα 6.1, όπου *A*, είναι η πραγματική ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο, ενώ το σκιασμένο χωρίο δείχνει την περιοχή λειτουργίας των

ΕΣΜ. Επιπλέον περιορισμοί μπαίνουν από το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα της διεπαφής των ηλεκτρονικών ισχύος. Συγκεκριμένες εφαρμογές βάζουν επιπρόσθετους ιδιαίτερους περιορισμούς. Για παράδειγμα το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών περιορίζει συγκεκριμένες καταστάσεις λειτουργίας. Δεν μπορείς να απορροφήσεις ενέργεια από το δίκτυο όταν οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες. Σε περίπτωση που η κυρία λειτουργία των *ΕΣΜ* είναι η ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου, το σύνολο της αποθηκευμένης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή εικονικής αδράνειας [40]. Αναφερόμενοι στην περιοχή λειτουργίας του σχήματος 6.1, ολόκληρος ο κύκλος στον PQ - χώρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Είναι εμφανές από αυτό, ότι η ισχύς μπορεί να ρέει και προς τις δύο κατευθύνσεις, δηλαδή από τα μέσα αποθήκευσης ενέργειας προς το δίκτυο, και το αντίθετο.

6.3. Υψηλού επιπέδου έλεγχος των ΕΣΜ

Για να μπορέσουμε να προσεγγίσουμε το πρόβλημα του ελέγχου των *ΕΣΜ*, πρέπει αρχικά να εξετάσουμε τον τρόπο μεταφοράς της ισχύος σε μια γραμμή μεταφοράς. Η γραμμή μεταφοράς του σχήματος 6.2 μοντελοποιείται ως ένα RL κύκλωμα με τις τερματικές τάσεις στις άκρες της γραμμής να παραμένουν σταθερές.



Σχήμα 6.2.: Απλοποιημένο διάγραμμα γραμμής μεταφοράς.

Η ροή ισχύος στα άκρα της γραμμής μεταφοράς δίδεται από την σχέση:

$$\bar{S} = P + jQ = \frac{V_1^2}{Z} \cdot e^{j\theta} - \frac{V_1 \cdot V_2}{Z} \cdot e^{j(\delta+\theta)}$$

Θεωρώντας ότι $Z \cdot e^{j\theta} = R + jX$ οι προηγούμενες σχέσεις γράφονται ως εξής:

$$\begin{aligned} P &= \frac{V_1}{R^2 + X^2} \cdot [R \cdot (V_1 - V_2 \cos \delta) + X V_2 \sin \delta] \\ Q &= \frac{V_1}{R^2 + X^2} \cdot [-R \cdot V_2 \sin \delta + X \cdot (V_1 - V_2 \cos \delta)] \end{aligned} \quad (6.3)$$

και

$$\begin{aligned} V_2 \cdot \sin \delta &= \frac{X \cdot P - R \cdot Q}{V_1} \\ V_1 - V_2 \cdot \cos \delta &= \frac{R \cdot P - X \cdot Q}{V_1} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Από τις σχέσεις (6.3) και (6.4) γίνεται εμφανές ότι μεταξύ του ελέγχου, ενεργού ισχύος-συχνότητας και άεργου ισχύος-τάσης υπάρχει αμοιβαία εξάρτηση, η οποία είναι πάντα παρούσα σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες στο σύστημα. Μεταβολή της τάσης σε ένα σημείο του δικτύου προκαλεί μεταβολή της παραγόμενης ή απορροφώμενης ισχύος, και μεταβολή της συχνότητας-γωνίας επίδρα επίσης στην άεργο ισχύ.

Ο ανεξάρτητος ή αποσυνδεδεμένος έλεγχος ενεργού ισχύος-συχνότητας και άεργου ισχύος-τάσης μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο στο βαθμό που η γωνία δ μεταξύ των ζυγών διατηρείται σε μικρές τιμές και η αντίσταση των γραμμών θεωρηθεί αρκετά μικρότερη της αυτεπαγωγής τους ($X \gg R$), οπότε η επίδραση της γωνίας στην άεργη ισχύ παραμένει ασθενής.

6.3.1. Ρύθμιση συχνότητας

Στα συστήματα ηλεκτρικής ισχύος, κάθε μονάδα παραγωγής μπορεί να συνεισφέρει στη ρύθμιση της συχνότητας μέσω του πρωτεύοντα ρυθμιστή στροφών. Ακολουθώντας την εξίσωση ταλάντωσης (6.1) και επεκτείνοντας την σχέση (6.2) ώστε να συμπεριλάβει τον στατισμό των σύγχρονων γεννητριών, η πραγματική ισχύς της εικονικής σύγχρονης μηχανής θα δίνεται από την εξίσωση:

$$P_{VSG} = K_d \frac{d\omega}{dt} + K_p \cdot (\omega - \omega_{ref}) \quad (6.5)$$

Από αυτή είναι εμφανές ότι ένα μέρος της ισχύος που ανταλλάσσεται με το δίκτυο, αφορά την εικονική αδράνεια που σχετίζεται με τον θετικό ή αρνητικό ρυθμό μεταβολής της συχνότητας (ROCOF), και ένα άλλο με την μεταβολή της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή. Οι συντελεστές K_p και K_d είναι συντελεστές βάρους που λένε

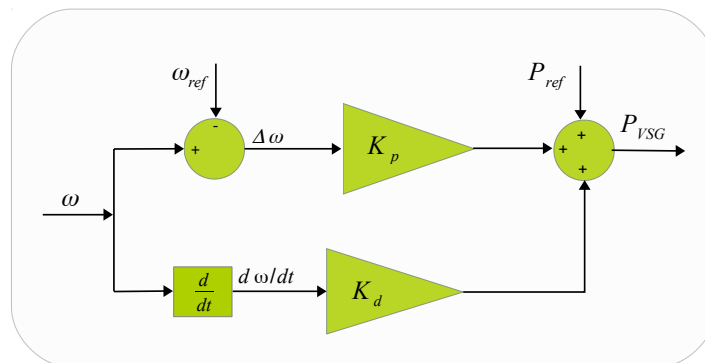
πόση θα είναι η συνεισφορά στην τελική ρύθμιση. Ο K_d ορίζει την ποσότητα της ενεργού ισχύος που πρέπει να αποδοθεί όταν η μέγιστη καθορισμένη μεταβολή στη συχνότητα (Hz/s) πραγματοποιηθεί. Έχει αρνητική τιμή ώστε να αντιστέκεται στην κατεύθυνση των μεταβολών που πραγματοποιούνται, αυτή είναι άλλωστε είναι και η φυσική σημασία της αδράνειας.

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ο παράγοντας $K_d \cdot d\omega/dt$ θα είναι μηδενικός, και η σχέση (6.5) μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$P_{VSG} = K_p \cdot (\omega - \omega_{ref})$$

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ο ελεγκτής συχνότητας συμπεριφέρεται ανάλογα με τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές στατισμού των πρωτεύοντων ελεγκτών συχνότητας των σύγχρονων μηχανών. Ο συντελεστής $1/k_p$ αποτελεί την κλίση της καμπύλης στατισμού και επιλέγεται ώστε η ονομαστική ισχύς της ΕΣΜ να αποδίδεται όταν η μεταβολή της συχνότητας είναι η μέγιστη επιτρεπτή. Είναι επίσης αρνητικός ώστε το σύστημα να έχει την τάση να επανέρχεται στην ω_{ref} .

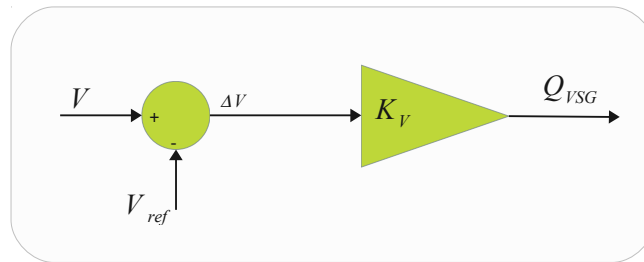
Ο έλεγχος συχνότητας λειτουργεί με δύο παραλλήλους τρόπους, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3: ο ένας κλάδος αφορά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και αντιστοιχεί στην καμπύλη στατισμού έλεγχο των σύγχρονων γεννητριών ($\Sigma\Gamma$), ενώ ο δεύτερος κλάδος περιγράφει την δυναμική συμπεριφορά του έλεγχου και μιμείται την αδρανειακή συμπεριφορά των $\Sigma\Gamma$ (έλεγχος ROCOF). Το P_{ref} που φαίνεται στο σχήμα 6.3, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διασύνδεση για τον δευτερεύοντα έλεγχο που πραγματοποιείται στο επίπεδο του δικτύου. Εδώ έχει ως στόχο, όπως θα δούμε αργότερα, να εισάγει την διασύνδεση της διαχείρισης των μπαταριών στην συμπεριφορά λειτουργίας των εικονικών σύγχρονων μηχανών.



Σχήμα 6.3.: Οι δύο κλάδοι ελέγχου συχνότητας των σύγχρονων εικονικών μηχανών.

6.3.2. Ρύθμιση τάσης

Οι ρυθμίζουσες γεννήτριες μεταβάλλουν τη διέγερσή τους για να απορροφούν ή να παράγουν άεργο ισχύ ώστε να ελέγχουν την τάση του δικτύου. Όταν λειτουργούν σε υπερδιέγερση παράγουν άεργο ισχύ, ενώ όταν λειτουργούν σε υποδιέγερση απορροφούν άεργο ισχύ από το δίκτυο. Η δυνατότητα των εικονικών σύγχρονων γεννητριών να λειτουργούν σε όλο το φάσμα του PQ-χώρου (σχήμα 6.1) μας δίνει τη δυνατότητα παράλληλα με τον έλεγχο της συχνότητας να πραγματοποιήσουμε και έλεγχο τάσης μιμούμενοι την λειτουργία των σύγχρονων γεννητριών.



Σχήμα 6.4.: Έλεγχος τάσης των σύγχρονων εικονικών μηχανών.

Ο αντίστοιχος έλεγχος άεργου ισχύος - τάσης φαίνεται στο σχήμα 6.4 και περιγράφεται από την εξίσωση (6.6):

$$Q_{VSG} = K_V \cdot (V - V_{ref}) \quad (6.6)$$

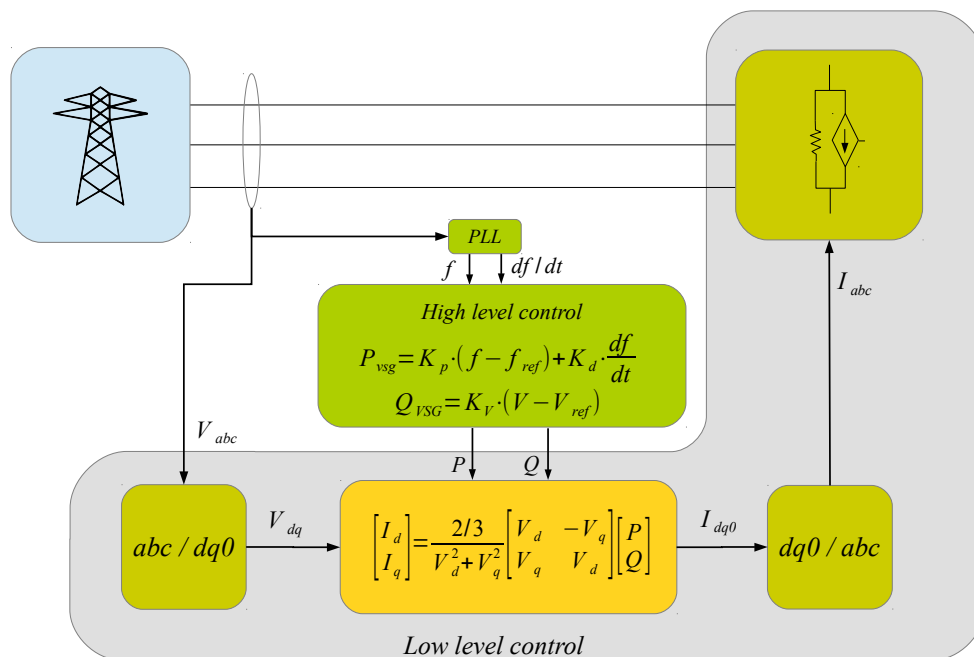
Ο συντελεστής $1/K_V$ αποτελεί και σε αυτή την περίπτωση την κλίση της καμπύλης στατισμού. Η τιμή της καθορίζει την ποσότητα άεργου ισχύος που θα ανταλλαχθεί με το δίκτυο κατά την μεταβολή της τάσης από την ονομαστική της τιμή. Η βασική διαφορά μεταξύ του ελέγχου τάσης του αντιστροφέα και της σύγχρονης μηχανής, έχει σχέση με την απόκριση του ελέγχου. Στον αντιστροφέα είναι ταχεία ενώ στην σύγχρονη μηχανή σχετικά αργή, λόγω των μεγάλων σταθερών χρόνου που έχει κατά πρώτο λόγο το τύλιγμα διέγερσης και κατά δεύτερο της διεγέρτριας [41].

6.4. Χαμηλού επιπέδου έλεγχος των ΕΣΜ

Η έξοδος των ελεγκτών ρύθμισης τάσης και συχνότητας που αναφέρεται ως υψηλού επιπέδου έλεγχος, χρησιμοποιείται ως αναφορά για την ενεργό και άεργο ισχύ που είναι να ανταλλάξει η εικονική σύγχρονη μηχανή με το δίκτυο. Ο σκοπός του χαμηλού επιπέδου ελέγχου έγκειται στον υπολογισμό του ρεύματος που πρέπει να εφαρμόσει η εικονική σύγχρονη μηχανή, ώστε να πραγματοποιηθεί η επιθυμητή ανταλλαγή ισχύος. Ανάλογα με τον τρόπο υλοποίησης και το επίπεδο αφαίρεσης της υλοποίησης αυτό

μπορεί να είναι το V_{ref} που τροφοδοτεί τις εισόδους του αντιστροφέα ή το I_{ref} μιας πηγής ρεύματος σε μια πιο υψηλού επιπέδου υλοποίηση, όπως αυτή που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο.

Ο χαμηλού επιπέδου έλεγχος λοιπόν, παίρνει ως είσοδο τις τιμές αναφοράς της ενεργού και άεργου ισχύος, και υπολογίζει το ρεύμα που θα οδηγήσει την πηγή ρεύματος όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 6.5.: Επισκόπηση του τρόπου λειτουργίας της εικονικής σύγχρονης μηχανής.

Η παραδοσιακή θεωρία ισχύος για μονοφασικά και τριφασικά ημιτονικά συστήματα, παρότι καλά θεμελιωμένη, έχει δείχθει ότι έχει αρκετά πρόβλημα στο να περιγράψει επαρκώς μεταβατικά φαινόμενα ή φαινόμενα όπου η παρουσία μη γραμμικών στοιχείων (πχ. ηλεκτρονικά ισχύος) είναι παρούσα. Αντ' αυτού, η $p - q$ θεωρία είναι βασισμένη σε στιγμιαίες ισχύς, ορισμένες στο πεδίο του χρόνου, και δεν επιβάλλουν κανένα περιορισμό στις κυματομορφές της τάσης ή του ρεύματος. Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με εγχυρότητα, όχι μόνο στη μόνιμη κατάσταση, αλλά επίσης και στις μεταβατικές καταστάσεις [4].

Η ενεργός και άεργος ισχύς για ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα μπορεί να γραφτεί σε dq συντεταγμένες ως εξής:

$$P = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q) \quad (6.7)$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_d I_q - V_q I_d) \quad (6.8)$$

όπου,

V_d, V_q, I_d, I_q οι τάσεις και τα ρεύματα σε dq συντεταγμένες.

Τα V_d και V_q στις παραπάνω σχέσεις μπορούν να υπολογιστούν από τον μετασχηματισμό Park ως εξής:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Λύνοντας τώρα τις σχέσεις (6.7), (6.8) ως προς I_d και I_q παίρνουμε το σύστημα δύο εξισώσεων:

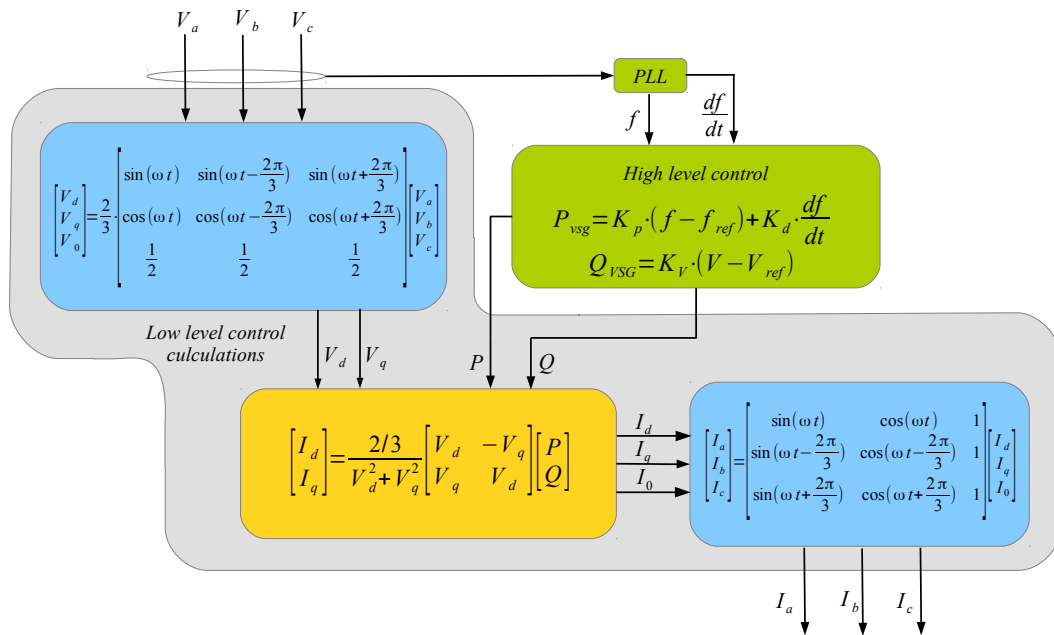
$$I_d = \frac{2(V_d P - V_q Q)}{3(V_d^2 + V_q^2)} \quad (6.9)$$

$$I_q = \frac{2(V_d P - V_q Q)}{3(V_d^2 + V_q^2)} \quad (6.10)$$

Όπου με αντίστροφο Park μετασχηματισμό μπορούμε να υπολογίσουμε τα ρεύματα I_{abc} που θα οδηγήσουν τις εξωτερικά ελεγχόμενες πηγές ρεύματος:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 1 \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix}$$

Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζεται γραφικά η αναλυτική δομή λειτουργίας του χαμηλού ελέγχου των ΕΣΜ συσκευών.



