



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη και Σχεδίαση Τεχνικών Ελέγχου ενός Συστήματος
Αποθήκευσης Ενέργειας σε Συσσωρευτές (Battery Energy
Storage System - BESS) για Αυτόνομα Νησιωτικά Συστήματα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπυρίδων Β. Γιαννούτσος

Επιβλέπων: Στέφανος Ν. Μανιάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη και Σχεδίαση Τεχνικών Ελέγχου ενός Συστήματος
Αποθήκευσης Ενέργειας σε Συσσωρευτές (Battery Energy
Storage System - BESS) για Αυτόνομα Νησιωτικά Συστήματα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπυρίδων Β. Γιαννούτσος

Επιβλέπων: Στέφανος Ν. Μανιάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Ιουλίου 2010.

.....
Στ. Ν. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Στ. Παπαθανασίου
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

.....
Σπυρίδων Β. Γιαννούτσος

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

Copyright © Σπυρίδων Β. Γιαννούτσος, 2010

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.

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στη μελέτη, υλοποίηση και διαχείριση ενός συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές (BESS). Τα κύρια χαρακτηριστικά του προτεινόμενου συστήματος είναι η προσαρμοστικότητα, η ικανότητα πρόγνωσης, η ευστάθεια και η ευελιξία. Για την ικανοποίηση των σύνθετων αυτών προδιαγραφών, γίνεται πλήρης παραμετροποίηση του δυναμικού συστήματος ελέγχου, που είναι δομημένο ιεραρχικά και βασίζεται στην επικοινωνία υποσυστημάτων που ελέγχονται από δύο μικροεπεξεργαστές. Επιπλέον η απόδοση εκτιμάται με συγκριτική μελέτη της απόκρισης του συστήματος ισχύος, χρησιμοποιώντας τις κυριότερες τεχνικές ελέγχου των παλμών του τριφασικού αντιστροφέα μέσα από την εφαρμογή ελέγχου P-Q με αναφορά είτε την τάση είτε το ρεύμα του δικτύου και την παράλληλη χρησιμοποίηση PI ελεγκτών. Ειδικότερα εξετάζεται η τεχνική της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (SPWM), η τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών με διανύσματα κατάστασης (SVPWM) και η τεχνική ελέγχου ρεύματος σε ζώνη υστέρησης (HBCC). Για το συγχρονισμό αντιστροφέα δικτύου χρησιμοποιείται βρόχος κλειδωμένης φάσης (PLL). Το σύστημα προσομοιώνεται στο πρόγραμμα MATLAB/SIMULINK για τις φάσεις φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών, καθώς και στην περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος, προκειμένου να ικανοποιηθούν τα όρια φόρτισής τους. Η προσομοίωση γίνεται και σε περιπτώσεις ασυμμετρίας της τάσης, του ρεύματος και μεταβολής της συχνότητας. Εντός της προκείμενης εργασίας, ο αναγνώστης μπορεί να βρει μια σύντομη αλλά περιεκτική ανάλυση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, τις προϋποθέσεις σύνδεσης αυτόνομης μονάδας παραγωγής στο δίκτυο, τη στρατηγική φόρτισης / εκφόρτισης των συσσωρευτών, τη θεωρητική ανάλυση των σημαντικότερων τεχνικών ελέγχου των παλμών του τριφασικού αντιστροφέα, αλλά και τη συγκριτική μελέτη και σχεδίαση των τεχνικών ελέγχου του προτεινόμενου συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Το BESS παρουσιάζει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών πέρα από τη ρύθμιση του φορτίου, που συνίσταται στην προστασία των καταναλωτών σε περίπτωση βλάβης του δικτύου, στην αδιάλειπτη παροχή ισχύος, στην ενίσχυση της στρεφόμενης εφεδρείας και της διείσδυσης των ΑΠΕ, καθώς και στην ευστάθεια του ΣΗΕ που εγκαθίσταται. Είναι λοιπόν αναμενόμενο ότι στο άμεσο μέλλον, το αυξανόμενο επιστημονικό ενδιαφέρον πάνω στην εξέλιξη του εξοπλισμού και των αλγορίθμων του BESS θα διευρύνει ακόμη περισσότερο τις πρακτικές εφαρμογές του και την ενσωμάτωσή του στα ΣΗΕ.

Λέξεις κλειδιά:

Συσσωρευτές, Σύστημα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Συσσωρευτές, (BESS), ΑΠΕ, Τεχνικές Ελέγχου Παλμών του Αντιστροφέα, Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών, Διαμόρφωση Εύρους Παλμών με Διανύσματα Κατάστασης, Τεχνική Ελέγχου Ρεύματος σε Ζώνη Υστέρησης, Έλεγχος Ενεργού και Άεργου Ισχύος (Έλεγχος P – Q), PLL, Όρια Φόρτισης, Φάση Φόρτισης και Εκφόρτισης

ABSTRACT

This diploma thesis refers to the modeling, implementation and management of a Battery Energy Storage System (BESS). The main features of the proposed system are adaptivity, precognition, stability and flexibility. To meet these complex specifications, the dynamic control system, which is implemented through a master-slave structure and based on a digital signal processor subsystem intercommunication, is fully parameterized. Moreover the performance of the power system is estimated by a comparative study on the most important three phase inverter pulse control techniques, through the application of P-Q control and the usage of PI regulators, while taking as a reference either the grid voltage or the grid current. Particularly, the following three control techniques are considered: Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM), Space Vector PWM (SVPWM) and Hysteresis Band Current Control (HBCC). The synchronization of the inverter and the network is achieved by using a Phase Locked Loop (PLL). The system is simulated in MATLAB/SIMULINK regarding the charge and discharge phases of the batteries, as well as the case where the system by-passes the active power command in order to satisfy their state of charge limit (SOC limit). The simulation is also carried out in case of unbalanced voltage, current and changed frequency. In this thesis, the reader is able to attain a short but coherent analysis of the energy storage systems, the elements required to connect an autonomous power source to the network, the battery charge / discharge policy, the theoretical analysis of the operation of the most important control techniques of a three phase voltage fed inverter, as well as the comparative study and design of the proposed control techniques for the battery energy storage system. Nowadays apart from load regulation, BESS has a wide range of applications, such as area and consumer protection in case of system disturbances, unlimited power supply (UPS), spinning reserve and further use of renewable energy sources, as long as providing system stability. Therefore, it is expected that in the near future, the increasing interest on the research and the development of new equipment and algorithms will make the field of application of BESS substantially larger.

Key words:

Batteries, Battery Energy Storage System (BESS), Renewable energy sources, inverter pulse control techniques, Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM), Space Vector PWM (SVPWM), Hysteresis Band Current Control (HBCC), Active and Reactive Power Control (P – Q control), PLL, State of charge limit (SOC limit), charge and discharge phase

Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας ολοκληρώνονται οι προπτυχιακές μου σπουδές στη σχολή των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Η επιτυχία αυτή αποτελεί ξεχωριστό γεγονός για εμένα αφού πραγματοποιήθηκε ύστερα από αρκετή προσπάθεια, ενώ σηματοδοτεί και την έναρξη της επαγγελματικής μου πορείας ως μηχανικός. Σε αυτό το διάστημα των πέντε ετών, ήταν αρκετοί οι άνθρωποι οι οποίοι στάθηκαν δίπλα μου και με βοήθησαν σε αυτή την προσπάθεια. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Στέφανο Ν. Μανιά, καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την εμπιστοσύνη που έδειξε από την αρχή στο πρόσωπό μου, τη συμπαράσταση και την πολύτιμη καθοδήγησή του προς την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Η σημαντικότερη προσφορά του όμως, ήταν όχι μόνο το μεγάλο ενδιαφέρον που μου προκάλεσε για το αντικείμενο των Ηλεκτρονικών Ισχύος, αλλά και οι συμβουλές του για τον τρόπο αντιμετώπισης των προβλημάτων ενός μηχανικού. Επιπλέον νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, κ. Α. Κλαδά και Στ. Παπαθανασίου, Καθηγητή Ε.Μ.Π. και Επ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. αντίστοιχα για τις γνώσεις που αποκόμισα από τα μαθήματά τους, καθώς και όλα τα μέλη του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος. Για το τέλος, αφήνω τους ανθρώπους οι οποίοι, όπως σε όλη μου τη ζωή, έτσι και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, στάθηκαν δίπλα μου σε ευχάριστες αλλά και δύσκολες στιγμές, προσφέροντας μου τα απαραίτητα εφόδια, ψυχικά και υλικά για να πετύχω τους στόχους μου. Για το λόγο αυτό, ευχαριστώ την οικογένειά μου, τη μητέρα μου Λίνα, τον πατέρα μου Βασίλη και εύχομαι καλή πρόοδο και πολλές επιτυχίες στον αδερφό μου Μιχάλη.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η	5
A B S T R A C T	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	11
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	25
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	25
1.1 ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΚΙΝΗΤΡΑ	25
1.2 ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ - ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ	26
1.3 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	29
1.4 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	31
1.5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΠΡΩΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	34
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΤΟ Σ.Η.Ε	34
2.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	34
2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	35
2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	39
2.4 ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	41
2.4.1 Στρεφόμενες μάζες - Σφόνδυλοι.....	41
2.4.2 Υπερπυκνωτές (supercapacitors).....	42
2.4.3 Υπεραγώγιμα πηνία (SMES).....	43
2.4.4 Αντλησιοταμίευση (Pump – hydro storage)	43
2.4.5 Σύστημα συμπίεσης αέρα (CAES)	44
2.4.6 Τεχνολογία υδρογόνου.....	45

2.5	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ (BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS).....	45
2.5.1.	Τεχνολογία μολύβδου-οξέος (<i>Lead Acid</i>)	47
2.5.2.	Τεχνολογία νικελίου-καδμίου (<i>NiCd</i>)	48
2.5.3.	Τεχνολογία θειούχου νατρίου (<i>NaS</i>).....	48
2.5.4.	Τεχνολογία ιόντων λιθίου (<i>Li ion</i>).....	48
2.5.5.	Τεχνολογία λιθίου-πολυμερούς (<i>Li – Polymer</i>)	49
2.5.6.	Τεχνολογία συσσωρευτών ροής (<i>flow batteries</i>)	49
2.6	ΣΥΝΟΨΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	52
2.7	ΓΕΝΙΚΟ ΔΟΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ BESS ΠΡΟΣ ΜΕΛΕΤΗ ...	54
2.8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3..... 57

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ BESS..... 57

3.1	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ BESS ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	57
3.1.1	Βασικά στοιχεία-ορισμοί	57
3.1.2	Αργές μεταβολές της τάσης	59
3.1.2.1	Προσεγγιστική μέθοδος.....	59
3.1.2.2	Ακριβής μέθοδος.....	60
3.1.3	Ταχείες μεταβολές της τάσης - <i>Flicker</i>	61
3.1.3.1	Χειρισμοί	62
3.1.3.2	Κανονική λειτουργία.....	64
3.1.4	Εκπομπές αρμονικών.....	64
3.2	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ BESS	66
3.2.1	Στόχοι και απαιτήσεις από το σύστημα BESS	66
3.2.2	Στρατηγική φόρτισης / εκφόρτισης των συσσωρευτών.....	67
3.3	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΚΟΙΝΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ (POINT OF COMMON COUPLING - PCC)	76
3.3.1	Σύμβαση κατεύθυνσης της ροής ενεργού και άεργου ισχύος.....	76
3.3.2	Σχηματικό διάγραμμα και ροή ισχύος στο PCC	77
3.4	ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΚΤΥΟΥ	82
3.5	ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΚΛΕΙΔΩΜΕΝΗΣ ΦΑΣΗΣ (PLL) ..	83
3.5.1	Λειτουργικό διάγραμμα του PLL.....	84
3.5.2	Μετασχηματισμός <i>abc</i> σε <i>αβ</i> (μετασχηματισμός <i>Clarke</i>).....	85
3.5.3	Πολυμεταβλητό φίλτρο	86

3.5.4 Μετασχηματισμός $\alpha\beta-dq$ και μετασχηματισμός <i>Park</i>	87
3.5.5 Φίλτρο Βρόχου	89
3.6 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ SCADA ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ BPL.....	90
3.6.1 Δομή συστημάτων SCADA	91
3.6.2 Η τεχνολογία BPL	92
3.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΤΡΙΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4..... 97

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ BESS 97

4.1 ΣΤΟΧΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ BESS... 97	97
4.2 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥ ΚΑΙ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ (P - Q CONTROL) ΜΕ ΣΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΚΑΙ ΤΟ ΡΕΥΜΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΑΛΜΩΝ..... 98	98
4.2.1 Έλεγχος P- Q μέσω της τάσης αναφοράς με χρήση PLL..... 99	99
4.2.2 Έλεγχος P – Q μέσω της τάσης αναφοράς χωρίς τη χρήση PLL . 102	102
4.2.2.1 Εκτίμηση γωνίας του δικτύου μέσω εικονικής ροής	103
4.2.2.2 Αποδιαμόρφωση με χρήση ανιχνευτή μηδενισμών (Zero Crossing detection).....	104
4.2.3 Έλεγχος P - Q μέσω του ρεύματος αναφοράς με χρήση PLL 106	106
4.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ ΤΗΣ ΕΝΤΟΛΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΟΡΙΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ..... 108	108
4.4 Έλεγχος προστασίας συστήματος BESS 110	110
4.5 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ BESS 111	111
4.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ PLL	114
4.7 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΥΟ ΜΙΚΡΟΠΕΠΕΡΓΑΣΤΩΝ DSP ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΗ MASTER-SLAVE. 115	115
4.7.1 Δομικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης	116
4.7.2 Υπορουτίνες DSP που συνιστούν τον αλγόριθμο ελέγχου	117
4.7.3 Υλοποίηση συστήματος σε επίπεδο hardware.....	122
4.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΤΕΤΑΡΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	125

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	126
ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΠΗΓΗΣ ΤΑΣΗΣ – ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΑΛΜΩΝ	126
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	126
5.2 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΠΗΓΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	127
5.2.1 Μονοφασικός αντιστροφέας ημιγέφυρας	127
5.2.2 Τριφασικός αντιστροφέας.....	128
5.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ.....	134
5.3.1 Τεχνική ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM) ..	135
5.3.1.1 Μονοφασικός αντιστροφέας ελεγχόμενος από SPWM.....	135
5.3.1.2 Τριφασικός αντιστροφέας ελεγχόμενος με SPWM.....	144
5.3.2 Διαμόρφωση εύρους παλμών με διανύσματα κατάστασης (SVPWM)	147
5.3.3 Διαμόρφωση εύρους παλμών για τον έλεγχο ρεύματος σε ζώνη υστέρησης (Hysteresis Band Current Control PWM)	154
5.4 ΦΙΛΤΡΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ	156
5.4.1 Φίλτρα εξόδου αντιστροφέα	157
5.4.1.1 Φίλτρο εξόδου τοπολογίας LC	157
5.4.1.2 Φίλτρο εξόδου τοπολογίας LCL.....	160
5.4.2 Φίλτρα εισόδου αντιστροφέα.....	162
5.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΠΕΜΠΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	164
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	165
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ BESS.....	165
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	165
6.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ BESS.....	165
6.2.1 Μοντελοποίηση συσσωρευτών, αντιστροφέα, μετρητικών συστημάτων και δικτύου.....	166
6.2.2 Μοντελοποίηση υποσυστημάτων ελέγχου συστήματος BESS.....	174
6.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ BESS ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	179
6.3.1 Προσομοίωση διανυσματικού ελέγχου P-Q με είσοδο αναφοράς V_{ref} για τον συγχρονισμό δικτύου και αντιστροφέα με ελεγκτή παραγωγής παλμών SPWM	180
6.3.1.1 Φάση εκφόρτισης.....	182
6.3.1.2 Φάση φόρτισης	186
6.3.1.3 Φάση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος.....	189

6.3.2 Προσομοίωση διανυσματικού ελέγχου $P-Q$ με είσοδο αναφοράς V_{ref} για τον συγχρονισμό δικτύου και αντιστροφή με ελεγκτή παραγωγής παλμών $SVPWM$	191
6.3.2.1 Φάση εκφόρτισης.....	193
6.3.2.2 Φάση φόρτισης	196
6.3.2.3 Φάση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος	198
6.3.3 Προσομοίωση διανυσματικού ελέγχου $P-Q$ με χρησιμοποίηση του ρεύματος του δικτύου I_{ref} ως αναφορά για το PLL για τη δημιουργία παλμών μέσω του ελέγχου βρόχου υστέρησης.	200
6.3.3.1 Φάση εκφόρτισης.....	203
6.3.3.2 Φάση φόρτισης	206
6.3.3.3 Φάση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος	209
6.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ BESS ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	210
6.4.1 Ασυμμετρία τάσεων δικτύου	211
6.4.2 Ασυμμετρία ρευμάτων δικτύου.....	212
6.4.3 Μεταβολές στη συχνότητα του δικτύου	213
6.4.4 Συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα	216
6.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΕΚΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	219
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....	220
ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	220
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	220
7.2 ΣΥΝΟΨΗ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ	221
7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	224
7.3.1 Σύνοψη και σύγκριση χαρακτηριστικών των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας.....	224
7.3.2 Σύνοψη της στρατηγικής φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών	226
7.3.3 Σύνοψη των μεθόδων συγχρονισμού του αντιστροφέα του συστήματος BESS με το δίκτυο	227
7.3.4 Σύνοψη και σύγκριση αποτελεσμάτων των τεχνικών ελέγχου του συστήματος BESS.	229
7.3.4.1 Διανυσματικός έλεγχος $P-Q$ με σήμα αναφοράς V_{ref} για το συγχρονισμό του αντιστροφέα με το δίκτυο.....	230
7.3.4.2 Έλεγχος $P-Q$ με σήμα αναφοράς I_{ref} για το συγχρονισμό του αντιστροφέα με το δίκτυο.....	231
7.3.4.3 Περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος	232
7.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΝΑΣΧΟΛΗΣΗ	235

Ευρετήριο σχημάτων και πινάκων

Κεφάλαιο 1

Σχήμα 1.1: Διάταξη συστήματος ελέγχου όπως αναφέρεται στη δημοσίευση [6]

Σχήμα 1.2: Διάταξη συστήματος ελέγχου BESS όπως αναφέρεται στη δημοσίευση [9]

Σχήμα 1.3: Δομικό διάγραμμα προτεινόμενου συστήματος ελέγχου του BESS

Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2-1: Τυπικές εφαρμογές μονάδων αποθήκευσης ανάλογα με τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας τους

Πίνακας 2-2: Εναλλακτικές μέθοδοι της αποθήκευσης ενέργειας για διάφορες εφαρμογές στο ΣΗΕ

Πίνακας 2-3: Μορφή μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας για τις διάφορες ομάδες αποθηκευτικών διατάξεων

Πίνακας 2-4: Χαρακτηριστικές εγκαταστάσεις συσσωρευτών μολύβδου οξέος

Πίνακας 2-5: Χαρακτηριστικές εγκαταστάσεις συσσωρευτών ροής

Πίνακας 2-6: Σύνοψη των τεχνολογιών και των χαρακτηριστικών των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται ως συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (BESS)

Πίνακας 2-7: Σύνοψη εφαρμογών και πλεονεκτημάτων – μειονεκτημάτων αποθηκευτικών διατάξεων ηλεκτρικής ενέργειας

Σχήμα 2-1: Απαιτήσεις ισχύος και χρονικής διάρκειας αποθήκευσης για διάφορες εφαρμογές των ΣΗΕ

Σχήμα 2-2: Μέγεθος, εφαρμογές και τεχνολογική ωριμότητα των διαφόρων πηγών αποθήκευσης

Σχήμα 2-3: Καταλληλότητα διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης ανάλογα με το χρονικό ορίζοντα και την ισχύ τους.

Σχήμα 2.4: Τυπική διάταξη μιας μονάδας flywheel

Σχήμα 2.5: Ηλεκτροχημικοί διπλοί πυκνωτές στρώματος

Σχήμα 2.6: Σύστημα αντλησιοταμίευσης (Pumped Storage Unit)

Σχήμα 2.7: Διάγραμμα λειτουργίας μονάδας CAES

Σχήμα 2.8: Δομή ενός συσσωρευτή μολύβδου οξέος

Σχήμα 2.9: Συσσωρευτής μολύβδου οξέος ρυθμιζόμενος από βαλβίδα

Σχήμα 2.10: Διάγραμμα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας βασιζόμενο σε συσσωρευτές

Σχήμα 2.11: Γενικό δομικό διάγραμμα ενός συστήματος BESS

Κεφάλαιο 3

Πίνακας 3-1: Πιθανοί τρόποι σύνδεσης στο δίκτυο εγκαταστάσεων παραγωγής

Πίνακας 3-2: Μέγιστη επιτρεπόμενη μεταβολή της τάσης στο ΣΚΣ d_{\max} (%) εξαιτίας χειρισμών

Πίνακας 3-3: Ανηγμένα όρια αρμονικών ρεύματος ανά MVA βραχυκυκλώσεως

- Σχήμα 3.1:** Παράδειγμα σύνδεσης εγκατάστασης BESS στο δίκτυο μέσης τάσης
- Σχήμα 3.2:** ΣΣΔ και ΣΚΣ για μια τυπική περίπτωση σύνδεσης παραγωγού BESS [4]
- Σχήμα 3.3:** Αποδεκτές περιοχές μεταβολής τάσης ως προς τη μέση τιμή και τη διακύμανση
- Σχήμα 3.4:** Τυπική μορφή ταχείας μεταβολής της τάσης
- Σχήμα 3.5:** Τυπικό σύστημα παραγωγής ενός αυτόνομου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μικρού νησιού του Αιγαίου
- Σχήμα 3.6:** Χαρακτηριστική καμπύλη απόδοσης αντιστροφέα συναρτήσει της ισχύος εξόδου
- Σχήμα 3.7:** Βέλτιστη λειτουργία φόρτισης και εκφόρτισης συστήματος BESS για την εξομάλυνση αιχμών και φορτίου παράλληλα με τη μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους
- Σχήμα 3.8:** Συμβάσεις για τον καθορισμό της φασικής γωνίας φ_A του ρεύματος εξόδου των εγκαταστάσεων παραγωγής, καθώς και για την ενεργό και άεργο ισχύ.
- Σχήμα 3.9:** Σχηματικό διάγραμμα διασύνδεσης συστήματος BESS και δικτύου στο PCC και εισόδοι /έξοδοι κυκλώματος ελέγχου του αντιστροφέα
- Σχήμα 3.10:** Απλουστευμένο μονογραμμικό ισοδύναμο διάγραμμα διασυνδεδεμένου συστήματος
- Σχήμα 3.11:** Διανυσματικό διάγραμμα στην περίπτωση προσφοράς ενεργού ισχύος από το σύστημα BESS και από το δίκτυο προς το φορτίο σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος
- Σχήμα 3.12:** Διανυσματικό διάγραμμα στην περίπτωση απορρόφησης ενεργού ισχύος από το σύστημα BESS σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.
- Σχήμα 3.13:** Διανυσματικό διάγραμμα στην περίπτωση προσφοράς ενεργού ισχύος από το σύστημα BESS και στο φορτίο και στο υπόλοιπο δίκτυο λειτουργώντας αδιάλειπτα
- Σχήμα 3.14:** Συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεως
- Σχήμα 3.15:** Η βασική δομή ενός PLL
- Σχήμα 3.16:** Λειτουργικό διάγραμμα του PLL
- Σχήμα 3.17:** Μετασχηματισμός Clarke, διανυσματικό διάγραμμα και στιγμιαίες εξισώσεις των μεταβλητών εισόδου εξόδου
- Σχήμα 3.18:** Δομή πολυμεταβλητού φίλτρου του PLL
- Σχήμα 3.19:** Επεξήγηση ολικού μετασχηματισμού Park σε δύο βήματα
- Σχήμα 3.20:** Δομή φίλτρου βρόχου του PLL
- Σχήμα 3.21:** Τοπολογία συστήματος SCADA
- Σχήμα 3.22:** Δικτύωση ενός συστήματος SCADA
- Σχήμα 3.23:** Τυπική δομή αμιγώς ενσύρματου δικτύου BPL
- Σχήμα 3.24:** Εισαγωγή δεδομένων IP στις γραμμές ηλεκτρικής ισχύος με την τεχνολογία BPL

Κεφάλαιο 4

- Σχήμα 4.1:** Βασικές παράμετροι εισόδου και εξόδου του συστήματος ελέγχου του BESS
- Σχήμα 4.2:** Δομικό διάγραμμα ελέγχου P – Q ενεργού και άεργου ισχύος του συστήματος BESS με παραγωγή της τάσης V_{ref} ως είσοδο αναφοράς στον ελεγκτή παραγωγής των παλμών του αντιστροφέα
- Σχήμα 4.3:** Έλεγχος P – Q ενεργού και άεργου ισχύος του συστήματος BESS με παραγωγή της τάσης V_{ref} ως είσοδο αναφοράς στον ελεγκτή παραγωγής των παλμών του αντιστροφέα
- Σχήμα 4.4:** Εκτίμηση της γωνίας θ του δικτύου χωρίς τη χρήση PLL
- Σχήμα 4.5:** Εκτίμηση της φάσης με χρήση ανιχνευτή μηδενικών (Zero Crossing Detector)
- Σχήμα 4.6:** (α) Τάση δικτύου με αρμονικές
(β) Λεπτομέρεια της τάσης στο σημείο μηδενισμού της

Σχήμα 4.7: Δομικό διάγραμμα ελέγχου P – Q ενεργού και άεργου ισχύος του συστήματος BESS με παραγωγή του ρεύματος ως είσοδο αναφοράς στον ελεγκτή παραγωγής των παλμών του αντιστροφέα που χρησιμοποιεί τεχνική υστέρησης

Σχήμα 4.8: Ελεγχος P – Q ενεργού και άεργου ισχύος του συστήματος BESS με παραγωγή του ρεύματος I_{ref} ως είσοδο αναφοράς στον ελεγκτή παραγωγής των παλμών του αντιστροφέα που χρησιμοποιεί τεχνική βρόχου υστέρησης

Σχήμα 4.9: Εκφόρτιση συσσωρευτών σε μελλοντική χρονική στιγμή όπου προβλέπεται ότι θα παρουσιαστεί μεγαλύτερη αιχμή ζήτησης φορτίου

Σχήμα 4.10: (α) Έλεγχος τιμής σήματος επίτρεψης για λειτουργία παράκαμψης εντολής ενεργού ισχύος προκειμένου το σύστημα να ικανοποιήσει τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών
(β) Υλοποίηση με PI ελεγκτή και πύλη και λογικούς τελεστές

Σχήμα 4.11: Προστασίες υπερφόρτισης δικτύου, συσσωρευτών και ασύμμετρης φόρτισης συσσωρευτών που επενεργούν στον αυτόματο διακόπτη απόζευξης της εγκατάστασης.

Σχήμα 4.12: Ολοκληρωμένο δομικό διάγραμμα προτεινόμενου συστήματος για εφαρμογή τεχνικής ελέγχου των παλμών με αναφορά το διάνυσμα τάσης (SPWM, SVPWM)

Σχήμα 4.13: Ολοκληρωμένο δομικό διάγραμμα προτεινόμενου συστήματος στην εφαρμογή τεχνικής ελέγχου των παλμών με αναφορά το διάνυσμα ρεύματος (HBCC)

Σχήμα 4.14: Δομικό διάγραμμα τριφασικού PLL

Σχήμα 4.15: Γωνία θ δικτύου ως έξοδος του PLL

Σχήμα 4.16: Δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου της διάταξης αποθήκευσης το οποίο απεικονίζει τη διασύνδεση των ελεγχόμενων από DSP υποσυστημάτων

Σχήμα 4.17: Δομικό διάγραμμα υλοποίησης του υποσυστήματος ‘BESS dedicated control and protection system’ που ελέγχεται από το πρώτο DSP (master – υψηλή προτεραιότητα)

Σχήμα 4.18: Δομικό διάγραμμα υλοποίησης του υποσυστήματος ‘Network dedicated control system’ που ελέγχεται από το δεύτερο DSP (slave – χαμηλή προτεραιότητα)

Σχήμα 4.19: Δομικό διάγραμμα του επεξεργαστή σήματος eZDSP TM F2812 όπως παρέχεται από τον κατασκευαστή στο τεχνικό εγχειρίδιο του DSP

Σχήμα 4.20: Συσχέτιση υποσυστημάτων πειραματικής διάταξης με κριτήρια master – slave

Σχήμα 4.21: Υπορουτίνες που συνιστούν τον αλγόριθμο ελέγχου. Χρόνος εκτέλεσης σε αυτές τις ρουτίνες παραχωρείται σύμφωνα με την προτεραιότητά τους.

Σχήμα 4.22: Ολοκληρωμένο διάγραμμα ροής του συστήματος ελέγχου. Παρατηρούμε τις εισόδους και τις εξόδους στους επιμέρους αλγορίθμους.

Σχήμα 4.23: (α) Schematics κυκλώματος προ-επεξεργασίας σημάτων

(β) Προσομοιωμένες τάσεις εισόδου και εξόδου του κυκλώματος

Σχήμα 4.24: HCPL-2231 Επεξεργασία παλμών μετά από την έξοδό τους από το DSP. Αποσαφήνιση και απομόνωση

Σχήμα 4.25: Διάταξη για τη δημιουργία της συμπληρωματικής ακολουθίας παλμών (για τους διακόπτες ενός κλάδου του αντιστροφέα)

Κεφάλαιο 5

Πίνακας 5-1: RMS τιμές αρμονικών συνιστωσών SPWM σε μονοφασικό αντιστροφέα

Πίνακας 5-2: RMS τιμές αρμονικών συνιστωσών SPWM σε τριφασικό αντιστροφέα

Πίνακας 5-3: Οι οκτώ επιτρεπτές καταστάσεις του αντιστροφέα καθώς και οι αντίστοιχες τάσεις εξόδου του αντιστροφέα σε κατάσταση αγωγής

Πίνακας 5-4 : Διφασικό πλαίσιο αναφοράς τιμών

Πίνακας 5-5: Επιλογή χρονικής διάρκειας βασικών χωρικών διανυσμάτων

Πίνακας 5-6: Αλληλουχία χρόνων έναυσης για κάθε τομέα.

Σχήμα 5.1: (α) Αντιστροφείας ημιγέφυρας

(β) Παλμοί έναυσης S1, S2 και τάση εξόδου με ωμικό φορτίο

Σχήμα 5.2: Τυπική συνδεσμολογία τριφασικού αντιστροφεία γέφυρας

Σχήμα 5.3: Τριφασικές κυματομορφές τάσης

(α) Δυναμικά τάσεων ακροδεκτών εξόδου

(β) Φασικές τάσεις φορτίου

(γ) Δυναμικό κοινού σημείου του φορτίου

Σχήμα 5.4: Ισοδύναμο μοντέλο ιδανικού τριφασικού αντιστροφεία στο οποίο φαίνονται οι μετρούμενες τάσεις

Σχήμα 5.5: Κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στο φορτίο της φάσης a του αντιστροφεία για λειτουργία του συστήματος BESS (α) εκφόρτιση και (β) φόρτιση

Σχήμα 5.6: Αρχή διαμόρφωσης PWM για τον έλεγχο της τάσης εξόδου

Σχήμα 5.7: Απεικόνιση της τεχνική SPWM για $M_f=0.7$ και για $F_{nc}=7$

(α) Κυματομορφές αναφορών και φορέα

(β) Κυματομορφή της τάσης εξόδου του συγκριτή 1, E_1

(γ) Κυματομορφή της τάσης εξόδου του συγκριτή 2, E_2

Σχήμα 5.8: Μονοφασικός αντιστροφείας πλήρους γέφυρας με το κύκλωμα οδήγησης στο οποίο χρησιμοποιείται η τεχνική SPWM.

Σχήμα 5.9: Σχέδιο μονοφασικού αντιστροφεία στο PSPICE

Σχήμα 5.10: (α) Ημίτονα αναφοράς SPWM ελέγχου και τριγωνικό φέρον στην είσοδο των τελεστικών ενισχυτών

(β) Τάση εξόδου πριν το βαθυπερατό φίλτρο

(γ) Τάση εξόδου μετά το βαθυπερατό φίλτρο

(δ) Ρεύμα εξόδου

(ε) Φάσμα Αρμονικών

(στ) Ανάλυση στη ν περιοχή συχνοτήτων των κυρίαρχων αρμονικών

Σχήμα 5.11: Τεχνική SPWM για τριφασικούς αντιστροφείας.

(α) Κυματομορφές αναφορών και φορέα

(β, γ, δ) Παλμοί οδήγησης των διακοπών των 3 κλάδων.

Σχήμα 5.12: Κυματομορφές στην περιοχή της υπερδιαμόρφωσης.

Σχήμα 5.13: Χαρακτηριστική μεταφοράς SPWM υπερδιαμόρφωσης

Σχήμα 5.14: Σχηματικό διάγραμμα απλού τριφασικού αντιστροφεία με

(α) ηλεκτρονικούς διακόπτες ισχύος,

(β) ιδανικούς διακόπτες και τριφασικό φορτίο.

Σχήμα 5.15: Διανύσματα τάσεως εξόδου

εξόδου αντιστροφεία για κάθε συνδυασμό παλμών

Σχήμα 5.16: Χωρικά διανύσματα αναφοράς και εξόδου στον τομέα που ορίζεται από τα διανύσματα V_o και V_{60}

Σχήμα 5.17 : Παλμοί έναυσης σε μία περίοδο όταν το διάνυσμα τάσης αναφοράς είναι στον τομέα $U_o U_{60}$

Σχήμα 5.18: Αρχή λειτουργίας του ελέγχου ρεύματος με ζώνη υστέρησης

Σχήμα 5.19: Βαθυπερατό φίλτρο

(α) Τοπολογία βαθυπερατού φίλτρου

(β) Διάγραμμα συνάρτησης μεταφοράς

Σχήμα 5.20: Βαθυπερατό φίλτρο εξόδου LC

Σχήμα 5.21: Κανονικοποιημένη κυμάτωση της φασικής τάσης εξόδου εν συναρτήσει του λόγου συχνότητας φορέα προς τη συχνότητα συντονισμού του φίλτρου εξόδου, για διάφορες τιμές του δείκτη διαμόρφωσης

Σχήμα 5.22: Τοπολογία φίλτρου LCL

Σχήμα 5.23: Μοντέλο LCL φίλτρου στο πεδίο της συχνότητας για μία φάση

Σχήμα 5.24: Διαγράμματα Bode για το φίλτρο LCL για τιμές των παραμέτρων από την 5.4.12

Σχήμα 5.25: (α) Ισοδύναμο κύκλωμα αντιστροφέα για τον υπολογισμό του φίλτρου εισόδου
(β) Αρμονικό ισοδύναμο κύκλωμα

Κεφάλαιο 6

Πίνακας 6-1: Χαρακτηριστικά αντιστροφέα συστήματος BESS

Σχήμα 6.1: Γενικό δομικό διάγραμμα της διάταξης BESS που προσομοιώνεται

Σχήμα 6.2: Ισοδύναμο κύκλωμα επαναφορτιζόμενου συσσωρευτή

Σχήμα 6.3: Μοντέλο για την προσομοίωση των συσσωρευτών

Σχήμα 6.4: Χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης των συσσωρευτών

Σχήμα 6.5: (α) Φίλτρο εισόδου (ρεύματος) αντιστροφέα

(β) Διάγραμμα πόλων-μηδενικών

(γ) Διαγράμματα Bode πλάτους και φάσης

Σχήμα 6.6: Μοντέλο τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης και μετρητικών συστημάτων

Σχήμα 6.7: (α) Φίλτρο εξόδου (τάσης) αντιστροφέα

(β) Διάγραμμα πόλων-μηδενικών

(γ) Διαγράμματα Bode πλάτους και φάσης

Σχήμα 6.8: Μπλοκ μέτρησης ενεργού και άεργου ισχύος στο MATLAB/SIMULINK

Σχήμα 6.9: Μετρητικά συστήματα τάσεων, ρευμάτων, ενεργού και άεργου ισχύος στο PCC

Σχήμα 6.10: Μοντέλο του δικτύου το οποίο θεωρείται ως ένας άπειρος ζυγός

Σχήμα 6.11: (α) Το μοντέλο του 'Network dedicated control system'

(β) Έλεγχος κατεύθυνσης ροής ενεργού ισχύος

(γ) Εξωτερικοί βρόχοι ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος και παραγωγή ρευμάτων αναφοράς

Σχήμα 6.12: (α) Το μοντέλο του 'BESS dedicated control and protection system'

(β) Ο αλγόριθμος ελέγχου του υποσυστήματος, που περιλαμβάνει το διαγνωστικό έλεγχο των συσσωρευτών, το σύστημα παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος, τον διανυσματικό έλεγχο του αντιστροφέα και τις διάφορες προστασίες

Σχήμα 6.13: (α) Διαγνωστικός έλεγχος για υπέρβαση των ορίων φόρτισης και έλεγχος ασύμμετρης φόρτισης συσσωρευτών (failure flag on)

(β) Έλεγχος ενεργοποίησης επίτρεψης λειτουργίας παράκαμψης εντολής ενεργού ισχύος (SOC_flag_on)

Σχήμα 6.14: Αλγόριθμος ελέγχου επιπέδων φόρτισης. Ενεργοποιείται κατά τη φάση λειτουργίας 'παράκαμψης εντολής ενεργού ισχύος'

Σχήμα 6.15: Έλεγχος υπέρβασης ρευμάτων ασφαλείας στην έξοδο της συστοιχίας των συσσωρευτών όπως και στην έξοδο του αντιστροφέα (από την πλευρά του δικτύου, μετά την αυτεπαγωγή διασύνδεσης)

Σχήμα 6.16: (α) Μπλοκ διάγραμμα του PLL

(β) Μοντέλο του PLL σύμφωνα με τις παραγράφους 3.5 και 4.6.

Σχήμα 6.17: Ολοκληρωμένο μοντέλο του συστήματος BESS στο MATLAB/SIMULINK

Σχήμα 6.18: (α) Μπλοκ διανυσματικού ελέγχου P-Q που χρησιμοποιεί ως σήμα αναφοράς V_{ref} την τάση του δικτύου

(β) Αλγόριθμος διανυσματικού ελέγχου P-Q που χρησιμοποιεί ως σήμα αναφοράς V_{ref} την τάση του δικτύου και εσωτερικοί βρόχοι ελέγχου ρευμάτων d-q άξονα

Σχήμα 6.19: Επιλογή τεχνικής ελέγχου των παλμών με βάση την τάση αναφοράς V_{ref}

Σχήμα 6.20: Μοντελοποίηση της τεχνικής SPWM

Σχήμα 6.21: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς αυτό της τάσης του δικτύου για την παραγωγή παλμών μορφής SPWM την περίοδο εκφόρτισης των συσσωρευτών

Σχήμα 6.22: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης και THD% τάσεως και ρεύματος στο PCC για την τεχνική που προσομοιώθηκε κατά την εκφόρτιση

Σχήμα 6.23: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς αυτό της τάσης του δικτύου για την παραγωγή παλμών μορφής SPWM την περίοδο φόρτισης των συσσωρευτών

Σχήμα 6.24: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης και THD% ρεύματος στο PCC για την τεχνική που προσομοιώθηκε κατά την φόρτιση των συσσωρευτών

Σχήμα 6.25: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς αυτό της τάσης του δικτύου για παραγωγή παλμών μορφής SPWM στην περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος για την ικανοποίηση των ορίων φόρτισης

Σχήμα 6.26: (α) Γενικό μοντέλο της τεχνικής διαμόρφωσης του εύρους των παλμών με διανύσματα κατάστασης (SV-PWM)

(β) Καθορισμός τομέα με βάση το πλάτος και τη γωνία του ρεύματος αναφοράς, υπολογισμός των διαστημάτων T_1, T_2, T_0 και καθορισμός του τρόπου αγωγής των IGBT

(γ) Τρόπος υπολογισμού των χρονικών διαστημάτων T_1, T_2, T_0

(δ) Διαστήματα αγωγής S1-S6 για την PWM περίοδο

Σχήμα 6.27: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς αυτό της τάσης του δικτύου για την παραγωγή παλμών μορφής SV-PWM την περίοδο εκφόρτισης των συσσωρευτών

Σχήμα 6.28: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης και THD% τάσεως και ρεύματος στο PCC για την τεχνική που προσομοιώθηκε κατά την εκφόρτιση

Σχήμα 6.29: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς αυτό της τάσης του δικτύου για την παραγωγή παλμών μορφής SV-PWM την περίοδο φόρτισης των συσσωρευτών

Σχήμα 6.30: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης και THD% ρεύματος στο PCC για την τεχνική που προσομοιώθηκε κατά την φόρτιση των συσσωρευτών

Σχήμα 6.31: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς αυτό της τάσης του δικτύου για παραγωγή παλμών μορφής SV-PWM στην περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος για την ικανοποίηση των ορίων φόρτισης

Σχήμα 6.32: Αλγόριθμος διανυσματικού ελέγχου P-Q που χρησιμοποιεί ως σήμα αναφοράς για το PLL το ρεύμα του δικτύου και δημιουργία παλμών μέσω βρόχου υστέρησης

Σχήμα 6.33: Τροποποιημένο μπλοκ του συστήματος 'BESS dedicated control and protection system' ώστε να περιλαμβάνει την τεχνική βρόχου υστέρησης

Σχήμα 6.34: Έλεγχος ρεύματος μέσω βρόχου υστέρησης

Σχήμα 6.35: Λεπτομέρεια του σχήματος 6.34, όπου φαίνεται μια υψίσυχη ταλάντωση του πραγματικού ρεύματος μέσα στη ζώνη υστέρησης (limit cycle). Σ' αυτό το τμήμα της κυματομορφής η διακοπτική συχνότητα είναι ιδιαίτερα υψηλή.

Σχήμα 6.36: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς I_{ref} αυτό του ρεύματος του δικτύου για παραγωγή παλμών μέσω ελέγχου του ρεύματος σε ζώνη υστέρησης (HBCC) την περίοδο εκφόρτισης των συσσωρευτών

Σχήμα 6.37: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης και THD% τάσεως και ρεύματος στο PCC για την τεχνική που προσομοιώθηκε κατά την εκφόρτιση

Σχήμα 6.38: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς I_{ref} αυτό του ρεύματος του δικτύου για παραγωγή παλμών μέσω ελέγχου του ρεύματος σε ζώνη υστέρησης (HBCC) την περίοδο φόρτισης των συσσωρευτών

Σχήμα 6.39: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης και THD% τάσεως και ρεύματος στο PCC για την τεχνική που προσομοιώθηκε κατά την εκφόρτιση

Σχήμα 6.40: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς I_{ref} αυτό του ρεύματος του δικτύου για παραγωγή παλμών μέσω ελέγχου του ρεύματος σε ζώνη υστέρησης (HBCC) την περίοδο εκφόρτισης των συσσωρευτών

Σχήμα 6.41: Αποτελέσματα προσομοίωσης στην περίπτωση ασυμμετρίας στις τάσεις του δικτύου

Σχήμα 6.42: Αποτελέσματα προσομοίωσης στην περίπτωση ασυμμετρίας των ρευμάτων του δικτύου

Σχήμα 6.43: Αποτελέσματα προσομοίωσης στην περίπτωση μεταβολής της συχνότητας δικτύου

(α) Ελάχιστη μεταβολή 2% σύμφωνα με το πρότυπο EN 50160

(β) Μέγιστη μεταβολή 15% σύμφωνα με το πρότυπο EN 50160

Σχήμα 6.44: Αποτελέσματα προσομοίωσης για διερεύνηση ευστάθειας του συστήματος στη μεταβολή της συχνότητας

(α) Αποτελέσματα για μεταβολή 30% της συχνότητας

(β) Αποτελέσματα για μεταβολή 40% της συχνότητας

Σχήμα 6.45: Αποτελέσματα προσομοίωσης για συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα στο ζυγό χαμηλής τάσης από την χρονική στιγμή 1sec έως 1.1sec

(α) Αποτελέσματα για σφάλμα μεταξύ φάσεων L-L

(β) Αποτελέσματα για σφάλμα φάσης προς γη L-G ($Z_f=2\Omega$)

(γ) Αποτελέσματα για σφάλμα μεταξύ φάσεων προς γη L-L-G ($Z_f=2\Omega$)

(δ) Τριφασικό σφάλμα προς γη ($Z_f=2\Omega$)

Κεφάλαιο 7

Πίνακας 7-1: Σύνοψη των τεχνολογιών και των χαρακτηριστικών των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται ως συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (BESS)

Πίνακας 7-2: Σύνοψη εφαρμογών και πλεονεκτημάτων – μειονεκτημάτων αποθηκευτικών διατάξεων ηλεκτρικής ενέργειας

Πίνακας 7-3: Σύνοψη στρατηγικής φόρτισης / εκφόρτισης του συστήματος BESS

Πίνακας 7-4: Χαρακτηριστικά μεθόδων εκτίμησης της φάσης της τάσης ή του ρεύματος δικτύου

Πίνακας 7-5: Συγκεντρωτική κατάσταση των κυριότερων χαρακτηριστικών των εξεταζόμενων τεχνικών ελέγχου του συστήματος BESS

Σχήμα 7.1: Εκτίμηση της γωνίας θ από την τάση του δικτύου μέσω του PLL για το συγχρονισμό του δικτύου και του αντιστροφέα

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Πρόλογος - Κίνητρα

Στη σημερινή εποχή, η επέκταση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) για την κάλυψη ενός ολοένα αυξανόμενου και απρόβλεπτου φορτίου, το οποίο περιλαμβάνει απότομες αιχμές, αλλά και η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ ειδικά στα νησιά, καθιστούν το σύστημα ευάλωτο σε διαταραχές και προκαλούν διάφορα προβλήματα λειτουργίας. Η αβεβαιότητα και η ανασφάλεια αυτή στη διαχείριση του φορτίου οδηγεί σε έξοδα για εξοπλισμό, ενίσχυση του δικτύου και λειτουργικό έλεγχο όλου του ΣΗΕ.

Μια πιθανή μέθοδος για έλεγχο του φορτίου είναι η αποθήκευση ενέργειας όταν υπάρχει μικρή ζήτηση και η έγχυση της αποθηκευμένης ενέργειας πίσω στο δίκτυο κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα μπορεί να είναι ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές (Battery Energy Storage System - BESS) το οποίο, λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα από SCADA σε καίριες θέσεις του δικτύου αλλά και μετρώντας το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών, θα παρέχει γρήγορο έλεγχο ενεργού και άεργου ισχύος, από και προς το σύστημα, βελτιώνοντας τη λειτουργικότητα, τον έλεγχο, την αξιοπιστία, τη διαχείριση ενέργειας και την ποιότητα ισχύος.

Το σύστημα αυτό είναι ένα δυναμικό σύστημα, αφού ο αμφίπλευρος αντιστροφέας με IGBT επιτρέπει τη λειτουργία 4 τεταρτημορίων με αποτέλεσμα τη γρήγορη μεταβολή ενεργού και άεργου ισχύος, τόσο ως προς το μέτρο όσο και ως προς την κατεύθυνση, αλλά και την ενίσχυση της ευστάθειας ως προς την τάση εφόσον αυτή ελέγχεται από την άεργο ισχύ. Επιπλέον η γρήγορη απόκριση των ηλεκτρονικών συστημάτων και των μικροεπεξεργαστών που αποτελούν την καρδιά του BESS, προσφέρει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών πέρα από τη ρύθμιση φορτίου, όπως προστασία καταναλωτών σε περίπτωση βλάβης του δικτύου, ενίσχυση στρεφόμενης εφεδρείας, διόρθωση συντελεστή ισχύος, ενίσχυση ευστάθειας τάσης και συχνότητας και αδιάλειπτη τροφοδοσία ισχύος.

Στην εργασία αυτή, παρουσιάζεται και αναλύεται ενδελεχώς μια νέα διάταξη ελέγχου ενός τέτοιου συστήματος. Το σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει έλεγχο ενεργού και άεργου ισχύος (P-Q control), ο οποίος πραγματοποιείται υλοποιώντας δύο ξεχωριστές τεχνικές ελέγχου, παράλληλα με τον έλεγχο ικανοποίησης των ορίων φόρτισης των συσσωρευτών και το συγχρονισμό της τάσης του αντιστροφέα με το δίκτυο μέσω βρόχου κλειδωμένης φάσης (PLL). Εξετάζονται τρεις διαφορετικές τεχνικές ελέγχου του τριφασικού αντιστροφέα (SPWM, SVPWM, HBCC) και παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοίωσης που αφορούν στην απόκριση της ενεργού και άεργου

ισχύος, του ρεύματος και της τάσης του δικτύου, του ρεύματος και της τάσης από την πλευρά των συσσωρευτών ενώ πραγματοποιείται και φασματική ανάλυση των κυματομορφών. Κρίνεται δε απαραίτητη η εκτίμηση των επιπέδων φόρτισης των συσσωρευτών (SOC levels), πληροφορία που διαβιβάζεται στο κέντρο ελέγχου.

Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου παρουσιάζει ενδιαφέρον στη φιλοσοφία και στη μέθοδο υλοποίησης, αφού είναι δομημένο ιεραρχικά με μορφή ‘master-slave’ και βασίζεται στη χρήση ψηφιακών επεξεργαστών σήματος. Αποτελείται από δύο κύρια υποσυστήματα: το ‘Σύστημα ελέγχου εστιασμένο στο δίκτυο’ ή ‘Network dedicated control system’ και το ‘Σύστημα ελέγχου και προστασίας εστιασμένο στο BESS’ ή ‘BESS dedicated control and protection system’. Τα δύο αυτά υποσυστήματα επικοινωνούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας δεδομένα μέσω των υπολογιστών ξενιστών των δύο μικροεπεξεργαστών και έχουν σχέση ‘αφεντικού-δούλου’ με το δεύτερο να είναι υψηλότερο στην ιεραρχία.

Το σύστημα προσομοιώνεται στο MATLAB/SIMULINK για κάθε τεχνική στις περιπτώσεις φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών, καθώς και στην περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος, προκειμένου το σύστημα να ικανοποιήσει τα όρια φόρτισης.

1.2 Προηγούμενες εργασίες - δημοσιεύσεις για συστήματα BESS

Το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής με συσσωρευτές (BESS), είναι αντικείμενο ενδιαφέροντος για περίπου 20 χρόνια. Διάφοροι συγγραφείς έχουν αναπτύξει μοντέλα και έχουν αντιμετωπίσει προβλήματα σχετικά με την εφαρμογή του συστήματος στο ΣΗΕ

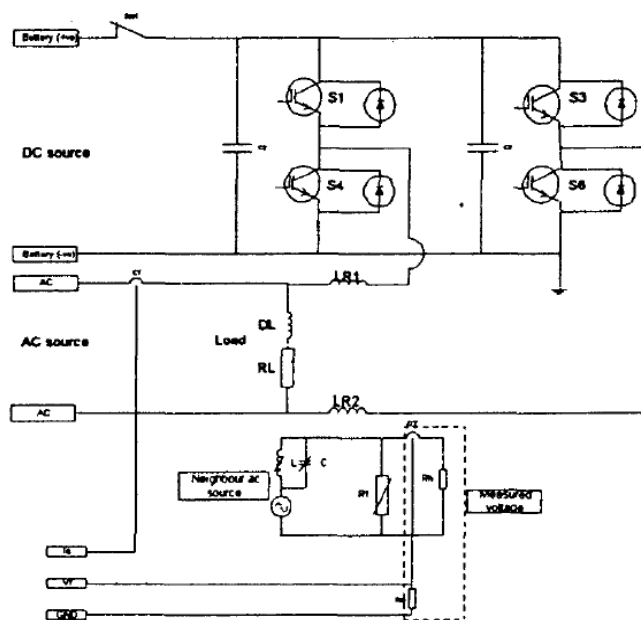
Το 1993 οι Anderson M.D, Carr D.S [2] μελέτησαν τα πεδία εφαρμογής του συστήματος BESS, ειδικότερα αναφορικά στους μεγάλους καταναλωτές π.χ βιομηχανίες, και κατέληξαν ότι τα κύρια πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι η εξομάλυνση του φορτίου, ο έλεγχος συχνότητας, η στρεφόμενη εφεδρεία, η απουσία εκπομπών και το επενδυτικό όφελος σε σχέση με την κατασκευή νέων συστημάτων διανομής

Την ίδια χρονιά οι Tsung-Ying Lee, Nanming Chen [1] ερεύνησαν τη βέλτιστη χωρητικότητα που θα πρέπει να έχει ένα σύστημα BESS όταν λειτουργεί σε ένα ΣΗΕ. Δοκίμασαν τον αλγόριθμο που δημιούργησαν στο ΣΗΕ της Ταϊβάν και κατέληξαν στο ότι η βέλτιστη χωρητικότητα μπορεί να σημαίνει και βέλτιστο οικονομικό όφελος.

Το 1995 οι Maly D.K, Kwan K.S [3] δημιούργησαν έναν αλγόριθμο δυναμικού προγραμματισμού για τη βέλτιστη πολιτική φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών. Απέδειξαν ότι για μια δεδομένη χωρητικότητα, υπάρχει βέλτιστο οικονομικό όφελος παράλληλα με την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Μέσα από πειραματικά δεδομένα αποδείχθηκε ότι η εξομάλυνση φορτίου στις αιχμές μπορεί να υπάρξει μόνο αν λάβουμε υπόψη μας το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών, τη διακύμανση της τάσης της μπαταρίας και τις εσωτερικές απώλειες. Ο αλγόριθμος αυτός είναι ο επικρατέστερος μέχρι σήμερα αναφορικά με την πολιτική φόρτισης / εκφόρτισης των συσσωρευτών.

Το 1996 οι Kyung-Hee ,Jung Hoyong ,Kim Daeseok [4] και το 1997 οι Alt J. T, Anderson M. D, Jungst R. G. [5], ασχολήθηκαν με τη σημασία που είχε η σωστή επιλογή της χωρητικότητας του συστήματος και ο τρόπος εγκατάστασης, έτσι ώστε να επιτευχθεί εξομάλυνση φορτίου και οικονομικό όφελος. Οι πρώτοι βασιζόμενοι στις χαρακτηριστικές δύο πρότυπων συστημάτων 20kW και 1MW μελέτησαν τη βέλτιστη θέση που θα έχει το σύστημα στο δευτερεύον ενός μετασχηματιστή ώστε να υπάρξει μέγιστος συντελεστής ισχύος. Οι δεύτεροι χρησιμοποίησαν ευριστικούς αλγόριθμους και κατασκεύασαν πρόγραμμα που υπολόγιζε οικονομικά οφέλη από τη χρησιμοποίηση του συστήματος

Το 1998 οι Leung, K.K. Sutanto, D [6], μοντελοποίησαν μια τοπολογία ενός συστήματος BESS με στόχο τον έλεγχο του φορτίου και την αντιστάθμιση ισχύος. Σε αυτήν την περίπτωση το BESS λειτουργούσε ως ενεργό φίλτρο, υπό την προϋπόθεση ότι το ρεύμα σε ένα κοινό κόμβο διατηρείται σταθερό και στο πλάτος και στην κυματομορφή, ανεξάρτητα από τις μεταβολές του φορτίου που μπορεί να είχε διαταραχές. Επιπλέον αυτή η σταθερή κυματομορφή μπορούσε να μετακινηθεί αριστερά και δεξιά παρέχοντας έτσι αντιστάθμιση άεργου ισχύος. Ο έλεγχος εφαρμοζόταν μέσω ενός DSP που έδινε εντολές να ανοιγοκλείνουν οι διακόπτες ώστε να παραχθεί η σταθερή κυματομορφή η οποία μπορούσε να μετακινηθεί μέσω ενός LC φίλτρου. Η διάταξη του ελέγχου του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 1.1

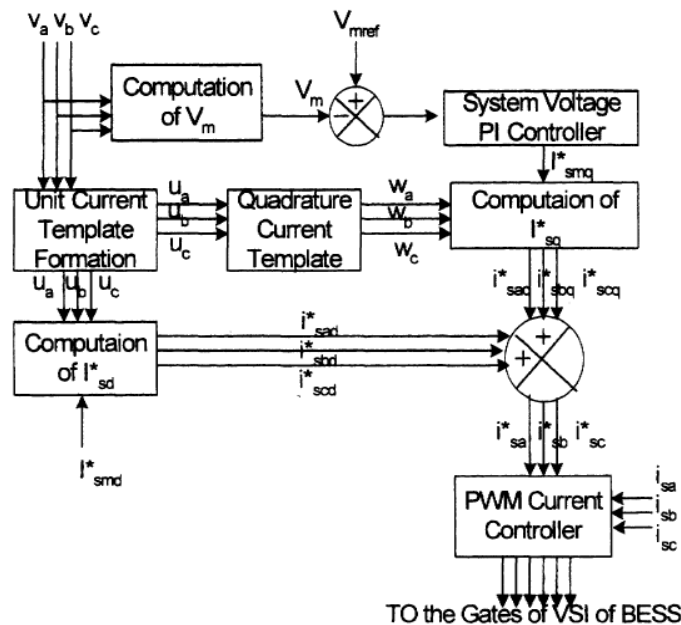


Σχήμα 1.1: Διάταξη συστήματος ελέγχου όπως αναφέρεται στη δημοσίευση [6]

Το 1999 οι S. K. Aditya, D. Das [7] μελέτησαν την επίδραση του BESS στον έλεγχο συχνότητας, βασιζόμενοι στο γεγονός ότι μπορεί να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ και άρα μπορεί να βοηθήσει στην ευστάθεια λειτουργώντας ως αντισταθμιστής άεργου ισχύος.

Το 2001 οι Z. Yang, C Shen, L. Zhang, M.L Crow , S. Atcitty [8] προσπάθησαν να ενσωματώσουν το BESS στα FACTS για αντιστάθμιση ισχύος δείχνοντας ότι λαμβάνουμε καλύτερα αποτελέσματα

Το 2005 οι Bhatia, R.S. Jain, S.P. Jain, D.K. Singh [9], ερεύνησαν την επίδραση που θα είχε ένα σύστημα BESS στις ποιότητα ισχύος, στην εξάλειψη αρμονικών και στη μείωση των διακυμάνσεων της τάσης κατά τη μεταβατική περίοδο σύνδεσης μιας γεννήτριας επαγωγής στο δίκτυο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όπως βελτιώνεται η αξιοπιστία και η ποιότητα στο δίκτυο, κατά παρόμοιο τρόπο αυξάνεται και η απόδοση μιας γεννήτριας επαγωγής αφού αυτή τροφοδοτείται από ένα σταθερό ως προς την τάση σύστημα. Επίσης μοντελοποίησαν το σύστημα ελέγχου του BESS. Οι βασικές αρχές του συστήματος ελέγχου ήταν οι εξής: Θεωρείται το σταθερό πλάτος I_{smd}^* των ρευμάτων αναφοράς των τριών φάσεων $i_{sad}^*, i_{sbd}^*, i_{scd}^*$, τα οποία είναι σε φάση με την τάση και είναι υπεύθυνα για τη φόρτιση του BESS και για την παροχή ενεργού ισχύος στο φορτίο. Το πλάτος I_{smd}^* πολλαπλασιάζεται με μοναδιαία διανύσματα u_a, u_b, u_c που έχουν προέλθει από τη διαίρεση των AC τάσεων v_a, v_b, v_c με το πλάτος V_m . Για την παραγωγή των ρευμάτων αναφοράς $i_{saq}^*, i_{sbq}^*, i_{scq}^*$, τα οποία έχουν διαφορά ενός τεταρτημορίου με την τάση, γίνεται πολλαπλασιασμός του πλάτους I_{smq}^* με μια άλλη ομάδα μοναδιαίων διανυσμάτων w_a, w_b, w_c που έχουν προέλθει μετά από κατάλληλο μετασχηματισμό φάσης των u_a, u_b, u_c . Το πλάτος I_{smq}^* προκύπτει από τη PI σύγκριση μεταξύ του V_m και της τάσης αναφοράς V_{ref} . Στη συνέχεια με σύγκριση των παραπάνω ρευμάτων παράγονται οι παλμοί του αντιστροφέα. Η διάταξη ελέγχου του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Διάταξη συστήματος ελέγχου BESS όπως αναφέρεται στη δημοσίευση [9]

Το 2006 ο Igor Papic [10] και το 2007 οι A. Oudalov, R.Cherkaoui [11] προσπάθησαν να δημιουργήσουν αποδοτικούς αλγόριθμους που θα έδιναν λύση το πρόβλημα της εξομάλυνσης φορτίου και της αποκοπής απότομων αιχμών. Ο πρώτος δημιούργησε αλγόριθμο που εκτιμά ότι ο υπολογισμός των Ah της χωρητικότητας είναι πολύ σημαντικός όταν το σύστημα χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση φορτίου σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, αφού όλα τα οικονομικά οφέλη προέρχονται από τη μείωση των φορτίων αιχμής. Ο δεύτερος, αφού χρησιμοποίησε δυναμικό προγραμματισμό [3], βρήκε το βέλτιστο σημείο λειτουργίας για μια συγκεκριμένη μπαταρία. Ο αλγόριθμος που δημιούργησε προχωρά ένα βήμα παρακάτω ώστε για δοσμένη καμπύλη φορτίου βρίσκει τη βέλτιστη χωρητικότητα και ισχύ της μπαταρίας που προσφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη από την κατανάλωση ισχύος. Οι μέθοδοι αυτές δοκιμάστηκαν σε πραγματικό φορτίο μιας βιομηχανίας και συζητήθηκαν αποτελέσματα.

Τέλος το 2009 οι Luis T Youn, Sohyung Cho [12] χρησιμοποίησαν γραμμική μέθοδο για να επιτύχουν το σημείο βέλτιστης λειτουργίας, υποθέτοντας Γκαουσιανή κατανομή για το ηλεκτρικό φορτίο και πολυωνυμική κατανομή για την παραγωγή ισχύος. Ανέφεραν τα αποτελέσματά τους μετά από δοκιμή σε ένα μικρό σταθμό παραγωγής ισχύος.

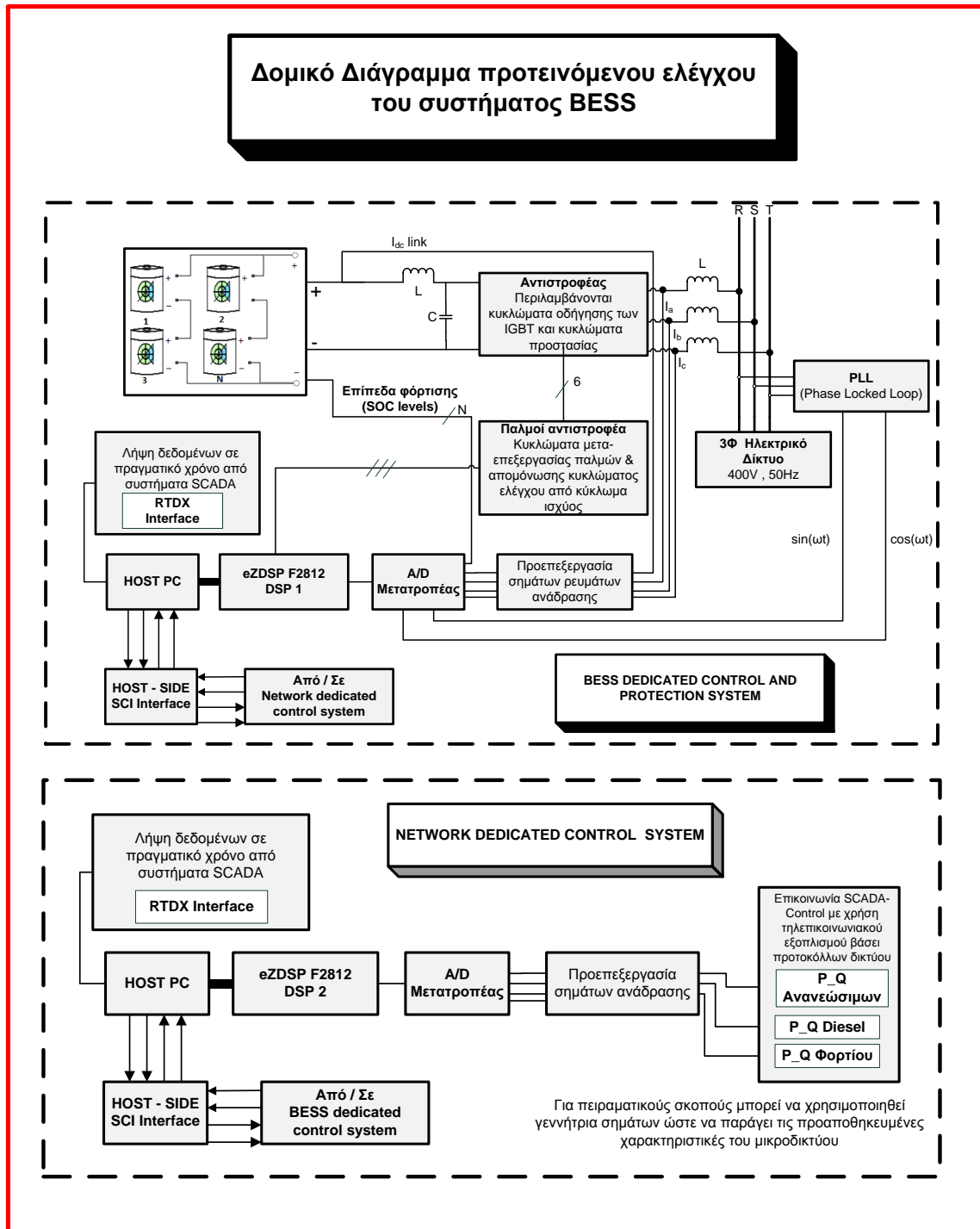
Στις παραπάνω δημοσιεύσεις κανείς από τους συγγραφείς δεν είχε παρουσιάσει ένα πλήρως μοντελοποιημένο σύστημα BESS, όπου ο έλεγχος P-Q να γίνεται από δύο μικροεπεξεργαστές που να ελέγχουν δύο υποσυστήματα με συγκεκριμένες υπορουτίνες, εστιασμένα στο δίκτυο και στο σύστημα ελέγχου και προστασίας των συσσωρευτών αντίστοιχα, με ιεραρχική δομή master-slave, ενώ παράλληλα επικοινωνούν και διαβιβάζουν πληροφορίες μέσω υπολογιστών ξενιστών μεταξύ τους. Το ζητούμενο σε αυτό το σύστημα είναι η ικανοποίηση των εντολών αναφοράς ενεργού και άεργου ισχύος $P^* - Q^*$ και τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών. Η τεχνική ελέγχου λαμβάνει υπόψη: τα δεδομένα από τα συστήματα SCADA, το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών, τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών και τα φιλτραρισμένα σήματα ημιτόνων που παράγονται από το PLL, το οποίο βοηθά στο συγχρονισμό του αντιστροφέα και του δικτύου, ενισχύοντας έτσι την ικανότητα Fault ride through του συστήματος και την ευστάθεια.

1.3 Συνεισφορά διπλωματικής εργασίας

Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου του BESS, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 1.3, έχει κύρια χαρακτηριστικά την προσαρμοστικότητα στα δεδομένα του μικροδικτύου που θα χρησιμοποιηθεί, την προγνωστικότητα ώστε να αξιοποιεί βέλτιστα την παραγωγή από ΑΠΕ, την ενίσχυση της ευστάθειας με συμβολή στην πρωτεύουσα ρύθμιση τάσης και συχνότητας και την ευελιξία με την χρησιμοποίηση διαφορετικών τεχνικών ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος.

Σε σύγκριση με εργασίες και δημοσιεύσεις παλαιότερων ετών, το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου είναι δομημένο ιεραρχικά σε μορφή master – slave και βασίζεται στην

επικοινωνία δύο μικροεπεξεργαστών DSP, ο καθένας από τους οποίους υλοποιεί συγκεκριμένες ρουτίνες που αντιστοιχούν στο εκάστοτε υποσύστημα.



Σχήμα 1.3: Δομικό διάγραμμα προτεινόμενου συστήματος ελέγχου του BESS

Το πρώτο υποσύστημα το οποίο ονομάζεται ‘Network dedicated control system’ περιέχει κυκλώματα ελέγχου ροής ισχύος και κυκλώματα ελέγχου επιπέδου φόρτισης

των συσσωρευτών. Παράλληλα δέχεται δεδομένα ισχύος σε πραγματικό χρόνο από συστήματα SCADA και διαβιβάζει τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών.

Το δεύτερο υποσύστημα, το οποίο ονομάζεται BESS dedicated control and protection system, περιέχει κυκλώματα οδήγησης αντιστροφέα με παραγωγή παλμών, κυκλώματα προστασίας των συσσωρευτών και του αντιστροφέα από υπερφόρτιση, υπερρεύματα και αποσυγχρονισμό, ενώ ενσωματώνει και κυκλώματα συγχρονισμού της τάσης με το δίκτυο μέσω PLL.

Για την ικανοποίηση των σύνθετων αυτών προδιαγραφών, γίνεται πλήρης παραμετροποίηση του δυναμικού συστήματος ελέγχου, ενώ εξετάζεται η απόδοση του συστήματος χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές τεχνικές ελέγχου των παλμών του αντιστροφέα (SPWM, SVPWM, HBCC), μέσα από την εφαρμογή ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος με αναφορά είτε την τάση είτε το ρεύμα του δικτύου και την παράλληλη χρησιμοποίηση PI ελεγκτών. Οι προτεινόμενες τεχνικές ελέγχου περιλαμβάνουν έλεγχο ικανοποίησης των ορίων φόρτισης των συσσωρευτών. Για την ανάλυση και την τεκμηρίωση της απόδοσης, το σύστημα προσομοιώνεται στο MATLAB /SIMULINK για κάθε τεχνική, στις φάσεις φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών, καθώς και στην περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος, προκειμένου να ικανοποιηθούν τα όρια φόρτισής τους. Η προσομοίωση γίνεται και στην περίπτωση ασυμμετρίας της τάσης, του ρεύματος και μεταβολής της συχνότητας. Στο τέλος, αφού γίνει φασματική ανάλυση των κυματομορφών για κάθε περίπτωση, παρουσιάζεται συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων.

1.4 Διάρθρωση παρούσας εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονείται στα πλαίσια της πενταετούς φοίτησης στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών και αποτελεί αποκορύφωμα αυτής.

Στο **πρώτο** κεφάλαιο του παρόντος, γίνεται μια γενική εισαγωγή στο αντικείμενο και τη συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας, ενώ παρουσιάζονται και τα περιεχόμενα προηγούμενων εργασιών στον ίδιο τομέα.

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο, γίνεται μια σύντομη αλλά περιεκτική παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στα ΣΗΕ, ενώ δίνεται έμφαση στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές. Ως σύνοψη, παρατίθενται συγκριτικοί πίνακες των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα BESS.

Στο **τρίτο** κεφάλαιο, αναλύονται οι προϋποθέσεις σύνδεσης μιας αυτόνομης πηγής ενέργειας στο δίκτυο και καθορίζεται η πολιτική φόρτισης/εκφόρτισης του συστήματος, η οποία επιτυγχάνει βέλτιστη οικονομική λειτουργία αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα εξομάλυνσης του φορτίου και αποκοπής των αιχμών, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές ισχύος από τις άλλες συνιστώσες του συστήματος (ΑΠΕ, diesel). Επιπλέον εξετάζεται και η λειτουργία του βρόχου κλειδωμένης φάσης (Phase Locked Loop – PLL) που είναι υπεύθυνος για το συγχρονισμό του αντιστροφέα με το δίκτυο, ενώ γίνεται μια

σύντομη ανασκόπηση στα συστήματα SCADA/RTU αλλά και στην τεχνολογία ευρυζωνικής μετάδοσης πληροφορίας μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ισχύος (Broadband over Power Line – BPL), στοιχεία που εφαρμόζονται στο προτεινόμενο σύστημα.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο, αναλύονται και μοντελοποιούνται οι προτεινόμενες τεχνικές ελέγχου του συστήματος BESS με τρόπο μεθοδολογικό. Θεμελιώνεται ο έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος του αντιστροφέα (P-Q control), χρησιμοποιώντας ως σήματα αναφοράς την τάση και το ρεύμα του δικτύου και εξετάζοντας το ρόλο ύπαρξης του PLL. Παράλληλα, προτείνεται τρόπος υλοποίησης του συστήματος με μικροεπεξεργαστές DSP σε δομή master – slave ενώ περιγράφονται με διαγράμματα ροής οι υπορουτίνες που συνιστούν τον αλγόριθμο ελέγχου.

Στο **πέμπτο** κεφάλαιο παρουσιάζεται θεωρητικά αλλά και με παραδείγματα η λειτουργία των κυριότερων τεχνικών ελέγχου του μονοφασικού και τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης. Αναλυτικότερα εξετάζονται οι τεχνικές SPWM, SV-PWM και η τεχνική του ρεύματος σε βρόχο υστέρησης (HBCC). Επίσης επεξηγείται ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάζονται τα φίλτρα εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα.

Στο **έκτο** κεφάλαιο, το σύστημα μοντελοποιείται στο MATLAB/SIMULINK και προσομοιώνεται για κάθε τεχνική, στις φάσεις φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών, καθώς και στην περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος, προκειμένου να ικανοποιηθούν τα όρια φόρτισής τους. Παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν στην απόκριση της ενεργού και άεργου ισχύος, του ρεύματος και της τάσης, των στοιχείων των συσσωρευτών κ.α., ενώ πραγματοποιείται φασματική ανάλυση των κυματομορφών και εξέταση στην περίπτωση ασυμμετρίας τάσης ή ρεύματος και μεταβολής της συχνότητας.

Τέλος, στο **έβδομο** κεφάλαιο διατυπώνονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη σύγκριση των τεχνικών ελέγχου και από τη λειτουργία του συστήματος, αλλά και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στο αντικείμενο.

1.5 Αναφορές πρώτου κεφαλαίου

- [1] Tsung-Ying Lee , Nanming Chen «*Optimal capacity of the battery energy storage system in a power system*», IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 8, Issue 4, pages 667-673,Dec 1993
- [2] Anderson, M.D, Carr, D.S. «*Battery energy storage technologies*», Proceedings of the IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), Volume 81, Issue 3, pages 475-479,Mar 1993
- [3] Maly D.K, Kwan K.S «*Optimal battery energy storage system charge scheduling with dynamic programming*», IEE Proc. Science,Measurement and Technology, Volume 142, Issue 6, pages 453-458,Nov 1995

- [4] Kyung-Hee Jung Hoyong Kim Daeseok Rho B POSCO Res. Inst., Seoul «*Determination of the installation site and optimal capacity of the battery energy storage system for load leveling*», IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 11, Issue 1, pages 162-4167,Mar 1996
- [5] Alt J. T. Anderson M. D. Jungst R. G. «*Assessment of utility side cost savings from battery energy storage*», IEEE Transactions on Power Storage, Volume 12, Issue 3, pages 1112-1120, 1997
- [6] Leung, K.K. Sutanto, D. «*A new topology of a battery energy storage system*», Energy Management and Power Delivery, 1998. Proceedings of EMPD '98. 1998 IEEE International Conference, Volume 1, pages 253-258,Nov 1998
- [7] S. K. Aditya, D. Das «*Application of Battery energy storage system to Load Frequency control of an isolated power system*», International Journal of Energy Research, Issue 23, pages 247-258, 1999
- [8] Z. Yang, C Shen, L. Zhang, M.L Crow and S. Atcitty «*Integration of a StatCom and Battery Energy Storage*», IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Volume 16, Issue 2, pages 254-259,May 2001
- [9] Bhatia, R.S. Jain, S.P. Jain, D.K. Singh, B «*Battery Energy Storage System for Power Conditioning of Renewable Energy Sources*», IEEE PEDS, 2005
- [10] Igor Paptic «*Simulation Model for Discharging a Lead-Acid BESS for Load Levelling*», IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 21, Issue 2,June 2006
- [11] Alexandre Oudalov, Rachid Cherkaoui «*Sizing and optimal operation of a battery energy storage system for peak shaving application*», IEEE Transactions, ,Jul 2007
- [12] Luis T Youn, Sohyung Cho «*Optimal Operation of Energy Storage Using Linear Programming Technique*», Proceedings of the World Congresss on Engineering and Computer Science,Vol 1, Oct 2009

Κεφάλαιο 2

Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας για χρήση στο Σ.Η.Ε.

2.1 Επισκόπηση βιβλιογραφίας για την αξία αποθήκευσης ενέργειας

Στη σημερινή εποχή, η επέκταση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) για την κάλυψη ενός ολοένα αυξανόμενου και απρόβλεπτου φορτίου, το οποίο περιλαμβάνει απότομες αιχμές, αλλά και η αυξανόμενη διείσδυση των Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) ειδικά στα νησιά, καθιστούν το σύστημα ευάλωτο σε διαταραχές και προκαλούν διάφορα προβλήματα λειτουργίας. Η αβεβαιότητα και η ανασφάλεια αυτή στη διαχείριση του φορτίου οδηγεί σε έξοδα για εξοπλισμό, ενίσχυση του δικτύου και λειτουργικό έλεγχο όλου του ΣΗΕ. Παράλληλα, το πρόβλημα με τις ΑΠΕ είναι ότι δεν είναι διαθέσιμες 24 ώρες το εικοσιτετράωρο.

Για την καλύτερη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την επίλυση φαινομένων ασυμβατότητας μεταξύ σταθμών παραγωγής και φορτίου είναι απαραίτητη η ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στις χρονικές περιόδους κατά τις οποίες η παραγόμενη ενέργεια είναι αυξημένη αλλά δεν υπάρχει ανάλογη ζήτηση από το φορτίο πρέπει η πλεονάζουσα ενέργεια να αποθηκεύεται, ενώ σε περιόδους όπου είναι αδύνατη η παραγωγή ενέργειας ή ζήτηση είναι αυξημένη να αποδίδεται στο δίκτυο.

Βέβαια, η αξία των αποθηκευτικών διατάξεων είναι ότι μπορούν να διαδραματίσουν περισσότερους από έναν ρόλους. Για παράδειγμα μια 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. Ήδη από το 1981 έχει παρουσιαστεί μελέτη για την επίδραση που μπορεί να έχει μία αποθηκευτική διάταξη σε θέματα κατανομής ισχύος όπως παρουσιάζεται στην [2], ενώ μία πιο πρόσθετη μελέτη [3] προσπαθεί να παρουσιάσει ένα μοντέλο για την επίδραση της αποθηκευτικής διάταξης στις απαιτήσεις στρεφόμενης εφεδρείας ενός συστήματος. Σημαντική έμφασή σε ζητήματα εφαρμογών σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής

παρουσιάζεται στο [4]. Στις εργασίες [5,6] εξετάζονται διάφοροι συνδυασμοί σεναρίων για χρήση αποθηκευτικής διάταξης στα ηλεκτρικά δίκτυα και πιο συγκεκριμένα :

i) Συνδυασμός αποφυγής ενίσχυσης δικτύου διανομής και χρήση για παροχή βελτιωμένης ποιότητας ισχύος.

ii) Συνδυασμός αποφυγής ενίσχυσης δικτύων διανομής/ μεταφοράς για μικρό χρονικό διάστημα π.χ. 1 έτος και χρήση της αποθηκευτικής διάταξης για εξομάλυνση τιμών.

iii) Χρήση της αποθηκευτικής διάταξης για να ικανοποιεί τις ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών σε περιόδους υψηλών τιμών και να παρέχει βελτίωση της αξιοπιστίας και ποιότητας ισχύος.

Πρόσφατες αναφορές του DTI [7,8] προσεγγίζουν την αξία της αποθήκευσης ενέργειας για τη διαχείριση της αβεβαιότητας λόγω της συμμετοχής των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα αλλά και στις προοπτικές που μπορούν να έχουν οι αποθηκευτικές διατάξεις στην ενίσχυση της ασφάλειας τροφοδοσίας του δικτύου. Η μελέτη εστιάζει, στην αξία της αποθήκευσης για την αύξηση της διείσδυσης της παραγωγής από ΑΠΕ για διάφορα επίπεδα διείσδυσης και ειδικά έναντι της τεχνολογίας OCGT (Open Cycle Gas Turbines), αεριοστρόβιλων Ανοικτού Κύκλου. Τα αποτελέσματα εστιάζουν στη μείωση του κόστους καυσίμου, στη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και στην αύξηση της δυνατότητας απορρόφησης αιολικής ισχύος. Επίσης μελετάται η αξία της αποθήκευσης ενέργειας ως μία πηγή στατικής εφεδρείας η οποία εξαρτάται από:

- Το πόσο ευέλικτες μονάδες διαθέτει το υπό εξέταση ΣΗΕ,
- Την ποσότητα που αποθηκεύεται,
- Το κόστος καυσίμου του Ανοικτού Κύκλου,
- Την επίδοση της αποθήκευσης λόγω της αποφυγής φαινομένων χαμηλών φορτίσεων.

Επιπρόσθετα με τις παραπάνω αυτές μελέτες για συνδυασμό αποθήκευσης και ΑΠΕ, ο συνδυασμός των διεσπαρμένων εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας σε ένα δίκτυο με την αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων περιγράφεται στην αναφορά [9].

Για το πρόβλημα της διαχείρισης των αποθηκευτικών διατάξεων για αυτόνομα συστήματα έχει προταθεί να ανεξαρτητοποιηθεί το πρόβλημα της διαχείρισης των αποθηκευτικών διατάξεων από το πρόβλημα της επιλογής των μονάδων και η επίλυση του με τη βοήθεια του δυναμικού προγραμματισμού [10]. Στην εργασία [11] μελετάται η προσθήκη συσσωρευτών σε ένα αυτόνομο σύστημα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, ενώ για το όριο αποθήκευσης υπολογίζεται η ωφέλεια συγκρινόμενη με το μέσο κόστος του συστήματος. Σε μία τέτοια περίπτωση δεν υπολογίζεται η αξία της αποθήκευσης τις περιόδους που μπορεί να οδηγήσει σε αποφυγή ένταξης μονάδων και συνεπώς σε υψηλότερα οφέλη.

2.2 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

Στη συνέχεια, συνοψίζουμε τις πιθανές εφαρμογές που μπορεί να έχουν οι

αποθηκευτικές διατάξεις σε ένα ΣΗΕ, κάποιες από τις οποίες μπορούν να εξυπηρετούνται από την ίδια αποθηκευτική διάταξη είτε ταυτόχρονα είτε σε διαφορετικές χρονικές περιόδους [12].

- Χρήση αποθηκευμένης ενέργειας λόγω έλλειψης ικανότητας παραγωγής των διαθέσιμων μονάδων.

- Αποθήκευση ενέργειας για αποφυγή παραβίασης τεχνικών ελαχίστων θερμικών μονάδων.

- Χρήση αποθηκευτικής διάταξης για εξομάλυνση της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ και αποδοτικότερης συμμετοχής τους στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας [13,14], αποθηκεύοντας στις ώρες χαμηλού κόστους και χρησιμοποιώντας την στις ώρες υψηλού κόστους εκμεταλλευόμενοι τη διαφορά τιμών

- Περιορισμός αποκοπτόμενης ενέργειας από ΑΠΕ, αποθήκευση ενέργειας για χρήση σε επόμενο χρονικό διάστημα οπότε και δεν θα υπάρχει διαθέσιμη παραγωγή. Είναι η συνηθισμένη πρακτική σε μικρά αυτόνομα και απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά στα νησιά

- Για εκμετάλλευση της διαφοράς κόστους παραγωγής από τις συμβατικές μονάδες είτε χωρίς αλλαγή του προγράμματος ένταξης μονάδων (μόνο οικονομική κατανομή [15]), είτε μεταβάλλοντας κάπως το πρόγραμμα ένταξης μονάδων.

- Παροχή στρεφόμενης εφεδρείας, παροχή ισχύος σε έκτακτη χρονική στιγμή

- Περιορισμός απωλειών δικτύου λόγω της παροχής ισχύος σε πολύ τοπικό επίπεδο

- Αποφυγή ή μετάθεση επενδύσεων ενίσχυσης δικτύου, διανομής ειδικά αν υπάρχει συνδυασμός της διάταξης αποθήκευσης με κάποιας μορφής παραγωγής από ΑΠΕ [16], αν έχουν επιλεγεί οι κατάλληλες θέσεις για την εγκατάστασή της.

- Διαχείριση ζητημάτων ποιότητας ισχύος λόγω της γρήγορης απόκρισης των μονάδων αυτών [17,18] σε μεταβολές ενεργού και άεργου ισχύος

- Αδιάλειπτη παροχή ισχύος

- Εκκίνηση μετά από σφάλμα Black start

- Υποστήριξη τάσης και συχνότητας

- Παραγωγή άλλου αγαθού και αποθήκευσής του π.χ θερμότητας, σε ώρες στις οποίες το κόστος είναι χαμηλό για την αποφυγή κατανάλωσης ενέργειας σε ώρες υψηλού φορτίου [19].

Οι χρονικοί ορίζοντες για τη χρήση των αποθηκευτικών διατάξεων για μία από τις παραπάνω δυνατές εφαρμογές, χωρίζουν τις διατάξεις αποθήκευσης σε διατάξεις:

- **Βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης**

Πρόκειται για τις διατάξεις αποθήκευσης που μπορούν να προσφέρουν ή να απορροφήσουν ενέργεια για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (λίγα δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά). Τυπικές εφαρμογές αυτού του είδους είναι η παροχή αδιάλειπτης παροχής ισχύος και ευστάθειας λειτουργίας ΣΗΕ.

- **Μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης**

Αφορά διατάξεις που χρησιμοποιούνται για χρονικούς ορίζοντες από μερικά λεπτά ως μερικές ώρες. Αυτού του είδους οι εφαρμογές απασχολούν την παρούσα διπλωματική

εργασία. Τέτοιου είδους εφαρμογές είναι η διαχείριση ΑΠΕ, η ενίσχυση της παροχής στρεφόμενης εφεδρείας και η διαχείριση παρεχόμενης ισχύος στους καταναλωτές.