Σχήμα 6.6.: Χαμηλού επιπέδου έλεγχος της Εικονικής Σύγχρονης Μηχανής.

7. Συνεισφορά των ΕΣΜ στην ευστάθεια συχνότητας

Για την ικανοποιητική λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ισχύος, η συχνότητα του συστήματος πρέπει να διατηρείται σχεδόν σταθερή. Η συχνότητα του συστήματος εξαρτάται πρωτίστως από το ισοζύγιο της ενεργού ισχύος. Καθώς η συχνότητα είναι ένας κοινός παράγοντας σε όλο το σύστημα, μία μεταβολή στη ζήτηση ενεργού ισχύος σε ένα σημείο αντανακλάται σε όλο το σύστημα ως μεταβολή στη συχνότητα.

Η ευστάθεια μικρών διαταραχών, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ορίζεται ως η ικανότητα του συστήματος ισχύος να διατηρεί τον συγχρονισμό του όταν αυτό υπόκειται σε μικρές διαταραχές. Αυτού του τύπου η ευστάθεια ονομάζεται επίσης ευστάθεια μονίμου καταστάσεως, και καλείται να εξετάσει αν ένα σημείο λειτουργίας είναι ευσταθές. Δηλαδή, εάν μετά από κάποια διαταραχή θα επανέλθει το σύστημα στο αρχικό σημείο λειτουργίας. Ο χρόνος αποκατάστασης, η μέγιστη υπερέψωση, η ταλάντωση του συστήματος, είναι εξίσου σημαντικές πληροφορίες για την σταθερότητα του συστήματος. Στα πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η ευστάθεια μικρών διαταραχών σχετίζεται κυρίως [17] με την ανεπαρκή απόσβεση των ταλαντώσεων του συστήματος. Οι εικονικές σύγχρονες μηχανές μέσω της εικονικής αδράνειας μπορούν να συνεισφέρουν στην καλύτερη εξομάλυνση των διαταραχών αυτών. Η ευστάθεια μικρών διαταραχών μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος, και την επίδραση σε αυτά, των εικονικών σύγχρονων μηχανών.

7.0.1. Στόχοι του παρόντος κεφαλαίου

Μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων έχει ασχοληθεί με την συνεισφορά των ΕΣΜ στην στήριξη της συχνότητας [32, 33, 27, 28, 29]. Άλλωστε η δημιουργία των συσκευών αυτών στοχεύει στη βελτίωση της ευστάθειας του δικτύου εκεί που η παρουσία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι μεγάλη [9, 32].

Ο στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να διερευνήσει την συνεισφορά της εισαγωγής εικονικών σύγχρονων μηχανών στην λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Διαφορετικά σενάρια ηλεκτρικών συστημάτων με διαφορετικό ποσοστό εισαγωγής ΕΣΜ συσκευών χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό.

7.1. Συμπεριφορά των ΕΣΜ

Οι μεταβολές της συχνότητας ενός δικτύου, όπως αναφέραμε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, επηρεάζεται από το ισοζύγιο ενεργού ισχύος και συνεπώς από τις μεταβολές του φορτίου στο σύνολο του δικτύου. Το πρόβλημα εξισορρόπησης ενέργειας είναι πρόβλημα εξισορρόπησης της συχνότητας και το αντίστροφο. Οι λειτουργίες του ελέγχου συχνότητας των εικονικών σύγχρονων μηχανών εξετάζονται εδώ τόσο σε σύνδεση, με απομονωμένα δίκτυα, όσο και σε διάταξη σύνδεσης με το άπειρο δίκτυο.

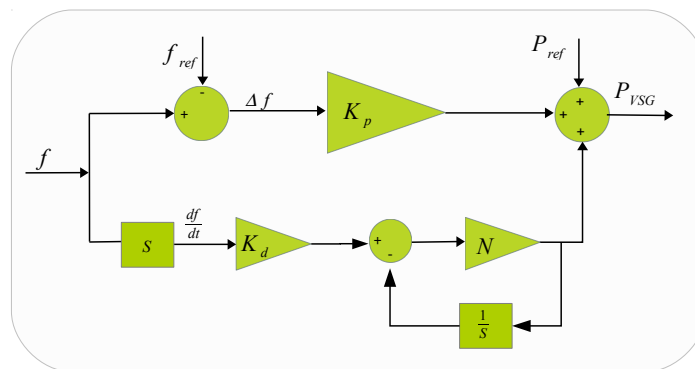
Η ρύθμιση συχνότητας πραγματοποιείται μέσω της ταχείας έκχυσης και απορρόφησης ενεργού ισχύος. Η σχέση (7.1) αποτελεί την μαθηματική έκφραση αυτού του ελέγχου:

$$P_{VSG} = K_d \frac{df}{dt} + K_p \cdot (f - f_{ref}) \quad (7.1)$$

Ωστόσο, το ποια είναι η ποσότητα της ισχύος που πρέπει να ανταλλαχθεί σε κάθε στιγμή, καθορίζεται από τους συντελεστές K_p και K_d . Οι συντελεστές επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε, το P_{VSG} να ισούται με την ονομαστική του τιμή P_{nom} όταν οι αντίστοιχες μέγιστες μεταβολές στην συχνότητα και στην μεταβολή της συχνότητας πραγματοποιούνται.

- $K_d = P_{nom}/1 \text{ Hz/sec}$
- $K_p = P_{nom}/1 \text{ Hz}$

Ο υπολογισμός του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας, ειδικά στις περιπτώσεις εκείνες όπου η μέτρηση γίνεται άμεσα από το κύκλωμα του δικτύου, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στο θόρυβο. Για το λόγο αυτό το σήμα που τροφοδοτεί των κλάδο του ROCOF ελέγχου, φιλτράρεται από βαθυπερατό φίλτρο. Στο σχήμα 7.1 φαίνεται η συνολική υλοποίηση σε μπλοκ διάγραμμα.



Σχήμα 7.1.: Απεικόνιση των δύο κλάδων ελέγχου της εικονικής σύγχρονης μηχανής. Στον δεύτερο κλάδο φαίνεται το βαθυπερατό φίλτρο για την αποθρομβοποίηση της συχνότητας.

Ο κύριος ρόλος των ΕΣΜ είναι να αντισταθμίζουν τις διαταραχές της συχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η καρδιά των εικονικών σύγχρονων γεννητριών βρίσκεται στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας των συσκευών. Η παράμετρος αυτή και ο τρόπος που αλληλεπιδρά η λειτουργία αντισταθμίσεως της συχνότητας στον έλεγχο των μπαταριών, εξετάζεται διεξοδικά στο κεφάλαιο 8. Για τις προσομοιώσεις αυτού του κεφαλαίου οι μπαταρίες θεωρούμε ότι έχουν άπειρη χωρητικότητα και σταθερή τάση, επιπλέον οι απώλειες φόρτισης αποφόρτισης των συσσωρευτών δεν λαμβάνονται υπόψιν.

Για να αποτιμήσουμε την συνεισφορά των εικονικών σύγχρονων μηχανών στην συνολική ευστάθεια του συστήματος, μεταβάλλουμε το συνολικό πραγματικό φορτίο προκαλώντας διαταραχές στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Ταυτόχρονα εξετάζουμε τις συνέπειες που προκαλούνται στο δίκτυο από την εισαγωγή των ΕΣΜ σε αυτό. Το ποσοστό διείσδυσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση [30]:

$$\%VSG_{penetrationlevel} = \frac{\sum P_{VSG}}{\sum P_{Load}} \times 100\%$$

όπου

$\sum P_{VSG}$ είναι η συνολική ονομαστική ενεργός ισχύς της εικονικής σύγχρονης μηχανής

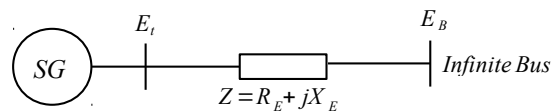
$\sum P_{Load}$ το συνολικό σταθερό ωμικό φορτίο

Για τον σκοπό των προσομοιώσεων διάφορες καμπύλες φορτίου χρησιμοποιούνται

7.1.1. Γεννήτρια σε άπειρο ζυγό

Ξεκινάμε την παρουσίαση μας με ένα σενάριο προσομοίωσης που έχει χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς σκοπούς ευρέως, επιχειρούμε να διερευνήσουμε, μέσα από αυτό το σενάριο αν η λειτουργία των εικονικών σύγχρονων μηχανών είναι αντίστοιχη με αυτή των σύγχρονων γεννητριών. Εξετάζουμε αν η αδρανειακή συμπεριφορά των VSG συσκευών είναι αντίστοιχη με την μηχανική αδράνεια των SG όταν μία διαταραχή της συχνότητας πραγματοποιηθεί.

Ας υποθέσουμε αρχικά μια σύγχρονη μηχανή συνδεδεμένη σε έναν άπειρο ζυγό μέσω μιας γραμμής μεταφοράς $Z = R_E + jX_E$, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.2.



Σχήμα 7.2.: Σύστημα γεννήτριας - άπειρου ζυγού.

Για οποιαδήποτε δεδομένη συνθήκη του συστήματος, το πλάτος της τάσης E_B και η συχνότητα f στον άπειρο ζυγό παραμένουν σταθερά. Ωστόσο, καθώς η μόνιμη κατάσταση του συστήματος θα μεταβάλλεται, η συχνότητα και η τάση του άπειρου ζυγού ενδέχεται να αλλάξουν, αντιπροσωπεύοντας μια αλλαγή στην κατάσταση λειτουργίας του εξωτερικού δικτύου.

Στο σενάριο που ακολουθεί ένα απλοποιημένο μοντέλο σύγχρονης μηχανής χρησιμοποιείται. Η εξίσωση κίνησης της, σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του Matlab/Simulink δίνεται από την σχέση:

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - K_d\Delta\omega)$$

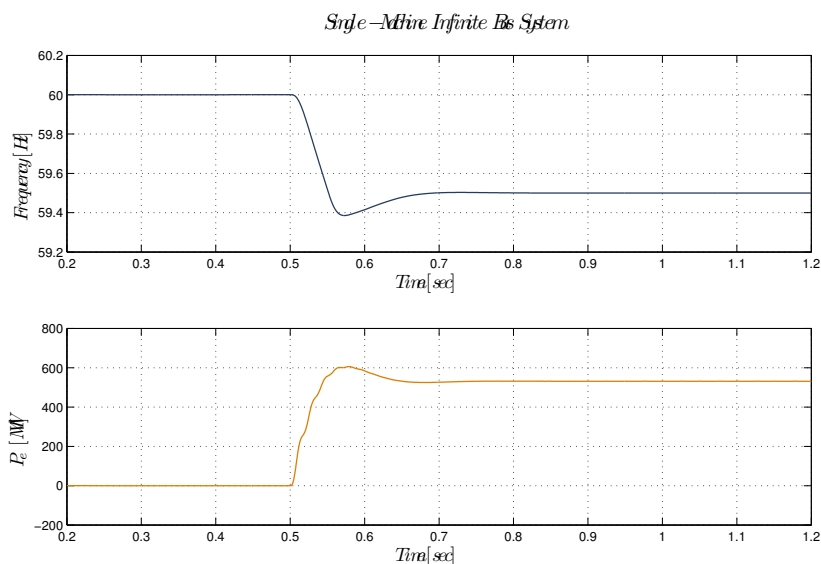
όπου

$\Delta\omega$ η ανά μονάδα μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας

K_d ο συντελεστής απόσβεσης

Το σενάριο προσομοίωσης χρησιμοποιεί μια σύγχρονη γεννήτρια ονομαστικών στοιχείων 1000 MVA , 315 KV . Η αδράνεια της μηχανής είναι $J = 168.870\text{ kgm}^2$.

Σε αυτήν την επίδειξη μια βηματική μεταβολή πραγματοποιείται στην συχνότητα του άπειρου ζυγού. Η γεννήτρια αρχικοποιείται ώστε να ξεκινά σε μόνιμη κατάσταση. Τη χρονική στιγμή $t = 0.5\text{ sec}$ η συχνότητα του δικτύου πέφτει απότομα στην τιμή των 59.5 Hz . Η απόκριση της ενεργού ισχύος φαίνεται στο σχήμα 7.3.

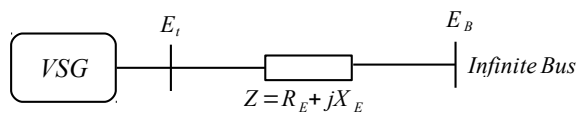


Σχήμα 7.3.: Σύγχρονη γεννήτρια συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό. Παρουσιάζεται η απόκριση της γεννήτριας στη βηματική μεταβολή της συχνότητας.

Όπως ήταν αναμενόμενο η γεννήτρια αντιδρά στην μεταβολή της συχνότητας παρέχοντας ενεργό ισχύ στο δίκτυο. Μετά από μια μικρή μεταβατική περίοδο το σύστημα σταθεροποιείται σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3.

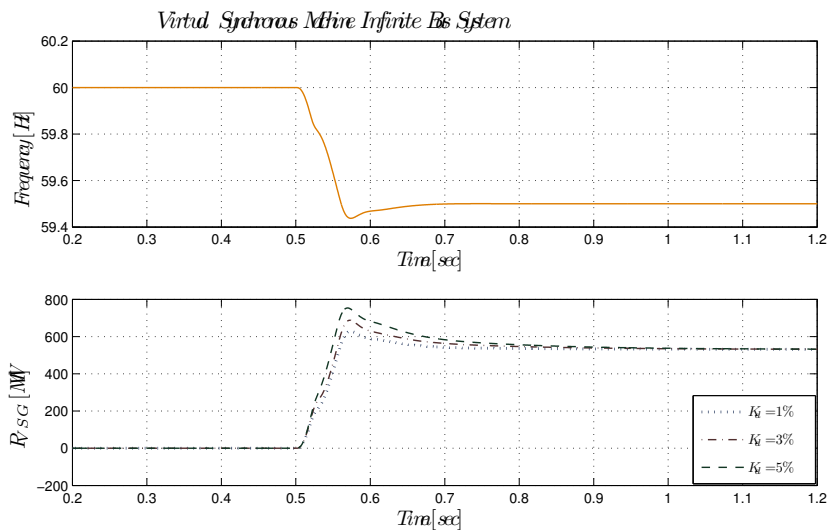
7.1.2. ΕΣΜ σε άπειρο ζυγό

Επαναλαμβάνουμε την προηγούμενη διάταξη, συνδέοντας μια εικονική σύγχρονη μηχανή μέσω μιας γραμμής μεταφοράς $Z = R_E + jX_E$, σε άπειρο ζυγό, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.4.



Σχήμα 7.4.: Σύστημα εικονικής σύγχρονης μηχανής - άπειρου ζυγού.

Σε αυτό το σενάριο λειτουργίας, το μοντέλο εικονικής σύγχρονης μηχανής που χρησιμοποιείται είναι αυτό του σχήματος 7.1. Η ονομαστική ισχύς και τάση της ΕΣΜ, επιλέγεται στα $P_{nom} = 1000 \text{ MVA}$ και $V_{nom} = 315 \text{ KV}$ αντίστοιχα.



Σχήμα 7.5.: Εικονική σύγχρονη γεννήτρια συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό. Παρατηρούμε την απόκριση της ΕΣΜ στη βηματική μεταβολή της συχνότητας.

Εξαιτίας της εξίσωσης ταλάντωσης που έχει ενσωματωθεί στον έλεγχο της ΕΣΜ, η απόκρισή του στην μεταβολή της συχνότητας, μεταβάλλει της ενεργό ισχύ εξόδου ανάλογα με τη μεταβολή της συχνότητας του δικτύου.

Τη χρονική στιγμή $t = 0.5 \text{ sec}$, η συχνότητα μεταβάλλεται όπως και πριν από 60 Hz σε 59.5 Hz . Το σχήμα 7.5 παρουσιάζει την απόκριση της ενεργού ισχύος για διαφορετικές τιμές του συντελεστή αδράνειας K_d και δείχνει την ικανότητα των ΕΣΜ να ρυθμίζουν την ενεργό ισχύ για να υποστηρίξουν την συχνότητα κατά τη διάρκεια μεταβολής της συχνότητας του δικτύου.

Ο συντελεστής K_p επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε στην καινούρια μόνιμη κατάσταση, αφού η διαταραχή έχει πραγματοποιηθεί, η ΕΣΜ να προσφέρει στο δίκτυο ίση ισχύ με αυτή που προσφέρει η σύγχρονη γεννήτρια, έτσι $K_p = P_{nom}$. Ομοίως, για το συντελεστή K_d δώσαμε ένα εύρος τιμών ώστε η μέγιστη υπερύψωση της εικονικής σύγχρονης μηχανής να είναι αντίστοιχη με αυτή της σύγχρονης γεννήτριας, έτσι $K_d = 1\% - 5\%$ του P_{nom} .

Στο σχήμα παρατηρούμε ότι καθώς μεταβάλλεται ο συντελεστής K_d , όπως είναι αναμενόμενο, μεταβάλλεται η απόκριση της ΕΣΜ. Όσο μεγαλύτερος ο συντελεστής τόσο πιο έντονα αντιστέκεται η εικονική αδράνεια στη μεταβολή της συχνότητας.

7.1.3. Παράλληλη λειτουργία ΣΓ και ΕΣΜ στο άπειρο δίκτυο

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης, ένα σύστημα αποτελούμενο από μια σύγχρονη γεννήτρια παράλληλα με μια εικονική σύγχρονη μηχανή, συνδέεται με το άπειρο δίκτυο, σχήμα 7.6. Η διαταραχή πραγματοποιείται από την μεταβολή του δυναμικού φορτίου. Η λειτουργία του συστήματος αποτιμάται, για τα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας, με διαφορετικό ποσοστό διείσδυσης της εικονικής σύγχρονης μηχανής.

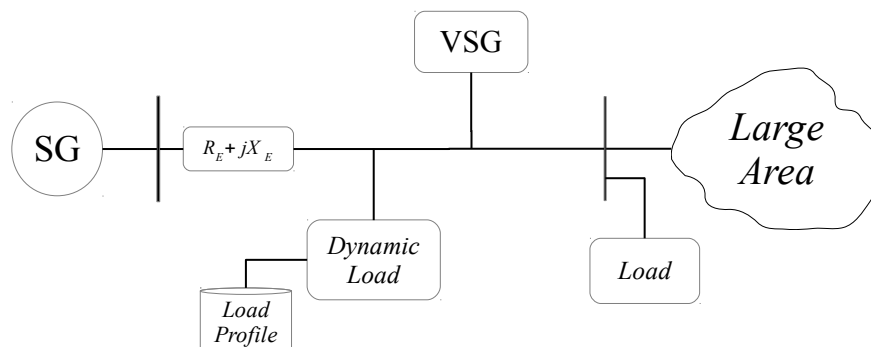


Figure 7.6.: Σύστημα μιας περιοχής αποτελούμενο από SG και VSG συνδεδεμένο στο άπειρο δίκτυο.