- **Μακροπρόθεσμης αποθήκευσης.**

Αφορά διατάξεις αποθήκευσης από αρκετές ώρες μέχρι εβδομάδα και μήνες. Κυρίως χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση της ζήτησης μεταξύ ωρών αιχμής και μη αιχμής ή την ικανοποίηση ζήτησης αιχμής έχοντας αποθηκεύσει ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Αυτού του είδους οι εφαρμογές απασχολούν κυρίως την παρούσα διπλωματική εργασία.

Χαρακτηριστικές εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας στο ΣΗΕ ανάλογα με την απαιτούμενη χρονική διάρκεια παρουσιάζονται στον πίνακα. 2-1.

Πίνακας 2-1: Τυπικές εφαρμογές μονάδων αποθήκευσης ανάλογα με τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας τους

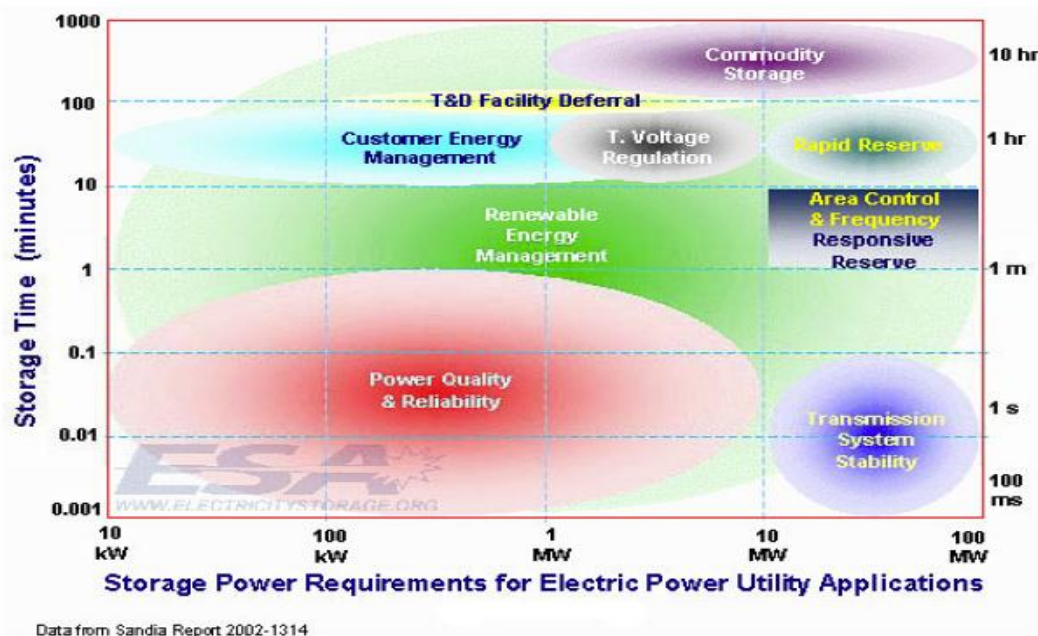
Ομάδα εφαρμογών	Εφαρμογές	Διάρκεια κύκλου φόρτισης/εκφόρτισης
Διαχείριση μονάδων ΑΠΕ	Εξασφάλιση ισχύος από τις μονάδες ΑΠΕ	4-10 ώρες
	Συμβόλαια ανάλογα με την ώρα παράδοσης της παραγωγής από ΑΠΕ.	
Χειρισμοί συστήματος μεταφοράς ή διανομής	Υποστήριξη συστημάτων μεταφοράς	2-5 sec
	Μείωση των απαιτήσεων για εγκατεστημένη ισχύ συστήματος μεταφοράς	4-6 ώρες
	Υποκατάσταση κεντρικών μονάδων παραγωγής	
	Μείωση της συμφόρησης δικτύων	2-6 ώρες
	Αναβολή επενδύσεων σε συστήματα μεταφοράς και διανομής	
	Παροχή βοηθητικών υπηρεσιών	1-5 ώρες
	Χρήση για εξομάλυνση των τιμών αγοράς	1-10 ώρες
Σχέσεις εταιριών ηλεκτρισμού και πελατών	Παροχή υπηρεσιών ποιότητας ισχύος (PQ)	10 sec-1 min
	Παροχή υπηρεσιών για εφαρμογές αξιοπιστίας (PR)	15 min-5 ώρες
	Διαχείριση μεταβολής ζήτησης	4-12 ώρες
	Διαχείριση για τη χρήση τιμολογίων χρέωση ανάλογα με την ώρα κατανάλωσης (time of use rates)	2-(εξαρτώμενο από το σύστημα τιμολογίων)

Εναλλακτικές λύσεις για τα παραπάνω ζητήματα σε σχέση με τη λειτουργία των μονάδων αποθήκευσης δίνονται στον πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-2: Εναλλακτικές μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας για διάφορες εφαρμογές στο ΣΗΕ

Ομάδα εφαρμογών	Εφαρμογές	Εναλλακτικές μέθοδοι
Διαχείριση μονάδων ΑΠΕ	Εξασφάλιση ισχύος από τις μονάδες ΑΠΕ	Μερική φόρτιση της κεντρικής παραγωγής, έλεγχος φορτίων με μεθόδους DLC, αφοσιωμένη παραγωγή κοντά στα φορτία.
	Συμβόλαια ανάλογα με την ώρα παράδοση για την παραγωγή από ΑΠΕ	Χρήση υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ και καταναεμούμενων πηγών με χρήση ανανεώσιμων καυσίμων (γεωθερμία, βιοαέριο)
Χειρισμοί συστήματος μεταφοράς ή διανομής	Υποστήριξη συστημάτων μεταφοράς	Ενίσχυση του δικτύου μεταφοράς ή εγκατάσταση διεσπαρμένης παραγωγής
	Μείωση των απαιτήσεων για εγκατεστημένη ισχύ συστήματος μεταφοράς	Ευφυή συστήματα χρέωσης, αναβάθμιση συστημάτων μεταφοράς, έλεγχος φορτίου, αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και διεσπαρμένη παραγωγή
	Μείωση της συμφόρησης δικτύων	
	Αναβολή επενδύσεων σε συστήματα μεταφοράς και διανομής	
	Παροχή βοηθητικών υπηρεσιών	Διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας και φόρτιση κεντρικής παραγωγής στο μερικό φορτίο και διεσπαρμένη παραγωγή
	Υποκατάσταση κεντρικών μονάδων παραγωγής	φόρτιση κεντρικής παραγωγής στο μερικό φορτίο, απευθείας έλεγχος φορτίου, εμπορία με γειτονικές αγορές
Χρήση για εξομάλυνση των τιμών αγοράς	Διαχείριση για τη χρήση τιμολογίων χρέωση ανάλογα με την ώρα κατανάλωσης (time of use rates)	
Σχέσεις εταιριών ηλεκτρισμού και πελατών	Παροχή υπηρεσιών ποιότητας ισχύος (PQ)	Φίλτρα και διατάξεις βελτίωσης ποιότητας ισχύος και παροχή άεργου ισχύος
	Παροχή υπηρεσιών για εφαρμογές αξιοπιστίας (PR)	Διεσπαρμένη παραγωγή, ενίσχυση δικτύου διανομής
	Διαχείριση μεταβολής ζήτησης	Μείωση κατανάλωσης και αύξηση απόδοσης

Το σχήμα 2.1 παρουσιάζει το χρονικό ορίζοντα και την ισχύ που απαιτείται για τις διάφορες ομάδες εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας συνοψίζοντας τα περιεχόμενα των παραπάνω πινάκων.



Σχήμα 2.1: Απαιτήσεις ισχύος και χρονικής διάρκειας αποθήκευσης για διάφορες εφαρμογές των ΣΗΕ

2.3 Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

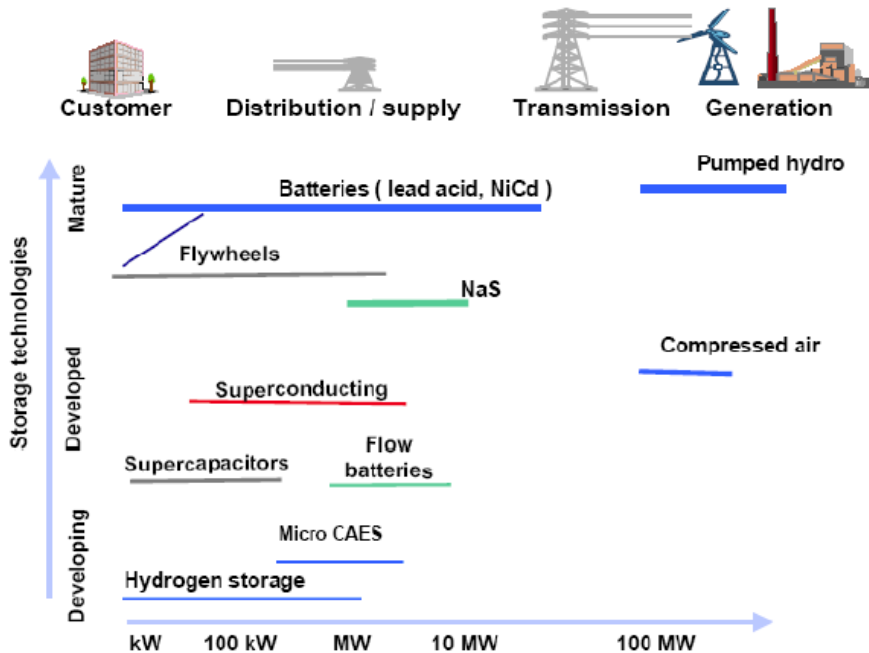
Τα διάφορα μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζουν τη λειτουργία τους σε μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική, μαγνητική ή δυναμική και στη συνέχεια την εκ νέου μετατροπή της ενέργειας αυτής σε ηλεκτρική. Ο πίνακας 2-3 παρουσιάζει τις διάφορες μορφές ενέργειας στις οποίες μπορεί να μετατραπεί η ηλεκτρική ενέργεια προκειμένου να αποθηκευθεί, καθώς και χαρακτηριστικά παραδείγματα διάταξης για κάθε μορφή μετατροπής.

Πίνακας 2-3: Μορφή μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας για τις διάφορες ομάδες αποθηκευτικών διατάξεων

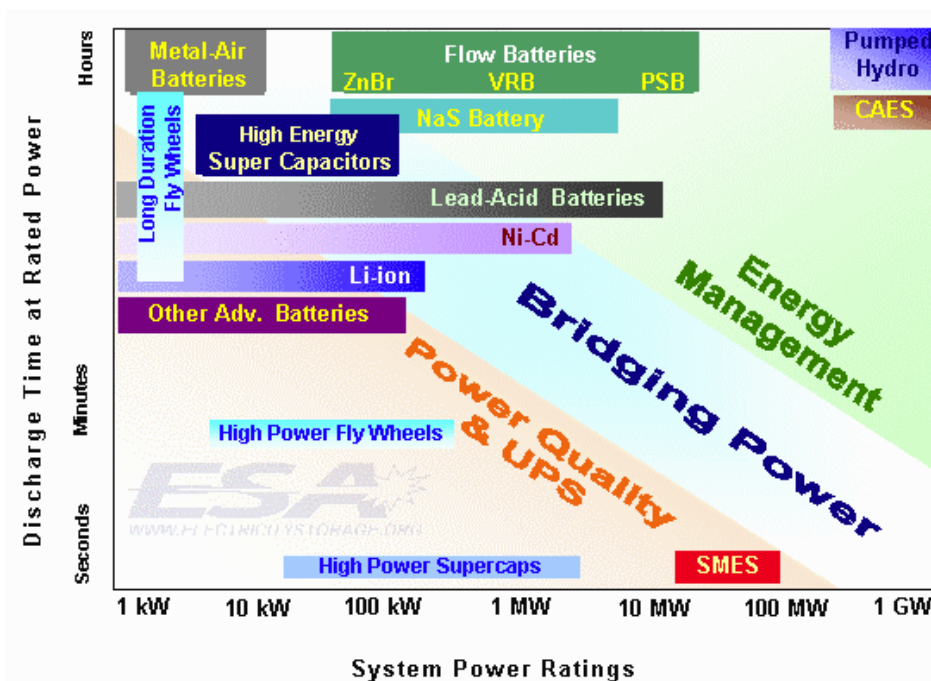
Μορφή μετατροπής	Αντιπροσωπευτική διάταξη
Ηλεκτρική	Πυκνωτές και υπέρ-πυκνωτές
Υπεραγώγιμα Υλικά	Magnetic Energy Storage (SMES)
Χρήση μηχανικής ενέργειας (δυναμική ή περιστροφή)	Αντλησιοταμίευση
	Συμπιεσμένος Αέρας (CAES)
	Στρεφόμενοι σφόνδυλοι
Χημικές μέθοδοι	Μπαταρίες, μπαταρίες ροής, προχωρημένου τύπου μπαταρίες.

Ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή χρειάζεται και μία αποθηκευτική διάταξη με κατάλληλες ιδιότητες. Προκειμένου να αποφασιστεί ποιο αποθηκευτικό μέσο είναι κατάλληλο για κάθε περίπτωση εφαρμογής χρειάζεται να εξεταστεί μια ευρεία γκάμα

αποθηκευτικών διατάξεων. Ένα σχετικό διάγραμμα για τα τυπικά μεγέθη των αποθηκευτικών διατάξεων, τις τυπικές εφαρμογές τους και την ωριμότητά τους παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2 , ενώ το σχήμα 2.3 παρουσιάζει το χρονικό ορίζοντα χρήσης των διαφόρων αποθηκευτικών διατάξεων.



Σχήμα 2.2: Μέγεθος, εφαρμογές και τεχνολογική ωριμότητα των διαφόρων πηγών αποθήκευσης



Σχήμα 2.3: Καταλληλότητα διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης ανάλογα με το χρονικό ορίζοντα και την ισχύ τους.

2.4 Μηχανικά και ηλεκτρικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε σε συστήματα που στηρίζουν το μηχανισμό αποθήκευσης στην μηχανική και ηλεκτρική ενέργεια ή στην έμμεση αποθήκευση. Ειδικότερα θα εξετάσουμε τις στρεφόμενες μάζες, τους υπερπυκνωτές, τα υπεραγώγιμα πηνία, την αντλησιοταμίευση, τα συστήματα συμπίεσης αέρα και την αποθήκευση υδρογόνου.

2.4.1 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 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 στροφέα και ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας του στροφέα (σύμφωνα με την εξίσωση $E_k = (mv^2)/2$ όπου E_k = κινητική ενέργεια, m = μάζα και v = ταχύτητα). 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. Ταχύτητες μέχρι 40000rpm έχουν ήδη επιτευχθεί, ενώ μέχρι 60000rpm προβλέπονται για τις μελλοντικές γενεές. Σχηματικά μία τέτοια μονάδα παριστάνεται στην Σχ. 2.4.

Ο χρόνος εκφόρτισης αυτών των διατάξεων κυμαίνεται μεταξύ λίγων sec και μέχρι 15-30 min, βοηθώντας περισσότερο από τις συσσωρευτές σε εφαρμογές ισχύος παρά ενέργειας. Αντίθετα από τις συσσωρευτές, 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 (για χρήση σε υψηλές συχνότητες) με μικρή συντήρηση και εγκατάσταση

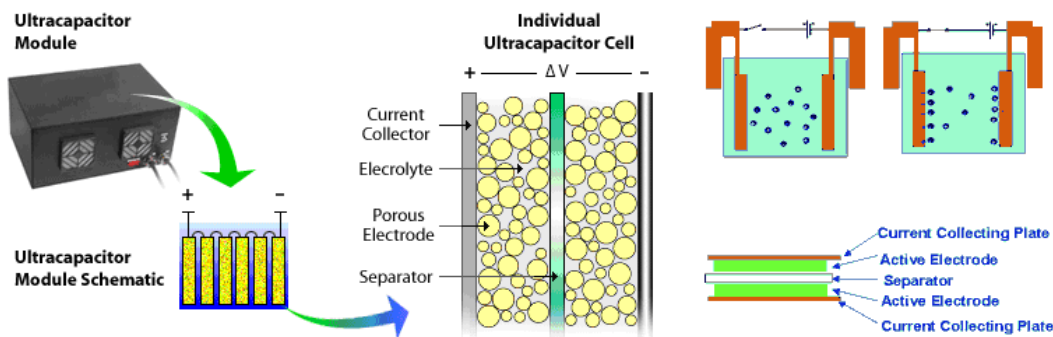


Σχήμα 2.4: Τυπική διάταξη μιας μονάδας flywheel

2.4.2 Υπερπυκνωτές (supercapacitors)

Οι υπερπυκνωτές φτάνουν σε χωρητικότητες μερικών χιλιάδων Farad και η δομή τους μοιάζει με αυτή των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών. Οι πυκνωτές χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με το μέσο μεταξύ του ζεύγους των ηλεκτροδίων, τους ηλεκτροστατούς, τους ηλεκτρολυτικούς και τους ηλεκτροχημικούς. Από αυτά τα τρία, οι ηλεκτροχημικοί διπλοί πυκνωτές στρώματος ξεχωρίζουν για τη μακράν μεγαλύτερη χωρητικότητά τους. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ιδιότητες ενός υπερπυκνωτή εξαρτώνται έντονα από το πορώδες στρώμα του ενεργού άνθρακα και από το μοριακό μέγεθος των ιόντων του ηλεκτρολύτη. Στους υπερπυκνωτές, αντί το στρώμα του οξειδίου να παίζει το ρόλο του διηλεκτρικού, η εμφάνιση του διηλεκτρικού γίνεται κάθε φορά που ασκείται τάση στους ακροδέκτες του. Μ' αυτό τον τρόπο, το φορτίο αποθηκεύεται ηλεκτροστατικά μέσα στα πολωμένα στρώματα υγρού που βρίσκεται ανάμεσα στον οργανικό ηλεκτρολύτη και στο ηλεκτρόδιο. Η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια προσδιορίζεται από το μέγεθος των ιόντων στον ηλεκτρολύτη που έλκονται προς το φορτισμένο ηλεκτρόδιο. Το ηλεκτρικό διπλό στρώμα λειτουργεί σαν μονωτικό υλικό (διηλεκτρικό) και δεν παραβιάζεται εφόσον η τάση δεν ξεπεράσει την επιτρεπόμενη. Ο διαχωριστής σε αυτήν την περίπτωση, δεν παίζει το ρόλο του διηλεκτρικού υλικού, απλά χωρίζει τον ενεργό άνθρακα σε δύο τμήματα. Το αποτέλεσμα σε αυτήν την περίπτωση είναι να έχουμε δύο πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά, στη συσκευασία του ενός.

Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές αξιοποιούν τη χωρητικότητα διπλού στρώματος. Έτσι η παρουσία φορτίου σε ένα ηλεκτρόδιο κατασκευασμένο από ενεργό άνθρακα, αντισταθμίζεται από την ανακατανομή ιόντων μέσα στον ηλεκτρολύτη. Επομένως τα ιόντα που έλκονται από το φορτισμένο ηλεκτρόδιο δημιουργούν ένα λεπτό στρώμα με ετερόνυμο φορτίο (ως προς το ηλεκτρόδιο). Εμβαπτίζοντας, λοιπόν ένα δεύτερο ηλεκτρόδιο, δημιουργείται ένας δεύτερος πυκνωτής συνδεδεμένος σε σειρά με τον πρώτο. Στο σχήμα 2.5 διακρίνουμε τη σχηματική αναπαράσταση ενός υπερπυκνωτή διπλού κυκλώματος. Παρατηρούνται ιόντα δεσμευμένα στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων αλλά και ελεύθερα. Τα δύο εκατέρωθεν στρώματα ιόντων δημιουργούν στην ουσία δύο ξεχωριστούς πυκνωτές σε σειρά.



Σχήμα 2.5: Ηλεκτροχημικοί διπλοί πυκνωτές στρώματος

Οι υπερπυκνωτές έχουν την ικανότητα να παρέχουν ισχύ της τάξης των 100Kw, ενώ η ενέργειά τους είναι δυνατό να διοχετευτεί μέσα σε κλάσματα του sec ως και μέσα σε ένα λεπτό. Οι κυριότερες εφαρμογές τους αφορούν υποστήριξη τάσης, βελτίωση του συντελεστή ισχύος και υποστήριξη ενεργού και αέργου ισχύος[22]. Στα μειονεκτήματά τους περιλαμβάνεται και το γεγονός της διαρροής ρεύματος, περίπου 1,2% ημερησίως.

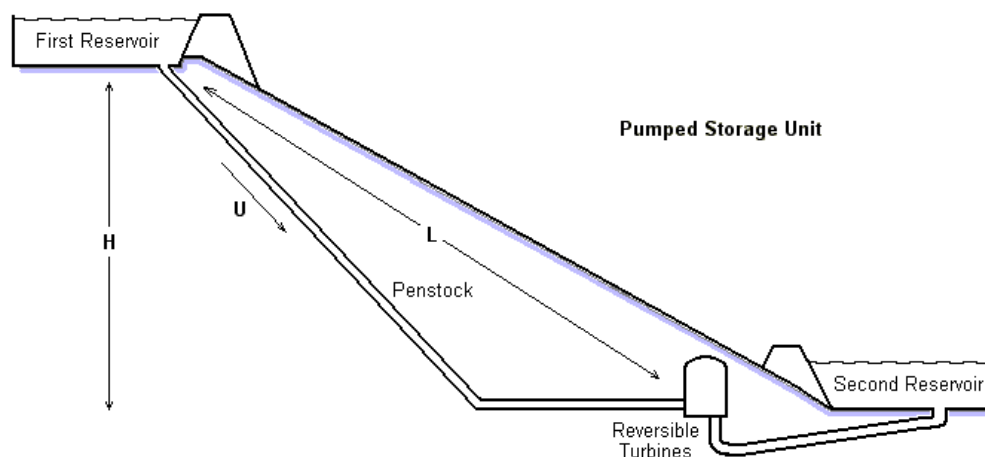
2.4.3 Υπεραγώγιμα πηνία (SMES)

Οι διατάξεις SMES στηρίζουν τη λειτουργία τους στη χρήση της τεχνολογίας των υπεραγώγιμων υλικών γι' αυτό και απαιτούν σημαντικές ποσότητες ψύξης. Αυτές οι διατάξεις, μπορούν να διαθέσουν έως και 2MW μέσα σε λίγους κύκλους του εναλλασσόμενου ρεύματος. Και οι δύο τύπου διατάξεις και ειδικά οι συσκευές SMES αποτελούν μια αποτελεσματική λύση σε παροχή ποιότητας ισχύος στα δίκτυα διανομής. Μάλιστα υπάρχουν εταιρίες στις ΗΠΑ οι οποίες διαθέτουν τέτοιου είδους μεταφερόμενες μονάδες σε containers για την εφαρμογή τους σε διάφορες περιοχές του δικτύου διανομής. [21, 12,18].

2.4.4 Αντλησιοταμίευση (Pump – hydro storage)

Η πιο διαδεδομένη ιδέα για τη μαζική αποθήκευση ενέργειας είναι η χρήση μονάδων αντλησιοταμίευσης. Η γενική ιδέα της αντλησιοταμίευσης είναι η εξής: Σε μία δεξαμενή βρίσκεται αποθηκευμένη μία ποσότητα νερού. Όταν ζητηθεί ισχύς το νερό μπορεί να πέσει σε μία χαμηλότερα τοποθετημένη (δεύτερη) δεξαμενή με τη βοήθεια υδροστρόβιλου, ενώ όταν δεν υπάρχει πια ζήτηση ισχύος μπορεί με αντλίες να οδηγηθεί ξανά πίσω στην πρώτη (ψηλότερη) δεξαμενή.

Ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από τα εξής μέρη: Μία ανώτερη δεξαμενή (First Reservoir), αγωγοί νερού (Penstock), αντλία, υδροστρόβιλος, ή σε συνδυασμό με τον στρόβιλο αντιστρέψιμης φοράς Reversible Turbine και μία κατώτερη, δεύτερη δεξαμενή (Second Reservoir) η οποία μπορεί να είναι ακόμη και η θάλασσα. Σχηματική αναπαράσταση των παραπάνω γίνεται στο σχήμα 2.6

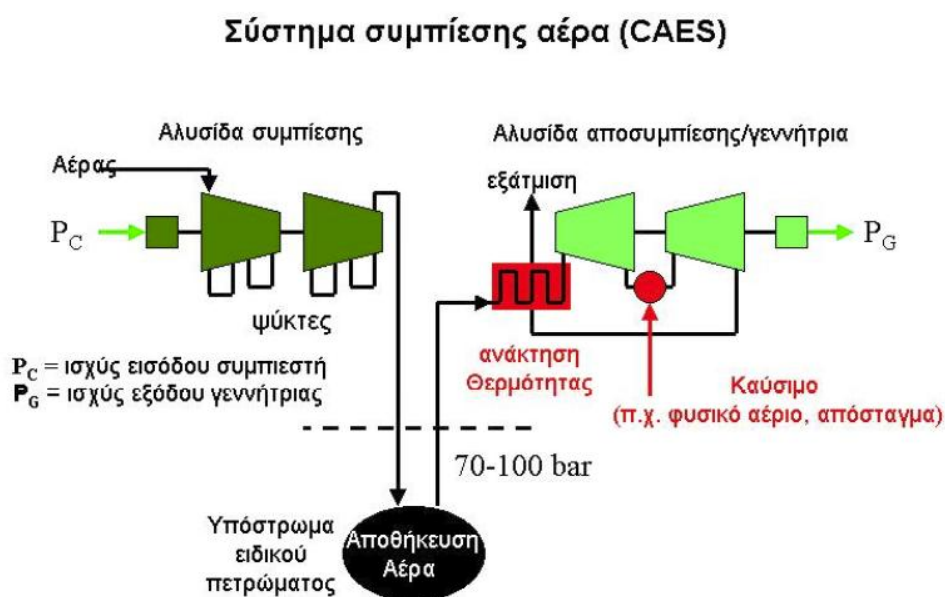


Σχήμα 2.6: Σύστημα αντλησιοταμίευσης (Pumped Storage Unit)

Παρόλο όμως που η αντλησιοταμίευση μπορεί να δώσει υψηλή χωρητικότητα ενέργειας σε χαμηλό κόστος δεν χρησιμοποιείται όσο θα ήταν αναμενόμενο. Ο λόγος είναι αφενός η εξειδικευμένη περιοχή που χρειάζεται για να κατασκευαστεί η εγκατάσταση και αφετέρου ο χρόνος που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία και να απελευθερωθεί η αποθηκευμένη ενέργεια, αφού αν η αντλία δεν λειτουργεί ήδη χρειάζεται χρόνος ένταξης. Για αυτό ως επί το πλείστον χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Παγκοσμίως είναι διαθέσιμα πάνω από 90GW ισχύος από αντλησιοταμίευση και σε μερικές περιπτώσεις σε συνδυασμό με φράγματα [21]. Στη χώρα μας 2 τέτοιους είδους σταθμοί υπάρχουν στη Σφηκιά και στον ΥΗΣ Θησαυρού, ενώ σε κατασκευή βρίσκεται παρόμοιο υβριδικό σύστημα στην Ικαρία.

2.4.5 Σύστημα συμπίεσης αέρα (CAES)

Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ότι αέρας μπορεί να συμπιεστεί στα 800 ως 1600psi 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. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζεται σε γενικές γραμμές στην παρακάτω Σχ. 2.7. Πρόσφατη είναι και η προσπάθεια μείωσης της απαιτούμενης ισχύος και της πιο ευέλικτης εφαρμογής τέτοιων διατάξεων με τη μορφή Transportable-CAES ή micro- CAES [31] για την εκμετάλλευση αιολικής παραγωγής, ενώ νέες εγκαταστάσεις αυτής της μορφής εγκαθίστανται στις Η.Π.Α [32]



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα λειτουργίας μονάδας CAES

2.4.6 Τεχνολογία υδρογόνου

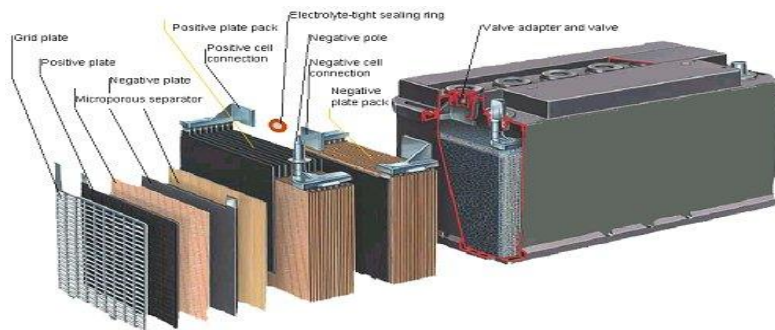
Μία αναπτυσσόμενη τεχνολογία στον τομέα της ενέργειας είναι η χρήση του υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου (fuel cell) είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε για μεταφορές. Το υδρογόνο έχει πάρα πολύ μεγάλη θερμογόνο δύναμη ενώ σημαντική έρευνα έχει πραγματοποιηθεί για την ασφαλή αποθήκευσή του σε μεταλλικά δοχεία ή ράβδους διαφόρων σχημάτων με χρήση νερού ή αέρα για την ψύξη του και υπάρχουν ήδη διαθέσιμα σχετικά εμπορικά προϊόντα [36].

Η παραγωγή του υδρογόνου γίνεται με διάφορες φυσικοχημικές μεθόδους από τους υδρογονάνθρακες, αλλά μπορεί να παραχθεί και με την βοήθεια ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης νερού. Αν υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας π.χ αυξημένη παραγωγή από ΑΠΕ, τότε μπορεί να αξιοποιηθεί στην παραγωγή του υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και η παραγόμενη ποσότητα να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια και ως καύσιμο στον τομέα των μεταφορών.

Στην εργασία [37] παρουσιάζεται μεθοδολογία για την βέλτιστη λειτουργία ενός συστήματος αιολικού πάρκου και ηλεκτρόλυσης είτε για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είτε για παραγωγή υδρογόνου καυσίμου ή και για τις δύο εφαρμογές, είτε σε αυτόνομη είτε σε διασυνδεδεμένη με το δίκτυο λειτουργία. Επίσης, υπάρχουν ήδη εργασίες για τον προγραμματισμό λειτουργίας μίας μονάδας παραγωγής υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης συνεργαζόμενης με αιολική παραγωγή και δυνατότητα συμμετοχής στην αγορά ηλεκτρισμού [38].

2.5 Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές (Battery Energy Storage Systems)

Ο παλαιότερος και πιο καθιερωμένος τρόπος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι με τη μορφή χημικής ενέργειας σε συσσωρευτές. Η συσσωρευτές αποτελούνται από συσσωρευμένα κύτταρα (συσσωρευτές) και κάθε κύτταρο αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη σε υγρή, ρευστή ή στερεή μορφή, μαζί με θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο. Κατά την εκφόρτιση, γίνονται ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στα δύο ηλεκτρόδια, παράγοντας ροή ηλεκτρονίων μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Οι αντιδράσεις αυτές είναι αντιστρεπτές, επιτρέποντας στην μπαταρία να φορτιστεί εφαρμόζοντας μια εξωτερική τάση στα δύο ηλεκτρόδια. Η δομή ενός συσσωρευτή φαίνεται στο σχήμα 2.8 .



Σχήμα 2.8: Δομή ενός συσσωρευτή μολύβδου οξέος

Οι συσσωρευτές συνήθως διακρίνονται με βάση τη χωρητικότητά τους ως προς την ενέργεια και ως προς την ισχύ. Παρακάτω αναφέρονται τα κύρια στοιχεία αξιολόγησης των συσσωρευτών, τα οποία σχετίζονται άμεσα με το κόστος.

- **Απόδοση συσσωρευτή (%) :** Είναι το ποσοστό εκείνο που δείχνει το ποσό της ισχύος ή της ενέργειας που εκφορτίζεται ως προς την ικανότητα της μπαταρίας, με το υπόλοιπο να είναι συνήθως απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον.

- **Ικανότητα μέγιστης ισχύος (W):** Είναι το ανώτερο όριο ισχύος το οποίο μπορεί να μεταφερθεί από και προς την μπαταρία (σε kW ή MW).

- **Ειδική ενέργεια (Wh/kg) :** Είναι η αποθηκευτική ικανότητα της μπαταρίας σε ενέργεια (Wh) ως προς τη μάζα της (kg).

- **Ειδική ισχύς (W/kg) :** Είναι η αποθηκευτική ικανότητα της μπαταρίας σε ισχύ (W) ως προς τη μάζα της (kg).

- **Πυκνότητα ισχύος (C):** Η πυκνότητα ισχύος της μπαταρίας συσχετίζει την ισχύ (kW) που μπορεί να αποδώσει η μπαταρία για δεδομένο μέγεθος (Wh). Μια μπαταρία μεγάλης πυκνότητας ισχύος, θα μπορεί να παρέχει την ίδια ισχύ αδιάλειπτα, σε σχέση με μπαταρία χαμηλότερης πυκνότητας ισχύος. Η πυκνότητα ισχύος μετράται σε βαθμό κατά C ο οποίος είναι πολλαπλός που εκφράζει την ικανότητα της μπαταρίας σε A σε σχέση με τα Ah της. Με αυτόν τον τρόπο η πυκνότητα ισχύος είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της μπαταρίας. Για παράδειγμα, μια μπαταρία 45Ah πυκνότητας ισχύος 5C είναι ικανή να δώσει 5*45A συνεχόμενα. Έτσι μια μπαταρία 12V 60Ah (720 wh) και ικανότητας 5C αποδίδει ισχύ 3,6kW ενώ η ίδια μπαταρία 12V/60 Ah (720 wh) και ικανότητας 20C αποδίδει ισχύ 14.4Kw.

- **Διάρκεια ζωής (κύκλους) :** Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μετράται σε κύκλους φόρτισης εκφόρτισης.

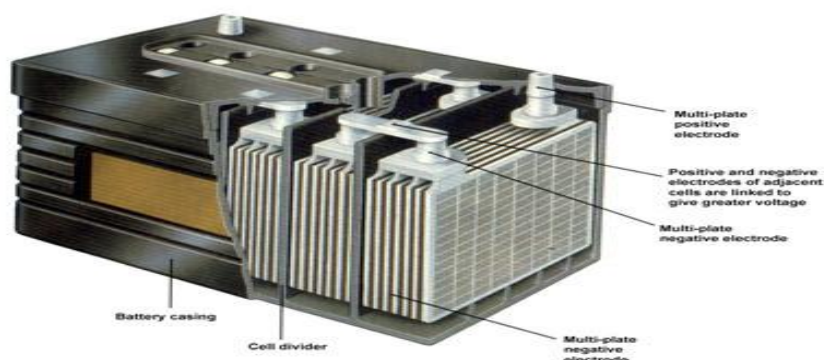
- **Αυτοεκφόρτιση (self discharge) %:** Όλες οι συσσωρευτές είτε λόγω εσωτερικών απωλειών είτε λόγω κάποιας μικρής διαρροής έχουν ένα ποσοστό αυτοεκφόρτισης.

- **Βάθος εκφόρτισης %:** Είναι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποδώσει η μπαταρία ανά μονάδα στην περίπτωση που δίνεται εντολή εκφόρτισης. Δηλαδή με την εκφόρτιση προσφέρεται μόνο ένα ποσοστό της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ για το υπόλοιπο δεν επιδιώκεται η ανάκτηση, ώστε να αποφευχθεί η πλήρης καταστροφή του συσσωρευτή.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές αποτελούνται κυρίως από τη διάταξη των συσσωρευτών, το σύστημα ελέγχου, το σύστημα ισχύος και το σύστημα προστασίας των συσσωρευτών. Στα συστήματα BESS, ραγδαία ανάπτυξη έχουν κυρίως τα δύο πρώτα. Παρακάτω θα αναλύσουμε τα κυριότερα χαρακτηριστικά και τις τεχνολογίες των διαφόρων τύπων συσσωρευτών. Στη συνέχεια παρατίθεται συγκριτικοί πίνακες τόσο ως προς τα χαρακτηριστικά όσο και ως προς τις δυνατότητες εφαρμογής των διαφόρων τεχνολογιών.

2.5.1. Τεχνολογία μολύβδου-οξέος (Lead Acid)

Οι συσσωρευτές μολύβδου οξέος (lead acid) είναι ο παλαιότερος τύπος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας αφού χρησιμοποιείται για παραπάνω από 130 χρόνια. Υπάρχουν διάφοροι τύποι τέτοιων συσσωρευτών όπως : η κλασική τοπολογία ρυθμιζόμενη από βαλβίδα και τοπολογία που χρησιμοποιεί gel ως ηλεκτρολύτη παρά υγρό. Κάθε κύτταρο αποτελείται από ένα θετικό ηλεκτρόδιο διοξειδίου του μολύβδου και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο σπογγοειδούς μολύβδου, τα οποία διαχωρίζονται από ένα πορώδες υλικό, εμβαπτισμένο σε διάλυμα ηλεκτρολύτη θεικού οξέος που περικλείεται από ένα πλαστικό περίβλημα. Αυτά φαίνονται στο σχήμα 2.9



Σχήμα 2.9: Συσσωρευτής μολύβδου οξέος ρυθμιζόμενος από βαλβίδα

Παρά τη χαμηλή τιμή πυκνότητας ενέργειας κατά βάρος λόγω της υψηλής πυκνότητας του μολύβδου, οι συσσωρευτές αυτές έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν υψηλά ρεύματα. Μαζί με το χαμηλό κόστος, καθίστανται ελκυστικές για χρήση σε μηχανοκίνητα οχήματα για να παρέχουν την ισχύ που απαιτείται από τους ηλεκτρικούς κινητήρες.

Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγεται το γεγονός ότι ο ηλεκτρολύτης είναι όξινος και διαβρωτικός και επομένως επιβλαβής για το περιβάλλον. Επιπλέον σε περίπτωση εφαρμογής μεγαλύτερης τάσης, παράγονται από την ηλεκτρόλυση του ύδατος εκρηκτικά αέρια, οπότε θα πρέπει να χειρίζονται με προσοχή. Σε επίπεδο εταιρειών υπάρχουν διάφορες σημαντικές σε μέγεθος εγκαταστάσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 2-4. [23]

Πίνακας 2-4: Χαρακτηριστικές εγκαταστάσεις συσσωρευτών μολύβδου οξέος

Τοποθεσία Χαρακτηριστικά	Μέγεθος	Εφαρμογή /τύπος κατασκευής
Southern California Edison Chino, CA ΗΠΑ	10 MW/40 MWh	Επιπεδοποίηση φορτίου/ (Open/vented)
Puerto Rico El. Power Authority San Juan, Πουέρτο Ρίκο	20 MW/ MWh	Ρύθμιση συχνότητας/ (Open stirred electrolyte)
GNB Industrial Power Metlakatla, Αλάσκα, ΗΠΑ	1 MW / 1.4 MWh	Παροχή φορτίο/ (Sealed, Valve Regulated)

2.5.2. Τεχνολογία νικελίου-καδμίου (NiCd)

Οι συσσωρευτές νικελίου καδμίου (NiCd) είναι παρόμοιες τεχνολογικά με τις συσσωρευτές μολύβδου οξέος σε σχέση με την ωριμότητα χρήσης τους αλλά παρουσιάζουν διαφορετική χρησιμότητα στις εφαρμογές. Όπως ο μολύβδος, έτσι και το κάδμιο είναι ένα βαρύ τοξικό υλικό που κρύβει μεγάλους περιβαλλοντολογικούς κινδύνους αν δε χειριστεί σωστά.

Οι συσσωρευτές αυτές συχνά προτιμούνται σε σχέση με τις αντίστοιχες μολύβδου οξέος σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη αξιοπιστία όπως: φωτισμός εκτάκτου ανάγκης, αδιάλειπτη παροχή ισχύος, τηλεπικοινωνίες, εκκίνηση γεννητριών. Οι συσσωρευτές αυτές έχουν μικρό κόστος συντήρησης, γεγονός που τις δίνει πλεονέκτημα έναντι των συσσωρευτών μολύβδου οξέος. Στα μειονεκτήματά τους ανήκει η μεγάλη διάρκεια ζωής των τοξικών αποβλήτων καθώς και η πεπερασμένη ποσότητα καδμίου στον πλανήτη. Η πιο χαρακτηριστική εγκατάσταση αυτού του είδους συσσωρευτών είναι στην Αλάσκα και μπορεί να παρέχει 27MW για 15λεπτά[24],[25].

2.5.3. Τεχνολογία θειούχου νατρίου (NaS)

Οι συσσωρευτές θειούχου νατρίου αποτελούνται από τηγμένο θείο στο θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο και τηγμένο νάτριο στο αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, ενώ τα δύο αυτά ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από ένα στερεό κεραμικό ηλεκτρολύτη φτιαγμένο από αλουμίνα. Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει μόνο τα θετικά φορτισμένα ιόντα του νατρίου να τον διαπεράσουν και να ενωθούν με το θείο ώστε να σχηματίσουν ενώσεις πολυθεικού νατρίου. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, θετικά ιόντα νατρίου περνούν από τον ηλεκτρολύτη και ηλεκτρόνια ρέουν στο εξωτερικό κύκλωμα της μπαταρίας παράγοντας τάση 2V. Η μπαταρία διατηρείται στους 300° C περίπου ώστε να επιτρέψει αυτή τη διαδικασία.

Οι συσσωρευτές NaS έχουν πολύ μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, 4.2 φορές κατ' όγκο και 5.8 φορές κατά βάρος, από τις συσσωρευτές μολύβδου οξέος με μικρότερες ανάγκες συντήρησης. Επιπλέον έχουν πολύ μεγάλη απόδοση, κοντά στο 90%, ενώ δεν παρουσιάζουν καθόλου διαρροές. Μειονέκτημα των συσσωρευτών αυτών είναι ότι χρειάζονται πηγή θερμότητας για να επιτύχουν τέτοια θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες. Η πιο σημαντική εφαρμογή τους αφορά εγκαταστάσεις ενίσχυσης έργου ισχύος σε υποσταθμούς παρέχοντας όμως και τη δυνατότητα κυκλικής λειτουργίας στην Ιαπωνία και στις ΗΠΑ [27].

2.5.4. Τεχνολογία ιόντων λιθίου (Li ion)

Η κάθοδος σε αυτές τις συσσωρευτές είναι ένα μεταλλικό οξειδίο του λιθίου και η άνοδος είναι κατασκευασμένη από γραφίτη άνθρακα σε στρώματα. Ο ηλεκτρολύτης είναι κατασκευασμένος από άλατα λιθίου διαλυμένα σε οργανικό διαλύτη. Όταν η μπαταρία φορτίζεται, τα άτομα Li στην κάθοδο γίνονται ιόντα και διαπερνούν

τον ηλεκτρολύτη προς την άνοδο από άνθρακα όπου συνδυάζονται με εξωτερικά ηλεκτρόνια και εναποτίθενται μεταξύ των στρωμάτων του άνθρακα ως άτομα λιθίου. Η διαδικασία αυτή αντιστρέφεται κατά την εκφόρτιση.

Οι συσσωρευτές αυτές έχουν μεγάλη πυκνότητα ενέργειας (300-400 kWh/m³ λιθίου), υψηλότερη απόδοση μετατροπής και μεγάλο κύκλο ζωής (περίπου 3000 κύκλοι για βάθος εκφόρτισης 80%). Επειδή το λίθιο είναι το ελαφρύτερο στερεό στοιχείο, οι συσσωρευτές που βασίζονται σε αυτό μπορούν να είναι κατά πολύ ελαφρύτερες από τις συνηθισμένες. Γι' αυτό το λόγο και λόγω της μεγάλης απόδοσής τους, βρίσκουν πολλές εφαρμογές στα κινητά τηλέφωνα και στους φορητούς υπολογιστές. Πρόσφατα έχει αρχίσει και η δυνατότητα επέκτασης χρήσης συσσωρευτών Li-Ion και σε εφαρμογές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η ικανότητα αυτών των συσσωρευτών μπορεί να φτάσει σε επίπεδα λίγων δεκάδων kW, με μία πρώτη εγκατάσταση στη χώρα μας στην πειραματική εγκατάσταση συμπαραγωγής του Ε.Μ.Π και της Ε.Π.Α Αττικής[26].

2.5.5. Τεχνολογία λιθίου-πολυμερούς (Li – Polymer)

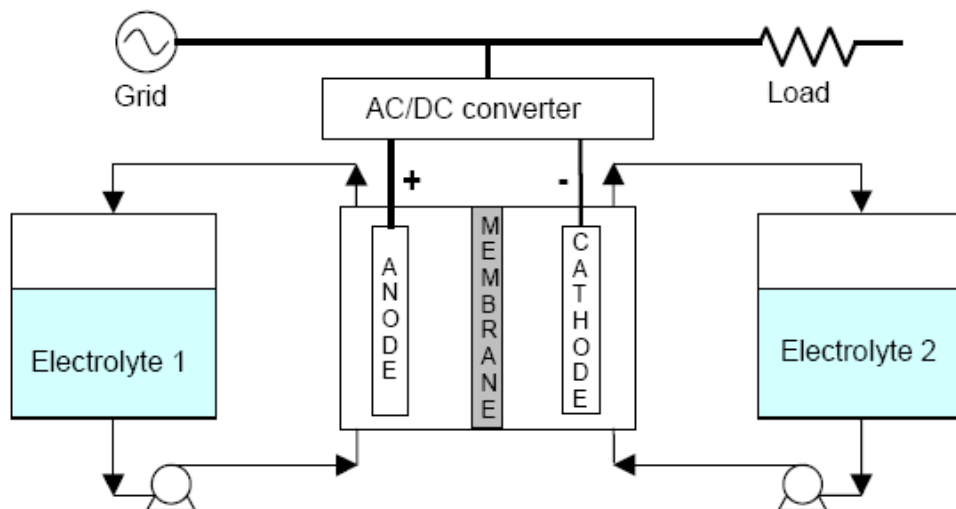
Σήμερα τα πλέον επαναφορτιζόμενα στοιχεία λιθίου είναι τα εμπομαζόμενα λιθίου – πολυμερούς. Αυτά στην πραγματικότητα είναι στοιχεία 'Λιθίου Ιόντων Πολυμερούς', αλλά έτσι έχει επικρατήσει να λέγονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Το στοιχείο του λιθίου ιόντος πολυμερούς, δηλαδή το πορώδες διαχωριστικό φύλλο, έχει αντικατασταθεί από ένα φύλλο συμπαγούς πολυμερούς υλικού που να μην είναι μη αγώγιμο στον ηλεκτρισμό, αλλά επιτρέπει να περάσουν τα ιόντα. Τα ηλεκτρόδιά τους είναι λίθιο στην κάθοδο και γραφίτης (άνθρακας) στην άνοδο. Τα στοιχεία Li-Po έχουν ονομαστική τάση 3,7V. Η πρακτική περιοχή τάσης είναι από 4,2 volts όταν είναι φορτισμένα έως 3 volts όταν εκφορτιστούν. Η εξωτερική διαφορά από τα στοιχεία Li-Ion είναι ότι περικλείονται σε μαλακό περίβλημα που λέγεται φάκελος. Αυτό το γεγονός τα κάνει να είναι πολύ ελαφριά συγκριτικά με όλα τα άλλα στοιχεία και αποκλείει τον κίνδυνο έκρηξης, αφού δεν μπορεί να αναπτυχθεί μεγάλη πίεση στο εσωτερικό του στοιχείου, όχι όμως και τον κίνδυνο ανάφλεξης. Η μεγάλη πυκνότητα ισχύος και ενέργειας τα καθιστά εξαιρετική λύση για ηλεκτρική κίνηση. Η λύση όμως δεν είναι ακόμα ικανοποιητική στο οικονομικό μέρος.

2.5.6. Τεχνολογία συσσωρευτών ροής (flow batteries)

Αυτός ο τύπος μπαταρίας αποτελείται από δύο ηλεκτρολυτικούς ταμιευτήρες στους οποίους οι ηλεκτρολύτες κυκλοφορούν (μέσω αντλιών) μέσα από ένα ηλεκτροχημικό κύτταρο που περιλαμβάνει μια άνοδο, μια κάθοδο και μια μεμβράνη που τις διαχωρίζει. Η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό στο ηλεκτροχημικό κύτταρο όταν οι δύο ηλεκτρολύτες το διαπερνούν. Και οι δύο ηλεκτρολύτες είναι αποθηκευμένοι χωριστά σε δεξαμενές έξω από το ηλεκτροχημικό κύτταρο. Το μέγεθος των δεξαμενών και η ποσότητα των ηλεκτρολυτών καθορίζει την πυκνότητα ενέργειας

σε αυτές τις συσσωρευτές. Παρ' όλα αυτά, η πυκνότητα ισχύος εξαρτάται από τις αντιδράσεις που συμβαίνουν στην άνοδο και στην κάθοδο. Η δομή των συσσωρευτών ροής φαίνεται στο σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10: Διάγραμμα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας βασισμένο σε συσσωρευτές ροής

Οι συσσωρευτές ροής ονομάζονται συχνά και συσσωρευτές οξειδοαναγωγής (redox flow) εξαιτίας των αντιδράσεων μεταξύ των δύο ηλεκτρολυτών.

Κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά των συσσωρευτών αυτών είναι: η υψηλή ισχύς, η μεγάλη διάρκεια, η ικανότητα μεταφοράς ισχύος, η εύκολη αντικατάσταση των ηλεκτρολυτών, η γρήγορη μετάβαση από εκφόρτιση σε φόρτιση, αλλά και η μικρή απόδοση λόγω των απωλειών στις χημικές αντιδράσεις. Επιπλέον δεν παρουσιάζεται καθόλου αυτοεκφόρτιση, εφόσον οι ηλεκτρολύτες αποθηκεύονται χωριστά. Οι κύριες κατηγορίες συσσωρευτών ροής είναι οι εξής:

- **Οξειδοαναγωγής βαναδίου (Vanadium redox – VRB):** Σε κάθε κύτταρο μιας μπαταρίας VRB, τα ζεύγη αποθηκεύονται σε ήπιο διάλυμα θειικού οξέος (ηλεκτρολύτες). Κατά τη διάρκεια φόρτισης/εκφόρτισης, H^+ ιόντα ανταλλάσσονται μεταξύ των δύο δεξαμενών μέσω τις μεμβράνης από πολυμερές, ώστε να παράγουν μια τάση 1.4-1.6 V.
- **Βρωμιούχου ψευδαργύρου (Zinc-Bromine-ZnBr):** Σε κάθε κύτταρο μιας μπαταρίας ZnBr, δύο διαφορετικοί ηλεκτρολύτες ρέουν μέσω πλαστικού ηλεκτροδίου σε δύο διαφορετικά διαμερίσματα, χωριζόμενα από μια μικροπορώδη μεμβράνη. Κατά την εκφόρτιση, Zn και Br ενώνονται και σχηματίζουν ZnBr, παράγοντας 1.8V σε κάθε κύτταρο. Κατά τη φόρτιση, μεταλλικός ψευδάργυρος εναποτίθεται ως ένα λεπτό φιλμ στη μια μεριά του ηλεκτροδίου[28,29].

Οι συσσωρευτές αυτές έχουν βρει εφαρμογές από ερευνητικά κέντρα και εταιρίες από το 1980. Οι δύο κυριότερες εταιρίες είναι οι ‘Sumitomo Industries’ και η ‘ZBB Energy Corporation’, των οποίων οι εφαρμογές συνοψίζονται στον πίνακα 2-5.

Πίνακας 2-5: Χαρακτηριστικές εγκαταστάσεις συσσωρευτών ροής

Πελάτης	Μέγεθος	Εφαρμογή	Ημερομηνία Έναρξης
Institute of Applied Energy	AC 170kW*6h	Σταθεοποίηση εξόδου τουρμπίνας αιολικής ενέργειας	Μαρτιος 2001
Tottori Sanyo Electric	AC 1,5MW*1h	Αποκοπή αιχμών	Απρίλιος 2001
Obayashi Corporation	DC 30kW*8h	Υβριδικό με φ/β κύπαρα	Νοέμβριος 2001
Kwansei Gakuin University	AC 500kW*10h	Αποκοπή αιχμών	Δεκέμβριος 2002
Detroit Edison	AC 400kWh	Αποκοπή αιχμών & σταθεροποίηση φορτίου	Ιούνιος 2001
United Energy Melbourne	AC 200kWh	Επίδειξη αποθήκευσης σε δίκτυο	Απρίλιος 2001
Australian Inland Energy	DC 40kW*8h	Υβριδικό με φ/β κύπαρα	Νοέμβριος 2002
Powrlight corporation	DC 100kWh	Υβριδικό με φ/β κύπαρα	Απρίλιος 2003
Pacific Gas and Electric Company	2MWh	Μέγιστη χωρητικότητα ισχύος	Οκτώβριος 2005

Στη συνέχεια στον πίνακα 2-6 συνοψίζουμε τα βασικότερα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά δίκτυα [21].

Πίνακας 2-6: Σύνοψη των τεχνολογιών και των χαρακτηριστικών των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (BESS)

Τύπος Μπαταρίας	Μεγαλύτερη χωρητικότητα (Εμπορική μονάδα)	Περιοχή & εφαρμογή	απόδοση η(%)	Κόστος €/kWh	Διάρκεια ζωής (κύκλους)	Βάθος εκφόρτισης (%)	Θερμοκρασία λειτουργίας	Ειδική Ενέργεια (wh/kg)	Αυτό-εκφόρτιση (%) /μήνα	Σχόλια
Μολύβδου οξέος (flooded type)	10MW/40MWh	California-Chino /Εξομάλυνση φορτίου	72-78	50-150	1000-1200	70	(-5 με 40)	25	2 με 5	συνεχής συντήρηση για πλήρωση νερού, μεγάλο βάρος, τοξικός ηλεκτρολύτης
Μολύβδου οξέος (ρυθμιζόμενη από βαλβίδα)	300kW/580kWh	Turn Key System/Εξομάλυνση φορτίου	72-78	50-150	200-300	80	(-5 με 40)	30-50	2 με 5	λιγότερο σπιβαρή, αμελητέα συντήρηση, πιο φορητή, ασφαλής
Νικελίου Καδμίου (NiCd)	27MW/6.75MWh	GVEA Alaska Control power supply/Ανιστάθμιση ισχύος	72-78	200-600	3000	100	(-40 με 50)	45-80	5 με 20	μεγάλος ρυθμός αυτό-εκφόρτισης, τα κύτταρα NiCd είναι δηλητηριώδη και βαριά
Θειούχου Νατρίου (NaS)	9.6MW/64MWh	Tokyo Japan/Εξομάλυνση φορτίου	89	200-300	2500	100	325	100	ΟΧΙ	καθόλου αυτό-εκφόρτιση, χρειάζεται εξωτερική πηγή θερμότητας, για 30s 6 φορές μεγαλύτερη ισχύ
Ιόντων Λιθίου (Li-ion)	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ	100	700-100	3000	80	(-30 με 60)	90-190	1	μεγάλο κόστος εξαιτίας ειδικού πακεταρίσματος και εσωτερικής προστασίας από υπέρταση
ροής VRB	1.5MW/1.5MWh	Japan Voltage Sag/Αποκοπή φορτίου αιχμής	85	360-1000	10000	75	0-40	30-50	ΟΧΙ	αμελητέα αυτό-εκφόρτιση
ροής ZnBr	1MW/4MWh	Kyushuu EPC	75	360-1000	10000	70	0-40	70	ΟΧΙ	αμελητέα αυτό-εκφόρτιση, μικρή ισχύς, ογκώδης, επικίνδυνα υλικά
Μεταλλου αέρα (Metal air)	μικρή		50	50-200	100	50	(-20 με 40)	450-650	ΟΧΙ	αμελητέα αυτό-εκφόρτιση, η επαναφόρτιση είναι πολύ δύσκολη και όχι αποδοτική, συμπαγής

2.6 Σύνοψη εφαρμογών και χαρακτηριστικών των αποθηκευτικών διατάξεων ενέργειας

Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου παραθέτουμε το συγκεντρωτικό πίνακα 2-7, όπου συνοψίζονται οι εφαρμογές και τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα των αποθηκευτικών

διατάξεων ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα αξιολογείται και η ικανότητα τους σε εφαρμογές ενέργειας και ισχύος.

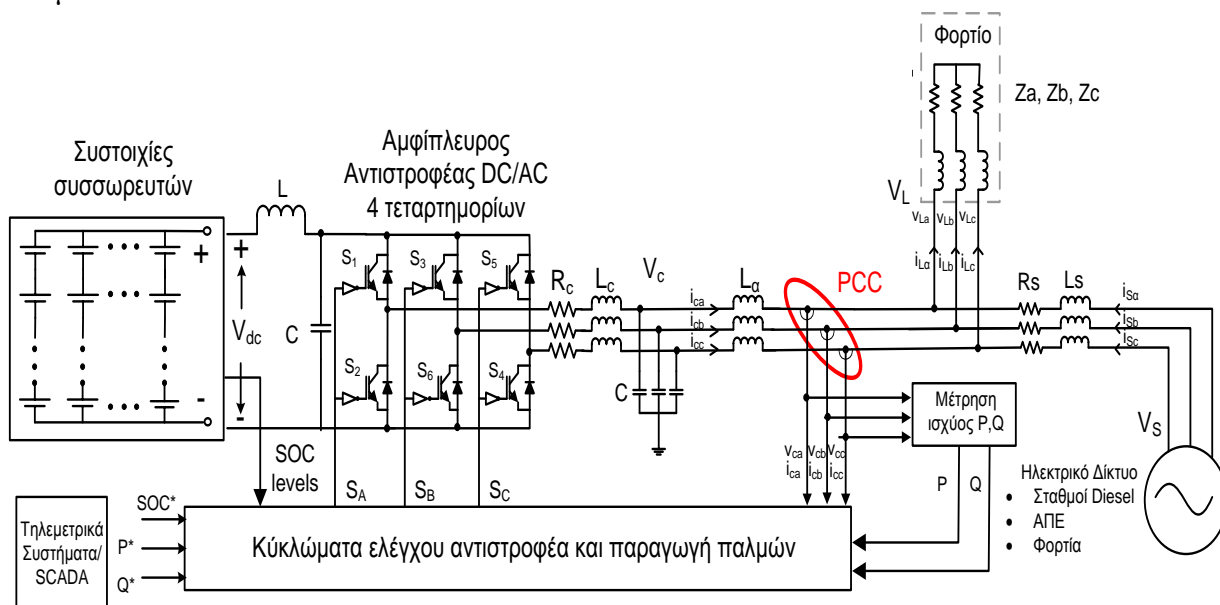
Πίνακας 2-7: Σύνοψη εφαρμογών και πλεονεκτημάτων – μειονεκτημάτων αποθηκευτικών διατάξεων ηλεκτρικής ενέργειας

Αποθηκευτική Διάταξη	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Εφαρμογές Ισχύος	Εφαρμογές Ενέργειας	Συνήθης Εφαρμογή
Μπαταρίες ροής (flow): PSB, VRB, ZnBr	Υψηλή χωρητικότητα, ανεξάρτητη εκτίμηση ισχύος και ενέργειας	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	++	+++	Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών
Μολύβδου οξέος (ρυθμιζόμενη από βαλβίδα)	Χαμηλό αρχικό κόστος	Περιορισμένος κύκλος ζωής σε βαθιά εκφόρτιση	+++	-	Εξομάλυνση αιχμών
Νικελίου Καδμίου (NiCd)	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, απόδοση	επικίνδυνα υλικά	+++	++	Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών-λεπτών
Θειούχου Νατρίου (NaS)	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, υψηλή απόδοση	Κόστος παραγωγής, χρήση εξωτερικής πηγής θερμότητας, μέτρα ασφαλείας (λόγω σχεδιασμού)	+++	+++	Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών-λεπτών
Ιόντων λιθίου (Li-ion)	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, υψηλή απόδοση	Υψηλό κόστος παραγωγής (λόγω σχεδιασμού), απαιτεί ειδικό κύκλωμα φόρτισης	+++	-	Κινητή τηλεφωνία, Υποσταθμοί ενέργειας
Σφόνδυλοι (flywheels)	Υψηλή Ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	+++	-	Εξομάλυνση ισχύος για λίγα λεπτά
SMES (Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση)	Υψηλή Ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας, υψηλό κόστος παραγωγής	+++	--	Εφαρμογές ποιότητας ισχύος, διανομή
E.C Capacitors (Υπερπυκνωτές)	Μεγάλος κύκλος ζωής, υψηλή απόδοση	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	+++	++	Εφαρμογές ποιότητας ισχύος, διανομή
Αντλησιοταμίευση	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία	--	+++	Εξομάλυνση ζήτησης σε μεγάλο χρονικό διάστημα
Ενεργειακή Αποθήκευση Συμπιεσμένου Αέρα	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία για τις χρησιμοποιούμενες κοιλότητες	--	+++	Εξομάλυνση ζήτησης σε μεγάλο χρονικό διάστημα

Στο επόμενο κεφάλαιο, θα ασχοληθούμε με τη διαχείριση και το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος που θα έχει ως αποτέλεσμα τον καθορισμό της πολιτικής φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών, καθώς και την αλληλεπίδραση με το δίκτυο.

2.7 Γενικό δομικό διάγραμμα συστήματος BESS προς μελέτη

Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζουμε το γενικό δομικό διάγραμμα του συστήματος BESS. Στα επόμενα κεφάλαια κάθε επιμέρους συνιστώσα τόσο στο κύκλωμα ισχύος όσο και στο κύκλωμα ελέγχου θα εξεταστεί και θα μοντελοποιηθεί. Επιπλέον θα εξεταστούν τεχνικές που αφορούν το κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα και τεχνικές ελέγχου των παλμών.



Σχήμα 2.11: Γενικό δομικό διάγραμμα ενός συστήματος BESS

Όπως παρατηρούμε το διάγραμμα αυτό αποτελείται από τις παρακάτω συνιστώσες:

- **Συστοιχίες Συσσωρευτών:** Περιλαμβάνει τις συστοιχίες των συσσωρευτών με τεχνολογίες που αναλύθηκαν παραπάνω αλλά και τα κυκλώματα προστασίας.
- **Αντιστροφέας ισχύος:** Πρόκειται για τριφασικό αμφίπλευρο αντιστροφέα πηγής τάσης ο οποίος έχει λειτουργία 4 τεταρτημορίων, δηλαδή λειτουργεί ως αντιστροφέας μετατρέποντας την τάση από DC σε AC αλλά και ως ανόρθωση, μετατρέποντας την τάση από AC σε DC.
- **Φίλτρα εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα:** Αυτά είναι υπεύθυνα για την εξομάλυνση των κυματομορφών τάσεων και ρευμάτων εκατέρωθεν καθώς και τη μέγιστη ισχύ που ανταλλάσσεται μεταξύ συσσωρευτών και δικτύου.
- **Κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα:** Το κύκλωμα αυτό περιέχει συστήματα μέτρησης τάσεως, ρεύματος και ισχύος από διάφορα σημεία του δικτύου, συστήματα επεξεργασίας σημάτων, μικροελεγκτές και άλλα συστήματα που υλοποιούν τον έλεγχο του αντιστροφέα και εφαρμόζοντας ορισμένες τεχνικές παράγουν τους παλμούς για τους ημιαγωγούς.
- **Δίκτυο ΣΗΕ και τηλεμετρικά συστήματα:** Δεδομένα από το δίκτυο μεταφέρονται μέσω συστημάτων SCADA στο κύκλωμα ελέγχου για επεξεργασία. Το δίκτυο θεωρείται ως άπειρος ζυγός με σταθερή τιμή τάσης και συχνότητας.

2.8 Βιβλιογραφία - Αναφορές δεύτερου κεφαλαίου

- [1] A.F.Wals, R.H.Hendriks, «*Economics of Energy Storage -An analysis of the administrative consequences of electricity storage*», March 2004, διαθέσιμο www.ecn.nl/docs/library/report/2004/c04006.pdf
- [2] T.Yau,L.Walker, HL Graham, A Gupta, R Raithel, «*Effect of battery Storage Devices on Power System Dispatch*», J. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-100, Issue: 1 Jan. 1981 pp375-383.
- [3] M.S.Habibi, «*Model For Impact Of Storage On Spinning Reserve Requirements And Distributed Generation*», Proc. of the 33rd Southeastern Symposium on System Theory, Mar 2001, pp: 161-165, 2001.
- [4] A. Nourai «*Comparison of the Costs of Energy Storage Technologies for T&D Applications*», July 2004, διαθέσιμο www.energystorage.org
- [5] Schoenung, S.M., J.M. Eyer, J.J. Iannucci, S.A. Horgan, «*Energy Storage for a Competitive Power Market*», Annual Review of Energy and the Environment Vol. 21: 347-370,
- [6] Schoenung, S.M, «*Benefit and Cost Comparisons of Energy Storage technologies for Three Emerging Value Propositions*», proc of the EESAT 2007, Oct. 17-19,2005, San Francisco,California,
- [7] «*Enhancing security of the uk electricity system with energy storage* », DTI, CONTRACT NUMBER: K/EL/00319/00/00, 2006.
- [8] «*The future value of storage in the UK with generator intermittency*» DTI contract DG/DTI/00040/00/00 (2004).
- [9] Kelsey B. Lynn, «*Estimating the Value of Distributed Energy Storage to California in Combination with Solar Photovoltaics, Market Investigation, Preliminary Analysis and Recommendations for Further Research*», Electric Power Research Institute, March 2006
- [10] A.G.Bakirtzis,P.S Dokopoulos «*Short term generation scheduling in a small autonomous system with unconventional energy sources*» IEEE Trans on power Systems,Vol3, No3, 1988
- [11] Γιάννης Καμπούρης, «*Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε Συστήματα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας*», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ 1992.
- [12] A.Ter-Gazarian, «*Energy storage for Power systems*»,Peter Peregrinus IEE Energy Series 6,UK, 1994
- [13] Edgardo D. Castronuovo,J. A. Peças Lopes, «*On the Optimization of the Daily Operation of a Wind- Hydro Power Plant*», IEEE Trans On Power Systems, Vol. 19, No. 3, August 2004,pp1599-1606.
- [14] G.N. Bathurst, G. Strbac «*Value of combining energy storage and wind in short-term energy and balancing markets*», J. Electric Power Systems Research 67 (2003), pp1-8
- [15] Chin H. Lo, Max D. Anderson, «*Economic Dispatch And Optimal Sizing Of Battery Energy Storage Systems In Utility Load-Leveling Operations*», IEEE Trans on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, September 1999,pp 824-829.
- [16] Rau, N.S. Taylor, B, «*A central inventory of storage and other technologies to defer distribution upgrades-optimization and economics*», IEEE Trans. on Power Delivery, Jan 1998,Vol. 13, Iss. 1 pp.194- 200
- [17] Math H. J. Bollen, Understanding power quality problems : voltage sags and interruptions, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, NY, c2000.

- [18] S. Swaminathan, R.K. Sen, «**Review of Power Quality Applications of Energy Storage Systems**», Sandia National Laboratories, report no. SAND98-1513, July 1998. Διαθέσιμο <http://www.prod.sandia.gov/cgi-bin/techlib/access-control.pl/1998/981513.pdf>
- [19] C. Johnson, U. Abdulwahid, J. Manwell, «**Design and modelling of Dispatchable heat storage in Wind/Diesel systems**» Proc of the AWEA Annual Conference, Portland, OR, 2002.
- [20] Status of Electrical Energy Storage. Systems. Technical Report DG/DTI/00050/00/00, 2004, Διαθέσιμο www.berr.gov.uk/files/file15189.pdf
- [21] Δικτυακός τόπος Energy Storage Association www.energystorage.org
- [22] Stanley Atcitty, «**Electrochemical Capacitor Characterization for Electric Utility Applications**», Phd Dissertation, November 2006, Virginia Polytechnic Institute.
- [23] M. Farber De Anda, J. Boyes, W. Torres, «**Lessons Learned From the Puerto Rico Battery Energy Storage System**», Sandia Laboratories Technical Report SAND99-2232, 1999.
- [24] Golden Valley Electric Association (GVEA) Fairbank's Battery Energy Storage System (BESS), διαθέσιμο <http://www.gvea.com/about/bess/>
- [25] Y. H. Pan, V. Srinivasan, C. Y. Wang, «**An experimental and modeling study of isothermal charge/discharge behavior of commercial Ni-MH cells**», J. of Power Sources, Vol. 112, Issue 1, 24 October 2002, pp 298-306.
- [26] EU-DEEP The birth of a European Distributed Energy Partnership that will help the large scale implementation of distributed energy resources in Europe. FP6 Project: SES6-CT-2003-503516, Technical Annex, available www.eu-deep.com
- [27] Ali Nourai, Bradford P. Martin, and Doug R. Fitchett, «**Testing the limits [electricity storage technologies]**», IEEE power and energy magazine, Vol 3, Is 2, March 2005 pp:40 – 46.
- [28] David Linden, Thomas B. Reddy, «**Handbook of Batteries**», McGraw-Hill, 2002.
- [29] D. Pavlov, G. Papazov, M. Gerganska (Eds.). «**Battery Energy Storage Systems**». Nov. 1991, UNESCO Regional office for Science and Technology in Europe (ROSTE).
- [30] Melissa M. Reading, «**Flywheel Energy Storage System**», διαθέσιμο www.energy.ca.gov/reports/2004_04-07_500-04-014.PDF
- [31] Enis, B., Lieberman, P. and Rubin, I., van der Linden, S, «**Transportable Compressed Air Energy Storage (T-CAES) System Driven by A 2,500-kW Wind Turbine**». Proc of the 19th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Capsis Hotel, Aghia Pelagia, Crete, Greece, July 12-14 2006.
- [32] S. van der Linden «**Bulk energy storage potential in the USA, current developments and future prospects**», J. Energy 31 (2006) pp 3446–3457.
- [33] European Hydrogen and Fuel Cell Projects, 2004 EUR 21241-, διαθέσιμο http://europa.eu.int/comm/research/energy/pdf/h2fuell_cell_en.pdf
- [34] Ibrahim Dincer, Marc Rosen, «**Thermal Energy storage, systems and Applications**», John Wiley and sons, West Sussex, 2002
- [35] Strommen «**Introduction of Renewable Energy Systems in Remote Communities in the Nordic Region**» Master Thesis NTNU, Norwegian university of science and technology Faculty of information technology, Department of electrical engineering --- NTNU 2006, June 2006
- [36] Hystore Technologies Ltd, <http://www.hystoretechnologies.com>
- [37] M. Korpaas, «**Distributed Energy Systems with Wind Power and Energy Storage**», Phd Dissertation, NTNU, Trondheim, April 2004
- [38] M. Korpaas, Holen, A.T «**Operation Planning of Hydrogen Storage Connected to Wind Power Operating in a Power Market**», IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 21, No. 3, September 2006, pp. 742 – 749

Κεφάλαιο 3

Διαχείριση ισχύος και προγραμματισμός συστήματος BESS

3.1 Τεχνικές προϋποθέσεις σύνδεσης εγκατάστασης παραγωγής συστήματος BESS στο δίκτυο μέσης τάσης

Εφόσον το προτεινόμενο σύστημα BESS συνδέεται στο δίκτυο μέσης τάσης (MT) και έχει σχεδιαστεί ώστε να συμμετέχει στο ισοζύγιο ισχύος μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, παρέχοντας ισχύ όταν υπάρχει υψηλή ζήτηση από το φορτίο και αποθηκεύοντας ενέργεια όταν υπάρχει χαμηλή ζήτηση, είναι απαραίτητο να εξασφαλίζει την επιθυμητή ποιότητα ισχύος σύμφωνα με τις προδιαγραφές που απαιτούν τα πρότυπα για τις εγκαταστάσεις παραγωγής. Ο στόχος είναι να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους λοιπούς καταναλωτές και να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των παραγωγών. Παράλληλα, εκτός της εξασφάλισης αποδεκτής ποιότητας ισχύος είναι απαραίτητος και ο απαιτούμενος εξοπλισμός ζεύξης και προστασίας με σκοπό την ομαλή λειτουργία των εγκαταστάσεων.

Βασικά, τα κριτήρια και οι προϋποθέσεις που εξετάζονται προκειμένου να επιτραπεί η σύνδεση μιας νέας εγκατάστασης παραγωγής στο δίκτυο είναι τα ακόλουθα[3]:

- Επάρκεια του δικτύου και διατάξεις προστασίας (γραμμών, Μ/Σ, κλπ).
- Αργές μεταβολές της τάσης (μόνιμη κατάσταση)
- Ταχείες μεταβολές της τάσης
- Εκπομπές Flicker (χειρισμών και κανονικής λειτουργίας)
- Εκπομπές αρμονικών
- Διαμόρφωση των προστασιών της διασύνδεσης εγκαταστάσεων δικτύου

Αρχικά θα ορίσουμε κάποιες βασικές έννοιες και στη συνέχεια θα προχωρήσουμε σε περαιτέρω ανάλυση των προϋποθέσεων σύνδεσης.

3.1.1 Βασικά στοιχεία-ορισμοί

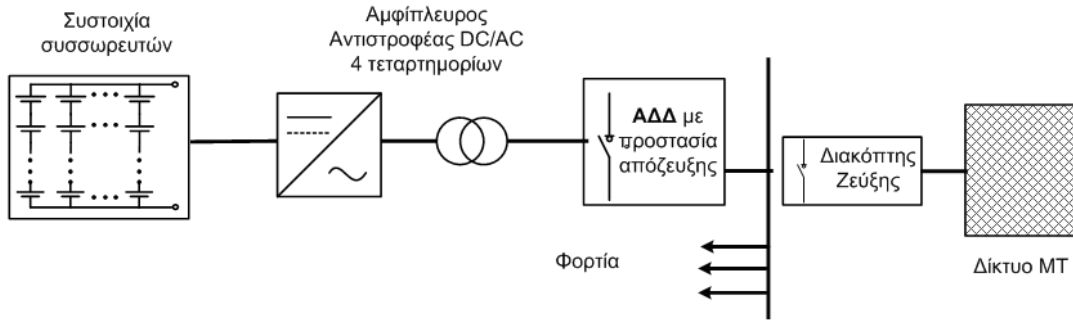
Αρχικά, εφόσον το σύστημα BESS που θα εξετάσουμε (και το οποίο έχει αμεσότερη εφαρμογή σε αυτόνομα νησιωτικά συστήματα) δεν ξεπερνά συνήθως τα 4MW σε ισχύ, σύμφωνα με τον πίνακα 3-1 συνδέεται σε υφιστάμενη γραμμή μέσης τάσης δίχως να χρειάζεται κατασκευή αποκλειστικής γραμμής.

Η σύνδεση της εγκατάστασης στο δίκτυο πρέπει να γίνεται μέσω εγκατάστασης ζεύξης, η οποία διαθέτει τη δυνατότητα διακοπής ρεύματος φορτίου, περιλαμβάνει μέσο ορατής απόζευξης και είναι ανά πάσα στιγμή προσιτή στο προσωπικό της ΔΕΗ. Για τα στοιχεία της ζεύξης εφαρμόζονται οι σχετικές οδηγίες (π.χ Οδηγία διανομής 34 της ΔΕΗ, ‘παροχές ΜΤ’) και η τρέχουσα πρακτική. Επιπλέον για τη σύνδεση των μονάδων παραγωγής, πρέπει να εγκατασταθεί διακόπτης με ικανότητα διακοπής τουλάχιστον ρεύματος φορτίου (διακόπτης ισχύος, ασφαλειοδιακόπτης φορτίου, επαφείας με ασφάλειες έναντι προστασίας έναντι βραχυκυκλωμάτων), ο οποίος εξασφαλίζει το γαλβανικό διαχωρισμό όλων των φάσεων. Ο διακόπτης αυτός αναφέρεται ως **Αυτόματος Διακόπτης Διασύνδεσης (ΑΔΔ)** και σε αυτόν επενεργεί το σύστημα προστασίας αποζεύξεως.

Πίνακας 3-1: Πιθανοί τρόποι σύνδεσης στο δίκτυο εγκαταστάσεων παραγωγής

Ενδεικτική Ισχύς Εγκατάστασης (MW)	Τρόπος Σύνδεσης στο δίκτυο
έως 0,1	Δίκτυο ΧΤ
έως 4	Δίκτυο ΜΤ, σε υφιστάμενη γραμμή με πιθανή ενίσχυση
έως 6	Δίκτυο ΜΤ, μέσω αποκλειστικής γραμμής απλού κυκλώματος
έως 20	Δίκτυο ΜΤ, μέσω αποκλειστικής γραμμής διπλού κυκλώματος
άνω των 20	Δίκτυο ΥΤ, μέσω ιδιαίτερου Υ/Σ ανύψωσης ΥΤ/ΜΤ

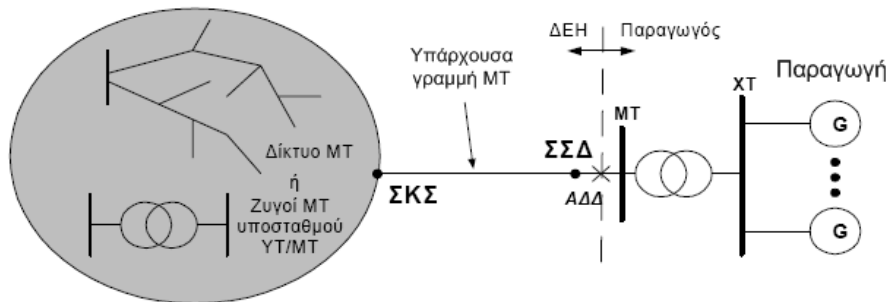
Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η **προστασία απόζευξης** επενεργεί στον ΑΔΔ της εγκατάστασης παραγωγής και εξασφαλίζει την άμεση απόζευξη της όταν εμφανιστούν ανεπίτρεπτες διακυμάνσεις της τάσης και της συχνότητας. Έτσι αποτρέπεται η νησιδοποίηση τμήματος του δικτύου που έχει απομονωθεί από το υπόλοιπο δίκτυο, γεγονός που θα είχε σοβαρές συνέπειες, όπως τη δημιουργία υπερτάσεων, (ιδιαίτερα στην περίπτωση ασύγχρονων γεννητριών λόγω της αυτοδιέγερσής τους) αλλά και κινδύνους για το προσωπικό που εργάζεται σε αυτό. Το σύστημα προστασίας απόζευξης περιλαμβάνει κατ’ ελάχιστον προστασίες υπότασης, υπέρτασης, υποσυχνότητας και υπερσυχνότητας, ενώ μετά τη λειτουργία του ΑΔΔ, η ζεύξη του πρέπει να καθυστερήσει μέχρι να επανέλθει η τάση και η συχνότητα του δικτύου εντός της προβλεπόμενης ζώνης κανονικής λειτουργίας. Ένα παράδειγμα διασύνδεσης της εγκατάστασης BESS φαίνεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα σύνδεσης εγκατάστασης BESS στο δίκτυο μέσης τάσης

Στη συνέχεια θα δώσουμε δύο χρήσιμους ορισμούς:

- **Σημείο σύνδεσης στο δίκτυο (ΣΣΔ):** Είναι το σημείο του δικτύου MT ή ΧΤ όπου συνδέονται οι εγκαταστάσεις του παραγωγού και βρίσκεται πάντα στην έξοδο των εγκαταστάσεων αυτών. Στο ΣΣΔ εγκαθίσταται πάντα η διάταξη μέτρησης της ενέργειας την οποία απορροφούν οι εγκαταστάσεις του παραγωγού από το δίκτυο της ΔΕΗ. Η ενέργεια που αποδίδει ο παραγωγός στο δίκτυο μετράται πάντα μέσω της ίδιας παροχής.
- **Σημείο κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ):** Είναι το πλησιέστερο προς τις εγκαταστάσεις του παραγωγού σημείο του δικτύου, στο οποίο συνδέεται ή μπορεί να συνδεθεί στο μέλλον άλλος καταναλωτής ή παραγωγός. Το ΣΚΣ και το ΣΣΔ γενικά μπορεί να είναι διαφορετικά. Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: ΣΣΔ και ΣΚΣ για μια τυπική περίπτωση σύνδεσης παραγωγού BESS [4]

3.1.2 Αργές μεταβολές της τάσης

Στην ενότητα αυτή εξετάζονται οι αργές μεταβολές της τάσης στο ΣΚΣ, δηλαδή οι διακυμάνσεις σε χρονικά διαστήματα 10λέπτων, οι επιτρεπόμενες τιμές των οποίων ορίζονται από το πρότυπο EN 50160 της CENELEC [1].

3.1.2.1 Προσεγγιστική μέθοδος

Υπολογίζεται ο λόγος βραχυκύκλωσης R_k στο ΣΚΣ:

$$R_k = \frac{S_k}{S_{mcA}} \quad (3.1.1)$$

όπου S_k είναι η ισχύς βραχυκύκλωσης του δικτύου στο ΣΚΣ και S_{mcA} η φαινόμενη ισχύς που αντιστοιχεί στη μέγιστη ενεργό ισχύ συνεχούς λειτουργίας της εγκατάστασης παραγωγής (μέση τιμή 10λέπτου). Εάν ικανοποιείται η συνθήκη :

$$R_k \geq 33 \quad (3.1.2)$$

τότε οι προκαλούμενες μεταβολές της τάσης είναι αποδεκτές και η σύνδεση επιτρέπεται. Βέβαια αν η σύνθετη αντίσταση του δικτύου είναι αρκετά επαγωγική, ο υπολογισμός με τον προηγούμενο τρόπο είναι αρκετά συντηρητικός και η μεταβολή της τάσης στο ΣΚΣ πρέπει να εξεταστεί με τη σχέση [1]:

$$\varepsilon(\%) = 100 \cdot \frac{S_{mcA}}{S_k} \cos(\psi_k + \varphi_A) = \frac{100}{R_k} \cdot \cos(\psi_k + \varphi_A) \quad (3.1.3)$$

όπου $\varepsilon(\%)$ είναι η αναμενόμενη μέγιστη μεταβολή της τάσης στο ΣΚΣ επί τοις εκατό της τάσης του δικτύου, ψ_k η φασική γωνία της σύνθετης αντίστασης βραχυκυκλώσεως του δικτύου και φ_A η φασική γωνία του ρεύματος στην έξοδο των εγκαταστάσεων παραγωγής. Η υπολογιζόμενη μεταβολή της τάσης θα πρέπει να είναι μικρότερη του 3%.

3.1.2.2 Ακριβής μέθοδος

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 50160 της CENELEC [1], η τάση δημοσίων δικτύων μέσης τάσης (MT) πρέπει να μην αποκλίνει περισσότερο από από $\pm 10\%$ της ονομαστικής τιμής για το 95% του χρόνου μετρούμενη ως μέση τιμή 10λέπτου. Για να σχεδιάζονται τα δίκτυα με βάση επιθυμητά όρια διαταραχών, η ΔΕΗ θέτει τα εξής όρια σχεδιασμού [2]:

i) Η μέση τιμή της τάσης οποιουδήποτε κόμβου δεν πρέπει να αποκλίνει άνω του $\pm 5\%$ από την ονομαστική τιμή, ώστε να είναι δυνατή η διόρθωση της μέσω των μεταβλητών λήψεως (taps) των Μ/Σ διανομής (ρύθμιση από -5% έως $+5\%$ σε βήματα 2.5%).

ii) Η διακύμανση της τάσης περί τη μέση τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το $\pm 3\%$ της ονομαστικής τιμής. Με την απαίτηση αυτή γενικά εξασφαλίζεται ότι η διακύμανση της τάσης σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου ΧΤ δε θα υπερβαίνει το όριο του $\pm 10\%$

Ο ακριβής προσδιορισμός των προκαλούμενων μεταβολών της τάσης περιλαμβάνει τον υπολογισμό ροών φορτίου στο δίκτυο για τις ακόλουθες τέσσερις ακραίες λειτουργικές καταστάσεις [1,4]:

- Α.** Μέγιστο φορτίο – Ελάχιστη παραγωγή **Β.** Μέγιστο φορτίο – Μέγιστη παραγωγή
Γ. Ελάχιστο φορτίο – Ελάχιστη παραγωγή **Δ.** Ελάχιστο φορτίο – Μέγιστη παραγωγή

Για τις 4 καταστάσεις προκύπτουν η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της τάσης κάθε κόμβου j , $U_{\min i}, U_{\max i}$:

$$U_{\max j} = \max \{U_{A,j}, U_{B,j}, U_{\Gamma,j}, U_{\Delta,j}\} \quad (3.1.4)$$

$$U_{\min j} = \min \{U_{A,j}, U_{B,j}, U_{\Gamma,j}, U_{\Delta,j}\} \quad (3.1.5)$$

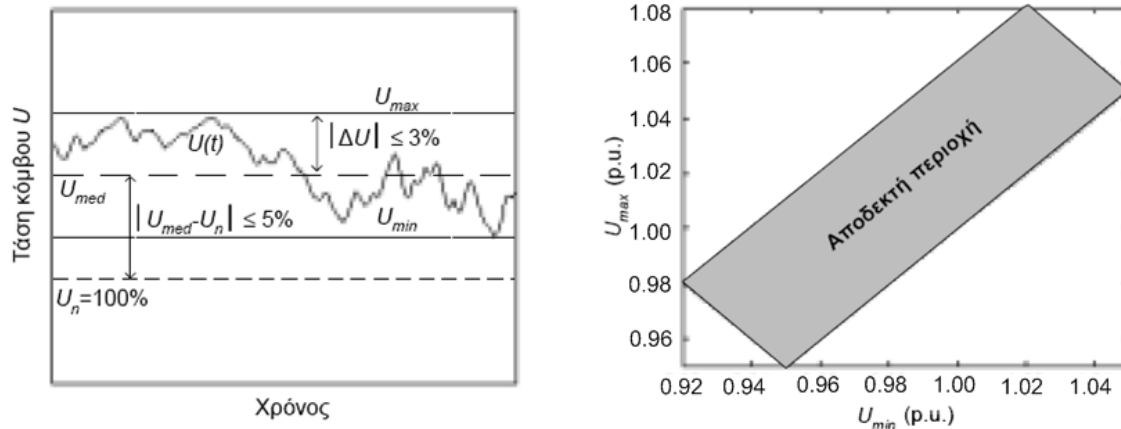
Η μέση τιμή κάθε κόμβου, $U_{\text{med},j}$, δεν πρέπει να αποκλίνει άνω του $\pm 5\%$ από την ονομαστική:

$$0.95 \cdot U_n \leq U_{\text{med},j} = \frac{U_{\min,j} + U_{\max,j}}{2} \leq 1.05 \cdot U_n \quad (3.1.6)$$

Η διακύμανση της τάσης ΔU_j , περί τη μέση τιμή $U_{\text{med},j}$ δεν πρέπει να υπερβαίνει το $\pm 3\%$ της ονομαστικής τάσης:

$$2 \cdot \Delta U_j = U_{\max,j} - U_{\min,j} \leq 0.06 \cdot U_n \quad (3.1.7)$$

Οι απαιτήσεις αυτές ορίζουν τις αποδεκτές περιοχές του σχήματος 3.3.