Το σενάριο προσομοίωσης χρησιμοποιεί μια σύγχρονη γεννήτρια ονομαστικών στοιχείων $P_n = 112 \text{ KVA}$, $V_n = 762 \text{ V}$. Το ηλεκτρικό μέρος της μηχανής αντιπροσωπεύεται από ένα έκτης τάξεως μοντέλο και το μηχανικό μέρος είναι το ίδιο όπως και στο απλοποιημένο μπλοκ σύγχρονης μηχανής της προηγούμενης παραγράφου. Η προσομοίωση ξεκινά με το σύστημα σε μόνιμη κατάσταση. Το σταθερό φορτίο του δικτύου του σχήματος 7.6 είναι 90 KW .

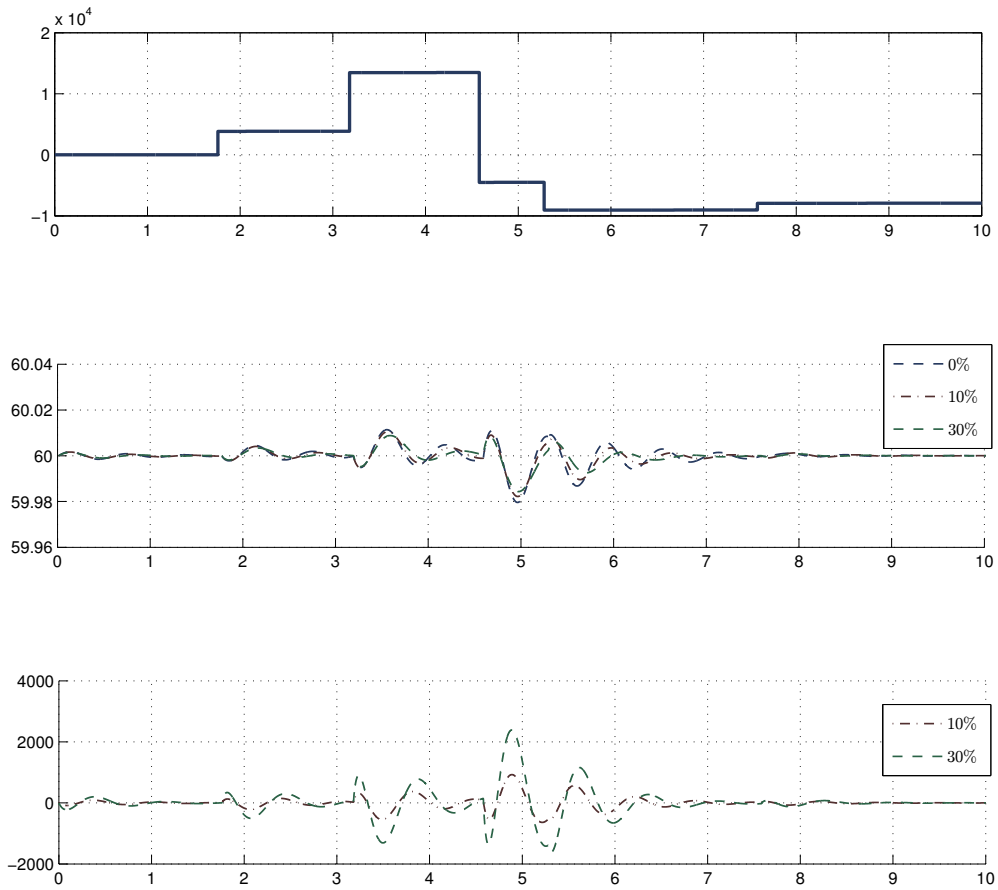
Οι λεπτομέρειες των προσομοιώσεων έχουν ως εξής:

- Το ποσοστό διείσδυσης των ΕΣΜ αυξάνει σταδιακά. Με αυτόν τον τρόπο τρία υπό-σενάρια λαμβάνονται, με ποσοστό 0.0, 10.0, και 30.0% αντίστοιχα.
- Το σταθερό φορτίο του δικτύου παραμένει αμετάβλητο.
- Η διαταραχή προκαλείται από το δυναμικό φορτίο σύμφωνα με συγκεκριμένα προφίλ (καμπύλες μεταβλητού φορτίου).

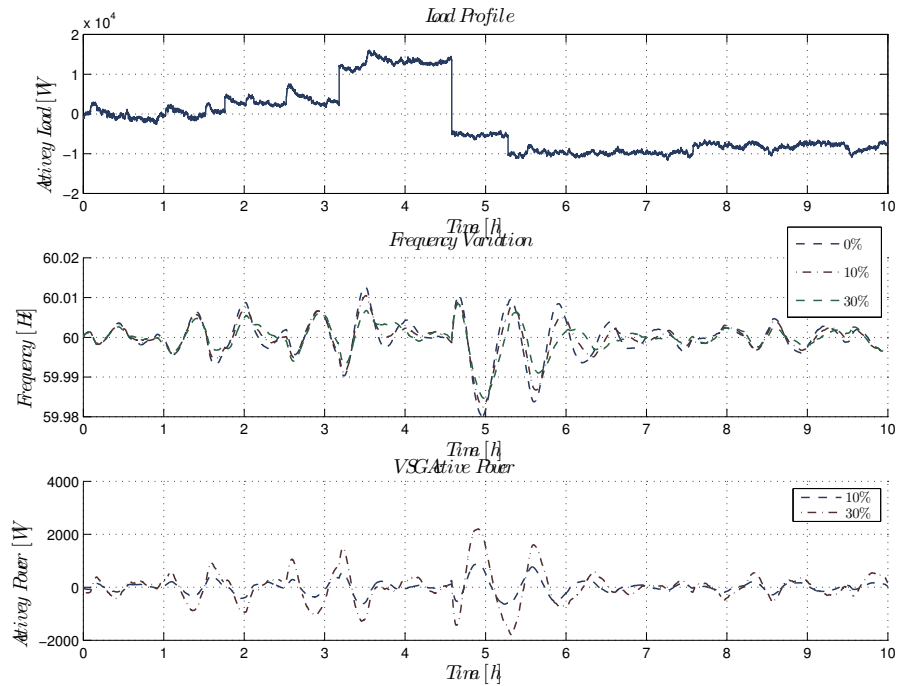
Για κάθε ένα από τα τρία υπό-σενάρια (διείσδυση της VSG συσκευής σε ποσοστό 0.0, 10.0 και 30.0%), δύο καμπύλες φορτίου εφαρμόζονται.

- Το προφίλ των μεταβολών του δυναμικού φορτίου ακολουθεί μια σειρά βηματικών μεταβολών σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.
- Το προφίλ ακολουθεί την καμπύλη του προηγούμενου παραδείγματος και πάνω σε αυτή προσθέτουμε μια τυχαία μεταβολή που ενσωματώνει τη στοχαστική συμπεριφορά του φορτίου. Αυτή μοντελοποιείται σε αντιστοιχία με τις μεταβολές της συχνότητας ενός πραγματικού δικτύου, προσαρμοσμένες στο μέγεθος της προσομοίωσης.

Τα διαγράμματα του σχήματος 7.7α', παρουσιάζουν την απόκριση του συστήματος στην μεταβολή του φορτίου για την πρώτη καμπύλη φορτίου. Παρατηρούμε ότι μια αποσβαινόμενη ταλάντωση ξεκινά ύστερα από κάθε βηματική μεταβολή. Η επίδραση της ΕΣΜ συσκευής γίνεται άμεσα αισθητή καθώς η μεταβολή της συχνότητας του δικτύου μειώνεται όσο η διείσδυση αυξάνει. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρούμε και στα διαγράμματα του σχήματος 7.7β', όσο μεγαλύτερη η μεταβολή του φορτίου τόσο μεγαλύτερη και η διαταραχή στη συχνότητα. Η συμβολή των ΕΣΜ γίνεται διακριτή όπου η μεταβολή της συχνότητας παίρνει μέγιστες τιμές.



(α') Προφίλ φορτίου με βηματικές μεταβολές του δυναμικού φορτίου.



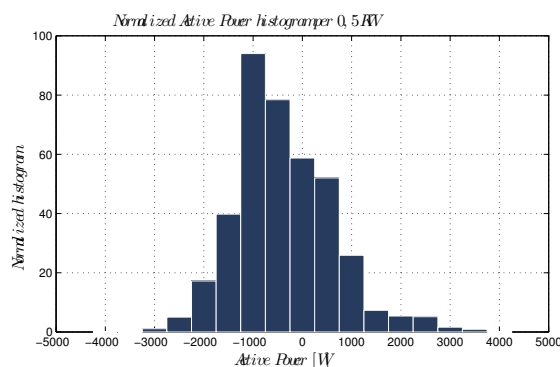
(β') Βηματικές μεταβολές του μεταβλητού φορτίου και του στοχαστικού φορτίου.

76 Σχήμα 7.7.: Απόκριση του συστήματος στη μεταβολή του μεταβλητού φορτίου.

Λόγω της παρουσίας του άπειρου ζυγού, οι ανάγκες ενεργού ισχύος του δικτύου στη μόνιμη κατάσταση καλύπτονται από το εξωτερικό δίκτυο. Αυτό έχει σαν συνέπεια το σύστημα να επιστρέφει στην ονομαστική τιμή συχνότητας, αφού τα μεταβατικά φαινόμενα αποσβέσουν μέχρι μία νέα διαταραχή να μεταβάλει την ισορροπία. Η ΕΣΜ όπως φαίνεται και από τα γραφήματα του σχήματος 7.10 συνεισφέρει ενεργά στην αντιστάθμιση των διαταραχών του συστήματος προσφέροντας και απορροφώντας ενεργό ισχύ αντίστροφα με τις μεταβολές της συχνότητας.

7.1.3.1. Ανάλυση της καμπύλης φορτίου

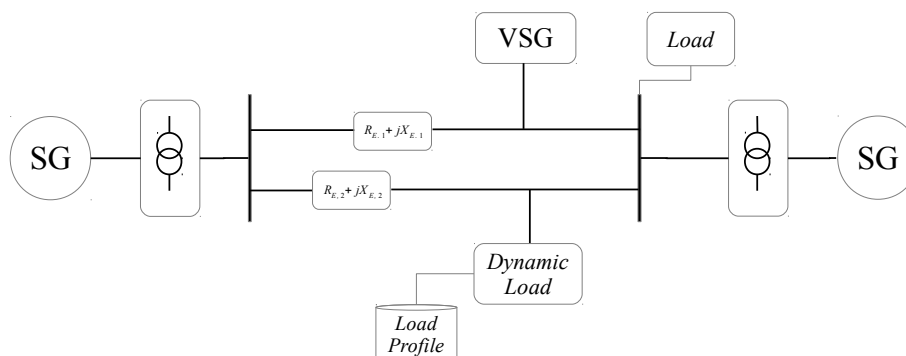
Στα διαγράμματα του σχήματος 7.10 φαίνονται οι καμπύλες για τα δύο προφίλ φορτίου. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του στοχαστικού μέρους του δεύτερου προφίλ φορτίου μπορούν να γίνουν καλύτερα αντιληπτά μέσα από το κανονικοποιημένο ιστόγραμμα του σχήματος 7.8. Η μέση τιμή του προφίλ είναι $\mu = -0.38 \text{ KW}$, ενώ η τυπική απόκλιση των μεταβολών είναι $\sigma = 0.99 \text{ KW}$ με μέγιστη διακύμανση αυτή των 2.7 KW .



Σχήμα 7.8.: Κανονικοποιημένο ιστόγραμμα ανά 0.5 KW του στοχαστικού προφίλ φορτίου.

7.1.4. Σύστημα δύο περιοχών

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης ένα απομονωμένο σύστημα δύο περιοχών, σχήμα 7.9, υπόκειται σε διαταραχές του μεταβλητού του φορτίου. Η λειτουργία του δικτύου αποτιμάται σε σχέση με τη συνεισφορά της ΕΣΜ στην αντιστάθμιση της συχνότητας. Το δίκτυο έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη συντονισμών στα ηλεκτρικά συστήματα [1]. Εδώ το τροποποιούμε για τις ανάγκες της δικής μας προσομοίωσης. Αποτελείται από δύο γεννήτριες με ρυθμιστή στροφών (governor) και ονομαστικά μεγέθη 255 MVA , 24 KV και 600 MVA , 22 KV αντίστοιχα. Η μηχανική ισχύς παρέχεται από έναν αεριοστρόβιλο για κάθε γεννήτρια.

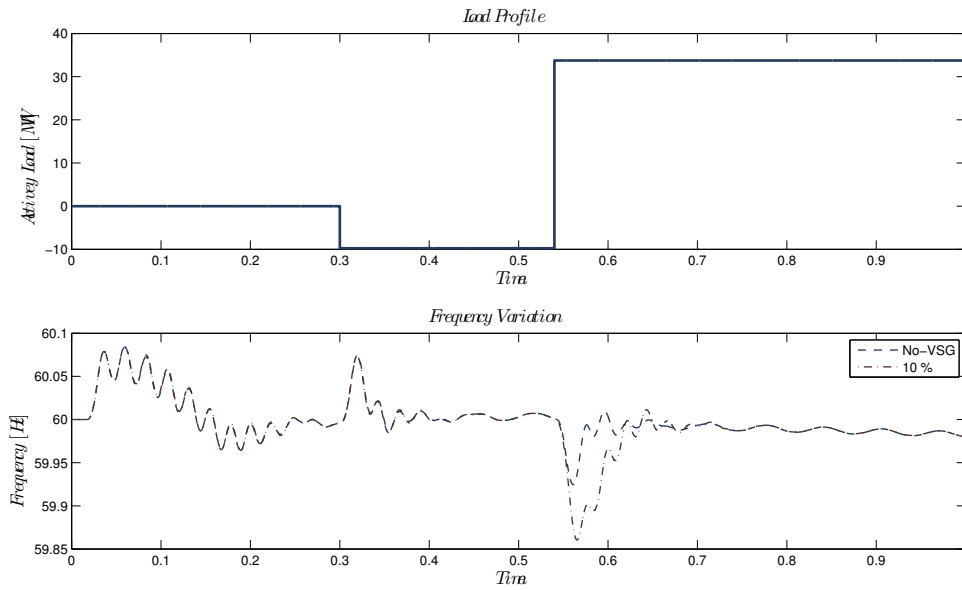


Σχήμα 7.9.: Σύστημα δύο περιοχών αποτελούμενο από δύο γεννήτριες, μια εικονική γεννήτρια και ένα μεταβλητό φορτίο.

Η διείσδυση της εικονικής σύγχρονης γεννήτριας στο σύστημα είναι 5%. Το συνολικό σταθερό φορτίο υπολογίζεται στα 300 MW ενώ το μεταβλητό ακολουθεί την καμπύλη του σχήματος 7.10.

Στο γράφημα του σχήματος 7.10 παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου προσομοίωσης. Για τις βηματικές μεταβολές της καμπύλης φορτίου παρατηρούμε την απόκριση του συστήματος για λειτουργία με και χωρίς την εικονική σύγχρονη μηχανή.

Είναι ενδιαφέρον αρχικά να παρατηρήσουμε ότι ένα μικρό ποσοστό (5%) εισαγωγής της VSG συσκευής στο σύστημα επιφέρει μεγάλη μείωση στη μέγιστη μεταβολή της συχνότητας. Μπορούμε επίσης να δούμε ότι το σύστημα δύο περιοχών στη μόνιμη κατάσταση ταλαντώνεται ελαφρώς γύρω από την ονομαστική τιμή της συχνότητας.

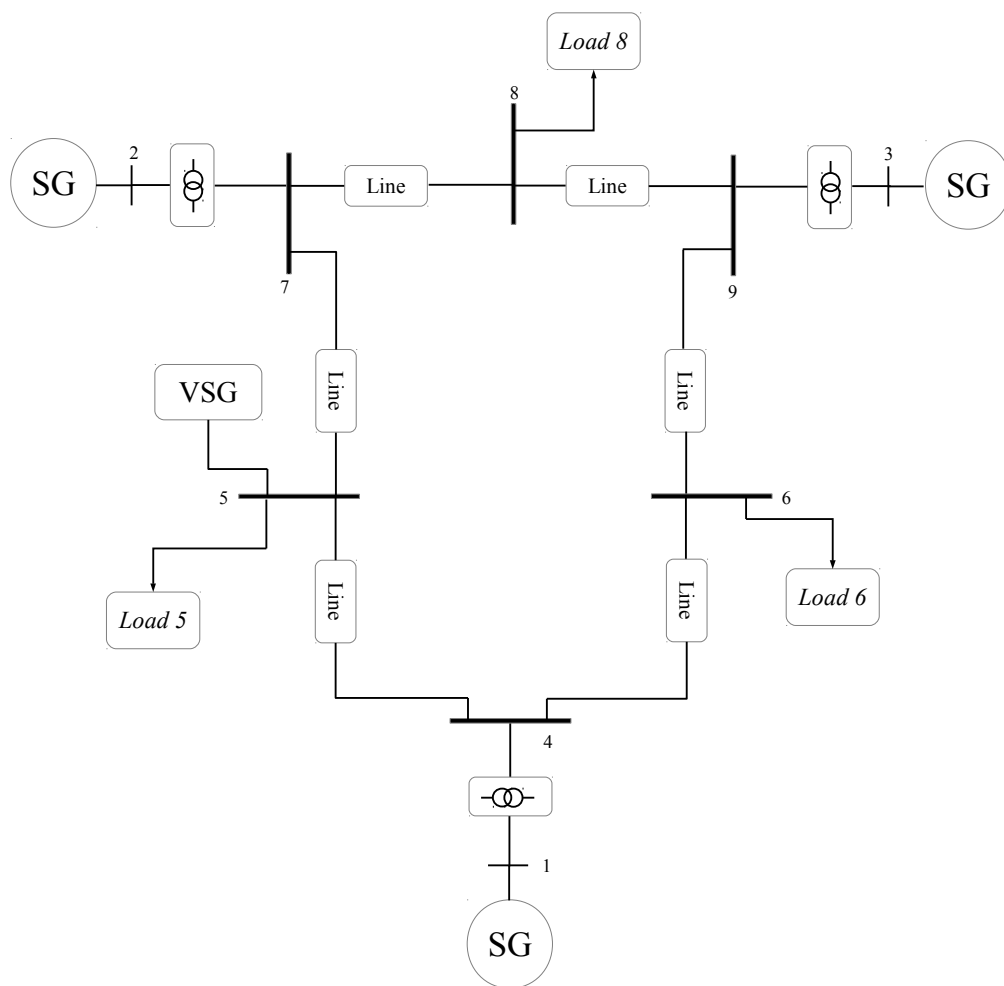


Σχήμα 7.10.: Απόκριση του συστήματος στη μεταβολή του μεταβλητό φορτίου, για το σύστημα δύο περιοχών.

7.1.5. Σύστημα τριών περιοχών

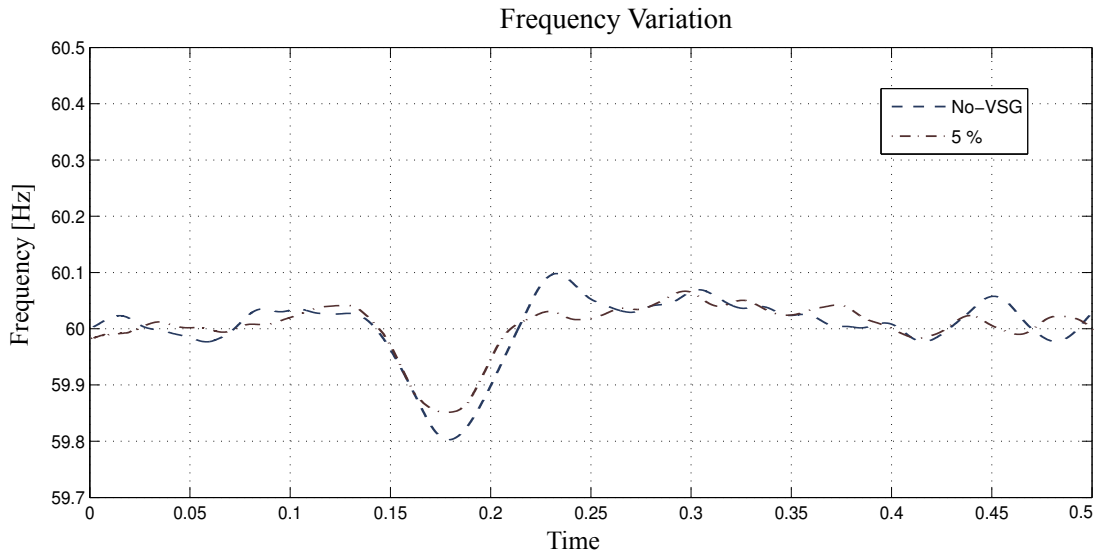
Το προηγούμενο μοντέλο σύγχρονης μηχανής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη ευστάθειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, για εκείνη την περίοδο χρόνου όπου η δυναμική απόκριση του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κινητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην περιστρεφόμενη μάζα του δρομέα. Για τα περισσότερα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αυτός ο χρόνος είναι της τάξης του ενός δευτερολέπτου ή και λιγότερο [5]. Έχοντας ως στόχο να αποτιμήσουμε την συνεισφορά των εικονικών σύγχρονων μηχανών στη λειτουργία και τη σταθερότητα του ηλεκτρικού συστήματος, το IEEE 3-machine 9-bus μοντέλο ηλεκτρικού συστήματος χρησιμοποιείται [5].

Το μονογραμμικό διάγραμμα του σχήματος 7.11, δείχνει τους 9 ζυγούς του συστήματος με τις 3 γεννήτριες και τα τρία φορτία. Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του δικτύου παρατίθενται στο παράρτημα Α΄.



Σχήμα 7.11.: Μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος 3-μηχανών 9-ζυγών.

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης ένα φορτίο 80 MW προστίθεται στο ζυγό 5. Το ποσοστό διείσδυσης της εικονικής σύγχρονης μηχανής είναι 5%. Οι γεννήτριες αρχικοποιούνται ώστε το σύστημα να ξεκινά σε μόνιμη κατάσταση. Τη χρονική στιγμή $t = 0.25\text{ sec}$ το φορτίο συνδέεται απότομα στο σύστημα. Η απόκριση του συστήματος στη μεταβολή φαίνεται στο σχήμα 7.12.



Σχήμα 7.12.: Απόκριση του συστήματος στην μεταβολή του φορτίου 5, για το σύστημα 3-μηχανών 9-ζυγών.

7.2. Συμπεράσματα

Στα μελλοντικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, ένας σημαντικός αριθμός διεσπαρμένης και αποκεντρωμένης παραγωγής αναμένεται να εισαχθεί. Οι εικονικές σύγχρονες μηχανές ίσως προσφέρουν την βάση για την εξάπλωση της κατανεμημένης παραγωγής (σε ποσοστό μεγαλύτερο από 50%), χωρίς να θέσουν σε κίνδυνο την σταθερότητα του δικτύου [29].

Σε αυτό το κεφάλαιο ο βασικός αλγόριθμος ελέγχου που αναπτύχθηκε χρησιμοποιείται στις συσκευές *ΕΣΜ*. Ο κύριος αλγόριθμος της εικονικής μηχανής αποκρίνεται τόσο στην μεταβολή της συχνότητας Δf όσο και στο ρυθμό μεταβολής της (ROCOF).

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι ενθαρρυντικά εκεί όπου οι μεταβολές της συχνότητας αντισταθμίζονται από την παραγωγή ή κατανάλωση ενεργού ισχύος. Η επίπτωση της εισαγωγής εικονικής αδράνειας στην δυναμική σταθερότητα του δικτύου αποτιμάται θετικά. Η παράλληλη λειτουργία των *ΕΣΜ* συσκευών σε πρότυπα μοντέλα δικτύων, όπως το *IEEE 3-machine 9-bus* σύστημα, ακόμα και με μικρό ποσοστό εισαγωγής της τάξης του 5% αποδείχθηκε βοηθητική ως προς την σταθερότητα του δικτύου.

8. ΕΣΜ για πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υφίστανται σήμερα σημαντικές αλλαγές στις λειτουργικές τους απαιτήσεις κυρίως ως αποτέλεσμα της απορρύθμισης που προκαλείται στο σύστημα από την αύξηση της ασυνεχούς διεσπαρμένης παραγωγής. Επιπλέον, η συνεχής αύξηση των φορτίων οδηγεί σε λιγότερο σταθερή λειτουργία του συστήματος. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας έχουν χρησιμοποιηθεί ως τεχνική λύση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως για την βελτίωση της ποιότητας ισχύος, την ασφάλεια του δικτύου, την αποσυμφόρηση του συστήματος (congestion management) κ.α. Τα τελευταία χρόνια, το κόστος των τεχνολογιών αποθήκευσης με συσσωρευτές έχει μειωθεί σημαντικά, γεγονός που δικαιολογεί το αναδυόμενο ενδιαφέρον για τέτοιου είδους εφαρμογές. Επιπλέον, τα συστήματα αποθήκευσης με συσσωρευτές (BESS) έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να επιτρέψουν την λειτουργία διαφορετικών εφαρμογών, ταχείας απόκρισης, ταυτόχρονα στην ίδια συσκευή (π.χ. ισοστάθμιση φορτίων, peak shaving, διόρθωση βύθισης τάσης, λειτουργίες UPS) [19, 10]. Ως εκ τούτου, οι BESS εφαρμογές μπορούν να αυξήσουν τη σταθερότητα και την ασφάλεια του ηλεκτρικού δικτύου, το οποίο βοηθά στην περαιτέρω ένταξη της διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας ή ανάλογα να παρατείνουν μια ενδεχόμενη επέκταση του δικτύου. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να ικανοποιήσουν τις τεχνικές απαιτήσεις για πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας απορροφώντας ενέργεια όταν η συχνότητα του συστήματος βρίσκεται πάνω από μία ονομαστική τιμή και αποβάλλοντας την όταν η συχνότητα πέσει κάτω από την ονομαστική τιμή της. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι οι μονάδες BESS αποτελούνται από στατικά στοιχεία, έχουν ταχεία δυναμική απόκριση συγκρινόμενα με τυπικές γεννήτριες ή άλλου τύπου μονάδες αποθήκευσης. Το γεγονός αυτό, τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές όπου φαινόμενα γρήγορης απόκρισης, για απορρόφηση ή έγχυση ενέργειας, είναι απαραίτητα.

Οι εικονικές σύγχρονες μηχανές (VSG, VISMA, VSM) είναι μία νέα έννοια που όπως έχουμε αναφέρει έχει προταθεί ως μια στρατηγική έλεγχου για να αντιμετωπίσει προβλήματα σταθερότητας, όπου μεγάλο ποσοστό κατανεμημένης παραγωγής έχει εισχωρήσει στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η βασική ιδέα πίσω από το VSG έχει ως στόχο την αναπαραγωγή των στατικών και δυναμικών χαρακτηριστικών μιας πραγματικής σύγχρονης μηχανής μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, ώστε να κληρονομήσει τα πλεονεκτήματα που οι σύγχρονες μηχανές έχουν σε σχέση με τη σταθερότητα του δικτύου ηλεκτρικής ισχύος. Στην καρδιά των ΕΣΜ συσκευών βρίσκεται η έννοια της αποθήκευσης, η δυνατότητα στήριξης του δικτύου πηγάζει από την δυνατότητα απορρόφησης και παραγωγής ενεργής και άεργης ισχύος από το VSG με τέτοιο τρόπο ώστε

να δημιουργεί τη δυναμική συμπεριφορά που είναι επιθυμητή.

8.0.1. Στόχοι του παρόντος κεφαλαίου

Από όταν οι θεμελιώδεις έννοιες των ΕΣΜ άρχισαν να εισάγονται στη βιβλιογραφία [9, 32], ένας μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων ασχολήθηκε με ζητήματα υλοποίησης και βελτιστοποίησης των VSG συσκευών. Οι περισσότερες από αυτές τις δημοσιεύσεις εισήγαγαν εργαστηριακά πρότυπα και πειραματικές δοκιμές των συσκευών αυτών, άλλες προσομοίωσαν σενάρια λειτουργίας σε πραγματικά ή μη δεδομένα [40, 31, 34, 35, 7, 6, 14, 15, 27]. Παρότι ένας αρκετός αριθμός αυτών των δημοσιεύσεων έχουν ασχοληθεί με την ευστάθεια συχνότητας [27, 32, 33] λίγες έχουν ενσωματώσει και μελετήσει την έννοια της αποθήκευσης ενέργειας ως πεπερασμένο μέγεθος στη δομή των ΕΣΜ [14, 29].

Από την άλλη πλευρά, μελέτες στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας έχουν εκτεταμένως ασχοληθεί με την χρησιμοποίηση των εφαρμογών αυτών για να παρέχουν πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας ενώ επιπλέον έχουν δείξει ότι τέτοιες μονάδες με συγκεκριμένες στρατηγικές έλεγχου είναι οικονομικά βιώσιμες [22, 20].

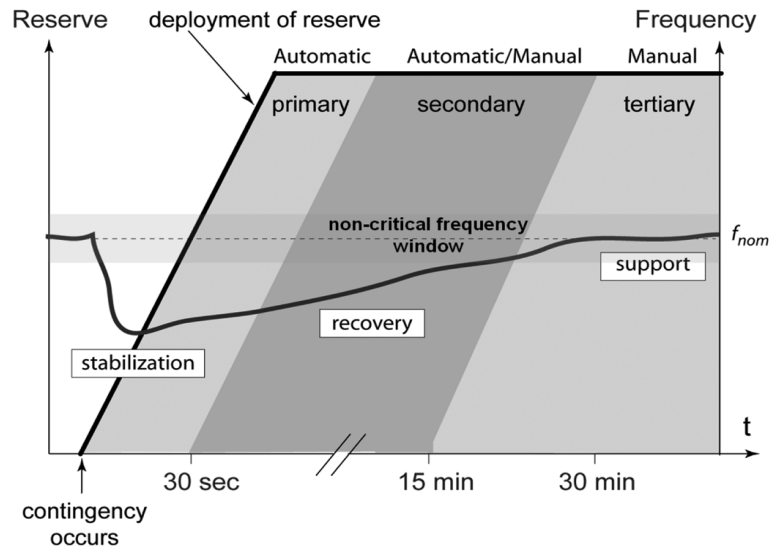
Σε αυτό το κεφάλαιο ενσωματώνουμε την έννοια της αποθήκευσης ενέργειας στην λειτουργία των ΕΣΜ. Μια τέτοια παραδοχή όπως θα δούμε αλλάζει τον συνολικό έλεγχο της συσκευής. Η διαχείριση των μπαταριών επιβάλλει επιλέων περιορισμούς στη λειτουργία των ΕΣΜ.

Εξετάζουμε την λειτουργία των ΕΣΜ για πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, βασισμένη σε δεδομένα συχνότητας που μας παραχώρησε ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Αναπτύσσουμε και συγκρίνουμε διαφορετικούς αλγόριθμους ελέγχου, που λαμβάνουν υπόψιν τόσο τους περιορισμούς που προκύπτουν από την κατάσταση φόρτισης όσο και από την μέγιστη χωρητικότητα των συσσωρευτών.

8.1. Ρύθμιση συχνότητας σύμφωνα με το ENTSO-E

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει την ιδιαίτερη εκείνη μορφή που της επιβάλλει η ενέργεια που παράγεται και καταναλώνεται σε κάθε στιγμή να βρίσκεται σε ισοζύγιο. Κάθε διαταραχή της ισορροπίας αυτής προκαλεί μεταβολή της συχνότητας του συστήματος από την ονομαστική της τιμή και μειώνει την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος. Ως εκ τούτου, κάθε πάροχος ρύθμισης συχνότητας είναι υποχρεωμένος να συντηρεί μια επαρκή ποσότητα ενέργειας αποθηκευμένη ώστε να μπορεί να αντισταθμίσει το δίκτυο σε ενδεχόμενο σφάλμα.

Σύμφωνα με το ENTSO-E [3] ο έλεγχος συχνότητας-φορτίου πραγματοποιείται σε διαφορετικά, ακολουθιακά βήματα, το κάθε ένα με διαφορετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά, αλλά αλληλοεξαρτώμενα μεταξύ τους. Για παράδειγμα, μια μεταβολή στη συχνότητα θα



Σχήμα 8.1.: Μεταβολή της συχνότητας και επακόλουθη ενεργοποίηση των διαδοχικών αποθεματικών [3].

προκαλέσει όλους τους πρωτεύοντες ελεγκτές όλων των γεννητριών να ανταποκριθούν μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα ώστε να αντισταθμίσουν την μεταβολή της συχνότητας, ο δευτερεύων έλεγχος θα ακολουθήσει μέσα σε μερικά λεπτά. Τον δευτερεύοντα έλεγχο θα υποστηρίξει ο τριτοβάθμιος έλεγχος όπως φαίνεται στο σχήμα 8.1. Οι απαιτήσεις που το ENTSO-E θέτει για την λειτουργία της πρωτεύουσας ρύθμισης φαίνονται στον πίνακα 8.1.

Την τελευταία δεκαετία η αγορά επικουρικών λειτουργιών έχει καθιερωθεί σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες. Παραγωγοί ή ιδιοκτήτες συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας έχουν το δικαίωμα, όχι ακόμα την υποχρέωση, να προσφέρουν αποθεματικό για την στήριξη της συχνότητας, εφόσον φυσικά καλύπτουν τις τεχνικές προδιαγραφές που θέτουν οι διαχειριστές μεταφοράς ενέργειας (TSOs).

Συνολικό μέγεθος	3000 MW
Διαθεσιμότητα	100 %
Χρόνος έναρξης	≤ 5 sec
Ελάχιστος χρόνος παροχής	≥ 15 min
Ελάχιστη ονομαστική ισχύς συμβολαίου	$\geq 1 - 2$ MW
Μέγιστη ονομαστική ισχύς συμβολαίου	≤ 90 MW

Πίνακας 8.1.: Τεχνικές προδιαγραφές του ENTOS-E για την λειτουργία πρωτεύουσας ρύθμισης.

8.2. Λειτουργία του BESS-VSG για πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας

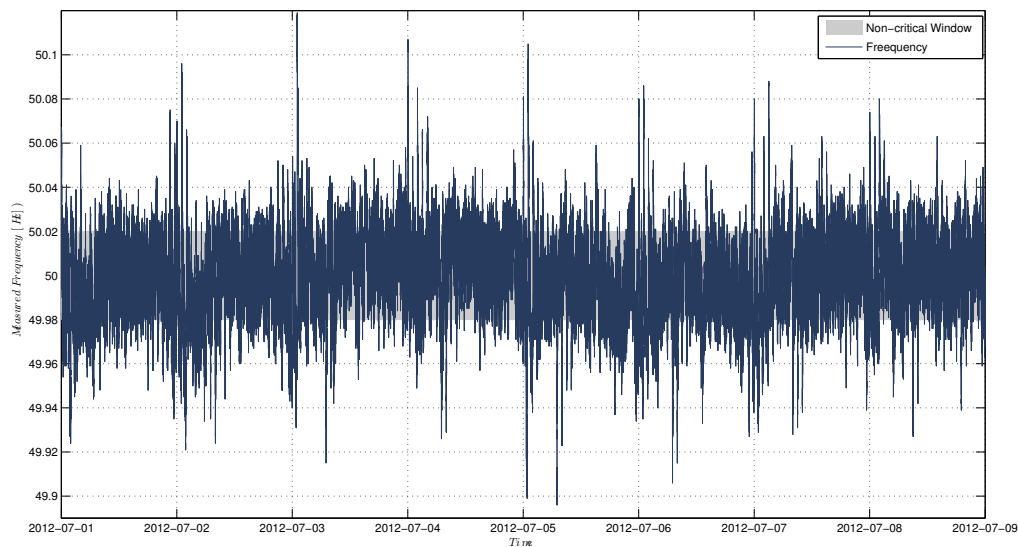
Η ελάχιστη εφεδρεία ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (BESS with VSG control) που θέλει να παρέχει αποθεματικό ισχύος P_n είναι $E_{reserve} = 1/4h \cdot P_n$ δεδομένου ότι το σύστημα αποθήκευσης είναι υποχρεωμένο να παρέχει την ονομαστική τιμή ισχύος για τουλάχιστον 15 min σύμφωνα με το ENTSO-E. Η τιμή αυτή σε πραγματικές καταστάσεις θα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη αφού οι μεταβολές στη συχνότητα ακολουθούν μεταξύ τους σε μικρές χρονικές αποστάσεις έτσι ώστε να μην υπάρχει επαρκής χρόνος για την επαναφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης. Γι' αυτό το λόγο οι στρατηγικές ελέγχου φόρτισης έχουν σημαντική επίδραση στη συνολική συμπεριφορά και απόδοση των συσκευών. Ένα επιπλέον ζήτημα είναι η χρησιμοποίηση των βοηθητικών αντιστάσεων ασφαλείας. Παρότι βοηθούν στο να μειωθεί η συνολική χωρητικότητα του BESS καταναλώνοντας την ισχύ που πρέπει να απορροφηθεί από το δίκτυο όταν οι μπαταρίες τυχαίνει να είναι πλήρως φορτισμένες, αν η χωρητικότητα κρατηθεί πολύ χαμηλά και η χρήση τους γίνει συχνή, η συνολική απόδοση της μονάδας μειώνεται δραστικά.