Σχήμα 3.3: Αποδεκτές περιοχές μεταβολής τάσης ως προς τη μέση τιμή και τη διακύμανση

3.1.3 Ταχείες μεταβολές της τάσης - Flicker

Σύμφωνα με το πρότυπο EN50160 [1], ταχείες μεταβολές της τάσης είναι γρήγορες μεταβολές της rms τιμής της που συμβαίνουν σε διάρκεια ενός κύκλου έως και ορισμένων δευτερολέπτων. Αυτές συμβαίνουν εξαιτίας των ζεύξεων, αποζεύξεων ή εξαιτίας της μεταβλητότητας της ισχύος εξόδου των εγκαταστάσεων. Κατά την εξέταση μεταβολών αυτού του τύπου θα πρέπει να εκτιμώνται :

- i) Το μέγεθος των αναμενόμενων μεταβολών της τάσης στο ΣΚΣ και
- ii) Οι προκαλούμενες εκπομπές flicker χειρισμών και κανονικής λειτουργίας (προκαλούμενη οπτική ενόχληση λόγω διακυμάνσεων της τάσης των λαμπτήρων)

3.1.3.1 Χειρισμοί

Η προκαλούμενη μεταβολή της τάσης στο ΣΚΣ εξαιτίας χειρισμών δεν πρέπει να υπερβαίνει τα όρια που δίνονται στον πίνακα 3-2 και τα οποία εξαρτώνται από την αναμενόμενη συχνότητα χειρισμών [4].

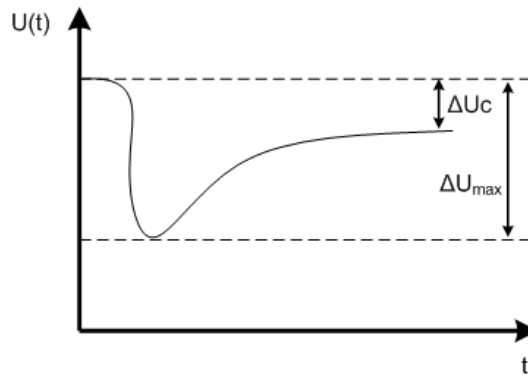
Πίνακας 3-2: Μέγιστη επιτρεπόμενη μεταβολή της τάσης στο ΣΚΣ d_{\max} (%) εξαιτίας χειρισμών

Συχνότητα χειρισμών r (ανά ώρα)	Επιτρεπόμενη μεταβολή της τάσης d_{\max} (%)
$r > 10$	$\leq 2\%$
$1 < r \leq 10$	$\leq 3\%$
$r \leq 1$	$\leq 4\%$

Ο υπολογισμός της προκαλούμενης μεταβολής d_{\max} (%) γίνεται με εφαρμογή της σχέσης:

$$d_{\max} (\%) = 100 \cdot k_v \cdot \frac{S_{nE}}{S_k} \quad (3.1.8)$$

όπου S_{nE} είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της μοναδιαίας εγκατάστασης και $k_v(\psi_k)$ είναι ο συντελεστής μεταβολής τάσης της εγκατάστασης. Μια τυπική μορφή ταχείας διαταραχής δίνεται στο σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4: Τυπική μορφή ταχείας μεταβολής της τάσης

Εκτός από τη μέγιστη βύθιση τάσης, πρέπει ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται ότι το προκαλούμενο flicker εξαιτίας χειρισμών δεν υπερβαίνει το επιτρεπόμενο όριο:

$$P_{st} \leq E_{Pst} = G_{Pst} = 0.79 \quad (3.1.9)$$

$$P_{lt} \leq E_{P_{lt}} = G_{P_{lt}} = 0.63 \quad (3.1.10)$$

όπου P_{st} και P_{lt} είναι οι δείκτες flicker βραχείας και μακράς διάρκειας της εγκατάστασης παραγωγής εξαιτίας χειρισμών και $E_{P_{st}}, E_{P_{lt}}$ είναι τα αντίστοιχα όρια για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση. Για την εφαρμογή των παραπάνω χρησιμοποιείται ο κανόνας κυβικής άθροισης των flicker:

$$P_{st} = \sqrt[3]{\sum_i P_{st,i}^3} \text{ και } P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_i P_{lt,i}^3} \quad (3.1.11)$$

Στη συνέχεια δίνεται συνοπτικά ο τρόπος υπολογισμού των δεικτών flicker και ο καθορισμός των σχετικών ορίων.

Όρια εκπομπών flicker $E_{P_{st}}, E_{P_{lt}}$ [5]

Για δίκτυα MT τα όρια flicker είναι αυτά των δύο προηγούμενων σχέσεων. Εάν όμως στο δίκτυο MT πρόκειται να συνδεθούν και άλλες εγκαταστάσεις παραγωγής (π.χ ανεμογεννήτριες), τότε τα όρια επιμερίζονται ανάλογα με την ισχύ:

$$E_{P_{st},i} = G_{P_{st}} \cdot \sqrt[3]{\frac{S_{nE,i}}{S_t}} \geq 0.35 \quad (3.1.12)$$

$$E_{P_{lt},i} = G_{P_{lt}} \cdot \sqrt[3]{\frac{S_{nE,i}}{S_t}} \geq 0.25 \quad (3.1.13)$$

Υπολογισμός των δεικτών flicker P_{st}, P_{lt}

Το flicker που προκαλείται εξαιτίας των χειρισμών μιας εγκατάστασης δίνεται από τις σχέσεις :

$$P_{st} = 18 \cdot N_{10}^{0.31} \cdot k_f(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (3.1.14)$$

$$P_{lt} = 8 \cdot N_{120}^{0.31} \cdot k_f(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (3.1.15)$$

όπου N_{10} και N_{120} ο μέγιστος αριθμός χειρισμών εντός περιόδου 10 λεπτών και 120 λεπτών και $k_f(\psi_k)$ ο συντελεστής flicker χειρισμών της εγκατάστασης που δίνεται στο

πιστοποιητικό δοκιμών ως συνάρτηση της γωνίας ψ_k . Αν βέβαια στο ίδιο σημείο συνδέονται και άλλες εγκαταστάσεις τότε ο συνολικός υπολογισμός flicker δίνεται από:

$$P_{st\Sigma} = \frac{18}{S_k} \cdot \left[\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{10,i} \cdot (k_{f,i}(\psi_k) \cdot S_{n,i})^{3.2} \right]^{0.31} \quad (3.1.16)$$

$$P_{lt\Sigma} = \frac{8}{S_k} \cdot \left[\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{120,i} \cdot (k_{f,i}(\psi_k) \cdot S_{n,i})^{3.2} \right]^{0.31} \quad (3.1.17)$$

όπου N_{wt} είναι ο αριθμός των προς σύνδεση εγκαταστάσεων. Ο δείκτης i υποδηλώνει μεγέθη της i -οστής εγκατάστασης.

3.1.3.2 Κανονική λειτουργία

Όπως και για τους χειρισμούς, έτσι και για την κανονική λειτουργία της εγκατάστασης, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι οι εκπομπές flicker διατηρούνται εντός των τιθέμενων ορίων που δείχνουν οι σχέσεις (3.1.9), (3.1.10). Ο υπολογισμός των δεικτών P_{st} , P_{lt} γίνεται με τη βοήθεια του συντελεστή flicker $c(\psi_k)$ κανονικής λειτουργίας, ο οποίος δίνεται στο πιστοποιητικό δοκιμών [4]. Για μια εγκατάσταση:

$$P_{st} = P_{lt} = c(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (3.1.18)$$

Για πολλές εγκαταστάσεις, ο συνολικός δείκτης flicker δίνεται με τετραγωνική άθροιση από τη σχέση:

$$P_{st\Sigma} = P_{lt\Sigma} = \frac{1}{S_k} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}} (c_i(\psi_k, v_a) \cdot S_{n,i})^2} \quad (3.1.19)$$

3.1.4 Εκπομπές αρμονικών

Η διάταξη BESS όπως και άλλες εγκαταστάσεις (Α/Γ μεταβλητών στροφών) διαθέτουν μετατροπείς ισχύος, καθιστώντας αναγκαίο τον έλεγχο και περιορισμό των εκπομπών αρμονικών από αυτές. Η προσέγγιση η οποία ακολουθείται είναι αυτή των σχετικών προτύπων της IEC, με σημαντικότερο το 61000-3-6 [7], για δίκτυα MT και YT, η οποία περιλαμβάνει 3 βασικά στάδια:

i) Καθορισμός των αποδεκτών ορίων αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης του δικτύου: Υιοθετούνται τα όρια σχεδιασμού της IEC.

ii) Επιμερισμός τους στις διάφορες εγκαταστάσεις που συνδέονται στα δίκτυα: Ακολουθείται η ίδια προσέγγιση με αυτή της Παραγράφου 3.1.3 για τον επιμερισμό των ορίων flicker. Η άθροιση όμως των αρμονικών προερχόμενων από διαφορετικές πηγές δεν είναι κυβική, όπως στις σχέσεις (3.1.11) - (3.1.13), αλλά εξαρτάται από την τάξη τους. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC, ο χρησιμοποιούμενος εκθέτης άθροισης είναι $a=1$ για αρμονικές τάξης $h < 5$ (πλήρως συσχετισμένες), $a=1.4$ για $5 \leq h \leq 10$ (μερικώς συσχετισμένες) και $a=2$ για $h > 10$ (ασυσχετίστες).

iii) Προσδιορισμός ορίων αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος εξόδου κάθε εγκατάστασης: Η αρμονική παραμόρφωση της τάσης στο ΣΚΣ συνδέεται με την παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου της εγκατάστασης μέσω της σχέσης:

$$U_{h,i} = Z_h \cdot I_{h,i} \quad (3.1.20)$$

όπου U_{hi} και I_{hi} είναι οι αρμονικές τάξης h της τάσης και του ρεύματος και Z_h η αρμονική σύνθετη αντίσταση του δικτύου στη συχνότητα $h \cdot f_1$ (f_1 η θεμελιώδης συχνότητα των 50 Hz). Η ίδια σχέση συνδέει και τα σχετικά όρια αρμονικής παραμόρφωσης.

Σε αντίθεση με τα δίκτυα ΧΤ, όπου το πρότυπο IEC 725 [6] ορίζει μια τυποποιημένη σύνθετη αντίσταση γενικής εφαρμογής, για δίκτυα ΜΤ και ΥΤ η Z_h πρέπει να υπολογίζεται κατά περίπτωση. Η απαίτηση αυτή καθιστά την όλη διαδικασία αρκετά πολύπλοκη και κατάλληλη για ειδικές περιπτώσεις εξέτασης.

Μια απλουστευμένη μέθοδος ελέγχου της τήρησης των ορίων αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης βασίζεται στην παρακάτω σχέση για τις αρμονικές συνιστώσες (τάξης $h \leq 40$) του ρεύματος εξόδου[4,6]:

$$I_h \leq L_h \cdot S_k \cdot \frac{S_A}{S_t} \quad (3.1.21)$$

όπου I_h η αρμονική συνιστώσα τάξης h του ρεύματος εξόδου (A), L_h το ανηγμένο όριο εκπομπών αρμονικών ρεύματος (A/MVA) από τον Πίνακα 3-3, S_k η ισχύς βραχυκυκλώσεως (MVA) στο ΣΚΣ, S_A η ονομαστική φαινομένη ισχύς της εγκατάστασης και S_t η συνολική ισχύς εγκαταστάσεων που συνδέονται (ή αναμένεται να συνδεθούν) στο δίκτυο ΜΤ και οι οποίες προκαλούν αρμονική παραμόρφωση. Εάν η εγκατάσταση παραγωγής περιλαμβάνει περισσότερες της μιας μονάδες, τότε το ρεύμα I_h της σχέσης (3.1.21) είναι το συνολικό αρμονικό ρεύμα εξόδου τάξης h της εγκατάστασης και προκύπτει από τις αρμονικές εντάσεις των επιμέρους μονάδων (αθροίζονται όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο (ii)).

Πίνακας 3-3: Ανηγμένα όρια αρμονικών ρεύματος ανά MVA βραχυκυκλώσεως

Τάξη h	Ανηγμένο όριο εκπομπών αρμονικών του ρεύματος, L_h , (A/MVA)	
	Δίκτυο 15 kV	Δίκτυο 20 kV
3	0.070	0.050
5	0.080	0.060
7	0.053	0.040
9	0.010	0.008
11	0.033	0.025
13	0.023	0.017
17	0.013	0.010
19	0.011	0.008
23	0.007	0.005
25	0.005	0.004
h άρτιος ή $h=15,21$ ή $h>25$	0.04/ h	0.03/ h

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για άλλες ονομαστικές τάσεις δικτύου τα όρια υπολογίζονται κατ' αντίστροφη αναλογία προς την τάση.

Αναλυτικότερες μέθοδοι υπολογισμού των αρμονικών μπορούν να αναζητηθούν στην βιβλιογραφία [1-7], [10].

Επιπλέον ένα διεθνώς αναγνωρισμένο μέτρο για την ποιότητα ισχύος καθορίζεται από τον συντελεστή Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion – THD) . Όσο μεγαλύτερος είναι ο THD, τόσο μικρότερη είναι η ποιότητα ισχύος. Το THD μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.1.22.

$$THD\% = \sqrt{\frac{\sum \text{όλων των τετραγώνων όλων των παρασιτικών αρμονικών}}{\text{Τετράγωνο πλάτους θεμελιώδους αρμονικής}}} \times 100\% \quad (3.1.22)$$

Για παράδειγμα θα δώσουμε τον τρόπο υπολογισμού του THD της τάσης και του ρεύματος:

$$THD_V \% = \sqrt{\frac{\sum_{\forall n \neq 1}^{\infty} (\hat{V}_{O,n})^2}{\hat{V}_{O,1}^2}} \times 100\% \quad (3.1.23)$$

$$THD_I \% = \sqrt{\frac{\sum_{\forall n \neq 1}^{\infty} (\hat{I}_{O,n})^2}{\hat{I}_{O,1}^2}} \times 100\% \quad (3.1.24)$$

Φυσικά αν μια κυματομορφή δεν περιέχει αρμονικές τότε το THD είναι 0.

3.2 Στρατηγική λειτουργίας συστήματος BESS

Στο κεφάλαιο αυτό θα καθορίσουμε την πολιτική φόρτισης - εκφόρτισης των συσσωρευτών καθώς και τη λειτουργία του συστήματος σε εφαρμογές εξομάλυνσης φορτίου και αποκοπής αιχμών.

3.2.1 Στόχοι και απαιτήσεις από το σύστημα BESS

Βασικά ζητούμενα κατά τη φάση σχεδιασμού του συστήματος ελέγχου της προτεινόμενης διάταξης αποθήκευσης ενέργειας BESS είναι η προσαρμοστικότητα, η προγνωστικότητα, η ευστάθεια και η ευελιξία.

Το σύστημα προτείνεται κυρίως για εγκατάσταση σε νησιά του Αιγαίου, τα οποία μπορεί να μην είναι διασυνδεδεμένα στο ηπειρωτικό δίκτυο και να έχουν αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, με έντονη διείσδυση ΑΠΕ και μεγάλη διακύμανση των καμπυλών φορτίου σε ημερήσια και κυρίως ετήσια βάση λόγω των τουριστικών δραστηριοτήτων. Είναι συνεπώς απαραίτητο, ο αλγόριθμος ελέγχου να λαμβάνει υπόψη του τα χαρακτηριστικά του μικροδικτύου στο οποίο συνδέεται το BESS και να προσαρμόζει τη στρατηγική του σύμφωνα με αυτά.

Επίσης, εφόσον το σύστημα πρόκειται να εφαρμοστεί σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας με παραγωγή που εμφανίζει έντονη στοχαστικότητα, κυρίως λόγω της διείσδυσης ΑΠΕ, το σύστημα ελέγχου θα πρέπει να εμφανίζει προγνωστικότητα ώστε αφ'ενός να αξιοποιεί βέλτιστα την παραγωγή από ΑΠΕ (φόρτιση συσσωρευτών σε

συνθήκες ελάχιστης ζήτησης) και αφετέρου να τροφοδοτεί αιχμές του φορτίου (εκφόρτιση συσσωρευτών σε συνθήκες μέγιστης ζήτησης), επιτρέποντας περαιτέρω μείωση του κόστους της ενέργειας.

Ακόμη, το εγκατεστημένο σύστημα θα πρέπει να συμβάλλει στην πρωτεύουσα ρύθμιση τάσεως και συχνότητας του δικτύου, ώστε να ενισχύει την ευστάθειά του, ιδιαίτερα κατά την εκδήλωση σφαλμάτων ή έντονων μεταβολών του φορτίου. Συνεπώς, θα πρέπει να εμφανίζει ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε σφάλμα δικτύου (Fault Ride Through), ώστε να παραμένει συνδεδεμένο κατά τη διάρκεια έντονων μεταβατικών φαινομένων.

Επιπλέον, ο αλγόριθμος ελέγχου θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη περιορισμούς στο ρυθμό και στη συχνότητα φόρτισης των συσσωρευτών σε συνδυασμό με τα προφανή όρια φόρτισης του συστήματος συσσωρευτών και αντιστροφέα, ώστε να εξασφαλίζεται η διάρκεια ζωής του συστήματος, που το καθιστά οικονομικά συμφέρουσα επένδυση. Παράλληλα, ένα εστιασμένο σύστημα προστασίας θα πρέπει να επιτηρεί το σύστημα και να ενεργοποιεί κατάλληλες προστασίες σε περίπτωση αστοχίας.

Για την ικανοποίηση όλων αυτών των σύνθετων προδιαγραφών, είναι απαραίτητη η πλήρης παραμετροποίηση του συστήματος ελέγχου. Οι τιμές των παραμέτρων θα ελέγχονται από το σύστημα σε πραγματικό χρόνο. Για αυτό το σκοπό είναι απαραίτητη η εγκατάσταση συστημάτων SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) σε κατάλληλα σημεία του δικτύου. Ιδιαίτερα κομβικής σημασίας είναι η επιτήρηση της συνολικής παραγωγής από Α/Γ, είτε με απευθείας μετρήσεις από RTU (Remote Terminal Unit) είτε με χρήση τεχνολογιών όπως η BPL (Broadband over Power Line). Δεδομένα από την τηλεεπιτήρηση του συστήματος θα αποστέλλονται μέσω κατάλληλου τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού στο σύστημα ελέγχου του BESS, το οποίο συνδυάζοντας μετρήσεις, προγνωστικά μοντέλα και αποθηκευμένες χαρακτηριστικές των συνιστωσών του δικτύου θα τροποποιεί τη στρατηγική του ελέγχου, ώστε να κατανέμει το φορτίο μεταξύ σταθμών βάσης, Α/Π, Φ/Β και BESS.

3.2.2 Στρατηγική φόρτισης / εκφόρτισης των συσσωρευτών

Το σχήμα 3.5 δείχνει ένα τυπικό σύστημα παραγωγής ενός μικρού αυτόνομου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο έχει εγκατασταθεί και μία διάταξη αποθήκευσης σε συσσωρευτές. Οι βασικές συνιστώσες του συστήματος είναι οι συμβατικοί σταθμοί diesel, το αιολικό και το φωτοβολταϊκό πάρκο. Ακολουθεί ανάλυση των βασικών συνιστωσών του συστήματος:

- **Συμβατικοί σταθμοί Diesel**

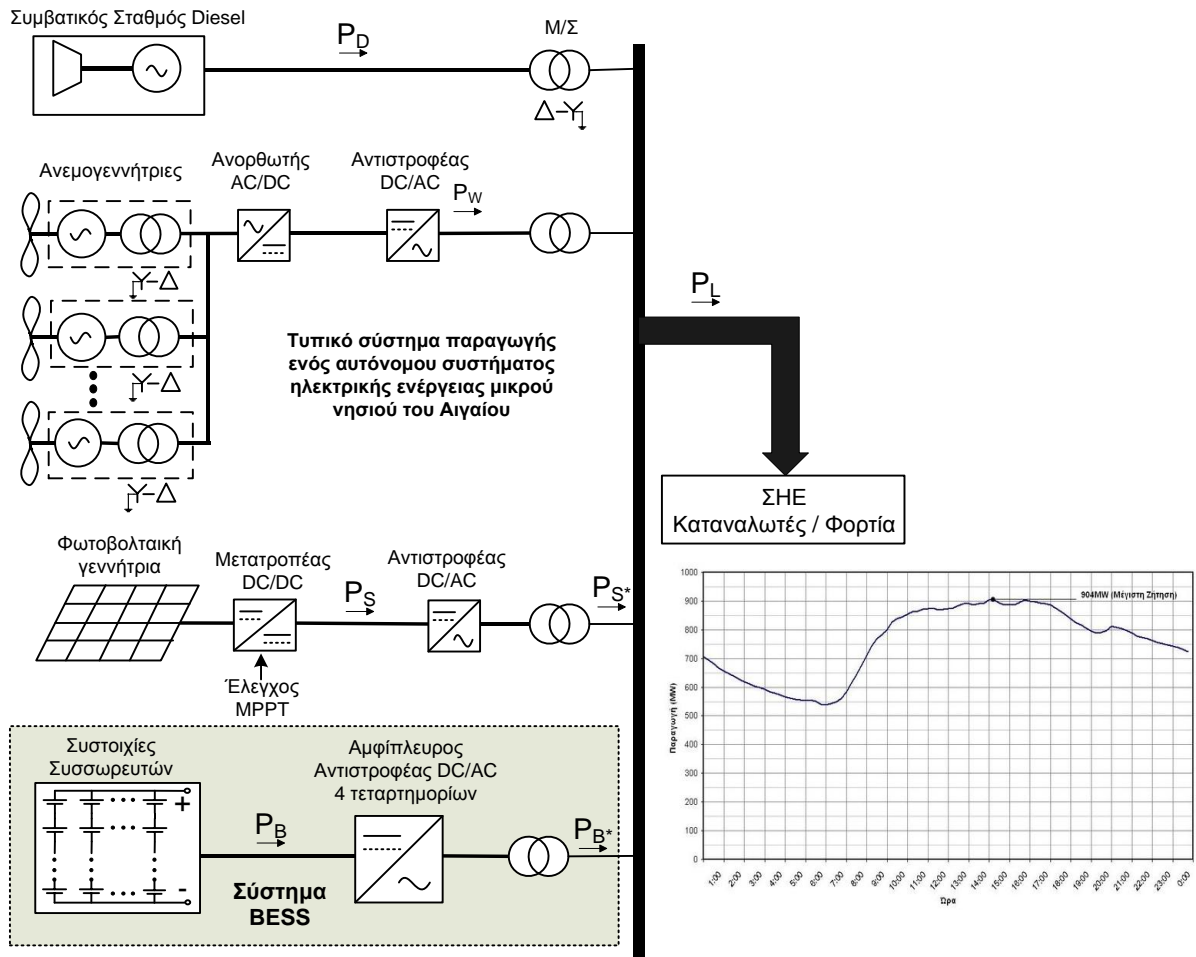
Έστω ότι το σύστημα αποτελείται από N_D σταθμούς. Το κόστος παραγωγής του i -οστού σταθμού περιγράφεται από μια γραμμική συνάρτηση κόστους:

$$F_i(P_{Di}) = \begin{cases} NLC_i + IC_i P_{Di}, & P_{Di_low} \leq P_{Di} \leq P_{Di_high} \\ 0, & P_{Di} = 0 \end{cases} \quad (3.2.1)$$

όπου NLC : No Load cost (Κόστος άνευ φορτίου) και IC : Incremental cost (Αυξητικό κόστος). Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί και ως εξής [8] :

$$P_{Di} \cdot foc_i + (voc_i + fc) \cdot q = \left[\frac{foc_i}{h} + (voc_i + fc) \right] \cdot q \quad (3.2.2)$$

όπου foc είναι το σταθερό κόστος λειτουργίας σε €/kWh, voc το μεταβλητό κόστος λειτουργίας σε €/kWh, fc το κόστος καυσίμου σε €/kWh, q η ετήσια παραγωγή σε kWh και h οι ετήσιες ώρες λειτουργίας.



Σχήμα 3.5: Τυπικό σύστημα παραγωγής ενός αυτόνομου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μικρού νησιού του Αιγαίου

Η έξοδος του σταθμού diesel P_D κατά τη διάρκεια της ώρας t είναι:

$$P_D(t) = \sum_{i=1}^{N_D} P_{Di}(t) \quad (3.2.3)$$

όπου

$$P_{Di_min} \leq P_{Di}(t) \leq P_{Di_max} \quad (3.2.4)$$

εάν η i -οστή μονάδα είναι δεσμευμένη και $P_{Di} = 0$ αν δεν είναι δεσμευμένη (δεν παράγει)

Η ισχύς που ο σταθμός diesel πρέπει να παρέχει κάθε στιγμή ισούται με την ισχύ του φορτίου μείον την ισχύ λόγω των σταθμών Α/Γ, Φ/Β και BESS.

Οι συμβατικές μονάδες diesel δεν επιτρέπεται να λειτουργούν κάτω από ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ονομαστικής ισχύος τους κυρίως για λόγους φθοράς, αυξημένων αναγκών συντήρησης, μειωμένης απόδοσης και αντιοικονομικής συμπεριφοράς [10]. Έτσι τίθεται ο ακόλουθος περιορισμός μαζί με τη σχέση (3.2.4):

$$P_{Dmin} = c_T \cdot P_{Dn} \quad (3.2.5)$$

όπου P_{Dmin} το τεχνικό ελάχιστο και c_T ο συντελεστής τεχνικού ελαχίστου, ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος της μονάδας. Τιμές που χρησιμοποιούνται γενικά είναι 40% - 60%. Αυτός ο περιορισμός είναι γενικά γνωστός ως περιορισμός ελάχιστης ισχύος εξόδου των σταθμών diesel. Ο σταθμός diesel ελέγχει επίσης την τάση και τη συχνότητα του συστήματος.

- **Αιολικό πάρκο**

Η διαθέσιμη ισχύς εξόδου P_W του αιολικού πάρκου είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου $w(t)$ κατά τη διάρκεια αυτής της ώρας :

$$P_w(t) = g_w(w(t)) \quad (3.2.6)$$

Για μέγιστη εξοικονόμηση καυσίμου όλη η διαθέσιμη ισχύς του αιολικού πάρκου πρέπει να αξιοποιείται είτε συνεισφέροντας στο φορτίο είτε φορτίζοντας τις συσσωρευτές του BESS. Ωστόσο λόγω του περιορισμού του τεχνικού ελαχίστου, ορισμένη αιολική ισχύς θα χαθεί. Εάν P_L η ισχύς του φορτίου, τότε το ισοζύγιο ισχύος(χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη το BESS) επιβάλλει:

$$P_D = P_L - P_W \quad (3.2.7)$$

οπότε ο περιορισμός τεχνικού ελαχίστου οδηγεί σε αντίστοιχο περιορισμό αιολικής διείσδυσης [9]:

$$P_D \geq P_{D\min} \Rightarrow P_W \leq P_L - c_T P_{Dn} = P_{W\max.T} \quad (3.2.8)$$

Επιπλέον για λόγους στρεφόμενης εφεδρείας (για την κάλυψη ενδεχόμενης απώλειας αιολικής παραγωγής συνεπάγεται τον ακόλουθο περιορισμό στη μέγιστη δυνατότητα απορρόφησης αιολικής ισχύος:

$$P_{Dn} \geq P_L \Rightarrow P_{W\max.T \leq} (1 - c_T) \cdot P_L \quad (3.2.9)$$

Βέβαια, για να αποφευχθούν μεταβολές στη συχνότητα των αυτόνομων συστημάτων, τέτοιες που δε θα μπορούν να καλυφθούν από τους ρυθμιστές στροφών, εισάγονται και δυναμικοί περιορισμοί ως:

$$P_W \leq c_D \cdot P_{Dn} = P_{W\max,D} \quad (3.2.10)$$

όπου c_D ο συντελεστής μέγιστης διείσδυσης αιολικής ισχύος.

Ο συνολικός περιορισμός προκύπτει από τις σχέσεις (3.2.8) και (3.2.10) ως:

$$P_W \leq P_{W\max} = \min \{ P_{W\max.T}, P_{W\max.D} \} \quad (3.2.11)$$

- **Φωτοβολταϊκό πάρκο**

Η διαθέσιμη ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού πάρκου κατά τη διάρκεια της ώρας t είναι αντίστοιχα μια συνάρτηση του γενικού βαθμού ηλιοφάνειας $s(t)$, ενώ ισχύει αντίστοιχα:

$$P_S(t) = g_S(s(t)) \quad (3.2.12)$$

$$P_S \leq P_{S\max} \quad (3.2.13)$$

λόγω των τεχνικών ελαχίστων των σταθμών diesel. Τα φωτοβολταϊκά panel είναι συνδεδεμένα μέσω ενός DC/DC μετατροπέα (που ελέγχεται από το σύστημα που υλοποιεί κατάλληλο αλγόριθμο MPPT (Maximum Power Point Tracking) στον αντιστροφέα και στη συνέχεια στο δίκτυο. Συνήθης είναι η προσθήκη συσσωρευτών στο DC μέρος του Φ/Π, ωστόσο εδώ μπορούν να παραληφθούν λόγω της ύπαρξης σταθμού BESS που εξυπηρετεί τις ανάγκες του συνολικού συστήματος.

- **BESS:**

Έστω $V_{B\min}$ και $V_{B\max}$ τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών (μέγιστη και ελάχιστη χωρητικότητα συσσωρευτών – SOC_levels). Η ενέργεια που κάθε στιγμή είναι αποθηκευμένη στις συσσωρευτές πρέπει να ικανοποιεί την ανισότητα:

$$V_{B\min} \leq V_B(t) \leq V_{B\max} \quad (3.2.14)$$

Οι συσσωρευτές μπορούν να φορτιστούν από οποιαδήποτε συνιστώσα που παράγει ισχύ στο δίκτυο (diesel, A/Γ, Φ/Π). Η απόδοση των συσσωρευτών κατά τη φόρτιση και τα επίπεδα φόρτισης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τον αλγόριθμο βέλτιστης οικονομικής κατανομής. Το ισοζύγιο ενέργειας στις συσσωρευτές κατά τη διάρκεια της ώρας t περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$V_B(t+1) = V_B(t) - \eta_B P_B(t), \alpha \nu \quad P_B(t) < 0 \quad (3.2.15\alpha)$$

$$V_B(t+1) = V_B(t) - P_B(t), \alpha \nu \quad P_B(t) > 0 \quad (3.2.15\beta)$$

$$-P_B(t) \leq P_{BC}, \alpha \nu \quad P_B(t) < 0 \quad (3.2.16\alpha)$$

$$P_B(t) \leq P_{BD}, \alpha \nu \quad P_B(t) > 0 \quad (3.2.16\beta)$$

όπου οι συσσωρευτές φορτίζονται για $P_B < 0$ και εκφορτίζονται για $P_B > 0$. Ακόμα P_{BC}, P_{BD} είναι ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών αντίστοιχα. Το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών στην αρχή και το τέλος της μέρας είναι επίσης καθορισμένο.

$$V_B(0) = V_{B0} \quad (3.2.17\alpha)$$

$$V_B(T) = V_{BT} \quad (3.2.18\beta)$$

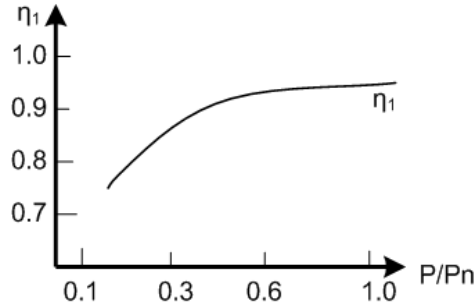
- **Αντιστροφέας**

Το φ/β πάρκο, οι A/Γ και το σύστημα BESS συνδέονται στο δίκτυο μέσω αντιστροφέα αντιστροφέων και μετασχηματιστών ανύψωσης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5. Ο αντιστροφέας, ο οποίος προφανώς επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ισχύος, είναι αυτός που ελέγχει τη ροή ισχύος P_S, P_B μεταξύ εγκαταστάσεων και δικτύου (σύμβαση προσήμου: $P > 0 \rightarrow$ Ροή ισχύος προς το δίκτυο). Εάν η απόδοση του αντιστροφέα είναι η , ενώ ο Μ/Σ θεωρηθεί ιδανικός, οι ακόλουθες σχέσεις περιγράφουν το ισοζύγιο ισχύος στον αντιστροφέα [11]:

$$P_{S'} = \eta_1 \cdot P_S \quad P_S > 0 \quad (3.2.19\alpha)$$

$$P_{S'} = \frac{1}{\eta_1} \cdot P_S \quad P_{S'} < 0 \quad (3.2.19\beta)$$

Η απόδοση του αντιστροφέα είναι συνάρτηση της ισχύος εξόδου του και φαίνεται στο σχήμα 3.6



Σχήμα 3.6: Χαρακτηριστική καμπύλη απόδοσης αντιστροφέα συναρτήσει της ισχύος εξόδου

Επομένως για τη λειτουργία του συστήματος, κάθε φορά πρέπει να ισχύει το ισοζύγιο παραγωγής ζήτησης.

- Σε περιόδους χαμηλού φορτίου και υψηλής παραγωγής από ΑΠΕ, η επιπλέον παραγόμενη ενέργεια πρέπει να αποθηκεύεται στις συσσωρευτές του συστήματος BESS. Συνεπώς αν κάτω από αυτές τις συνθήκες οι συσσωρευτές είναι φορτισμένες πλήρως, χάνεται η επιπλέον ενέργεια.

- Όλη η διαθέσιμη ισχύς του αιολικού πάρκου πρέπει να αξιοποιείται είτε συνεισφέροντας στο φορτίο είτε φορτίζοντας τους συσσωρευτές του BESS.

Αρχικά αν P_L είναι το φορτίο τότε θα πρέπει $P_D \geq P_L$, όπου δεσμεύονται n μονάδες που λειτουργούν σε ονομαστική ισχύ ώστε να καλύπτουν το φορτίο. Συνοπτικά το ισοζύγιο αυτό μπορεί να διατυπωθεί ως εξής (θεωρείται $P_D \geq P_{D_min}$ για κάθε μονάδα diesel):

Αν $P_W + P_S \neq 0$ τότε $P_D = P_L - (P_W + P_S)$

Αν $P_D > \sum P_{D_min}$, τότε

αν η μπαταρία είναι φορτισμένη ($SOC_level > SOC_lower$) τότε:

δίνω P_B τέτοια ώστε:

αν $P_W + P_S < P_{wmax}$ τότε $P_D = P_L - (P_W + P_S) - P_B$ όσο

$P_D \geq \sum P_{D_min}$ και $SOC_level \geq SOC_lower$

αλλιώς αν $P_W + P_S > P_{wmax}$ τότε $P_D = P_L - (P_{wmax}) - P_B$ όσο

$P_D \geq \sum P_{D_min}$ και $SOC_level \geq SOC_lower$

Στη συνέχεια το φορτίο P_D κατανέμεται στις μονάδες που έχουν αρχικά δεσμευτεί σύμφωνα με το ωριαίο κόστος τους.

αν η μπαταρία είναι αφόρτιστη ($SOC_level < SOC_upper$) τότε :

αν $P_W + P_S > P_{wmax}$ τότε $P_D = P_L - (P_{wmax})$ και

$P_B = P_{wmax} - (P_W + P_S)$ όσο ($SOC_level < SOC_upper$)

Στη συνέχεια το φορτίο P_D κατανέμεται στις μονάδες που έχουν αρχικά δεσμευτεί σύμφωνα με το ωριαίο κόστος τους.

Αλλιώς αν $P_w + P_\varphi < P_{wmax}$ τότε $P_D = P_L - (P_w + P_s)$ και αφού γίνει οικονομική κατανομή μεταξύ των μονάδων φόρτισε με P_B ίση με την υπόλοιπη ισχύ που οι σταθμοί Diesel μπορούν να δώσουν όσο ($SOC_level < SOC_upper$)

Αν $P_D < \sum P_{D_min}$ ή $P_D < 0$, τότε

αν η μπαταρία είναι φορτισμένη ($SOC_level > SOC_lower$) τότε:

αν $P_{wmax} = P_{wmax_T}$ τότε $P_B = 0$ και $P_D = P_L - (P_{wmax})$

και κάθε μονάδα που έχει δεσμευτεί λειτουργεί στο τεχνικό ελάχιστο .

αλλιώς αν $P_{wmax} = P_{wmax_D}$ τότε δίνω P_B τέτοια

ώστε $P_D = P_L - (P_{wmax}) - P_B$ όσο

[$SOC_level > SOC_lower$ και $P_D \geq \sum P_{D_min}$]

Στη συνέχεια το φορτίο P_D κατανέμεται στις μονάδες που έχουν αρχικά δεσμευτεί σύμφωνα με το ωριαίο κόστος τους.

αν η μπαταρία είναι αφόρτιστη ($SOC_level < SOC_upper$) τότε

$P_D = P_L - (P_{wmax})$ και $P_B = P_{wmax} - (P_w + P_s)$ όσο

($SOC_level < SOC_upper$)

Στη συνέχεια το φορτίο P_D κατανέμεται στις μονάδες που έχουν αρχικά δεσμευτεί σύμφωνα με το ωριαίο κόστος τους.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

<<Δοθέντος της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης (επόμενες 24 ώρες) και της τυπικής διακύμανσης της μέσης τιμής

1. της ωριαίας ζήτησης φορτίου $L(t)$, $\sigma(t)$
2. της ωριαίας ταχύτητας ανέμου $w(t)$, $\sigma_w(t)$
3. της ωριαίας έντασης ηλιοφάνειας $s(t)$, $\sigma_s(t)$

να καθοριστούν :

1. ο προγραμματισμός των σταθμών diesel
2. η ωριαία πολιτική αποθήκευσης του συστήματος

ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος παραγωγής (κόστος καυσίμου σταθμών diesel το επόμενο διάστημα προγραμματισμού (24ωρο)>>

Πρόκειται για ένα πρόβλημα δυναμικής βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση (συνάρτηση κόστους) το συνολικό κόστος των σταθμών diesel κατά τη διάρκεια της περιόδου προγραμματισμού:

$$F_T = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^{N_D} F_i(P_{Di}(t)) \right] \quad (3.2.20)$$

Όσον αφορά το σύστημα BESS, η επίλυση του ανωτέρου προβλήματος καθορίζει τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών που θα πρέπει να τηρηθούν κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπως και το πρόγραμμα ροής ενεργού και άεργου ισχύος που θα πρέπει να ακολουθηθεί.

Στις δημοσιεύσεις [13] – [16] δίνονται μέθοδοι επίλυσης τέτοιων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Εδώ αξίζει να σημειωθούν τα βασικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της επίλυσεως:

- Η εκφόρτιση των συσσωρευτών λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια αιχμών φορτίου όταν αυτό βοηθά στην αποφυγή της ένταξης επιπλέον μονάδας diesel.
- Η φόρτιση των συσσωρευτών λαμβάνει χώρα μόνο εφόσον δεν απαιτείται η δέσμευση επιπλέον μονάδας diesel για αυτό το σκοπό, συνεπώς με αξιοποίηση της αιολικής και φωτοβολταϊκής παραγωγής, όπως και της επιπλέον ισχύος που οι ενταγμένοι σταθμοί diesel μπορούν να αποδώσουν.
- Η βέλτιστη πολιτική αποθήκευσης των συσσωρευτών για το διάστημα προγραμματισμού μπορεί να αποθηκευτεί στη μνήμη των μικροεπεξεργαστών του συστήματος με τη μορφή Look-up tables.

• **Σχεδίαση με βάση την αντιμετώπιση του προβλήματος εξομάλυνσης φορτίου και αιχμών**

Όπως παρατηρήσαμε και στην εισαγωγή, στο ΣΗΕ είναι επιθυμητό η ημερήσια καμπύλη φορτίου να παρουσιάζει όσο το δυνατόν λιγότερες αιχμές και γενικά να είναι επίπεδη ώστε αυτά να προσαρμόζονται στη βέλτιστη οικονομική λειτουργία των εγκατεστημένων χωρητικότητας παραγωγής, που λειτουργεί σε φτηνότερη και ποιοτικότερη ενέργεια [14,16,19]. Έτσι η μέθοδος που εφαρμόζει το σύστημα BESS είναι να αποθηκεύει ενέργεια όταν η ζήτηση είναι μικρή και να εγχέει πίσω την αποθηκευμένη ενέργεια στο δίκτυο κατά τη διάρκεια των αιχμών.

Το δασμολογικό σύστημα παίζει αποφασιστικό ρόλο όταν αξιολογείται η οικονομική ζωτικότητα του BESS για την εξομάλυνση των αιχμών. Οικονομικά οφέλη παράγονται με δύο τρόπους:

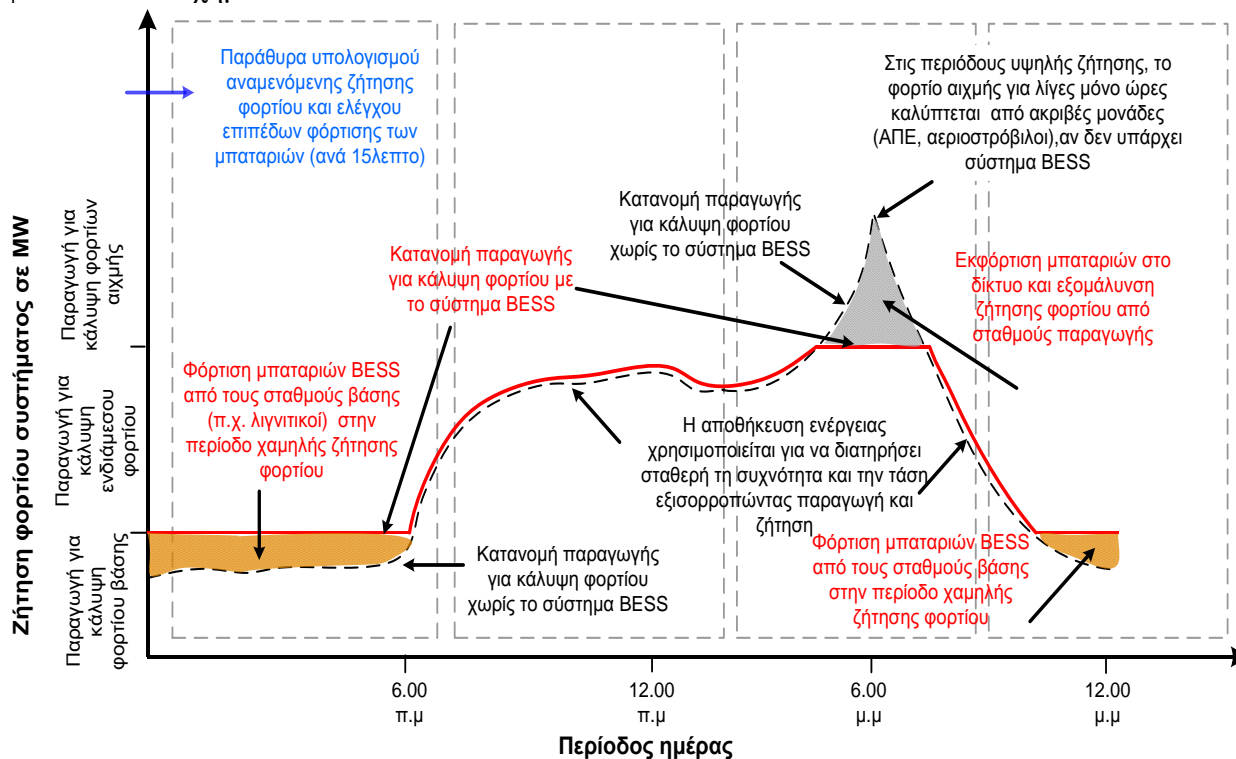
- i) Πρώτον, από τη μείωση της ισχύος αιχμής και
- ii) Δεύτερον, κέρδος από το κόστος της περισσότερο ακριβής ενέργειας, δηλαδή από τη διαφορά μεταξύ της ενέργειας που θα είχε χρεωθεί σύμφωνα με το ακριβό δασμολόγιο

κατά τις αιχμές, από την ενέργεια που αυτή αντικαθίσταται, δηλαδή τη φτηνή αποθηκευμένη ενέργεια, που έχει χρεωθεί σύμφωνα με το χαμηλό δασμολόγιο.

Όταν καταναλώνεται λιγότερο ακριβή ηλεκτρική ισχύς, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η απόδοση του BESS εκτιμάται μεταξύ 75% - 85%. Σε αντίθεση με τις άλλες πηγές, ο χρόνος λειτουργίας του BESS είναι συνήθως περιορισμένος, αφού μπορεί να στείλει στο δίκτυο μόνο καθορισμένες ποσότητες ενέργειας κάθε φορά. Αυτό οδηγεί σε σύνθετο έλεγχο του BESS, ο οποίος θα πρέπει να γίνεται μέσω υπολογιστή. Έτσι ο αλγόριθμος θα πρέπει να επιτηρεί την κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος και στην περίπτωση υπέρβασης ενός ορίου να ενεργοποιεί το BESS για εκφόρτιση, ενώ στην περίπτωση μικρής κατανάλωσης να φορτίζει τις συσσωρευτές.

Ο αλγόριθμος αυτός αποτελείται από τρία στάδια: Το πρώτο, είναι υπεύθυνο για τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων καθώς και για την πρόβλεψη της κατανάλωσης σε διαστήματα 15 λεπτών. Εάν η αναμενόμενη κατανάλωση υπερβαίνει την επιθυμητή μέγιστη τιμή, τότε το δεύτερο μέρος του αλγορίθμου εκτελείται, ώστε να ελέγξει την παροχή ενέργειας από το BESS στο δίκτυο, αλλιώς ενεργοποιείται το τρίτο μέρος, το οποίο ελέγχει τη φόρτιση των συσσωρευτών. Σε όλη αυτή τη διαδικασία βέβαια, θα πρέπει να ελέγχονται τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών.

Η λειτουργία του συστήματος BESS για την εξομάλυνση αιχμών και φορτίου φαίνεται στο σχήμα 3.7



Σχήμα 3.7: Βέλτιστη λειτουργία φόρτισης και εκφόρτισης συστήματος BESS για την εξομάλυνση αιχμών και φορτίου παράλληλα με τη μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους.

Έτσι λοιπόν το σύστημα μπορεί να βρίσκεται στις εξής καταστάσεις λειτουργίας:

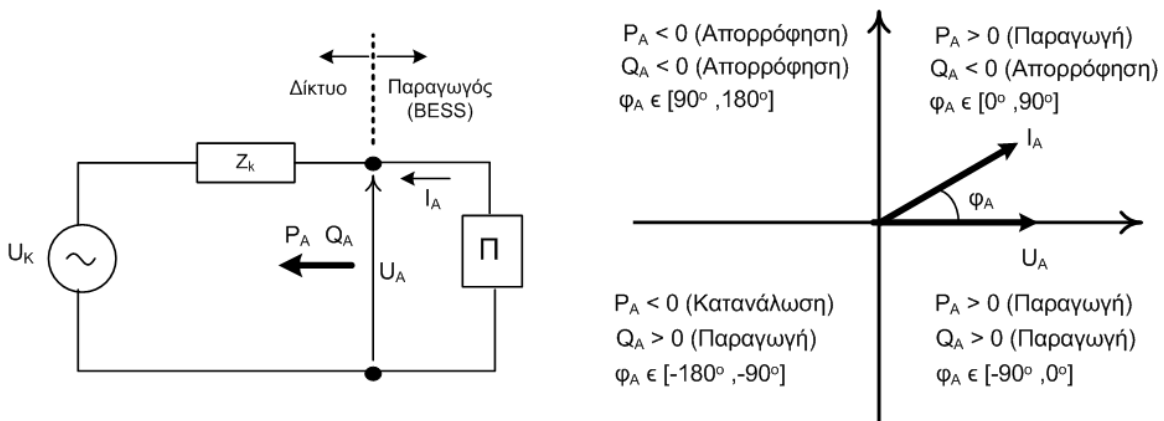
- **Φάση εκφόρτισης:** Το σύστημα βρίσκεται εντός των περιορισμών φόρτισης των συσσωρευτών (SOC_levels) και αποδίδει ενεργό ισχύ στο δίκτυο.
- **Φάση φόρτισης:** Το σύστημα βρίσκεται εντός των περιορισμών φόρτισης των συσσωρευτών (SOC_levels) και απορροφά ενεργό ισχύ από το δίκτυο.
- **Φάση παράκαμψης εντολής ενεργού ισχύος:** Το σύστημα παρακάμπτει την εντολή ενεργού ισχύος για να ικανοποιήσει τα όρια φόρτισης. Αυτή η φάση λειτουργίας έχει προγραμματιστεί για να επιτρέψει την απαιτούμενη προγνωστικότητα του ελέγχου. Αν και ο διαχειριστής ζητά ενεργό ισχύ, το σύστημα ελέγχου του BESS προτιμά να μην τη τροφοδοτήσει αλλά να διατηρήσει το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών του έτσι ώστε να τροφοδοτήσει την αμέσως επόμενη και μεγαλύτερη αιχμή φορτίου που προβλέπεται.

3.3 Διαχείριση και ροή ισχύος στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης (Point of Common Coupling - PCC)

Στο κεφάλαιο αυτό θα θεμελιώσουμε μαθηματικά και με διανυσματικά διαγράμματα τις βασικές αρχές ανταλλαγής ισχύος στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) μεταξύ του συστήματος BESS και του δικτύου, σύμφωνα με τις οποίες εξάγονται οι λειτουργικές καταστάσεις φόρτισης και εκφόρτισης του συστήματος.

3.3.1 Σύμβαση κατεύθυνσης της ροής ενεργού και άεργου ισχύος

Στο σχήμα 3.8 φαίνονται αντίστοιχα το σημείο στο οποίο διαχωρίζεται το δίκτυο από το σύστημα BESS. Παράλληλα διακρίνονται και οι συμβάσεις κατεύθυνσης ροής για την ενεργό και την άεργο ισχύ, το ρεύμα εξόδου των εγκαταστάσεων παραγωγής.



Σχήμα 3.8: Συμβάσεις για τον καθορισμό της φασικής γωνίας ϕ_A του ρεύματος εξόδου των εγκαταστάσεων παραγωγής, καθώς και για την ενεργό και άεργο ισχύ.

Η φασική γωνία ϕ_A του ρεύματος εξόδου της εγκατάστασης παραγωγής είναι η γωνία του μιγαδικού διανύσματος του ρεύματος ως προς αυτό της τάσης στην έξοδο της εγκατάστασης. Συμβατικά το ρεύμα θεωρείται εξερχόμενο από την εγκατάσταση

(σύμβαση γεννήτριας) και αντίστοιχα η ενεργός και η άεργος ισχύς είναι θετικές όταν παράγονται από την εγκατάσταση όπως δείχνει το σχήμα 3.8.

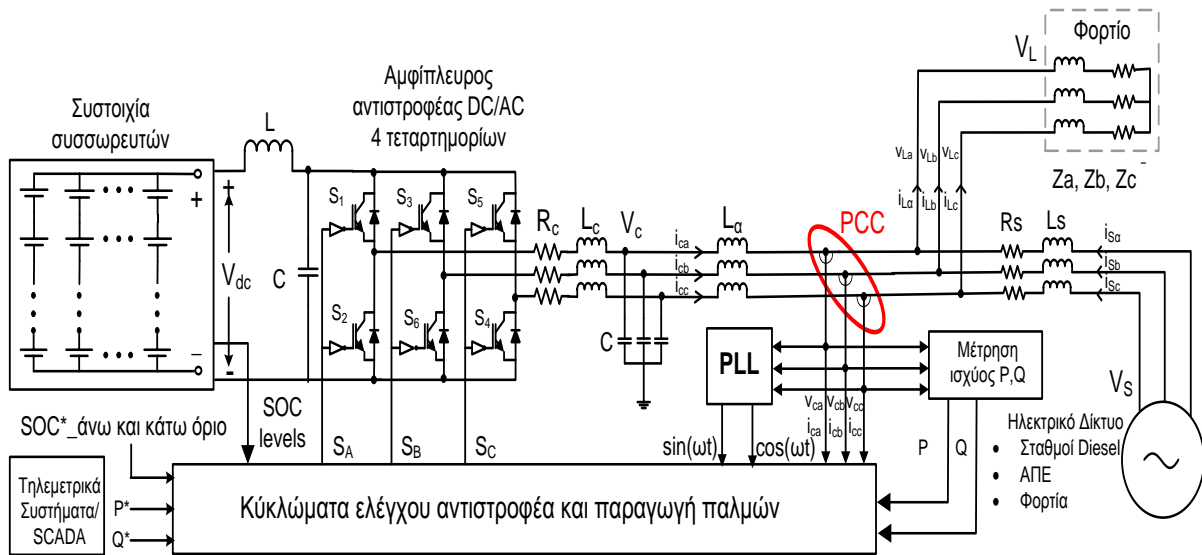
Αν P_A, Q_A είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς εξόδου, της εγκατάστασης παραγωγής, η τιμή της γωνίας φ_A δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi_A = \arctan\left(-\frac{Q_A}{P_A}\right) \tag{3.3.1}$$

Στο παραπάνω σχήμα διευκρινίζεται το διάστημα τιμών της φ_A ανάλογα με το αν η ενεργός ή η άεργος ισχύς παράγονται ή καταναλώνονται από την εγκατάσταση.

3.3.2 Σχηματικό διάγραμμα και ροή ισχύος στο PCC

Το σχηματικό διάγραμμα 3.9 δείχνει τη διασύνδεση του συστήματος BESS με το δίκτυο. Από τη μεριά του BESS περιλαμβάνει το σύστημα συσσωρευτών, τον αμφίπλευρο τριφασικό αντιστροφέα πηγής τάσης (VSI), φίλτρο εξόδου και αυτεπαγωγή διασύνδεσης. Το φίλτρο αποτελείται από αντίσταση R_c ισοδύναμη με τις απώλειες των ημιαγωγών IGBT του αντιστροφέα, αυτεπαγωγή L_c και χωρητικότητα C ανά φάση. Το τριφασικό δίκτυο περιλαμβάνει αντίσταση πηγής R_s και αυτεπαγωγή L_s ανά φάση, ενώ στο σημείο σύνδεσης έχει συνδεθεί συμμετρικό φορτίο σύνθετης αντίστασης Z . Ο αντιστροφέας συνδέεται με το δίκτυο μέσω μιας μικρής αυτεπαγωγής διασύνδεσης L_α .



Σχήμα 3.9: Σχηματικό διάγραμμα διασύνδεσης συστήματος BESS και δικτύου στο PCC και εισοδοί /έξοδοι κυκλώματος ελέγχου του αντιστροφέα.

Το σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) είναι μια σημαντική συνιστώσα για το σύστημα γιατί εκεί γίνονται οι μετρήσεις τάσεων και ρευμάτων από τις οποίες υπολογίζονται η ενεργός και η άεργος ισχύς, οι οποίες αποτελούν εισόδους για το

σύστημα ελέγχου [20]. Παράλληλα, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου δέχεται ως εισόδους τις τάσεις και τα ρεύματα στο PCC, τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών, τις εντολές ενεργού και άεργου ισχύος από τα συστήματα SCADA και τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών. Η δομή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου και η υλοποίηση του αναλύονται στο κεφάλαιο 4. Από το σημείο κοινής σύνδεσης δέχεται σήματα και ο βρόχος κλειδωμένης φάσης (Phase Locked Loop - PLL) ο οποίος παρέχει στο σύστημα ελέγχου φιλτραρισμένα σήματα ημιτόνου για το συγχρονισμό μεταξύ δικτύου και αντιστροφέα. Η δομή του PLL θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο αυτού του κεφαλαίου.

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε την ανταλλαγή ισχύος στο PCC για τις περιπτώσεις φόρτισης, εκφόρτισης και αδιάλειπτης λειτουργίας του συστήματος. Για να εξετάσουμε τις παραπάνω περιπτώσεις, θεωρούμε πως οι τάσεις του δικτύου $v_s(t)$ και τα ρεύματα του φορτίου $i_L(t)$ στις σχέσεις (3.3.2), (3.3.3) αποτελούνται από το γενικευμένο σύνολο αρμονικών συνιστωσών h , όπου $H = \{1,2,3,\dots,N\}$ και N είναι η μεγαλύτερη τάξη των αρμονικών.

$$v_s(t) = \begin{bmatrix} v_{Sa} = \sum_{h \in H} V_{Sha} \cdot \sin(h\omega t + a_{ha}) \\ v_{Sb} = \sum_{h \in H} V_{Shb} \cdot \sin(h(\omega t - 2\pi/3) + a_{hb}) \\ v_{Sc} = \sum_{h \in H} V_{Shc} \cdot \sin(h(\omega t + 2\pi/3) + a_{hc}) \end{bmatrix} \quad (3.3.2)$$

$$i_L(t) = \begin{bmatrix} i_{La} = \sum_{h \in H} I_{Lha} \cdot \sin(h\omega t + a_{ha} - \varphi_{ha}) \\ i_{Lb} = \sum_{h \in H} I_{Lhb} \cdot \sin(h(\omega t - 2\pi/3) + a_{hb} - \varphi_{hb}) \\ i_{Lc} = \sum_{h \in H} I_{Lhc} \cdot \sin(h(\omega t + 2\pi/3) + a_{hc} - \varphi_{hc}) \end{bmatrix} \quad (3.3.3)$$

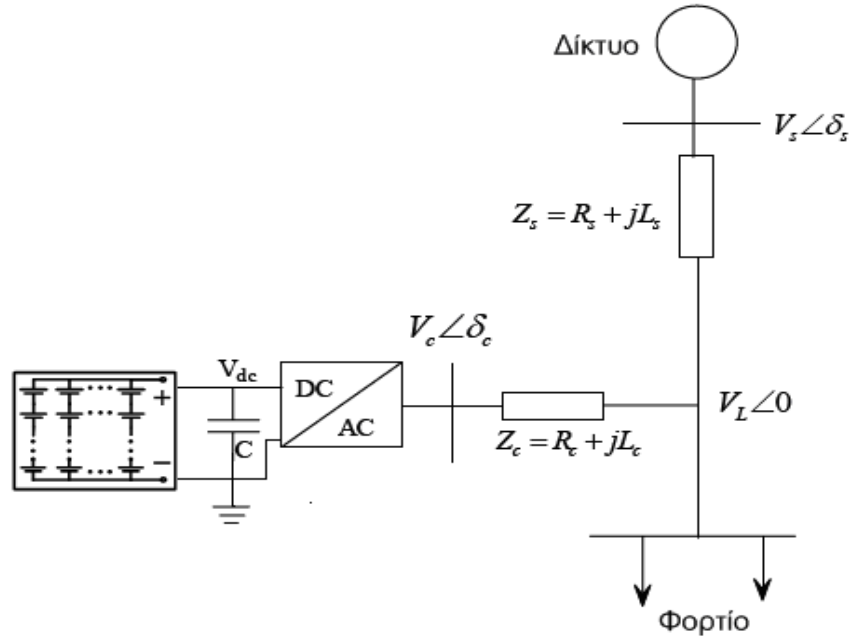
όπου $(V_{Sha}, V_{Shb}, V_{Shc})$ και $(I_{Lha}, I_{Lhb}, I_{Lhc})$ είναι οι μέγιστες τιμές των τάσεων δικτύου και ρευμάτων φορτίου αντίστοιχα, που αντιστοιχούν στις αρμονικές h τάξης ενώ τα $(\varphi_{ha}, \varphi_{hb}, \varphi_{hc})$ είναι οι τυχαίες γωνίες κάθε φάσης. Βέβαια το σύστημα θα μπορούσε να έχει θεωρηθεί και εντελώς συμμετρικό χωρίς καμιά επίπτωση στην ανάλυση. Οι τάσεις του δικτύου φιλτράρονται μέσω βαθυπερατών φίλτρων με συχνότητα αποκοπής τα 50Hz.

Στο σχήμα 3.10 φαίνεται το μονογραμμικό απλουστευμένο ισοδύναμο του προηγούμενου συστήματος. Η ενεργός και η άεργος ισχύς (P_{cp}, Q_{cp}) οι οποίες μεταφέρονται μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου δίνονται από τις σχέσεις:

$$P_{cp} = \frac{V_L \cdot V_C \cdot \sin \delta_c}{\omega L_c} \quad (3.3.4)$$

$$Q_{cq} = \frac{V_c}{\omega L} (V_c - V_L \cdot \cos(\delta_c)) \quad (3.3.5)$$

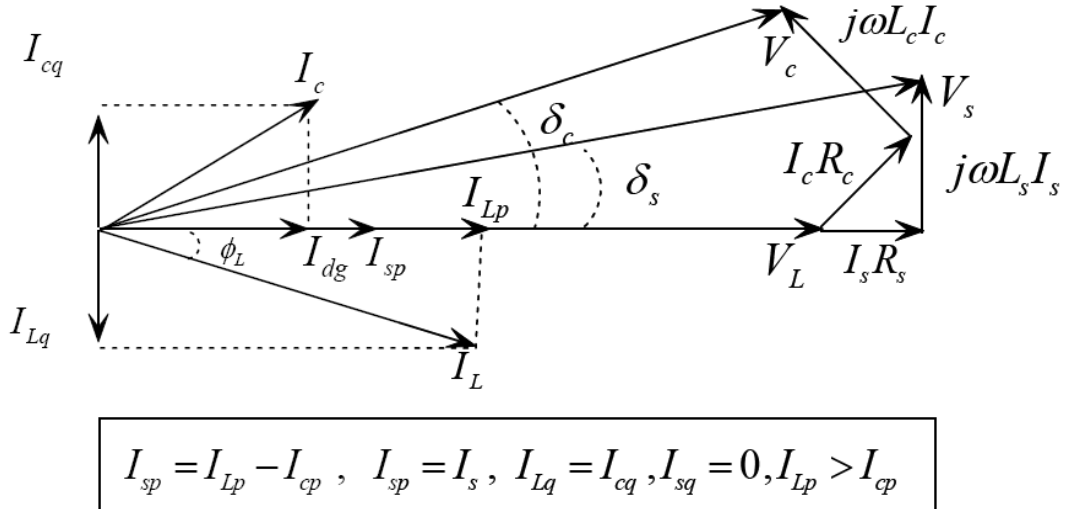
όπου V_L και V_c είναι οι τάσεις από την πλευρά του φορτίου και του αντιστροφέα, ενώ δ_c είναι η μεταξύ τους γωνία (θεωρούμε προσεγγιστικά $L_c + L_a \approx L_c$).



Σχήμα 3.10: Απλουστευμένο μονοφασικό ισοδύναμο διάγραμμα διασυνδεδεμένου συστήματος

Τα επόμενα διανυσματικά διαγράμματα δείχνουν τα διανύσματα των τάσεων και των ρευμάτων στις περιπτώσεις φόρτισης/ εκφόρτισης των συσσωρευτών καθώς και στην περίπτωσης αδιάλειπτης λειτουργίας του συστήματος. Σε αυτά, θεωρείται λειτουργία μοναδιαίου συντελεστή ισχύος του δικτύου κατά τη ροή ενεργού ισχύος. Με I_{SP}, I_{Lp}, I_{dg} συμβολίζονται τα θεμελιώδη ενεργά ρεύματα του δικτύου, του φορτίου και της εξόδου του αντιστροφέα, ενώ με V_s, V_L, V_c οι τάσεις του δικτύου, του φορτίου και της εξόδου του αντιστροφέα. Η γωνία Φ_L είναι η γωνία του συντελεστή ισχύος του φορτίου, η δ_s είναι η γωνία ισχύος μεταξύ της τάσης του δικτύου και της τάσης του φορτίου, ενώ η δ_c είναι η γωνία ισχύος μεταξύ της τάσης εξόδου του αντιστροφέα μετά το φίλτρο και της τάσης του φορτίου. Τα I_{Lq}, I_{cq} είναι οι άεργες συνιστώσες των ρευμάτων του φορτίου και της εξόδου του αντιστροφέα μετά το φίλτρο.

Το σχήμα 3.11 δείχνει το διανυσματικό διάγραμμα για ανταλλαγή ενεργού ισχύος μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, όπου και το σύστημα BESS και το δίκτυο προσφέρουν ισχύ στο φορτίο (εκφόρτιση συσσωρευτών).



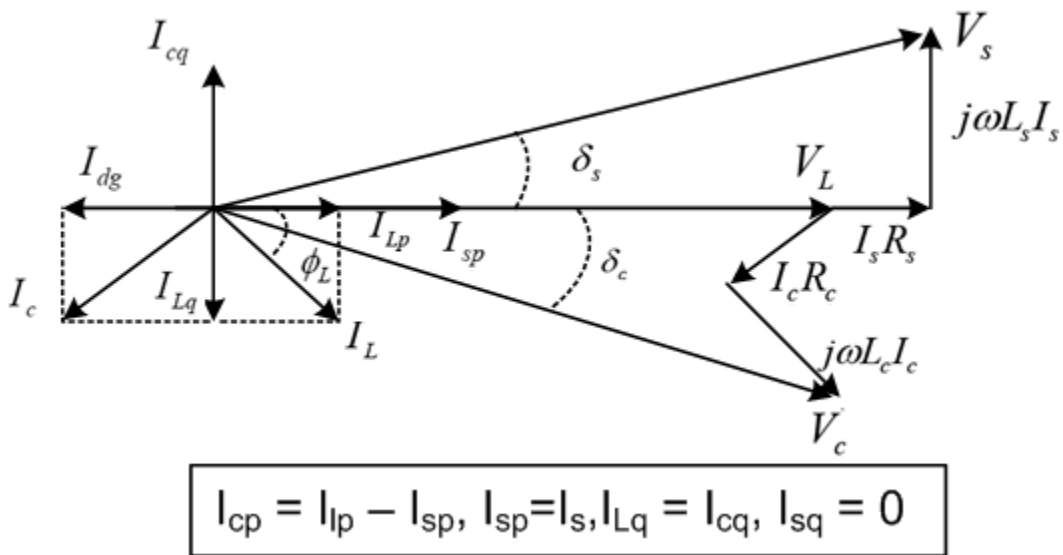
Σχήμα 3.11: Διανυσματικό διάγραμμα στην περίπτωση προσφοράς ενεργού ισχύος από το σύστημα BESS και από το δίκτυο προς το φορτίο σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος

Από το παραπάνω διάνυσμα προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\tilde{V}_s = \tilde{V}_L + \tilde{I}_s \cdot (R_s + j\omega L_s) = V_s \angle \delta_s \quad (3.3.6)$$

$$\tilde{V}_c = \tilde{V}_L + \tilde{I}_c \cdot (R_c + j\omega L_c) = V_c \angle \delta_c \quad (3.3.7)$$

Το σχήμα 3.12 δείχνει το διανυσματικό διάγραμμα για ανταλλαγή ενεργού ισχύος για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, όπου το σύστημα BESS απορροφά ισχύ από το δίκτυο (φόρτιση συσσωρευτών)



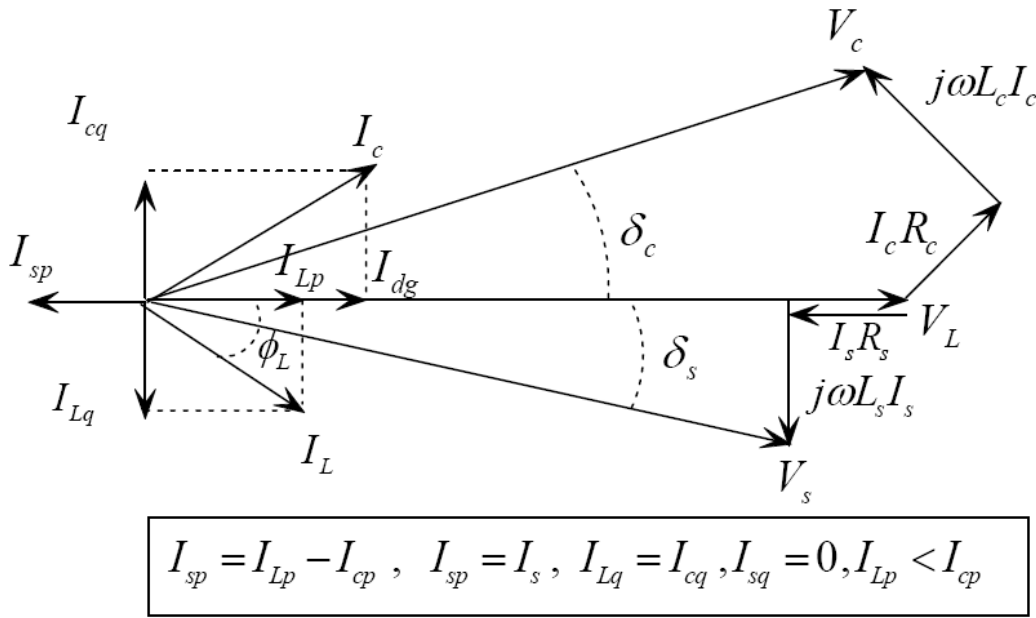
Σχήμα 3.12: Διανυσματικό διάγραμμα στην περίπτωση απορρόφησης ενεργού ισχύος από το σύστημα BESS σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

Από το παραπάνω διάνυσμα προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\tilde{V}_s = \tilde{V}_L + \tilde{I}_s \cdot (R_s + j\omega L_s) = V_s \angle \delta_s \quad (3.3.8)$$

$$\tilde{V}_c = \tilde{V}_L - \tilde{I}_c \cdot (R_c + j\omega L_c) = V_c \angle \delta_c \quad (3.3.9)$$

Το σχήμα 3.13 δείχνει το διανυσματικό διάγραμμα για ανταλλαγή ενεργού ισχύος για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, στην περίπτωση που στο σύστημα BESS λειτουργεί αδιάλειπτα για ορισμένο χρονικό διάστημα, δηλαδή παρέχει ενεργό ισχύ όχι μόνο στο φορτίο αλλά και στο δίκτυο.



Σχήμα 3.13: Διανυσματικό διάγραμμα στην περίπτωση προσφοράς ενεργού ισχύος από το σύστημα BESS και στο φορτίο και στο υπόλοιπο δίκτυο λειτουργώντας αδιάλειπτα.

Αυτό συμβαίνει διότι η ενεργή συνιστώσα του ρεύματος φορτίου I_{Lp} σε αυτήν την περίπτωση είναι μικρότερη από τη συνιστώσα ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα I_{dg} με αποτέλεσμα το BESS να δίνει επιπλέον ισχύ στο δίκτυο. Από το παραπάνω διάνυσμα προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\tilde{V}_s = \tilde{V}_L - \tilde{I}_s \cdot (R_s + j\omega L_s) = V_s \angle \delta_s \quad (3.3.10)$$

$$\tilde{V}_c = \tilde{V}_L + \tilde{I}_c \cdot (R_c + j\omega L_c) = V_c \angle \delta_c \quad (3.3.11)$$

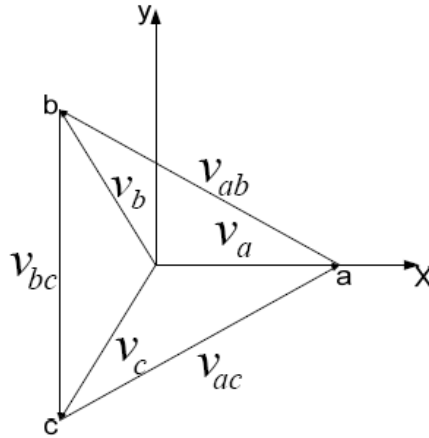
Οι τάσεις και τα ρεύματα στο PCC χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η τριφασική ενεργός ισχύς του φορτίου P_{Lavg} σύμφωνα με τη σχέση:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [V_{La}(t) \cdot i_{La}(t) + V_{Lb}(t) \cdot i_{Lb}(t) + V_{Lc}(t) \cdot i_{Lc}(t)] dt \quad (3.3.12)$$

3.4 Μοντέλο δικτύου

Σε αυτό το τμήμα θα περιγράψουμε το μαθηματικό μοντέλο του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε στα επόμενα.

Το δίκτυο αναπαρίσταται ως μια συμμετρική τριφασική πηγή τάσης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14: Συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεως

Οι τάσεις των τριών φάσεων του συστήματος ορίζονται ως εξής:

$$v_a = E_m \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (3.4.1\alpha)$$

$$v_b = E_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.4.1\beta)$$

$$v_c = E_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3.4.1\gamma)$$

όπου E_m το πλάτος της φασικής τάσης και ω η γωνιακή συχνότητα.

Τα τρία φασικά ρεύματα του συμμετρικού συστήματος ορίζονται ως εξής:

$$i_a = I_m \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (3.4.2\alpha)$$

$$i_b = I_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) \quad (3.4.2\beta)$$

$$i_c = I_m \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3} + \varphi\right) \quad (3.4.2\gamma)$$

όπου I_m το πλάτος του ρεύματος φάσης και φ η φάση μεταξύ τάσης και ρεύματος
Οι πολικές τάσεις είναι οι τάσεις μεταξύ των φάσεων και ορίζονται ως εξής:

$$v_{ab} = v_a - v_b \quad (3.4.3\alpha)$$

$$v_{bc} = v_b - v_c \quad (3.4.3\beta)$$

$$v_{ca} = v_c - v_a \quad (3.4.3\gamma)$$

Σε περίπτωση μη ύπαρξης ουδετέρου, θα ισχύει ότι :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3.4.4\alpha)$$

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (3.4.4\beta)$$

Η ενεργός και η άεργος ισχύς ορίζονται:

$$P = \text{Re}(\vec{v} \cdot \vec{i}^*) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (3.4.5\alpha)$$

$$Q = \text{Im}(\vec{v} \cdot \vec{i}^*) = -\frac{1}{\sqrt{3}}(v_{bc} i_a + v_{ca} i_b + v_{ab} i_c) \quad (3.4.5\beta)$$

3.5 Δομή και λειτουργία του βρόχου κλειδωμένης φάσης (PLL)

Όπως παρατηρήσαμε στην προηγούμενη ενότητα, η φάση, το πλάτος και η συχνότητα της τάσης στο PCC είναι πολύ σημαντικές πληροφορίες για τη λειτουργία ενός αντιστροφέα πηγής τάσης συνδεδεμένου με το δίκτυο. Σε τέτοιες εφαρμογές, μια ακριβής και γρήγορη παρατήρηση της γωνίας, του πλάτους και της συχνότητας της τάσης είναι απαραίτητη για τη σωστή παραγωγή σημάτων αναφοράς και τη συμμόρφωση με τις καθιερωμένες απαιτήσεις σύνδεσης μετατροπέων ισχύος όπως λειτουργία σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Επομένως, χρειάζεται ένα σύστημα που θα μπορεί να συγχρονίζει την τάση του αντιστροφέα με το δίκτυο. Γενικά, υπάρχουν δύο μέθοδοι που το επιτυγχάνουν αυτό:

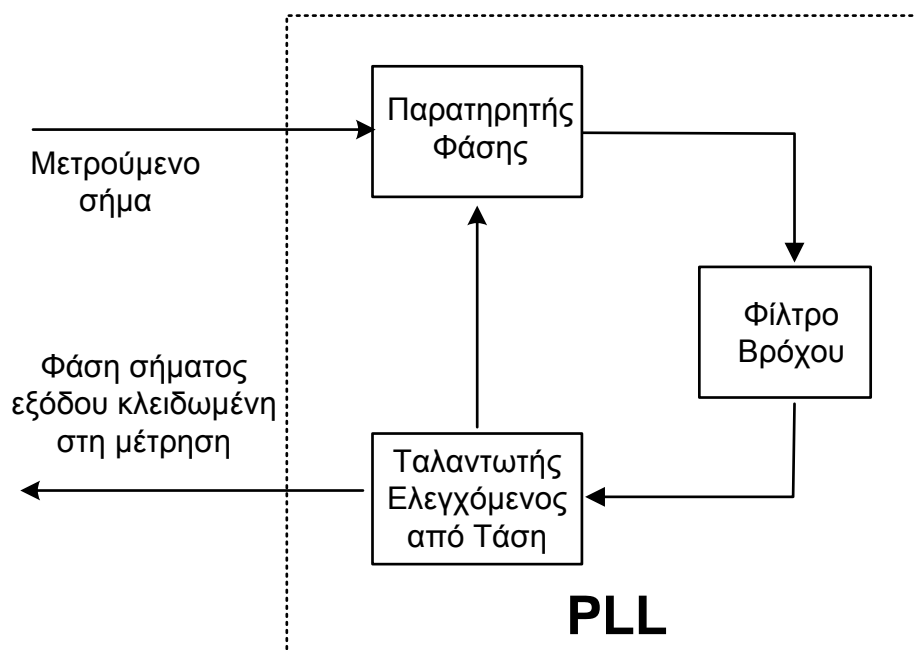
- Zero Crossing Detection
- Βρόχος Κλειδωμένης Φάσης (Phase Locked Loop – PLL)

Η πρώτη μέθοδος προσπαθεί να επιτύχει συγχρονισμό επιβλέποντας τις χρονικές στιγμές που η τάση γίνεται 0, ενώ η δεύτερη, το PLL, είναι ένα σύστημα με ανάδραση το οποίο ρυθμίζει τη φάση ενός λογικά παραγόμενου σήματος ώστε να ταιριάζει με τη φάση ενός σήματος εισόδου. Το PLL χρησιμοποιείται ώστε να συγχρονίσει τη γωνία ρεύματος του αντιστροφέα θ_{inv} , με τη γωνία του δικτύου θ_{grid} ώστε να επιτύχει συντελεστή ισχύος κοντά στη μονάδα. Η γωνία θ_{inv} χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το ρεύμα αναφοράς το οποίο συγκρίνεται με το πραγματικό ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα.

3.5.1 Λειτουργικό διάγραμμα του PLL

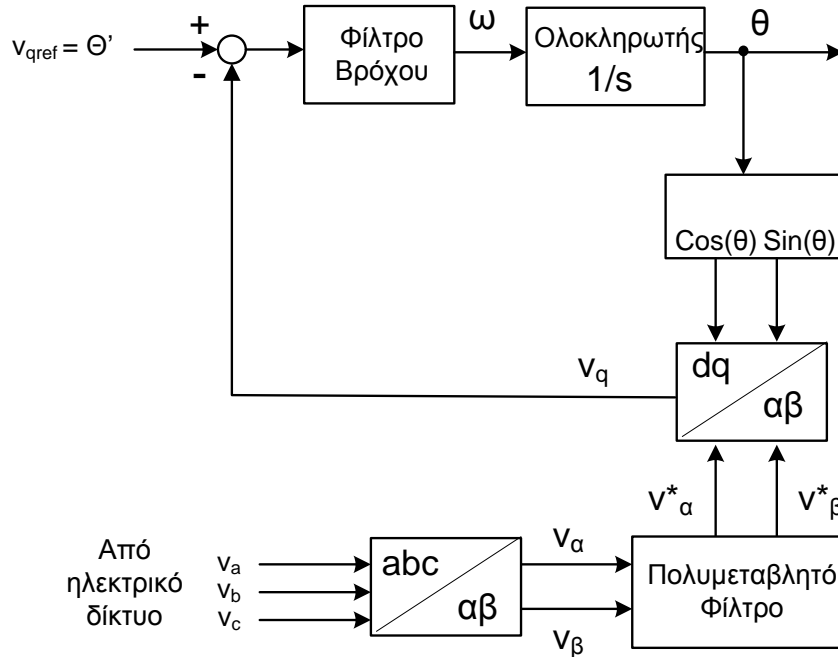
Στόχος είναι η δημιουργία ενός βρόχου κλειδωμένης φάσης που θα χρησιμοποιηθεί για το συγχρονισμό ενός τριφασικού αντιστροφέα με το ηλεκτρικό δίκτυο ισχύος[21]. Το PLL θα πρέπει να συνεχίζει να παράγει σήματα αναφοράς για τη συχνότητα λειτουργίας του αντιστροφέα ακόμη και όταν υπάρχει παραμόρφωση ή μη σταθεροποιημένη τάση και συχνότητα δικτύου. Επίσης θα πρέπει η υλοποίηση όλων των τμημάτων του PLL να μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ενός μόνο microcontroller ή DSP και όλος ο έλεγχος να μπορεί να γίνει με την ψηφιακή επεξεργασία των σημάτων που θα λαμβάνονται από έναν ή περισσότερους A/D μετατροπείς. Και αυτοί οι μετατροπείς θα είναι ενσωματωμένοι στο microcontroller ή στο DSP.

Στο σχήμα 3.15 φαίνεται η βασική δομή ενός PLL που περιγράφηκε παραπάνω.



Σχήμα 3.15: Η βασική δομή ενός PLL

Αν στο βασικό κύκλωμα ενός PLL προσθέσουμε τις κατάλληλες διατάξεις για τη λήψη των απαραίτητων σημάτων και την περαιτέρω επεξεργασία τους, τότε προκύπτει το λειτουργικό διάγραμμα ενός πιο σύνθετου βρόχου κλειδωμένης φάσης [22,23] το οποίο φαίνεται στο σχήμα 3.16. Όπως παρατηρούμε ο έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω ενός φίλτρου βρόχου που ενσωματώνει ένα PI ελεγκτή ο οποίος προσπαθεί να κρατήσει το σφάλμα μηδενικό ελέγχοντας την τάση V_q . Παράλληλα υπάρχουν συστήματα τα οποία εκτελούν μετασχηματισμό των τάσεων του δικτύου σε στατό πλαίσιο αναφοράς και σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς, ενώ παρεμβάλλεται και πολυμεταβλητό φίλτρο [21]. Οι λειτουργίες των υποσυστημάτων αυτών επεξηγούνται στις αμέσως επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 3.16: Λειτουργικό διάγραμμα του PLL

3.5.2 Μετασχηματισμός abc σε αβ (μετασχηματισμός Clarke)

Κατά το μετασχηματισμό αβ ή μετασχηματισμό Clarke, οι μεταβλητές ενός συμμετρικού τριφασικού συστήματος abc μεταφέρονται σε ένα νέο διφασικό σύστημα αναφοράς δύο σταθερών κάθετων αξόνων α-β βάση των παρακάτω σχέσεων μετασχηματισμού [24]:

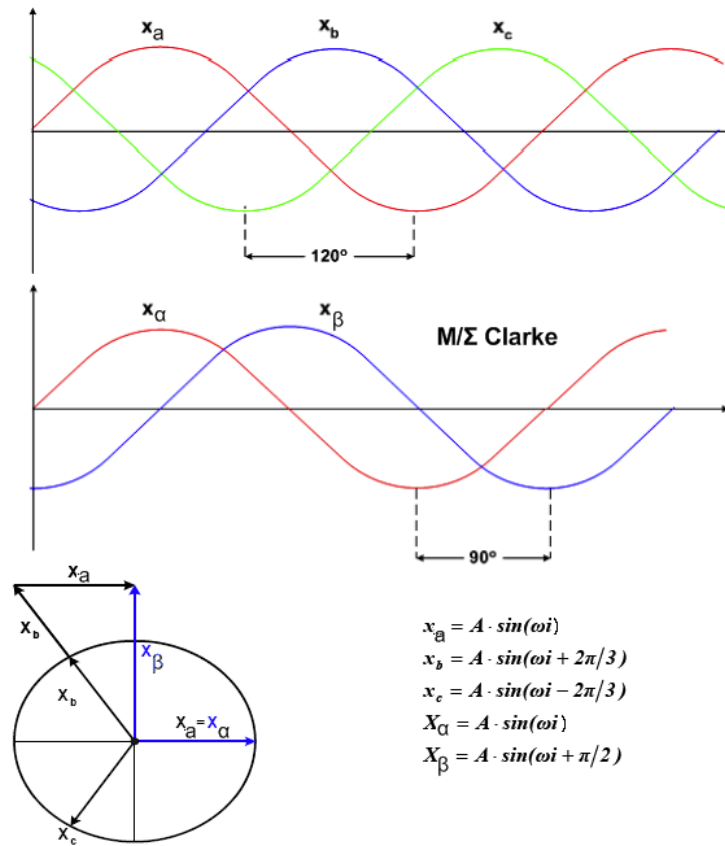
$$x_a = x_a \tag{3.5.1}$$

$$x_\beta = \frac{2x_b + x_c}{\sqrt{3}}$$

όπου x_a, x_b, x_c είναι οι μεταβλητές συμμετρικού τριφασικού συστήματος εισόδου και x_α, x_β μετασχηματισμένες μεταβλητές συμμετρικού διφασικού ορθογώνιου στατού συστήματος εξόδου. Συγκεκριμένα για τις τάσεις θα ισχύει ότι:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{3.5.2}$$

Διαγραμματικά, ο μετασχηματισμός Clarke φαίνεται στην επόμενη σελίδα στο σχήμα 3.17:

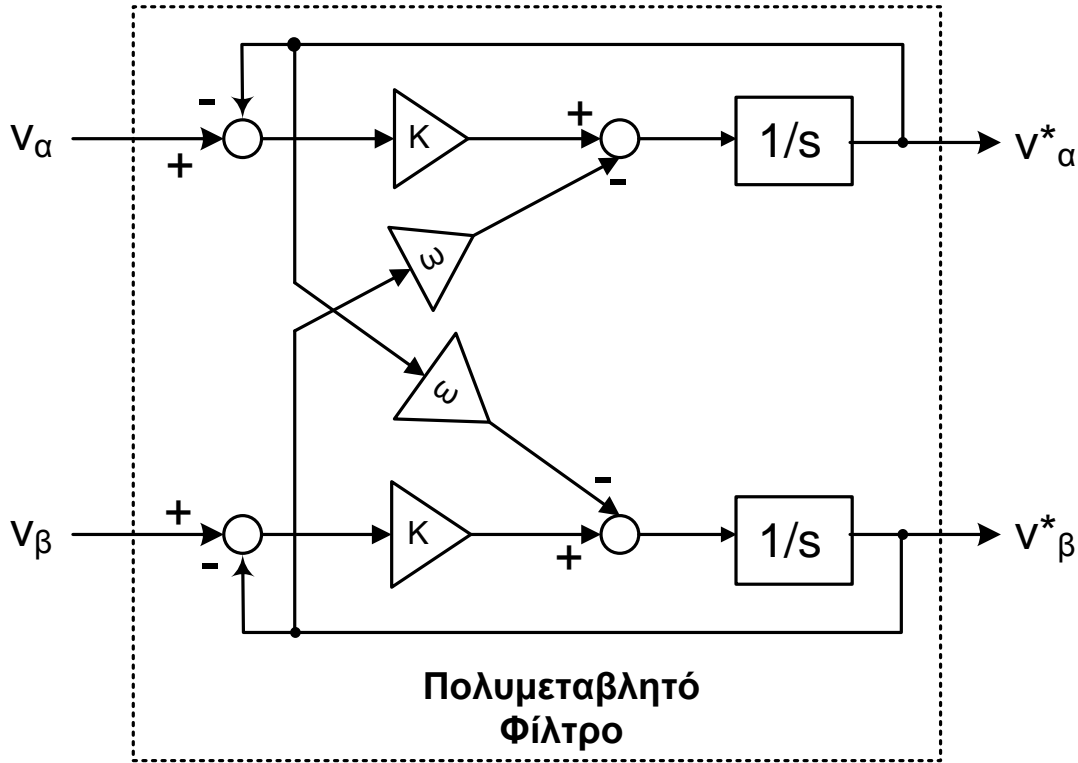


Σχήμα 3.17: Μετασχηματισμός Clarke, διανυσματικό διάγραμμα και στιγμιαίες εξισώσεις των μεταβλητών εισόδου εξόδου

3.5.3 Πολυμεταβλητό φίλτρο

Όταν υπάρχει ασυμμετρία στις τάσεις του δικτύου, τότε δημιουργείται αρμονική παραμόρφωση 2ας τάξεως στο σήμα εξόδου του PLL. Επίσης η ύπαρξη αρμονικών στις τάσεις του δικτύου τείνει να δημιουργήσει αρμονική παραμόρφωση 6^{ης} τάξεως στο σήμα εξόδου του PLL.