8.2.1. Ανάλυση των δεδομένων

Για τους σκοπούς αυτής της προσομοίωσης χρησιμοποιήσαμε στατιστικά δεδομένα συχνότητας, που μας παραχώρησε ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ). Τα δεδομένα έχουν ληφθεί από την 1 έως την 8 Ιουλίου του 2012 και αποτυπώνονται στο σχήμα 8.2. Οι μετρήσεις δεν έχουν σταθερή συχνότητα δειγματοληψίας (είναι περίπου 0.25 Hz), παρόλα αυτά τα δεδομένα έρχονται με time stamp ώστε να χρησιμοποιηθούν με ακρίβεια.

Οι κανονισμοί του ENTSO-E έχουν καθορίσει την ονομαστική τιμή της συχνότητας στα 50 Hz και ένα παράθυρο συχνοτήτων $\pm 20 mHz$ μέσα στο οποίο οι μεταβολές στις συχνότητες θεωρούνται μη κρίσιμες ή σχεδόν ονομαστικές. Η μέγιστη μεταβολή της συχνότητας έχει επίσης καθοριστεί ώστε να μην υπερβαίνει τα $\pm 200 mHz$.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το ιστόγραμμα του Σχήματος 8.3 η ποιότητα της συχνότητας στα δεδομένα που αντλήσαμε συντηρείται σε πολύ καλά επίπεδα. Περίπου το 80 % του χρόνου η συχνότητα βρίσκεται εντός του παραθύρου των $\pm 20 mHz$. Υπάρχουν λίγες μόνο εξαιρέσεις όπου η συχνότητα ξεπερνά $\pm 100 mHz$ ενώ δεν υπερβαίνει ποτέ τα $\pm 200 mHz$. Επιπλέον είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι η απόκλιση της συχνότητας για μεγάλες περιόδους είναι συμμετρική γύρω από την ονομαστική τιμή. Για μικρότερα χρονικά διαστήματα, ωστόσο, παρατηρούνται πολλές αποκλίσεις οι οποίες δεν είναι οπωσδήποτε εξισορροπημένες, πραγματοποιούνται σε τυχαία χρονικά διαστήματα με διαφορετικό πλάτος και απροσδιόριστο ρυθμό επανάληψης (σχήμα 8.2).



Σχήμα 8.2.: Δεδομένα συχνότητας της Α.Δ.Μ.Η.Ε., από 1 έως 8 Ιουλίου 2012. Με γκρι μπορούμε να διακρίνουμε το μη-κρίσιμο παράθυρο συχνοτήτων των $\pm 20 \text{ mHz}$.

8.2.2. Βασικός έλεγχός του BESS-VSG

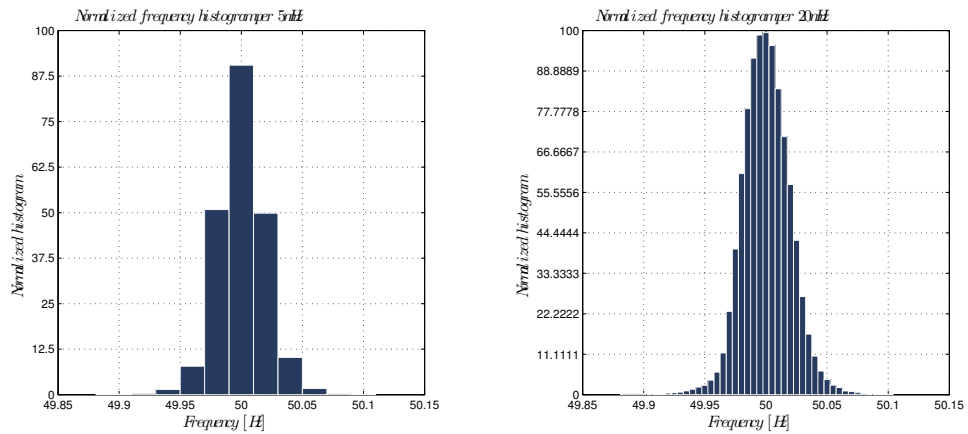
Ο κύριος ρόλος του BESS-VSG είναι να αντισταθμίζει τις διαταραχές της συχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι διαταραχές καθαυτές είναι που καθορίζουν πόση ενέργεια πρέπει να ανταλλαχθεί μεταξύ του δικτύου και του BESS-VSG. Καθώς η συχνότητα μεταβάλλεται σε τιμές μεγαλύτερες του 50.020 Hz , ο ελεγκτής πρέπει να απορροφά ισχύ, ενώ όταν η τιμή της συχνότητας πέσει κάτω από 49.98 Hz οφείλει να εκχύει ισχύ στο δίκτυο. Όπως αναφέραμε νωρίτερα οι μεταβολές της συχνότητας δεν πρέπει να ξεπερνούν τα $\pm 200 \text{ mHz}$, έτσι το πρωτεύον αποθεματικό ισχύος P_n πρέπει να ενεργοποιείται όταν η μεταβολή της συχνότητας Δf φτάνει $\pm 200 \text{ mHz}$. Η συσχέτιση αυτή συχνότητας/ισχύος είναι γνωστή και μπορεί να περιγραφεί από την σχέση

$$P_{VSG} = K_p \cdot (f - f_{ref}) \quad (8.1)$$

όπου

f_{ref} είναι η ονομαστική συχνότητα.

Να σημειωθεί ότι το $1/K_p$ ονομάζεται στατισμός, ωστόσο το BESS-VSG έχει ως στόχο την αύξηση της σταθεράς αδράνειας ενός δεδομένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και η ενέργεια που εξάγεται ή απορροφάται σχετίζεται με τον θετικό ή αρνητικό ρυθμό



Σχήμα 8.3.: Κανονικοποιημένο Ιστόγραμμα της συχνότητας του δικτύου για 20 mHz και 5 mHz αντίστοιχα.

μεταβολής της συχνότητας (ROCOF).

$$P_{VSG} = K_d \cdot \frac{df}{dt} \quad (8.2)$$

Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται εικονική αδράνεια που αντιβαίνει σε κάθε προσπάθεια μεταβολής της συχνότητας. Ο συντελεστής K_d είναι το ανάλογο της σταθεράς αδράνειας μιας ΣΜ και ορίζει την ποσότητα της ενεργού ισχύος που ανταλλάσσεται στο δίκτυο όταν η μέγιστη καθορισμένη μεταβολή στη συχνότητα (Hz/s) πραγματοποιηθεί.

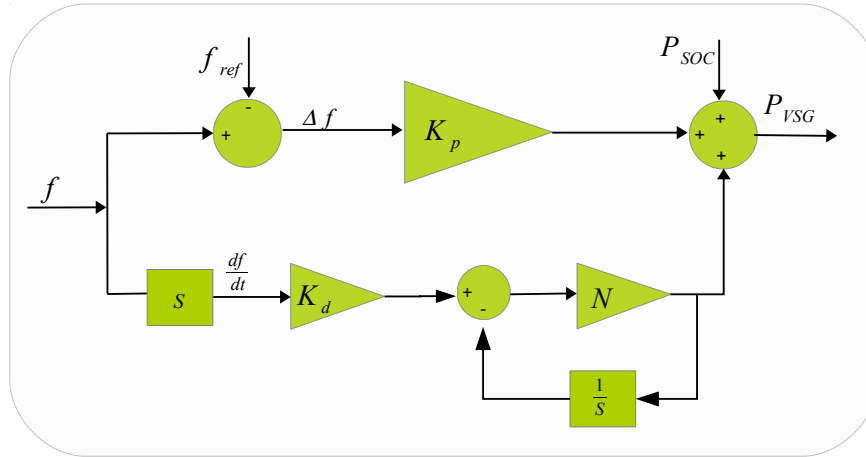
Συνεπώς οι τιμές των συντελεστών επιλέγονται ώστε η ονομαστική ισχύς P_n να παρέχεται όταν οι αντίστοιχες μέγιστες μεταβολές πραγματοποιούνται.

- $K_p = P_{nom}/0.2 \text{ Hz}$
- $K_d = P_{nom}/0.4 \text{ Hz/s}$

Ο βασικός έλεγχος του BESS-VSG αποτελείται λοιπόν από δύο επιμέρους ελέγχους όπως φαίνεται στο σχήμα 8.4 τον έλεγχο droop (8.1) που τείνει να επαναφέρει την συχνότητα στην ονομαστική της τιμή όταν αυτή βγει από το παράθυρο των $\pm 20 \text{ mHz}$ και τον έλεγχο ROCOF (8.2) που αντιστέκεται σε κάθε μεταβολή της συχνότητας. Με μαθηματική γλώσσα μπορεί να περιγραφεί από την σχέση:

$$P_{VSG} = \begin{cases} K_p \cdot (f - f_{ref}) + K_d \cdot \frac{df}{dt} & |f| \geq 20 \text{ mHz} \\ 0 & |f| \leq 20 \text{ mHz} \end{cases} \quad (8.3)$$

Τα δεδομένα εισόδου στον αλγόριθμο ελέγχου του BESS-VSG είναι πραγματικά δεδομένα συχνότητας f του δικτύου. Αφού μετατραπούν σε συνεχούς χρόνου μέσω



Σχήμα 8.4.: Διαγραμματική αναπαράσταση του BESS-VSG έλεγχου, με τους δύο παράλληλους κλάδους Droop control και ROCOF control.

γραμμικής παρεμβολής τροφοδοτούν τον έλεγχο του BESS-VSG. Ένα σήμα P_{VSG} παράγεται σύμφωνα με τις μεταβολές των μεγεθών f και df/dt , το οποίο στην συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του I_{DC} που οδηγεί τη συστοιχία των μπαταριών. Η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών (SOC) έρχεται με τη σειρά της να τροφοδοτήσει εκ νέου τον αλγόριθμο ελέγχου του BESS, σχήμα 8.5.

Ο ισολογισμός στιγμιαίας ισχύος μεταξύ συνεχούς και εναλλασσόμενου δίνει:

$$u_{DC}(t) \cdot i_{DC}(t) = u_{ab}(t) \cdot i_a(t) + u_{bc}(t) \cdot i_b(t) + u_{ca}(t) \cdot i_c(t) \quad (8.4)$$

όπου

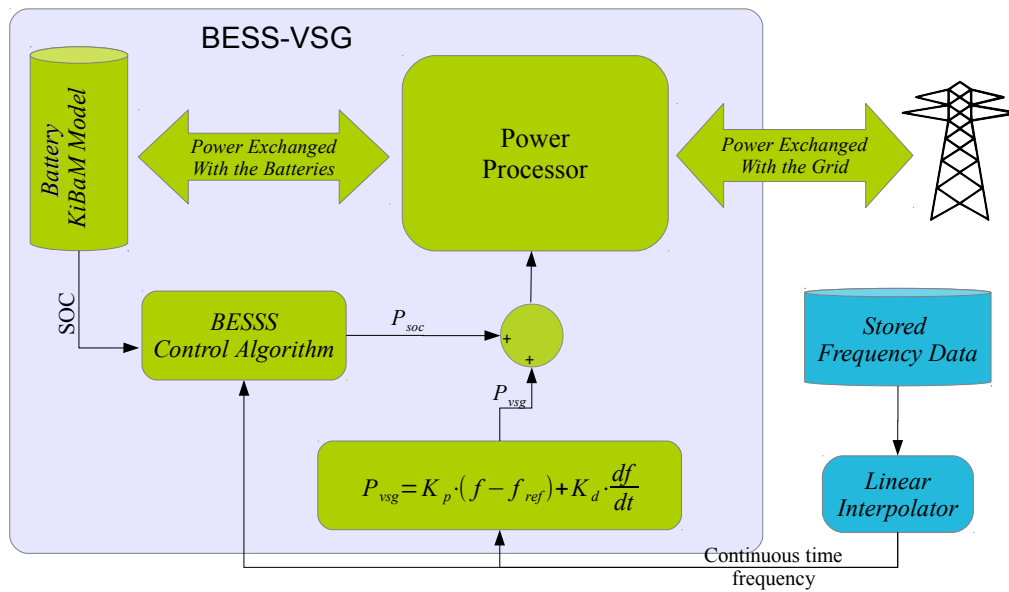
$i_i(t)$ είναι τα φασικά ρεύματα.

Υποθέτοντας ότι η τάση τροφοδοσίας είναι σταθερή $u_{DC}(t) = V_{DC}$, οι τάσεις εξόδου είναι ημιτονοειδείς και το σύστημα συμμετρικό, το ρεύμα τροφοδοσίας μπορεί να γραφεί [26].

$$I_{DC} = \sqrt{3} \frac{V_{o1}}{V_{DC}} I_L \cos(\theta_1) \quad (8.5)$$

όπου

I_L το ενεργό ρεύμα γραμμής
 V_{o1} είναι η θεμελιώδης πολική τάση εξόδου
 θ_1 είναι η γωνία για τη θεμελιώδη συχνότητα



Σχήμα 8.5.: Συνολική απεικόνιση του BESS-VSG, και η διάταξη της προσημείωσης.

8.2.3. Μοντέλο Μπαταριών

Για τις ανάγκες της εξομοίωσης το KiBaM μοντέλο χωρητικότητας των μπαταρίας που αναπτύξαμε στο κεφάλαιο 5 χρησιμοποιείται. Επιπρόσθετα λαμβάνονται οι παρακάτω απλοποιήσεις:

- Οι απώλειες που εμφανίζονται στους συσσωρευτές από τους κύκλους φόρτισης - αποφόρτισης δεν λαμβάνονται υπόψιν,
- Η τάση της μπαταρίας θεωρούμαι ότι παραμένει σταθερή στην ονομαστική της τιμή $V_{DC} = 60V$ ανεξάρτητα από το βάθος εκφόρτισης.
- Οι απώλειες του αντιστροφέα θεωρούνται μηδενικές.

8.2.4. Μέγεθος του BESS-VSG

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης υπολογίζουμε την ονομαστική ισχύς του BESS-VSG από τα πραγματικά δεδομένα του εργαστηριακού εξοπλισμού. Πιο συγκεκριμένα, ο υπολογισμός του P_n γίνεται βάσει του αποθεματικού ενέργειας (ενεργειακή εφεδρεία) των συσσωρευτών του εργαστηρίου. Στόχος μας είναι να υπολογίσουμε ποιο είναι το συμβόλαιο P_n που μπορούμε να συνάψουμε, δεδομένης της χωρητικότητας του BESS του εργαστηρίου. Έτσι το πρωτεύον ενεργειακό αποθεματικό $E_{reserve}$ υπολογίζετε:

$$E_{reserve} = V_{DC} \cdot Q_{max} = P_n \cdot \frac{h}{4}$$

Δεδομένου ότι το πρωτεύων αποθεματικό ισχύος πρέπει να παρέχετε, σύμφωνα με το ENTSO-E, για $1/4 \cdot h$ το P_n θα είναι:

$$P_n = V_{DC} \cdot Q_{max} \cdot 4 = 93.1kW \quad (8.6)$$

όπου

V_{DC}	η τάση της συστοιχίας των μπαταριών (60V)
Q_{max}	η ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών (388 Ah)

Τα $P_n = 0.09 Mw$ της πρωτεύουσας ισχύος που προκύπτουν από την σχέση (8.6) είναι περίπου το 9% του ελάχιστου συμβολαίου που εγκρίνει το ENTSO-E. Αποτελεί όμως, μόλις το 0.03% του συνολικού μεγέθους που απαιτείται για την στήριξη της συχνότητας. Συνεπώς, το BESS-VSG θα ακολουθεί το προφίλ της συχνότητας δίνοντάς μας εικόνα για το πώς συμπεριφέρεται, συνεισφέροντας αναλογικά στη συχνότητα και στη σταθερά αδράνειας του συστήματος, ωστόσο η συνεισφορά του αυτή για τα δεδομένα του πραγματικού δικτύου μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα.

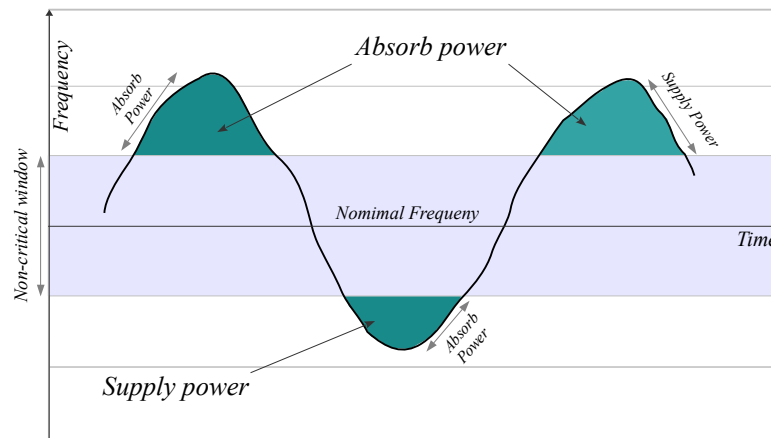
8.3. Επίδραση της ρύθμισης συχνότητας στη χωρητικότητα του BESS-VSG

8.3.1. BESS-VSG χωρίς επαναφόρτιση

Ξεκινάμε την παρουσίαση μας με ένα σενάριο προσομοίωσης μη ρεαλιστικό, για λόγους κατανόησης. Το μοντέλο BESS-VSG φορτίζεται και αποφορτίζεται ακολουθώντας τις διακυμάνσεις της συχνότητας χωρίς κανέναν επιπλέον έλεγχο στην κατάσταση φόρτισης, σχήμα 8.6. Στην αρχή της βδομάδας (1 Ιουλίου), το BESS-VSG είναι 100% φορτισμένο (τιμή 0 στα γραφήματα), στη συνέχεια προσφέρει ή απορροφά ισχύ ανάλογα με τις διακυμάνσεις των μεγεθών f και df/dt .

Οι κανόνες λειτουργίας σε αυτό το σενάριο είναι απλοί.

- Οι μπαταρίες εκφορτίζονται όταν $f < f_{min} = f_{nom} - 20 \text{ mHz}$ ή όταν $\frac{df}{dt} < 0$
- Οι μπαταρίες φορτίζονται όταν $f > f_{min} = f_{nom} + 20 \text{ mHz}$ ή όταν $\frac{df}{dt} > 0$



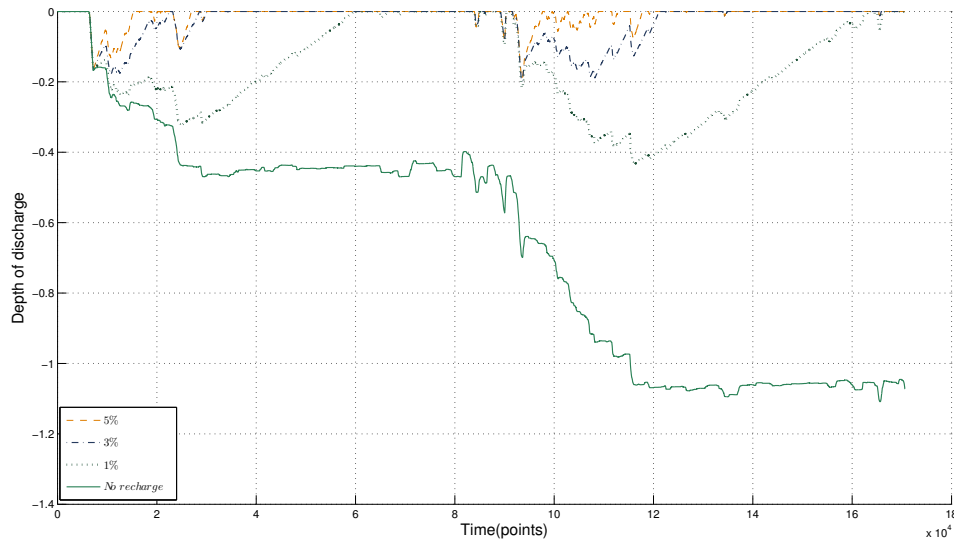
Σχήμα 8.6.: Τρόπος λειτουργίας του BESS-VSG ελεγκτή σε σχέση με τις μεταβολές της συχνότητας, ακολουθώντας τις οδηγίες του ENTSO-E.

Η καμπύλη “No recharge” του σχήματος 8.7 δείχνει την μεταβολή της κατάστασης φόρτισης (SOC) του BESS-VSG μέχρι το τέλος τις βδομάδας, στις 8 Ιουλίου. Λόγω του περιορισμού στον έλεγχο του BESS-VSG, οι μπαταρίες μακροπρόθεσμα τείνουν να αποφορτίζονται. Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης η ελάχιστη χωρητικότητα που θα έπρεπε να διαθέτουν, ξεπερνά τη συνολική διαθέσιμη χωρητικότητα των μπαταριών και είναι $1.109 Q_{max}$. Αυτό σημαίνει επίσης ότι το ελάχιστο αποθεματικό ενέργειας (ενεργειακή εφεδρεία) που θα πρεπε να διαθέσει το BESS-VSG για τη λειτουργία των 8 ημερών είναι $1.109 P_n \cdot h$. Αυτό φυσικά δεν αποτελεί σε καμιά περίπτωση πραγματική στρατηγική λειτουργίας, μας βοηθά όμως να δούμε τον τρόπο που συμπεριφέρεται το BESS-VSG όταν αφηθεί ελεύθερο στο δίκτυο. Για να καταφέρει να διατηρήσει το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας το SOC του σε αποδεκτά όρια κατά τη διάρκεια λειτουργίας, χρειάζεται μια στρατηγική έλεγχου που θα επαναφορτίζει το σύστημα σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

8.3.2. BESS-VSG με επαναφόρτιση

Σε αυτό το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης λαμβάνουμε υπόψη τη φόρτιση των μπαταριών σύμφωνα με τους παρακάτω κανόνες:

- Φόρτισε τις μπαταρίες σε $SOC = 100\%$ όταν η συχνότητα βρίσκεται μέσα στην μη κρίσιμη περιοχή όπου $|\Delta f| < 20 \text{ mHz}$.
- Χρησιμοποίησε ισχύς επαναφόρτισης ένα μικρό ποσοστό της ονομαστικής ισχύς ($0.01P_n$, $0.03P_n$, $0.05P_n$).



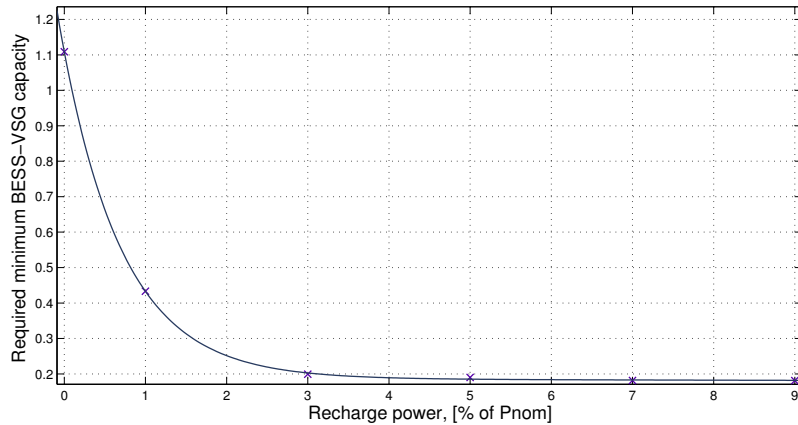
Σχήμα 8.7.: Μεταβολή της κατάσταση φόρτισης του BESS-VSG για διάστημα από 1-8 Ιουλίου 2012, χωρίς φόρτιση, και με έλεγχο φόρτισης για 1% – 5% του ονομαστικού αποθεματικού ισχύος P_n .

- Εάν η κατάσταση φόρτισης είναι στο 100 %, και $f > f_{nom} + 20 \text{ mHz}$ κατανάλωσε την απορροφούμενη ενέργεια στις βοηθητικές αντιστάσεις.

Με αυτούς τους κανόνες λειτουργίας η ελάχιστη απαιτούμενη χωρητικότητα του BESS-VSG μειώνεται δραστικά όσο η ισχύς επαναφόρτισης αυξάνεται. Το σχήμα 8.7 δείχνει την μεταβολή του βάθους εκφόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο και την ισχύς επαναφόρτισης για 1%, 3% και 5% του P_n . Όσο πιο μεγάλη η ισχύς επαναφόρτισης τόσο πιο μικρο το βάθος εκφόρτισης και συνεπώς μικρότερη η απαιτούμενη χωρητικότητα των μπαταριών [22].

Υπάρχει ωστόσο ένας βασικός περιορισμός στο να χρησιμοποιούμε μεγάλη ισχύς επαναφόρτισης. Όταν αυτή είναι μεγάλη το BESS-VSG είναι διαρκώς φορτισμένο στο 100% και δεν είναι δυνατό να απορροφά ισχύς από το δίκτυο όταν η συχνότητα ξεπεράσει το μη κρίσιμο παράθυρο. Χρησιμοποιούμε τους βοηθητικούς αντιστάτες για να απορροφούμε την ισχύ αυτή, αλλά με αυτόν τον τρόπο μειώνουμε την απόδοση του συστήματος.

Στο σχήμα 8.8 δείχνουμε την επίδραση που έχει η ισχύς επαναφόρτισης (σε ποσοστό επί του P_n) στην απαιτούμενη χωρητικότητα του BESS-VSG. Το ελάχιστο απαιτούμενο αποθεματικό ενέργειας της συσκευής που φαίνεται στον άξονα Y προκύπτουν από τις προσομοιώσεις του σχήματος 8.7. Παρατηρούμε επίσης ότι η αύξηση της ισχύος επαναφόρτισης από κάποιο σημείο και πέρα δεν επιδρά στην ελάχιστη απαιτούμενη χωρητικότητα του συστήματος. Το $0.2 p_n \cdot h$ λοιπόν είναι η ελάχιστη διαθέσιμη ενέργεια που πρέπει να έχει το BESS-VSG για να ανταπεξέλθει σε αυτό το σενάριο λειτουργίας. Σε μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση πάντως, για την επιλογή του ελάχιστου αποθεμα-



Σχήμα 8.8.: Επίδραση της ισχύς επαναφόρτισης σε σχέση με το μέγιστο βάθος αποφόρτισης του BESS-VSG. Με \times συμβολίζουμε τα δεδομένα της προσομείωσης ενώ με συνεχή γραμμή την εκθετική παρεχβολή τους.

τικού ενέργειας θα έπρεπε να προσθέσουμε άλλα $0.25 p_n \cdot h$, ώστε να διασφαλίσουμε την αξιοπιστία του συστήματος εάν ένα επιπλέον συμβάν αποφόρτισης πραγματοποιηθεί (15 min της συνολικής ονομαστικής ισχύς) στο στατιστικό ελάχιστο της φόρτισης.

8.3.3. BESS-VSG με έλεγχο της κατάστασης φόρτισης

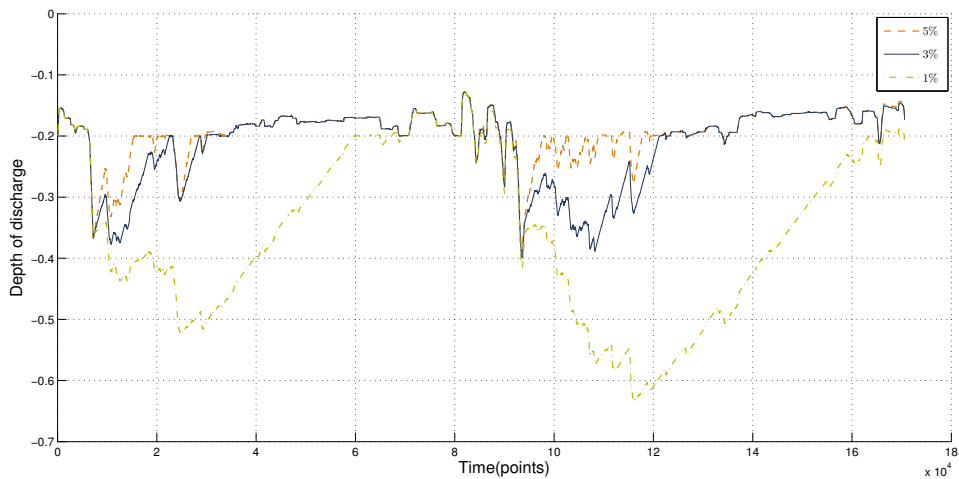
Εάν διατηρήσουμε το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης του συστήματος λίγο κάτω από 100 %, μπορούμε να παρακάμψουμε τα προβλήματα του προηγούμενου σεναρίου. Με αυτόν τον τρόπο θα διατηρούμαι αποθεματικό προς φόρτιση και θα αποφεύγουμε τις καταστάσεις εκείνες όπου ενέργεια πρεπε να διοχετευθεί στις βοηθητικές αντιστάσεις. Βασισμένη σε αυτή την ιδέα, θα βελτιώσουμε την προηγούμενη στρατηγική λειτουργίας του BESS-VSG. Ο στόχος πλέον δεν θα είναι να κρατάμε τις μπαταρίες 100 % φορτισμένες, αλλά να διατηρούμαι το επίπεδο φόρτισης σε ένα καθορισμένων επίπεδο SOC_{ref} [22].

Το σύνολο των κανόνων λειτουργίας έχει ως εξής:

- Οι μπαταρίες εκφορτίζονται όταν $f < f_{min} = f_{nom} - 20 \text{ mHz}$ ή όταν $\frac{df}{dt} < 0$
- Οι μπαταρίες φορτίζονται όταν $f > f_{min} = f_{nom} + 20 \text{ mHz}$ ή όταν $\frac{df}{dt} > 0$
- Αποφόρτισε τις μπαταρίες όταν $SOC > SOC_{ref}$ με ισχύς επαναφόρτισης ένα μικρό ποσοστό της ονομαστικής ισχύος ($0.01P_n - 0.05P_n$).
- Φόρτισε τις μπαταρίες όταν $SOC < SOC_{ref}$ με ισχύς επαναφόρτισης ένα μικρό ποσοστό της ονομαστικής ισχύος ($0.01P_n - 0.05P_n$).
- Εάν η κατάσταση φόρτισης είναι στο 100 %, και $f > f_{nom} + 20 \text{ mHz}$ κατανάλωσε την απορροφούμενη ενεργεία στις βοηθητικές αντιστάσεις.

Όπως παρατηρήσαμε στο ιστόγραμμα του σχήματος 8.3 τα δεδομένα συχνότητας μακροπρόθεσμα μεταβάλλονται συμμετρικά ως προς την ονομαστική τους τιμή. Αυτό σημαίνει ότι στατιστικά η μεταβολές που περιμένουμε να πραγματοποιηθούν θα αφορούν τόσο την απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο όσο και την εισαγωγή ενέργειας σε αυτό, με τον ίδιο τρόπο. Αυτή η απλή παρατήρηση μας λέει ότι το επίπεδο του SOC_{ref} πρέπει να οριστεί στο μέσο του μέγιστου και του ελάχιστου επιπέδου φόρτισης των μπαταριών. Αν καθορίσουμε το βάθος εκφόρτισης στο 40% της συνολικής χωρητικότητας του BESS-VSG, τότε $SOC_{ref} = 80\%$.

Οι καμπύλες του σχήματος 8.9 παρουσιάζουν την μεταβολή του βάθους εκφόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο και την ισχύ φόρτισης-αποφόρτισης για 1%, 3% και 5% του P_n . Αυτό που επιπρόσθετα μπορούμε να παρατηρήσουμε σε αυτό το σενάριο είναι ότι η κατάσταση φόρτισης του BESS-VSG δείχνει να κινείται γύρω από το SOC_{ref} . Επιπλέον οι βοηθητικές αντιστάσεις δεν χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν πουθενά σε όλη τη διάρκεια της εβδομαδιαίας προσομοίωσης.



Σχήμα 8.9.: Μεταβολή της κατάσταση φόρτισης του BESS-VSG για διάστημα από 1-8 Ιουλίου 2012, με έλεγχο φόρτισης (σενάριο 2) για 1% – 5% της ονομαστικής ισχύος P_n .

8.3.4. BESS-VSG με αναλογικό έλεγχο της κατάστασης φόρτισης

Η στρατηγική ελέγχου του BESS-VSG μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω εισάγοντας την έννοια του αναλογικού ελέγχου στην κατάσταση φόρτισης των μπαταριών. Στις προηγούμενες προδιαγραφές λειτουργίας η ισχύς φόρτισης - εκφόρτισης παρέμενε σταθερή στο προκαθορισμένο επίπεδο ισχύος ($0.01P_n - 0.05P_n$) ανεξάρτητα αν το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών βρισκόταν μακριά ή κοντά από το SOC_{ref} . Όμως, γιατί η ισχύς

φόρτισης - εκφόρτισης να έχει το ίδιο μέγεθος όταν η μπαταρίες βρίσκονται σε πραγματικό κίνδυνο (σε βαθιά εκφόρτιση ή υπερφορτισμένες) και όταν βρίσκονται κοντά στην τιμή του SOC_{ref} . Στον αναλογικό έλεγχο κάθε απόκλιση από την καθορισμένη τιμή (SOC_{ref} στην περίπτωση μας) θεωρείται σφάλμα, όσο μεγαλύτερο το σφάλμα τόσο μεγαλύτερη και η ισχύς που το επαναφέρει στην καθορισμένη τιμή της κατάστασης φόρτισης [15].

Η στρατηγική λειτουργίας έχει ως εξής:

- Οι μπαταρίες εκφορτίζονται όταν $f < f_{min} = f_{nom} - 20 \text{ mHz}$ ή όταν $\frac{df}{dt} < 0$
- Οι μπαταρίες φορτίζονται όταν $f > f_{min} = f_{nom} + 20 \text{ mHz}$ ή όταν $\frac{df}{dt} > 0$
- Φόρτιση-αποφόρτιση τις μπαταρίες όταν $SOC \neq SOC_{ref}$ με ισχύς $P_{soc} = K_{soc} \cdot (SOC - SOC_{ref})$
- Εάν η κατάσταση φόρτισης είναι στο 100 %, και $f > f_{nom} + 20 \text{ mHz}$ κατανάλωσε την απορροφούμενη ενέργεια στις βοηθητικές αντιστάσεις.

Η τιμή του SOC_{ref} όπως και στο προηγούμενο σενάριο επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνει τα ίδια περιθώρια στη συνολική ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει ή να εκχύσει το BESS-VSG στο δίκτυο. Θέτουμε λοιπόν το $SOC_{ref} = 0.8$. Η σταθερά K_{soc} πρέπει να υπολογιστεί με τέτοιον τρόπο ώστε ένα ποσοστό ($0.01P_n$ to $0.05P_n$) του πρωτεύοντος αποθεματικού ισχύος να ενεργοποιείται όταν η μέγιστη μεταβολή της κατάστασης φόρτισης πραγματοποιηθεί.

$$K_{soc} = (1\% \text{ to } 5\%) \cdot P_n / \Delta SOC$$

οπου

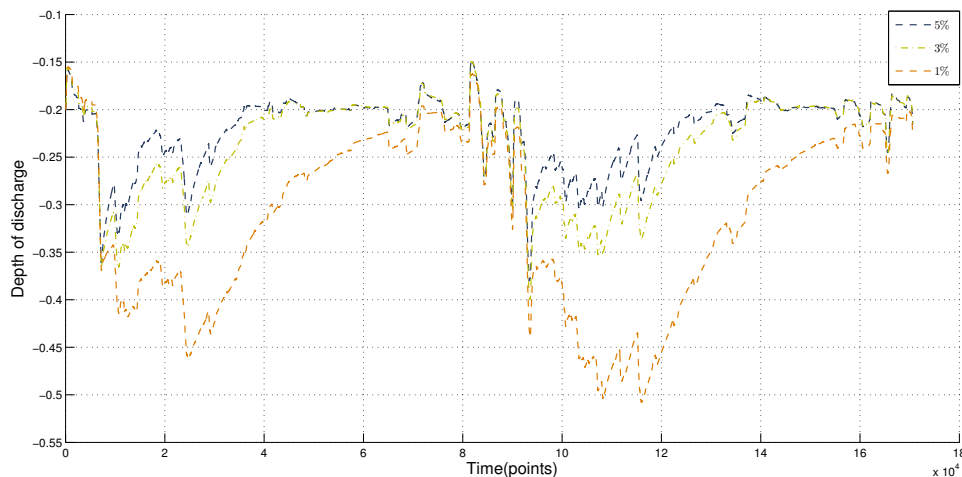
ΔSOC είναι η μέγιστη καθορισμένη μεταβολή του SOC , και είναι $|SOC_{ref} - SOC_{max}| = 0.2$.

Με αυτήν την επιλογή του K_{soc} επιτυγχάνεται συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών στρατηγικών λειτουργίας.