Το πολυμεταβλητό φίλτρο απομακρύνει αποτελεσματικά και τα δύο είδη αυτών των διαταραχών[21]. Επίσης το φίλτρο λειτουργεί σωστά ακόμα και όταν υπάρχει μικρή μεταβολή στη συχνότητα του δικτύου. Στο σχήμα 3.18 φαίνεται ένα πολυμεταβλητό φίλτρο του οποίου η γωνιακή συχνότητα είναι $\omega = 2\pi f = 314\text{rad/s}$.



Σχήμα 3.18: Δομή πολυμεταβλητού φίλτρου του PLL

3.5.4 Μετασχηματισμός αβ-dq και μετασχηματισμός Park

Κατά το μετασχηματισμό d-q τα σήματα v_α και v_β μεταφέρονται από το πλαίσιο αναφοράς δύο κάθετων αξόνων α και β σε ένα σύστημα αναφοράς δύο σύγχρονων κάθετων αξόνων d,q το οποίο περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα με βάση τις παρακάτω γραμμικές σχέσεις μετασχηματισμού [24] :

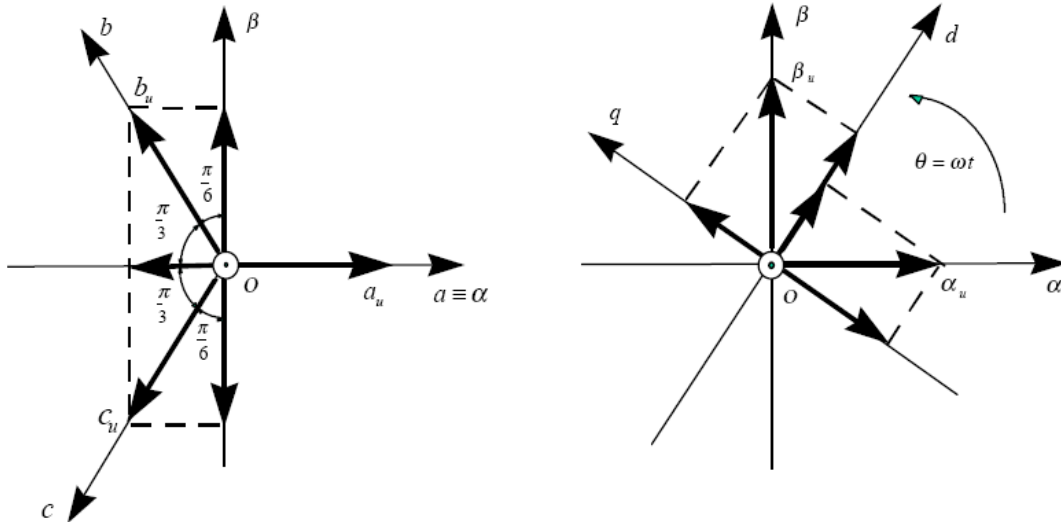
$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{pmatrix} \quad (3.5.3)$$

Το σήμα v_q σχετίζεται με τη φάση των τάσεων του δικτύου και στέλνεται από το PLL για να συγκριθεί με το σήμα αναφοράς το οποίο στέλνεται στον τριφασικό αντιστροφέα.

Οι υπολογισμοί για το $\sin \theta$ και $\cos \theta$ μπορούν να γίνουν από ένα microcontroller ή από ένα DSP με τη χρήση τιμών αποθηκευμένων σε διαδοχικές θέσεις μνήμης έτσι ώστε να σχηματίζουν ένα μονοδιάστατο πίνακα. Μπορούν π.χ να χρησιμοποιηθούν 1024 τιμές με ανάλυση 16-bit η κάθεμία.

Ο ολικός μετασχηματισμός από ένα τριφασικό σύστημα αναφοράς σε ένα πλαίσιο dq που περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα ονομάζεται **μετασχηματισμός Park**. Ο μετασχηματισμός αυτός διεξάγεται σε δύο στάδια:

- Μετασχηματισμός από το τριφασικό σύστημα αναφοράς σε ένα στατό διφασικό σύστημα $\alpha\beta$, ο οποίος λέγεται και μετασχηματισμός Clarke και
 - Μετασχηματισμός από το $\alpha\beta$ στατό πλαίσιο στο πλαίσιο dq που στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα.
- Τα βήματα αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.19: Επεξήγηση ολικού μετασχηματισμού Park σε δύο βήματα

Αναλυτικότερα, θεωρούμε ένα διάνυσμα στον τρισδιάστατο χώρο όπως το επόμενο:

$$x_{abc} = [a_u \quad b_u \quad c_u] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.5.4)$$

Θεωρώντας τώρα ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα, όμοιο με εκείνο της παραγράφου 3.4, αυτού του είδους το τριφασικό διάνυσμα μετασχηματίζεται στην αναπαράσταση dq (η μηδενική συνιστώσα έχει τιμή 0) μέσω της μήτρας μετασχηματισμού T , ως εξής:

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.5.5a)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Park, από το πλαίσιο dq στο πλαίσιο abc έχει την εξής μήτρα μετασχηματισμού T^{-1} :

$$T^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.5.5\beta)$$

Με άλλα λόγια, ο μετασχηματισμός Park από το διάνυσμα $x_{abc} = \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$ στο $x_{dq} = \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix}$

πραγματοποιείται, όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, από τους επιμέρους πολλαπλασιασμούς:

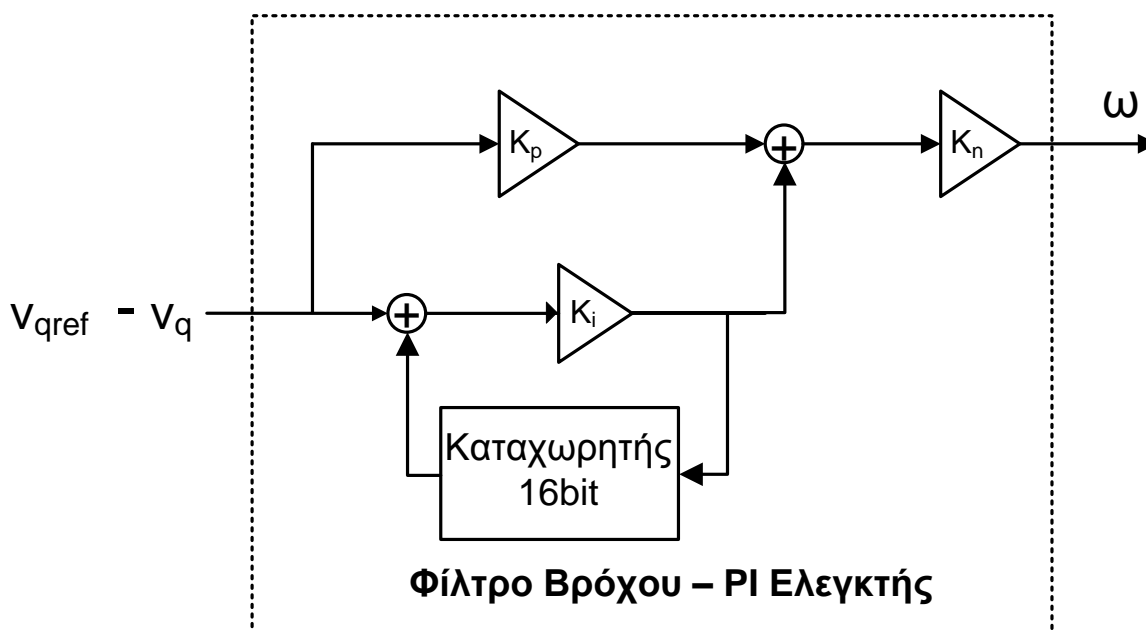
$$\begin{bmatrix} \alpha_u \\ \beta_u \\ \sigma_u \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_u \\ b_u \\ c_u \end{bmatrix} \quad (3.5.6)$$

$$\begin{bmatrix} d_u & q_u & \sigma_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_u & \beta_u & \sigma_u \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5.7)$$

$$\begin{bmatrix} d_u \\ q_u \\ \sigma_u \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_u \\ b_u \\ c_u \end{bmatrix} \quad (3.5.8)$$

3.5.5 Φίλτρο Βρόχου

Το φίλτρο βρόχου ουσιαστικά είναι ένα PI ελεγκτής ο οποίος προσπαθεί να μηδενίσει το σφάλμα όσο το δυνατόν γρηγορότερα [22]. Η διάταξη φαίνεται στο σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.20: Δομή φίλτρου βρόχου του PLL

Για τον PI ελεγκτή οι συντελεστές ενίσχυσης K_p και K_i πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε να έχουμε ένα καλό συμβιβασμό μεταξύ σταθερότητας και δυναμικής απόκρισης του PLL. Για να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα η διαταραχή που δημιουργείται λόγω του διακριτού τρόπου λειτουργίας του ψηφιακού PLL, ο συντελεστής ενίσχυσης K_n πρέπει να είναι μικρότερος της μονάδας.

3.6 Συστήματα SCADA και τεχνολογία BPL

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.9, για τη λειτουργία του συστήματος ελέγχου του BESS είναι απαραίτητο να διαβιβάζονται σήματα που αντιστοιχούν σε δεδομένα του συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Χρειάζεται λοιπόν να υπάρχει επιτήρηση της συνολικής παραγωγής από Α/Γ και φωτοβολταϊκά, ώστε να υπάρχει πληροφορία για το στιγμιαίο ισοζύγιο παραγωγής κατανάλωσης στο δίκτυο, στο οποίο συνδέεται το σύστημα BESS. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν μετρήσεις ενεργού και άεργου ισχύος από τις μονάδες παραγωγής και μετρήσεις του επιπέδου της τάσης και του επιπέδου φόρτισης των συσσωρευτών.

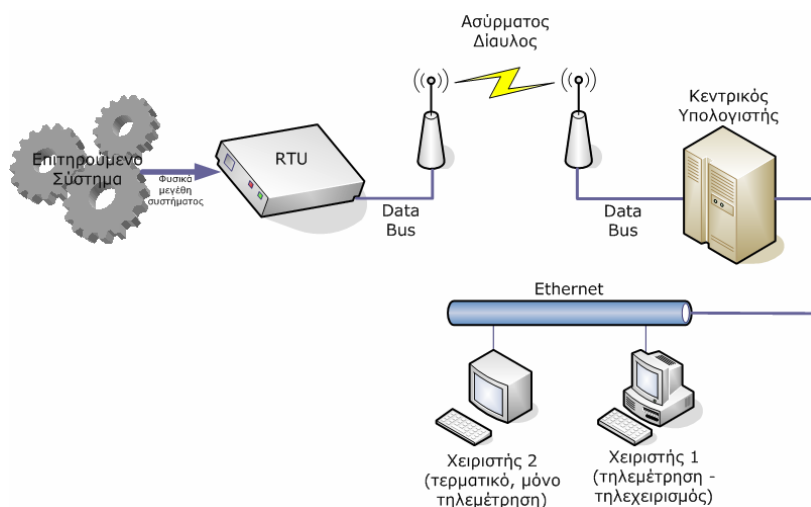
Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση συστημάτων SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) σε κατάλληλα σημεία του δικτύου. Ιδιαίτερα κομβικής σημασίας είναι η επιτήρηση της συνολικής παραγωγής από Α/Γ είτε με απευθείας μετρήσεις από RTU είτε με τη χρήση εκτιμητών. Δεδομένα από την τηλεεπιτήρηση του συστήματος θα αποστέλλονται με χρήση κατάλληλου τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού στο σύστημα BESS. Μια ενδιαφέρουσα, πρόσφατη και κατάλληλη για τέτοιες εφαρμογές τεχνολογία BPL (Broadband over Power Lines) δηλαδή η μεταφορά δεδομένων μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας. Στις επόμενες

παραγράφους θα εξηγήσουμε συνοπτικά τη λειτουργία και τις εφαρμογές των τεχνολογιών αυτών στα ηλεκτρικά δίκτυα.

3.6.1 Δομή συστημάτων SCADA

Η λέξη SCADA αποτελεί τα αρχικά των λέξεων ‘Supervisory, Control And Data Acquisition System’, δηλαδή σύστημα εποπτείας, ελέγχου και συλλογής πληροφοριών. Είναι, συνεπώς, σύστημα τηλεμετρίας και τηλεχειρισμού, το οποίο συλλέγει πληροφορίες από διάφορες διεργασίες και τις αξιοποιεί για τον εποπτικό τους έλεγχο. Τα συστήματα SCADA είναι ιδιαίτερα δημοφιλή, τόσο σε ιδιαίτερα σύνθετες βιομηχανικές εφαρμογές, όπου απαιτούνται αυτοματισμοί υψηλής αξιοπιστίας και ακρίβειας όσο και σε συστήματα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία απαιτούν συνεχή και λεπτομερή έλεγχο όλων των κρίσιμων παραμέτρων τους.

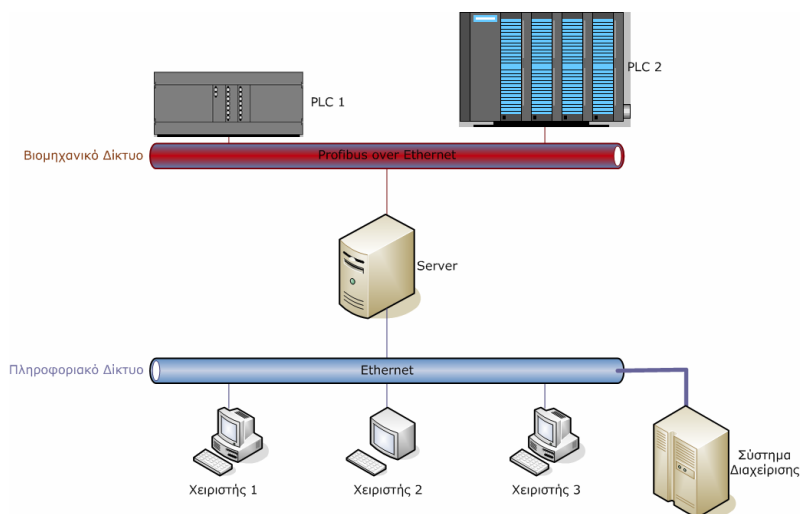
Ένα σύνθετο σύστημα SCADA [26] χρησιμοποιεί σαν κεντρικό πυρήνα έναν κεντρικό υπολογιστή, αρκετά μεγάλης υπολογιστικής ισχύος, στον οποίο βρίσκεται το λογισμικό SCADA εγκατεστημένο, όπως και το πρόγραμμα της εκάστοτε εφαρμογής. Η ζητούμενη τηλεμετρία στον επιθυμητό χώρο, επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση σταθμών τηλεμετρίας RTU (Remote Telemetry Units). Οι σταθμοί αυτοί «διαβάζουν» τις τιμές διαφόρων μεγεθών που μας ενδιαφέρουν (τάση, ισχύς κτλ), τις μετατρέπουν σε ηλεκτρικά σήματα και τα σήματα αυτά τα μεταδίδουν ενσύρματα ή ασύρματα με κατάλληλες τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις στον κεντρικό υπολογιστή, ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Από εκεί και πέρα, αρχίζει η παρακολούθηση και η επεξεργασία τους από τους χρήστες του κεντρικού υπολογιστή και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία της εκάστοτε διεργασίας. Η τοπολογία ενός συστήματος SCADA φαίνεται στο σχήμα 3.21



Σχήμα 3.21: Τοπολογία συστήματος SCADA

Ένα πολύ σημαντικό κεφάλαιο στην ολοκλήρωση ενός συστήματος SCADA αποτελούν οι τύποι των δικτύων, με τα οποία επικοινωνούν τόσο ο κεντρικός υπολογιστής με τους χρήστες όσο και τα διάφορα PLC (Programmable Logic Controllers) μεταξύ τους. Για μία σύνθετη βιομηχανική εφαρμογή, συνήθως απαιτούνται αρκετά PLC, το καθένα επιφορτισμένο με ένα συγκεκριμένο τμήμα και η διασύνδεση αυτών έχει άμεσες συνέπειες στην ορθή λειτουργία και άμεση ανταπόκριση του SCADA.

Όπως δείχνει και το σχήμα 3.22, για την δικτύωση του κεντρικού υπολογιστή με τους χρήστες (πληροφοριακό δίκτυο), χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα Ethernet ή Token Ring, ενώ για την δικτύωση των PLC (βιομηχανικό δίκτυο), έχουμε τα πρωτόκολλα Profibus, TCP/IP και Industrial Ethernet, με το πρώτο να είναι και το πιο ευρέως διαδεδομένο. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε συστήματα SCADA εγκατεστημένα εντός Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, κυριαρχεί το πρωτόκολλο ModBus, αν και τα τελευταία χρόνια γίνεται μία, ανεπιτυχής προς το παρόν, προσπάθεια να επικρατήσει το Profibus παγκοσμίως, για λόγους συμβατότητας και ευκολίας.

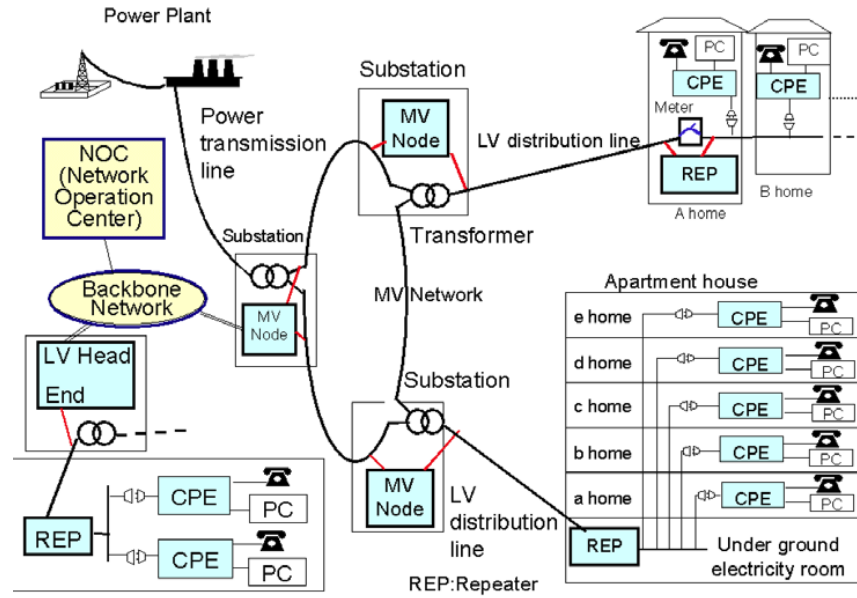


Σχήμα 3.22: Δικτύωση ενός συστήματος SCADA

3.6.2 Η τεχνολογία BPL

Η τεχνολογία BPL (Broadband over Power Line) είναι μια σύγχρονη εμπορική τεχνολογία που επιτρέπει την εφαρμογή ευρυζωνικού Internet (μέσω του πρωτοκόλλου IP) στις γραμμές ηλεκτρικής ισχύος, σε ταχύτητες από 4Mbps έως 145Mbps για τη μετάδοση πληροφοριών μέσω του δικτύου [25]. Η τεχνολογία αυτή λοιπόν μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα στο σύστημα BESS για τη μεταφορά σε πραγματικό χρόνο δεδομένων ισχύος P,Q από τις συνιστώσες του ισοζυγίου παραγωγής ζήτησης και κατάστασης του δικτύου.

Στο σχήμα 3.23 αποτυπώνεται μια πρακτική δομή των αμιγώς ενσύρματων δικτύων BPL.



Σχήμα 3.23: Τυπική δομή αμγώς ενσύρματου δικτύου BPL

Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο κορμού που έχει υλοποιηθεί με οπτικές ίνες, συνδέεται με το δίκτυο BPL στη MT, μέσω των κόμβων BPL MT (MV nodes). Έπειτα το δίκτυο MT συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο διανομής XT, όπου απολήγουν οι μονάδες τερματισμού του δικτύου BPL που ονομάζονται NTU ή CPE και βρίσκονται στο χώρο του τελικού χρήστη/καταναλωτή. Επομένως, η τοπολογία του δικτύου μπορεί να χωριστεί σε τρία κύρια τμήματα, καθένα από τα οποία έχει τη δική του αρχιτεκτονική [27,28].

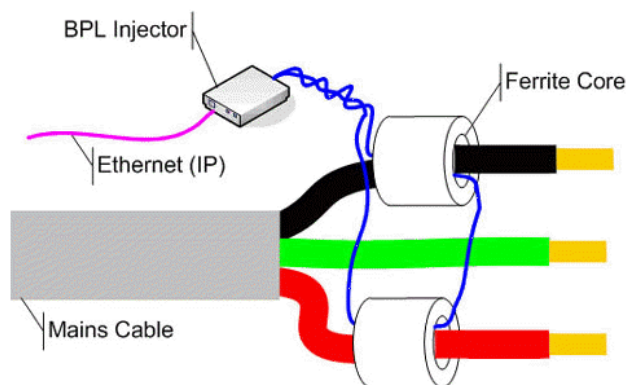
- Το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο κορμού που είναι συνήθως ένας οπτικός δακτύλιος.
- Το δίκτυο (δακτύλιος) BPL στη MT.
- Το δίκτυο (δακτύλιος) BPL στη XT, συνήθως υλοποιημένο με τοπολογία αστέρα ή δένδρου.

Στην πλέον απλή μορφή της, η αρχιτεκτονική αυτή μπορεί να περιλαμβάνει το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο κορμού και το δίκτυο BPL στη χαμηλή τάση σε τοπολογία αστέρα ή δένδρου, όπου και αποφεύγεται η μεταβίβαση του σήματος από την MT. Αυτό προϋποθέτει ότι υπάρχει ένα δίκτυο κορμού άμεσα προσβάσιμο στους κόμβους του δικτύου BPL XT (ουσιαστικά στους Y/Σ MT/XT, ΜΣ MT/XT) κάτι που στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι πρακτικά δύσκολο οπότε καταφεύγουμε στην λύση της συμμετοχής της MT στην διαδρομή του σήματος.

Η ανωτέρω τυπική τοπολογία χρησιμοποιεί την τεχνική διαμόρφωσης OFDM [25]. Τα δεδομένα από το δίκτυο κορμού του διαδικτύου μετατρέπονται σε μορφότυπο σήματος OFDM στις συσκευές BPL MT και, στη συνέχεια, γίνεται η σύζευξη με μια φάση της γραμμής μεταφοράς MT. Η διαδικασία είναι αμφίδρομη, δηλαδή αντίστοιχα και το σήμα μορφότυπου OFDM μετατρέπεται σε μορφότυπο σήματος που χρησιμοποιείται στο δίκτυο κορμού του τηλεπικοινωνιακού (PSTN, Internet). Για να

διατηρείται η στάθμη του σήματος BPL στα δίκτυα BPL XT για μεγάλες αποστάσεις, χρησιμοποιούνται επαναλήπτες (repeaters) BPL.

Η αρχιτεκτονική του δικτύου βασίζεται σε τρεις διαφορετικές μονάδες που ονομάζονται εισαγωγείς/συγκεντρωτές (injectors), επαναλήπτες (repeaters) και εξαγωγείς (extractors). Ο εξοπλισμός BPL εισάγει τα δεδομένα IP ως ένα σήμα RF στο εναέριο δίκτυο χρησιμοποιώντας πυρήνες φερρίτη όπως φαίνεται στο σχήμα 3.24.



Σχήμα 3.24: Εισαγωγή δεδομένων IP στις γραμμές ηλεκτρικής ισχύος με την τεχνολογία BPL

Το σήμα στη συνέχεια αφού μεταφερθεί στον προορισμό του, τότε μπορεί πολύ εύκολα να ανακτηθεί από το χρήστη μέσω ενός BPL modem που δίνει πρόσβαση στο RF BPL σήμα. Το BPL modem μετατρέπει το σήμα RF σε δεδομένα IP. Τότε ο λήπτης συνδέοντας το BPL modem σε έναν υπολογιστή ή server, λαμβάνει τις πληροφορίες που θέλει.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλύσουμε το σύστημα ελέγχου του BESS και θα προτείνουμε διάφορες τεχνικές ελέγχου.

3.7 Βιβλιογραφία - Αναφορές τρίτου κεφαλαίου

- [1] European Norm EN 50160, “*Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*”.CENELEC, 1999.
- [2] Οδηγία Διανομής Νο.32 της ΔΕΗ: «*Κριτήρια δια την Εξέτασιν της Επάρκειας και της Εξασφάλισης Τροφοδοτήσεως των Δικτύων Διανομής*», 1973.
- [3] Οδηγία Διανομής Νο.129 της ΔΕΗ: «*Τεχνικές Προδιαγραφές για τη Σύνδεση Παραγωγών στα Δίκτυα Διανομής*»
- [4] Σ. Παπαθανασίου, Γ. Τσιτίλος, Γ. Αντωνόπουλος, Δ. Σταυρόπουλος, «*Τεχνικές προϋποθέσεις για τη σύνδεση παραγωγών στα δίκτυα διανομής*» σύνοδος « ΑΘΗΝΑ2001 »
- [5] *IEC 61000-3-7:1996(TR) Electromagnetic compatibility (EMC) -- Part 3: Limits – Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems – Basic EMC publication.*

- [6] **IEC 725 (1981)**: Considerations on reference impedances for use in determining the disturbance characteristics of household appliances and similar electrical equipment
- [7] **IEC 61000-3-6:1996(TR) Electromagnetic compatibility (EMC) -- Part 3**: Limits – Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems – Basic EMC publication
- [8] Β. Παπαδιάς, Γ. Κονταξής, «**Ηλεκτρική οικονομία**», εκτύπωση ΕΜΠ, Αθήνα 2003
- [9] «**Μεθοδολογία υπολογισμού του ορίου Διείσδυσης Α.Π.Ε. στα μη διασυνδεδεμένα νησιά**», Ρυθμιστική αρχή ενέργειας, Φεβρουάριος 2003
- [10] Σ. Παπαθανασίου, «**Ανανεώσιμες Πηγές ενέργειας, Σημειώσεις παραδόσεων**», Εκτύπωση ΕΜΠ, Αθήνα 2008
- [11] Muhammad H. Rashid «**Power Electronics Handbook**», September 2001
- [12] Maly D.K, Kwan K.S «**Optimal battery energy storage system charge scheduling with dynamic programming**», IEE Proc. Science, Measurement and Technology, Volume 142, Issue 6, pages 453-458, Nov 1995
- [13] Alt J. T. Anderson M. D. Jungst R. G. «**Assessment of utility side cost savings from battery energy storage**», IEEE Transactions on Power Storage, Volume 12, Issue 3, pages 1112-1120, 1997
- [14] Alexandre Oudalov, Rachid Cherkaoui «**Sizing and optimal operation of a battery energy storage system for peak shaving application**», IEEE Transactions, Jul 2007.
- [15] Tsung-Ying Lee, Nanming Chen «**Optimal capacity of the battery energy storage system in a power system**», IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 8, Issue 4, pages 667-673, Dec 1993
- [16] Kyung-Hee Jung Hoyong Kim Daeseok Rho POSCO Res. Inst., Seoul «**Determination of the installation site and optimal capacity of the battery energy storage system for load leveling**», IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 11, Issue 1, pages 162-4167, Mar 1996
- [17] Luis T Youn, Sohyung Cho «**Optimal Operation of Energy Storage Using Linear Programming Technique**», Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, Vol 1, Oct 2009
- [18] Bhatia, R.S. Jain, S.P. Jain, D.K. Singh, B «**Battery Energy Storage System for Power Conditioning of Renewable Energy Sources**», IEEE PEDS, 2005
- [19] Igor Papic «**Simulation Model for Discharging a Lead-Acid BESS for Load Levelling**», IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 21, Issue 2, June 2006
- [20] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A.V. Timbus. 2006. «**Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems**», IEEE Transactions on Industrial Electronics. 53(5): October.

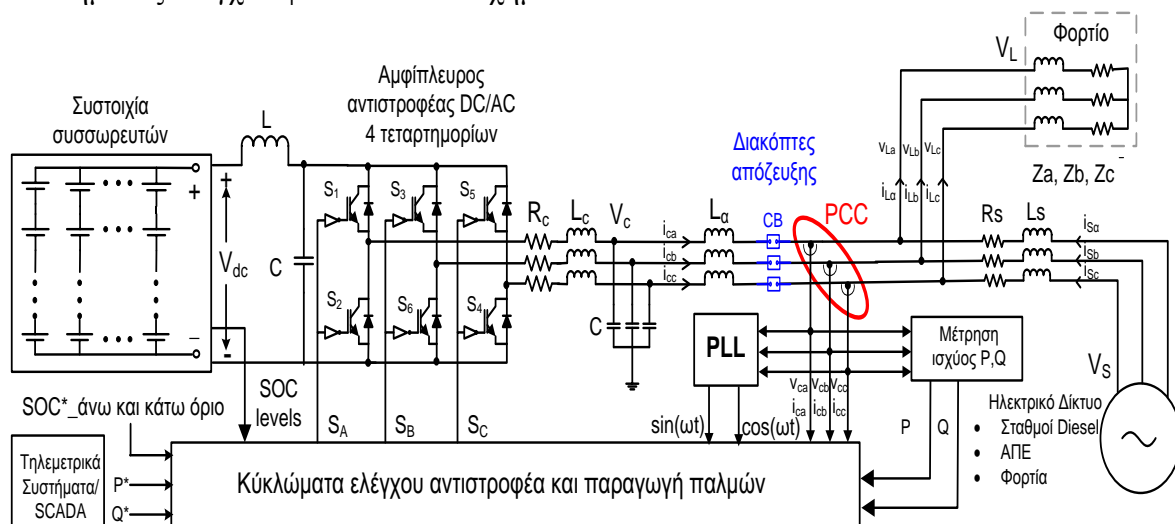
- [21] T. Ostrem, W. Sulkowski, L. E. Norum, and C. Wang, «*Grid Connected Photovoltaic (PV) Inverter with Robust Phase-Locked Loop (PLL)*», 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela
- [22] S. Eren, M. Karimi-Ghartemani, and A. Bakhshai, «*Enhanced Frequency-Adaptive Phase Locked Loop for Distributed Power Generation System Applications*»
- [23] A. N. Nemmani, M. Vandepas, K.Ok, K. Mayaram and U. Moon «*Design techniques for radiation hardened Phase-Locked Loops* »
- [24] B. K. Bose, «*Power Electronics and Variable Frequency Drives:Technology and Applications*», IEEE Press, 1997.
- [25] Broadband Over Power Line (BPL) Technology and the SMART GRID, διαθέσιμο <http://www.novastars.com/BPL/index.html>
- [26] Γ. Κορρές «*Εποπτεία και διαχείριση ενεργειακών συστημάτων*», Αθήνα 2008
- [27] «*Μελέτη των κύριων παραμέτρων ενός ευρυζωνικού δικτύου μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ισχύος (BPL)*», Διπλωματική εργασία Μιλτιάδου Μίλτου, Πάτρα, Οκτώβριος 2009
- [28] G Duval, «*Applications of power line carrier at Electricite de France*» Proc 1997 Internat. Symp. on Power Line Comms and its Applications pp76-80

Κεφάλαιο 4

Σχεδίαση και ανάλυση προτεινόμενων τεχνικών ελέγχου του συστήματος BESS

4.1 Στόχος του προτεινόμενου ελέγχου του συστήματος BESS

Γενικός σκοπός του συστήματος ελέγχου του BESS είναι να επεξεργάζεται εντολές από εξωτερικά συστήματα καθώς και μετρήσεις από το σύστημα συσσωρευτών, αντιστροφέα και δικτύου, ώστε να προσφέρει σε αυτό ή να απορροφά από αυτό ορισμένη ποσότητα ενεργού και άεργου ισχύος. Οι βασικές παράμετροι εισόδου και εξόδου του συστήματος ελέγχου φαίνονται στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 4.1: Βασικές παράμετροι εισόδου και εξόδου του συστήματος ελέγχου του BESS

Παρατηρούμε ότι το σύστημα ελέγχου δέχεται εισόδους από τρία διαφορετικά υποσυστήματα. Αρχικά από το σύστημα προγραμματισμού παρέχονται οι απαιτούμενες εντολές ενεργού και άεργου ισχύος P^* , Q^* τις οποίες πρέπει να ακολουθεί το σύστημα BESS προκειμένου να επιτελέσει είτε εφαρμογές εξομάλυνσης φορτίου και αποκοπής αιχμών (load levelling – peak shaving), τις οποίες αναφέραμε στην παράγραφο 3.2.2, είτε εφαρμογές αδιαλείπτου παροχής ισχύος, είτε εφαρμογές αντιστάθμισης. Για το σκοπό αυτό διοχετεύονται και τα απαιτούμενα όρια φόρτισης των συσσωρευτών ($SOC_άνω$ όριο και $SOC_κάτω$ όριο) όπως αυτά έχουν υπολογιστεί από τη στρατηγική φόρτισης - εκφόρτισης των συσσωρευτών.

Από το σύστημα των συσσωρευτών, λαμβάνουμε τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών (*SOC_levels από εδώ και στο εξής*), τα οποία είναι απαραίτητα για την ικανοποίηση των ορίων φόρτισης όπως προστάζει η τεχνική φόρτισης - εκφόρτισης των συσσωρευτών. Τα όρια αυτά επίσης χρησιμεύουν και για την ενεργοποίηση της προστασίας ασύμμετρης φόρτισης των συσσωρευτών όπως θα δούμε παρακάτω. Στην παράγραφο 4.3 μάλιστα, θα εξετάσουμε την περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος προκειμένου το σύστημα να ικανοποιήσει τα όρια φόρτισης.

Από την πλευρά του αντιστροφέα και του δικτύου, λαμβάνονται με χρήση μετρητικών οργάνων οι τιμές της τάσης v_{RST} και του ρεύματος i_{RST} του δικτύου στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC), μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου. Επιπλέον, με τη χρήση τηλεμετρικών συστημάτων (π.χ τεχνολογία BPL), υπολογίζονται οι τιμές της ενεργού και άεργου ισχύος του δικτύου P , Q κάθε χρονική στιγμή. Ακόμη ο βρόχος κλειδωμένης φάσης (PLL) λαμβάνοντας υπόψη την τάση του δικτύου στο PCC, παράγει φιλτραρισμένα σήματα ημιτόνου και συνημιτόνου προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για το συγχρονισμό μεταξύ αντιστροφέα και δικτύου[1,2,3].

Η έξοδος του συστήματος ελέγχου είναι ουσιαστικά οι παλμοί οδήγησης των ημιαγωγών IGBT του αντιστροφέα, που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο ανοιγοκλείνουν οι διακόπτες ώστε να παράγουν το επιθυμητό επίπεδο τάσης και να υπάρξει λειτουργία 4 τεταρτημορίων. Η μορφή των παλμών αυτών είναι προϊόν μιας τεχνικής ελέγχου των παλμών (όπως SPWM, SVPWM, HBCC), οι οποίες θα αναλυθούν διεξοδικά στο κεφάλαιο 5.

Στο παρόν κεφάλαιο, θα συνθέσουμε μεθοδολογικά το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου του BESS, βήμα προς βήμα, ξεκινώντας από τις βασικές του λειτουργίες και προχωρώντας διαδοχικά σε πιο σύνθετες. Μ' αυτόν τον τρόπο ο αναγνώστης θα μπορεί να κατανοήσει πλήρως τα βήματα της σχεδίασης. Θα προτείνουμε επίσης μέθοδο υλοποίησης του συστήματος ελέγχου με χρήση δύο μικροεπεξεργαστών DSP σε διάταξη master – slave (αφέντη δούλου) και θα αναλύσουμε τις υπορουτίνες που αναλαμβάνει ο κάθε μικροεπεξεργαστής. Παράλληλα, θα εξετάσουμε και την υλοποίηση του συστήματος με κατάλληλο hardware.

4.2 Προτεινόμενα συστήματα διανυσματικού ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος (*P - Q control*) με σήματα αναφοράς την τάση και το ρεύμα για το συγχρονισμό του αντιστροφέα και για την παραγωγή παλμών.

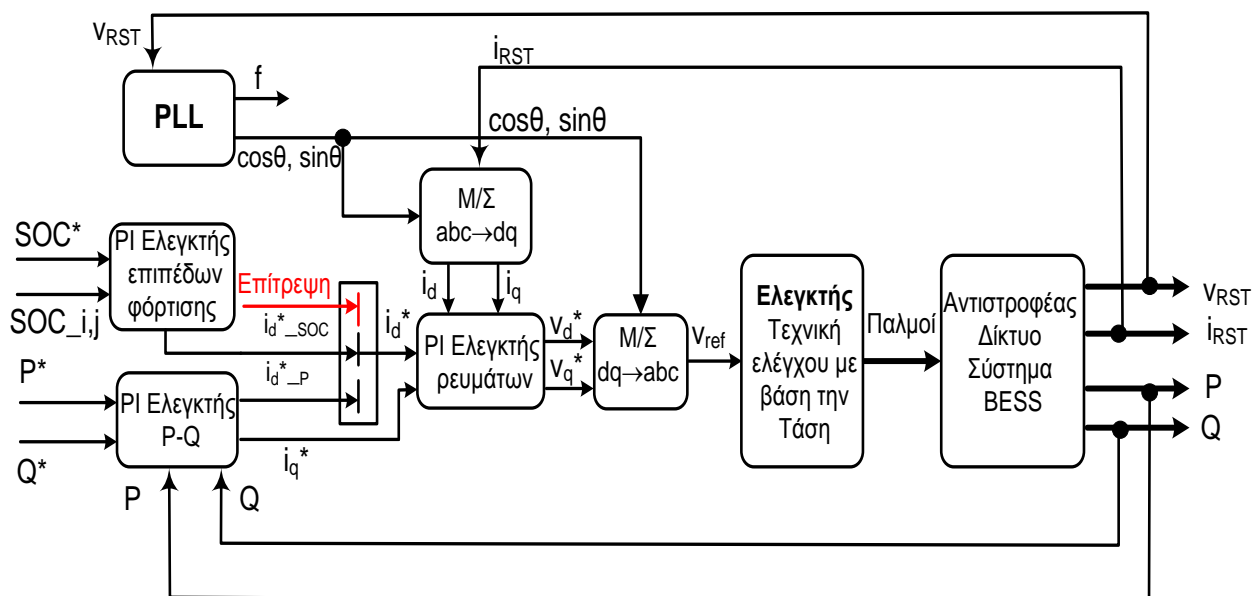
Το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί δύο ειδών τεχνικές ελέγχου του αντιστροφέα:

- Τεχνική με σήμα αναφοράς την τιμή της τάσης v_{ref} (*SPWM, SVPWM*) και
- Τεχνική με σήμα αναφοράς την τιμή του ρεύματος i_{ref} (Τεχνική ελέγχου ρεύματος σε βρόχο υστέρησης – HBCC).

Και οι δύο τεχνικές ωστόσο βασίζονται στη λογική του διανυσματικού ελέγχου, ενσωματώνοντας δύο βρόχους ελέγχου [2,8,10,11,15]. Υπάρχει ένας εξωτερικός βρόχος ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος και ένας εσωτερικός βρόχος ρευμάτων. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τις παραπάνω τεχνικές.

4.2.1 Έλεγχος P-Q μέσω της τάσης αναφοράς με χρήση PLL

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα της τεχνικής ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος με αναφορά την τάση v_{ref} .



Σχήμα 4.2: Δομικό διάγραμμα ελέγχου P – Q ενεργού και άεργου ισχύος του συστήματος BESS με παραγωγή της τάσης v_{ref} ως είσοδο αναφοράς στον ελεγκτή παραγωγής των παλμών του αντιστροφέα

Η μεταβλητές ελέγχου του εξωτερικού βρόχου είναι οι τιμές P, Q ενεργού και άεργου ισχύος οι οποίες υπολογίζονται μέσω της σχέσης¹:

$$P = \text{Re}(\bar{v} \cdot \bar{i}^*) = v_R \cdot i_R + v_S \cdot i_S + v_T \cdot i_T$$

$$Q = \text{Im}(\bar{v} \cdot \bar{i}^*) = -\frac{1}{\sqrt{3}}(v_{RS} \cdot i_T + v_{ST} \cdot i_R + v_{TR} \cdot i_S) \quad (4.2.1)$$

Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τις εντολές αναφοράς P^*, Q^* ώστε να παραχθούν τα σήματα σφάλματος.

$$e_p = P^* - P$$

$$e_q = Q^* - Q \quad (4.2.2)$$

Τα σφάλματα αυτά γίνονται είσοδοι σε ένα PI ελεγκτή από τον οποίο παράγονται τα

¹ Για τον υπολογισμό των ισχύων λήφθηκε υπόψη το πρότυπο 1459 της IEEE και η υλοποίηση του σε επίπεδο προσομοίωσης γίνεται με τρόπο που περιγράφουμε στο κεφάλαιο 6 μέσω των σχέσεων:

$$P = \frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t (v(\omega t) \times i(\omega t)) dt \quad (6.9) \quad Q = \frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t (v(\omega t) \times i(\omega t - \pi/2)) dt \quad (6.10)$$

ρεύματα αναφοράς $i_{d_p}^*, i_{q}^*$ σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$i_{d_p}^* = K_p (P^* - P) + \int K_I (P^* - P) \quad (4.2.3\alpha)$$

$$i_{q}^* = K_p (Q^* - Q) + \int K_I (Q^* - Q) \quad (4.2.3\beta)$$

Όπως φαίνεται στο σχήμα και θα αναλύσουμε σε επόμενη παράγραφο, παράγεται και το ρεύμα αναφοράς $i_{d_SOC}^*$ από τη σύγκριση με PI ελεγκτή κάποιου από τα επιθυμητά όρια φόρτισης SOC^* με το μέσο όρο των επιπέδων φόρτισης των συσσωρευτών εκείνη τη στιγμή $SOC_{-i,j}$ ώστε να ισχύει:

$$i_{d_SOC}^* = K_p (SOC^* - SOC_{-i,j}) + \int K_I (SOC^* - SOC_{-i,j}) \quad (4.2.4)$$

Τελικά το σήμα αναφοράς i_{d}^* θα προκύψει είτε από τη σύγκριση των ισχύων, είτε από τη σύγκριση των ορίων φόρτισης με βάση την τιμή ενός σήματος επίτρεψης που καθορίζεται από την ικανοποίηση ή όχι των ορίων φόρτισης. Ο τρόπος που προκύπτει η τιμή της επίτρεψης θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

Στη συνέχεια, λαμβάνουμε το σήμα ρευμάτων του δικτύου i_{RST} από το PCC και εκτελούμε μετασχηματισμό Park σε dq πλαίσιο αναφοράς, που περιστρέφεται με μια συγχρονική ταχύτητα η οποία καθορίζεται από το PLL, το οποίο λαμβάνοντας ως είσοδο την τάση v_{RST} του δικτύου, παρατηρεί την συχνότητα f και τη γωνία θ και τη διοχετεύει στο μετασχηματισμό Park ώστε τα ρεύματα i_d, i_q να είναι συγχρονισμένα. Σύμφωνα με τη σχέση 3.5.5α θα ισχύει²:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.2.5)$$

Στη συνέχεια τα ρεύματα i_d, i_q συγκρίνονται με τα ρεύματα αναφοράς i_{d}^*, i_{q}^* και το σφάλμα σύγκρισης:

$$\begin{aligned} e_d &= i_{d}^* - i_d \\ e_q &= i_{q}^* - i_q \end{aligned} \quad (4.2.6)$$

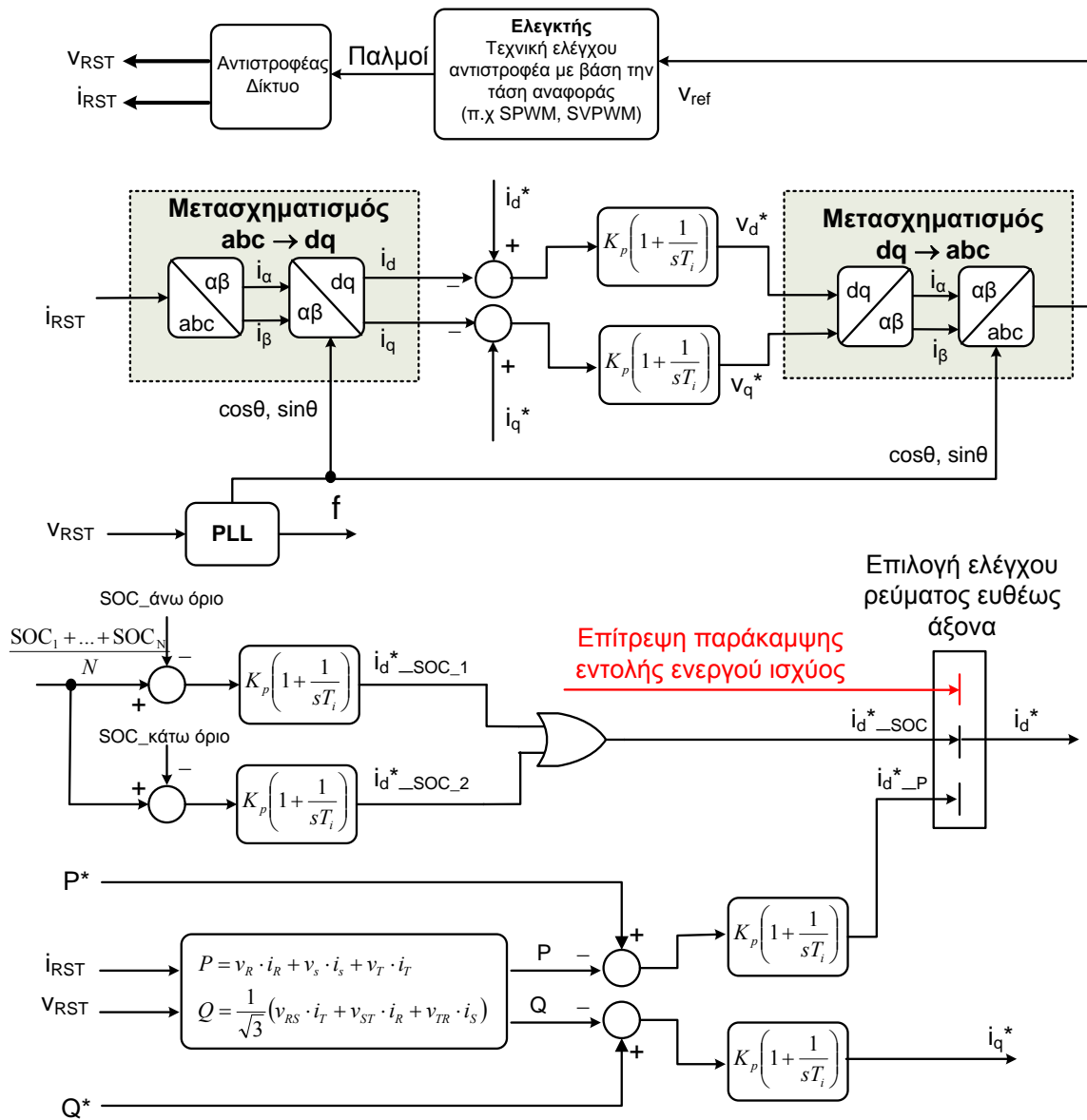
Γίνεται είσοδος σε έναν άλλο PI ελεγκτή από τον οποίο παράγονται τα σήματα αναφοράς τάσης v_{d}^*, v_{q}^* σύμφωνα με τις σχέσεις:

² Η μηδενική συνιστώσα i_o δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς και αναφέρεται για να τονίσει τη μοναδικότητα του μετασχηματισμού

$$v_d^* = K_p(i_d^* - i_d) + \int K_I(i_d^* - i_d) \quad (4.2.7\alpha)$$

$$v_q^* = K_p(i_q^* - i_q) + \int K_I(i_q^* - i_q) \quad (4.2.7\beta)$$

Στη συνέχεια εκτελείται αντίστροφος μετασχηματισμός Park σε abc τριφασικό πλαίσιο με γωνία που καθορίζεται από το PLL, το οποίο λαμβάνοντας ως είσοδο την τάση v_{RST} του δικτύου, παρατηρεί την συχνότητα f και τη γωνία θ και τη διοχετεύει στο μετασχηματισμό ώστε η τάση v_{ref} να είναι συγχρονισμένη με το δίκτυο.



Σχήμα 4.3: Έλεγχος P – Q ενεργού και άεργου ισχύος του συστήματος BESS με παραγωγή της τάσης v_{ref} ως είσοδο αναφοράς στον ελεγκτή παραγωγής των παλμών του αντιστροφέα

Το διάνυσμα της τάσης αναφοράς παράγεται μέσω της σχέσης 3.5.5β.

$$\begin{bmatrix} v_{ref\ a} \\ v_{ref\ b} \\ v_{ref\ c} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \\ v_o \end{bmatrix} \quad (4.2.8)$$

Κατ’ αυτό τον τρόπο παράγεται η τάση αναφοράς Vref η οποία αποτελεί είσοδο στον ελεγκτή που υλοποιεί μια τεχνική ελέγχου των παλμών του αντιστροφέα. Έτσι παράγεται η επιθυμητή ισχύς. Μάλιστα το σύστημα PLL ενισχύει τη δυναμική ευστάθεια του συστήματος αφού είναι λιγότερο ευαίσθητο σε έντονα μεταβατικά φαινόμενα από ότι άλλες μέθοδοι εκτίμησης της συχνότητας όπως η Zero Peak Detection [3]. Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του ελέγχου P-Q μέσω της τάσης αναφοράς.

Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η ακριβής προσαρμογή και εκτίμηση της γωνίας και της συχνότητας του δικτύου σε συνδυασμό με την εύκολη ρύθμιση μέσω του PI ελεγκτή. Επιπλέον όπως θα δούμε, επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση και ενίσχυση της ευστάθειας του συστήματος μέσα από την ικανοποίηση της προδιαγραφής Fault ride through. Το μειονέκτημα στη χρησιμοποίηση του PLL με αυτή την τεχνική ελέγχου είναι η χαμηλή απόδοση στην περίπτωση ασύμμετρων καταστάσεων του δικτύου ή στην περίπτωση μεγάλων σφαλμάτων, όπου η γωνία ισχύος είναι δύσκολο να εκτιμηθεί. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τον έλεγχο P – Q στην περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιούμε το PLL και θα δούμε τους λόγους που το PLL υπερτερεί.

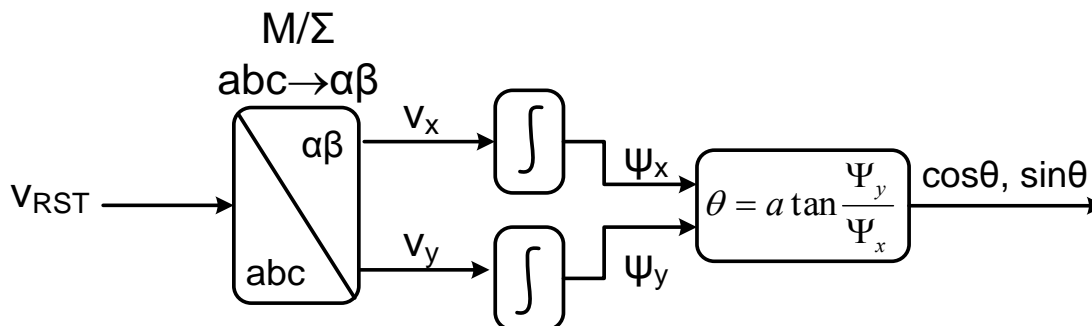
4.2.2 Έλεγχος P – Q μέσω της τάσης αναφοράς χωρίς τη χρήση PLL

Στην ενότητα αυτή, θα αναδείξουμε τα μειονεκτήματα των άλλων τεχνικών εκτίμησης της φάσης και της γωνίας της τάσης και θα αιτιολογήσουμε γιατί επιλέξαμε το PLL για το συγχρονισμό των πλαισίων αναφοράς. Ο συγχρονισμός του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς με το σύστημα των τάσεων επιτυγχάνεται μόνο εφόσον το πλαίσιο στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ίδιας τιμής με την κυκλική συχνότητα της τάσης[4-6]. Πρέπει δηλαδή η γωνία πλαισίου - συστήματος τάσεων να είναι συνεχώς σταθερή, ώστε το διάνυσμα των τάσεων να είναι ακίνητο ως προς το πλαίσιο αναφοράς.

Επισημαίνουμε ότι η πληροφορία της φάσης πρέπει να είναι εξαιρετικά ακριβής, διότι σφάλμα στην εκτίμησή της οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα στα υπολογιζόμενα από το μετασχηματισμό μεγέθη. Τέτοια σφάλματα σε ένα σύστημα ελέγχου μπορεί να είναι πολύ σοβαρά και να προκαλέσουν με τη σειρά τους αστάθεια στην έξοδο του συστήματος και άρα στη λειτουργία του μετατροπέα.

4.2.2.1 Εκτίμηση γωνίας του δικτύου μέσω εικονικής ροής

Αν δε χρησιμοποιηθεί το PLL, τότε η γωνία του δικτύου εκτιμάται μέσω μιας εικονικής ροής, που προκύπτει από την ολοκλήρωση της τάσης του δικτύου. Η περίπτωση αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4 .



Σχήμα 4.4: Εκτίμηση της γωνίας θ του δικτύου χωρίς τη χρήση PLL

Σε αυτή την περίπτωση, η τάση v_{RST} του δικτύου μετασχηματίζεται σύμφωνα με το μετασχηματισμό Clarke σε διφασικό στατό πλαίσιο αναφοράς $\alpha\beta$ ως εξής:

$$\begin{aligned} v_\alpha &= v_a \\ v_\beta &= \frac{2v_b + v_a}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (4.2.9)$$

και στη συνέχεια παράγεται η εικονική ροή ψ_x, ψ_y με ολοκλήρωση των παραπάνω τάσεων ως εξής:

$$\psi_x(t) = \int v_x(t) dt \quad (4.2.10\alpha)$$

$$\psi_y(t) = \int v_y(t) dt \quad (4.2.10\beta)$$

και στη συνέχεια υπολογίζεται η γωνία θ μέσω της αντίστροφης εφαπτομένης:

$$\theta = a \tan \frac{\Psi_y}{\Psi_x} \quad (4.2.11)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το ημίτονο και το συνημίτονο της γωνίας και διοχετεύεται στο μετασχηματισμό, ώστε η τάση v_{ref} να είναι συγχρονισμένη με το δίκτυο όπως περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο.

Με την τεχνική αυτή το μεγάλο μειονέκτημα είναι ότι η γωνία θ θα βρίσκεται απλά στο ίδιο τεταρτημόριο με τη γωνία της τάσης του δικτύου, οπότε είναι σίγουρο ότι

το PLL είναι πολύ ακριβέστερο και έχει μεγαλύτερη απόδοση σε αυτό τον τομέα, κυρίως λόγω της χρήσης του φίλτρου κλειστού βρόχου και του πολυμεταβλητού φίλτρου. Χωρίς τη χρησιμοποίηση PLL, η δυναμική του συστήματος είναι αρκετά μειωμένη και είναι δύσκολο να ρυθμιστεί.

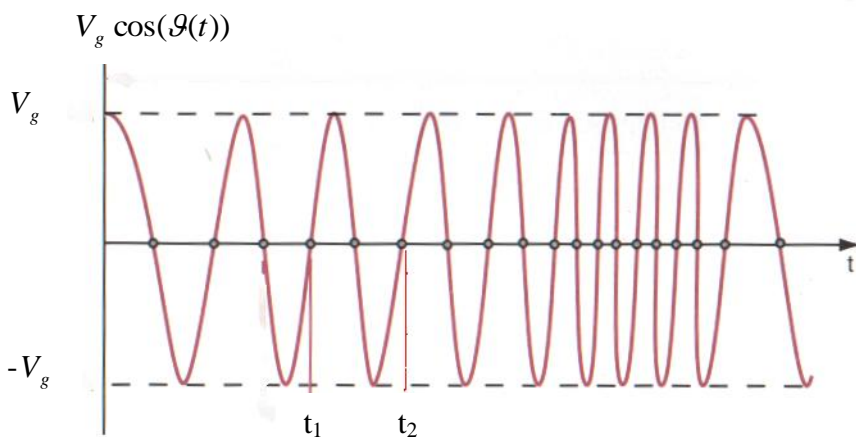
Απ' την άλλη πλευρά, το σύστημα αυτό δουλεύει καλύτερα από το PLL σε περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλη παραμόρφωση στην τάση του δικτύου (THD>10%) , αφού η ζώνη σφάλματος γωνίας του εν λόγω συστήματος είναι αυξημένη. Γενικότερα βέβαια η τεχνική αυτή στην περίπτωση παραμορφώσεων είναι πιο σθεναρή, αλλά σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να ξεπεράσει την απόδοση του PLL.

4.2.2.2 Αποδιαμόρφωση με χρήση ανιχνευτή μηδενισμών (Zero Crossing detection)

Η πληροφορία για τη φάση του σήματος περιέχεται στα σημεία όπου το σήμα μηδενίζεται και ονομάζονται σημεία διασταύρωσης με το μηδέν. Έστω ότι η τάση του δικτύου περιγράφεται από ένα σήμα της μορφής :

$$\begin{aligned}
 v_g &= V_g \cos(\vartheta(t)) = V_g \cos\left(\int_0^t \omega(\tau) d\tau + \vartheta(0)\right) = V_g \cos\left(\int_0^t 2\pi(f + f(\tau)) d\tau + \vartheta(0)\right) \\
 &= V_g \cos\left(2\pi \int_0^t (f + \Delta f \cdot g(\tau)) d\tau + \vartheta(0)\right) = V_g \cos\left(2\pi f t + 2\pi \Delta f \int_0^t g(\tau) d\tau + \vartheta(0)\right) \quad (4.2.12)
 \end{aligned}$$

Η συχνότητα του δικτύου είναι μεταβαλλόμενη και εκφράζεται σαν άθροισμα δύο συχνοτήτων, μίας σταθερής των 50 Hz και μιας μεταβαλλόμενης $f(t) = \Delta f \cdot g(t)$. Αν το $g(t)$ είναι ένα περιοδικό σήμα μοναδιαίου πλάτους τότε η συχνότητα του δικτύου κυμαίνεται μεταξύ $f - \Delta f$ και $f + \Delta f$, δηλαδή αν είναι $\Delta f = 1$ Hz, τότε η συχνότητα είναι 50 ± 1 Hz.



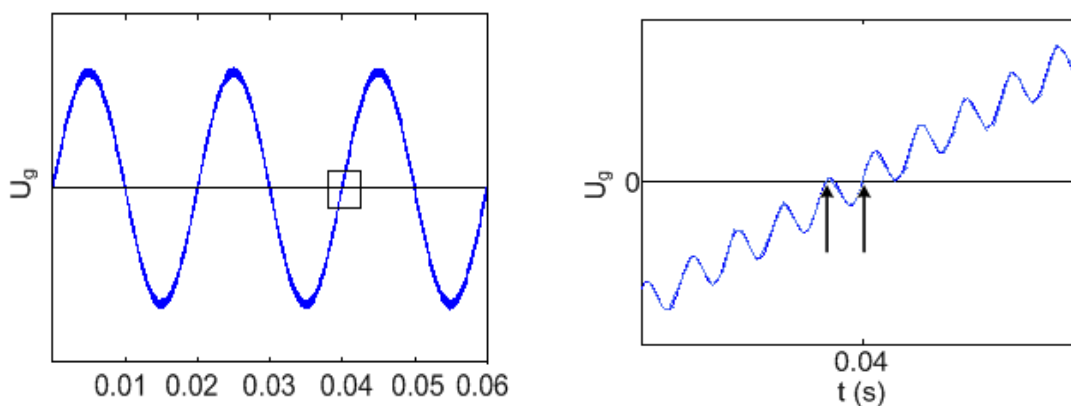
Σχήμα 4.5: Εκτίμηση της φάσης με χρήση ανιχνευτή μηδενικών (Zero Crossing Detector)

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ανιχνεύει τους μηδενισμούς του σήματος V_g που συμβαίνουν όταν το σήμα έχει θετική κλίση. Επομένως αν δύο τέτοιοι διαδοχικοί μηδενισμοί συμβαίνουν σε χρόνους t_1 και t_2 , για τη φάση του σήματος $g(t)$ (σταθερό στο διάστημα t_1, t_2) ισχύει :

$$\begin{aligned} \vartheta(t_2) - \vartheta(t_1) = 2\pi &\Rightarrow 2\pi f(t_2 - t_1) + 2\pi \Delta f \int_{t_1}^{t_2} g(\tau) d\tau = 2\pi \Rightarrow \\ 2\pi f(t_2 - t_1) + 2\pi \Delta f g(t_1) \cdot (t_2 - t_1) = 2\pi &\Rightarrow 2\pi f + 2\pi \Delta f g(t_1) = \frac{2\pi}{t_2 - t_1} \quad (4.2.13) \\ 2\pi(f + \Delta f g(t_1)) = \frac{2\pi}{t_2 - t_1} &\Rightarrow 2\pi(f + f(t_1)) = \frac{2\pi}{t_2 - t_1} \Rightarrow \omega(t_1) = \frac{2\pi}{t_2 - t_1} \end{aligned}$$

Από τη σχέση (4.2.13) προκύπτει η κυκλική συχνότητα ω της τάσης του δικτύου και η φάση ϑ στη συνέχεια προκύπτει από το ολοκλήρωμα $\int_0^t \omega(\tau) d\tau + \vartheta(0)$ [15].

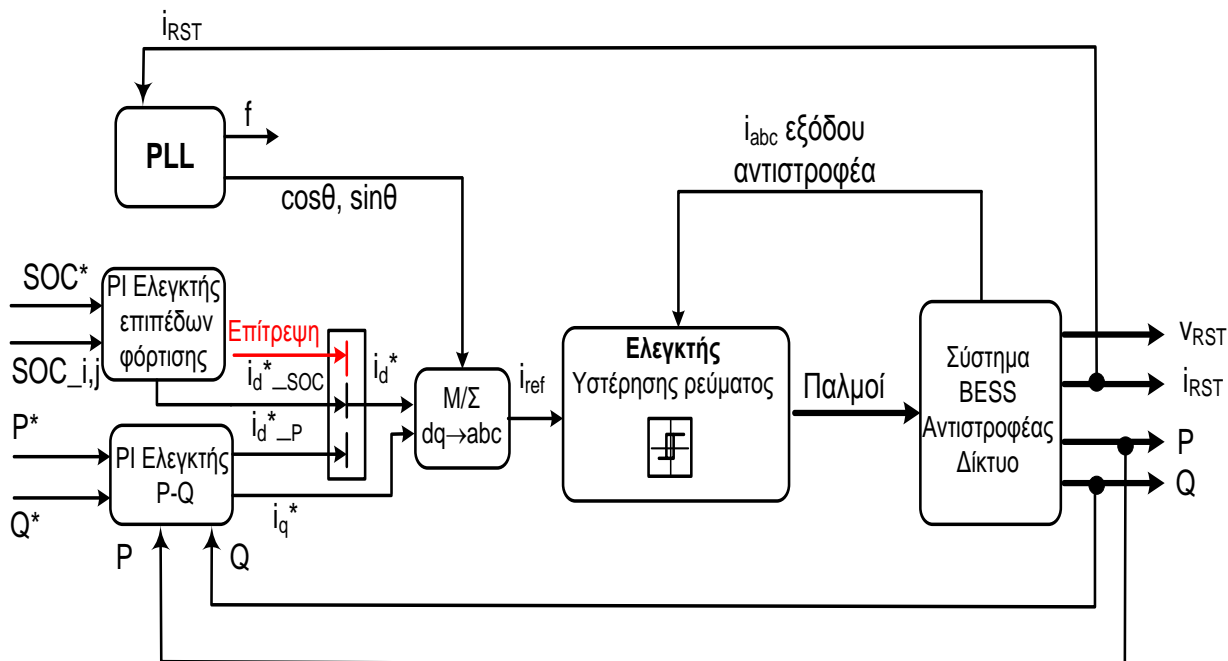
Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν μπορούν να εκτιμηθούν οι γρήγορες μεταβολές στη συχνότητα. Πιο σοβαρό μειονέκτημα είναι η ακρίβεια της μεθόδου όταν υπάρχουν διαταραχές στο σήμα εισόδου όπως αρμονικές, γεγονός που είναι αρκετά σύνηθες. Αν το σήμα εισόδου περιέχει αρμονικές, τότε η εκτίμηση της συχνότητας μπορεί να είναι εσφαλμένη. Αν οι αρμονικές αναγκάζουν το σήμα να κάνει μια ταλάντωση κοντά στο σημείο μηδενισμού, τότε προκύπτουν δύο σημεία μηδενισμού υπό θετική κλίση και η μέθοδος κάνει λάθος στον υπολογισμό της συχνότητας όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6



Σχήμα 4.6: (α) Τάση δικτύου με αρμονικές
(β) Λεπτομέρεια της τάσης στο σημείο μηδενισμού της

4.2.3 Έλεγχος P - Q μέσω του ρεύματος αναφοράς με χρήση PLL

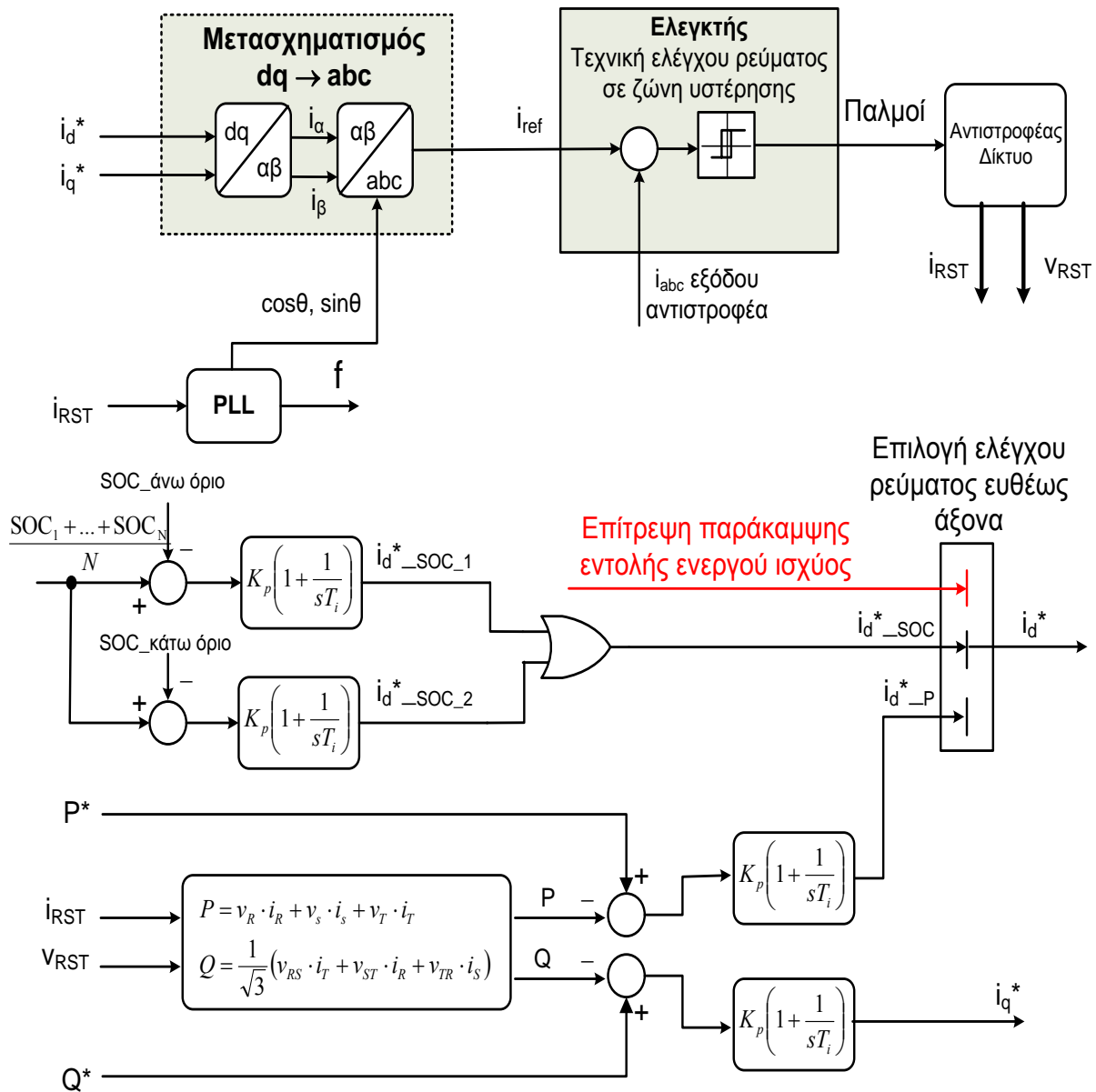
Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα της τεχνικής ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος με αναφορά το ρεύμα i_{ref} χρησιμοποιώντας το PLL .



Σχήμα 4.7: Δομικό διάγραμμα ελέγχου P – Q ενεργού και άεργου ισχύος του συστήματος BESS με παραγωγή του ρεύματος ως είσοδο αναφοράς στον ελεγκτή παραγωγής των παλμών του αντιστροφέα που χρησιμοποιεί τεχνική υστέρησης

Όμοια με πριν ,το σήμα αναφοράς i_d^* θα προκύψει είτε από τη σύγκριση των ισχύων, είτε από τη σύγκριση των ορίων φόρτισης με βάση την τιμή ενός σήματος επίτρεψης που καθορίζεται από την ικανοποίηση ή όχι των ορίων φόρτισης. Στη συνέχεια, εκτελούμε αντίστροφο μετασχηματισμό Park σε abc τριφασικό πλαίσιο αναφοράς, με γωνία που καθορίζεται από το PLL, το οποίο λαμβάνοντας ως είσοδο το ρεύμα i_{RST} του δικτύου (και όχι την τάση v_{RST}), παρατηρεί την συχνότητα f και τη γωνία θ και τη διοχετεύει στο μετασχηματισμό ώστε το ρεύμα i_{ref} να είναι συγχρονισμένο με το δίκτυο.

$$\begin{bmatrix} i_{ref\ a} \\ i_{ref\ b} \\ i_{ref\ c} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \\ i_o \end{bmatrix} \quad (4.2.14)$$



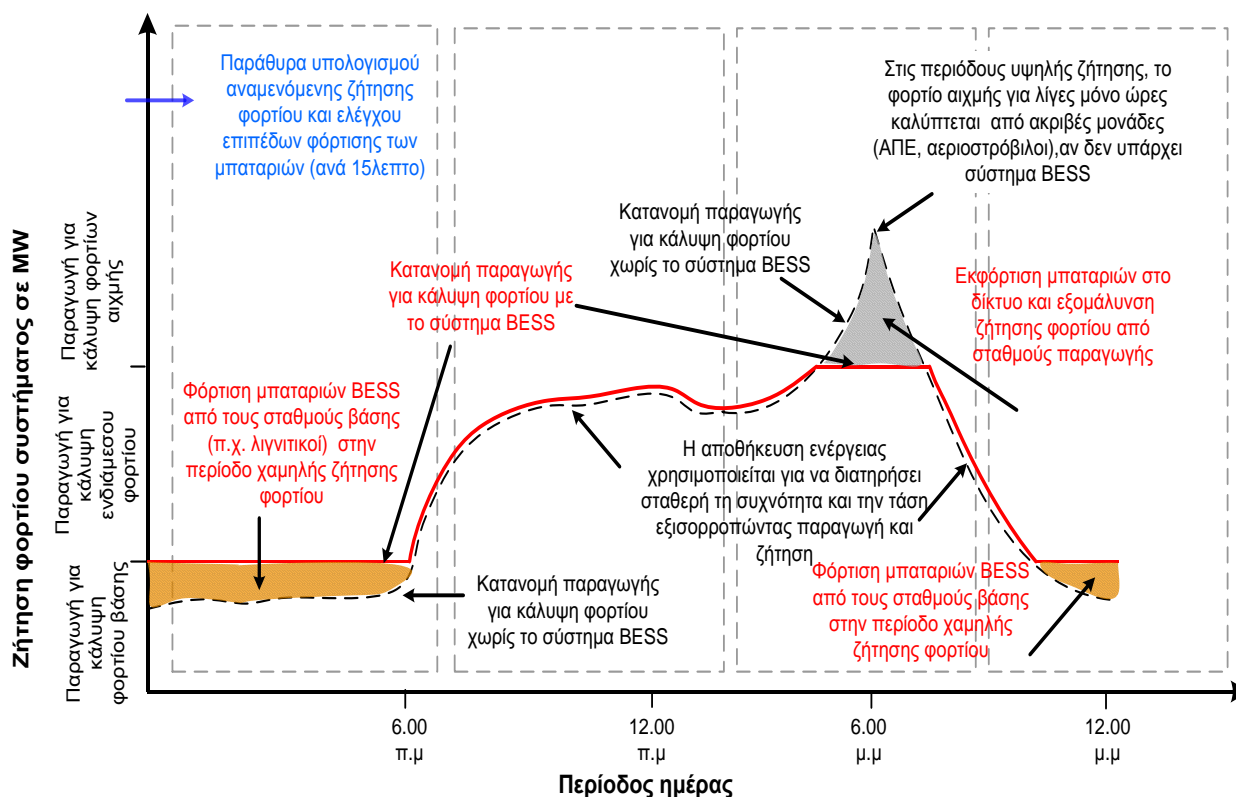
Σχήμα 4.8: Έλεγχος P – Q ενεργού και άεργου ισχύος του συστήματος BESS με παραγωγή του ρεύματος I_{ref} ως είσοδο αναφοράς στον ελεγκτή παραγωγής των παλμών του αντιστροφέα που χρησιμοποιεί τεχνική βρόχου υστέρησης

Στη συνέχεια λαμβάνονται τα ρεύματα εξόδου του αντιστροφέα (πριν το φίλτρο), i_{abc} και συγκρίνονται με το ρεύμα αναφοράς I_{ref} , ενώ το σφάλμα περνά μέσα από βρόχο υστέρησης παράγοντας του παλμούς του αντιστροφέα. Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του ελέγχου P – Q μέσω του ρεύματος αναφοράς.

Στην επόμενη παράγραφο θα εξετάσουμε τον έλεγχο στην περίπτωση παράκαμψης της εντολής άεργου ισχύος, για την ικανοποίηση των ορίων φόρτισης και θα δώσουμε τον τρόπο με τον οποίο προκύπτει το σήμα επίτρεψης.

4.3 Σύστημα ελέγχου στην περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος για την ικανοποίηση των ορίων φόρτισης των συσσωρευτών

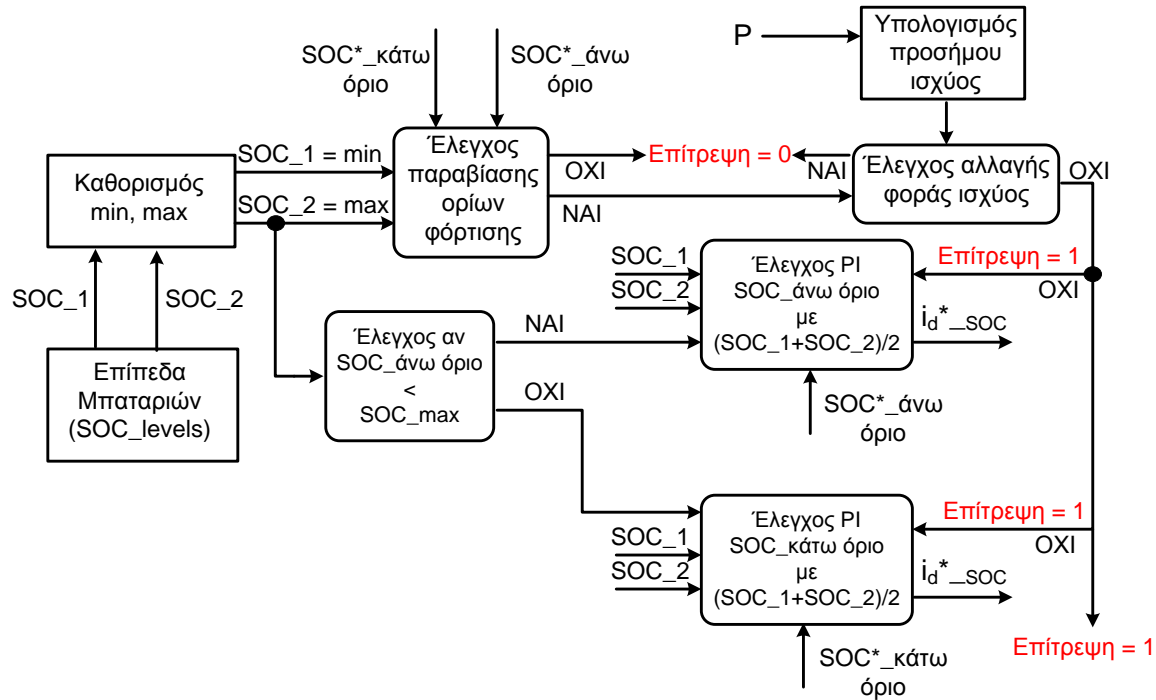
Στο κεφάλαιο 3.2, εξετάσαμε την εφαρμογή του συστήματος BESS στην εξομάλυνση φορτίου και στην αποκοπή αιχμών. Ένα βασικό χαρακτηριστικό του συστήματος BESS για την επιτέλεση αυτής της εφαρμογής είναι η προγνωστικότητα, το γεγονός δηλαδή ότι το σύστημα θα πρέπει να κρατάει τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών σε τιμές τέτοιες, ούτως ώστε να μπορεί να τροφοδοτήσει ισχύ όχι την υπάρχουσα χρονική στιγμή που δίνεται η εντολή, αλλά σε μια μεγαλύτερη αιχμή που προβλέπεται στο μέλλον. Για λόγους πληρότητας της περιγραφής παρουσιάζουμε την πολιτική αυτή ξανά στο σχήμα 4.9.



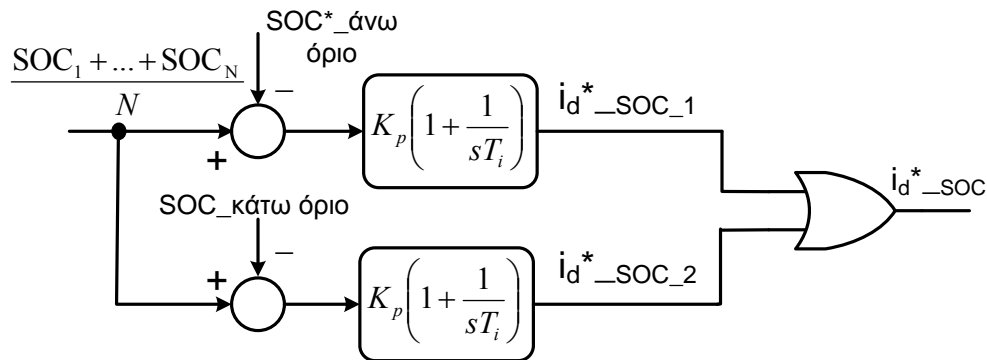
Σχήμα 4.9: Εκφόρτιση συσσωρευτών σε μελλοντική χρονική στιγμή όπου προβλέπεται ότι θα παρουσιαστεί μεγαλύτερη αιχμή ζήτησης φορτίου

Για την επίτευξη της παραπάνω λειτουργίας ο προτεινόμενος μηχανισμός είναι ο έλεγχος των ορίων φόρτισης των συσσωρευτών και η καθιέρωση περίπτωσης λειτουργίας παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος για την ικανοποίηση αυτών των ορίων.

Στην προηγούμενη παράγραφο παρατηρήσαμε ότι η ενεργή συνιστώσα του ρεύματος αναφοράς μπορούσε να προκύψει είτε από τη σύγκριση των ισχύων, είτε από τη σύγκριση των ορίων φόρτισης με βάση την τιμή ενός σήματος επίτρεψης. Η τιμή του σήματος επίτρεψης καθορίζεται από τον αλγόριθμο παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10.



(α)



(β)

Σχήμα 4.10: (α) Έλεγχος τιμής σήματος επίτρεψης για λειτουργία παράκαμψης εντολής ενεργού ισχύος προκειμένου το σύστημα να ικανοποιήσει τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών (β) Υλοποίηση με PI ελεγκτή και πύλη και λογικούς τελεστές

Ο παραπάνω αλγόριθμος έχει ως εισόδους τα επίπεδα των συσσωρευτών (SOC_levels) καθώς και τα όρια φόρτισης $SOC_άνω\ όριο$ και $SOC_κάτω\ όριο$.

Παράλληλα έχει είσοδο τη μετρούμενη ενεργό ισχύ από την οποία εξάγεται η φορά της (αν είναι από η προς το σύστημα BESS) μετρώντας το πρόσημο της.³

Στη συνέχεια καθορίζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή από τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών τη δεδομένη χρονική στιγμή και ελέγχεται αν παραβιάζονται τα όρια φόρτισης. Αν δε παραβιάζονται, η επίτρεψη παίρνει την τιμή 0 και το ρεύμα $i_d^* = i_{d_P}^*$, που καθορίζεται από την εντολή ενεργού ισχύος. Αν όμως παραβιάζονται τα όρια και ισχύει οπωσδήποτε η προϋπόθεση ότι δεν άλλαξε η φορά της ενεργού ισχύος, τότε το σήμα της επίτρεψης παίρνει την τιμή 1 και τότε παρακάμπτεται η εντολή ενεργού ισχύος και ισχύει ότι το ρεύμα $i_d^* = i_{d_SOC}^*$. Το ρεύμα αυτό παράγεται από έναν από τους δύο ελεγκτές PI που συγκρίνουν ένα όριο επιπέδων φόρτισης κάθε φορά (*SOC_άνω όριο* ή *SOC_κάτω όριο*) με την επιθυμητή τιμή, που είναι τώρα ο μέσος όρος των επιπέδων φόρτισης των συσσωρευτών τη δεδομένη στιγμή, $\frac{SOC_1 + \dots + SOC_N}{N}$. Στο σχήμα 4.10α παρουσιάζονται 2 επίπεδα φόρτισης για τη διευκόλυνση παρουσίασης του ελέγχου.