Έτσι ο συνολικός έλεγχος του BESS-VSG σε αναλογία με την σχέση (8.3) θα είναι:

$$P_{VSG} = \begin{cases} K_p \cdot (f - f_{ref}) + K_d \cdot \frac{df}{dt} + K_{soc} \cdot (SOC - SOC_{ref}) & |f| \geq 20 \text{ mHz} \\ K_{soc} \cdot (SOC - SOC_{ref}) & |f| \leq 20 \text{ mHz} \end{cases} \quad (8.7)$$

Οι καμπύλες του σχήματος 8.10 παρουσιάζουν την μεταβολή του βάρους εκφόρτισης σε συνάρτηση με τον χρόνο και την ισχύς φόρτισης-αποφόρτισης για K_{soc} 1%, 3% και 5% του $P_n / \Delta SOC$. Παρατηρούμε ότι η κατάσταση φόρτισης του BESS-VSG έχει την τάση να συμμορφώνεται στη καθορισμένη τιμή του SOC_{ref} , ενώ και σε αυτή την περίπτωση οι βοηθητικές αντιστάσεις δεν χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν.

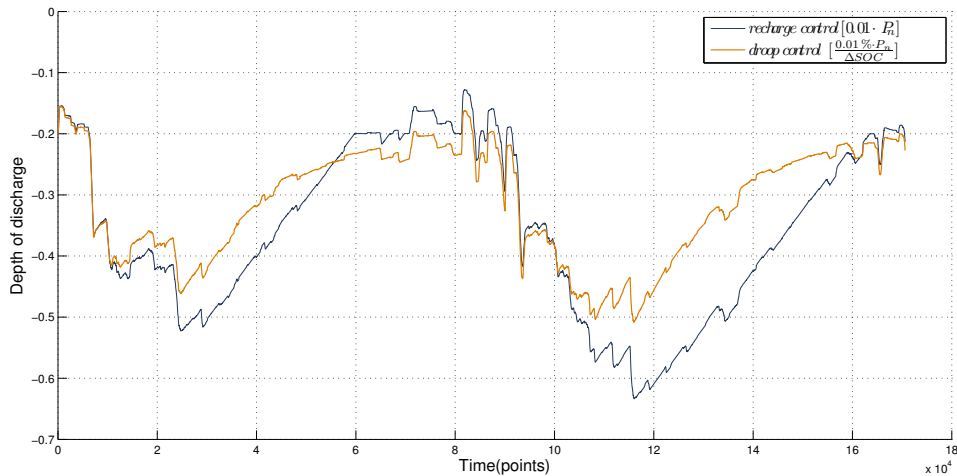


Σχήμα 8.10.: Μεταβολή της κατάστασης φόρτισης του BESS-VSG για διάστημα από 1-8 Ιουλίου 2012, με αναλογικό έλεγχο φόρτισης - εκφόρτισης.

8.4. Σύγκριση των στρατηγικών ελέγχου

Είδαμε ότι όταν αφήσαμε το BESS-VSG ελεύθερο στις επιδράσεις του δικτύου, λόγω της δυναμικής του συμπεριφοράς σταδιακά αποφορτίστηκε. Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα αυτό, διάφορες στρατηγικές ελέγχου των μπαταριών χρησιμοποιήθηκαν. Αρχικά χρησιμοποιήσαμε μια μέθοδο επαναφόρτισης των μπαταριών, σε διαστήματα που δεν ενοχλούν την λειτουργία του δικτύου, φορτίζοντας με σταθερή ισχύ όσο η συχνότητα του δικτύου βρισκόταν στο μη κρίσιμο παράθυρο. Το πρόβλημα αυτής της μεθόδου ήταν ότι για μεγάλα διαστήματα οι μπαταρίες ήταν 100 % φορτισμένες χωρίς να μπορούν να συνεισφέρουν στην απορρόφηση ισχύος. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε λαμβάνοντας υπόψιν την κατάσταση φόρτισης των μπαταριών. Ο στόχος πλέον ήταν να διατηρήσουμε την κατάσταση φόρτισης των μπαταριών σε ένα καθορισμένο επίπεδο SOC_{ref} , φορτίζοντας ή αποφορτίζοντας αντίστοιχα όταν το SOC ήταν μικρότερο ή μεγαλύτερο της καθορισμένης τιμής SOC_{ref} . Η μέθοδος αυτή λειτούργησε αρκετά αποδοτικά κάνοντας το σύστημα διαθέσιμο διαρκώς τόσο για απορρόφηση όσο και για παραγωγή ισχύος, μειώνοντας ταυτόχρονα το ελάχιστο απαιτούμενο αποθεματικό ενέργειας της συσκευής. Τέλος, δοκιμάσαμε να επεκτείνουμε την στρατηγική ελέγχου των μπαταριών εισάγοντας την έννοια του αναλογικού ελέγχου στην κατάσταση φόρτισης. Με αυτό τον τρόπο η φόρτιση και η εκφόρτιση των μπαταριών δεν γίνεται πλέον με σταθερή ισχύ. Η ισχύς μεταβάλλεται αναλογικά με το πόσο μακριά βρίσκεται η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών, από το SOC_{ref} .

Στο σχήμα 8.11 παρουσιάζουμε γραφικά σε αντιπαραβολή τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των δύο τελευταίων στρατηγικών ελέγχου (σενάρια 3 και 4). Η ισχύς επαναφόρτισης για την πρώτη περίπτωση (σενάριο 3) είναι 1 % του P_n , ενώ στην περίπτωση του αναλογικού ελέγχου 1 % του $P_n/\Delta SOC$. Από τη σύγκριση αυτή μπορούμε

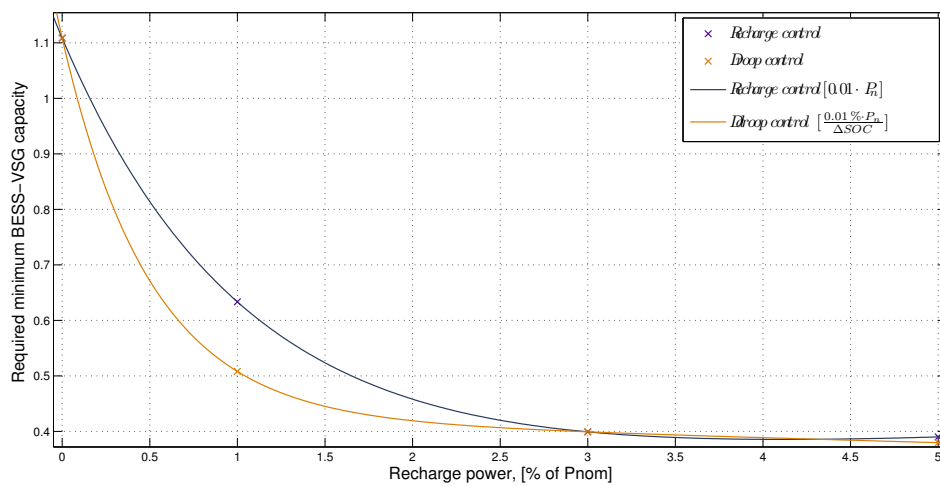


Σχήμα 8.11.: Αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων του σεναρίου 3 και 4. Η ισχύς επαναφόρτισης είναι αντίστοιχα 1% του P_n και 1% του $P_n/\Delta SOC$.

να διακρίνουμε τι διαφορετική συμπεριφορά των δυο ελέγχων. Αυτό γίνεται καλύτερα αντιληπτό στις δύο περιόδους παρατεταμένης φόρτισης, που ακολουθούν τα συμβάντα βαθιάς εκφόρτισης των μπαταριών. Ενώ αρχικά φορτίζουν με ίδια ποσότητα ισχύος, γεγονός που γίνεται οπτικά εμφανές από την κλίση των καμπύλων, όσο το ΔSOC μειώνεται ο αναλογικός έλεγχος μειώνει την ισχύ φόρτισης κάνοντας έτσι τη συμπεριφορά φόρτισης των μπαταριών πιο ομαλή.

Στα γραφήματα του σχήματος 8.12 είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι αύξηση των συντελεστών που είναι υπεύθυνοι για την ισχύ επαναφόρτισης, από κάποιο σημείο και μετά δεν επιδρούν στο ελάχιστο απαιτούμενο αποθεματικό ενέργειας της συσκευής. Η σωστή επιλογή των συντελεστών πρέπει να κοστολογεί τόσο το μέγιστο βάθος εκφόρτισης όσο και την ισχύ επαναφόρτισης των μπαταριών.

Αξίζει να επισημάνουμε ότι η καμπύλη του αναλογικού ελέγχου στα γραφήματα του σχήματος 8.12 βρίσκεται κάτω από την αντίστοιχη της άλλης στρατηγικής ελέγχου. Αυτό συμβαίνει επειδή ο αναλογικός έλεγχος είναι παρών καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας. Διασφαλίζεται με αυτό τον τρόπο το μέγιστο βάθος εκφόρτισης των μπαταριών επιβαρύνοντας το δίκτυο μόνο όταν αυτό είναι απαραίτητο, δηλαδή όταν οι μπαταρίες βρίσκονται μακριά από την ονομαστική τιμή φόρτισης τους. Οι τιμές της ισχύος φόρτισης όταν το ΔSOC είναι μικρό, είναι πολύ μικρές σε σύγκριση με την ονομαστική τιμή ισχύος P_n του συστήματος.

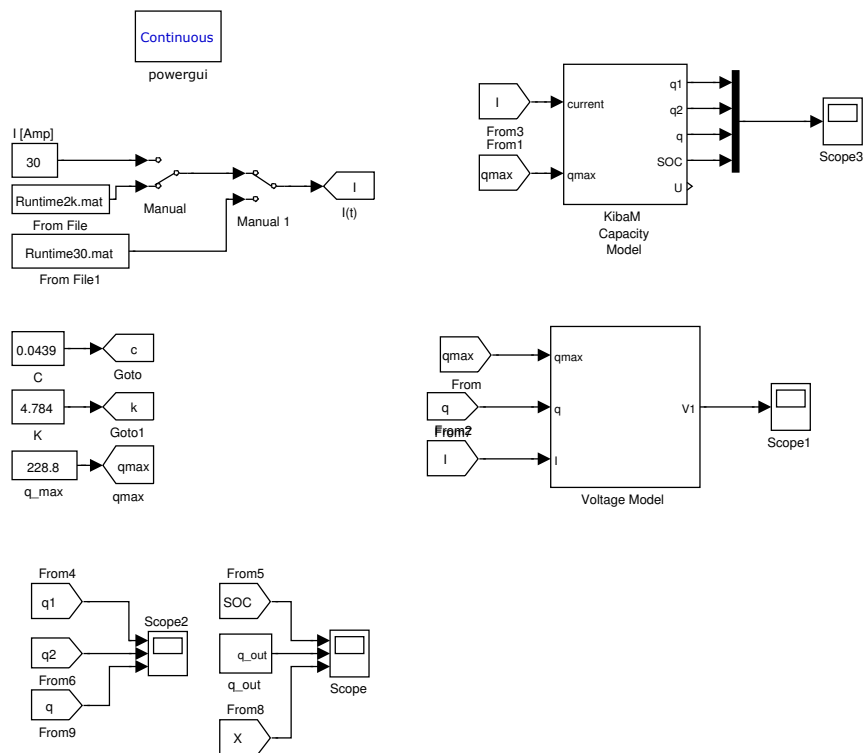


Σχήμα 8.12.: Διάγραμμα της ισχύς επαναφόρτισης προς το μέγιστο βάθος αποφόρτισης, για έλεγχο με επαναφόρτιση ($0.01 \cdot P_n$) και αναλογικό έλεγχο ($0.01 \cdot P_n / \Delta SOC$) αντίστοιχα. Με \times συμβολίζουμε τα δεδομένα της προσομοίωσης ενώ με συνεχή γραμμή τις εκθετικές παρεμβολές τους.

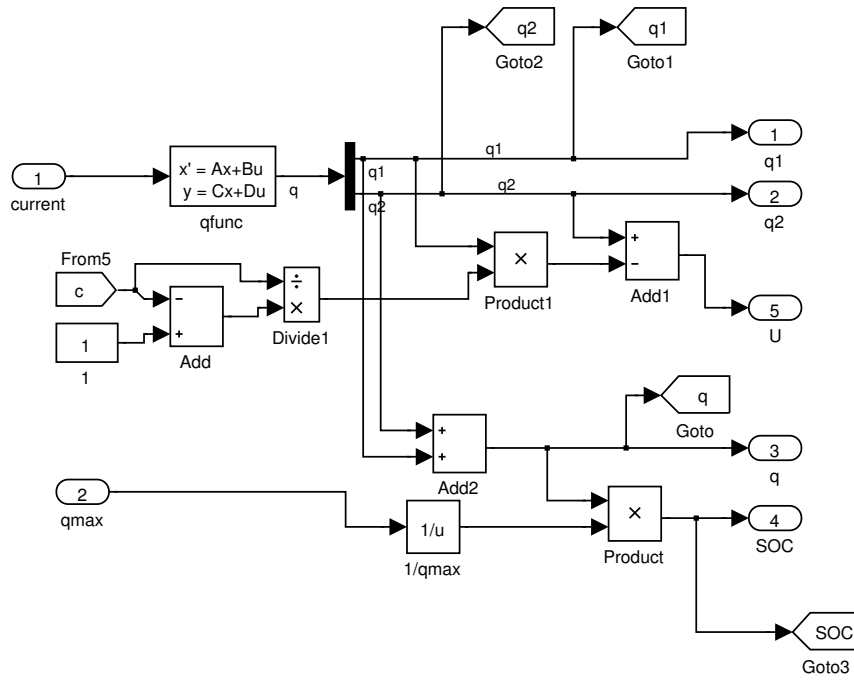
9. Συμπεράσματα

Α'. Παράρτημα

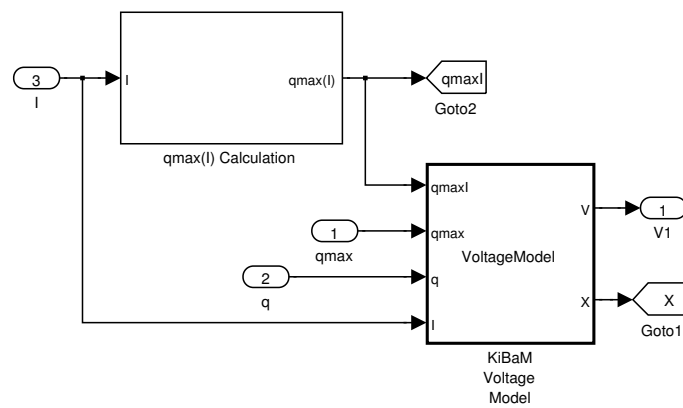
A.1. Μοντέλο μπαταρίας KiBaM



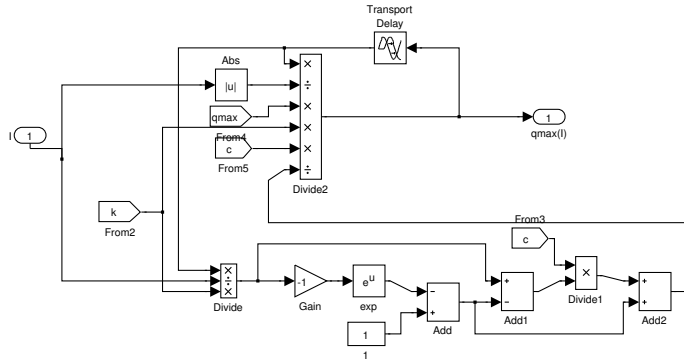
Σχήμα Α'.1.: Matlab/Simulink implementation of KiBaM battery model.



Σχήμα Α'.2.: Capacity Model implementation of KiBaM.

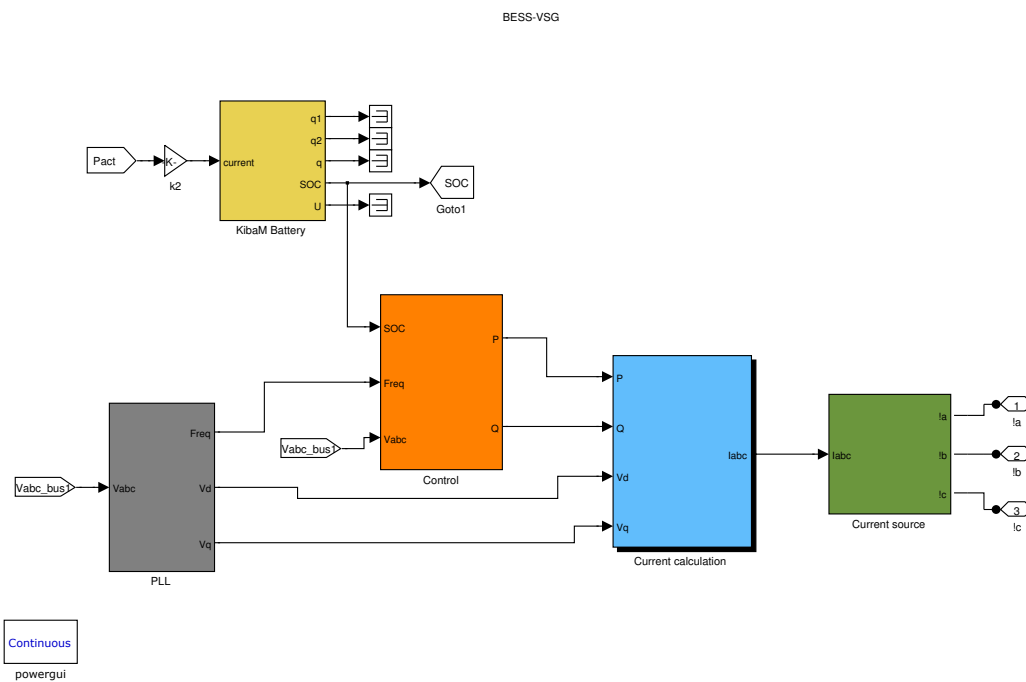


Σχήμα Α'.3.: Voltage model implementation of KiBaM .

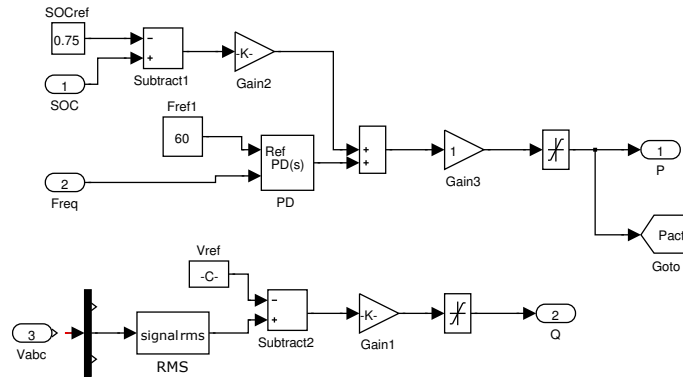


Σχήμα A'.4.: Calculation of $q_{max}(I)$.