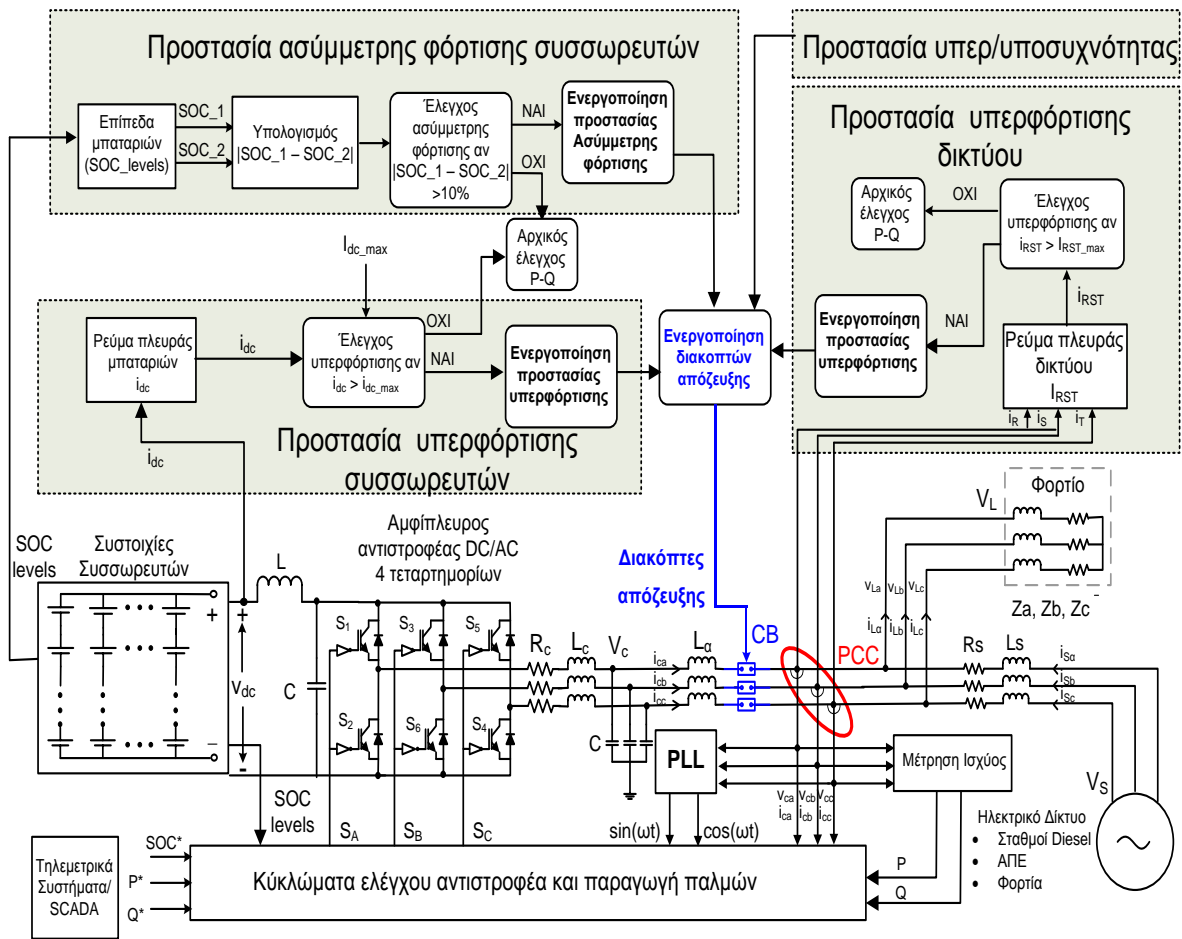
4.4 Έλεγχος προστασίας συστήματος BESS

Το σύστημα BESS ενσωματώνει διαφορετικού τύπου προστασίες η ενεργοποίηση των οποίων δίνει σήμα σε ηλεκτρονόμους προστασίας. Όπως αναφέραμε στην παράγραφο 3.1.1 υπάρχουν πολλών ειδών προστασίες που οι περισσότερες επενεργούν στον διακόπτη απόζευξης της εγκατάστασης (Circuit Breaker - CB). Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- Προστασία υπερφόρτισης συσσωρευτών
- Προστασία υπερφόρτισης δικτύου
- Προστασία Ασύμμετρης φόρτισης συσσωρευτών
- Προστασία υποσυχνότητας
- Προστασία υπερσυχνότητας

Η προστασία ασύμμετρης φόρτισης των συσσωρευτών μπορεί να ελεγχθεί εξετάζοντας τη διαφορά $|SOC_i - SOC_j|$ με ένα όριο π.χ. 10%. Οι έλεγχοι υπερφόρτισης μπορούν να πραγματοποιηθούν συγκρίνοντας τα ρεύματα i_{dc} , i_{RST} από την πλευρά των συσσωρευτών και του δικτύου αντίστοιχα, με συγκεκριμένα όρια. Το σχήμα 4.11 απεικονίζει τις προστασίες που επενεργούν στο διακόπτη απόζευξης της εγκατάστασης.

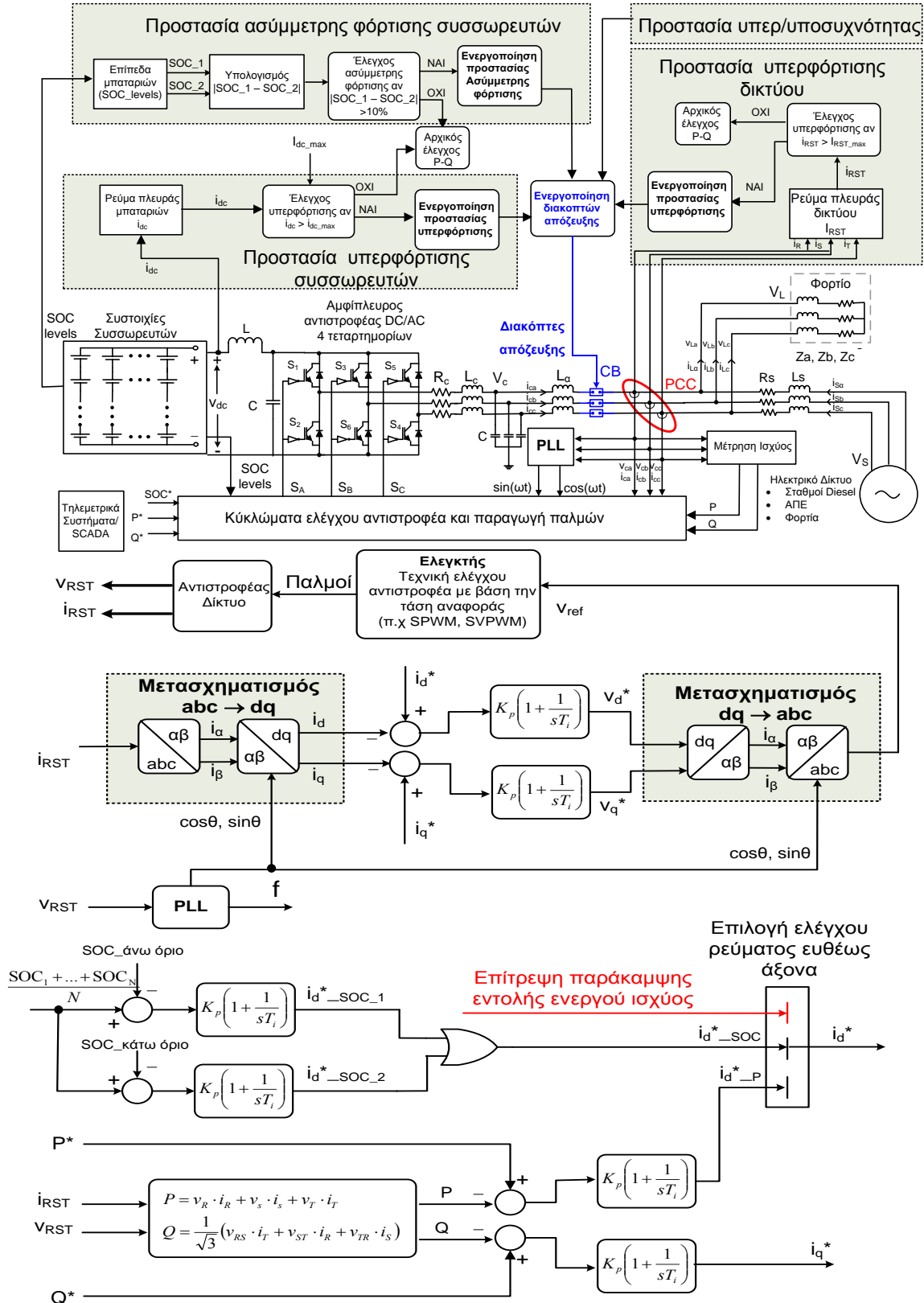
³ Η σύμβαση κατεύθυνσης της ροής ενεργού και άεργου ισχύος έχει μελετηθεί στην παράγραφο 3.3.1



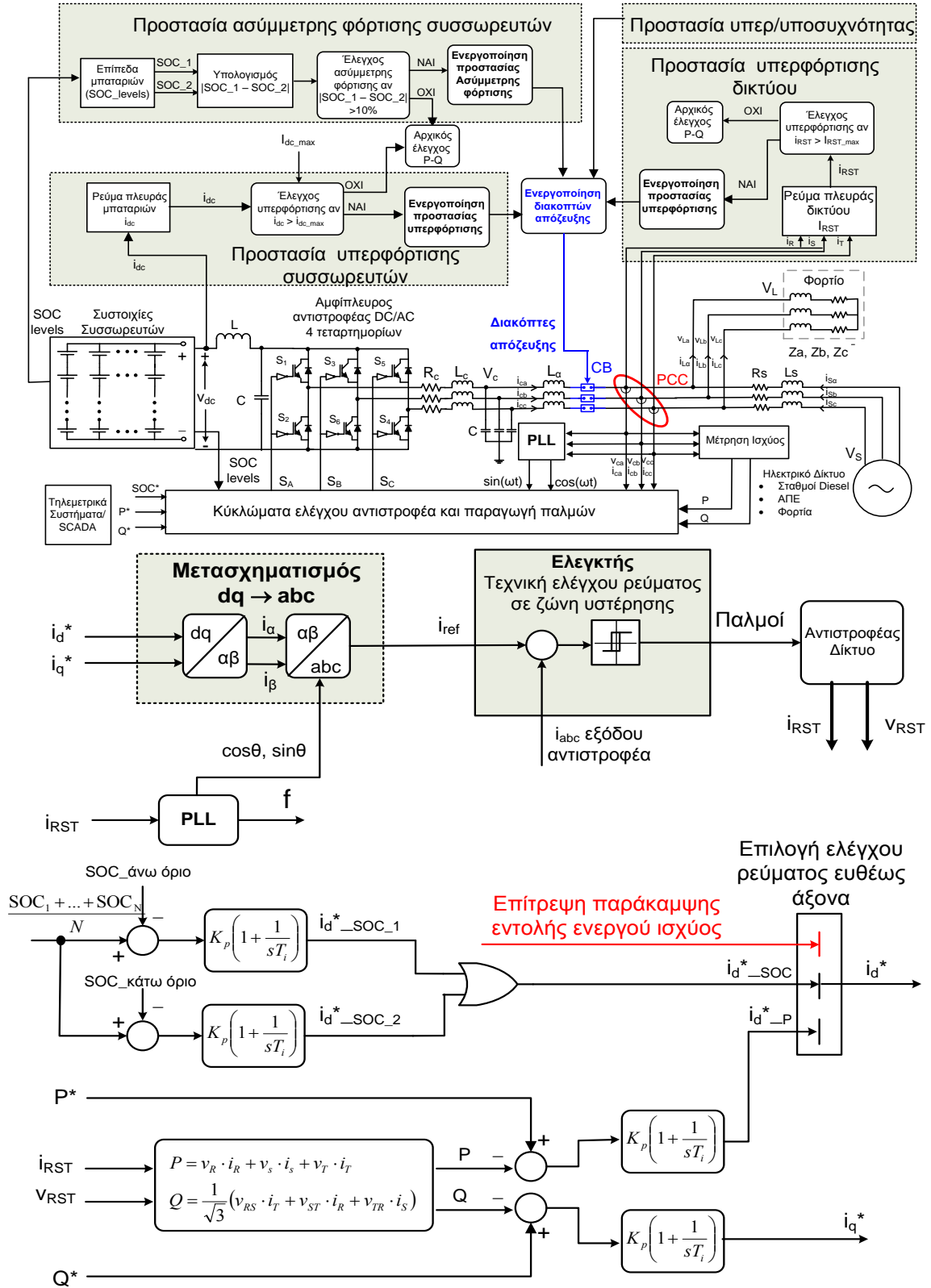
Σχήμα 4.11: Προστασίες υπερφόρτισης δικτύου, συσσωρευτών και ασύμμετρης φόρτισης συσσωρευτών που επενεργούν στον αυτόματο διακόπτη απόζευξης της εγκατάστασης.

4.5 Δομή και διαγράμματα ολοκληρωμένου συστήματος BESS

Για λόγους διευκόλυνσης του αναγνώστη, αλλά και για μια συνολική θεώρηση του συστήματος ελέγχου στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τα συνολικά δομικά διαγράμματα του συστήματος BESS που περιλαμβάνουν τόσο το κύκλωμα ισχύος όσο και το σύστημα ελέγχου. Στα σχήματα 4.12 και 4.13 αντίστοιχα παρουσιάζονται δύο ομάδες από δομικά διαγράμματα που περιλαμβάνουν τις δύο τεχνικές διανυσματικού ελέγχου P-Q με αναφορά είτε την τάση είτε το ρεύμα.



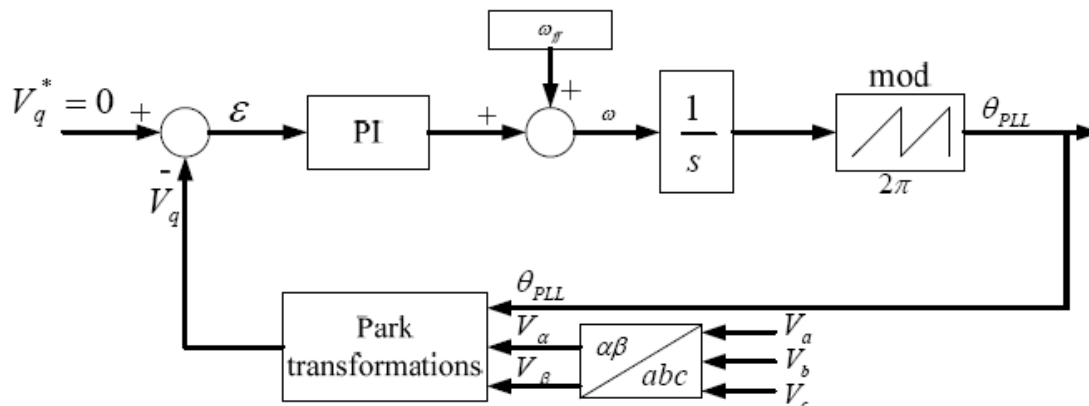
Σχήμα 4.12: Ολοκληρωμένο δομικό διάγραμμα προτεινόμενου συστήματος για εφαρμογή τεχνικής ελέγχου των παλμών με αναφορά το διάνυσμα τάσης (SPWM, SVPWM)



Σχήμα 4.13: Ολοκληρωμένο δομικό διάγραμμα προτεινόμενου συστήματος στην εφαρμογή τεχνικής ελέγχου των παλμών με αναφορά το διάνυσμα ρεύματος (HBCC)

4.6 Υπολογισμός παραμέτρων του PLL

Όπως περιγράψαμε στην παράγραφο 3.5 το PLL χρησιμοποιείται για να καθορίσει τη γωνία θ και τη συχνότητα του δικτύου [5,6]. Το δομικό διάγραμμα του τριφασικού PLL παρουσιάζεται στο σχήμα 4.14. Στην παράγραφο αυτή θα υπολογιστούν οι παράμετροι του PLL με βάση κάποια κριτήρια επίδοσης.



Σχήμα 4.14: Δομικό διάγραμμα τριφασικού PLL

Η συνάρτηση του PI ελεγκτή είναι :

$$P(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I} \right) \tag{4.6.1}$$

και το γραμμικοποιημένο μοντέλο του PLL είναι μια συνάρτηση δευτέρας τάξεως:

$$H(s) = \frac{K_p s + \frac{K_p}{T_I}}{s^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_I}} \tag{4.6.2}$$

όπου K_p είναι το αναλογικό και K_I το ολοκληρωτικό κέρδος.

Για να πετύχουμε μέγιστη υπερύψωση (overshoot) $M_p = 5\%$, ρυθμίζουμε το συντελεστή απόσβεσης $\zeta = 0.7$. Ο χρόνος αποκατάστασης t_s ρυθμίζεται ως μία περίοδος 50Hz, δηλαδή $t_s = 20ms$ ώστε να επιτυγχάνεται όριο ζώνης σφάλματος 1% στη μόνιμη απόκριση. Έτσι η ιδιοσυχνότητα ω_n υπολογίζεται από τη σχέση:

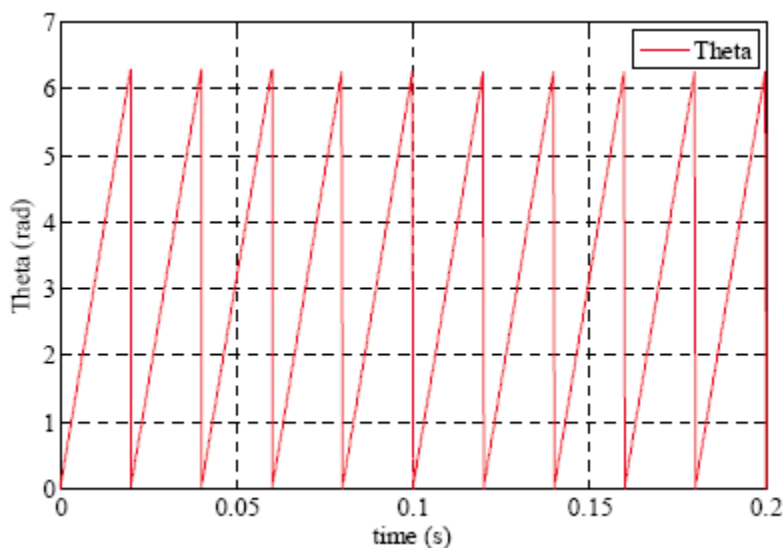
$$t_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} = 329rad / s \tag{4.6.3}$$

Συγκρίνοντας τη συνάρτηση του PLL με μια συνάρτηση δευτέρας τάξης λαμβάνουμε τα κέρδη K_p και K_I ως εξής:

$$K_p = 2\zeta\omega_n = 461 \quad (4.6.4)$$

$$\omega_n^2 = \frac{K_p}{T_I} = 0.0043 \quad (4.6.5)$$

Η έξοδος του PLL, δηλαδή η γωνία θ του δικτύου δίνεται στο διάγραμμα 4.15.



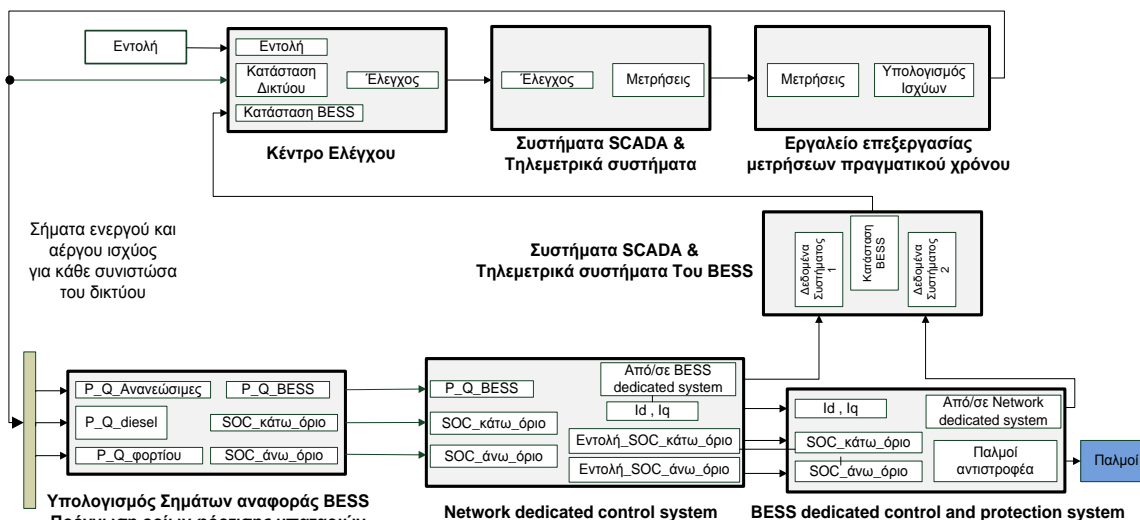
Σχήμα 4.15: Γωνία θ δικτύου ως έξοδος του PLL

4.7 Υλοποίηση συστήματος ελέγχου με χρήση δύο μικροεπεξεργαστών DSP σε διάταξη master-slave.

Στην παράγραφο αυτή θα προτείνουμε μέθοδο υλοποίησης της διάταξης ελέγχου που περιγράφηκε παραπάνω. Ο βασικός άξονας της υλοποίησης είναι η χρήση δύο συστημάτων, που το κάθε ένα θα είναι εστιασμένο στο σύστημα BESS και στο δίκτυο αντίστοιχα και τα οποία θα μπορούν να επικοινωνούν μέσω θυρών υπολογιστών ξενιστών. Τα συστήματα αυτά θα ελέγχονται από δύο DSP (Digital Signal Processor), καθένα από τα οποία θα έχει τις δικές του υπορουτίνες. Τέλος, θα προτείνουμε μέθοδο υλοποίησης του συστήματος σε επίπεδο hardware.

4.7.1 Δομικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης

Στο σχήμα 4.16 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα της διάταξης, το οποίο περιλαμβάνει τα δύο ελεγχόμενα από μικροεπεξεργαστές υποσυστήματα.



Σχήμα 4.16: Δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου της διάταξης αποθήκευσης το οποίο απεικονίζει τη διασύνδεση των ελεγχόμενων από DSP υποσυστημάτων

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, το σύστημα ελέγχου αξιοποιεί μετρήσεις από σημεία του δικτύου (σταθμοί παραγωγής και υποσταθμοί) στα οποία υπάρχει εγκατεστημένος μετρητικός και τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός. Επίσης τροφοδοτεί το κέντρο ελέγχου ενέργειας του δικτύου – μικροδικτύου με δεδομένα λειτουργίας του συστήματος. Αρχικά γίνεται ο προγραμματισμός φόρτισης /εκφόρτισης των συσσωρευτών, σύμφωνα με τη εφαρμογή εξομάλυνσης φορτίου και αποκοπής αιχμών για βέλτιστη οικονομική λειτουργία και υπολογίζονται τα απαιτούμενα σήματα αναφοράς P^* , Q^* , όπως και τα απαιτούμενα όρια φόρτισης (SOC_limits), εντός των οποίων πρέπει να διατηρηθεί το σύστημα ώστε να είναι δυνατή η τροφοδότηση πιθανών αιχμών του φορτίου που τα προγνωστικά μοντέλα υπολογίζουν.

Στη συνέχεια, τα σήματα αναφοράς ενεργού, άεργου ισχύος και ορίων φόρτισης διαβιβάζονται σε ένα σύστημα ‘εστιασμένο στο δίκτυο’ ή από εδώ και στο εξής ‘**Network dedicated control system**’. Το υποσύστημα αυτό ελέγχεται από ένα DSP. Οι λειτουργίες αυτού του συστήματος είναι να ελέγχει τη ροή ενεργού και άεργου ισχύος μεταξύ αντιστροφέα και BESS, ικανοποιώντας τις εντολές του κέντρου ελέγχου. Συνεπώς, παράγει τα ρεύματα αναφοράς ευθέως και εγκάρσιου άξονα που θα πρέπει να επιβάλλει ο ελεγκτής του αντιστροφέα ενώ διαβιβάζει και τα όρια φόρτισης του συστήματος.

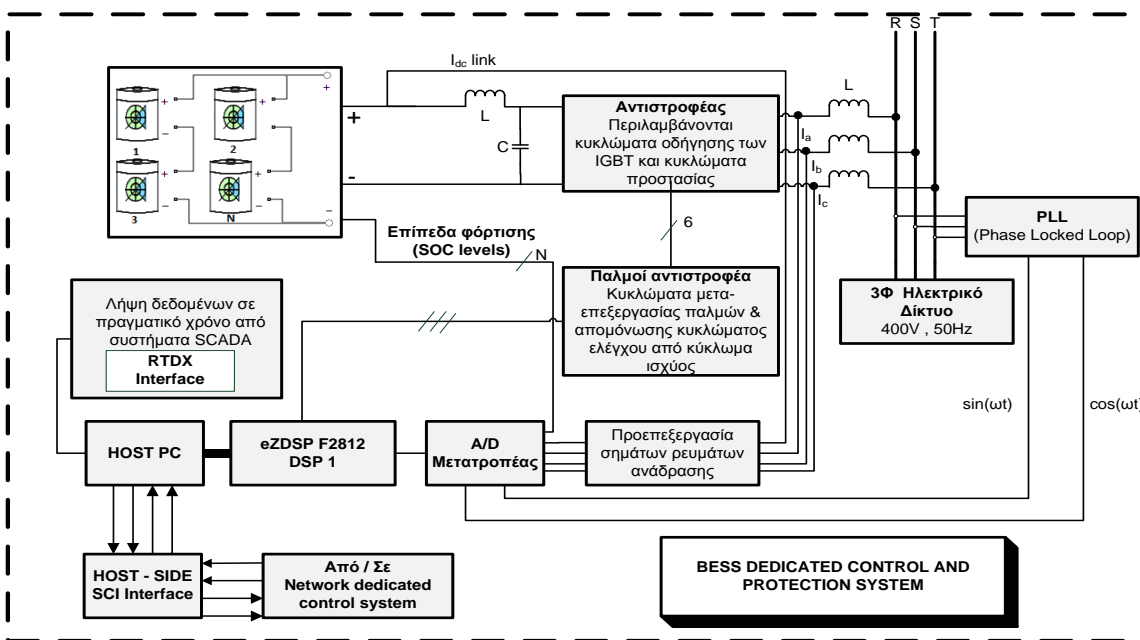
Τέλος, το σύστημα ‘εστιασμένο στις συσσωρευτές’ η από εδώ και στο εξής ‘**BESS dedicated control and protection system**’, παράγει τους παλμούς οδήγησης των ημιαγωγών IGBT του αντιστροφέα, ενώ παράλληλα ενσωματώνει διατάξεις προστασίας

αυτού και των συσσωρευτών από συνθήκες υπερφόρτισης ή αποσυγχρονισμού. Σε περίπτωση που το σύστημα διαγνώσει ότι οι εντολές που του διαβιβάζονται από το Network dedicated system δεν είναι δυνατό να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα, λόγω του ότι οι συσσωρευτές έχουν φτάσει τα όρια φόρτισης, παρακάμπτει αυτόματα την εντολή ενεργού ισχύος που του διαβιβάζεται για να ικανοποιήσει περιορισμούς που τίθεται στα όρια φόρτισης των συσσωρευτών.

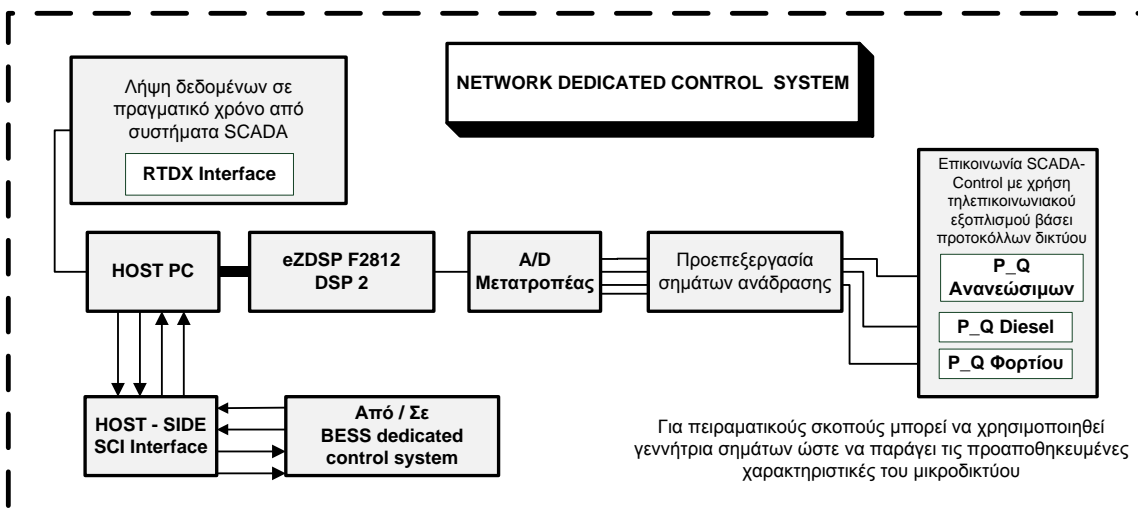
4.7.2 Υπορουτίνες DSP που συνιστούν τον αλγόριθμο ελέγχου

Όπως δείξαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το κύκλωμα ισχύος είναι τυπικό για τέτοια συστήματα και περιλαμβάνει συστοιχία συσσωρευτών, παθητικό φίλτρο φίλτρο στο dc bus και τριφασικό αντιστροφέα πηγής τάσης συνδεδεμένο στο δίκτυο μέσω κατάλληλης αυτεπαγωγής διασύνδεσης. Απαραίτητη βέβαια κρίνεται η εκτίμηση των ορίων φόρτισης των συσσωρευτών, πληροφορία που διαβιβάζεται κατάλληλα στο σύστημα ελέγχου. Γι' αυτό το σκοπό είναι απαραίτητη η αγορά του αντίστοιχου μετρητικού εξοπλισμού από τον κατασκευαστή των συσσωρευτών, ο οποίος θα βρίσκεται μόνιμα εγκατεστημένος στο χώρο των συσσωρευτών, παράγοντας τα κατάλληλα για το μικροεπεξεργαστή αναλογικά σήματα ανάδρασης (τάση ανάλογη του επιπέδου φόρτισης κάθε στοιχείου).

Εντούτοις, το κύκλωμα ελέγχου, που βασίζεται στη χρήση ψηφιακών επεξεργασιών σήματος, εμφανίζει ενδιαφέρον ως προς τη φιλοσοφία και τη μέθοδο υλοποίησης. Η βασική δομή του συστήματος ελέγχου απεικονίζεται στα σχήματα 4.17 και 4.18. Παρακάτω αναλύεται η φιλοσοφία του συστήματος αυτού και παρουσιάζεται λεπτομερώς η υλοποίηση των επιμέρους συνιστωσών.



Σχήμα 4.17: Δομικό διάγραμμα υλοποίησης του υποσυστήματος ‘BESS dedicated control and protection system’ που ελέγχεται από το πρώτο DSP (master – υψηλή προτεραιότητα)



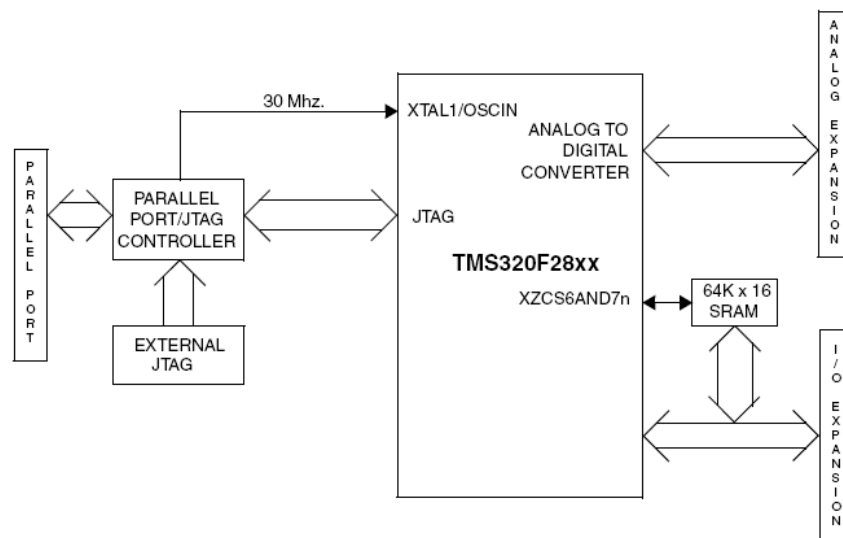
Σχήμα 4.18: Δομικό διάγραμμα υλοποίησης του υποσυστήματος ‘Network dedicated control system’ που ελέγχεται από το δεύτερο DSP (slave – χαμηλή προτεραιότητα)

Όπως παρουσιάζεται στα παραπάνω σχήματα, το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου είναι δομημένο ιεραρχικά. Αποτελείται από δύο κύρια υποσυστήματα, τα ‘BESS dedicated control and protection system’ και ‘Network dedicated control system’ τα οποία επικοινωνούν σε πραγματικό χρόνο μέσω σειριακών θυρών (SCI) των υπολογιστών ξενιστών των δύο μικροεπεξεργαστών (DSP 1 & DSP 2) που τα ελέγχουν. Τα δύο αυτά υποσυστήματα έχουν σχέση αφεντικού - δούλου (master – slave) με το πρώτο να είναι υψηλότερο στην ιεραρχία από το δεύτερο.

Το σύστημα ‘BESS dedicated control and protection system’ αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

i) Texas Instruments eZDSP F2812 DSP 1: Πρόκειται για ψηφιακό επεξεργαστή σήματος όπως παριστάνεται στο σχήμα 4.19. Ο προγραμματισμός του γίνεται σε MATLAB/Simulink, ενώ χρησιμοποιούνται και βελτιστοποιημένες βιβλιοθήκες κώδικα του μικροεπεξεργαστή [12]. Από τον κώδικα σε γλώσσα MATLAB παράγεται αυτόματα (χρήση προγράμματος μεταγλώττισης Code Composer Studio) ο κώδικας του προγράμματος σε γλώσσα C και φορτώνεται στη μνήμη του DSP. Ο μικροεπεξεργαστής επικοινωνεί με τον υπολογιστή ξενιστή μέσω παράλληλης θύρας. Μέσω του SCI interface παρέχεται δυνατότητα επικοινωνίας των υπολογιστών ξενιστών και κατ’ επέκταση διαφορετικών μικροεπεξεργαστών σε πραγματικό χρόνο, δυνατότητα που αξιοποιείται για την υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου.

ii) Μετρητικά συστήματα : Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των ρευμάτων στην έξοδο της συστοιχίας των συσσωρευτών και στην έξοδο του αντιστροφέα. Οι αναδράσεις ρευμάτων, αφού υποστούν κατάλληλη προ-επεξεργασία ώστε να είναι συμβατές με το A/D interface του μικροεπεξεργαστή, αξιοποιούνται για την προστασία του συστήματος συσσωρευτών και αντιστροφέα από υπερρεύματα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε καταστροφή εξοπλισμού.



Σχήμα 4.19: Δομικό διάγραμμα του επεξεργαστή σήματος eZDSP TM F2812 όπως παρέχεται από τον κατασκευαστή στο τεχνικό εγχειρίδιο του DSP

iii) Σύστημα PLL (Phase Locked Loop): Το PLL παρέχει στην έξοδό του αναλογικά και φιλτραρισμένα σήματα ημιτόνου που εισάγονται στον μικροεπεξεργαστή και χρησιμοποιούνται για το συγχρονισμό του αντιστροφέα με το δίκτυο. Παρ’ ότι το σύστημα εισάγει κόστος και πολυπλοκότητα στην υλοποίηση, κρίνεται σκόπιμη η ενσωμάτωσή του, καθώς αποσυγχρονισμός του αντιστροφέα από το δίκτυο θα ενεργοποιήσει κατάλληλες προστασίες. Καθώς λοιπόν απλούστερες μέθοδοι εκτίμησης της συχνότητας (π.χ Zero Peak Detection) είναι σχετικά λιγότερο ευσταθείς και ευαίσθητες σε έντονα μεταβατικά φαινόμενα, το σύστημα PLL αποτελεί πλεονεκτική λύση καθώς ενισχύει τη δυναμική ευστάθεια του συστήματος ενισχύοντας την προδιαγραφή Fault Ride Through.

iv) Κυκλώματα μετα-επεξεργασίας των παλμών οδήγησης του αντιστροφέα που παράγονται σε κατάλληλες ψηφιακές εξόδους του μικροεπεξεργαστή. Σε αρχικό στάδιο υλοποίησης προτείνεται η χρήση κλασικού τριφασικού αντιστροφέα δύο επιπέδων, ενώ αργότερα μπορούν να δοκιμαστούν μορφές cascade που όμως προσθέτουν πολυπλοκότητα στο σύστημα. Τα κυκλώματα μετα-επεξεργασίας των παλμών προσφέρουν τα εξής:

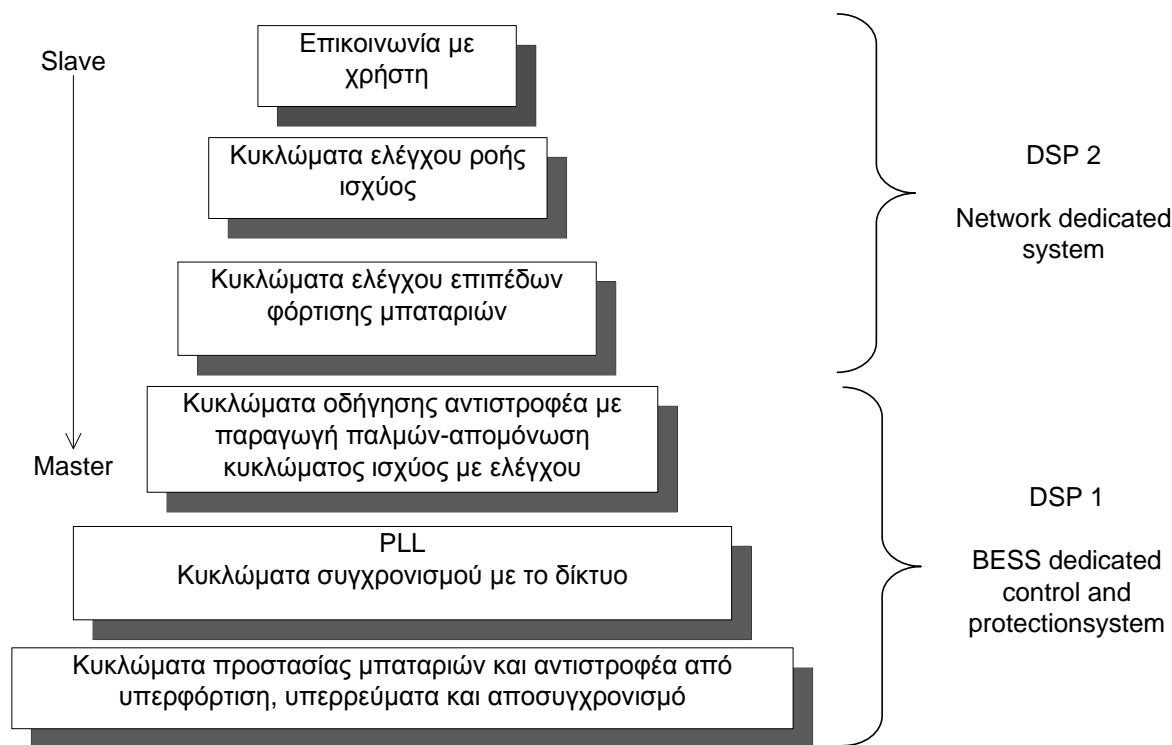
- Απομόνωση του κυκλώματος ελέγχου από το κύκλωμα ισχύος μέσω φωτοαπομόνωσης (optocoupling).
- Προστασία του μετασηματιστή από βραχυκύκλωμα σε περίπτωση λάθους παλμοδότησης λόγω λάθους προγραμματισμού ή αστοχίας του DSP. Για το λόγο αυτό παράγονται μόνο οι τρεις παλμοί οδήγησης του αντιστροφέα από το DSP ενώ οι συμπληρωματικοί τους παράγονται από ένα λογικό EX – OR κύκλωμα το οποίο υλοποιείται με φωτοδιόδους υψηλής ταχύτητας.

Το σύστημα ‘**Network dedicated system**’ αποτελείται αντίστοιχα από τα εξής υποσυστήματα:

i) **Μια γεννήτρια σήματος** που μπορεί να αναπαράγει καταγεγραμμένες κυματομορφές αιολικής παραγωγής, παραγωγής σταθμών βάσης και φορτίου, για την προσομοίωση των συστημάτων τηλειδιοποίησης και ελέγχου ενός πραγματικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Προφανώς στο πραγματικό σύστημα η επικοινωνία SCADA – control γίνεται με χρήση τεχνολογιών όπως BPL βάσει πρωτοκόλλων δικτύου. Ωστόσο δεν επηρεάζει τη φιλοσοφία της υλοποίησης και τη λειτουργία του συστήματος ελέγχου. Κρίνεται λοιπόν σκόπιμη για λόγους ευκολίας και απλότητας της υλοποίησης, η ανάγνωση αναλογικών σημάτων τα οποία παράγονται από γεννήτρια σήματος και περιλαμβάνουν πληροφορία για το στιγμιαίο ισοζύγιο παραγωγής κατανάλωσης στο δίκτυο μικροδίκτυο στο οποίο εφαρμόζεται το σύστημά μας. Ακόμα μεγαλύτερη απλότητα επιτυγχάνεται με τη χρήση προαποθηκευμένων στη μνήμη του DSP κυματομορφών.

ii) **Texas Instruments eZDSP F2812 DSP 2:** Αντίστοιχα με Texas Instruments eZDSP F2812 DSP 1 [12]. Το δεύτερο DSP υλοποιεί αλγόριθμο που δέχεται ως είσοδο μετρήσεις ισχύος από κομβικά σημεία του δικτύου και λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του συστήματος BESS (επίπεδο συσσωρευτών) και τη συχνότητα του δικτύου στο PCC με το BESS (μέσω επικοινωνίας των δύο dedicated υποσυστημάτων – SCI interface) παράγει τις εντολές ενεργού και άεργου ισχύος, όπως και τις εντολές των ορίων φόρτισης των συσσωρευτών και τα διαβιβάζει στο ‘BESS dedicated’ σύστημα.

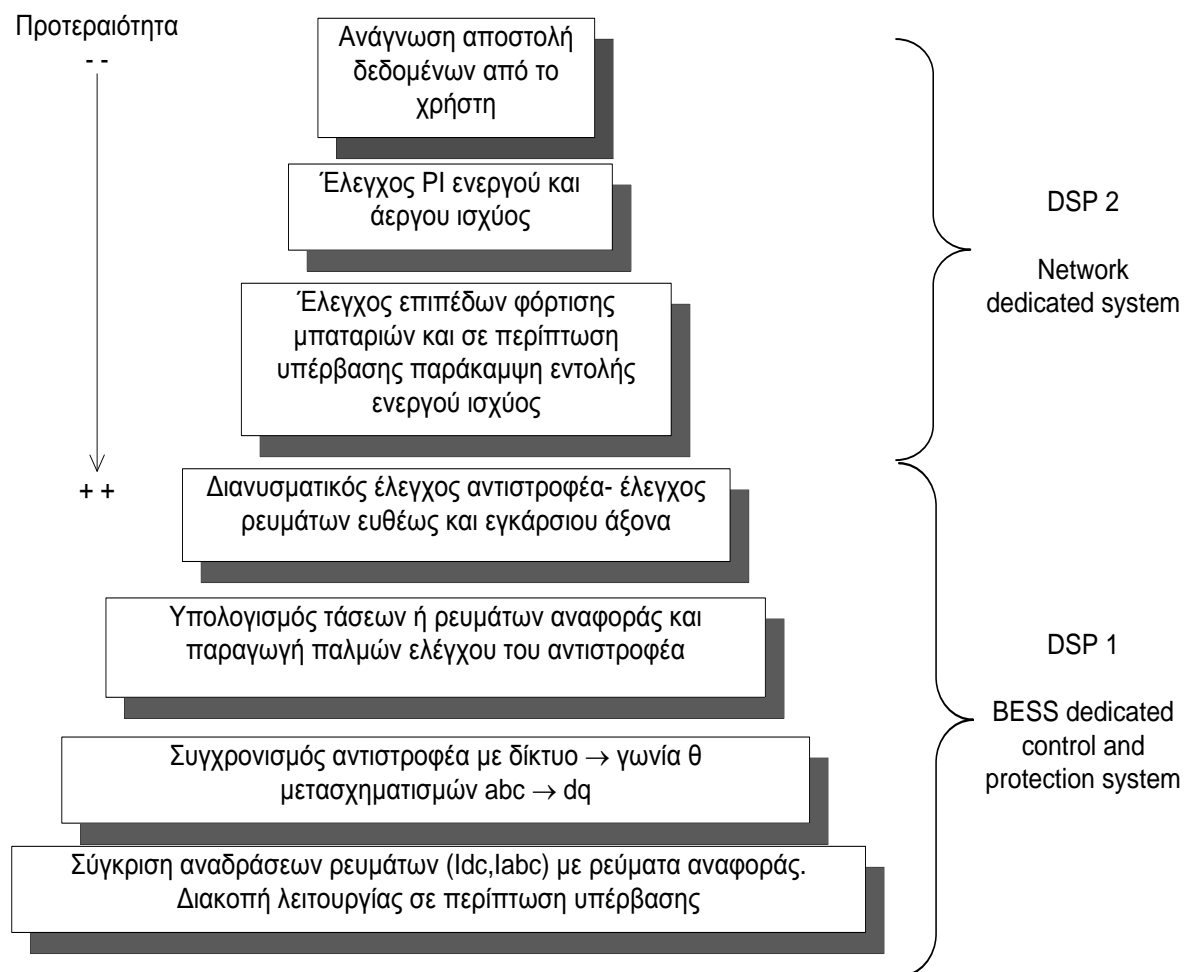
Η συσχέτιση των υποσυστημάτων της πειραματικής με master- slave κριτήρια φαίνεται στο σχήμα 4.20.



Σχήμα 4.20: Συσχέτιση υποσυστημάτων πειραματικής διάταξης με κριτήρια master - slave

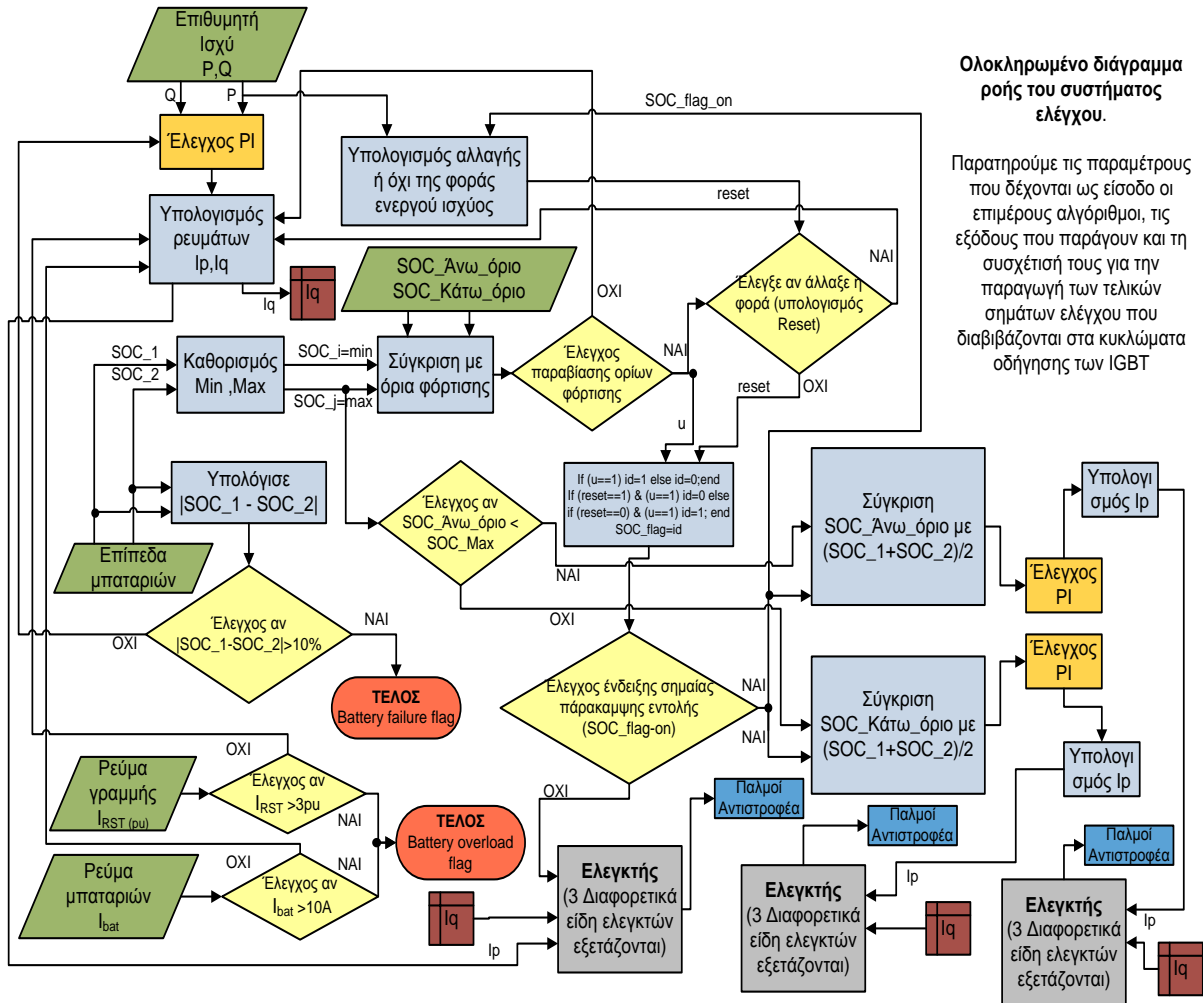
Τα παραπάνω συστήματα και υποσυστήματα είναι που υλοποιούν μια σειρά από ρουτίνες για την προστασία και τον έλεγχο του BESS με στόχο τη βέλτιστη οικονομική λειτουργία του συστήματος.

Οι ρουτίνες που εκτελεί το σύστημα ελέγχου φαίνονται με βάση την προτεραιότητα (priority) εκτέλεσης στο οργανόγραμμα του σχήματος 4.21



Σχήμα 4.21: Υπορουτίνες που συνιστούν τον αλγόριθμο ελέγχου. Χρόνος εκτέλεσης σε αυτές τις ρουτίνες παραχωρείται σύμφωνα με την προτεραιότητά τους.

Τέλος στο σχήμα 4.22 δίνεται το διάγραμμα ροής σήματος του συστήματος ελέγχου. Ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει τις παραμέτρους που δέχονται ως είσοδο οι επιμέρους αλγόριθμοι, τις εξόδους που παράγουν και τη συσχέτισή τους για την παραγωγή των τελικών σημάτων ελέγχου που διαβιβάζονται στα κυκλώματα οδήγησης των IGBT's.



Ολοκληρωμένο διάγραμμα ροής του συστήματος ελέγχου.
 Παρατηρούμε τις παραμέτρους που δέχονται ως είσοδο οι επιμέρους αλγόριθμοι, τις εξόδους που παράγουν και τη συσχέτισή τους για την παραγωγή των τελικών σημάτων ελέγχου που διαβιβάζονται στα κυκλώματα οδήγησης των IGBT

Σχήμα 4.22: Ολοκληρωμένο διάγραμμα ροής του συστήματος ελέγχου. Παρατηρούμε τις εισόδους και τις εξόδους στους επιμέρους αλγόριθμους.

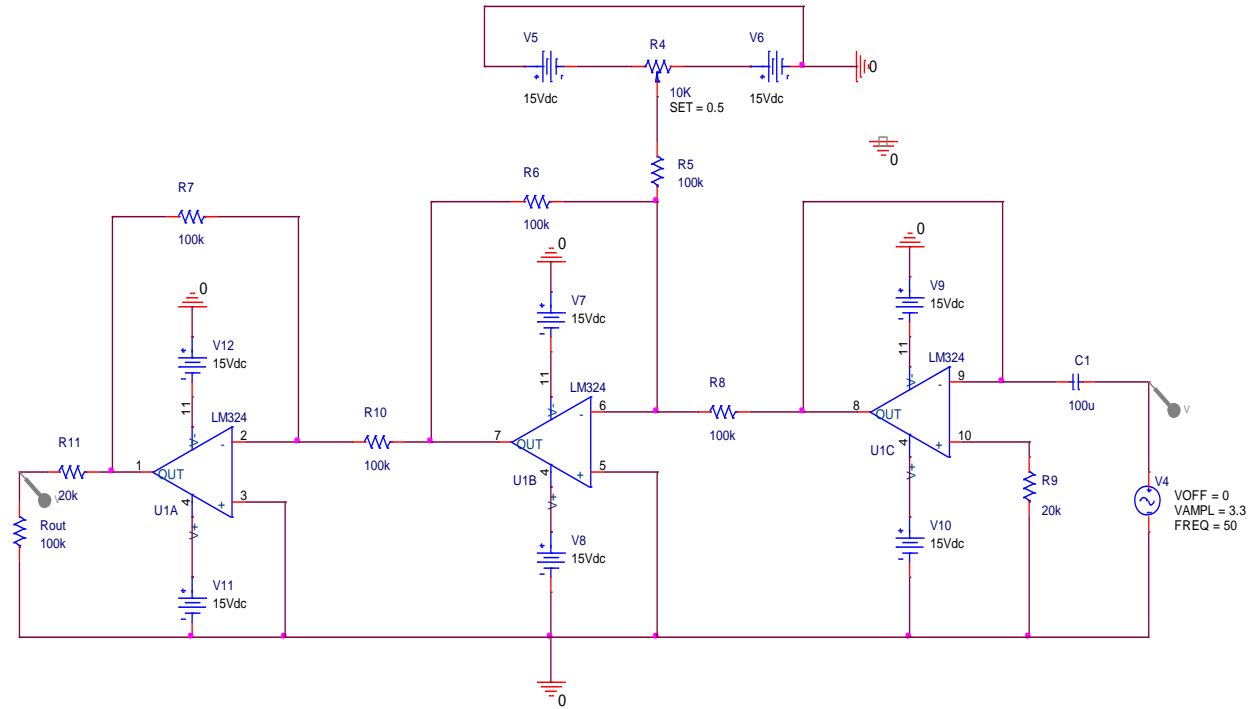
4.7.3 Υλοποίηση συστήματος σε επίπεδο hardware

Στην παράγραφο αυτή θα αναφέρουμε ενδεικτικά τρόπο υλοποίησης των κυκλωμάτων των σταδίων επεξεργασίας των σημάτων σε επίπεδο hardware.

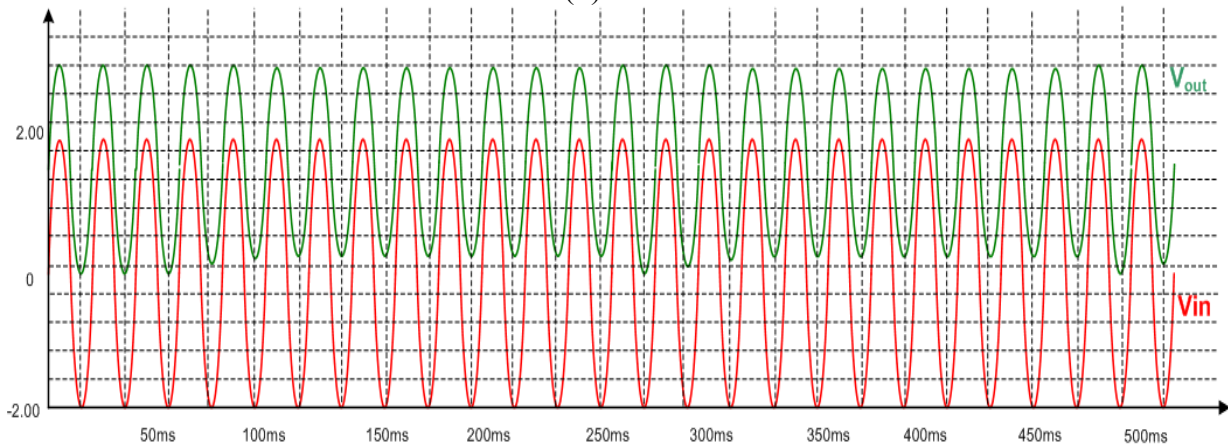
- **Αναλογικά κυκλώματα προ-επεξεργασίας σημάτων ανάδρασης:**

Για την ασφαλή λειτουργία των προτεινόμενων μικροεπεξεργαστών, πρέπει τα αναλογικά σήματα ανάδρασης να βρίσκονται στο εύρος 0-3.3V ως προς τον κοινό κόμβο αναφοράς του συστήματος.

Το κύκλωμα του σχήματος 4.23 επιτέλει ρύθμιση του κέρδους και του dc offset των αναλογικών σημάτων ώστε να βρίσκονται στο απαιτούμενο εύρος. Όπως βλέπουμε, το κύκλωμα αποτελείται από τελεστικούς ενισχυτές LM324, αντιστάσεις, πυκνωτές και ένα ποτενσιόμετρο συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο ώστε το σήμα εξόδου να είναι θετικό και μέσα στα επιτρεπόμενα όρια



(α)

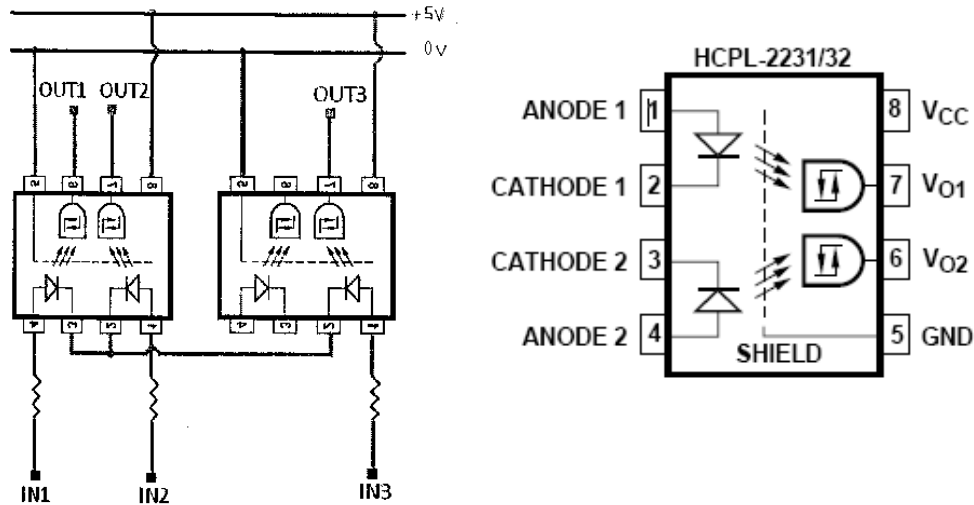


(β)

Σχήμα 4.23: (α) Schematics κυκλώματος προ-επεξεργασίας σημάτων
(β) Προσομοιωμένες τάσεις εισόδου και εξόδου του κυκλώματος

- **Μετεπεξεργασία παλμών εξόδου του DSP 1 και απομόνωση από το κύκλωμα ισχύος.**

Όπως σημειώσαμε στο σχήμα 4.17 είναι απαραίτητο να υπάρχει απομόνωση των σημάτων του DSP από το κύκλωμα ισχύος του αντιστροφέα για λόγους ασφαλείας. Η απομόνωση αυτή επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της φωτοαπομόνωσης χρησιμοποιώντας το κύκλωμα HCPL-2231/32 της Hewlett-Packard [13]. Το διάγραμμα του κυκλώματος όπως δίνεται από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή φαίνεται στο σχήμα 4.24

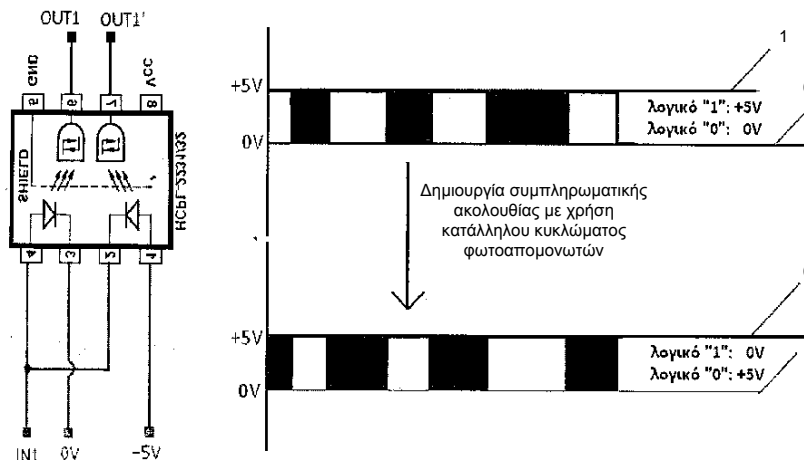


Σχήμα 4.24: HCPL-2231 Επεξεργασία παλμών μετά από την έξοδό τους από το DSP. Αποσαφήνιση και απομόνωση

• **Παραγωγή συμπληρωματικής ακολουθίας παλμών**

Όπως ήδη αναφέρθηκε, μόνο οι τρεις από τους έξι παλμούς ελέγχου παράγονται στις ψηφιακές εξόδους του DSP. Οι υπόλοιποι τρεις παλμοί προκύπτουν συμπληρωματικά. Άλλωστε ο αντιστροφέας υποστηρίζει παλμούς ελέγχου πλάτους 5V και το DSP παράγει στις ψηφιακές του εξόδους παλμούς πλάτους 3.3V.

Για την παραγωγή και των 6 παλμών ελέγχου πλάτους 5V του αντιστροφέα κατασκευάζεται το κύκλωμα του σχήματος 4.25 στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν optocouplers A 2231 της HP.



Σχήμα 4.25: Διάταξη για τη δημιουργία της συμπληρωματικής ακολουθίας παλμών (για τους διακόπτες ενός κλάδου του αντιστροφέα)

4.8 Βιβλιογραφία - Αναφορές τέταρτου κεφαλαίου

- [1] Lícia Neto Arruda, Sidelmo Magalhães Silva, Braz J. Cardoso Filho, «*PLL Structures for Utility Connected Systems*», 2006
- [2] R. S. Alabri, E. F. El-Saadany, «*Interfacing Control of Inverter-based DG Units*», International conference on communication, computer and power, February 2009
- [3] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus, «*Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems*», IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006.
- [4] Mihai Ciobotaru, Remus Teodorescu, Vassilios G Agelidis, «*Offset rejection for PLL based synchronization in grid-connected converters*», APEC-2008
- [5] A. Timbus, R. Teodorescu, F. Blaabjerg «*Independent Synchronization and Control of Three Phase Grid Converters*» SPEEDAM 2006 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion
- [6] A. Timbus, R. Teodorescu, F. Blaabjerg «*Synchronization Methods for Three Phase Distributed Power Generation Systems. An Overview and Evaluation*», 2005 IEEE
- [7] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, «*Control in Power Electronics*». Academic Press, 2002
- [8] R. Teodorescu, F. Iov, F. Blaabjerg «*Modeling and control of grid converter. Phase 1a: Basic grid inverter control*» February 2006
- [9] N. L. Soutanis, S. A. Papathanasiou, and N. D. Hatziargyriou, «*A Stability Algorithm for the Dynamic Analysis of Inverter Dominated Unbalanced LV Microgrids*», Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 22, no. 1, pp. 294-304, 2007.
- [10] M. N. Marwali, J. Jin-Woo, and A. Keyhani, «*Control of distributed generation systems - Part II: Load sharing control*», Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 19, no. 6, pp. 1551-1561, 2004
- [11] G. Fang, and M. R. Iravani, «*A Control Strategy for a Distributed Generation Unit in Grid-Connected and Autonomous Modes of Operation*», Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 23, no. 2, pp. 850-859, 2008
- [12] *Τεχνικό εγχειρίδιο eZDSP F2812*, DSP Development Systems 2003
- [13] *Τεχνικό εγχειρίδιο HCPL-2231/32*, Hewlett-Packard
- [14] Σ. Τζαφέστας «*Αυτόματος Έλεγχος Γραμμικών και Μη Γραμμικών Συστημάτων*», Αθήνα 2004
- [15] Fotios N. Gakis, Stavros A. Papathanassiou «*Simple control schemes for grid-connected three-phase voltage-source inverters of DG units*».

Κεφάλαιο 5

Αντιστροφέας πηγής τάσης – Τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών

5.1 Εισαγωγή

Οι αντιστροφείς είναι ηλεκτρονικές διατάξεις που έχουν ως κύριο σκοπό τη μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας και του πλάτους της παραγόμενης τάσης. Χρησιμοποιούνται ως:

- Ρυθμιστές στροφών εναλλασσόμενων ηλεκτρικών κινητήρων
- Συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος ή UPS
- Αντισταθμιστές άεργου ισχύος ή SVC
- ως ενεργά φίλτρα
- Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς (FACTS)
- Αντισταθμιστές τάσης

Διακρίνονται σε αντιστροφείς πηγής τάσης (VSI) και σε αντιστροφείς πηγής ρεύματος (CSI). Οι VSI χρησιμοποιούνται ως φυσική πηγή τάσης, κάτι που απαιτείται από τις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές και γι' αυτό είναι πιο διαδεδομένοι. Οι CSI χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές μέσης τάσης όπου απαιτούνται υψηλής ποιότητας κυματομορφές ρεύματος.

Η λειτουργία των αντιστροφέων πραγματοποιείται με ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία, άρα οι κυματομορφές τους αποτελούνται από μια αλληλουχία διακριτών τιμών τάσης διαφόρων επιπέδων. Η παλμική κυματομορφή της τάσης εξόδου εξασφαλίζεται με κατάλληλη τεχνική διαμόρφωσης, η οποία ελέγχει το χρόνο αγωγής και σβέσης (ON-OFF) αλλά και τη σειρά λειτουργίας των διακοπτικών στοιχείων. Οι συνηθέστερες τεχνικές διαμόρφωσης είναι :

- Η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)
- Διαμόρφωση εύρους παλμών με διανύσματα τάσης (Voltage Space – Vector Pulse Width Modulation, VSVPWM)
- Έλεγχος ρεύματος με σταθερή ζώνη υστέρησης (Hysteresis Band Current Control Pulse Width Modulation, HBCCPWM).

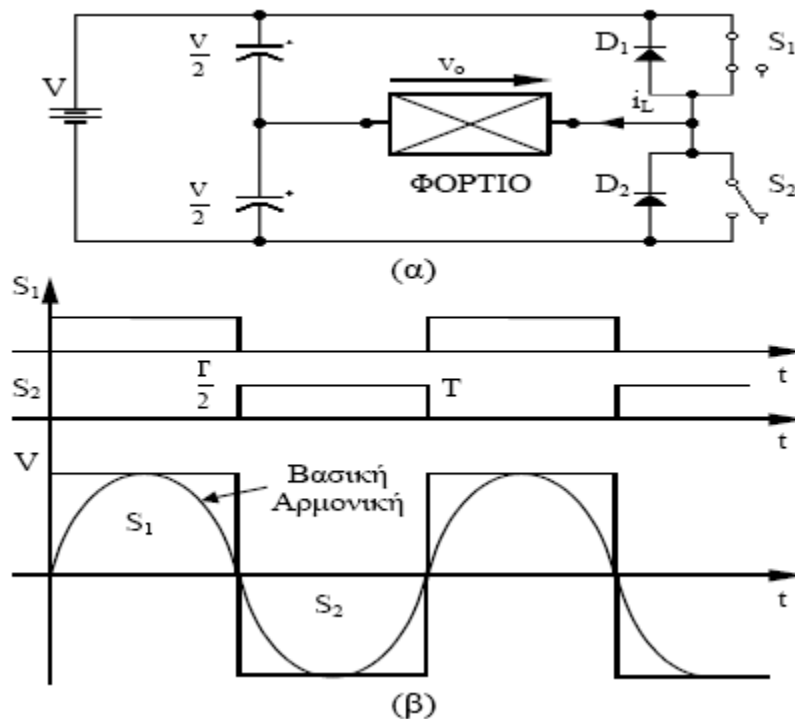
Εξαιτίας της κυματομορφής εξόδου (με διακριτές τιμές), επιβάλλονται κάποιοι λειτουργικοί περιορισμοί στους αντιστροφείς. Στους VSI με διαμόρφωση PWM, άρα και με υψηλό (dv/dt) της τάσης εξόδου, πρέπει το φορτίο να είναι επαγωγικό στις αρμονικές συχνότητες ώστε να μπορεί να παραχθεί ομαλή κυματομορφή ρεύματος. Αντιθέτως,

χωρητικό φορτίο στους VSI προκαλεί υψηλές αιχμές ρεύματος, οι οποίες για να περιοριστούν απαιτείται η παρεμβολή επαγωγικού φίλτρου μεταξύ της AC εξόδου του VSI και του φορτίου. Στους CSI με διαμόρφωση PWM, άρα και με υψηλό di/dt του ρεύματος εξόδου, το φορτίο πρέπει να είναι χωρητικό στις αρμονικές συχνότητες για να μπορεί να παραχθεί ομαλή κυματομορφή τάσης. Επαγωγικό φορτίο στους CSI προκαλεί ισχυρές αιχμές τάσης, οι οποίες για να εξαλειφθούν απαιτείται η παρεμβολή χωρητικού φίλτρου μεταξύ της AC πλευράς του CSI και του φορτίου. Ο αναγνώστης που θα ήθελε περισσότερες πληροφορίες πάνω στους αντιστροφείς μπορεί να ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία [1] – [12].

5.2 Αντιστροφέας πηγής τάσης

5.2.1 Μονοφασικός αντιστροφέας ημιγέφυρας

Στο σχήμα 5.1(α) παρουσιάζεται ένας μονοφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας όπου οι ιδανικοί διακόπτες μπορούν να αντικατασταθούν με τρανζίστορ ισχύος, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), Θυρίστορ (SCR- Silicon Control Rectifier), GTO (Gate Turn –off Θυρίστορ), MCT (Mos Controlled Thyristor).



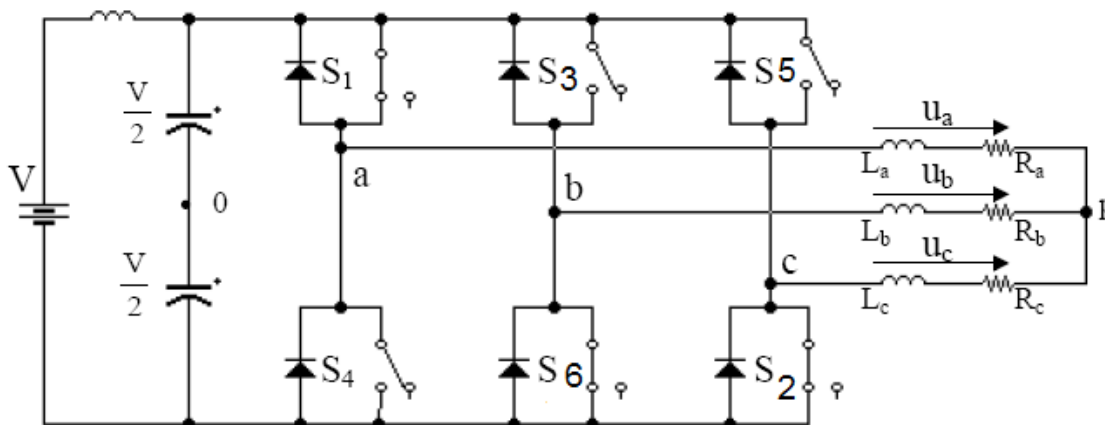
Σχήμα 5.1: (α) Αντιστροφέας ημιγέφυρας
(β) Παλμοί έναυσης S_1 , S_2 και τάση εξόδου με ωμικό φορτίο

Όπως διαπιστώνεται από το σχήμα 5.1(β), η τάση εξόδου V_o είναι ένας τετραγωνικός παλμός 2 καταστάσεων (δηλαδή έχει θετικές και αρνητικές τιμές), του οποίου το πλάτος είναι $\pm \frac{V}{2}$. Ο έλεγχος της τάσης εξόδου μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση των χρονικών διαστημάτων αγωγής των διακοπών S_1 και S_2 μέσω των παλμών έναυσής τους. Όταν η τάση εξόδου πρέπει να αυξηθεί, τα χρονικά διαστήματα αγωγής των S_1, S_2 πρέπει να αυξηθούν. Το αντίθετο συμβαίνει για μείωση της τάσης εξόδου. Επομένως αυξομειώνοντας τα χρονικά διαστήματα αγωγής των διακοπών S_1, S_2 η τάση εξόδου V_o μπορεί να παραμένει σταθερή στις διακυμάνσεις του φορτίου.

Για ωμικό φορτίο, όταν οι 2 διακόπτες είναι σε κατάσταση αποκοπής, η τάση εξόδου έχει μηδενική τιμή. Για επαγωγικό φορτίο όταν και οι 2 διακόπτες είναι σε κατάσταση αποκοπής, το ρεύμα εξακολουθεί να κυκλοφορεί για ένα χρονικό διάστημα μέσω των διόδων D_1, D_2 , του φορτίου και των πυκνωτών εισόδου. Οι διόδοι D_1, D_2 ονομάζονται διόδοι ελεύθερης διέλευσης και χρησιμοποιούνται για την διέλευση του ρεύματος εξόδου, όταν οι διακόπτες S_1, S_2 είναι σε κατάσταση αποκοπής.

5.2.2 Τριφασικός αντιστροφέας

Το κύκλωμα του βασικού τριφασικού αντιστροφέα με τροφοδοσία συνεχούς τάσης παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Τυπική συνδεσμολογία τριφασικού αντιστροφέα γέφυρας.

Το κύκλωμα αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με MOSFET ή IGBT ή και με GTO ανάλογα με την ισχύ που απαιτείται. Ο αντιστροφέας αυτός αποτελείται από αντιστροφεείς ημιγέφυρας οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι παράλληλα και έχουν την ίδια κυματομορφή τάσης εξόδου σε σχέση με το ουδέτερο υποθετικό σημείο 0 με μια μετατόπιση 120° μεταξύ τους. Επομένως για τον αντιστροφέα αυτό ισχύουν οι σχέσεις:

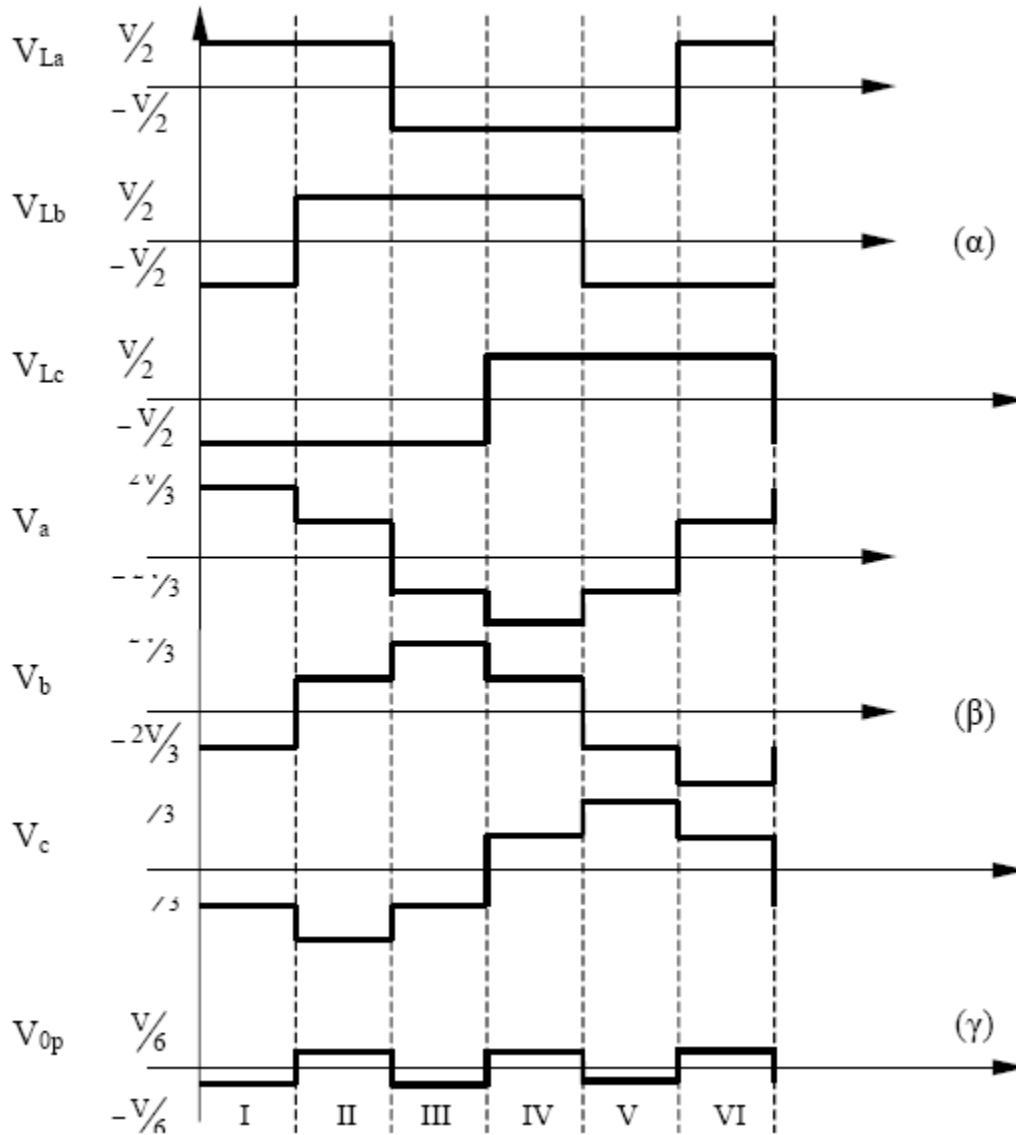
$$v_{ao}(\omega t) = v_{bo}(\omega t - 120) = v_{co}(\omega t - 240) \quad (5.2.1)$$

$$v_{ab} = v_{ao}(\omega t) - v_{bo}(\omega t) \quad (5.2.2)$$

$$v_{bc}(\omega t) = v_{bo}(\omega t) - v_{co}(\omega t) \quad (5.2.3)$$

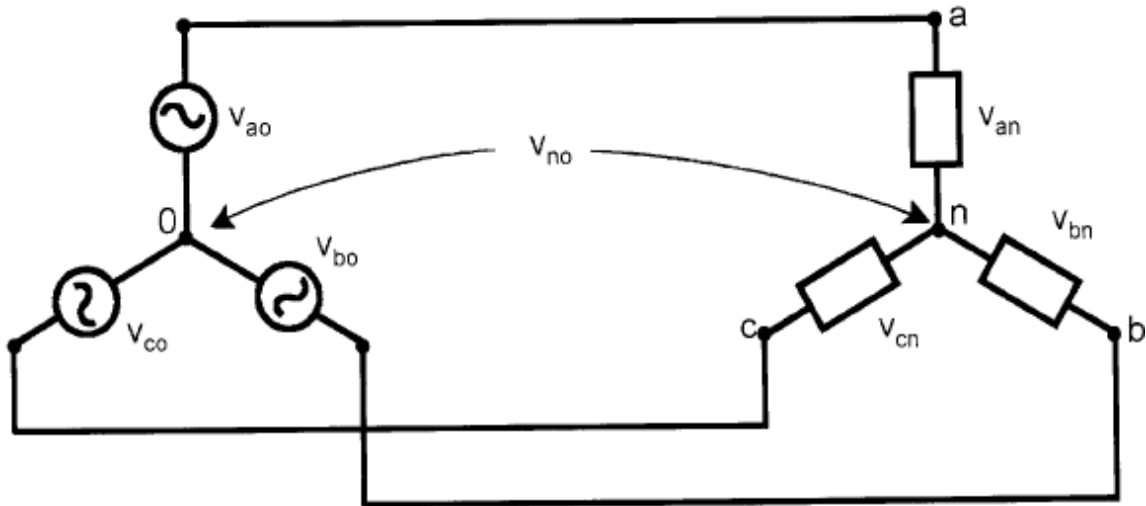
$$v_{ca} = v_{co}(\omega t) - v_{ao}(\omega t) \quad (5.2.4)$$

Ο τριφασικός αυτός αντιστροφέας τροφοδοτεί ένα τριφασικό ωμικοεπαγωγικό φορτίο σε συνδεσμολογία αστέρα. Οι προκύπτουσες κυματομορφές παρουσιάζονται στο σχήμα 5.3 .



Σχήμα 5.3: Τριφασικές κυματομορφές τάσης
 (α) Δυναμικά τάσεων ακροδεκτών εξόδου
 (β) Φασικές τάσεις φορτίου
 (γ) Δυναμικό κοινού σημείου του φορτίου

Οι κυματομορφές αυτές αναφέρονται στη διακοπτική ακολουθία 6 βημάτων , κατά την οποία μια πλήρης περίοδος της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου χωρίζεται σε 6 ίσα διαστήματα από τις χρονικές στιγμές μετάβασης των διακοπών κάθε ημιγέφυρας. Το κοινό σημείο (ουδέτερος) του φορτίου βρίσκεται σε θετικό δυναμικό όταν λειτουργούν περισσότεροι του ενός διακόπτες από την πάνω ομάδα (S_1, S_3, S_5) και σε αρνητικό δυναμικό όταν λειτουργούν περισσότεροι του ενός διακόπτες από την κάτω ομάδα (S_2, S_4, S_6) Οι κυματομορφές του σχήματος 5.3 αναφέρονται σε συμμετρικό φορτίο όπως σημειώνεται στο σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4: Ισοδύναμο μοντέλο ιδανικού τριφασικού αντιστροφέα στο οποίο φαίνονται οι μετρούμενες τάσεις

Από το σχήμα 5.4 συμπεραίνουμε τα εξής: Η τιμή της τάσης σε κάθε μία από τις φάσεις εξόδου του αντιστροφέα (a,b,c) αναφέρεται στον κόμβο αναφοράς (0), ο οποίος δεν έχει το ίδιο δυναμικό με τον κοινό κόμβο του αστέρα του φορτίου (n). Έτσι από το νόμο τάσεων Kirchoff η τάση στα άκρα του φορτίου θα είναι:

$$v_{a0} = v_{an} + v_{n0} \quad (5.2.5)$$

$$v_{b0} = v_{bn} + v_{n0} \quad (5.2.6)$$

$$v_{c0} = v_{cn} + v_{n0} \quad (5.2.7)$$

Από την πρόσθεση των παραπάνω και γνωρίζοντας ότι ισχύει $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$ λαμβάνουμε ότι:

$$v_{a0} + v_{b0} + v_{c0} = 3 \cdot v_{n0} \Rightarrow v_{n0} = \frac{1}{3}(v_{a0} + v_{b0} + v_{c0}) \quad (5.2.8)$$

Επομένως αντικαθιστώντας τη σχέση αυτή στις τρεις προηγούμενες προκύπτει ότι η τάση του φορτίου θα είναι :

$$v_{an} = \frac{2}{3}v_{a0} - \frac{1}{3}v_{b0} - \frac{1}{3}v_{c0} \quad (5.2.9)$$

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.3 η λειτουργία του αντιστροφέα για ένα κύκλο τάσης εξόδου μπορεί να διαιρεθεί σε έξι διαστήματα. Στα διαστήματα αυτά, για να επιτευχθούν οι τάσεις εξόδου του σχήματος 3.12 πρέπει οι διακόπτες να άγουν με την εξής σειρά:

<u>Χρονικό Διάστημα</u>	<u>Διακόπτες σε αγωγή</u>
I	1,5,6
II	1,2,6
III	1,2,3
IV	2,4,3
V	5,4,3
VI	5,4,6

Η τάση εξόδου του αντιστροφέα του σχήματος του σχήματος 5.3 με χρήση σειρών Fourier είναι :

$$v_{ao} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \widehat{V}_{ao,n} \cdot \sin(n\omega t) \quad (5.2.10)$$

όπου

0: το ουδέτερο σημείο και

$\widehat{V}_{ao,n}$: πλάτος της n – οστής αρμονικής συνιστώσας της τάσης V_{ao}

$$\widehat{V}_{ao,n} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{V}{2} \cdot \sin(n\omega t) \cdot dt = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{V}{2} \cdot \sin(n\omega t) \cdot dt = \frac{2V}{n\pi} \quad (5.2.11)$$

Άρα:

$$v_{ao} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{2V}{n\pi} \cdot \sin(n\omega t) \quad (5.2.12)$$

$$v_{bo} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{2V}{n\pi} \cdot \sin(n\omega t - 120) \quad (5.2.13)$$

$$v_{co} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{2V}{n\pi} \cdot \sin(n\omega t - 240) \quad (5.2.14)$$

Επομένως οι πολικές τάσεις θα είναι:

$$v_{ab} = \sum_{n=1,5,7}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \cdot \sin(n(\omega t + 30)) \quad (5.2.15)$$

$$v_{bc} = \sum_{n=1,5,7}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \cdot \sin(n(\omega t + 30 - 120)) \quad (5.2.16)$$

$$v_{ca} = \sum_{n=1,5,7}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \cdot \sin(n(\omega t + 30 - 240)) \quad (5.2.17)$$

Άρα και οι φασικές τάσεις θα είναι:

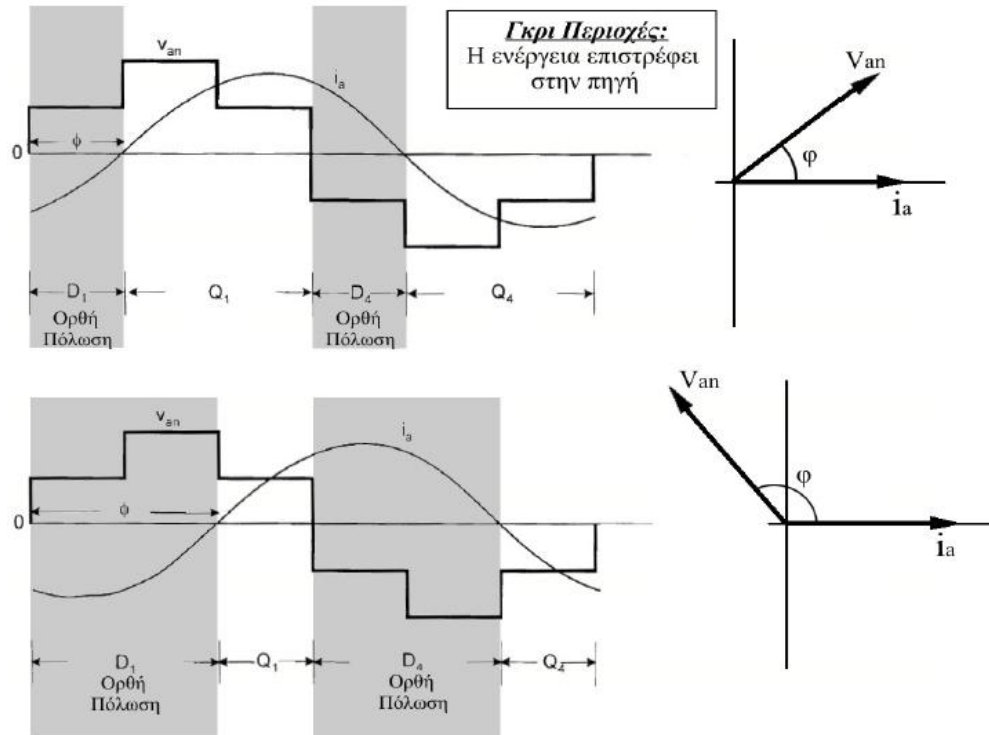
$$v_{a0} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{4V}{3n\pi} \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right)\right) \cdot \sin(n(\omega t)) \quad (5.2.18)$$

$$v_{b0} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{4V}{3n\pi} \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right)\right) \cdot \sin(n(\omega t - 120)) \quad (5.2.19)$$

$$v_{c0} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{4V}{3n\pi} \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right)\right) \cdot \sin(n(\omega t - 240)) \quad (5.2.20)$$

Όπου V η τάση εισόδου του αντιστροφέα.

Ο αντιστροφέας του BESS όπως αναφέραμε σε προηγούμενα κεφάλαια, είναι αμφίπλευρος, αφού μπορεί να μεταφέρει ενεργό και άεργο ισχύ και προς τις δύο κατευθύνσεις. Επειδή το φορτίο που θα κληθεί να τροφοδοτήσει ο αντιστροφέας είναι ωμικο-επαγωγικό, δεν παρουσιάζει μοναδιαίο συντελεστή μετατόπισης και έτσι είναι ευνόητο ότι η τάση και το ρεύμα του φορτίου δε θα είναι σε φάση. Επομένως, θα υπάρχουν περιοχές στις οποίες παρότι η τάση εξόδου του αντιστροφέα θα είναι θετική, το ρεύμα θα είναι αρνητικό και αντιστρόφως. Στις περιπτώσεις αυτές, παρότι ο ημιαγωγικός διακόπτης είναι ορθά πολωμένος, δεν επιτρέπει την κυκλοφορία αντίθετου ρεύματος, το οποίο αναγκαστικά περνάει από τις αντιπαράλληλες διόδους ελεύθερης διέλευσης, οι οποίες είναι πολωμένες θετικά, και επιτρέπουν την επιστροφή του ρεύματος προς την πηγή. Έτσι αφενός οι διακόπτες προστατεύονται από ανάστροφη πόλωση και αφετέρου η κυματομορφή του ρεύματος πλησιάζει περισσότερο την ημιτονοειδή.



Σχήμα 5.5: Κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στο φορτίο της φάσης a του αντιστροφέα για λειτουργία του συστήματος BESS (α) εκφόρτιση και (β) φόρτιση

Για να γίνουμε πιο συγκεκριμένοι, ας εξετάσουμε την τάση και το ρεύμα στη φάση a του φορτίου, η οποία φαίνεται στο σχήμα 5.3. Στη λειτουργία εκφόρτισης, ο αντιστροφέας παρέχει ηλεκτρική ενεργό ισχύ στο φορτίο και στο δίκτυο. Για ωμικοεπαγωγικό φορτίο που είναι ο κανόνας για τα περισσότερα φορτία, το ρεύμα έπεται της τάσης κατά μία γωνία ϕ που εξαρτάται από το συντελεστή μετατόπισης για το εκάστοτε φορτίο. Έστω λοιπόν ότι έχουμε ημιτονοειδές ρεύμα (χωρίς καθόλου αρμονική παραμόρφωση) με διαφορά 60° καθυστέρηση σε σχέση με την τάση. Στο πρώτο διάγραμμα του σχήματος 5.5 φαίνονται οι δύο αυτές κυματομορφές της φάσης a του φορτίου, τα διαστήματα μεταφοράς ενεργού ισχύος από και προς τις συσσωρευτές μέσω της φάσης a, καθώς και τα ημιαγωγά στοιχεία που άγουν κάθε φορά.

Είναι προφανές ότι κατά την εκφόρτιση των συσσωρευτών, τα διαστήματα κατά τα οποία έχουμε επιστροφή ενέργειας προς την πηγή είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα διαστήματα στα οποία έχουμε μεταφορά ενέργειας προς τις συσσωρευτές. Επομένως η μέση τιμή της μεταφερόμενης ενέργειας είναι θετική, γεγονός που σημαίνει ότι συνολικά ενέργεια προσφέρεται από το BESS στο φορτίο. Βλέπουμε επίσης ότι οι κυματομορφές εμφανίζουν συμμετρία ημίσεως κύματος και εάν η γωνία ϕ γίνει μηδενική (δηλαδή για μοναδιαίο συντελεστή μετατόπισης), άγουν μόνο οι ημιαγωγικοί διακόπτες, για γωνία 180° έκαστος.

Στη λειτουργία φόρτισης του BESS, η οποία φαίνεται στο δεύτερο διάγραμμα του σχήματος 5.5, τα διαστήματα επιστροφής ενέργειας προς την πηγή είναι σαφώς

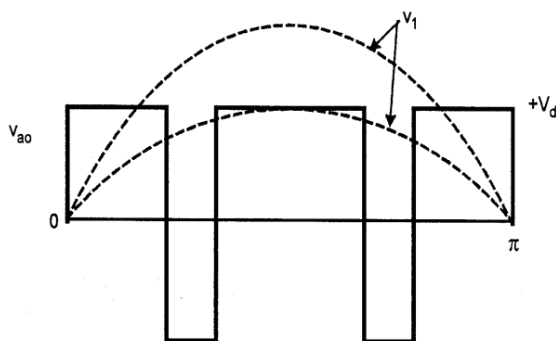
μεγαλύτερα, με αποτέλεσμα συνολικά ενέργεια να μεταφέρεται από το δίκτυο προς τις συσσωρευτές. Στην ακραία περίπτωση που η γωνία φ γίνει 180° , άγουν μόνο οι δίοδοι και ο αντιστροφέας λειτουργεί ως μη ελεγχόμενος ανορθωτής με δίοδους, ενώ η μετάβαση από φόρτιση σε εκφόρτιση γίνεται για γίνεται για $\varphi = 90^\circ$.

Η λειτουργία του αντιστροφέα με τετραγωνικό παλμό τάσης είναι ιδιαίτερα απλή, επιτρέπει τον εύκολο έλεγχο του και παρουσιάζει πολύ μικρές διακοπτικές απώλειες καθώς γίνονται μόνο έξι μεταγωγές των ημιαγωγικών στοιχείων ανά περίοδο. Η λειτουργία αυτή, όμως στην πράξη συνήθως δε χρησιμοποιείται καθώς παρουσιάζει ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα και κυρίως μεγάλες αρμονικές συνιστώσες στο ρεύμα και την τάση, χαμηλών γενικά συχνοτήτων (μικρής τάξης). Συνεπώς προκαλεί μεγάλη αρμονική παραμόρφωση στην τάση και το ρεύμα, η οποία για να μειωθεί απαιτεί τη χρήση ογκωδέστατων και ακριβών βαθυπερατών φίλτρων. Στην πράξη έχει επικρατήσει η λειτουργία του αντιστροφέα με την τεχνική διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (Pulse Width Modulation – PWM) που αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

5.3 Τεχνικές διαμόρφωσης του εύρους των παλμών

Η τάση εξόδου του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας μπορεί να είναι ένας τετραγωνικός παλμός, ο οποίος αναλύεται κατά Fourier στη θεμελιώδη συνιστώσα και στις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες. Οι αρμονικές συνιστώσες σ' ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης είναι ανεπιθύμητες και πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για τη μείωση ή την εξάλειψή τους, ώστε ο συντελεστής Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion- THD) της τάσης να είναι μικρότερος του 5%. Αυτό βέβαια μπορεί να γίνει τοποθετώντας ένα φίλτρο στην έξοδο του αντιστροφέα. Το μέγεθος, το κόστος και το βάρος του φίλτρου, εξαρτώνται από το πλάτος και τη συχνότητα της πρώτης ανώτερης αρμονικής (κυριαρχούσα αρμονική) σε σχέση με τη θεμελιώδη συνιστώσα. Με την περίπτωση του τετραγωνικού παλμού εξόδου, η κυριαρχούσα αρμονική βρίσκεται πιο κοντά στη θεμελιώδη συνιστώσα και επομένως προκύπτει ογκώδες και αντιοικονομικό φίλτρο.

Η βασική αρχή της διαμόρφωσης PWM φαίνεται στο σχήμα 5.6 .



Σχήμα 5.6: Αρχή διαμόρφωσης PWM για τον έλεγχο της τάσης εξόδου

Η μέγιστη τιμή της βασικής συνιστώσας του τετραγωνικού παλμού της τάσης είναι $4V_d/2\pi$, αλλά με τη δημιουργία δύο εγκοπών στα άκρα του παλμού επιτυγχάνεται μείωση της βασικής συνιστώσας και συγχρόνως μετατόπιση σε μεγαλύτερη τιμή της συχνότητας της πρώτης ανώτερης αρμονικής. Με την αύξηση του πλάτους της εγκοπής μειώνεται περαιτέρω η βασική συνιστώσα.

Η έξοδος ενός αντιστροφέα με τεχνική PWM παρουσιάζει υψηλότερη τιμή THD, αλλά οι αρμονικές είναι μετατοπισμένες σε υψηλότερες συχνότητες απ'ότι στον τετραγωνικό παλμό, επιτρέποντας έτσι την κατασκευή φίλτρου μικρότερων διαστάσεων. Επιπλέον είναι δυνατή η ρύθμιση της τιμής της τάσης θεμελιώδους συνιστώσας μεταβάλλοντας το εύρος της κυματομορφής αναφοράς. Η ιδιότητα αυτή παρέχει τη δυνατότητα σταθεροποίησης της τάσης εξόδου, όταν η πηγή της τάσης τροφοδότησης του αντιστροφέα υφίσταται μικρές διακυμάνσεις.

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τις βασικές τεχνικές PWM που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον έλεγχο της βασικής συχνότητας, του πλάτους της βασικής συχνότητας και τη μείωση των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών. Ο αναγνώστης που θέλει να αναζητήσει περισσότερες πληροφορίες για τις τεχνικές PWM μπορεί να απευθυνθεί στη βιβλιογραφία [1] - [12]

5.3.1 Τεχνική ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM)

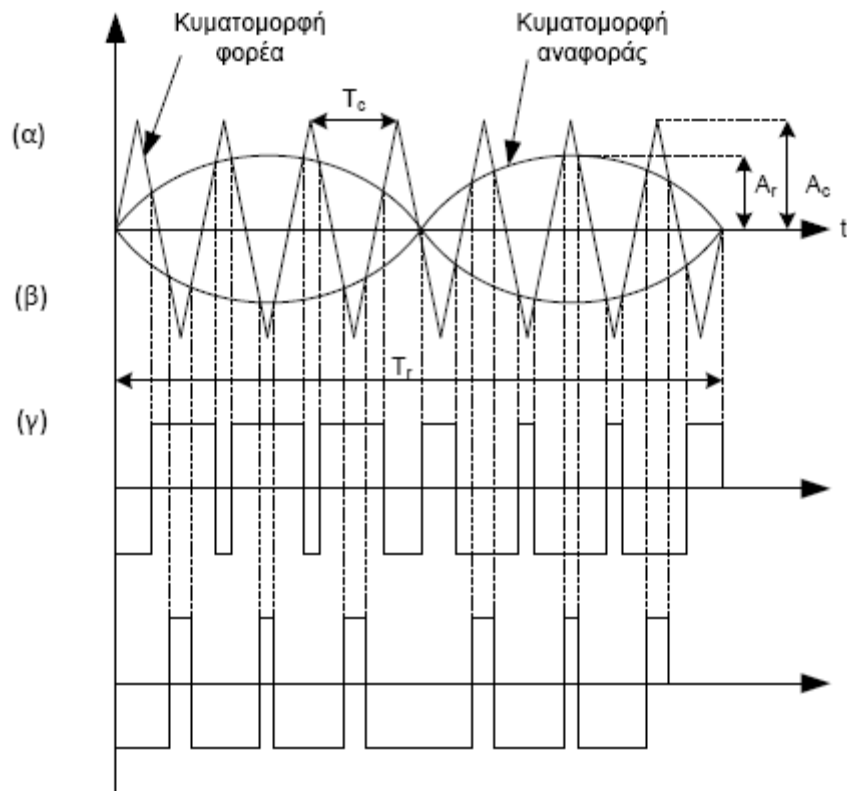
Η τεχνική SPWM βασίζεται σε ένα σύστημα συγκρίσεων μιας τριγωνικής κυματομορφής (φορέας) και μιας ημιτονικής κυματομορφής (αναφορά), της οποίας τη μορφή θέλουμε να αναπαράγουμε στην έξοδο του αντιστροφέα.

5.3.1.1 Μονοφασικός αντιστροφέας ελεγχόμενος από SPWM

Η τεχνική SPWM για μονοφασικό αντιστροφέα παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 5.7. Υπάρχουν 2 κυματομορφές αναφοράς με διαφορά φάσης 180° μία για κάθε ημιγέφυρα του μονοφασικού αντιστροφέα, και μια τριγωνική κυματομορφή φορέα. Οι κυματομορφές αυτές είναι συγχρονισμένες και παράγονται από γεννήτριες κυματομορφών στο κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα.

Μια από τις δύο κυματομορφές αναφοράς και η τριγωνική κυματομορφή εφαρμόζονται στην είσοδο ενός συγκριτή (σχήμα 5.8), στην έξοδο του οποίου παράγεται η κυματομορφή $E_1(\omega t)$ του σχήματος 5.7(β). Από τη σύγκριση της δεύτερης κυματομορφής με τον ίδιο φορέα, σε ένα δεύτερο συγκριτή, παράγεται η κυματομορφή $E_2(\omega t)$ του σχήματος 5.7(γ)

Το θετικό μέρος της κυματομορφής $E_1(\omega t)$ ορίζει τους παλμούς έναυσης του ημιαγωγικού διακόπτη Q_1 και το συμπληρωτικό του ορίζει τους παλμούς έναυσης του ημιαγωγικού διακόπτη Q_2 . Το θετικό μέρος της κυματομορφής $E_2(\omega t)$ ορίζει τους παλμούς έναυσης του διακόπτη Q_4 και το συμπληρωτικό του ορίζει τους παλμούς έναυσης του ημιαγωγικού διακόπτη Q_3 .



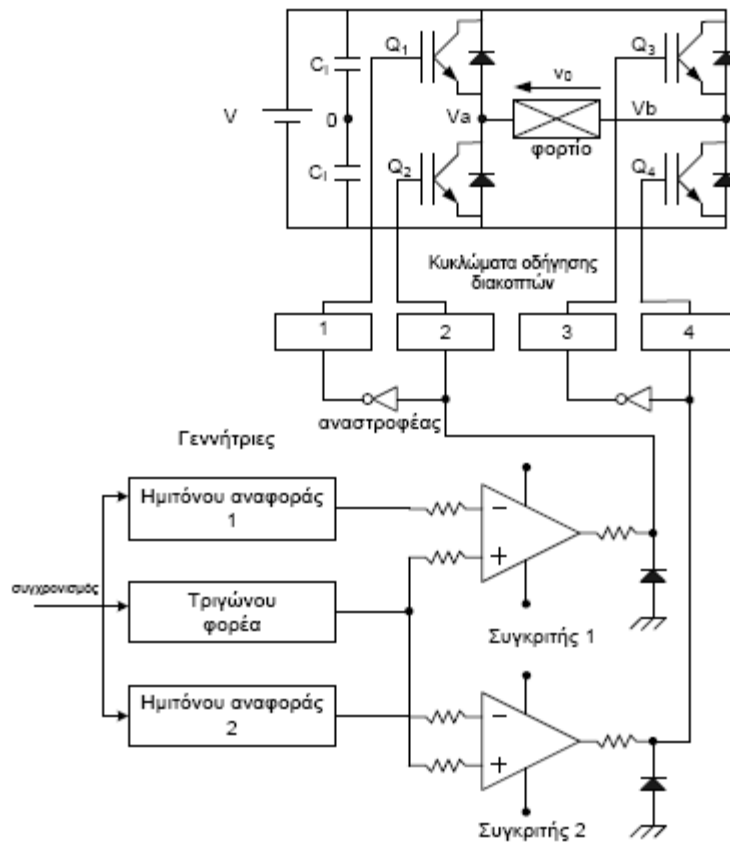
Σχήμα 5.7: Απεικόνιση της τεχνική SPWM για $M_f=0.7$ και για $F_{nc}=7$

- (α) Κυματομορφές αναφορών και φορέα
- (β) Κυματομορφή της τάσης εξόδου του συγκριτή 1, E_1
- (γ) Κυματομορφή της τάσης εξόδου του συγκριτή 2, E_2

Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζεται το κύκλωμα παραγωγής και σύνδεσης των παλμών έναυσης του αντιστροφέα γέφυρας, στο οποίο χρησιμοποιείται η τεχνική SPWM. Στο κύκλωμα αυτό δεν περιέχεται η συνδεσμολογία για τον έλεγχο της τάσης εξόδου. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι παλμοί παραμένουν ίδιοι ανεξάρτητα από τη χρήση IGBT, MOSFET ή άλλο διακοπτικό στοιχείο.

Για τους συμβολισμούς ισχύουν:

- A_r = πλάτος κυματομορφής αναφοράς
- A_c = πλάτος κυματομορφής φορέα
- T_c = περίοδος της κυματομορφής φορέα = $1/F_c$
- $M_f = A_r/A_c$ = συντελεστής διαμόρφωσης που μεταβάλλεται από 0 έως 1.
- $T_r = 1/F_r$ = περίοδος της κυματομορφής φορέα
- $F_{nc} = f_c/f_r$ = ανηγμένη συχνότητα φορέα



Σχήμα 5.8: Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας με το κύκλωμα οδήγησης στο οποίο χρησιμοποιείται η τεχνική SPWM.

Ο δείκτης διαμόρφωσης (modulation factor) είναι ένα σημαντικό μέγεθος που ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης τιμής της κυματομορφής αναφοράς (πλάτος) προς τη μέγιστη τιμή V_T της τριγωνικής κυματομορφής του τριγωνικού φορέα και δίνεται από τη σχέση :

$$M_f = \frac{\widehat{V}_{aN}^*}{V_T} \quad (5.3.1)$$

ενώ η ίδια σχέση ισχύει για όλες τις φάσεις. Γενικά, ο δείκτης διαμόρφωσης μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1 δίνοντας μια γραμμική σχέση μεταξύ της κυματομορφής αναφοράς και της κυματομορφής της τάσης εξόδου. Στην περιοχή αυτή της γραμμικής λειτουργίας, ο αντιστροφέας μπορεί να θεωρηθεί ως γραμμικός ενισχυτής τάσης. Για $M_f = 1$, η μέγιστη τιμή (πλάτος) της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα μεταξύ μιας φάσεως και του κόμβου αναφοράς N είναι $0.5 \cdot V_d$ που είναι ίση με το 78.55% του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας της αντίστοιχης τάσης για

λειτουργία τετραγωνικού παλμού ($4V_d/2\pi$). Στην πράξη, η μέγιστη τιμή εξόδου στη γραμμική περιοχή μπορεί να ανέλθει στο 90,7% της μέγιστης τάσης για λειτουργία τετραγωνικού παλμού με κατάλληλη υπέρθεση τρίτης αρμονικής. Αν $M_f = 0$, η τάση εξόδου του αντιστροφέα εκφυλίζεται σε τετραγωνικό παλμό με συντελεστή χρησιμοποίησης 0.5 και συχνότητα ίση με τη συχνότητα του τριγωνικού φορέα.

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούμε στο μέγεθος που ονομάζεται ανηγμένη συχνότητα φορέα και δίνεται από τη σχέση:

$$F_{nc} = \frac{f_c}{f_r} = \frac{\omega_c}{\omega} \quad (5.3.2)$$

όπου ο δείκτης c αναφέρεται στον φορέα και στον παρονομαστή βρίσκεται η θεμελιώδης συχνότητα. Με χρήση του ορισμού αυτού βλέπουμε ότι οι ανώτερες αρμονικές βρίσκονται σε συχνότητες $\omega(M \cdot F_{nc} \pm N)$. Επίσης μπορεί να δειχτεί ότι το πλάτος των ανώτερων αρμονικών είναι ανεξάρτητο της ανηγμένης συχνότητας και μειώνεται για μεγαλύτερες τιμές των M και N .

Με τη βοήθεια των παλμών έναυσης των διακοπών $Q_1 - Q_4$ σχεδιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων εξόδου. Η μία κυματομορφή αναφοράς παράγει την τάση $V_{ao(\omega t)}$ και η άλλη κυματομορφή την τάση $V_{bo(\omega t)}$, για τις οποίες ισχύει: $V_{bo,1(\omega t)} = -V_{ao,1(\omega t)}$ και άρα $V_{o,1(\omega t)} = V_{ao,1(\omega t)} - V_{bo,1(\omega t)} = 2V_{ao,1(\omega t)}$. Επειδή είναι :

$$\widehat{V}_{ao,1} = \frac{V}{2} M_f \quad (5.3.3)$$

Τότε το πλάτος της βασικής αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα θα είναι:

$$\widehat{V}_{o,1} = 2\widehat{V}_{ao,1} = VM_f \quad (5.3.4)$$

Επομένως χρησιμοποιώντας την τεχνική SPWM και μεταβάλλοντας το συντελεστή διαμόρφωσης M_f , μπορούμε να ελέγξουμε την τάση εξόδου. Η ανάλυση της τάσης εξόδου κατά Fourier είναι κάπως πολύπλοκη και έχει τη μορφή:

$$v_o = v_{ab} = \frac{1}{2} M_f V \cdot \sin(\omega t + \varphi) + \text{Όροι υψηλής συχνότητας } (M\omega \pm N\omega) \quad (5.3.5)$$

όπου M, N : ακέραιοι αριθμοί και το άθροισμά τους πρέπει να είναι περιττός αριθμός.

Είναι δυνατόν, με τη βοήθεια προγράμματος H/Y, να υπολογιστούν τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και του φορέα για διάφορες τιμές του

συντελεστή διαμόρφωσης M_f και της ανηγμένης συχνότητας φορέα F_{nc} . Ακολουθώντας, έχοντας τις τιμές των σημείων τομής με ανάλυση κατά Fourier μπορεί να βρεθεί το φάσμα συχνοτήτων της πολική τάσης εξόδου του αντιστροφέα $V_{o(ωt)}$. Αναλύοντας τα φάσματα συχνοτήτων της τάσης V_o για διάφορες τιμές των M_f , F_{nc} προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας, όπου δίνονται οι RMS τιμές των αρμονικών συνιστωσών της SPWM τάσης εξόδου. Οι τιμές αυτές είναι ανηγμένες ως προς την τάση εισόδου V και φαίνονται στον πίνακα 5-1

Πίνακας 5-1: RMS τιμές αρμονικών συνιστωσών SPWM σε μονοφασικό αντιστροφέα

M_f	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Αρμονική Συνιστώσα	<i>Ανηγμένη τιμή πλάτους αρμονικής ως προς την τάση εισόδου</i>				
Βασική	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$2F_{nc} \pm 1$	0.190	0.326	0.370	0.314	0.181
$2F_{nc} \pm 3$	--	0.024	0.071	0.139	0.212
$2F_{nc} \pm 5$	--	--	--	0.013	0.033

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5-1 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- i) Η βασική αρμονική συνιστώσα παρουσιάζει μέγιστη τιμή όταν $M_f = 1$ και είναι:

$$\widehat{V}_{o,1(\max)} = V$$
- ii) Η ανηγμένη τιμή της συχνότητας του φορέα F_{nc} , πρέπει να είναι ζυγός αριθμός έτσι ώστε να μηδενισθούν οι ανώτερες αρμονικές συνιστώσες της τάσης εξόδου V_o , οι οποίες βρίσκονται στη συχνότητα F_{nc} .

Η κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική συνιστώσα d , της οποίας οι τιμές της συχνότητας και του πλάτους χρειάζονται για την κατασκευή του φίλτρου εξόδου δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις :

$$d = 2F_{nc} - 1 \tag{5.3.6}$$

$$\widehat{V}_{o,d(\max)} = 0.370V \tag{5.3.7}$$

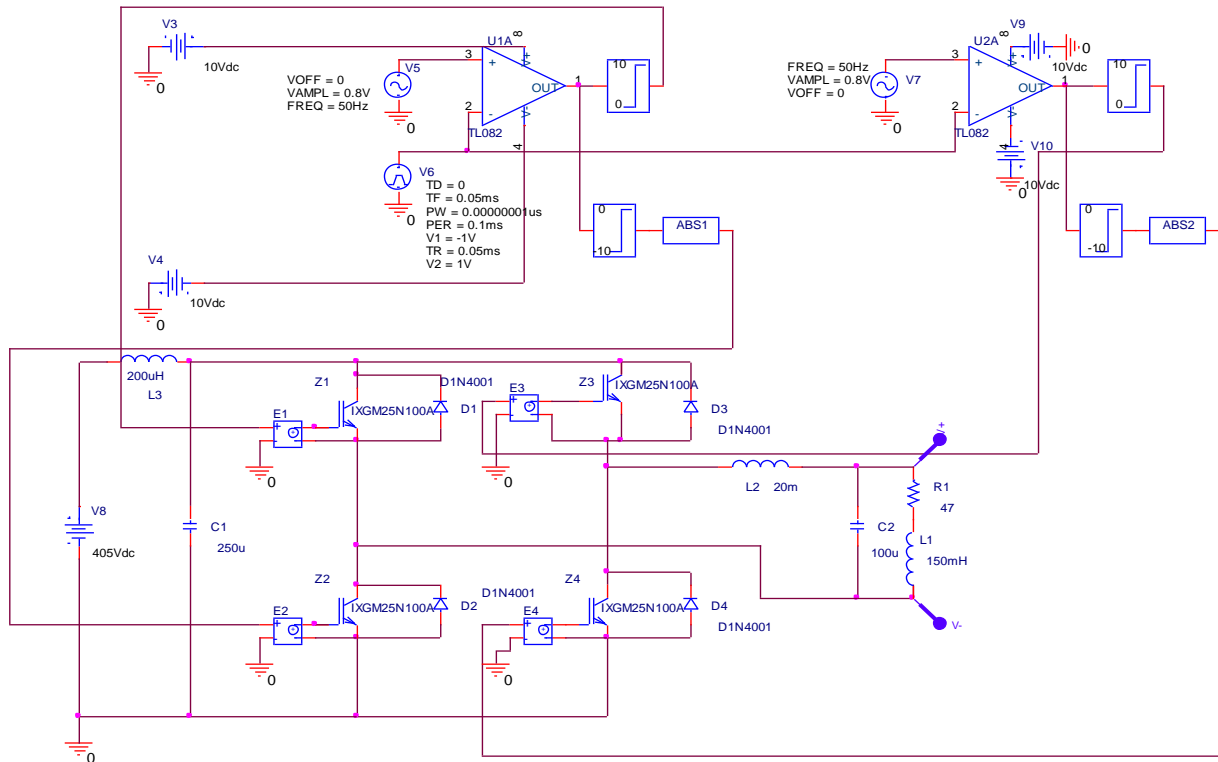
όπου:

F_{nc} = ανηγμένη συχνότητα του φορέα

$\widehat{V}_{o,d(\max)}$ = μέγιστο πλάτος της κυριαρχούσας αρμονικής συνιστώσας για $M_f = 0.6$.

Παράδειγμα Εφαρμογής στο PSPICE

Στη συνέχεια εφαρμόζουμε την τεχνική αυτή σε ένα μονοφασικό αντιστροφέα δείχνοντας πώς ελέγχει την τάση σε ένα ωμικοεπαγωγικό φορτίο $R = 47\Omega$, $L = 150mH$. Έστω ότι στην έξοδο θέλουμε τάση $V_{RMS} = 230\text{ V}$ συχνότητας $f = 50\text{Hz}$ με λόγο διαμόρφωσης συχνότητας $F_{nc} = 200$.



Σχήμα 5.9: Σχέδιο μονοφασικού αντιστροφέα στο PSPICE

Αν επιλέξουμε στη σχεδίαση ότι ο λόγος του πλάτους της κυματομορφής αναφοράς και της κυματομορφής φορέα $M_f = 0.8$ και εφόσον θέλουμε στο φορτίο να έχουμε τάση rms τιμής $V_{RMS} = 230\text{ V}$ προκύπτει ότι $\hat{V}_{o,1} = V_{RMS} \sqrt{2} = 325.2\text{V}$ πλάτος βασικής αρμονικής συνιστώσας.

Άρα ο αντιστροφέας θα χρειαστεί dc τάση στην είσοδο ίση με :

$$V_{DC} = \hat{V}_{o,1} \div M_f = 325.2 \div 0.8 = 406.5\text{V}$$

Ο λόγος διαμόρφωσης συχνότητας είναι :

$$F_{nc} = \frac{fc}{fr} = \frac{10000}{50} = 200$$

Έτσι οι κυριαρχούσες αρμονικές παρουσιάζονται:

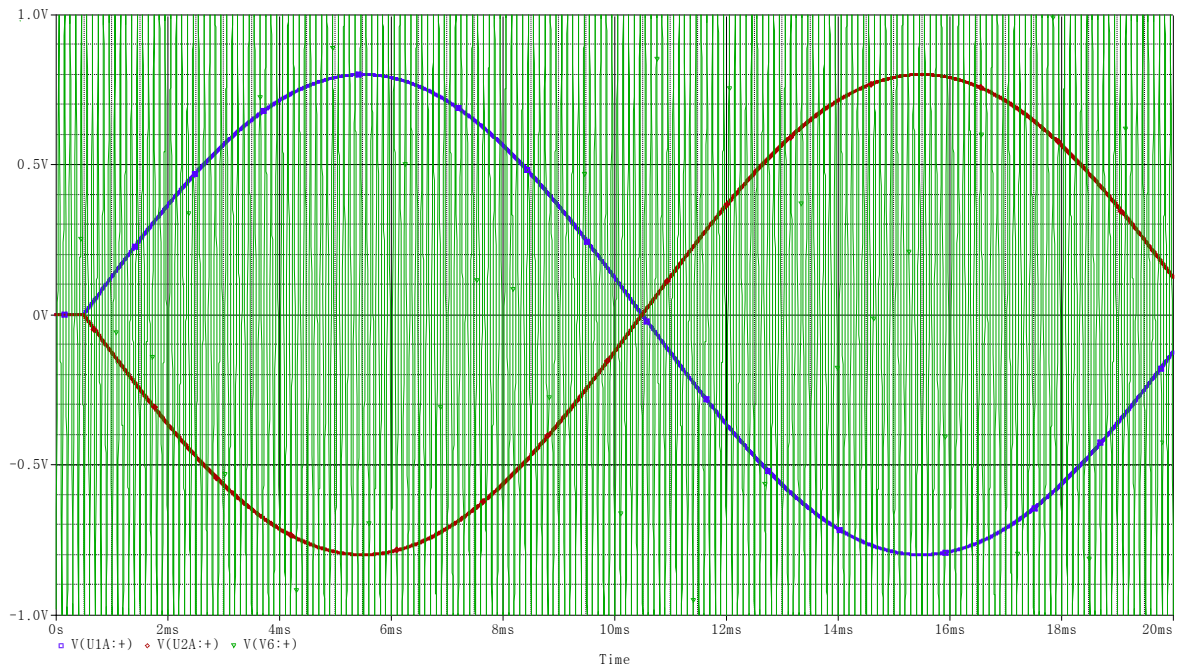
$$h = 2Fnc \pm 1 = 2 \cdot 200 \pm 1 = \{399, 401\}$$

με αντίστοιχες συχνότητες :

$$F_1 = 399 \cdot 50 = 19950 \text{ Hz}$$

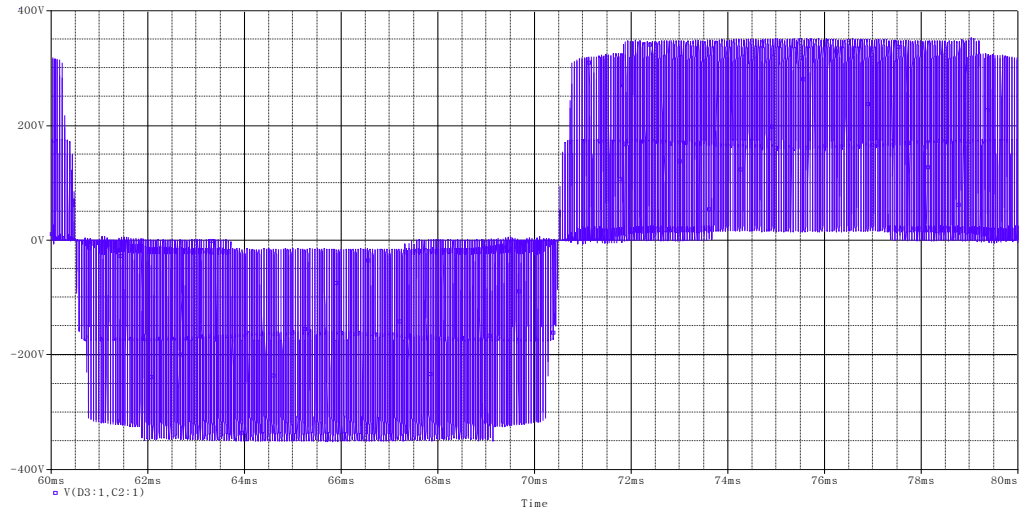
$$F_2 = 401 \cdot 50 = 20050 \text{ Hz}$$

Παρακάτω δίνουμε τις κυματομορφές που προκύπτουν από την προσομοίωση της τεχνικής SPWM στο PSPICE.

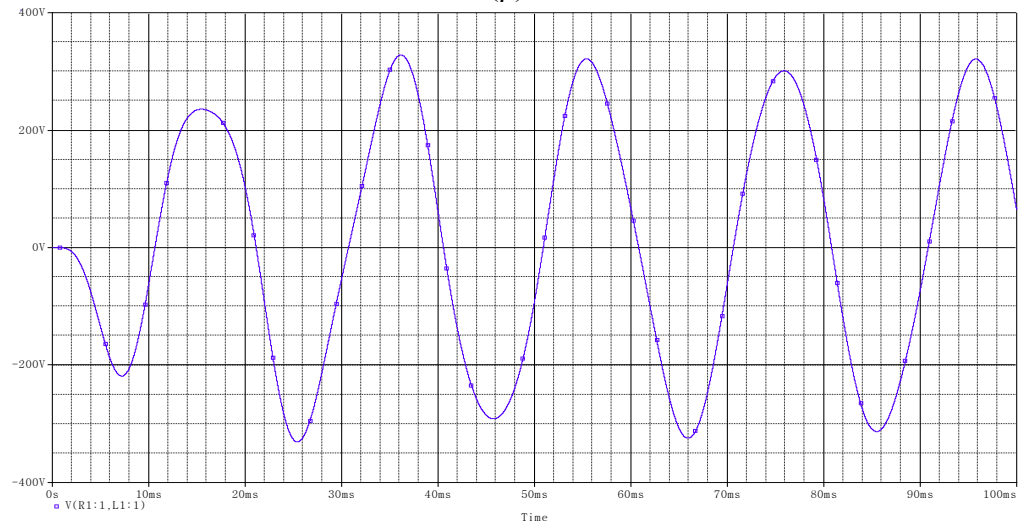


(α)

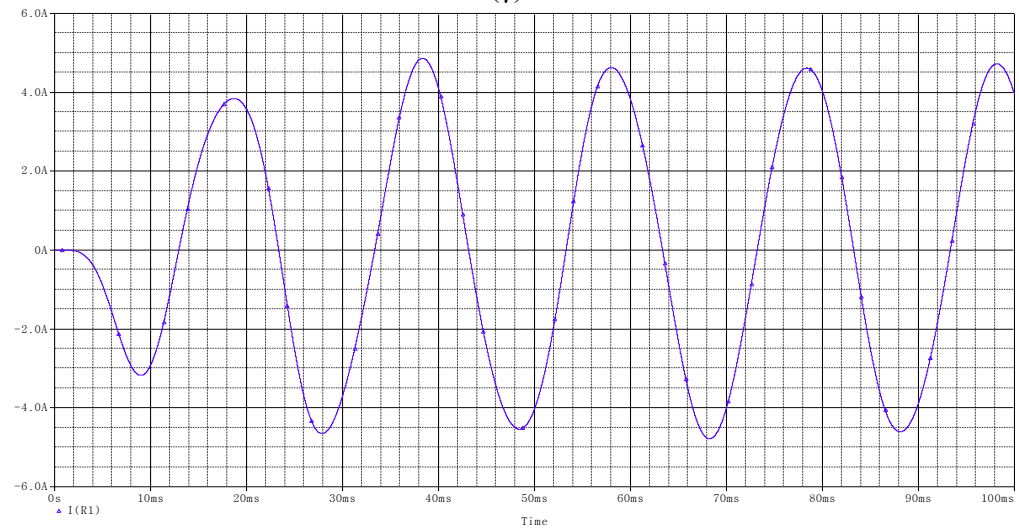
Κεφάλαιο 5 Αντιστροφέας πηγής τάσης – Τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών



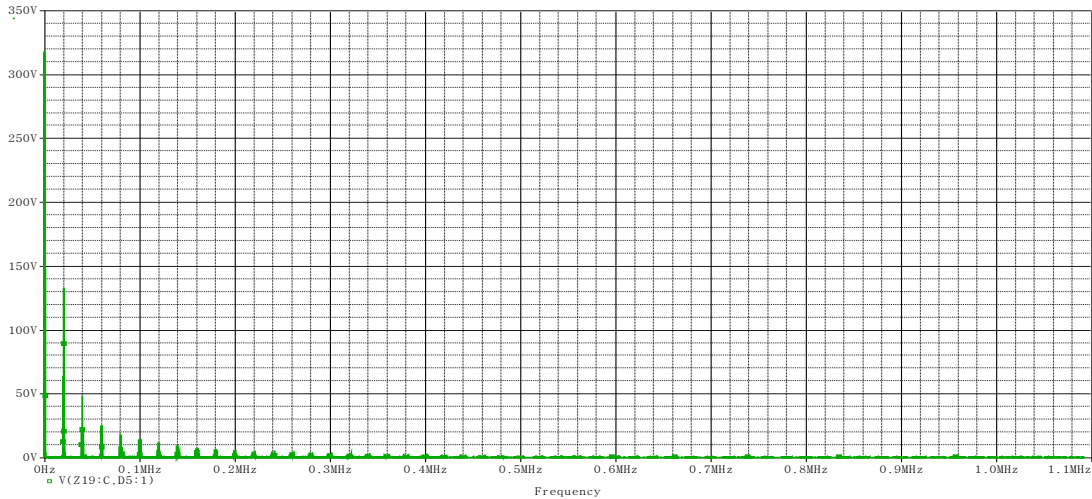
(β)



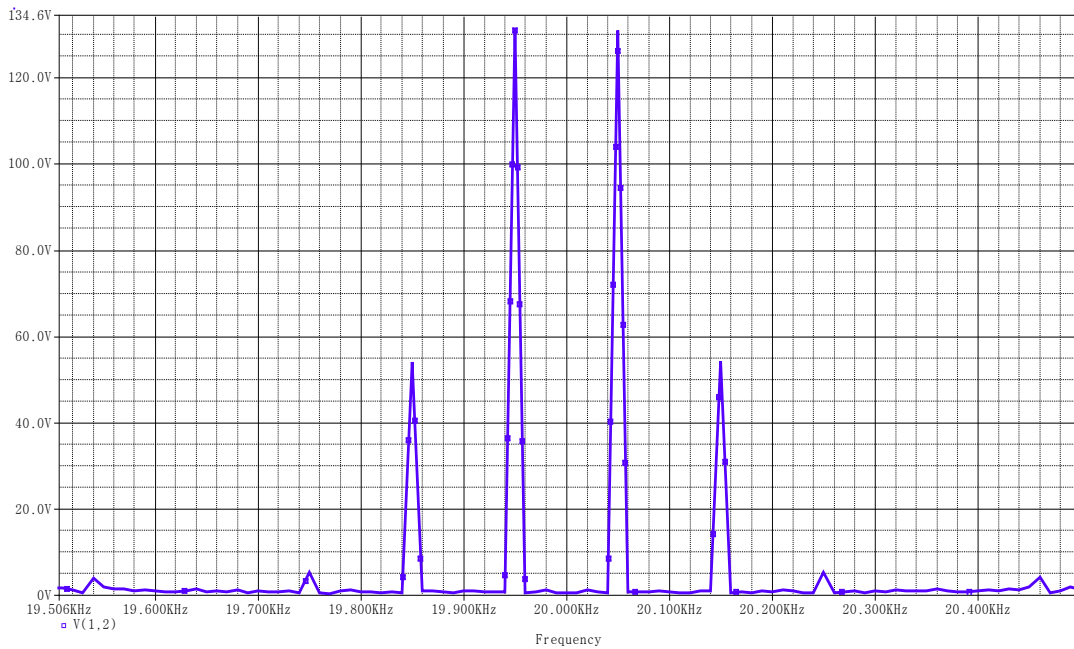
(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

Σχήμα 5.10: (α) Ημίτονα αναφοράς SPWM ελέγχου και τριγωνικό φέρον στην είσοδο των τελεστικών ενισχυτών
 (β) Τάση εξόδου πριν το βαθυπερατό φίλτρο
 (γ) Τάση εξόδου μετά το βαθυπερατό φίλτρο
 (δ) Ρεύμα εξόδου
 (ε) Φάσμα Αρμονικών
 (στ) Ανάλυση στη ν περιοχή συχνοτήτων των κυρίαρχων αρμονικών

Το συμπέρασμα που εξάγουμε είναι ότι αυτές οι αρμονικές μπορούν να περιοριστούν εύκολα με χρήση ενός απλού βαθυπερατού φίλτρου ή λόγω της επαγωγικής συμπεριφοράς του κινητήρα, αφού βρίσκονται σε τόσο υψηλές συχνότητες.

Παρατηρούμε ότι η πρώτη αρμονική έχει πλάτος 319V και RMS τιμή 227V, που προσεγγίζει ικανοποιητικά τις απαιτήσεις της σχεδίασης. Παρατηρούμε επίσης ότι η κυρίαρχη αρμονική συνιστώσα φτάνει σε πλάτος τα $132V : 132/319 = 0,41 = 41\%$ της θεμελιώδους.

Η μεγάλη της τιμή δε μας ενδιαφέρει, γιατί λόγω της υψηλής συχνότητας στην οποία εμφανίζεται, μπορεί εύκολα να φιλτραριστεί με βαθυπερατό φίλτρο ή ακόμα και να αποκοπεί από την επαγωγική συμπεριφορά του κινητήρα, που σε τόσο υψηλές συχνότητες εμφανίζει πολύ μεγάλη σύνθετη αντίσταση.

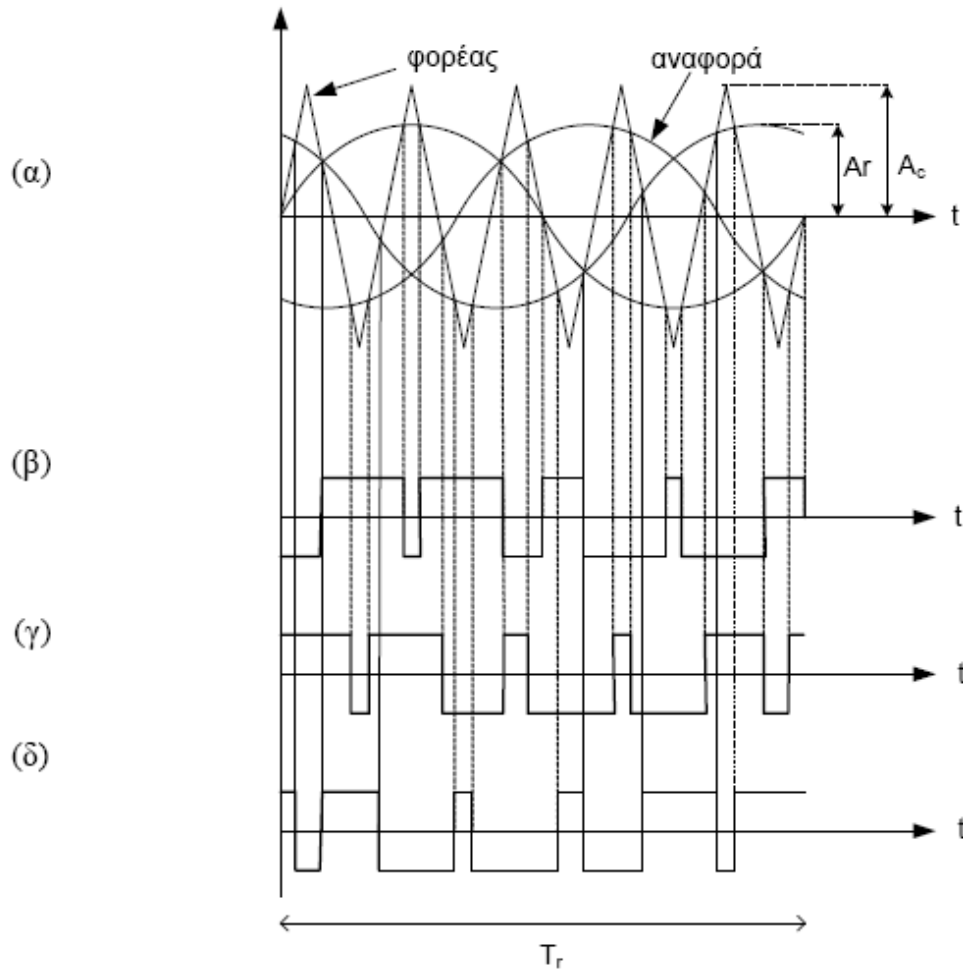
5.3.1.2 Τριφασικός αντιστροφέας ελεγχόμενος με SPWM

Για τον τριφασικό αντιστροφή χρησιμοποιούνται 3 ημιτονοειδείς κυματομορφές αναφοράς (μία για κάθε ημιγέφυρα) με διαφορά φάσης 120° και μια τριγωνική κυματομορφή φορέα. Το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς A_r είναι μεταβλητό σε σχέση με το πλάτος της κυματομορφής του φορέα A_c , το οποίο παραμένει σταθερό. Οι συντελεστές διαμόρφωσης M_f και ανηγμένης συχνότητας φορέα F_{nc} , ορίζονται όπως πριν. Όπως και στην τεχνική SPWM του μονοφασικού αντιστροφέα, έτσι και στον τριφασικό, τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και της κυματομορφής του φορέα, προσδιορίζουν τις κυματομορφές των παλμών έναυσης των διακοπών Q_1-Q_6 του αντιστροφέα καθώς και τις τάσεις εξόδου σε σχέση με το σημείο 0. Αυτά φαίνονται στο σχήμα 5.11

Είναι δυνατόν, με τη βοήθεια προγράμματος H/Y, να υπολογιστούν τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και του φορέα για διάφορες τιμές του συντελεστή διαμόρφωσης M_f και της ανηγμένης συχνότητας φορέα F_{nc} . Ακολουθώντας, έχοντας τις τιμές των σημείων τομής με ανάλυση κατά Fourier μπορεί να βρεθεί το φάσμα συχνοτήτων της πολική τάσης εξόδου του αντιστροφέα $V_o(\omega)$. Αναλύοντας τα φάσματα συχνοτήτων της τάσης V_o για διάφορες τιμές των M_f , F_{nc} προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας, όπου δίνονται οι RMS τιμές των αρμονικών συνιστωσών της SPWM τάσης εξόδου. Οι τιμές αυτές είναι ανηγμένες ως προς την τάση εισόδου V και φαίνονται στον πίνακα 5-2

Πίνακας 5-2: RMS τιμές αρμονικών συνιστωσών SPWM σε τριφασικό αντιστροφέα

M_f	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Αρμονική Συνιστώσα	<i>Ανηγμένη τιμή πλάτους αρμονικής ως προς την τάση εισόδου</i>				
Βασική	0.122	0.245	0.367	0.490	0.612
F_{nc}	0.010	0.037	0.080	0.135	0.195
$F_{nc\pm 2}$	--	--	--	0.005	0.011
$F_{nc\pm 4}$	--	--	--	--	--



Σχήμα 5.11: Τεχνική SPWM για τριφασικούς αντιστροφείς.

(α) Κυματομορφές αναφορών και φορέα

(β, γ, δ) Παλμοί οδήγησης των διακοπών των 3 κλάδων.

Τότε το πλάτος της βασικής αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα θα είναι:

$$\widehat{V}_{RS,1} = \frac{\sqrt{3}}{2} VM_f \quad (5.3.8)$$

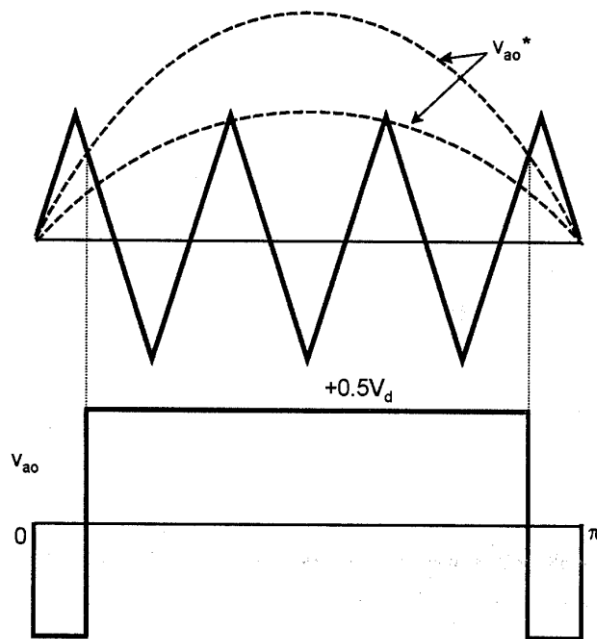
Η κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική συνιστώσα d , της οποίας οι τιμές της συχνότητας και του πλάτους χρειάζονται για την κατασκευή του φίλτρου εξόδου δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις :

$$d = F_{nc} - 2 \quad (5.3.9)$$

$$\widehat{V}_{RY,d(\max)} = 0.27V, \text{ για } M_f = 1 \quad (5.3.10)$$

Η ανηγμένη τιμή του φορέα, F_{nc} , επιλέγεται να είναι περιττός αριθμός πολλαπλάσιος του 3 έτσι ώστε να μην περιέχει η τάση εξόδου ζυγές αρμονικές συνιστώσες. Επιπλέον αρμονικές συνιστώσες σε συχνότητες πολλαπλάσιες του 3, είναι ίδιες σε μέγεθος και φάση και στις τρεις φάσεις. Όπως διαπιστώνεται από τον πίνακα 5-2, το πλάτος της βασικής αρμονικής, μεταβάλλεται σε σχέση με το συντελεστή διαμόρφωσης, παρέχοντας τη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης εξόδου.

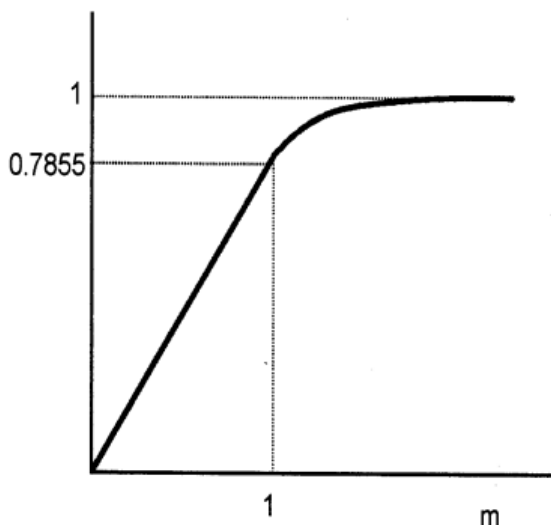
Όταν ο συντελεστής διαμόρφωσης M_f βρίσκεται κοντά στη μονάδα, τότε το πλάτος των παλμών και των εγκοπών πλησίον του κέντρου της θετικής και αρνητικής ημιπεριόδου γίνεται πολύ μικρό, σχεδόν μηδενίζεται. Όμως, για να εξασφαλιστεί η διακοπτική λειτουργία των ημιαγωγικών στοιχείων, πρέπει να υφίσταται ένα ελάχιστο πάχος εγκοπών και παλμών. Υπό συνθήκες ελέγχου πάχους εγκοπών και παλμών, υφίσταται κατά τη μετάβαση μια απότομη μεταβολή του ρεύματος φορτίου, η οποία για μεν τους διακόπτες IGBT μπορεί να είναι μικρή, όμως για τους διακόπτες GTO χαμηλής διακοπτικής συχνότητας είναι ουσιαστική. Στο σχήμα 5.12 παρουσιάζεται η επίδραση της υπερδιαμόρφωσης στην κυματομορφή της φασικής τάσης V_{ao} .



Σχήμα 5.12: Κυματομορφές στην περιοχή της υπερδιαμόρφωσης.

Όταν ο συντελεστής διαμόρφωσης είναι $M_f > 1$, τότε υπάρχει υπερδιαμόρφωση και οι εγκοπές και οι παλμοί στο κέντρο της ημιπεριόδου έχουν εκλείψει. Μόνο στην αρχή και στο τέλος της ημιπεριόδου υπάρχουν εγκοπές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη δημιουργία περίπου τετραγωνικού παλμού και αύξηση της βασικής αρμονικής συνιστώσας στην τιμή $\frac{4V_d}{2\pi}$. Για τιμή $M_f = 1$, η μέγιστη τιμή του εύρους της βασικής

αρμονικής συνιστώσας είναι $0.5V_d$, η οποία όπως δείξαμε παραπάνω είναι το 78.55% της τιμής $\frac{4V_d}{2\pi}$. Στην περιοχή της υπερδιαμόρφωσης, η χαρακτηριστική μεταφοράς είναι μη γραμμική (σχήμα 5.13) με αποτέλεσμα την επανεμφάνιση αρμονικών 5^{ης}, 7^{ης} κ.λ.π. τάξης.

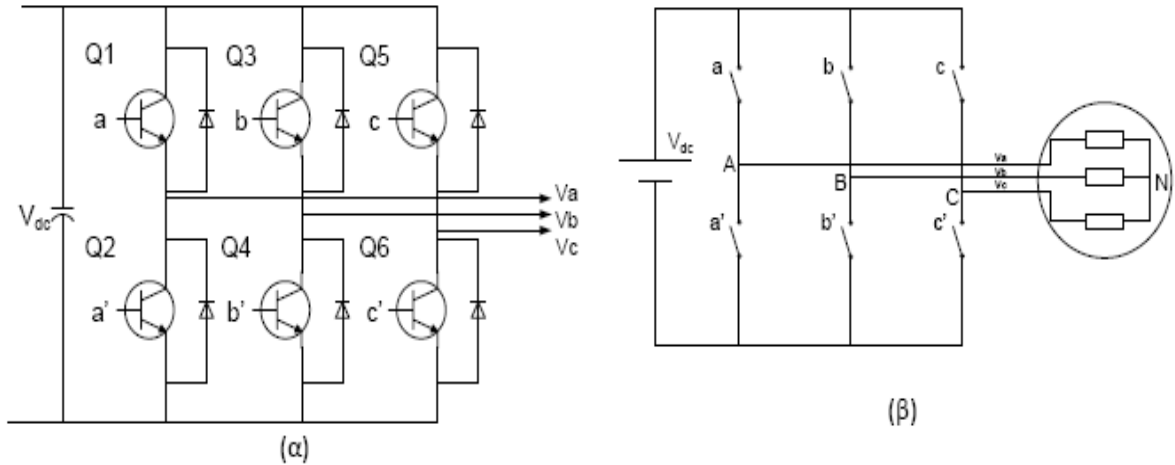


Σχήμα 5.13: Χαρακτηριστική μεταφοράς SPWM υπερδιαμόρφωσης

5.3.2 Διαμόρφωση εύρους παλμών με διανύσματα κατάστασης (SVPWM)

Η τεχνική SVPWM αναφέρεται σε μια ειδική διαδικασία εναλλαγών των διακοπτικών στοιχείων ισχύος ενός τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης (σχήμα 5.14). Το ειδικό αυτό σχήμα εναλλαγών των διακοπτικών στοιχείων ισχύος έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ψευδο-ημιτονοειδών ρευμάτων στους ακροδέκτες του φορτίου. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα ηλεκτρικής κίνησης μεταβλητής συχνότητας.

Η μέθοδος SV-PWM λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των φάσεων του φορτίου λόγω του απομονωμένου κοινού κόμβου και ελαχιστοποιεί έτσι την παραμόρφωση της τάσης στα άκρα του φορτίου κάθε φάσης. Ο τριφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία γέφυρας εμφανίζει $2^3=8$ επιτρεπούς συνδυασμούς χειρισμού των διακοπών του. Υπενθυμίζεται ότι οι επιτρεπτοί συνδυασμοί περιορίζονται αρκετά σε σχέση με τους δυνατούς, καθώς δεν επιτρέπεται αμφότεροι οι διακόπτες ενός κλάδου (ημιγέφυρας) να είναι κλειστοί, διότι τότε βραχυκυκλώνεται η πηγή συνεχούς τάσης.



Σχήμα 5.14: Σχηματικό διάγραμμα απλού τριφασικού αντιστροφέα με (α) ηλεκτρονικούς διακόπτες ισχύος, (β) ιδανικούς διακόπτες και τριφασικό φορτίο.

Υπάρχουν 8 διαφορετικοί συνδυασμοί για κατάσταση έναυσης και σβέσης των διακοπτικών στοιχείων της γέφυρας. Αυτοί οι συνδυασμοί αποτελούν μια διακριτή κατάσταση του αντιστροφέα και η προκύπτουσα στιγμιαία τιμή της φασικής τάσης παρουσιάζονται στον πίνακα 5-3.

Πίνακας 5-3: Οι οκτώ επιτρεπτές καταστάσεις του αντιστροφέα καθώς και οι αντίστοιχες τάσεις εξόδου του αντιστροφέα σε κατάσταση αγωγής

Αύξων Αριθμός Κατάστασης	Ημιαγωγικοί διακόπτες σε κατάσταση αγωγής			Άνω Ημιαγωγικοί διακόπτες σε κατάσταση αγωγής			Πλάτη Τάσεων στα άκρα του φορτίου κάθε φάσεως			Διάνυσμα κατάστασης αντιστροφέα \vec{V}
				Q ₁	Q ₃	Q ₅	V _{an}	V _{bn}	V _{cn}	
0	Q ₄	Q ₆	Q ₂	0	0	0	0	0	0	$\vec{V}_0(000)$
1	Q ₁	Q ₆	Q ₂	1	0	0	$2V_d/3$	$-V_d/3$	$-V_d/3$	$\vec{V}_1(100)$
2	Q ₁	Q ₃	Q ₂	1	1	0	$V_d/3$	$V_d/3$	$-2V_d/3$	$\vec{V}_2(110)$
3	Q ₄	Q ₃	Q ₂	0	1	0	$-V_d/3$	$2V_d/3$	$-V_d/3$	$\vec{V}_3(010)$
4	Q ₄	Q ₃	Q ₅	0	1	1	$-2V_d/3$	$V_d/3$	$V_d/3$	$\vec{V}_4(011)$
5	Q ₄	Q ₆	Q ₅	0	0	1	$-V_d/3$	$-V_d/3$	$2V_d/3$	$\vec{V}_5(001)$
6	Q ₁	Q ₆	Q ₅	1	0	1	$V_d/3$	$-2V_d/3$	$V_d/3$	$\vec{V}_6(101)$
7	Q ₁	Q ₃	Q ₅	1	1	1	0	0	0	$\vec{V}_7(111)$

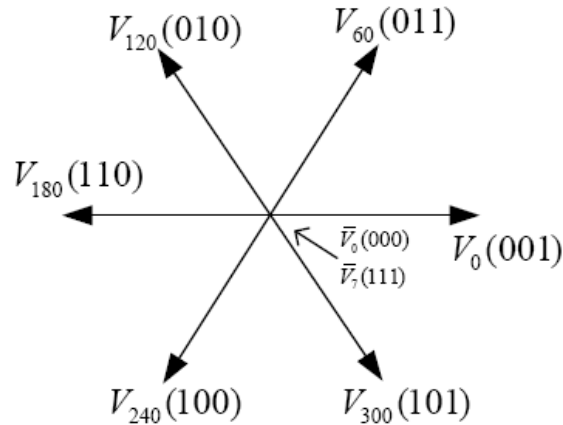
Οι αντίστοιχες τιμές των συνιστωσών σε (α, β) πλαίσιο αναφοράς φαίνονται από τον γενικό μετασχηματισμό Clarke:

$$V_{sa} = V_{AN} \quad (5.3.11)$$

$$V_{s,\beta} = \frac{2V_{BN} + V_{AN}}{\sqrt{3}} \quad (5.3.12)$$

Εξαιτίας του γεγονότος ότι μόνο 8 συνδυασμοί είναι δυνατοί για τους διακόπτες ισχύος, οι τάσεις V_{sa} , $V_{s\beta}$ μπορούν να πάρουν μόνο ένα περιορισμένο αριθμό τιμών στο πλαίσιο (α,β) σύμφωνα με την κατάσταση των σημάτων ελέγχου (c,b,a) των διακοπτικών στοιχείων. Αυτές οι τιμές V_{sa} , $V_{s\beta}$ για τις αντίστοιχες στιγμιαίες τιμές των φασικών τάσεων (V_{AN} , V_{BN} , V_{CN}) δίνονται στον πίνακα 5-4, ενώ τα διανύσματα τάσεως εξόδου δίνονται στο σχήμα 5.15 .

c	b	a	$V_{sq\alpha}$	$V_{sq\beta}$	διάνυσμα
0	0	0	0	0	O_0
0	0	1	$2V_{DC}/3$	0	U_0
0	1	0	$-V_{DC}/3$	$V_{DC}/\sqrt{3}$	U_{120}
0	1	1	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/\sqrt{3}$	U_{60}
1	0	0	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}/\sqrt{3}$	U_{240}
1	0	1	$V_{DC}/3$	$-V_{DC}/\sqrt{3}$	U_{300}
1	1	0	$-2V_{DC}/3$	0	U_{180}
1	1	1	0	0	O_{111}



Πίνακας 5-4 : Διφασικό πλαίσιο αναφοράς τιμών εξόδου αντιστροφείας για κάθε συνδυασμό παλμών

Σχήμα 5.15: Διανύσματα τάσεως εξόδου

Ας αναλύσουμε την κατάσταση 1, για παράδειγμα του πίνακα 5-3, κατά την οποία άγουν οι ημιαγωγικοί διακόπτες Q_1, Q_6, Q_2 . Στην κατάσταση αυτή η φάση a συνδέεται στο θετικό πόλο της πηγής συνεχούς, ενώ οι τάσεις των φάσεων b,c στον αρνητικό. Από τη σχέση 5.2.9 βλέπουμε ότι η τάση στο φορτίο μεταξύ φάσης a και κοινού κόμβου του τριγώνου (n), ο οποίος είναι απομονωμένος, είναι $2V_d/3$ (αφού στην περίπτωση αυτή ισχύει $V_{a0} = V_d/2$, $V_{b0} = -V_d/2$, $V_{c0} = -V_d/2$) ενώ οι αντίστοιχες τάσεις για τις φάσεις b,c προκύπτουν ίσες με $-V_d/3$. Με αντίστοιχο τρόπο υπολογίζουμε τάσεις και για τις επόμενες διακοπτικές καταστάσεις. Από μια σύντομη ανασκόπηση του πίνακα 5-3, προκύπτει ότι ο αντιστροφείας έχει έξι ενεργές καταστάσεις από τις οποίες προκύπτουν τα έξι επίπεδα της τάσης ανόδου, ενώ οι καταστάσεις 0 και 7 είναι καταστάσεις βραχυκύκλωσης. Το διάνυσμα κατάστασης του αντιστροφείας θα προκύψει ως εξής:

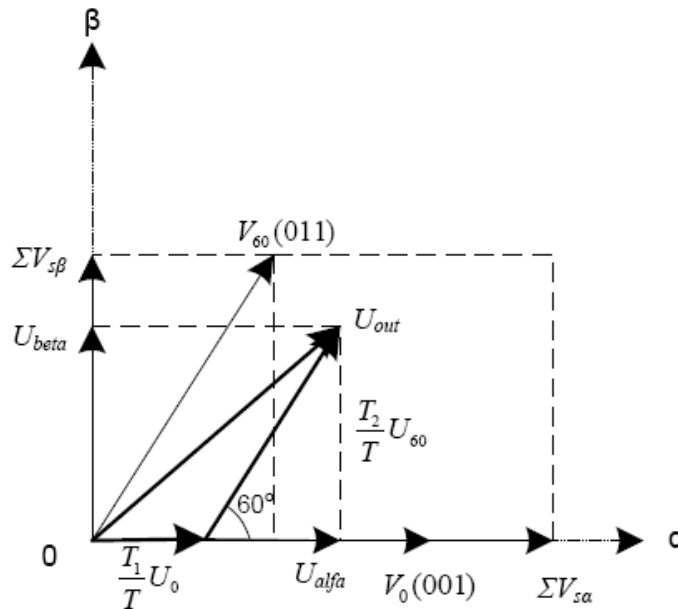
$$\begin{aligned} \bar{V} &= v_{qs} + j \cdot v_{ds} = \left(\frac{2}{3}v_{as} - \frac{1}{3}v_{bs} - \frac{1}{3}v_{cs} \right) + j \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}v_{bs} + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{cs} \right) = \\ & \frac{2}{3} \left[v_{as} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) v_{bs} + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) v_{cs} \right] = \frac{2}{3} [v_{as} + a \cdot v_{bs} + a^2 v_{cs}] \end{aligned} \quad (5.3.13)$$

όπου ως μοναδιαία διανύσματα βάσης μπορούν να ερμηνευτούν τα :

$$a = \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (5.3.14\alpha)$$

$$a^2 = \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (5.3.14\beta)$$

Ο σκοπός της τεχνικής SVPWM είναι να προσεγγιστεί ένα δεδομένο διάνυσμα αναφοράς τάσης στάτη V_{out} με ένα συνδυασμό βασικών χωρικών διανυσμάτων που μπορεί να παράγει ο αντιστροφέας. Το διάνυσμα αναφοράς αναπαρίσταται με τις προβολές V_{alfa} , V_{beta} . Στο σχήμα 5.16 φαίνεται το διάνυσμα αναφοράς τάσης, οι προβολές και 2 από τα βασικά χωρικά διανύσματα V_o και V_{60} . Στο σχήμα αυτό φαίνονται και οι προβολές των χωρικών διανυσμάτων στο πλαίσιο (α,β). Το ΣV_{sa} δείχνει το άθροισμα των προβολών των διανυσμάτων V_o , V_{60} στον άξονα α ενώ το ΣV_{sb} δείχνει το άθροισμα των προβολών των διανυσμάτων V_o , V_{60} στον άξονα β.



Σχήμα 5.16: Χωρικά διανύσματα αναφοράς και εξόδου στον τομέα που ορίζεται από τα διανύσματα V_o και V_{60}

Στο σχήμα 5.16, το διάνυσμα αναφοράς τάσης V_{out} περιέχεται στον τομέα που ορίζεται από τα διανύσματα V_o , V_{60} . Επομένως το διάνυσμα V_{out} μπορεί να παρασταθεί με τα διανύσματα V_o , V_{60} . Άρα μπορούμε να γράψουμε:

$$T = T_1 + T_2 + T_0 \quad (5.3.15)$$

$$V_{out} = \frac{T_1}{T} V_o + \frac{T_2}{T} V_{60} \quad (5.3.16)$$

όπου T_1 και T_2 είναι οι αντίστοιχες διάρκειες για τις οποίες εφαρμόζονται τα διανύσματα V_o , V_{60} σε μια περίοδο T . Το είναι ο χρόνος για τον οποίο εφαρμόζεται το μηδενικό διάνυσμα. Αυτές οι χρονικές περιόδοι μπορούν να υπολογιστούν:

$$U_{beta} = \frac{T_2}{T} |V_{60}| \sin 60^\circ \quad (5.3.17)$$

$$U_{alfa} = \frac{T_1}{T} |V_o| + \frac{T_2}{T} \cos 60^\circ \quad (5.3.18)$$

Από τον παραπάνω πίνακα και το σχήμα είναι φανερό ότι το πλάτος όλων των χωρικών διανυσμάτων είναι $2V_{dc}/3$. Όταν αυτή κανονικοποιείται με τη μέγιστη φασική τάση $V_{dc}/\sqrt{3}$, το πλάτος των χωρικών διανυσμάτων γίνεται $2/\sqrt{3}$. Τα κανονικοποιημένα πλάτη είναι $|V_o| = |V_{60}| = 2/\sqrt{3}$. Επομένως από τις δύο τελευταίες εξισώσεις υπολογίζονται οι χρονικές διάρκειες:

$$T_1 = \frac{T}{2} (\sqrt{3}U_{alfa} - U_{beta}) \quad (5.3.19)$$

$$T_2 = TU_{beta} \quad (5.3.20)$$

όπου U_{alfa} , U_{beta} παριστάνουν τις κανονικοποιημένες τιμές σε (α,β) πλαίσιο του διανύσματος V_{out} με δεδομένο ότι η μέγιστη φασική τάση είναι $V_{dc}/\sqrt{3}$. Το υπόλοιπο της περιόδου ξοδεύεται εφαρμόζοντας το μηδενικό διάνυσμα σε χρονικό διάστημα T_o . Οι χρονικές διάρκειες σαν κλάσματα της περιόδου δίνονται :

$$t_1 = \frac{T_1}{T} = \frac{1}{2} (\sqrt{3}U_{alfa} - U_{beta}) \quad (5.3.21)$$

$$t_2 = \frac{T_2}{T} = U_{beta} \quad (5.3.22)$$

Με παρόμοιο τρόπο, αν το V_{out} βρίσκεται σε ένα τομέα όπου περιέχεται από τα διανύσματα V_{60} και V_{120} , οι χρονικές διάρκειες προκύπτουν:

$$t_1 = \frac{T_2}{T} = \frac{1}{2} (-\sqrt{3}U_{alfa} + U_{beta}) \quad (5.3.23)$$

$$t_2 = \frac{T_3}{T} = \frac{1}{2}(\sqrt{3}U_{\alpha\beta} + U_{\beta\alpha}) \quad (5.3.24)$$

όπου T_2 είναι ο χρόνος που εφαρμόζεται το διάνυσμα V_{120} σε μια περίοδο $T=T_s$. Τώρα αν ορίσουμε 3 μεταβλητές X,Y,Z σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις:

$$X = U_{\beta\alpha} \quad (5.3.25)$$

$$Y = \frac{T_2}{T} = \frac{1}{2}(\sqrt{3}U_{\alpha\beta} + U_{\beta\alpha}) \quad (5.3.26)$$

$$Z = \frac{T_3}{T} = \frac{1}{2}(-\sqrt{3}U_{\alpha\beta} + U_{\beta\alpha}) \quad (5.3.27)$$

Τότε μπορούμε να ορίσουμε τις χρονικές διάρκειες των βασικών χωρικών διανυσμάτων σε οποιαδήποτε τομέα και αν βρίσκεται το V_{out} . Οι διάρκειες αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 5-5.

Πίνακας 5-5: Επιλογή χρονικής διάρκειας βασικών χωρικών διανυσμάτων

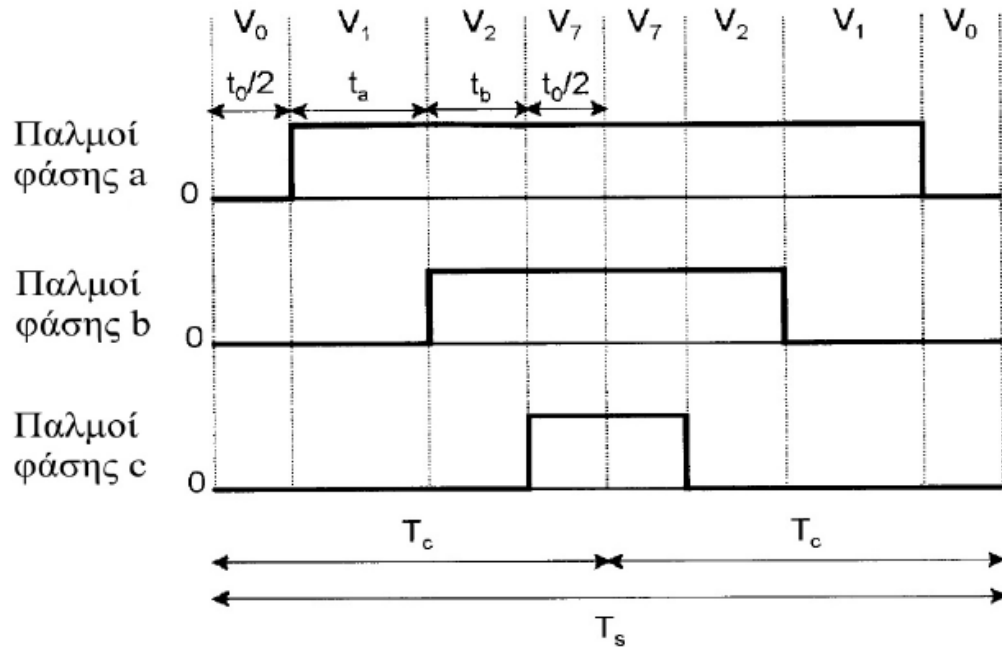
Τομέας	U_0, U_{60}	U_{60}, U_{120}	U_{120}, U_{180}	U_{180}, U_{240}	U_{240}, U_{300}	U_{300}, U_0
t1	-Z	Z	X	-X	Y	-Y
t2	X	Y	-Y	Z	-Z	-X

Για να γνωρίζουμε ποιες από τις παραπάνω καταστάσεις ισχύουν κάθε φορά, πρέπει να γνωρίζουμε τον τομέα στον οποίο βρίσκεται το διάνυσμα αναφοράς της τάσης. Αυτό γίνεται μετατρέποντας τους όρους (α, β) του διανύσματος αναφοράς τάσης V_{out} σε συμμετρικές τριφασικές ποσότητες με τον αντίστροφο μετασχηματισμό Clarke. Τελικά υπολογίζονται οι χρόνοι έναυσης των διακοπτικών στοιχείων από τις παρακάτω εξισώσεις και φαίνονται στο σχήμα 5.17:

$$t_{aon} = \frac{T - (t_1 + t_2)T}{4} \quad (5.3.28)$$

$$t_{bon} = t_{aon} + \frac{t_1}{2}T \quad (5.3.29)$$

$$t_{con} = t_{bon} + \frac{t_2}{2}T \quad (5.3.30)$$



Σχήμα 5.17: Παλμοί έναυσης σε μια περίοδο όταν το διάνυσμα αναφοράς βρίσκεται στον τομέα V_0, V_{60}

Ανάλογα με τον τομέα στον οποίο βρίσκεται το διάνυσμα αναφοράς, η διαδοχή των διακοπτικών στοιχείων αλλάζει. Η διαδοχή αυτή καθώς και οι χρόνοι έναυσης παρουσιάζονται στον πίνακα 5-6 σε μια περίοδο όταν το διάνυσμα αναφοράς βρίσκεται στον τομέα V_0, V_{60} .

Πίνακας 5-6: Αλληλουχία χρόνων έναυσης για κάθε τομέα.

Τομέας	U_0, U_{60}	U_{60}, U_{120}	U_{120}, U_{180}	U_{180}, U_{240}	U_{240}, U_{300}	U_{300}, U_0
Ta	taon	tbon	tcon	tcon	tbon	taon
Tb	tbon	taon	taon	tbon	tcon	tcon
Tc	tcon	tcon	tbon	taon	taon	tbon

Η περίοδος δειγματοληψίας στην περίπτωση αυτή είναι $T_s = 2T_c = 1/f_s$ (f_s : συχνότητα δειγματοληψίας). Παρατηρούμε ότι οι παλμοί είναι συμμετρικοί ως προς το μέσο της περιόδου δειγματοληψίας, ώστε η τάση εξόδου να έχει την ελάχιστη δυνατή αρμονική παραμόρφωση. Τα διαστήματα μηδενισμού κατανέμονται κατάλληλα μεταξύ των δύο μηδενικών επιτρεπών διανυσμάτων κατάστασης, έτσι ώστε να έχουμε τις ελάχιστες δυνατές μεταγωγές διακοπών και συνεπώς τις ελάχιστες απώλειες.

Στη γραμμική περιοχή λειτουργίας, το επιθυμητό διάνυσμα κατάστασης πάντοτε παραμένει εντός του κανονικού εξαγώνου. Στην περίπτωση αυτή, ο δείκτης διαμόρφωσης δίνεται από τη σχέση :

$$M_f = \frac{\widehat{V}^*}{\widehat{V}_{1sw}} \quad (5.3.31)$$

όπου \widehat{V}^* το επιθυμητό πλάτος τάσης φορτίου και \widehat{V}_{1sw} το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας ($2V_d/\pi$) για λειτουργία με τετραγωνικό παλμό τάσης. Ο δείκτης διαμόρφωσης λαμβάνει τιμές από 0 έως 1, όπου για μονάδα έχουμε λειτουργία με τετραγωνικό παλμό. Το μέγιστο πλάτος της τάσης αναφοράς στη γραμμική περιοχή λειτουργίας θα είναι:

$$\widehat{V}_{(max)}^* = \frac{2}{3} \cdot V_d \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = 0.577 \cdot V_d \quad (5.3.32)$$

Συνεπώς, η μέγιστη τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης για γραμμική λειτουργία θα είναι :

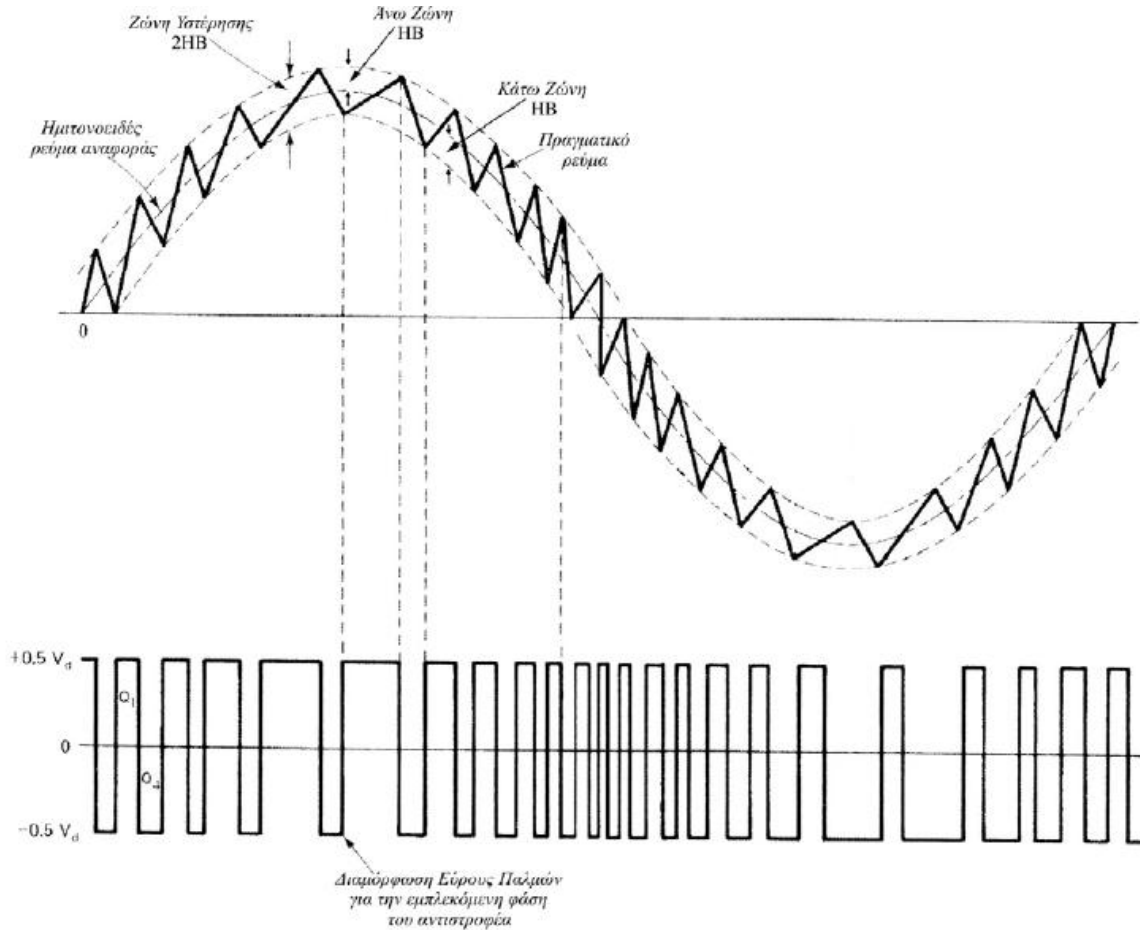
$$M_f^{mac} = \frac{\widehat{V}_{(max)}^*}{\widehat{V}_{1sw}} = \frac{0.577 \cdot V_d}{\left(\frac{2 \cdot V_d}{\pi}\right)} = 0.907 \quad (5.3.33)$$

Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό, ότι με την τεχνική SV-PWM η δυνατότητα τάσης εξόδου, στη γραμμική λειτουργία, είναι ίση με το 90,7% του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου για λειτουργία με τετραγωνικό παλμό τάσης. Το γεγονός αυτό αποτελεί μια σαφώς βελτιωμένη επίδοση σε σχέση με το 78,55% της τεχνικής SPWM. Βέβαια η μέθοδος αυτή υπολογιστικά είναι πιο πολύπλοκη σε σχέση με την SPWM εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των διακοπτικών καταστάσεων του αντιστροφέα.

5.3.3 Διαμόρφωση εύρους παλμών για τον έλεγχο ρεύματος σε ζώνη υστέρησης (Hysteresis Band Current Control PWM)

Η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών για τον έλεγχο ρεύματος σε ζώνη υστέρησης (Hysteresis Band Current Control PWM) συνίσταται στον κατάλληλο έλεγχο των ημιαγωγικών διακοπών του αντιστροφέα έτσι ώστε το στιγμιαίο ρεύμα του φορτίου να παραμένει εντός μιας προκαθορισμένης ζώνης υστέρησης (όριο σφάλματος) γύρω από την επιθυμητή του στιγμιαία τιμή.

Ο αλγόριθμος διαμόρφωσης του εύρους των παλμών του αντιστροφέα ώστε το στιγμιαίο ρεύμα μιας φάσης εξόδου του να ακολουθεί την επιθυμητή κυματομορφή εντός μιας ζώνης υστέρησης φαίνεται στο σχήμα 5.18.



Σχήμα 5.18: Αρχή λειτουργίας του ελέγχου ρεύματος με ζώνη υστέρησης

Αρχικά εισάγουμε την επιθυμητή κυματομορφή του ρεύματος (με το ζητούμενο πλάτος και συχνότητα) στο σύστημα ελέγχου και θέτουμε το εύρος της ζώνης υστέρησης. Το στιγμιαίο ρεύμα της φάσης του φορτίου που παρακολουθούμε θα πρέπει πάντοτε να παραμένει εντός της ζώνης υστέρησης. Εάν το ρεύμα αυξηθεί και τείνει να βγει από τη ζώνη υστέρησης , υπερβαίνοντάς την , θα πρέπει να το μειώσουμε. Αυτό επιτυγχάνεται με το άνοιγμα του άνω διακόπτη και το κλείσιμο του κάτω διακόπτη της ημιγέφυρας που ελέγχει την εμπλεκόμενη φάση. Η ενέργεια αυτή έχει ως αποτέλεσμα η τάση εξόδου του αντιστροφέα στη φάση αυτή να γίνει αρνητική ($- V_d / 2$) και το ρεύμα να μειώνεται. Μόλις συμβεί το αντίθετο, δηλαδή το ρεύμα μειωθεί και τείνει να βγει από τη ζώνη υστέρησης , περνώντας κάτω από αυτή , θα πρέπει να το αυξήσουμε. Αυτό επιτυγχάνεται με το κλείσιμο του άνω διακόπτη και το άνοιγμα του κάτω διακόπτη της ημιγέφυρας που ελέγχει την εμπλεκόμενη φάση. Η ενέργεια αυτή έχει ως αποτέλεσμα η τάση εξόδου του αντιστροφέα στη φάση αυτή να γίνει θετική ($+V_d / 2$) και το ρεύμα να αυξάνεται. Με τον τρόπο αυτό , το πραγματικό στιγμιαίο ρεύμα αναγκάζεται να ακολουθεί το επιθυμητό εντός της προκαθορισμένης ζώνης υστέρησης. Ο ίδιος έλεγχος θα πρέπει να εφαρμοστεί σε όλες τις φάσεις ενός τριφασικού αντιστροφέα.

Πρακτικά ο ελεγκτής στην εν λόγω μέθοδο υπολογίζει το σφάλμα του ρεύματος και στη συνέχεια το περνά από έναν ελεγκτή υστέρησης, ο οποίος το περιορίζει εντός της προκαθορισμένης ζώνης. Το σήμα που προκύπτει αποτελεί την κυματομορφή διαμόρφωσης ή αναφοράς, η οποία συγκρίνεται με μια τριγωνική κυματομορφή φορέα και η σύγκριση αυτή αποδίδει τους παλμούς έναυσης των ημιαγωγικών διακοπών σύμφωνα με την τεχνική PWM.

Όταν ο πάνω διακόπτης είναι κλειστός, η θετική κλίση του ρεύματος δίνεται από τη σχέση :

$$\frac{di}{dt} = \frac{0.5V_d - V_{cm} \sin \omega t}{L} \quad (5.3.34)$$

Όπου $0.5V_d$ είναι η εφαρμοζόμενη τάση, $V_{cm} \sin \omega t$ είναι η στιγμιαία τιμή της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης του φορτίου (CEMF) και L είναι η ενεργός αυτεπαγωγή του φορτίου. Η αντίστοιχη σχέση όταν ο διακόπτης είναι κλειστός είναι:

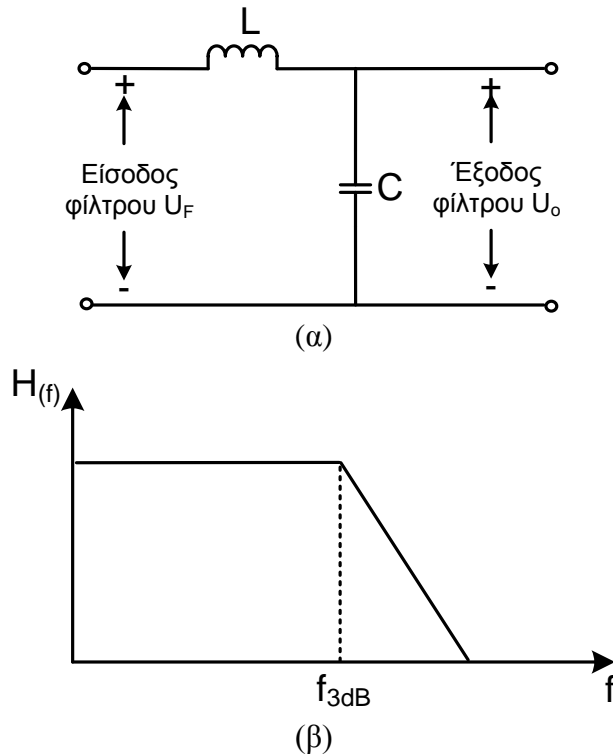
$$\frac{di}{dt} = \frac{-(0.5V_d + V_{cm} \sin \omega t)}{L} \quad (5.3.35)$$

Η τεχνική αυτή ελέγχου είναι ιδιαίτερα απλή, παρουσιάζει ταχύτητα στην απόκριση και άμεσο περιορισμό του ρεύματος φορτίου και για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιείται ευρέως. Βέβαια παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Η κυμάτωση του ρεύματος και η διακοπτική συχνότητα εξαρτώνται και καθορίζονται από το εύρος της ζώνης υστέρησης, επομένως η συχνότητα PWM δεν είναι σταθερή και το αρμονικό περιεχόμενο και η κυμάτωση του ρεύματος στο φορτίο δεν είναι βέλτιστα. Αυτό οφείλεται στον τρόπο ελέγχου που εξασφαλίζει ταχεία αλλά όχι βέλτιστη απόκριση αφού συνίσταται σε αναίσθητες διαδοχικές ωθήσεις του ρεύματος προς την επιθυμητή κατεύθυνση μόλις περάσει κάποιο όριο σφάλματος. Ένας τρόπος αντιμετώπισης των προβλημάτων αυτών είναι η επιλογή κατάλληλου εύρους για τη ζώνη υστέρησης ή ενός δυναμικού εύρους.