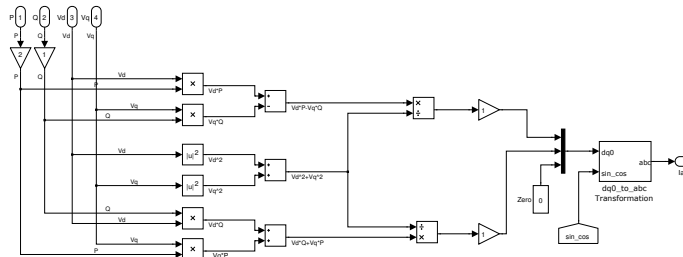
A'.2. Μοντέλο εικονικής σύγχρονης μηχανής



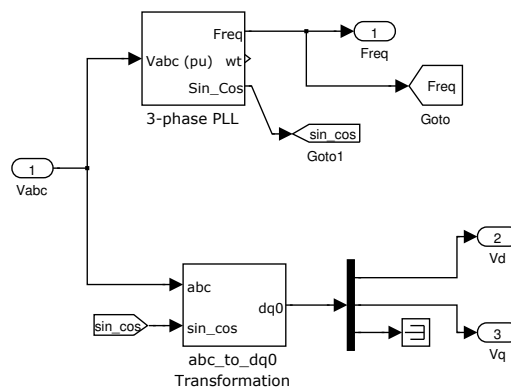
Σχήμα A'.5.: Simulink model of Virtual Synchronous Machine.



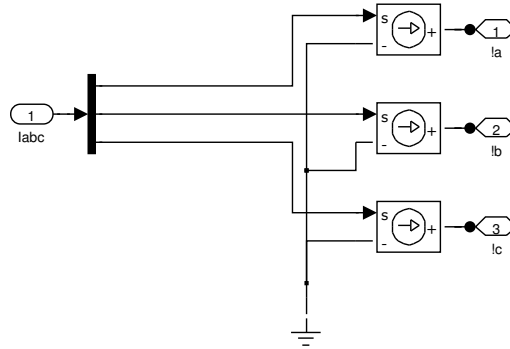
Σχήμα Α'.6.: High level control of VSG.



Σχήμα Α'.7.: Low level control of VSG.

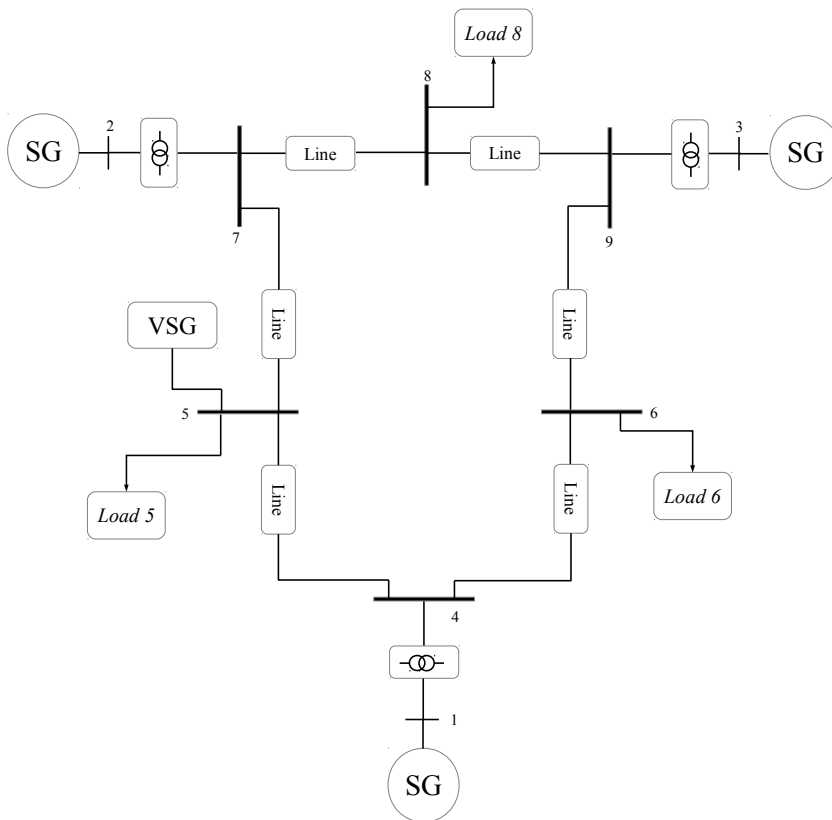


Σχήμα Α'.8.: PLL block of VSG model.



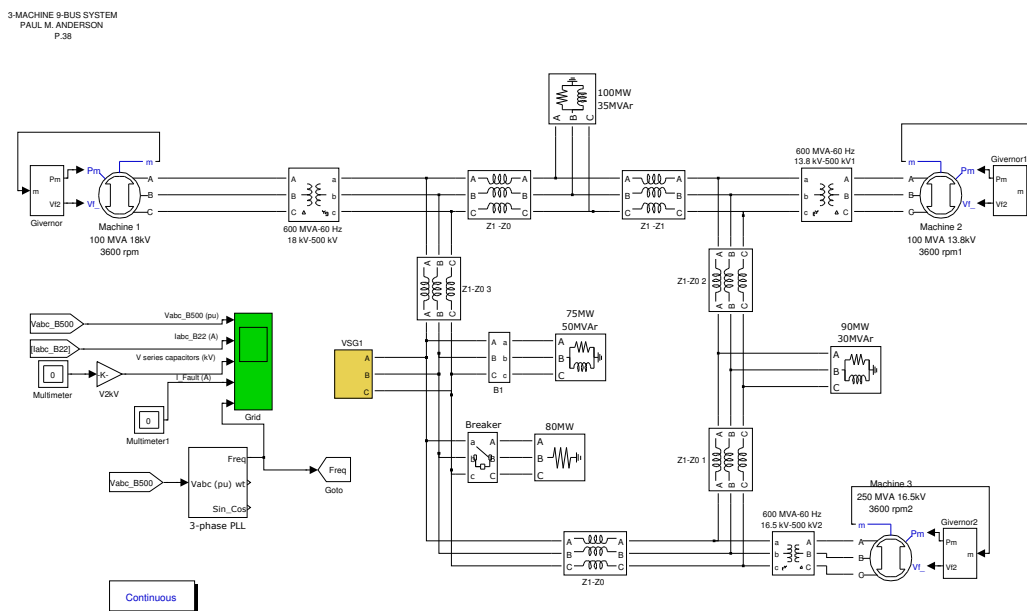
Σχήμα A'.9.: Controlled 3-phase Current Source of VSG model.

A'.3. Δεδομένα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

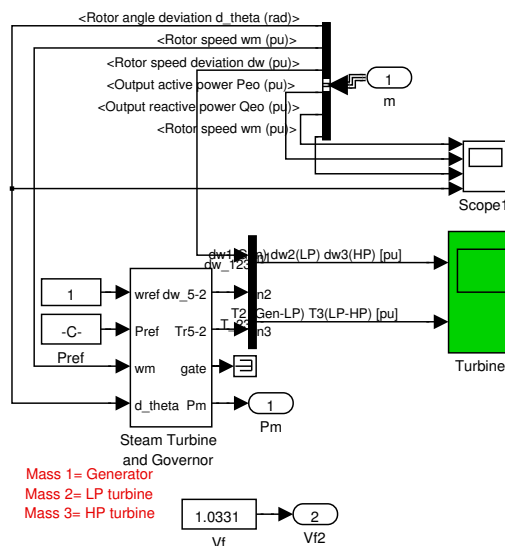


Σχήμα A'.10.: Single line diagram of 3-machine 9-bus system [?].

A.3.1. Matlab/Simulink models



Σχήμα Α'.11.: Simulink implementation of 3-machine 9-bus system.



Σχήμα Α'.12.: Simulink implementation of of steam turbine and governor.

A'.3.2. Ηλεκτρικές παράμετροι των γεννητριών

Generator	1	2	3
Rated <i>MVA</i>	250	100	100
<i>kV</i>	16.5	18	13.8
x_d	0.1460	0.8958	1.3125
x_d'	0.0608	0.1198	0.1813
x_q	0.0969	0.8645	1.2578
x_q'	0.0969	0.1969	0.25
x_ℓ (leakage)	0.0336	0.0521	0.0742
τ_{d0}	8.96	6.00	5.89
τ_{q0}	0	0.535	0.600

Πίνακας A'.1.: Οι επαγωγικές αντιδράσεις είναι σε *pu* υπολογισμένες με βάση τα 100 *MVA*.

A'.3.3. Επίλυση ροής φορτίου

Machine: Machine 3 250 MVA 16.5kV 3600 rpm2

Nominal: 250 MVA 16.5 kV rms

Bus Type: Swing bus

Uan phase: 1.25°

Uab: 17764 Vrms [1.077 pu] 31.25°

Ubc: 17764 Vrms [1.077 pu] -88.75°

Uca: 17764 Vrms [1.077 pu] 151.25°

Ia: 3662.8 Arms [0.4187 pu] -33.02°

Ib: 3662.8 Arms [0.4187 pu] -153.02°

Ic: 3662.8 Arms [0.4187 pu] 86.98°

P: 9.3125e+07 W [0.3725 pu]

Q: 6.3467e+07 Vars [0.2539 pu]

Pmec: 9.3322e+07 W [0.3733 pu]

Torque: 2.4754e+05 N.m [0.3733 pu]

Vf: 1.036 pu

Machine: Machine 2 100 MVA 13.8kV 3600 rpm1

Nominal: 100 MVA 13.8 kV rms
Bus Type: P & V generator
Uan phase: 1.57°
Uab: 14816 Vrms [1.074 pu] 31.57°
Ubc: 14816 Vrms [1.074 pu] -88.43°
Uca: 14816 Vrms [1.074 pu] 151.57°
Ia: 3772.3 Arms [0.9017 pu] -26.65°
Ib: 3772.3 Arms [0.9017 pu] -146.65°
Ic: 3772.3 Arms [0.9017 pu] 93.35°
P: 8.5301e+07 W [0.853 pu]
Q: 4.5776e+07 Vars [0.4578 pu]
Pmec: 8.5667e+07 W [0.8567 pu]
Torque: 2.2724e+05 N.m [0.8567 pu]
Vf: 1.8706 pu

Machine: Machine 1 100 MVA 18kV 3600 rpm
Nominal: 100 MVA 18 kV rms
Bus Type: P & V generator
Uan phase: 1.20°
Uab: 19341 Vrms [1.074 pu] 31.20°
Ubc: 19341 Vrms [1.074 pu] -88.80°
Uca: 19341 Vrms [1.074 pu] 151.20°
Ia: 2966.2 Arms [0.9248 pu] -29.93°
Ib: 2966.2 Arms [0.9248 pu] -149.93°
Ic: 2966.2 Arms [0.9248 pu] 90.07°
P: 8.5064e+07 W [0.8506 pu]
Q: 5.136e+07 Vars [0.5136 pu]
Pmec: 8.5449e+07 W [0.8545 pu]
Torque: 2.2666e+05 N.m [0.8545 pu]
Vf: 1.5888 pu

Βιβλιογραφία

- [1] Second benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(5):1057–1066, May 1985.
- [2] Χαράλαμπος Ι. Αναστόπουλος. Ανάλυση της λειτουργίας εργαστηριακού πρωτότυπου μικροδικτύου. Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Ιούλιος 2004.
- [3] Load-frequency control and performance. Technical report, UCTE OH, March 2009.
- [4] Hirofumi Akagi, Edson Hirokazu Watanabe, and Mauricio Aredes. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. John Wiley & Sons, March 2007.
- [5] Paul M. Anderson, Abdel-Aziz A. Fouad, Institute of Electrical Engineers, and Electronics. *Power system control and stability*. IEEE Press, 2003.
- [6] Y. Chen, R. Hesse, D. Turschner, and H. P. Beck. Dynamic properties of the virtual synchronous machine (VISMA). In *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ 2011)*, pages 13–15, 2011.
- [7] M. Ding, X. Yang, and J. Su. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid. *Automation of Electric Power Systems*, 89–93, 2009.
- [8] M.K. Donnelly, J.E. Dagle, D.J. Trudnowski, and G.J. Rogers. Impacts of the distributed utility on transmission system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(2):741–746, May 1996.
- [9] J. Driesen and K. Visscher. Virtual synchronous generators. In *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, pages 1–3, July 2008.
- [10] Elisabeth Lemaire, Nicolas Martin, Per Norgard, Erik de Jong, Roald de Graaf, Jasper Groenewegen, Efstathia Kolentini, and Stathis Tselepis. *European white book on grid-connected storage*. DERlab Report R- 003.0, European Distributed Energy Resources Laboratories, December 2011.
- [11] T.F. Fuller, M. Doyle, and J. Newman. Simulation and optimization of the dual lithium ion insertion cell. *Journal of the Electrochemical Society*, 141:1, 1994.
- [12] A. D. Hansen, Poul Sorensen, Lars H. Hansen, and Henrik Bindner. Models for a stand-alone PV system, volume 1219. Riso National Laboratory, December 2000.

-
- [13] MR Jongerden and BR Haverkort. Battery modeling. 2008.
- [14] V. Karapanos, S. de Haan, and K. Zwetsloot. Real time simulation of a power system with VSG hardware in the loop. In IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pages 3748–3754. IEEE, November 2011.
- [15] Karapanos, V., Yuan, Z., de Haan, S. W. H., and Visscher, K. A control algorithm for the coordination of multiple virtual synchronous generator units.
- [16] Taesic Kim and Wei Qiao. A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(4):1172–1180, December 2011.
- [17] Prabha Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Companies, Incorporated, January 1994.
- [18] James F. Manwell and Jon G. McGowan. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. *Solar Energy*, 50(5):399–405, May 1993.
- [19] Nicolas Martin, Elisabeth Lemaire, Paul Crolla, Rebecca Cartes, and Piotr Gburczyk. Applications of storage selected and their associated profiles. Technical Report D_JRA-2.1.1, DERri, September 2012.
- [20] P. Mercier, R. Cherkaoui, and A. Oudalov. Optimizing a battery energy storage system for frequency control application in an isolated power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(3):1469–1477, August 2009.
- [21] Nazih Moubayed, Janine Kouta, Ali El-Ali, Hala Dernayka, and Rachid Outbib. Parameter identification of the lead-acid battery model. In 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC '08, pages 1–6. IEEE, May 2008.
- [22] A. Oudalov, D. Chartouni, and C. Ohler. Optimizing a battery energy storage system for primary frequency control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(3):1259–1266, August 2007.
- [23] Valer Pop, Henk Jan Bergveld, Dmitry Danilov, Paul P. L. Regtien, and Peter H. L. Notten. *Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications*. Springer, softcover reprint of hardcover 1st ed. 2008 edition, December 2010.
- [24] Νικόλαος Γ. Δανιήλ. Μοντελοποίηση μικροδικτύου και ένταξη αυτού στην αγορά ενέργειας με χρήση ευφυούς πράκτορα. Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Μάιος 2011
- [25] D. Rakhmatov, S. Vrudhula, and D.A. Wallach. A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 11(6):1019–1030, December 2003.
- [26] M. H. Rashid. *Power electronics: circuits, devices, and applications*. Pearson/Prentice Hall, 2004.

- [27] M. Torres and L. A. C. Lopes. An optimal virtual inertia controller to support frequency regulation in autonomous diesel power systems with high penetration of renewables.
- [28] V. Karapanos, S. de Haan, and K. Zwetsloot. Testing a virtual synchronous generator in a real time simulated power system. Delft, Netherlands, May 2011. IPST.
- [29] T. V Van, K. Visscher, J. Diaz, V. Karapanos, A. Woyte, M. Albu, J. Bozelie, T. Loix, and D. Federenciuc. Virtual synchronous generator: An element of future grids. In Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES, pages 1–7. IEEE, October 2010.
- [30] V. Van Thong, E. Vandenbrande, J. Soens, D. Van Dommelen, J. Driesen, and R. Belmans. Influences of large penetration of distributed generation on n-1 safety operation. In IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004, pages 2177 –2181 Vol.2, June 2004.
- [31] V. Van Thong, A. Woyte, M. Albu, M. Van Hest, J. Bozelie, J. Diaz, T. Loix, D. Stanculescu, and K. Visscher. Virtual synchronous generator: Laboratory scale results and field demonstration. In PowerTech, 2009 IEEE Bucharest, pages 1 –6, July 2009.
- [32] K. Visscher and S.W.H. De Haan. Virtual synchronous machines (VSG'S) for frequency stabilisation in future grids with a significant share of decentralized generation. In SmartGrids for Distribution, 2008. IET-CIRED. CIRED Seminar, pages 1 –4, June 2008.
- [33] Yang Xiang-zhen, Su Jian-hui, Ding Ming, Li Jin-wei, and Du Yan. Control strategy for virtual synchronous generator in microgrid. In 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), pages 1633 –1637, July 2011.
- [34] X. Yang. Autonomous controller based on synchronous generator dq0 model for micro grid inverters. ICPE 2011-ECCE Asia, 2645- 2649, 2011.
- [35] Yong Chen, Ralf Hesse, Dirk Turschner, and Hans-Peter Beck. Comparison of methods for implementing virtual synchronous machine on inverters. Santiago de Compostela, Spain, 2012. European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality.
- [36] Muhamad Reza, Stability analysis of transmission systems with high penetration of distributed generations, Phd Thesis, Delft University of Technology, Dec 2006.
- [37] Άρης Ευάγγελος Λ. Δημέας. Συμβολή στον κατακεντημένο έλεγχο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στην χαμηλή τάση. Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, 2006.

-
- [38] James F. Manwell, Henrik Bindner, Tom Cronin, Per Lundsager, Utama Abdulwahid. Lifetime modeling of lead acid batteries. Riso National Laboratory, April 2005.
- [39] J. F. Manwell, A. Rogers, G. Hayman, C. T. Avelar, J. G. McGowan, U. Abdulwahid, K. Wu. Hybrid2-A hybrid simulation model theory manual. Renewable Energy Research Laboratory Uni. of Massachusetts, June 2006.
- [40] Loix, T. and De Breucker, S. and Vanassche, P. and Van den Keybus, J. and Driesen, J. and Visscher, K., "Layout and performance of the power electronic converter platform for the VSYNC project" (2009), 1–8.
- [41] Νικόλαος Α. Σουλτάνης. Συμβολή στον έλεγχο και στην προσομοίωση συστήματος ισχύος χαμηλής τάσης με διεσπαρμένη παραγωγή. Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, 2009.