5.4 Φίλτρα εισόδου - εξόδου αντιστροφείας

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν ορισμένα στοιχεία για τη σχεδίαση φίλτρων εισόδου και εξόδου ενός αντιστροφείας. Βασική απαίτηση στο σχεδιασμό φίλτρων είναι οι κυματομορφές στην έξοδο του φίλτρου να παρουσιάζουν THD μικρότερο του 5%. Υπάρχουν πολλά είδη φίλτρων (παθητικά, ενεργά) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις περιστάσεις. Ο πιο απλός και συνηθισμένος τύπος φίλτρου, που χρησιμοποιείται στην είσοδο και έξοδο του αντιστροφείας, είναι το βαθυπερατό φίλτρο ή φίλτρο LC. Η τοπολογία ενός βαθυπερατού φίλτρου φαίνεται στο

σχήμα 5.19(α). Πρόκειται για μια απλή τοπολογία που περιλαμβάνει μια αυτεπαγωγή L και μια χωρητικότητα C . Η λειτουργία του βαθυπερατού φίλτρου στηρίζεται στο γεγονός ότι επιτρέπει τη διέλευση των χαμηλών συχνοτήτων και αποτρέπει τη διέλευση των υψηλών συχνοτήτων (σχήμα 5.19(β)). Σε επίπεδο τάσης, αυτό σημαίνει ότι το φίλτρο LC επιτρέπει τη διέλευση της βασικής αρμονικής συνιστώσας και ένα μικρό μέρος των ανώτερων αρμονικών, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο συντελεστής THD.



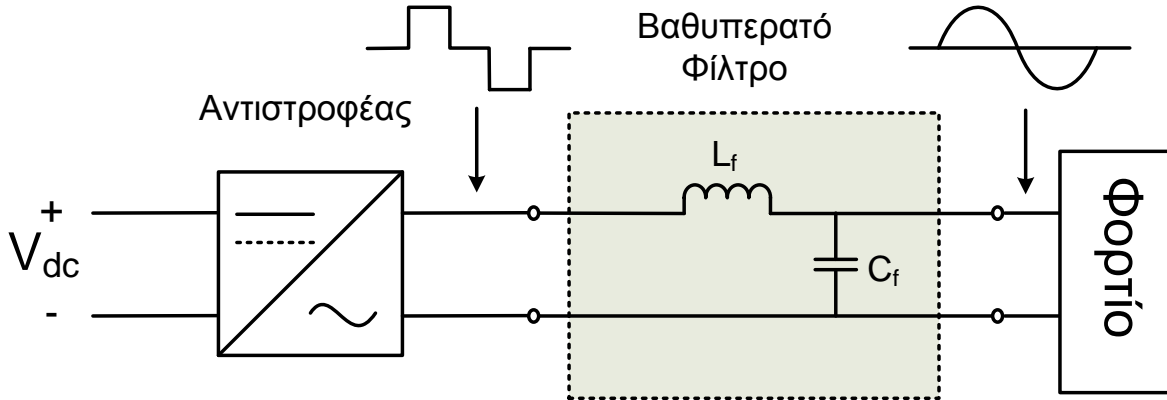
Σχήμα 5.19: Βαθυπερατό φίλτρο:
 (α) Τοπολογία βαθυπερατού φίλτρου
 (β) Διάγραμμα συνάρτησης μεταφοράς

5.4.1 Φίλτρα εξόδου αντιστροφέα

5.4.1.1 Φίλτρο εξόδου τοπολογίας LC

Στο σχήμα 5.20 παρουσιάζεται ένα βαθυπερατό φίλτρο εξόδου αντιστροφέα. Ας υποθέσουμε ότι η σύνθετη αντίσταση που παρουσιάζει το φορτίο είναι Z_L . Εφαρμόζοντας το Νόμο Τάσεων Kirchoff για την έξοδο του αντιστροφέα, θα πάρουμε την παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{U_o}{U_f} = \frac{1}{1 + j\omega\omega_f \left(\frac{1}{Z_L} + j\omega\omega_f \right)} \Leftrightarrow \frac{U_o}{U_f} = \frac{1}{1 - \omega^2 L_f C_f + j\omega \cdot \frac{L_f}{Z_L}} \quad (5.4.1)$$



Σχήμα 5.20: Βαθυπερατό φίλτρο εξόδου LC

Από τη σχέση 5.4.1 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για τη ν-οστή αρμονική συνιστώσα της τάσης εξόδου θα ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{\hat{U}_{o,n}}{U_{f,n}} = \frac{1}{1 - n^2 \omega^2 L_f C_f + \frac{j n \omega L_f}{Z_{L,n}}} \quad (5.4.2)$$

Κρατώντας αμετάβλητες τις τιμές της χωρητικότητας και της αυτεπαγωγής στη σχέση 5.4.2, για $Z_{L,n} \rightarrow \infty$ (δηλαδή για λειτουργία χωρίς φορτίο, εν κενώ) ο λόγος $\hat{U}_{o,n} / \hat{U}_{f,n}$ παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή του και κατά συνέπεια έχουμε τη χειρότερη περίπτωση ανώτερων αρμονικών στο φορτίο. Επομένως, θέτοντας $1/Z_{L,n} = 0$, η σχέση 5.4.2 παίρνει την εξής μορφή:

$$\frac{\hat{U}_{o,n}}{U_{f,n}} = \frac{1}{1 - n^2 \omega^2 L_f C_f} \quad (5.4.3)$$

Αποδεικνύεται ότι εάν η κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική συνιστώσα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα μειωθεί στο 3% της βασικής αρμονικής συνιστώσας από το φίλτρο εξόδου, τότε επιτυγχάνεται συντελεστής THD μικρότερος του 5% για λειτουργία εν κενώ που αποτελεί και τη χειρότερη περίπτωση λειτουργίας.

Αν θελήσουμε να μελετήσουμε τα φίλτρα εξόδου των τριφασικών αντιστροφέων με μια διαφορετική προσέγγιση, ιδιαίτερο βάρος έχει η παρατήρηση ότι η έξοδος στο πεδίο της συχνότητας αποτελείται από:

- Ανώτερες αρμονικές που βρίσκονται σε συχνότητες πολλαπλάσιες της συχνότητας φορέα, περιττής τάξης.
 - Πλευρικές αρμονικές γύρω από το κάθε πολλαπλάσιο της φέρουσας συχνότητας, με απόσταση πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας.
- Συνεπώς, η θέση κάθε αρμονικής στον άξονα των συχνοτήτων, f_h , δίνεται από τη σχέση:

$$f_h = n \cdot f_c \pm m \cdot f_r, \text{ όπου } n, m \in Z \quad (5.4.4)$$

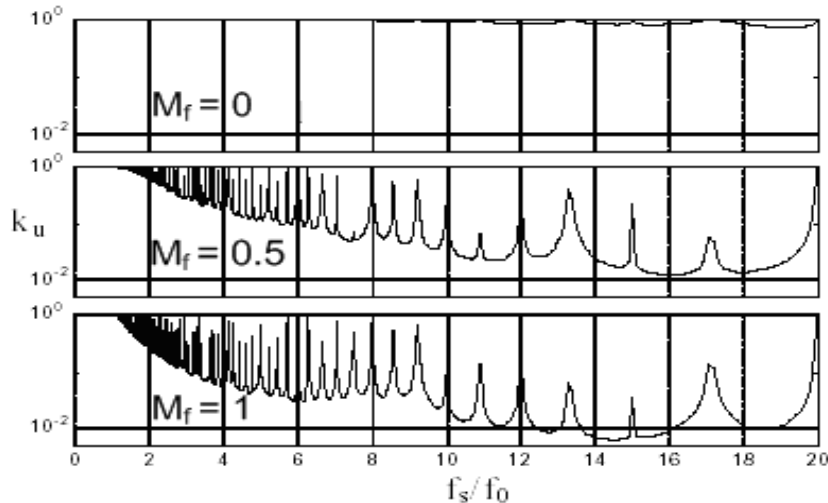
Οι κυριαρχούσες αρμονικές παρατηρούνται στη συχνότητα φορέα f_c και στις πλευρικές συχνότητες $f_h = f_c \pm 2f_r$. Ως εκ τούτου, απαιτείται φίλτρο εξόδου που να έχει συχνότητα συντονισμού f_o , $f_o = 1/2\pi\sqrt{LC}$, η οποία να ικανοποιεί τον περιορισμό:

$$f_r < f_o < f_s - 2f_r \quad (5.4.5)$$

Βασικό κριτήριο για την απόδοση του φίλτρου είναι η ελαχιστοποίηση της κυμάτωσης της τάσης εξόδου. Η κυμάτωση δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$k_R = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} (\widehat{V}_{R,n}^2 - \widehat{V}_{R,1}^2)}{\sum_{n=1}^{\infty} V_{R,n}^2}} \quad \text{και} \quad \widehat{V}_{R,1}^2 = M \frac{V_{DC}}{2} \quad (5.4.6)$$

Στο σχήμα 5.21 παρουσιάζεται η κυμάτωση συναρτήσει του λόγου συχνοτήτων f_c/f_o . Με δεδομένο ότι επιδιώκουμε συνήθως υψηλό συντελεστή διαμόρφωσης (συνεπώς $M \rightarrow 1$), διαπιστώνουμε από το σχήμα 5.21 ότι η χαμηλότερη κυμάτωση ($k_R < 5\%$) παρατηρείται για $f_c/f_o \approx 14.5$. Επομένως, αν για παράδειγμα ένα σύστημα αντιστροφείας έχει διακοπτική συχνότητα 6kHz, τότε το φίλτρο εξόδου θα έχει συχνότητα συντονισμού περίπου 413.8Hz.

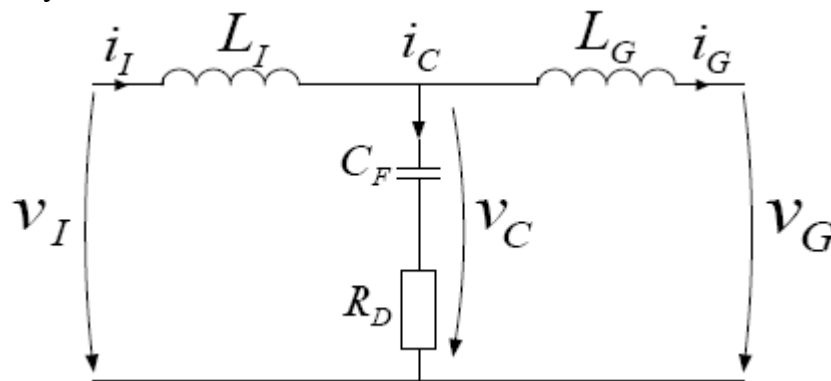


Σχήμα 5.21: Κανονικοποιημένη κυμάτωση της φασικής τάσης εξόδου εν συναρτήσει του λόγου συχνότητας φορέα προς τη συχνότητα συντονισμού του φίλτρου εξόδου, για διάφορες τιμές του δείκτη διαμόρφωσης

5.4.1.2 Φίλτρο εξόδου τοπολογίας LCL

Μια εναλλακτική τοπολογία σύνδεσης του αντιστροφέα με το δίκτυο είναι το φίλτρο LCL, το οποίο παρέχει υψηλή απόδοση με χαμηλό φόρτο και κόσθη. Αυτό είναι και ο λόγος που αυτή η τοπολογία χρησιμοποιείται συχνά. Το φίλτρο LCL αποτελείται από τρεις σύνθετες αντιστάσεις με πραγματική αντίσταση R_i και αυτεπαγωγή L_i από την πλευρά του μετατροπέα, τρεις πυκνωτές C_f με απώλειες σε αντιστάτες τιμής R_D και τρεις σύνθετες αντιστάσεις με πραγματική αντίσταση R_g και αυτεπαγωγή L_g από την πλευρά του δικτύου, θεωρώντας ενσωματωμένη τη σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή και του δικτύου. Το φίλτρο αυτό μειώνει τις συνιστώσες ρεύματος υψηλών συχνοτήτων από τον αντιστροφέα.

Το φίλτρο αυτό έχει τους πυκνωτές συνδεδεμένους σε αστέρα, αλλά ο κεντρικός αστέρας δεν είναι γειωμένος. Οι τάσεις του αντιστροφέα δεν αναφέρονται στη γη αλλά στο κοινό σημείο του αστέρα των πυκνωτών, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο για τους αντιστροφέις. Το μοντέλο ενός φίλτρου LCL ανάμεσα σε δύο φάσεις φαίνεται στο σχήμα 5.22. Οι κύριες απαιτήσεις από αυτό το φίλτρο είναι η αποσύζευξη της ενέργειας μεταξύ της τάσης του δικτύου και του αντιστροφέα, η απομόνωση του θορύβου και οι μικρές απώλειες.



Σχήμα 5.22: Τοπολογία φίλτρου LCL

Από το παραπάνω σχήμα, το μοντέλο του φίλτρου στο πεδίο της συχνότητας μπορεί να γραφτεί ως εξής:

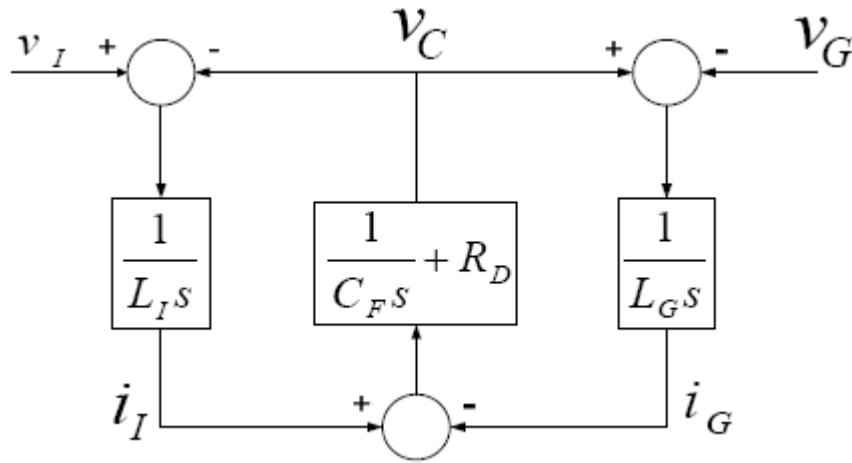
$$\begin{aligned}
 i_I - i_C - i_G &= 0 \\
 v_I &= i_I L_I s + v_c \\
 v_G &= -i_G L_G s + v_c \\
 v_c &= i_C \left(\frac{1}{C_F s} + R_D \right)
 \end{aligned}
 \tag{5.4.7}$$

όπου v_I είναι η τάση εξόδου του αντιστροφέα, i_I το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα, L_I η αυτεπαγωγή από το μέρος του αντιστροφέα, L_G η αυτεπαγωγή από το μέρος του

δικτύου, C_F η χωρητικότητα του δικτύου και R_D η αντίσταση που ισοδυναμεί με τις απώλειες του φίλτρου. Επομένως οι εξισώσεις του δικτύου μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{1}{L_I s} (v_I - v_C) \\ i_G &= \frac{1}{L_G s} (v_C - v_G) \\ v_C &= (i_I - i_G) \left(\frac{1}{C_F s} + R_D \right) \end{aligned} \quad (5.4.8)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να παρασταθούν με το μοντέλο του σχήματος 5.23 για την παραγωγή της συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου:



Σχήμα 5.23: Μοντέλο LCL φίλτρου στο πεδίο της συχνότητας για μία φάση

Αν θεωρήσουμε το παραπάνω κύκλωμα ως ένα δίθυρο, τότε θα ισχύει:

$$v_I = z_{11}i_1 + z_{12}i_G \quad (5.4.9\alpha)$$

$$v_G = z_{21}i_1 + z_{22}i_G \quad (5.4.9\beta)$$

όπου

$$\begin{aligned} z_{11} &= L_I s + \frac{1}{C_F s} + R_D, & z_{12} &= -\left(\frac{1}{C_F s} + R_D \right) \\ z_{21} &= \frac{1}{C_F s} + R_D, & z_{22} &= -\left(L_G s + \frac{1}{C_F s} + R_D \right) \end{aligned} \quad (5.4.10)$$

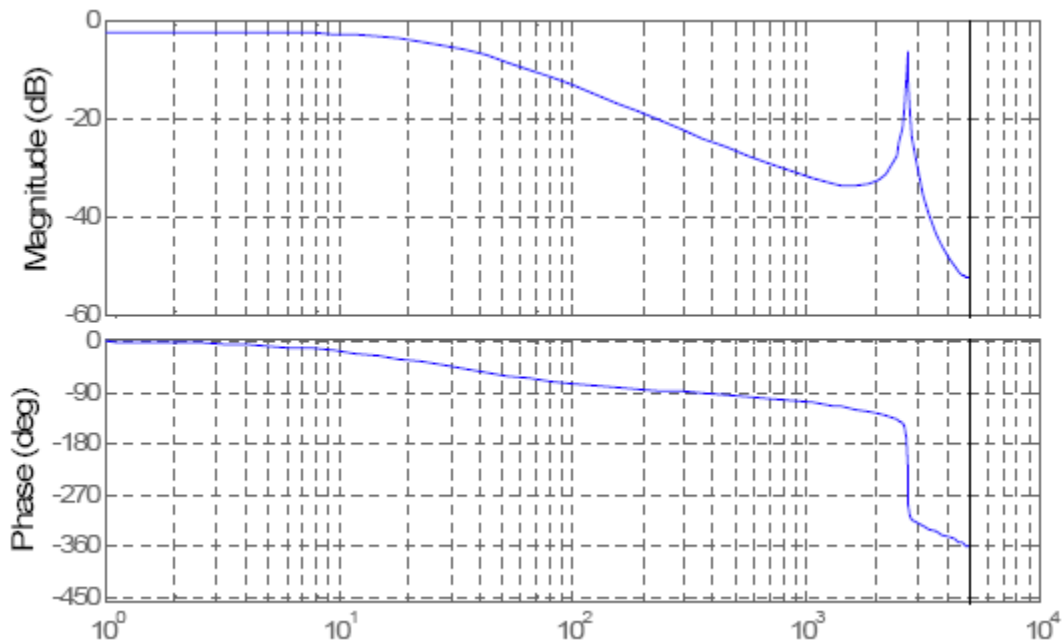
Για την παραγωγή της συνάρτησης μεταφοράς, θεωρούμε $v_G = 0$, οπότε προκύπτει:

$$H(s) = \frac{i_I(s)}{v_I(s)} = \frac{L_I C_F s^2 + R_D C_F s + 1}{L_I L_G C_F s^3 + R_D C_F (L_I + L_G) s^2 + (L_I + L_G) s} \quad (5.4.11)$$

Ενδεικτικά για τιμές:

$$L_I = 6mH, L_G = 3mH, C_F = 2\mu F, R_D = 0.05\Omega \quad (5.4.12)$$

στο σχήμα 5.23 δίνεται το διάγραμμα Bode πλάτους και φάσης.



Σχήμα 5.24: Διαγράμματα Bode για το φίλτρο LCL για τιμές των παραμέτρων από την 5.4.12

5.4.2 Φίλτρα εισόδου αντιστροφέα

Θεωρούμε για ευκολία έναν μονοφασικό αντιστροφέα. Προσομοιώνουμε τη λειτουργία του με μια διακοπτική συνάρτηση $s(\omega t)$ η οποία προσδιορίζει τον προγραμματισμό αγωγής των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα. Η τάση εξόδου σε αυτήν την περίπτωση θα είναι:

$$v_{if}(\omega t) = V * s(\omega t) \quad (5.4.13)$$

Όμως, όπως αποδείχθηκε στην παράγραφο 5.2.2 ο προγραμματισμός αγωγής θα είναι:

$$s(\omega t) \approx M_f \sin(\omega t) + \sum_{n=d}^{\infty} A_n \sin(n\omega_o t) \quad (5.4.14)$$

όπου d η τάξη της κυριαρχούσας αρμονικής συνιστώσας.

Από τις σχέσεις 5.4.13 και 5.4.14 το ρεύμα εξόδου υπολογίζεται ως εξής:

$$i_i(\omega t) = \frac{V_{if}}{Z_o(\omega t)} = \frac{V \cdot M_f \cdot \sin(\omega t + \varphi_1)}{|Z_{0,1}|} + \sum_{n=d}^{\infty} \frac{A_n \sin(n\omega_o t + \varphi_n)}{|Z_{o,n}|} \quad (5.4.15)$$

όπου $Z_{o,n}$ η σύνθετη αντίσταση εξόδου στη n -οστή αρμονική συνιστώσα και στην οποία συνυπολογίζονται οι σύνθετες αντιστάσεις φορτίου και φίλτρου εξόδου και φ_n η διαφορά φάσης μεταξύ των n -οστών αρμονικών συνιστωσών της τάσης και του ρεύματος εξόδου.

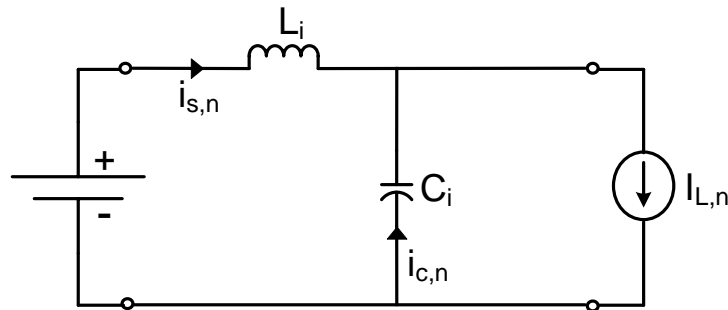
Το ρεύμα εισόδου του αντιστροφέα δίνεται από τη σχέση:

$$i_i(\omega t) = i_{if} * s(\omega t) \quad (5.4.16)$$

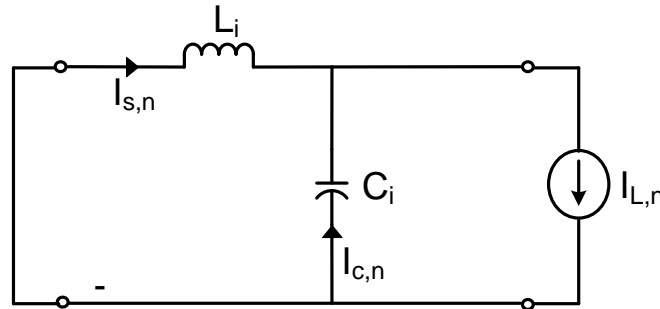
οπότε με περαιτέρω ανάλυση των σχέσεων 5.4.15 και 5.4.16 θα έχουμε:

$$i_i(\omega t) = \frac{VM_f^2 \cos(\varphi_1)}{2|Z_{0,1}|} + \frac{VM_f^2 \cos(2\omega_o t + \varphi)}{2|Z_{0,1}|} + \frac{VM_f \sin(\omega_o t + \varphi_1)}{|Z_{0,1}|} \sum_{n=d}^{\infty} A_n \sin(n\omega_o t) + \sum_{n=d}^{\infty} \sum_{k=d}^{\infty} \frac{A_n}{|Z_{0,n}|} A_k \sin(n\omega_o t + \varphi_n) \sin(k\omega_o t) \quad (5.4.17)$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα ολόκληρου του συστήματος του αντιστροφέα για τον υπολογισμό του φίλτρου εισόδου καθώς και το αρμονικό ισοδύναμο κύκλωμα, φαίνονται στο σχήμα 5.25. Από τα ισοδύναμα κυκλώματα και από τις παραπάνω σχέσεις, μπορούμε να υπολογίσουμε θεωρητικά τις κυματώσεις του ρεύματος και της τάσης εισόδου, και κατά συνέπεια από το σύστημα των εξισώσεων υπολογίζουμε τα στοιχεία αυτεπαγωγής και χωρητικότητας που συγκροτούν το φίλτρο εισόδου.



(α)



(β)

Σχήμα 5.25: (α) Ισοδύναμο κύκλωμα αντιστροφέα για τον υπολογισμό του φίλτρου εισόδου
(β) Αρμονικό ισοδύναμο κύκλωμα

5.5 Βιβλιογραφία - Αναφορές πέμπτου κεφαλαίου

- [1] Σ.Ν Μανιάς, «*Ηλεκτρονικά Ισχύος*», Συμμεών, 2000
- [2] Σ.Ν Μανιάς, Αθ. Καλετσάνος, «*Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά*», Συμμεών 2001
- [3] Bimal K. Bose, «*Modern Power Electronics and AC Drives*», Prentice Hall PTR, 2002
- [4] Muhammad H. Rashid, «*Power Electronics Handbook*», Academic Press, 2001
- [5] Ned Mohan, «*First Course on Power Electronics and Drives*», Ned Mohan, 2003
- [6] Μαλατέστας, Σ.Ν Μανιάς, «*Συστήματα οδήγησης ηλεκτρικών κινητήρων*», Συμμεών
- [7] Ιάκωβος Μανωλάς, «*Συγκριτική Μελέτη Τεχνικών Ελέγχου Κινητήρων Επαγωγής*», Διπλωματική εργασία, 2006
- [8] N. Mohan, W. P. Robbin, and T. Undeland, «*Power Electronics: Converters, Applications, and Design*», 2nd ed. New York: Wiley, 1995.
- [9] B. K. Bose, «*Power Electronics and Variable Frequency Drives: Technology and Applications*». IEEE Press, 1997.
- [10] H.W. van der Broeck, H.-C. Skudelny, and G.V. Stanke, «**Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors**», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.24, pp. 142-150, 1988
- [11] Guilian Guo, Wenxia You, «*Quality analysis of SVPWM Inverter Output Voltage*», 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering
- [12] Pavel Gajdusek, «*Programmable Laboratory Invertor and Space Vector PWM*»

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα προσομοίωσης τεχνικών ελέγχου του συστήματος BESS

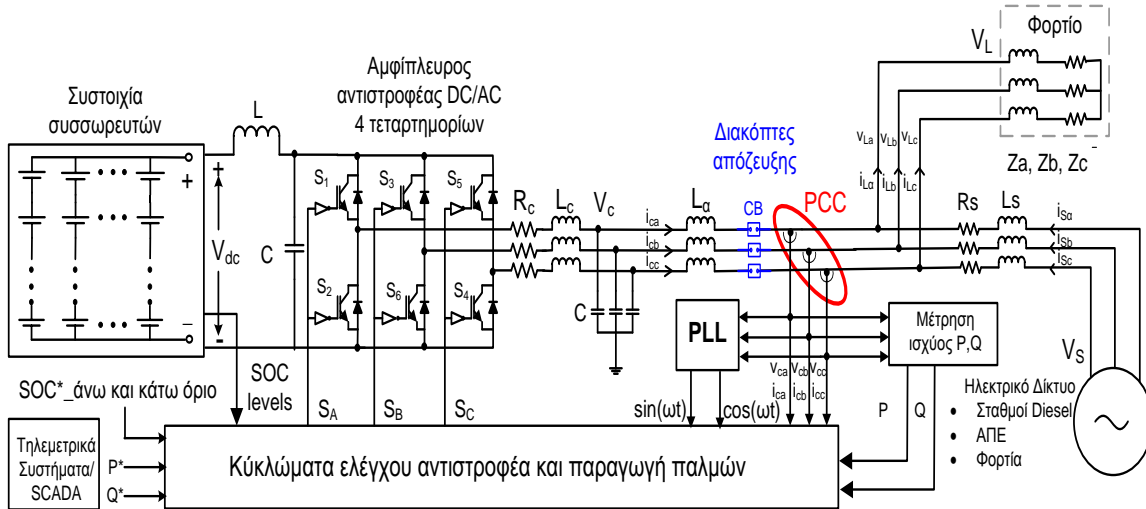
6.1 Εισαγωγή

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι κυριότερες τεχνικές ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος του συστήματος BESS. Έγινε ανάλυση αυτών σε θεωρητικό επίπεδο και σε επίπεδο υλοποίησης. Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε την εφαρμογή των εν λόγω τεχνικών σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο προσομοίωσης στον ηλεκτρονικό υπολογιστή χρησιμοποιώντας τις τεχνικές ελέγχου των παλμών του αντιστροφέα που έχουμε αναλύσει στο κεφάλαιο 5. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να αξιολογήσουμε και να συγκρίνουμε τις διάφορες τεχνικές με βάση την απόδοσή τους.

Οι προσομοιώσεις γίνονται στο περιβάλλον MATLAB/SIMULINK και τα αποτελέσματά τους δίνουν μια πολύ αντιπροσωπευτική εικόνα για την απόκριση του συστήματος και αποτελούν το ενδιάμεσο βήμα για την πρακτική εφαρμογή. Παρακάτω παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του συστήματος BESS, όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 4, καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Ο αναγνώστης μπορεί να βρει πληροφορίες για το πρόγραμμα MATLAB/SIMULINK στη βιβλιογραφία [3] - [5].

6.2 Μοντελοποίηση του συστήματος BESS

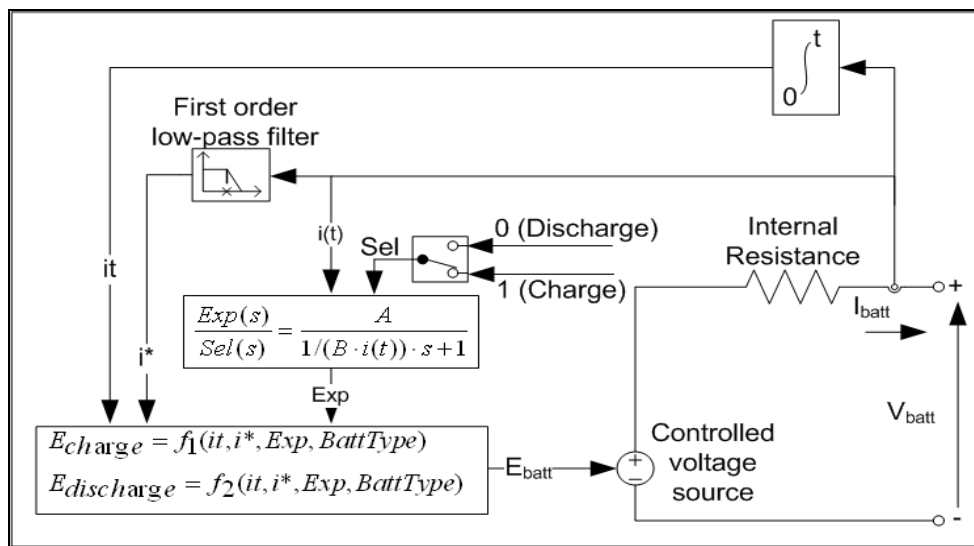
Αρχικά θα ασχοληθούμε με τη μοντελοποίηση του συστήματος BESS στο πρόγραμμα αριθμητικής επίλυσης MATLAB/SIMULINK το οποίο εκτελείται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η έκδοση του προγράμματος που χρησιμοποιείται είναι η 2009b. Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο και στο τέταρτο κεφάλαιο, το σύστημα BESS αποτελείται από επιμέρους υποσυστήματα τα οποία πρέπει να μοντελοποιηθούν. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1, τα συστήματα αυτά είναι : οι συστοιχίες των συσσωρευτών, ο αντιστροφέας ισχύος, τα φίλτρα εισόδου και εξόδου, το ηλεκτρικό δίκτυο, το PLL, το σύστημα ελέγχου και η μονάδα μετρήσεων των διαφόρων μεγεθών που χρειαζόμαστε. Κάποια από αυτά τα υποσυστήματα είναι κοινά για όλες τις τεχνικές ελέγχου οπότε θα ασχοληθούμε με τη μοντελοποίησή τους σε αυτή τη φάση πριν προχωρήσουμε στην προσομοίωση των διαφόρων τεχνικών ελέγχου.



Σχήμα 6.1: Γενικό δομικό διάγραμμα της διάταξης BESS που προσομοιώνεται

6.2.1 Μοντελοποίηση συσσωρευτών, αντιστροφέα, μετρητικών συστημάτων και δικτύου

Αρχικά θα παρουσιάσουμε το μοντέλο του συστήματος αποθήκευσης, που δεν είναι τίποτε άλλο από συσσωρευτές. Οι συσσωρευτές αυτοί αποτελούν την πηγή συνεχούς (DC) τάσης για τον αντιστροφέα και έχουν τη δυνατότητα να φορτίζονται και να εκφορτίζονται αποθηκεύοντας ή προσφέροντας ενέργεια αντίστοιχα. Για το μοντέλο των συσσωρευτών χρησιμοποιήθηκε το γενικό μοντέλο συσσωρευτών που δίνει το MATLAB /SIMULINK και βρίσκεται στη βιβλιοθήκη ‘Electrical Sources/Extra Sources’. Το δυναμικό αυτό μοντέλο αντιπροσωπεύει τις περισσότερες κατηγορίες επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών και παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2



Σχήμα 6.2: Ισοδύναμο κύκλωμα επαναφορτιζόμενου συσσωρευτή

Για τις προσομοιώσεις που ακολουθούν, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο λιθίου-ιόντος το οποίο εφαρμόζει τις παρακάτω εξισώσεις φόρτισης εκφόρτισης. Περισσότερες πληροφορίες μπορεί να βρει κανείς στο [3]

Lithium-Ion Model

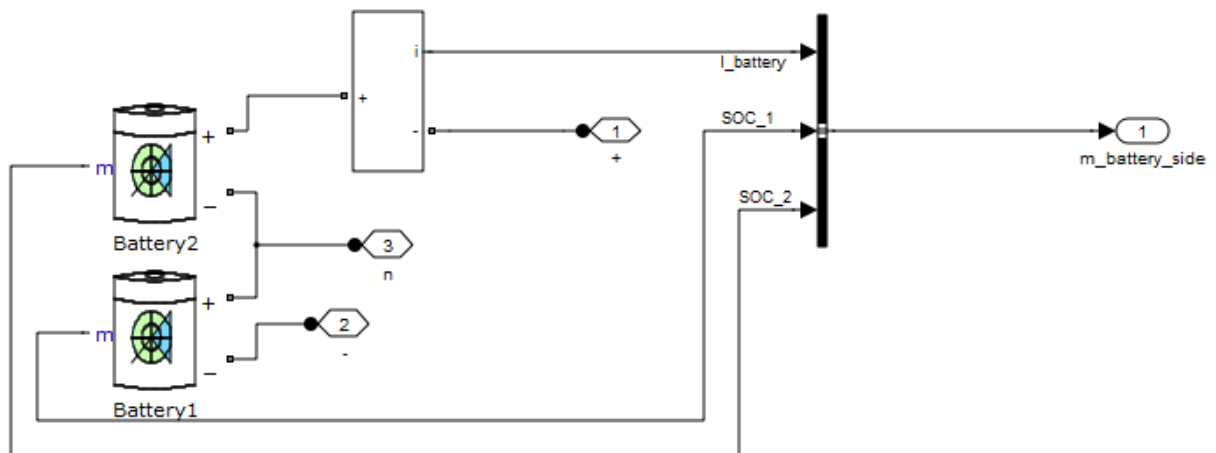
Discharge Model ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it)$$

Charge Model ($i^* < 0$)

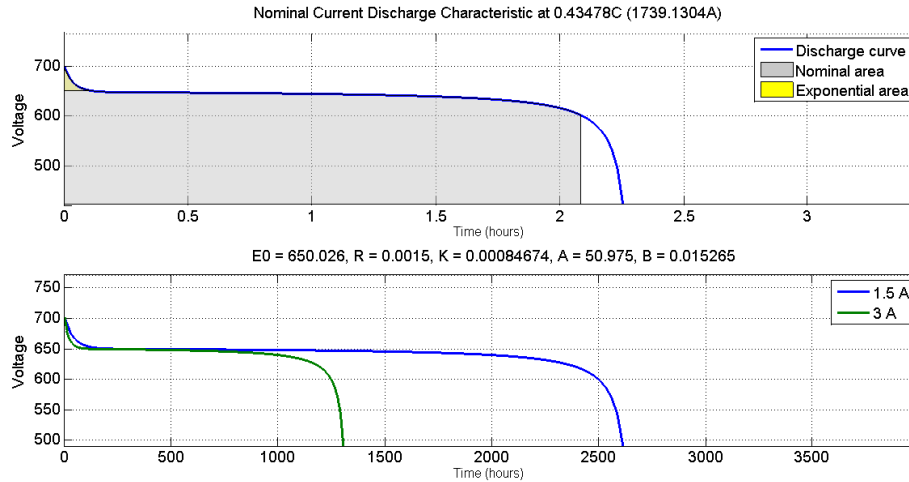
$$f_2(it, i^*) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it)$$

Για τη μελέτη που ακολουθεί, θεωρούμε δύο συστοιχίες συσσωρευτών με συνολική ονομαστική τάση $650V_{dc}$ και ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης $1740 A$. Μάλιστα χωρίζουμε την τάση αυτή σε δύο ίσα τμήματα των $325V$ με δύο όμοιες συστοιχίες ώστε να λάβουμε έναν κόμβο αναφοράς για τις μετρήσεις. Η χωρητικότητα τους υπολογίζεται στα $4000 Ah$. Το μοντέλο των συσσωρευτών παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3.



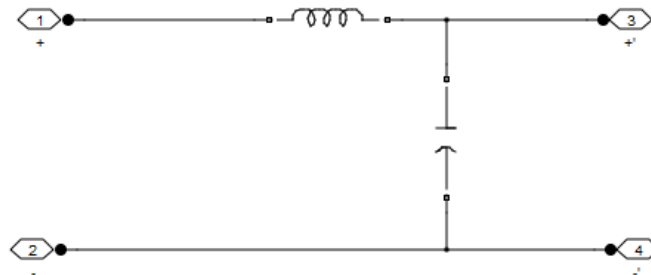
Σχήμα 6.3: Μοντέλο για την προσομοίωση των συσσωρευτών

Όπως παρατηρούμε, λαμβάνουμε μετρήσεις όχι μόνο του ρεύματος και της τάσης των συσσωρευτών κάθε χρονική στιγμή, αλλά και μετρήσεις των επιπέδων φόρτισης SOC_1 και SOC_2, οι τιμές των οποίων παίζουν καθοριστικό ρόλο για την εφαρμογή των τεχνικών ελέγχου που θα προσομοιώσουμε στη συνέχεια. Στο σχήμα 6.4 φαίνονται οι χαρακτηριστικές εκφόρτισης των συσσωρευτών. Συγκεκριμένα φαίνονται οι καμπύλες εκφόρτισης, καθώς και η περιοχή ονομαστικής λειτουργίας. Παρατηρούμε ότι για την πλήρη εκφόρτιση των συσσωρευτών στο ονομαστικό ρεύμα χρειάζονται περίπου 2,3 ώρες.

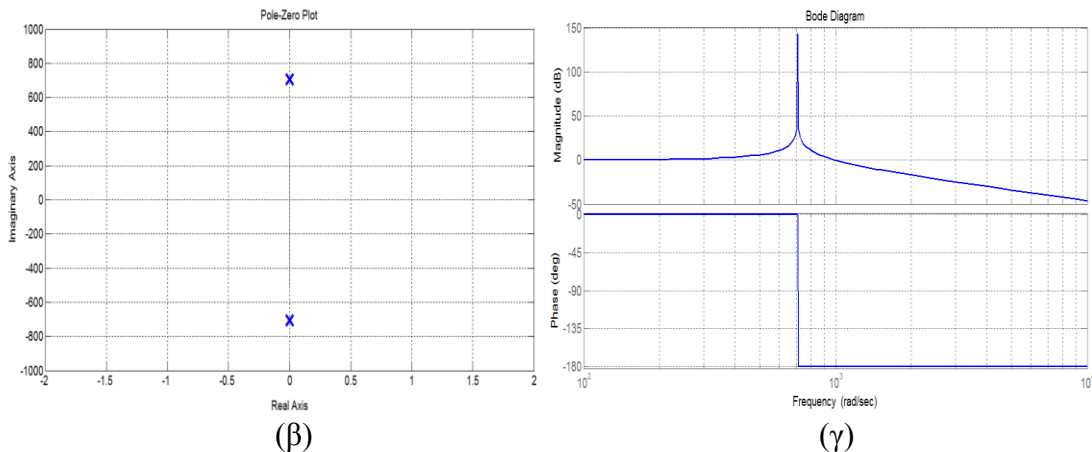


Σχήμα 6.4: Χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης των συσσωρευτών

Για την εξομάλυνση του ρεύματος εισόδου στον αντιστροφέα χρησιμοποιείται φίλτρο LC με τιμές $L=2\text{mH}$, $C=1000\mu\text{F}$, του οποίου το κύκλωμα, το διάγραμμα πολων μηδενικών και το διάγραμμα Bode φαίνονται στο σχήμα 6.5.



(α)



(β)

(γ)

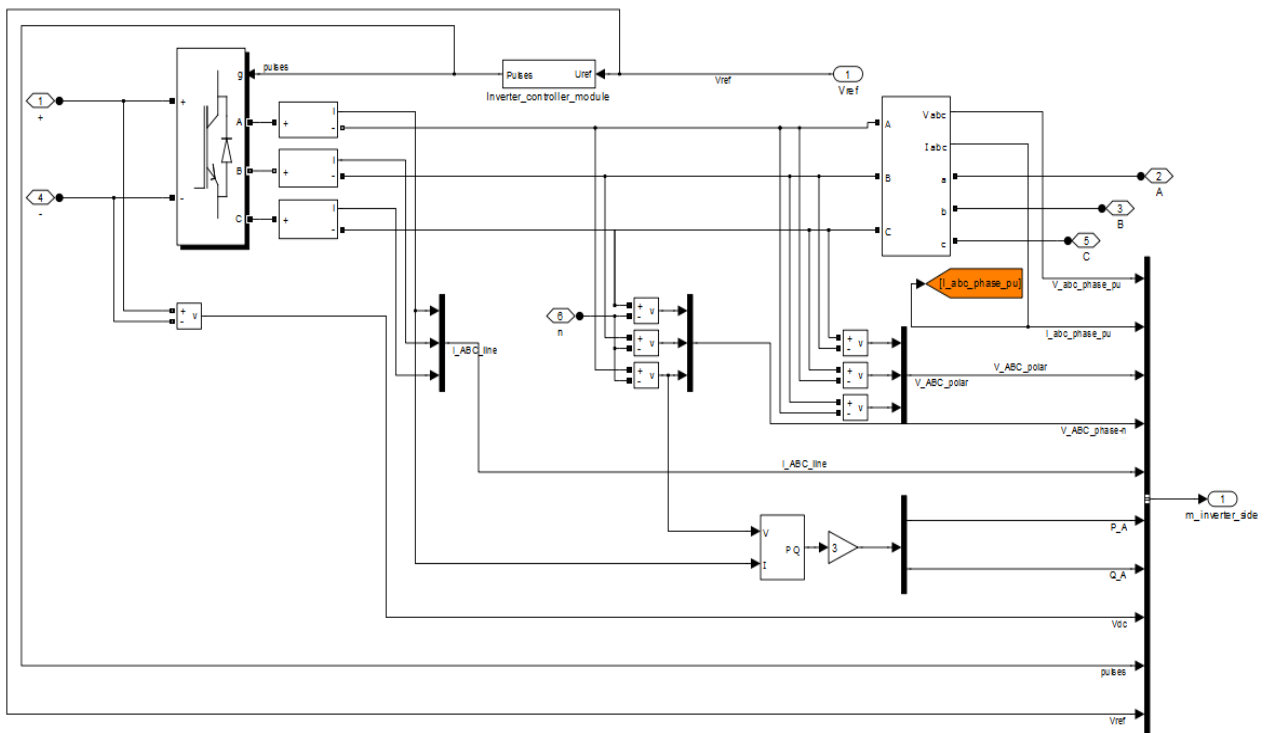
Σχήμα 6.5: (α) Φίλτρο εισόδου (ρεύματος) αντιστροφέα
 (β) Διάγραμμα πόλων-μηδενικών
 (γ) Διαγράμματα Bode πλάτους και φάσης

Ο αντιστροφέας που χρησιμοποιείται είναι ένας τριφασικός ελεγχόμενος αντιστροφέας πλήρους γέφυρας ο οποίος επιτρέπει την αμφίπλευρη ροή ενεργού και άεργου ισχύος και έχει λειτουργία τεσσάρων τεταρτημορίων. Ο αντιστροφέας αυτός θεωρείται ότι έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά του πίνακα 6-1:

Πίνακας 6-1: Χαρακτηριστικά αντιστροφέα συστήματος BESS

Μέγεθος	Τιμή
Όνομαστική ενεργός ισχύς συνεχούς λειτουργίας P_{nom}	1MW
Μέγιστη ενεργός ισχύς P_{max}	1,5MW
V_{dcmax}	1000V
Παράθυρο τάσης	300V - 800V
I_{dcmax}	2400A

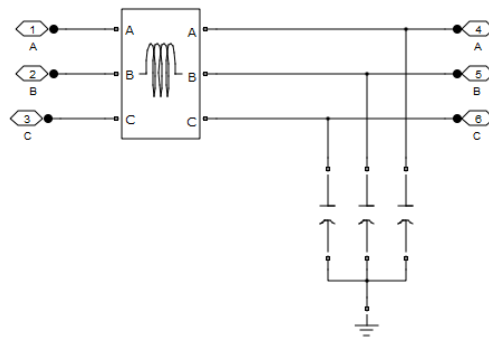
Ως μοντέλο του αντιστροφέα χρησιμοποιείται το ‘Universal Bridge’ από τη βιβλιοθήκη ‘Power Electronics’ του MATLAB/ SIMULINK υλοποιημένο με ημιαγωγά στοιχεία τύπου IGBT προκειμένου να μπορούν να διακινήσουν μεγάλη ισχύ. Από την πλευρά του αντιστροφέα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6, λαμβάνονται μετρήσεις φασικής, πολικής τάσης, καθώς και μετρήσεις του ρεύματος πριν το φίλτρο εξόδου.



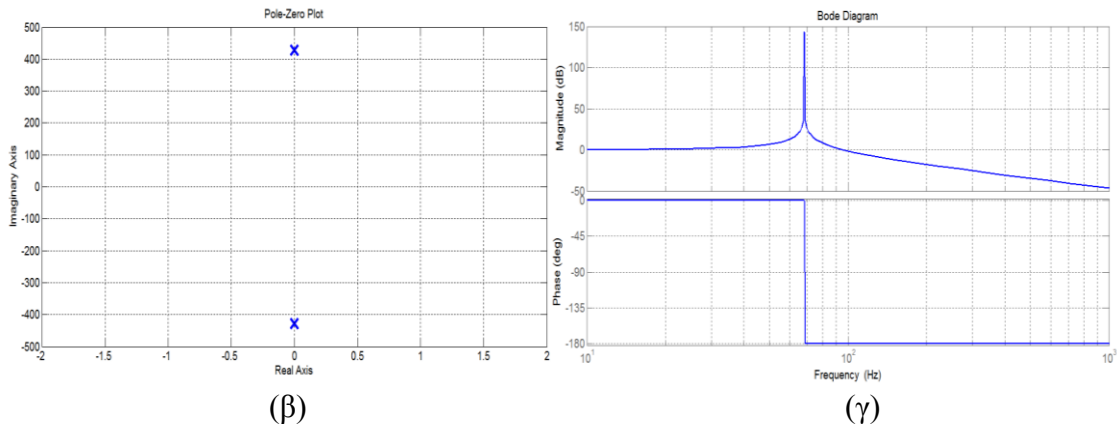
Σχήμα 6.6: Μοντέλο τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης και μετρητικών συστημάτων

Οι παλμοί του αντιστροφέα δίνονται με τεχνικές PWM και υστέρησης όπως θα εξετάσουμε στη συνέχεια, οπότε στην πρώτη περίπτωση η συχνότητα φορέα επιλέγεται 1050Hz, το οποίο μεταφράζεται σε $F_{nc} = 21$, δηλαδή περιττός ακέραιος, πολλαπλάσιος του τρία. Επιλέον η έξοδος του αντιστροφέα θα είναι $V_{rms} = 400V$ πολική, με αποτέλεσμα να λειτουργεί με υψηλό M_f , κοντά στη μονάδα. Για το μοντέλο αυτό θεωρήθηκαν τρεις διαφορετικές τεχνικές ελέγχου των παλμών (SPWM, SV-PWM, HBCC) οι οποίες θα εξεταστούν αργότερα όταν υλοποιηθούν οι τεχνικές ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος που χρησιμοποιεί το σύστημα BESS.

Για την εξομάλυνση της τάσης εξόδου του αντιστροφέα αλλά και για τη σύνδεση με το δίκτυο χρησιμοποιείται το ακόλουθο φίλτρο τάσης LC. Το φίλτρο αυτό θα πρέπει να επιτρέπει τη μέγιστη μεταφορά ενεργού ισχύος ανάμεσα στον αντιστροφέα και στο δίκτυο σύμφωνα με τη σχέση (3.3.4). Επιπλέον σύμφωνα με τη σχέση 5.4.6 και το σχήμα 5.21 επιδιώκεται το φίλτρο αυτό να παρουσιάζει τη μικρότερη δυνατή κυμάτωση στην τάση ώστε να ισχύει ότι για τη συχνότητα αποκοπής $f_c / f_o \approx 14.5$. Για $f_c = 1050Hz$ προκύπτει ότι $f_o = 72.4 Hz$. Για το λόγο αυτό υπολογίζονται οι τιμές του φίλτρου $L = 54.7mH$ και $C = 88,4\mu F$. Το κύκλωμα, το διάγραμμα πόλων-μηδενικών και το διάγραμμα Bode φαίνονται στο σχήμα 6.7.



(α)



(β)

(γ)

Σχήμα 6.7: (α) Φίλτρο εξόδου (τάσης) αντιστροφέα
(β) Διάγραμμα πόλων-μηδενικών
(γ) Διαγράμματα Bode πλάτους και φάσης

Το επόμενο μοντέλο αφορά ο δίκτυο και τα μετρητικά συστήματα. Στο κεφάλαιο 3 τονίστηκε η σημασία του σημείου κοινής σύνδεσης PCC, εφόσον σε αυτό το σημείο γίνονται οι μετρήσεις τάσεως, ρεύματος και εξάγονται οι μετρήσεις ενεργού και άεργου ισχύος. Ο τρόπος μέτρησης της ισχύος στο δίκτυο είναι πολύ σημαντικός. Σύμφωνα με την προσέγγιση του προτύπου της IEEE STD 1459 η φαινόμενη ισχύς ορίζεται ως η μέγιστη ενεργός ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί μέσω μιας δεδομένης τριφασικής γραμμής σε ένα τέλεια συμμετρικό τριφασικό φορτίο που τροφοδοτείται από τάση v_e , με τις απώλειες στη γραμμή να παραμένουν αμετάβλητες. Η φαινόμενη ισχύς ορίζεται από τον τύπο:

$$S_e = 3 \cdot v_e \cdot i_e \quad (6.1)$$

όπου :

$$v_e = \sqrt{\frac{3(v_a^2 + v_b^2 + v_c^2) + (v_{ab}^2 + v_{bc}^2 + v_{ca}^2)}{18}} \quad (6.2)$$

και :

$$i_e = \sqrt{\frac{i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 + i_n^2}{3}} \quad (6.3)$$

Όλες οι τιμές είναι *rms* ενώ i_n είναι το ρεύμα του ουδετέρου.

Όταν δεν υπάρχει ουδέτερος αγωγός, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του δικτύου που εξετάζουμε, οι τύποι (6.2) και (6.3) απλοποιούνται στους τύπους:

$$v_e = \sqrt{\frac{(v_{ab}^2 + v_{bc}^2 + v_{ca}^2)}{9}} \quad (6.4)$$

$$i_e = \sqrt{\frac{i_a^2 + i_b^2 + i_c^2}{3}} \quad (6.5)$$

Και αν η τάση και το ρεύμα είναι συμμετρικά ισχύει:

$$v_e = \frac{v_{LL}}{\sqrt{3}} \quad (6.6)$$

$$i_e = i \quad (6.7)$$

Οπότε προκύπτει ο γνωστός τύπος της ισχύος :

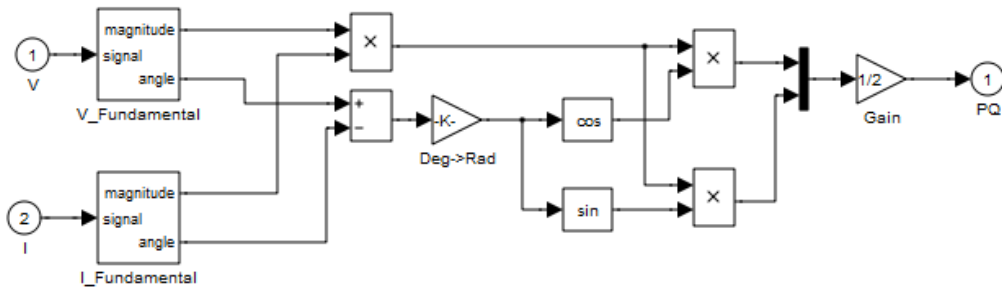
$$S_e = \sqrt{3} v_{LL} \cdot i \quad (6.8)$$

Για τη μέτρηση λοιπόν της ενεργού ισχύος σε ένα δίκτυο που περιέχει αρμονικές, χρησιμοποιείται ένα μπλοκ το οποίο υπολογίζει κάθε φορά το μέσο όρο του γινομένου $v \cdot i$ με ένα παράθυρο μέσου όρου που προχωρά με το χρόνο και είναι κεντραρισμένο στη θεμελιώδη συχνότητα των 50Hz, ώστε η ενεργός και η άεργος ισχύς να υπολογίζονται στη θεμελιώδη συχνότητα σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$P = \frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t (v(\omega t) \times i(\omega t)) dt \quad (6.9)$$

$$Q = \frac{1}{T} \int_{(t-T)}^t (v(\omega t) \times i(\omega t - \pi / 2)) dt \quad (6.10)$$

και υλοποιείται στο MATLAB/SIMULINK με το μπλοκ του σχήματος 6.8



Σχήμα 6.8: Το μπλοκ μέτρησης ενεργού και άεργου ισχύος στο MATLAB/SIMULINK

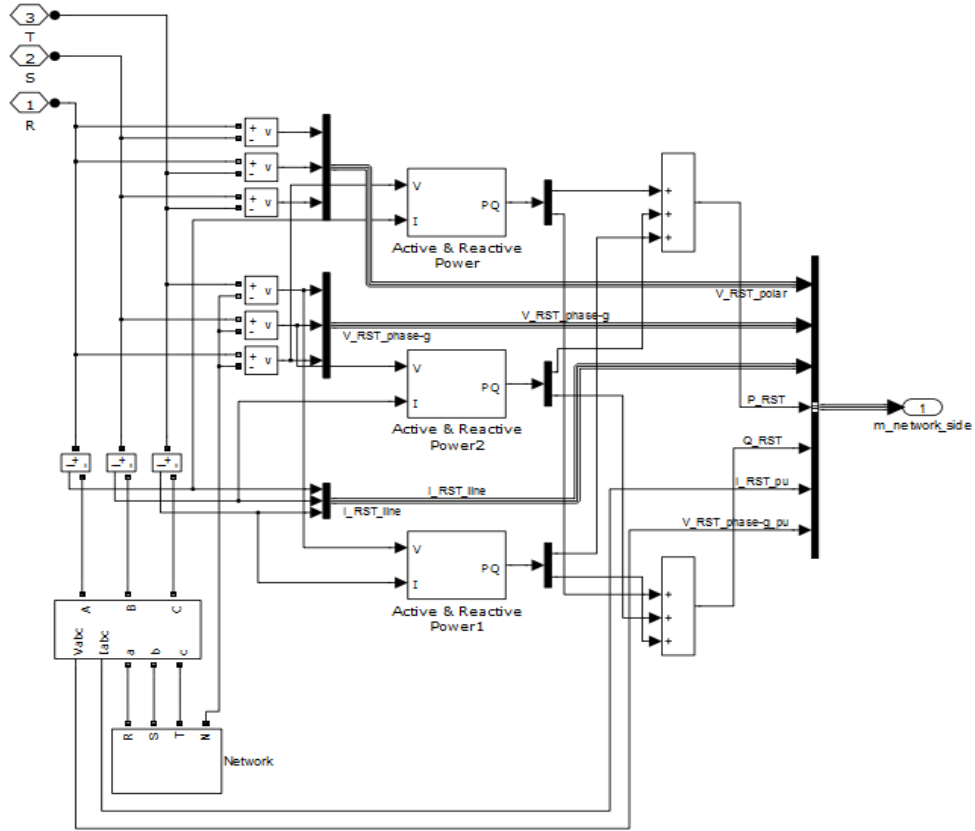
Για το μοντέλο του δικτύου θεωρούμε ένα δίκτυο άπειρου ζυγού χαμηλής τάσης τιμής 400V το οποίο διασυνδέεται με μετασχηματιστή D-Y με το δίκτυο μέσης τάσης 20kV. Τα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή είναι: φαινόμενη ισχύς 1500kVA, με $R=1\%$, $X=6\%$ ενώ το δίκτυο των 20kV έχει ισχύ βραχυκύκλωσης $S_k = 20MVA, \psi_k = 80^\circ$. Ως εκ τούτου, η σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$|Z_k| = \frac{V_n^2}{S_k} \quad (6.11)$$

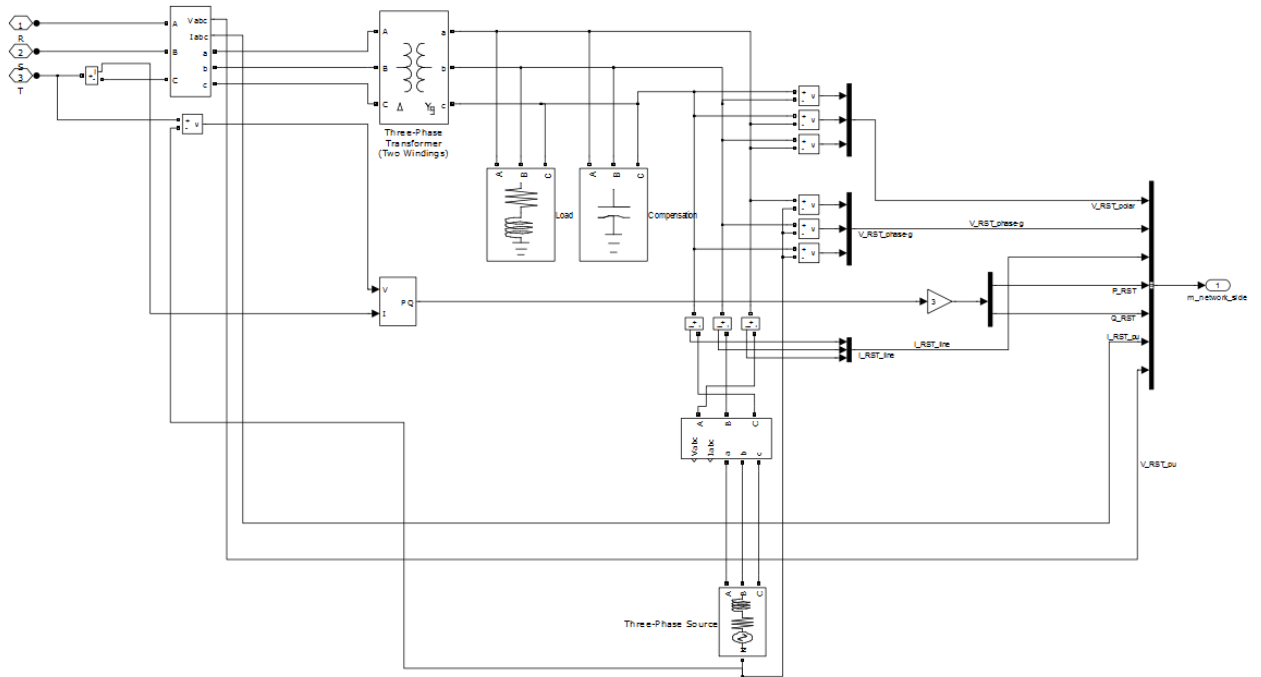
$$Z_k = |Z_k| \angle \psi_k \quad (6.12)$$

Παράλληλα συνδέεται φορτίο με $P = 3MW$ και συντελεστή ισχύος $\cos\phi = 0.85$ άρα ισχύει $Q = 1.86MW$, ενώ υπάρχει και αντιστάθμιση με πυκνωτές τιμής $Q_c = 600kVar$.

Η διαδικασία των μετρήσεων στο PCC φαίνεται στο σχήμα 6.9 ενώ το μοντέλο του δικτύου παρουσιάζεται στο σχήμα 6.10



Σχήμα 6.9: Μετρικά συστήματα τάσεων, ρευμάτων, ενεργού και άεργου ισχύος στο PCC



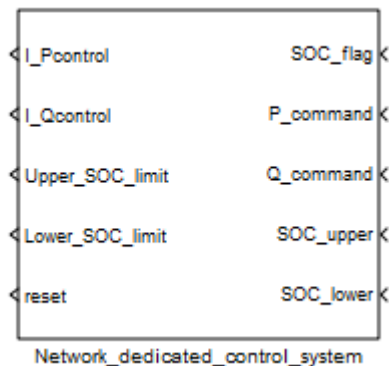
Σχήμα 6.10: Μοντέλο του δικτύου το οποίο θεωρείται ως ένας άπειρος ζυγός

Για την ανάλυση και τις μετρήσεις θεωρούμε τάση βάσης $V_{B1} = 400V$ από τη χαμηλή πλευρά, $V_{B2} = 20kV$ από την υψηλή πλευρά και ισχύ βάσης $S_B = 1000kVA$.

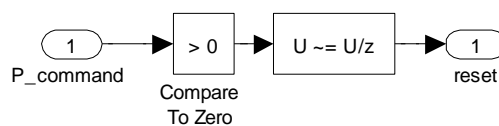
6.2.2 Μοντελοποίηση υποσυστημάτων ελέγχου συστήματος BESS

Στην παράγραφο αυτή θα μοντελοποιήσουμε στο MATLAB/SIMULINK το κύκλωμα ελέγχου του σχήματος 6.1 όπως αυτό έχει περιγραφεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 4 και πιο συγκεκριμένα στην παράγραφο 4.7. Το κύκλωμα ελέγχου περιέχει υποσυστήματα τα οποία είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους με δομή ‘αφέντη – δούλου’ (master-slave) και τα οποία υλοποιούν συγκεκριμένους αλγορίθμους και υπορουτίνες. Αρκετά από τα συστήματα αυτά είναι κοινά για τις τεχνικές τις οποίες θα αναλύσουμε στη συνέχεια, οπότε αυτή είναι η κατάλληλη στιγμή για την μοντελοποίηση τους.

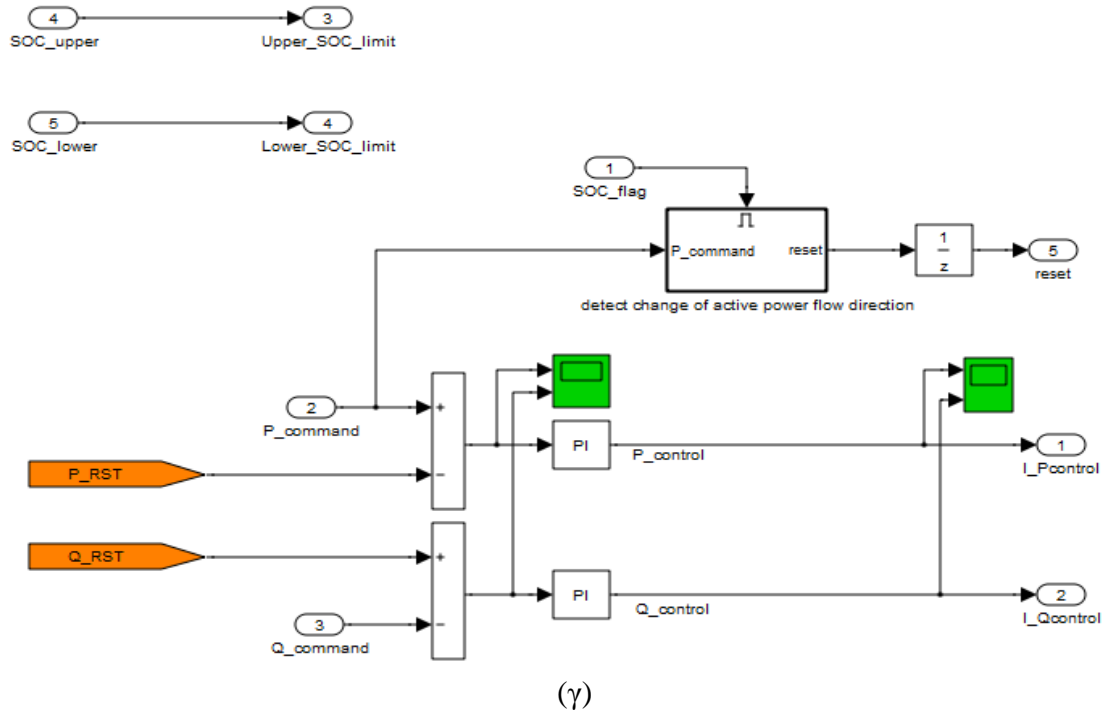
Αρχικά θα μοντελοποιήσουμε το ‘Network dedicated control system’ ή το ‘εστιασμένο στο δίκτυο’ σύστημα, το οποίο ελέγχει τη ροή ενεργού και άεργου ισχύος υλοποιώντας τον εξωτερικό βρόχο ελέγχου ισχύος. Παράλληλα, διαβιβάζει τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών και παράγει τα ρεύματα αναφοράς ευθέως και εγκάρσιου άξονα. Επιπλέον, παίρνει εντολές από το ‘BESS dedicated control and protection system’, που θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια, έτσι ώστε να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει άλλα επίπεδα ελέγχου. Για το σκοπό αυτό ελέγχεται η φορά της ενεργού ισχύος όταν λαμβάνεται η αντίστοιχη εντολή από το άλλο υποσύστημα. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 6.11.



(α)



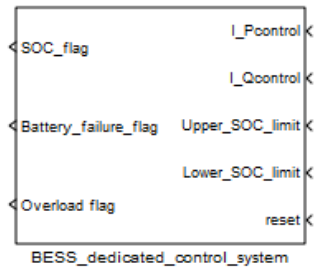
(β)



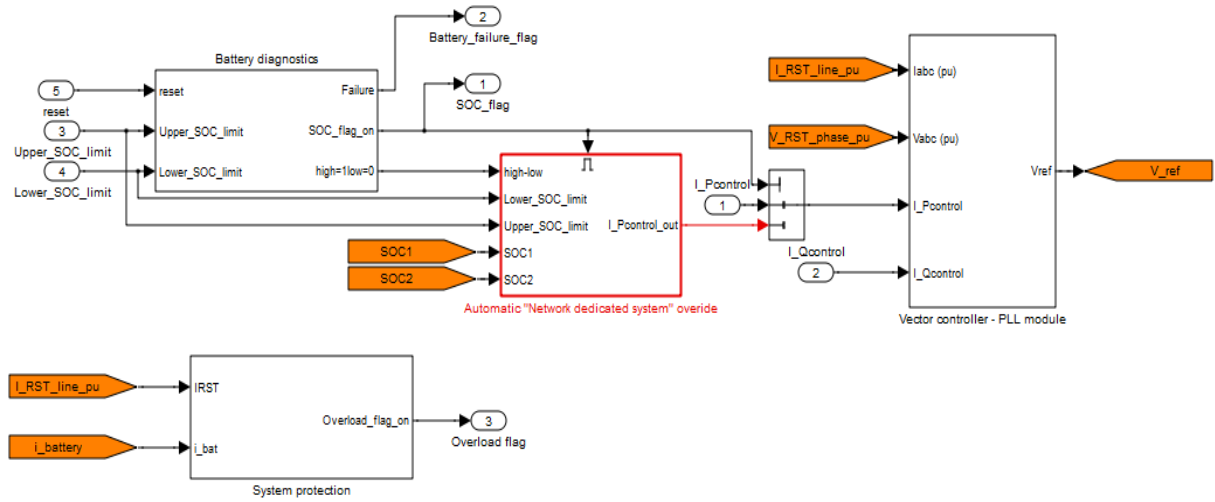
Σχήμα 6.11: (α) Το μοντέλο του ‘Network dedicated control system’
 (β) Έλεγχος κατεύθυνσης ροής ενεργού ισχύος

(γ) Εξωτερικοί βρόχοι ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος και παραγωγή ρευμάτων αναφοράς

Στη συνέχεια θα μοντελοποιήσουμε το ‘BESS dedicated control and protection system’ ή το εστιασμένο στο BESS σύστημα, το οποίο παράγει τους παλμούς οδήγησης των ημιαγωγικών διακοπών του αντιστροφέα. Το σύστημα υλοποιεί το διανυσματικό έλεγχο του αντιστροφέα και τροποποιείται ανάλογα με το αν θα χρησιμοποιηθεί τεχνική που έχει ως σήμα αναφοράς το ρεύμα ή την τάση του δικτύου. Το σύστημα περιέχει επίσης διατάξεις προστασία αυτού και των συσσωρευτών από συνθήκες υπερφόρτισης και αποσυγχρονισμού. Σε περίπτωση που το σύστημα διαγνώσει πως οι εντολές που διαβιβάζονται από το ‘Network dedicated system’ δεν είναι δυνατό να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα, λόγω του ότι οι συσσωρευτές έχουν φτάσει τα όρια φόρτισης, παρακάμπτει αυτόματα την εντολή ενεργού ισχύος που του διαβιβάζεται για να ικανοποιήσει τους περιορισμούς που τίθενται στα όρια φόρτισης των συσσωρευτών. Το γενικό σύστημα παρουσιάζεται στο σχήμα 6.12



(α)

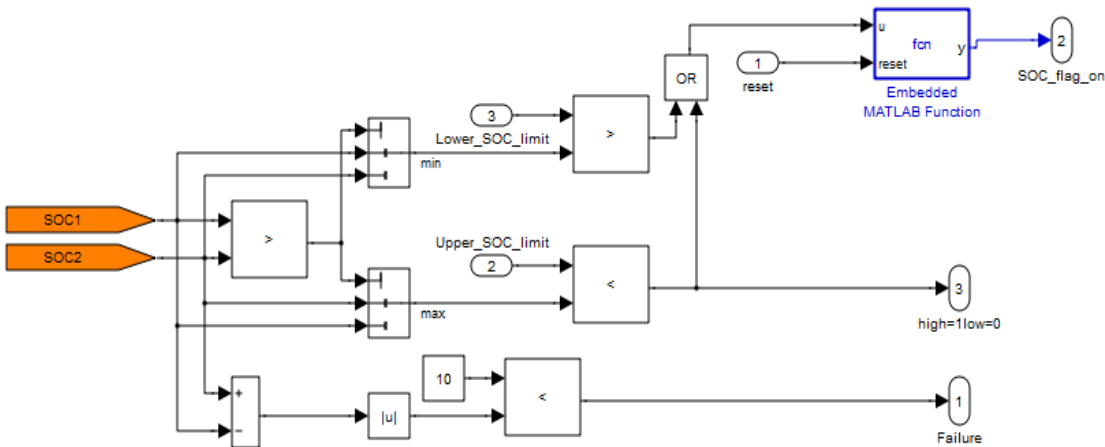


(β)

Σχήμα 6.12: (α) Το μοντέλο του ‘BESS dedicated control and protection system’

(β) Ο αλγόριθμος ελέγχου του υποσυστήματος, που περιλαμβάνει το διαγνωστικό έλεγχο των συσσωρευτών, το σύστημα παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος, τον διανυσματικό έλεγχο του αντιστροφέα και τις διάφορες προστασίες

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, το ‘BESS dedicated control and protection system’ περιλαμβάνει το διαγνωστικό έλεγχο των συσσωρευτών. Ο έλεγχος αυτός είναι υπεύθυνος για την απόφαση αν το σύστημα θα πρέπει να ακολουθήσει τη λειτουργία παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος λαμβάνοντας υπόψη τα όρια φόρτισης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.13, αφού ελέγχεται αν έχουν ξεπεραστεί τα όρια φόρτισης, η λειτουργία παράκαμψης εντολής πραγματοποιείται μόνο εφόσον δεν έχει αλλάξει κατεύθυνση η ενεργός ισχύς και έχουν ξεπεραστεί τα όρια φόρτισης. Αν έχει γίνει κάτι τέτοιο, η επιτροπή SOC_flag_on παίρνει αυτόματα την τιμή 1.



(α)

Embedded Matlab Function

```
function y = fcn(u,reset)

if (u==1)id=1
else id=0;
end
if (reset==1) & (u==1) id=0;
else if (reset==0) & (u==1)id=1;
end

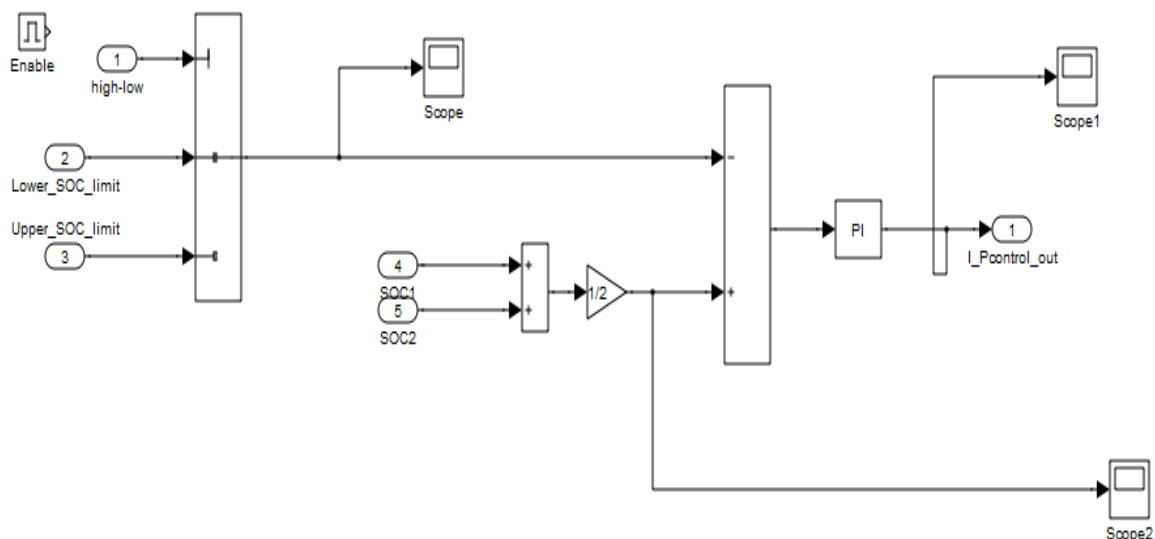
y=id;
```

(β)

Σχήμα 6.13: (α) Διαγνωστικός έλεγχος για υπέρβαση των ορίων φόρτισης και έλεγχος ασύμμετρης φόρτισης συσσωρευτών (failure flag on)
(β)Έλεγχος ενεργοποίησης επίτρειας λειτουργίας παράκαμψης εντολής ενεργού ισχύος (SOC_flag_on)

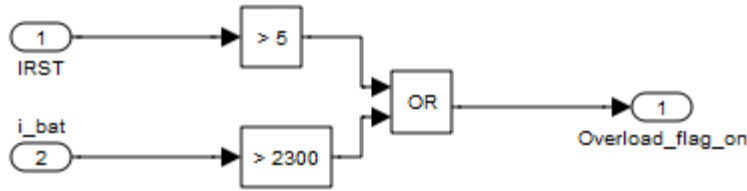
Επίσης, ο έλεγχος αυτός περιλαμβάνει και την προστασία ασύμμετρης φόρτισης των συσσωρευτών οπότε ενεργοποιείται ο διακόπτης αποσύζευξης (failure flag on).

Στην περίπτωση που ενεργοποιηθεί η λειτουργία παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος, τότε η παραγωγή του ρεύματος ευθέως άξονα γίνεται από τη σύγκριση των επιπέδων φόρτισης των συσσωρευτών με PI ελεγκτή όπως φαίνεται στο σχήμα 6.14.



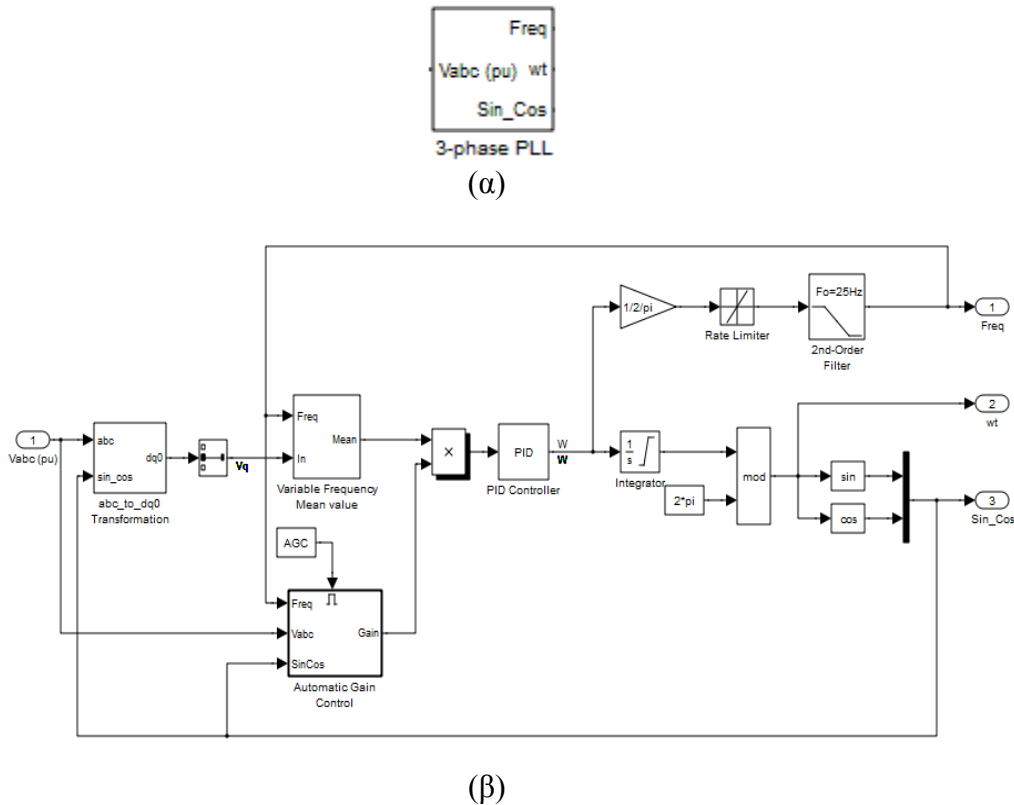
Σχήμα 6.14: Αλγόριθμος ελέγχου επιπέδων φόρτισης. Ενεργοποιείται κατά τη φάση λειτουργίας ‘παράκαμψης εντολής ενεργού ισχύος’

Οι υπόλοιπες προστασίες υλοποιούνται στο σχήμα 6.15 Αυτές περιλαμβάνουν προστασία υπερφόρτισης ρεύματος στην πλευρά των συσσωρευτών και στην πλευρά του δικτύου.



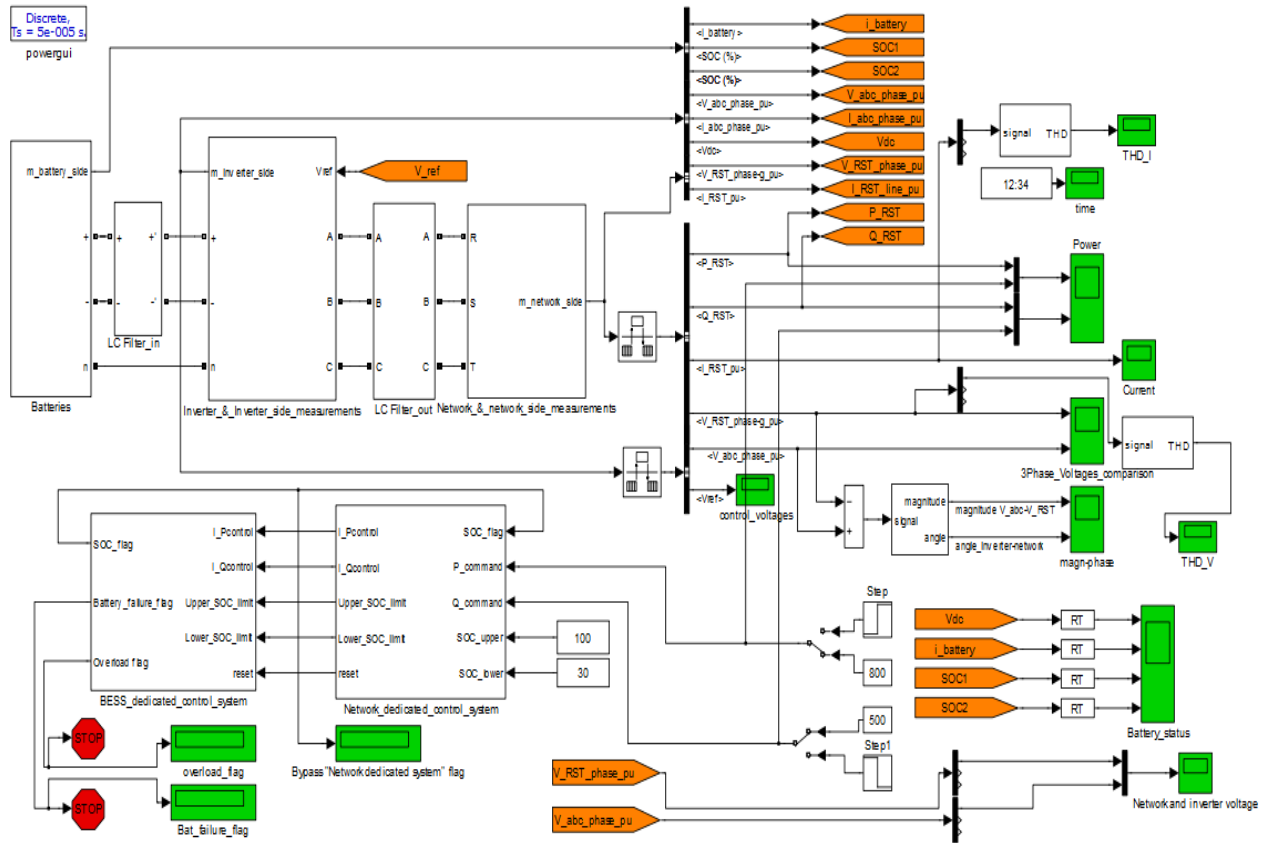
Σχήμα 6.15: Έλεγχος υπέρβασης ρευμάτων ασφαλείας στην έξοδο της συστοιχίας των συσσωρευτών όπως και στην έξοδο του αντιστροφέα (από την πλευρά του δικτύου, μετά την αυτεπαγωγή διασύνδεσης)

Ένα ακόμη βασικό σύστημα είναι ο βρόχος κλειδωμένης φάσης (PLL) το οποίο λαμβάνει τάσεις και ρεύματα από το PCC και συγχρονίζει τον αντιστροφέα με το δίκτυο. Η μοντελοποίηση του γίνεται σύμφωνα με την ανάλυση των παραγράφων 3.5 και 4.6 και παρουσιάζεται στο σχήμα 6.16. Τα κύρια υποσυστήματα που το συνθέτουν είναι το φίλτρο βρόχου, το πολυμεταβλητό φίλτρο και οι μετασχηματισμοί $abc \rightarrow dq$



Σχήμα 6.16: (α) Μπλοκ διάγραμμα του PLL
(β) Μοντέλο του PLL σύμφωνα με τις παραγράφους 3.5 και 4.6.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε το ολοκληρωμένο μοντέλο του συστήματος BESS στο MATLAB/SIMULINK στο σχήμα 6.17.



Σχήμα 6.17: Ολοκληρωμένο μοντέλο του συστήματος BESS στο MATLAB/SIMULINK

6.3 Προσομοίωση τεχνικών ελέγχου συστήματος BESS για μεταβολές του φορτίου

Στην παράγραφο αυτή θα γίνουν οι προσομοιώσεις για τις διαφορετικές τεχνικές που εξετάζονται και υλοποιούνται για τον έλεγχο του συστήματος BESS. Όλες οι τεχνικές έχουν ως βάση τον έλεγχο ενεργού και άεργου ισχύος. Δηλαδή σκοπός του συστήματος ελέγχου είναι να ακολουθηθεί πιστά η εντολή ενεργού και άεργου ισχύος που επιβάλλεται έτσι ώστε να εξομαλυνθεί η καμπύλη φορτίου με το βέλτιστο οικονομικά τρόπο.

Το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί δύο ειδών τεχνικές ελέγχου P - Q για την παραγωγή παλμών του αντιστροφέα:

- Τεχνική με σήμα αναφοράς την τιμή της τάσης v_{ref} η οποία πραγματοποιείται σε συνδυασμό με την SPWM ή την SV-PWM για την παραγωγή των παλμών
- Τεχνική με σήμα αναφοράς την τιμή του ρεύματος i_{ref} η οποία πραγματοποιείται σε συνδυασμό με την τεχνική ελέγχου ρεύματος σε βρόχο υστέρησης - HBCC). Και οι δύο τεχνικές ωστόσο βασίζονται στη λογική του διανυσματικού ελέγχου,

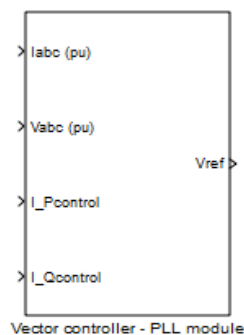
ενσωματώνοντας δύο βρόχους ελέγχου. Υπάρχει ένας εξωτερικός βρόχος ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος και ένας εσωτερικός βρόχος ρευμάτων. Οι προσομοιώσεις θα γίνουν για βηματικές μεταβολές των εντολών ενεργού και άεργου ισχύος στις ακόλουθες περιπτώσεις λειτουργίας:

- **Φάση εκφόρτισης:** Το σύστημα βρίσκεται εντός των περιορισμών φόρτισης των συσσωρευτών (SOC_levels) και αποδίδει ενεργό ισχύ στο δίκτυο.
- **Φάση φόρτισης:** Το σύστημα βρίσκεται εντός των περιορισμών φόρτισης των συσσωρευτών (SOC_levels) και απορροφά ενεργό ισχύ από το δίκτυο.
- **Φάση παράκαμψης εντολής ενεργού ισχύος:** Το σύστημα παρακάμπτει την εντολή ενεργού ισχύος για να ικανοποιήσει τα όρια φόρτισης. Αυτή η φάση λειτουργίας έχει προγραμματιστεί για να επιτρέψει την απαιτούμενη προγνωστικότητα του ελέγχου. Αν και ο διαχειριστής ζητά ενεργό ισχύ, το σύστημα ελέγχου του BESS προτιμά να μην τη τροφοδοτήσει αλλά να διατηρήσει το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών του έτσι ώστε να τροφοδοτήσει την αμέσως επόμενη και μεγαλύτερη αιχμή φορτίου που προβλέπεται.

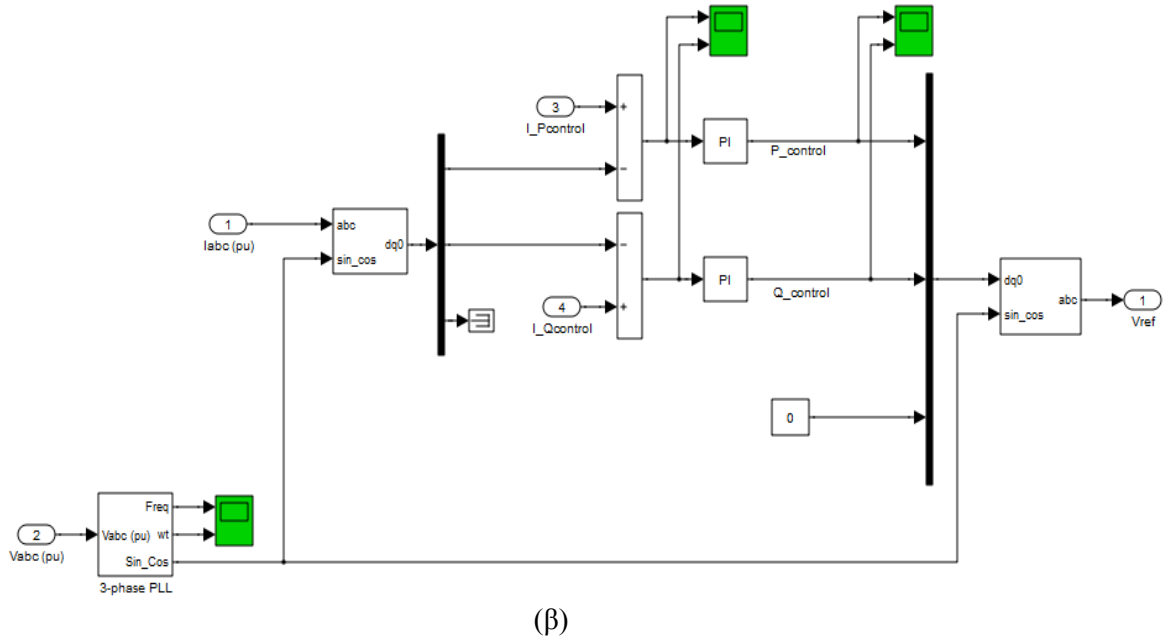
Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι μετά την ανάλυση του κεφαλαίου 4, αποδείχθηκε ότι η καλύτερη μέθοδος για την εκτίμηση της φάσης και της γωνίας των σημάτων της τάσης ή του ρεύματος στο PCC είναι το PLL σε σύγκριση με τη μέθοδο των Zero Crossings (Ανίχνευση μηδενικών) ή της εικονικής ροής δικτύου. Έτσι όλες οι προσομοιώσεις θα γίνουν με χρήση του PLL.

6.3.1 Προσομοίωση διανυσματικού ελέγχου P-Q με είσοδο αναφοράς V_{ref} για τον συγχρονισμό δικτύου και αντιστροφή με ελεγκτή παραγωγής παλμών SPWM .

Σε αυτήν την περίπτωση μοντελοποιείται και προσομοιώνεται η τεχνική της παραγράφου 4.2.1. Το μοντέλο του διανυσματικού ελέγχου παρουσιάζεται στο σχήμα 6.18. Όπως παρατηρούμε, είσοδοι στο μπλοκ αυτό είναι τα ρεύματα ευθέως και εγκάρσιου άξονα τα οποία έχουν προέλθει είτε από τον έλεγχο P – Q είτε από τον έλεγχο των ορίων φόρτισης. Επιπλέον είσοδοι είναι το ρεύμα και η τάση του δικτύου όπως αυτά έχουν μετρηθεί στο PCC. Αξίζει να σημειώσουμε επίσης πως το μπλοκ αυτό αποτελεί υποσύστημα του ‘BESS dedicated control and protection system’.



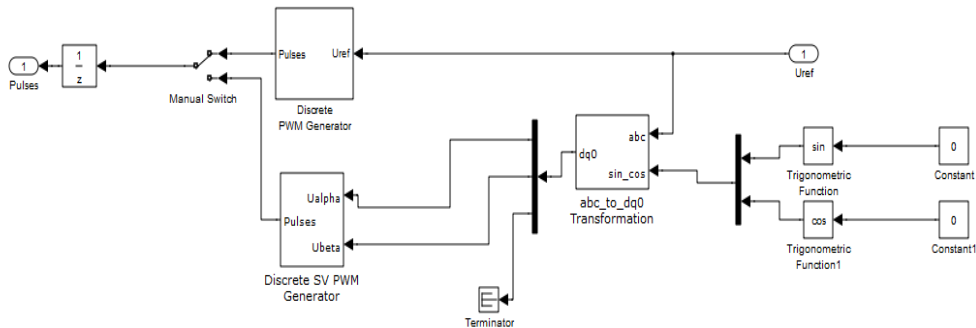
(α)



Σχήμα 6.18: (α) Μπλοκ διανυσματικού ελέγχου P-Q που χρησιμοποιεί ως σήμα αναφοράς V_{ref} την τάση του δικτύου
 (β) Αλγόριθμος διανυσματικού ελέγχου P-Q που χρησιμοποιεί ως σήμα αναφοράς V_{ref} την τάση του δικτύου και εσωτερικοί βρόχοι ελέγχου ρευμάτων d-q άξονα

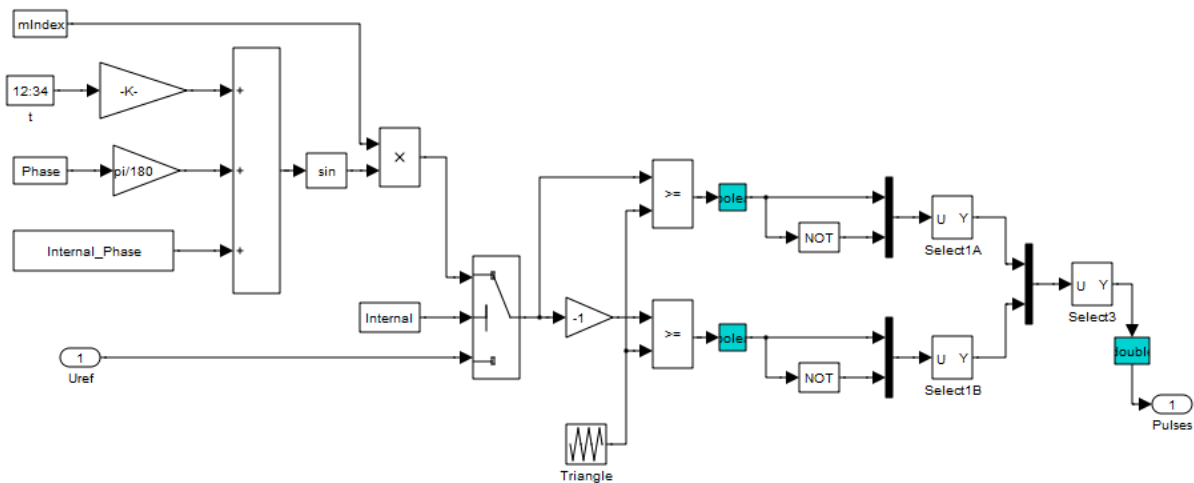
Όπως παρατηρούμε, το PLL σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνει ως είσοδο αναφοράς την τάση του δικτύου από την οποία υπολογίζει τη γωνία θ , δηλαδή τη φάση και τη διοχετεύει στους μετασχηματισμούς $abc \rightarrow dq$ και $dq \rightarrow abc$. Ο πρώτος μετασχηματισμός μετασχηματίζει το ρεύμα του δικτύου σε πλαίσιο dq συγχρονισμένο με τη γωνία που έχει υπολογίσει το PLL και στη συνέχεια γίνεται σύγκριση με τα ρεύματα αναφοράς και μέσω ελέγχου PI παράγονται οι τάσεις αναφοράς ευθέως και εγκάρσιου άξονα οι οποίες μετασχηματίζονται στην τάση V_{ref} που αποτελεί την αναφορά για την τεχνική ελέγχου των παλμών που θα μοντελοποιήσουμε στη συνέχεια.

Στο σχήμα 6.19, φαίνεται ότι η τεχνική αυτή μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε τόσο την τεχνική SPWM όσο και την SVPWM ως τεχνική ελέγχου παλμών.



Σχήμα 6.19: Επιλογή τεχνικής ελέγχου των παλμών με βάση την τάση αναφοράς V_{ref}

Σε αυτήν την παράγραφο θα χρησιμοποιήσουμε την τεχνική ημιτονοειδούς ελέγχου του εύρους των παλμών (SPWM). Η τεχνική αυτή έχει αναλυθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο 5 και η μοντελοποίησή της φαίνεται στο σχήμα 6.20. Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν πρέπει να σημειωθεί ότι έχει επιλεγεί συχνότητα φορέα ίση με 1050Hz ώστε να προκύψει περιττός συντελεστής F_{nc} . Επίσης γενική επιθυμία είναι η λειτουργία με συντελεστή διαμόρφωσης κοντά στη μονάδα.

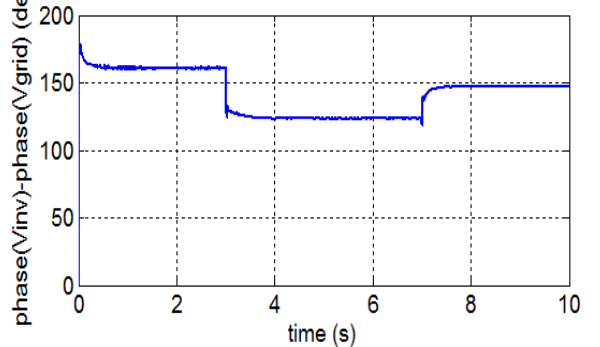
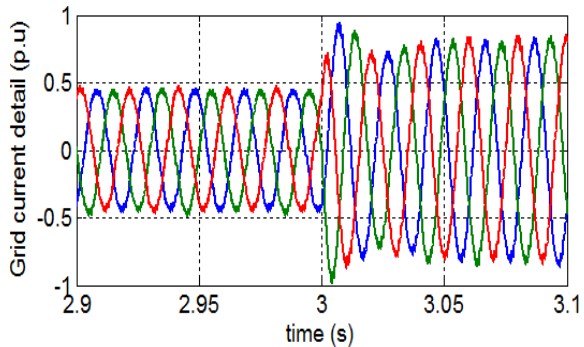
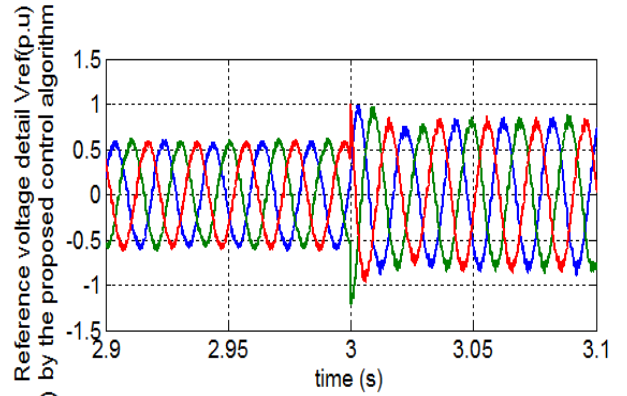
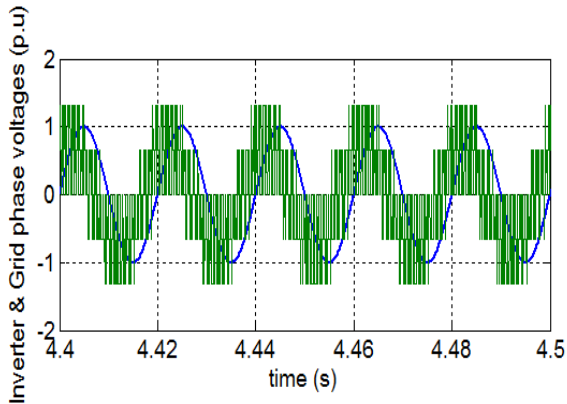
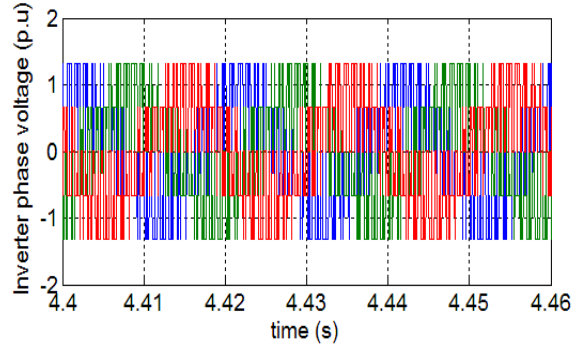
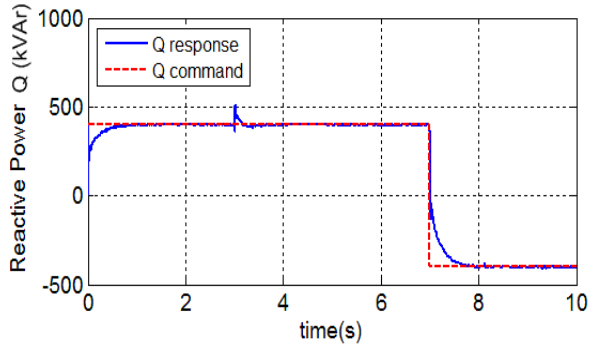
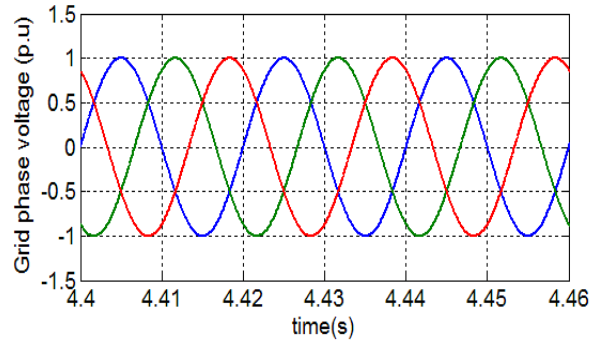
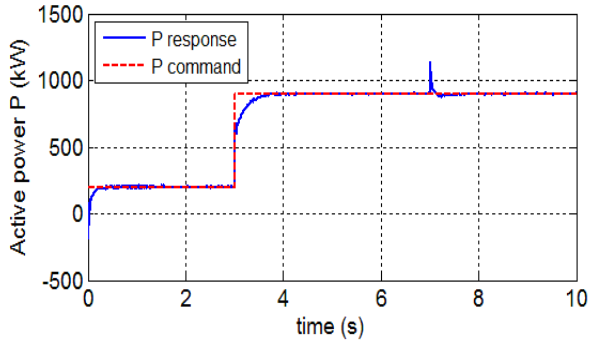


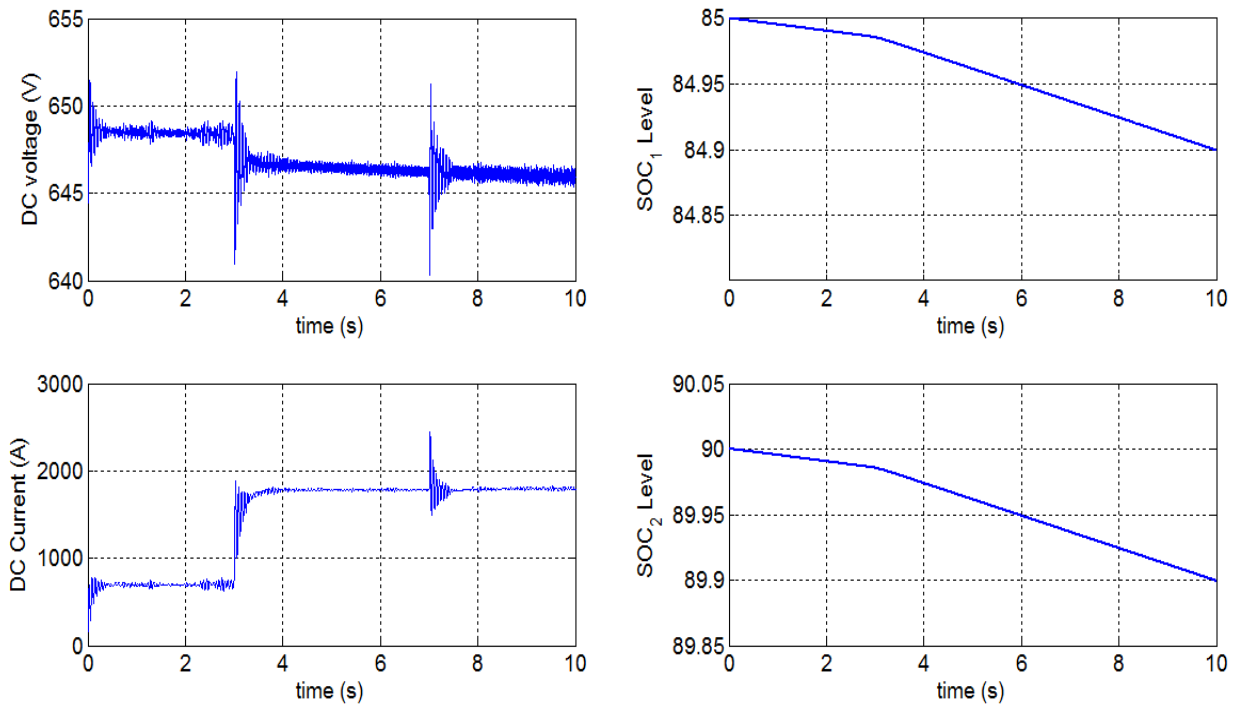
Σχήμα 6.20: Μοντελοποίηση της τεχνικής SPWM

Στα επόμενα θα παρουσιαστούν προσομοιώσεις για τις διάφορες φάσεις λειτουργίας.

6.3.1.1 Φάση εκφόρτισης

Στην προσομοίωση αυτή το σύστημα ζητά ενεργό ισχύ για την κάλυψη του φορτίου. Θεωρούμε πως υπάρχει βηματική μεταβολή της ενεργού ισχύος από 200kW σε 900kW τη χρονική στιγμή 3sec και βηματική μεταβολή της άεργου ισχύος από 400kVA_r σε -400 kVA_r τη χρονική στιγμή 7sec. Τα άνω και κάτω όρια φόρτισης των συσσωρευτών είναι 95% και 30% αντίστοιχα. Τα επίπεδα (SOC_Levels) των δύο συστοιχιών των συσσωρευτών την αρχική χρονική στιγμή είναι 85% και 90% αντίστοιχα. Παρουσιάζονται οι μεταβολές της ενεργού και άεργου ισχύος, η φασική τάση του δικτύου και του αντιστροφέα, το ρεύμα του δικτύου, η τάση αναφοράς, η διαφορά γωνίας μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου, η τάση και το ρεύμα στην DC πλευρά, καθώς και η πορεία των επιπέδων φόρτισης. Η προσομοίωση διαρκεί 10sec και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στο σχήμα 6.21.

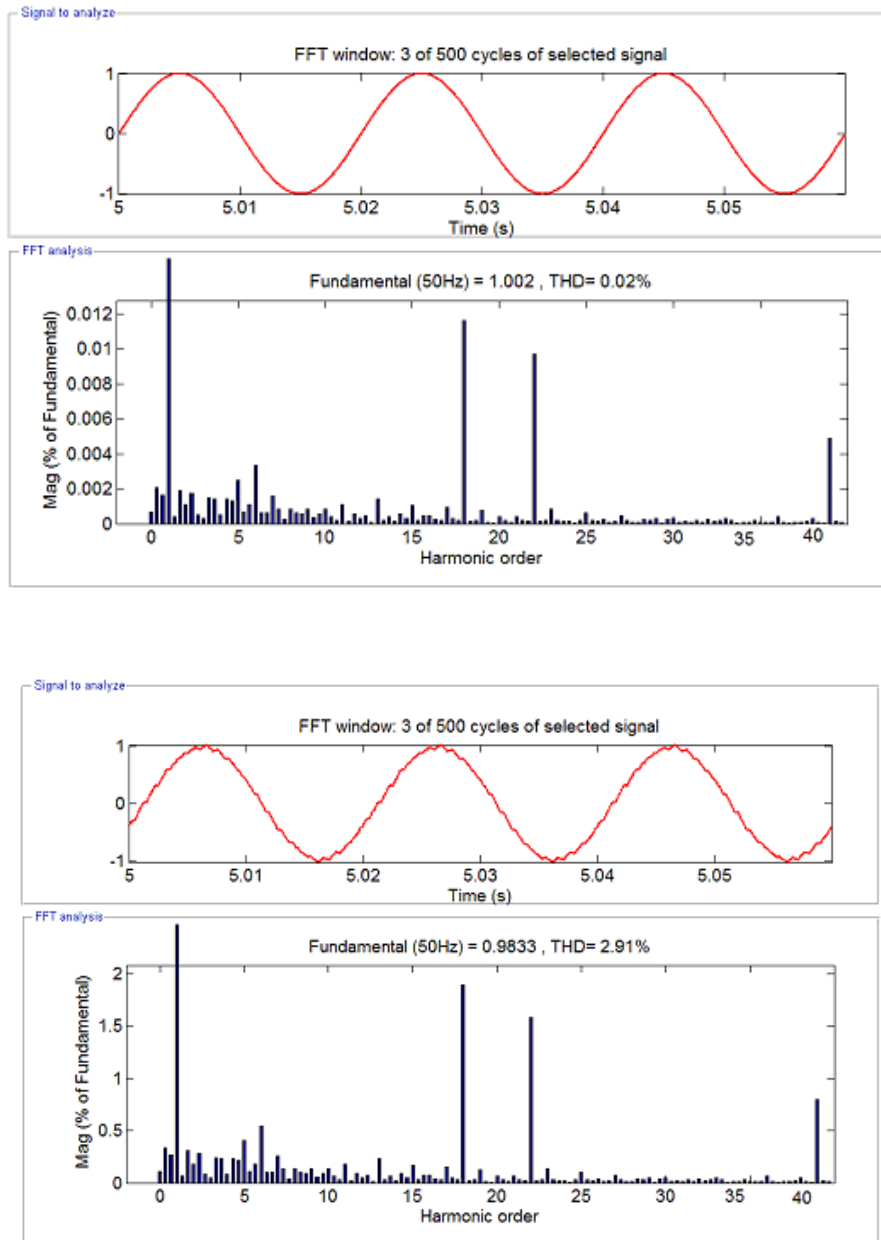




Σχήμα 6.21: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς αυτό της τάσης του δικτύου για την παραγωγή παλμών μορφής SPWM την περίοδο εκφόρτισης των συσσωρευτών

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι η απόκριση της ενεργού και της άεργου ισχύος στις εντολές του κέντρου ελέγχου είναι καλή αφού χρειάζεται περίπου 1sec για να βρεθούν στη μόνιμη κατάσταση, ενώ παρατηρείται και μικρή υπερπήδηση. Η τάση εξόδου του αντιστροφέα και του δικτύου είναι εξαιρετικές, ενώ η διακοπτική συχνότητα είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του φορέα λόγω της τεχνικής SPWM. Η φασική τάση του αντιστροφέα προηγείται σε σχέση με αυτή του δικτύου, γεγονός που δείχνει ότι υπάρχει μεταφορά ισχύος από τους συσσωρευτές (εκφόρτιση) προς το δίκτυο. Η τιμή της διαφοράς φάσης ανάμεσα στον αντιστροφέα και στο δίκτυο σε μοίρες φαίνεται επίσης στο διάγραμμα. Στα αποτελέσματα σημειώνουμε και την αύξηση του ρεύματος του δικτύου τη στιγμή της μεταβολής. Για την dc πλευρά των συσσωρευτών, παρατηρούμε την ομαλή μείωση της dc τάσης και την αύξηση του dc ρεύματος με την πάροδο του χρόνου εφόσον οι συσσωρευτές εκφορτίζονται παρέχοντας περισσότερη ενεργό ισχύ στο φορτίο. Τέλος, τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών πέφτουν αργά, σημάδι πως οι συσσωρευτές εκφορτίζονται. Η αργή πτώση τους οφείλεται στο ότι χρειάζονται αρκετές ώρες για να εκφορτιστούν πλήρως οι συσσωρευτές, ενώ η προσομοίωση διεξάγεται μόνο για λίγα δευτερόλεπτα.

Στο σχήμα 6.22 παρουσιάζουμε τις τιμές του συντελεστή THD % σε σχέση με τη συχνότητα των αρμονικών για την τάση και το ρεύμα στο PCC όπως αυτή αναλύθηκε με το fftool από το powergui του MATLAB.



Σχήμα 6.22: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης και THD% τάσεως και ρεύματος στο PCC για την τεχνική που προσομοιώθηκε κατά την εκφόρτιση

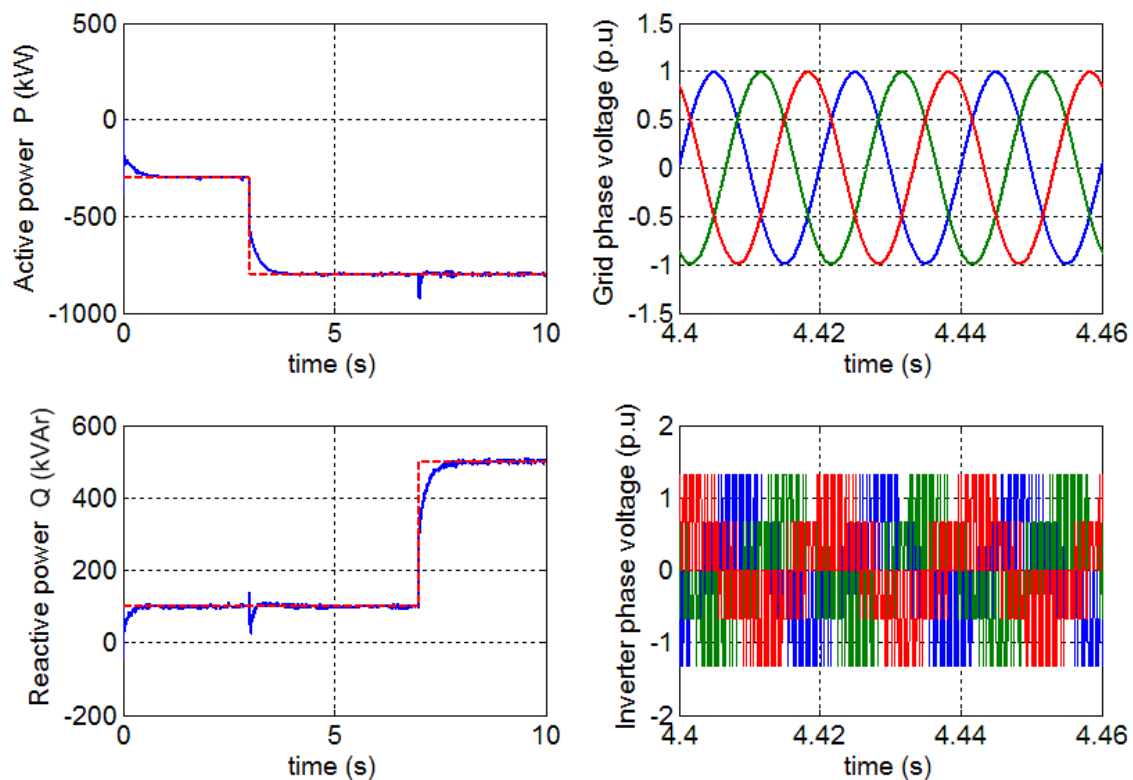
Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι το THD της τάσης είναι σχεδόν μηδενικό, ενώ το THD του ρεύματος είναι περίπου 2.91% μέσα στα όρια του προτύπου 519 του IEEE. Αυτό που είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε είναι ότι εφόσον χρησιμοποιούμε SPWM, οι μεγαλύτερες αρμονικές θα βρίσκονται στις τιμές $F_{nc} \pm 2$ όπου $F_{nc} = 21$, γεγονός που φαίνεται στο σχήμα, ενώ ανάμεσα σε αυτές τις αρμονικές δεν

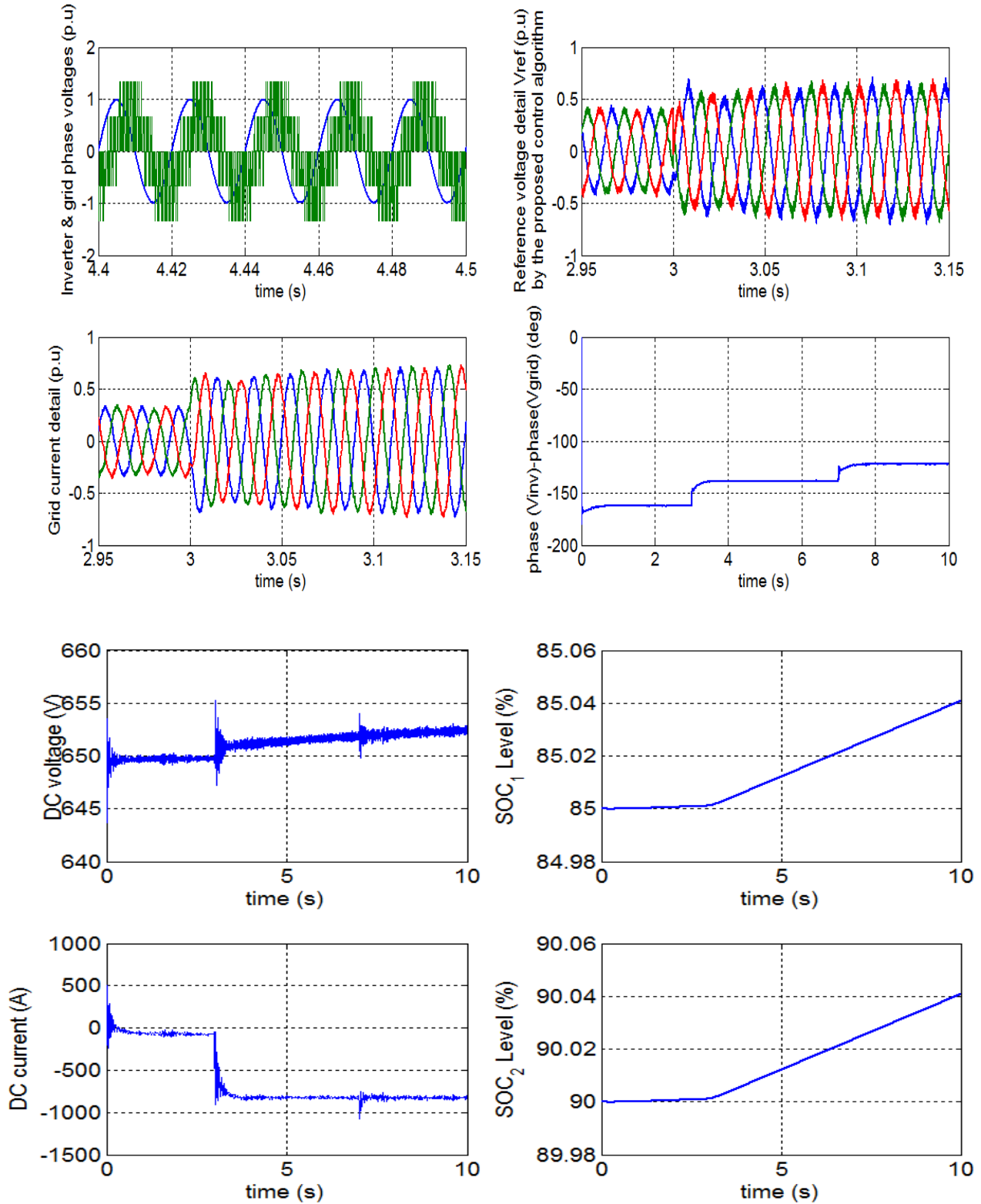
υπάρχει αρμονικό περιεχόμενο. Η επόμενη υψηλής τάξης αρμονική θα βρίσκεται στην τιμή $2F_{nc} \pm 1$.

Η τεχνική που μόλις περιγράψαμε έχει το μειονέκτημα ότι σε περίπτωση που χρησιμοποιήσουμε μεγάλη διακοπτική συχνότητα, θα έχουμε μεγάλες διακοπτικές απώλειες, ενώ οι υψίσυχνες αρμονικές μπορεί να προκαλέσουν ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση (EMI).

6.3.1.2 Φάση φόρτισης

Στην προσομοίωση αυτή το σύστημα αποθηκεύει ενέργεια εφόσον η ζήτηση ισχύος από το φορτίο είναι χαμηλή ή η ενέργεια είναι φτηνή τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Θεωρούμε πως υπάρχει βηματική μεταβολή της ενεργού ισχύος από -300kW σε -800kW τη χρονική στιγμή 3sec και βηματική μεταβολή της άεργου ισχύος από 100kVAr σε 500kVAr τη χρονική στιγμή 7sec . Τα άνω και κάτω όρια φόρτισης των συσσωρευτών είναι 95% και 30% αντίστοιχα. Τα επίπεδα (SOC_Levels) των δύο συστοιχιών των συσσωρευτών την αρχική χρονική στιγμή είναι 85% και 90% αντίστοιχα. Παρουσιάζονται οι μεταβολές της ενεργού και άεργου ισχύος, η φασική τάση του δικτύου και του αντιστροφέα, το ρεύμα του δικτύου, η τάση αναφοράς, η διαφορά γωνίας μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου, η τάση και το ρεύμα στην DC πλευρά, καθώς και η πορεία των επιπέδων φόρτισης. Η προσομοίωση διαρκεί 10sec και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στο σχήμα 6.23.

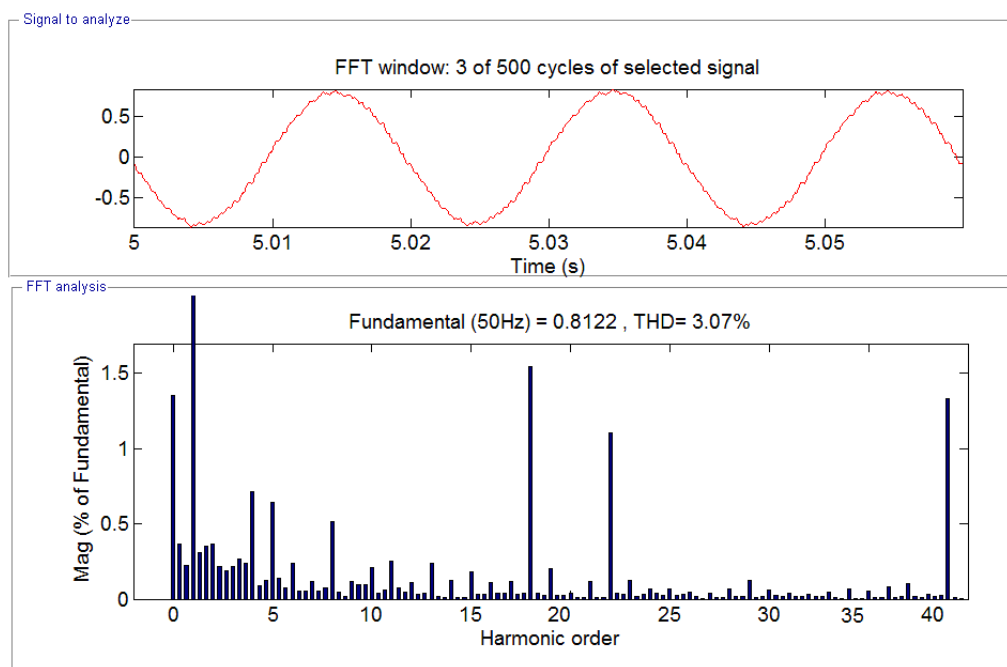




Σχήμα 6.23: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς αυτό της τάσης του δικτύου για την παραγωγή παλμών μορφής SPWM την περίοδο φόρτισης των συσσωρευτών

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι η απόκριση της ενεργού και της άεργου ισχύος στις εντολές του κέντρου ελέγχου είναι καλή αφού χρειάζεται περίπου 1sec για να βρεθούν στη μόνιμη κατάσταση, ενώ παρατηρείται και μικρή υπερπήδηση. Η τάση εξόδου του αντιστροφέα και του δικτύου είναι εξαιρετικές, ενώ η διακοπτική συχνότητα είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του φορέα λόγω της τεχνικής SPWM. Η φασική τάση του αντιστροφέα έπεται σε σχέση με αυτή του δικτύου, γεγονός που δείχνει ότι υπάρχει μεταφορά ισχύος από το δίκτυο προς τους συσσωρευτές (εκφόρτιση). Η τιμή της διαφοράς φάσης ανάμεσα στον αντιστροφέα και στο δίκτυο σε μοίρες φαίνεται επίσης στο διάγραμμα. Στα αποτελέσματα σημειώνουμε και την αύξηση του ρεύματος του δικτύου τη στιγμή της μεταβολής. Για την dc πλευρά των συσσωρευτών, παρατηρούμε την ομαλή αύξηση της dc τάσης και τη μετάβαση του dc ρεύματος σε αρνητικές τιμές με την πάροδο του χρόνου εφόσον οι συσσωρευτές φορτίζονται αποθηκεύοντας ενέργεια για μετέπειτα χρήση. Τέλος, τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών ανεβαίνουν αργά, σημάδι πως οι συσσωρευτές φορτίζονται. Η αργή άνοδος τους οφείλεται στο ότι χρειάζονται αρκετές ώρες για να φορτιστούν πλήρως οι συσσωρευτές, ενώ η προσομοίωση διεξάγεται μόνο για λίγα δευτερόλεπτα.

Στο σχήμα 6.24 παρουσιάζουμε τις τιμές του συντελεστή THD % σε σχέση με τη συχνότητα των αρμονικών για το ρεύμα στο PCC όπως αυτή αναλύθηκε με το fftool από το powergui του MATLAB.

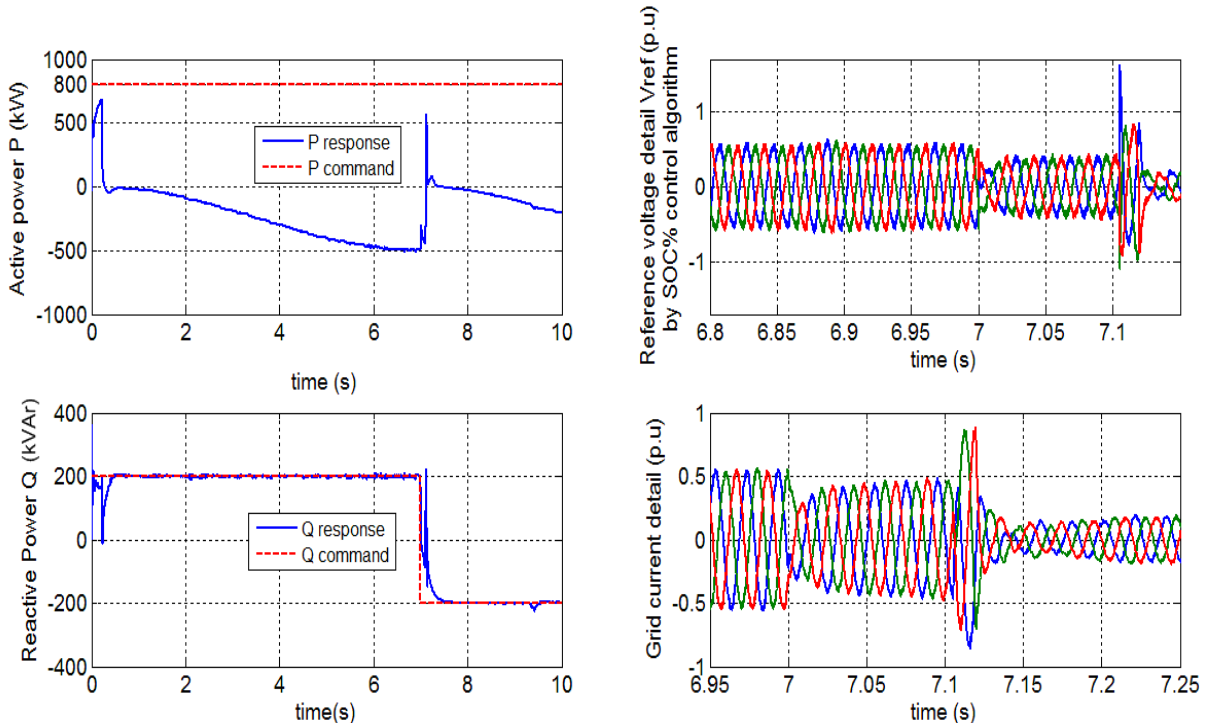


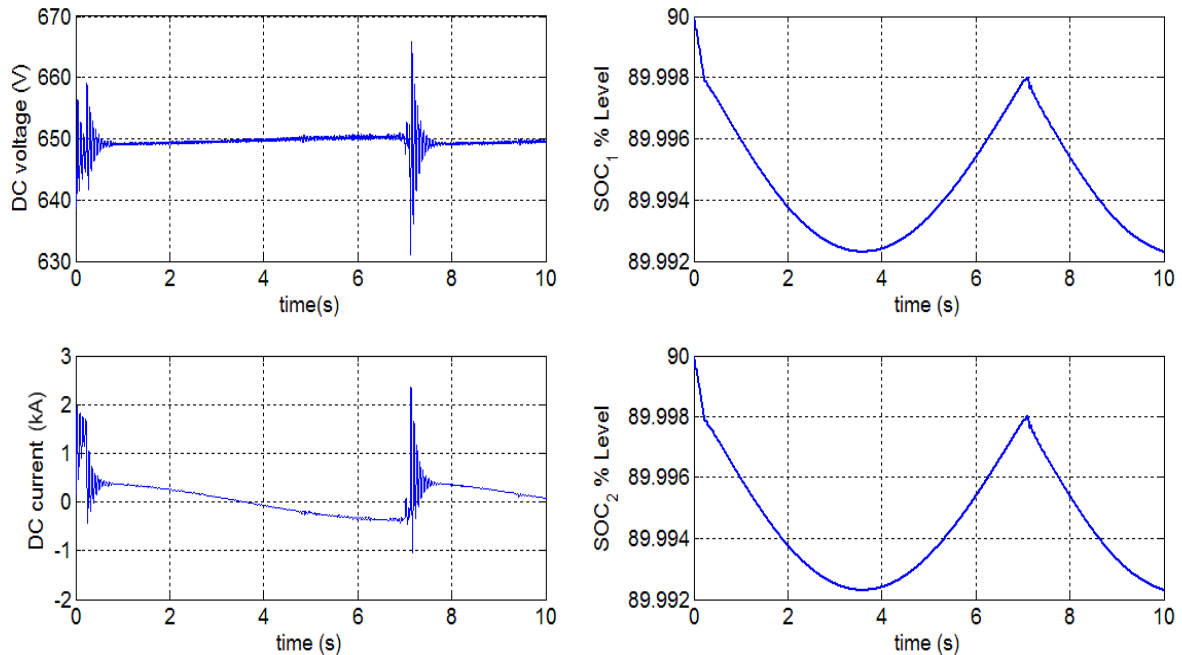
Σχήμα 6.24: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης και THD% ρεύματος στο PCC για την τεχνική που προσομοιώθηκε κατά την φόρτιση των συσσωρευτών

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι το THD του ρεύματος είναι περίπου 3,07% μέσα στα όρια του προτύπου 519 του IEEE. Αυτό που είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε είναι ότι εφόσον χρησιμοποιούμε SPWM, οι μεγαλύτερες αρμονικές θα βρίσκονται στις τιμές $Fnc \pm 2$ όπου $Fnc = 21$, γεγονός που φαίνεται στο σχήμα, ενώ ανάμεσα σε αυτές τις αρμονικές δεν υπάρχει αρμονικό περιεχόμενο. Η επόμενη υψηλής τάξης αρμονική θα βρίσκεται στην τιμή $2Fnc \pm 1$.

6.3.1.3 Φάση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος

Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα δεν ακολουθεί την εντολή ενεργού ισχύος αλλά προτιμά να ικανοποιήσει αυτόματα τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών παρακάμπτοντας το 'Network dedicated system'. Το σύστημα μπορεί να επανέλθει στην αρχική κατάσταση (ικανοποίηση της εντολής P) μόνο εάν μετά από κάποιο χρονικό διάστημα ικανοποιηθούν τα όρια φόρτισης και αλλάξει η κατεύθυνση της ροής της ενεργού ισχύος. Στο παράδειγμα αυτό θεωρούμε ότι υπάρχει σταθερή εντολή της ενεργού ισχύος στα 800kW και βηματική μεταβολή της άεργου ισχύος από 200kVAr σε -200 kVAr τη χρονική στιγμή 7sec. Τα άνω και κάτω όρια φόρτισης των συσσωρευτών είναι 90% και 89.998% αντίστοιχα ώστε να μην εκφορτιστεί η μπαταρία τη δεδομένη χρονική αλλά σε κάποια μεγαλύτερη αιχμή στο μέλλον. Τα επίπεδα φόρτισης των δύο συσσωρευτών στην αρχή είναι τα ίδια και ίσα με 90%. Παρουσιάζονται οι μεταβολές της ενεργού και άεργου ισχύος, το ρεύμα του δικτύου, η τάση αναφοράς, η τάση και το ρεύμα στην DC πλευρά, καθώς και η πορεία των επιπέδων φόρτισης. Η προσομοίωση διαρκεί 10sec και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στο σχήμα 6.25.





Σχήμα 6.25: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς αυτό της τάσης του δικτύου για παραγωγή παλμών μορφής SPWM στην περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος για την ικανοποίηση των ορίων φόρτισης

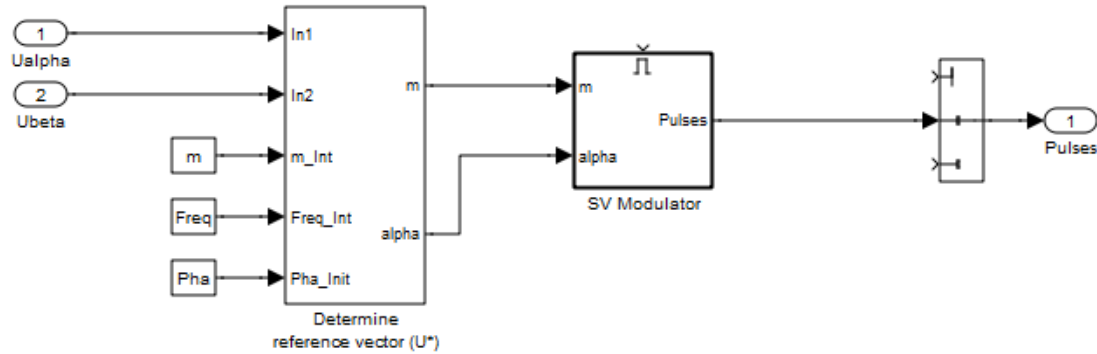
Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι ενώ αρχικά το σύστημα έχει την τάση να ακολουθήσει τις εντολές P-Q, ξαφνικά ξεπερνά το κάτω όριο φόρτισης του 89.998. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο έλεγχος για την παραγωγή του ρεύματος ευθέως άξονα να μην εξαρτάται πλέον από τον έλεγχο P αλλά από τον έλεγχο που περιλαμβάνει ικανοποίηση των ορίων φόρτισης. Έτσι η επιθυμητή τιμή τώρα είναι η μέση τιμή των δύο επιπέδων των δύο συστοιχιών, τιμή που βρίσκεται σίγουρα ανάμεσα στα όρια που θέλουμε να διατηρήσουμε. Ως αποτέλεσμα, παρατηρούμε από τα διαγράμματα ότι η μπαταρία αρχίζει να φορτίζεται για να διατηρήσει τα επιθυμητά επίπεδα φόρτισης. Το γεγονός αυτό αμέσως αντικατοπτρίζεται από το αρνητικό ρεύμα στο dc και τη σταθεροποιημένη dc τάση. Το ρεύμα και η τάση αναφοράς υφίστανται και αυτά τις αναγκαίες μεταβολές. Αξιοπρόσεκτη είναι επίσης και η μεταβολή στα όρια φόρτισης των συσσωρευτών τα οποία ακολουθούν μια περιοδική μεταβολή ανάμεσα στο ανώτερο και στο κατώτερο όριο με ένα συγκεκριμένο χρόνο απόκρισης φυσικά.

6.3.2 Προσομοίωση διανυσματικού ελέγχου P-Q με είσοδο αναφοράς V_{ref} για τον συγχρονισμό δικτύου και αντιστροφή με ελεγκτή παραγωγής παλμών SVPWM .

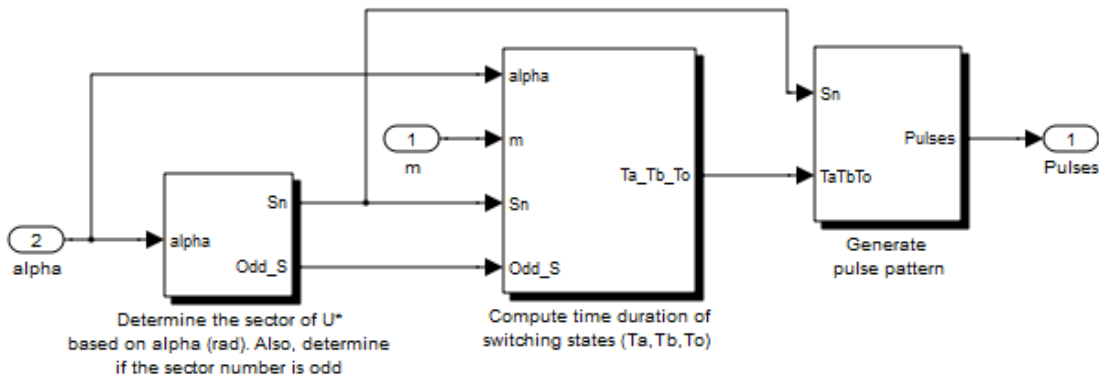
Όπως παρατηρήσαμε στο σχήμα 6.19, φαίνεται ότι η τεχνική αυτή μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε τόσο την τεχνική SPWM όσο και την SVPWM ως τεχνική ελέγχου παλμών.

Σε αυτήν την παράγραφο θα χρησιμοποιήσουμε την τεχνική διαμόρφωσης του εύρους των παλμών με διανύσματα κατάστασης (SVPWM). Η τεχνική αυτή έχει αναλυθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο 5 και η μοντελοποίησή της φαίνεται στο σχήμα 6.26. Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν πρέπει να σημειωθεί ότι έχει επιλεγεί συχνότητα φορέα ίση με 1050Hz ώστε να προκύψει περιττός συντελεστής F_{nc} . Επίσης γενική επιθυμία είναι η λειτουργία με συντελεστή διαμόρφωσης κοντά στη μονάδα.

Το μοντέλο της τεχνικής SV-PWM, το οποίο δίνεται στο σχήμα 6.26, αρχικά περιλαμβάνει τον καθορισμό του διανύσματος V^* και της γωνίας α , με αποτέλεσμα τον εντοπισμό του διανύσματος στον τομέα που βρίσκεται. Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα χρονικά διανύσματα T_1 , T_2 , T_0 και στη συνέχεια καθορίζεται ακριβώς το διάστημα αγωγής των ημιαγωγών S_1 έως S_6 στην περίοδο του PWM.



(α)

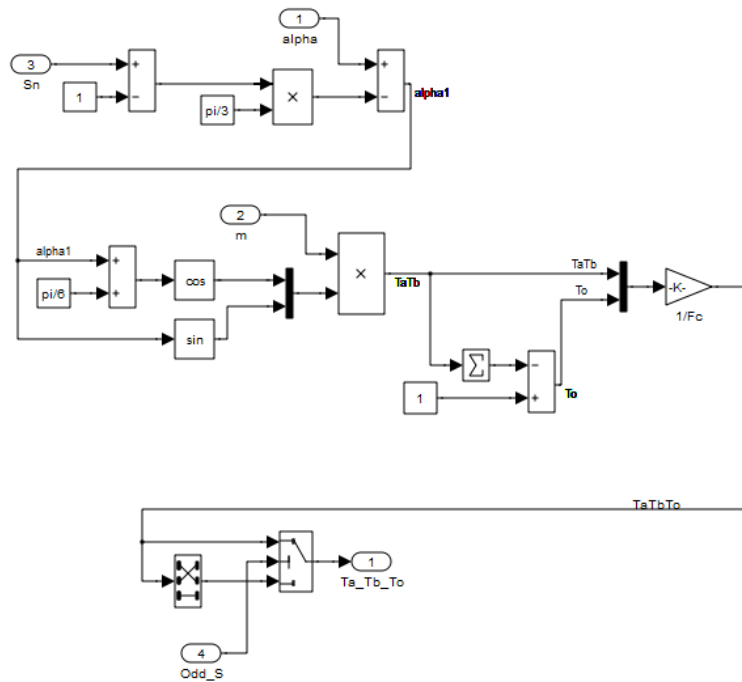


(β)

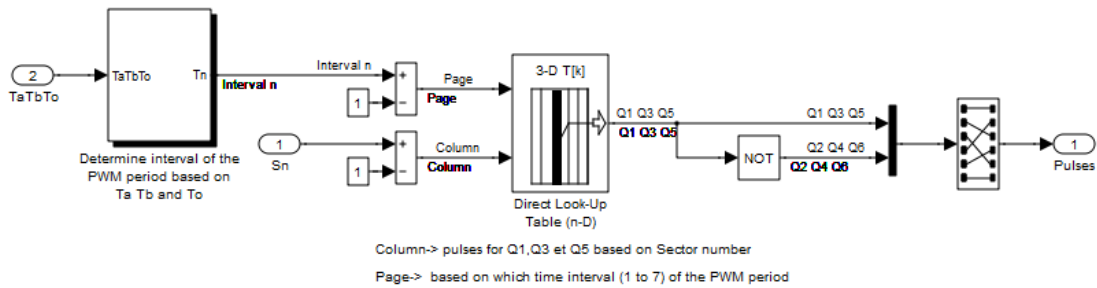
$$T_a = m \cdot \cos(\alpha + 30^\circ) \cdot (1/F_c)$$

$$T_b = m \cdot \sin(\alpha + 1^\circ) \cdot (1/F_c)$$

$$T_o = (1/F_c - T_a - T_b)$$



(γ)



(δ)

Σχήμα 6.26:(α) Γενικό μοντέλο της τεχνικής διαμόρφωσης του εύρους των παλμών με διανύσματα κατάστασης (SV-PWM)

(β) Καθορισμός τομέα με βάση το πλάτος και τη γωνία του ρεύματος αναφοράς, υπολογισμός των διαστημάτων T_1, T_2, T_0 και καθορισμός του τρόπου αγωγής των IGBT

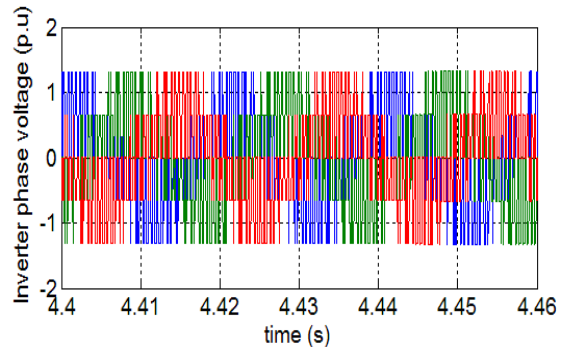
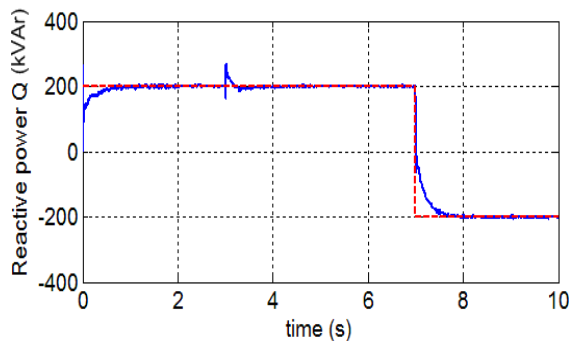
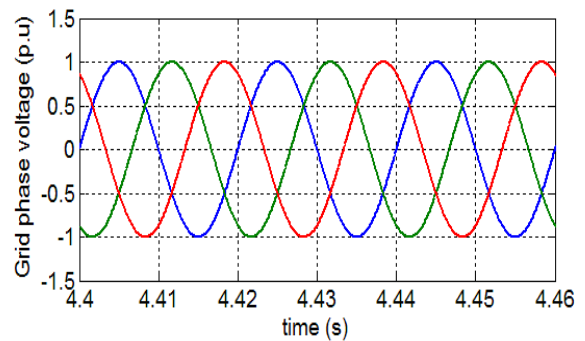
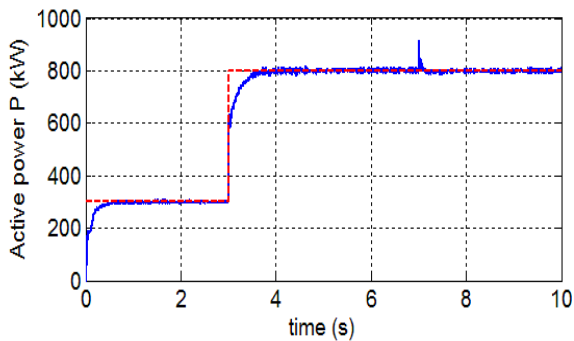
(γ) Τρόπος υπολογισμού των χρονικών διαστημάτων T_1, T_2, T_0

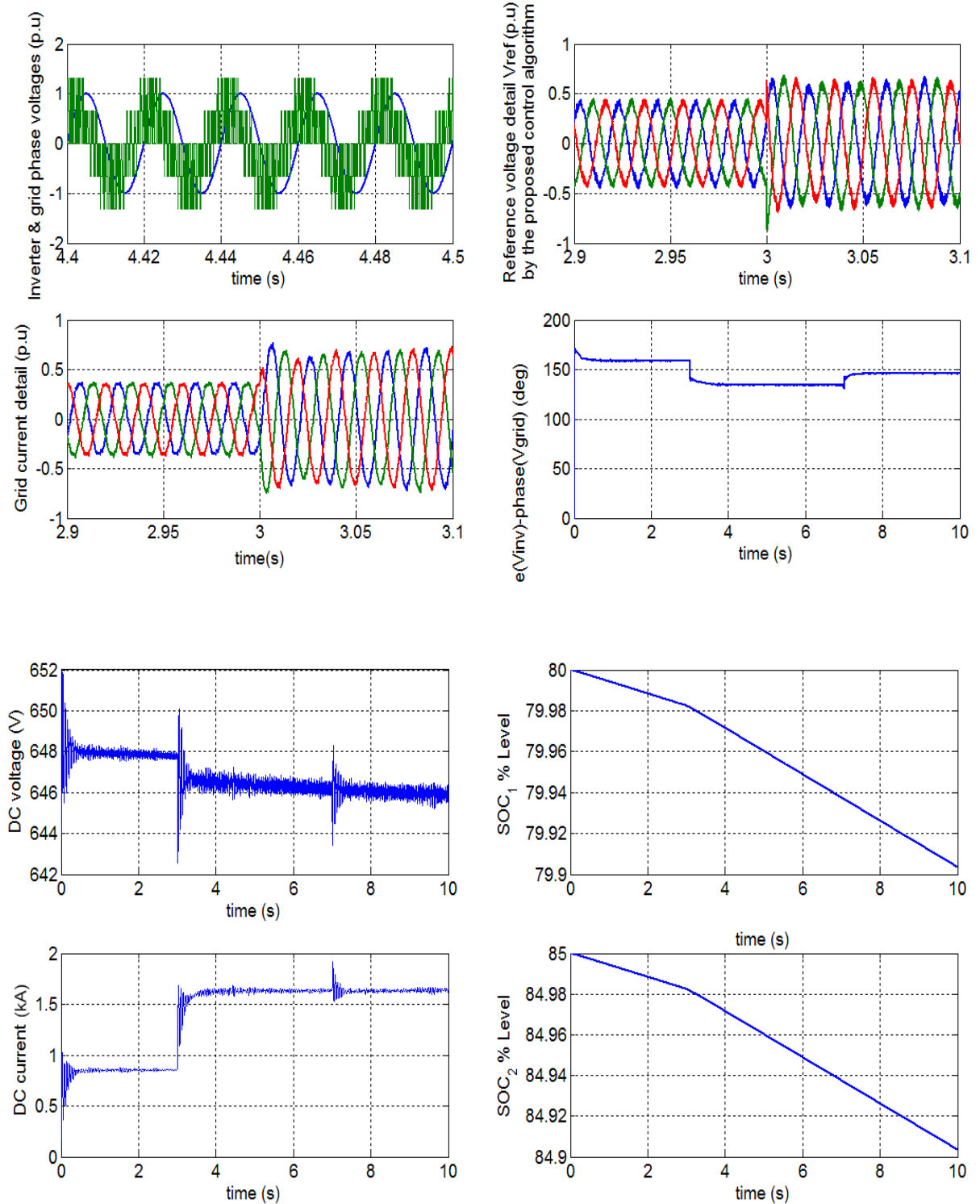
(δ) Διαστήματα αγωγής S1-S6 για την PWM περίοδο

Στα επόμενα θα παρουσιαστούν προσομοιώσεις για τις διάφορες φάσεις λειτουργίας.

6.3.2.1 Φάση εκφόρτισης

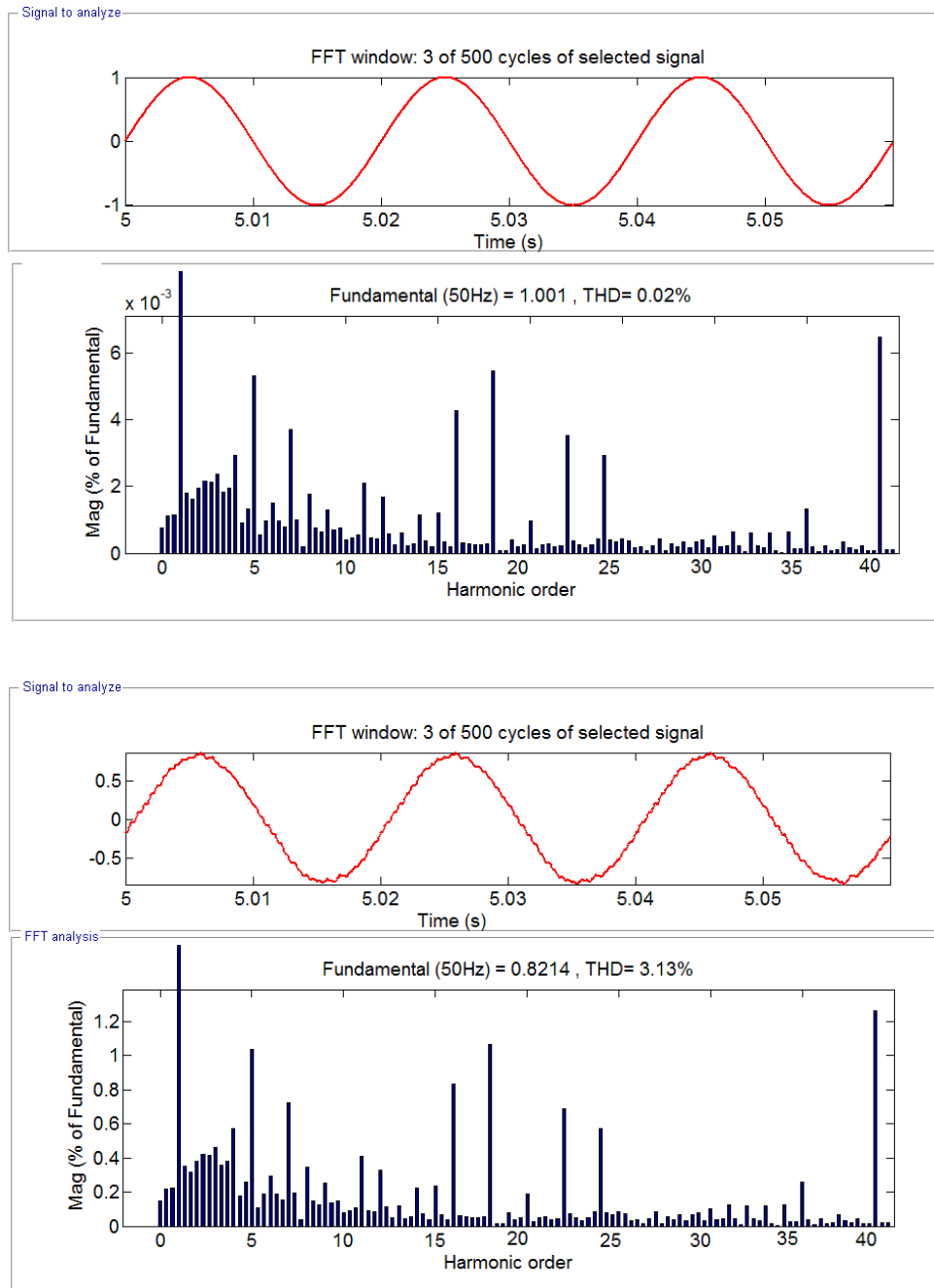
Στην προσομοίωση αυτή το σύστημα ζητά ενεργό ισχύ για την κάλυψη του φορτίου. Θεωρούμε πως υπάρχει βηματική μεταβολή της ενεργού ισχύος από 300kW σε 900kW τη χρονική στιγμή 3sec και βηματική μεταβολή της άεργου ισχύος από 200kVAr σε -200 kVAr τη χρονική στιγμή 7sec. Τα άνω και κάτω όρια φόρτισης των συσσωρευτών είναι 95% και 30% αντίστοιχα. Τα επίπεδα (SOC_Levels) των δύο συστοιχιών των συσσωρευτών την αρχική χρονική στιγμή είναι 80% και 85% αντίστοιχα. Παρουσιάζονται οι μεταβολές της ενεργού και άεργου ισχύος, η φασική τάση του δικτύου και του αντιστροφέα, το ρεύμα του δικτύου, η τάση αναφοράς, η διαφορά γωνίας μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου, η τάση και το ρεύμα στην DC πλευρά, καθώς και η πορεία των επιπέδων φόρτισης. Η προσομοίωση διαρκεί 10sec και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στο σχήμα 6.27.





Σχήμα 6.27: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς αυτό της τάσης του δικτύου για την παραγωγή παλμών μορφής SV-PWM την περίοδο εκφόρτισης των συσσωρευτών

Παρατηρούμε σχεδόν τα ίδια πράγματα με την SPWM τεχνική, με μια μικρή διαφορά στην απόκριση της ισχύος η οποία βελτιώθηκε στα 0,7sec, ενώ η υπερπήδηση είναι μικρή. Τα υπόλοιπα είναι όμοια με την SPWM. Στο σχήμα 6.28 παρουσιάζουμε τις τιμές του συντελεστή THD % σε σχέση με τη συχνότητα των αρμονικών για την τάση και το ρεύμα στο PCC όπως αυτή αναλύθηκε με το fftool από το powergui του MATLAB.

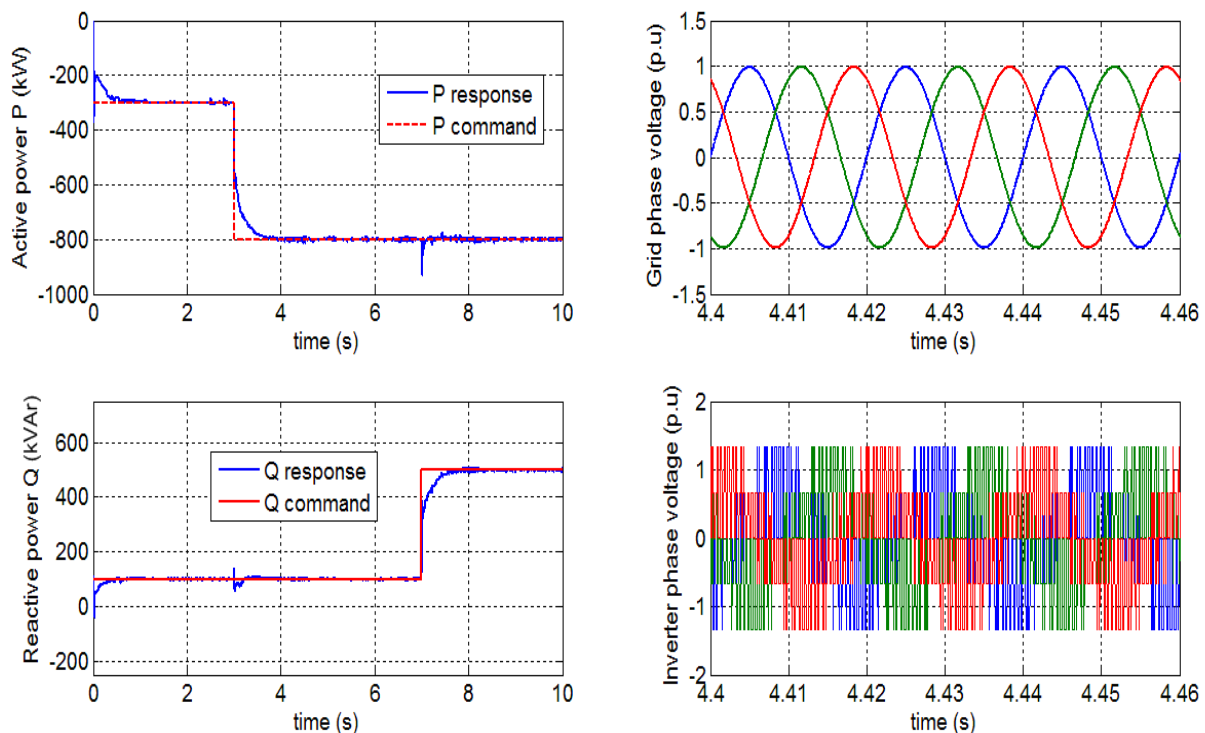


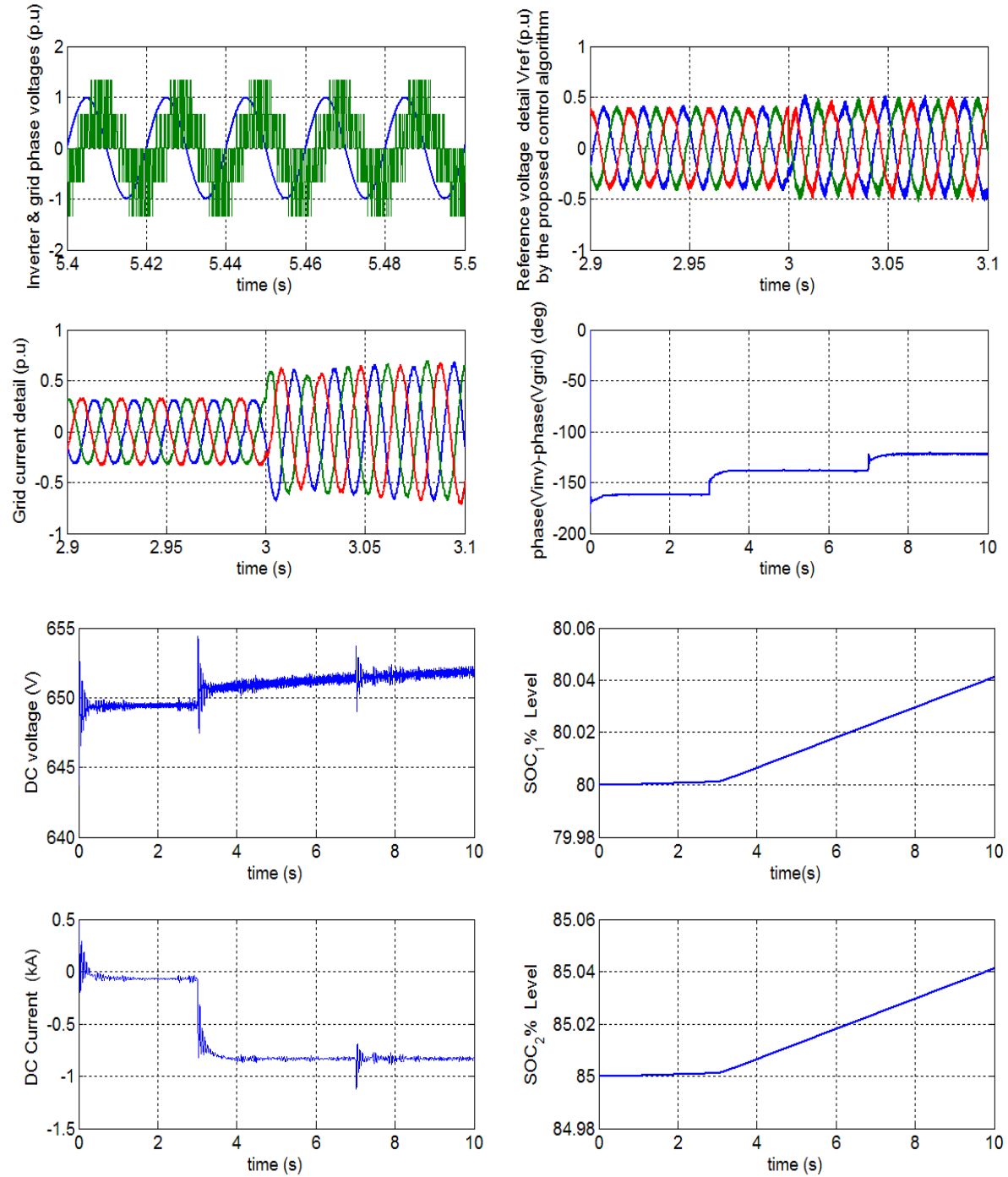
Σχήμα 6.28: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης και THD% τάσεως και ρεύματος στο PCC για την τεχνική που προσομοιώθηκε κατά την εκφόρτιση

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι το THD της τάσης είναι σχεδόν μηδενικό, ενώ το THD του ρεύματος είναι περίπου 3.13% μέσα στα όρια του προτύπου 519 του IEEE. Αυτό που είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε είναι ότι υπάρχουν αρμονικές εκτός από τις τιμές $Fnc \pm 2$ και πιο χαμηλής τάξης ($5^{ης}$, $7^{ης}$) η παρουσία των οποίων αποτελεί μειονέκτημα σε σχέση με πριν.

6.3.2.2 Φάση φόρτισης

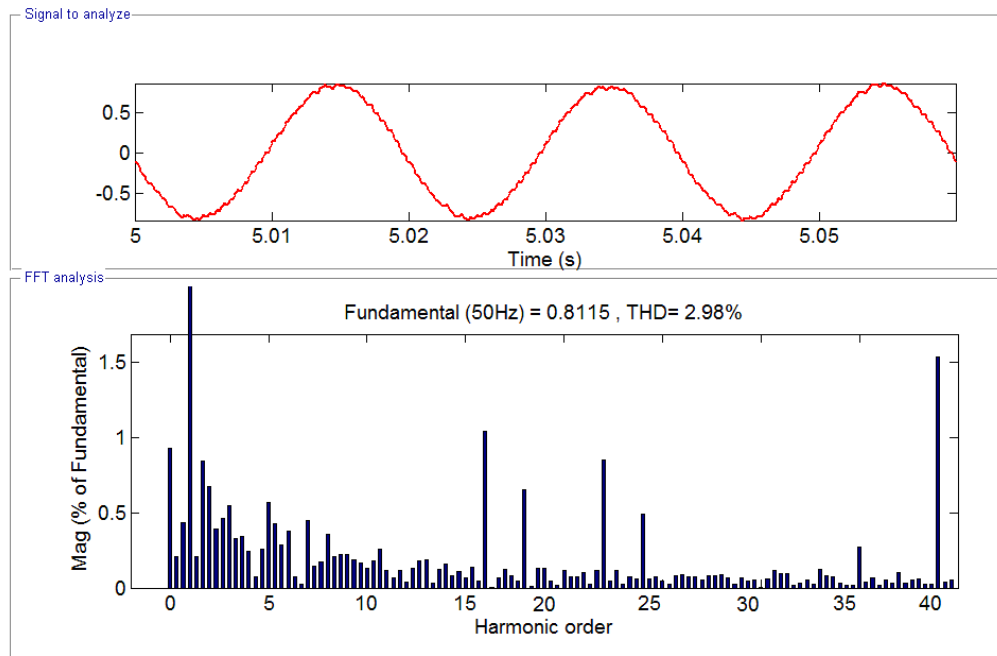
Στην προσομοίωση αυτή το σύστημα αποθηκεύει ενέργεια εφόσον η ζήτηση ισχύος από το φορτίο είναι χαμηλή ή η ενέργεια είναι φτηνή τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Θεωρούμε πως υπάρχει βηματική μεταβολή της ενεργού ισχύος από -300kW σε -800kW τη χρονική στιγμή 3sec και βηματική μεταβολή της άεργου ισχύος από 100kVAr σε 500kVAr τη χρονική στιγμή 7sec. Τα άνω και κάτω όρια φόρτισης των συσσωρευτών είναι 95% και 30% αντίστοιχα. Τα επίπεδα (SOC_Levels) των δύο συστοιχιών των συσσωρευτών την αρχική χρονική στιγμή είναι 80% και 85% αντίστοιχα. Παρουσιάζονται οι μεταβολές της ενεργού και άεργου ισχύος, η φασική τάση του δικτύου και του αντιστροφέα, το ρεύμα του δικτύου, η τάση αναφοράς, η διαφορά γωνίας μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου, η τάση και το ρεύμα στην DC πλευρά, καθώς και η πορεία των επιπέδων φόρτισης. Η προσομοίωση διαρκεί 10sec και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στο σχήμα 6.29.





Σχήμα 6.29: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς αυτό της τάσης του δικτύου για την παραγωγή παλμών μορφής SV-PWM την περίοδο φόρτισης των συσσωρευτών

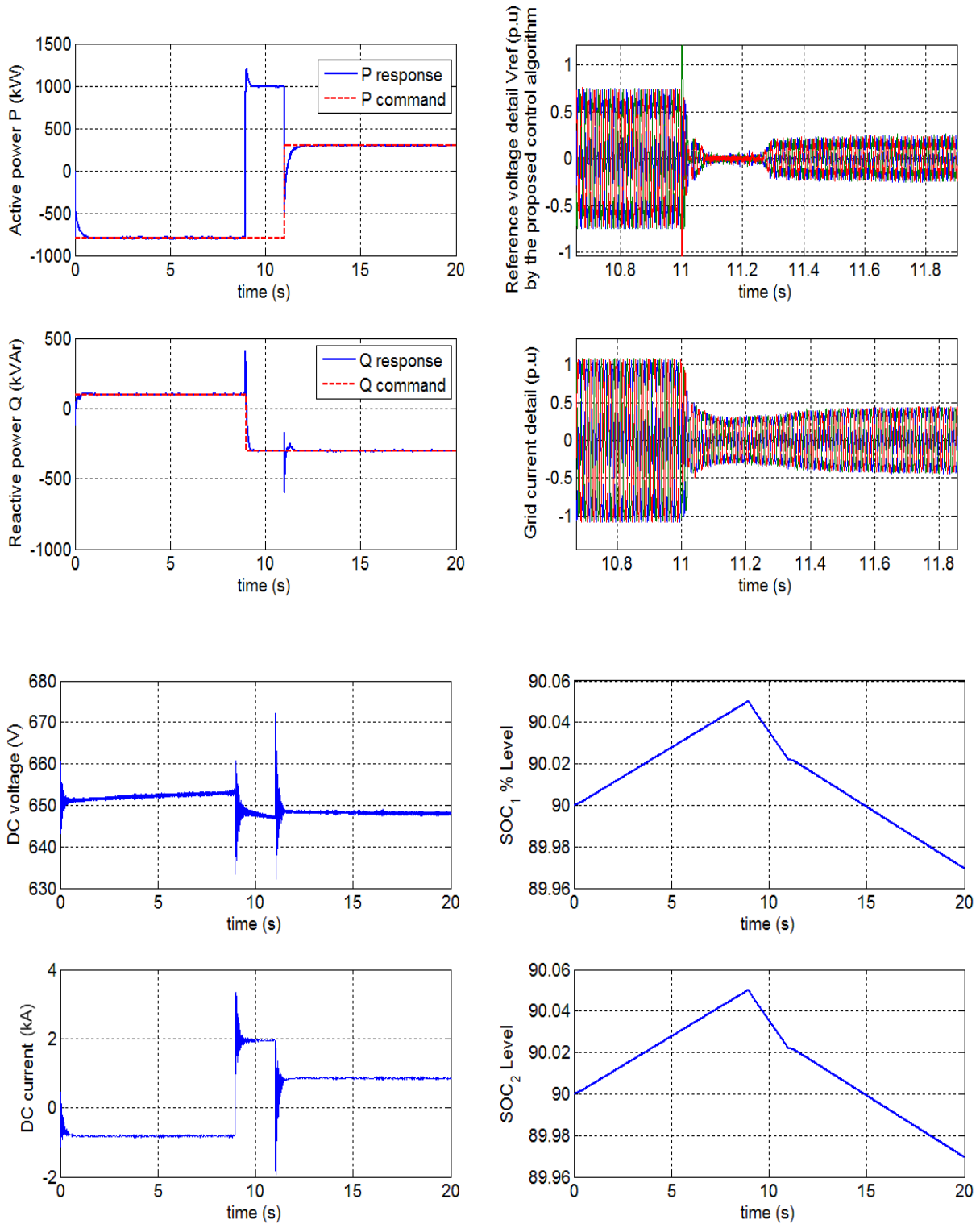
Στο σχήμα 6.30 παρουσιάζουμε τις τιμές του συντελεστή THD % σε σχέση με τη συχνότητα των αρμονικών για το ρεύμα στο PCC όπως αυτή αναλύθηκε με το fftool από το powergui του MATLAB



Σχήμα 6.30: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης και THD% ρεύματος στο PCC για την τεχνική που προσομοιώθηκε κατά την φόρτιση των συσσωρευτών

6.3.2.3 Φάση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος

Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα δεν ακολουθεί την εντολή ενεργού ισχύος αλλά προτιμά να ικανοποιήσει αυτόματα τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών παρακάμπτοντας το 'Network dedicated system'. Το σύστημα μπορεί να επανέλθει στην αρχική κατάσταση (ικανοποίηση της εντολής P) μόνο εάν μετά από κάποιο χρονικό διάστημα ικανοποιηθούν τα όρια φόρτισης και αλλάξει η κατεύθυνση της ροής της ενεργού ισχύος. Στο παράδειγμα αυτό θεωρούμε ότι υπάρχει βηματική εντολή της ενεργού ισχύος από τα -800kW στα 300kW τη χρονική στιγμή 11sec και βηματική μεταβολή της άεργου ισχύος από 100kVAr σε -300kVAr τη χρονική στιγμή 7sec. Τα άνω και κάτω όρια φόρτισης των συσσωρευτών είναι 90.05% και 30% αντίστοιχα ώστε να μην φορτιστεί η μπαταρία τη δεδομένη χρονική πάνω από αυτό το όριο διότι είναι ακριβή η ενέργεια τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Τα επίπεδα φόρτισης των δύο συσσωρευτών στην αρχή είναι τα ίδια και ίσα με 90%. Παρουσιάζονται οι μεταβολές της ενεργού και άεργου ισχύος, το ρεύμα του δικτύου, η τάση αναφοράς, η τάση και το ρεύμα στην DC πλευρά, καθώς και η πορεία των επιπέδων φόρτισης. Η προσομοίωση διαρκεί 20sec και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στο σχήμα 6.31.



Σχήμα 6.31: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς αυτό της τάσης του δικτύου για παραγωγή παλμών μορφής SV-PWM στην περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος για την ικανοποίηση των ορίων φόρτισης

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι αρχικά το σύστημα να ακολουθά τις εντολές P – Q με ακρίβεια μέχρι τη χρονική στιγμή 9sec., Τότε όμως φτάνει στο ανώτερο όριο φόρτισης που είναι 90.05% όπως φαίνεται και στα διαγράμματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο έλεγχος για την παραγωγή του ρεύματος ευθέως άξονα να μην εξαρτάται πλέον από τον έλεγχο P αλλά από τον έλεγχο που περιλαμβάνει ικανοποίηση των ορίων φόρτισης. Έτσι η επιθυμητή τιμή τώρα είναι η μέση τιμή των δύο επιπέδων των δύο συστοιχιών, τιμή που βρίσκεται σίγουρα ανάμεσα στα όρια που θέλουμε να διατηρήσουμε. Ως αποτέλεσμα, παρατηρούμε από τα διαγράμματα ότι η μπαταρία αρχίζει να εκφορτίζεται για να διατηρήσει τα επιθυμητά επίπεδα φόρτισης προσφέροντας στο δίκτυο το ανώτερο ποσό ισχύος που ο αντιστροφέας μπορεί να μεταφέρει εκείνη τη στιγμή. Το γεγονός αυτό αμέσως αντικατοπτρίζεται από τη μεταβολή της ροής του ρεύματος στο dc αλλά και τη μεταβολή της dc τάσης. Το ρεύμα και η τάση αναφοράς υφίστανται και αυτά τις αναγκαίες μεταβολές.

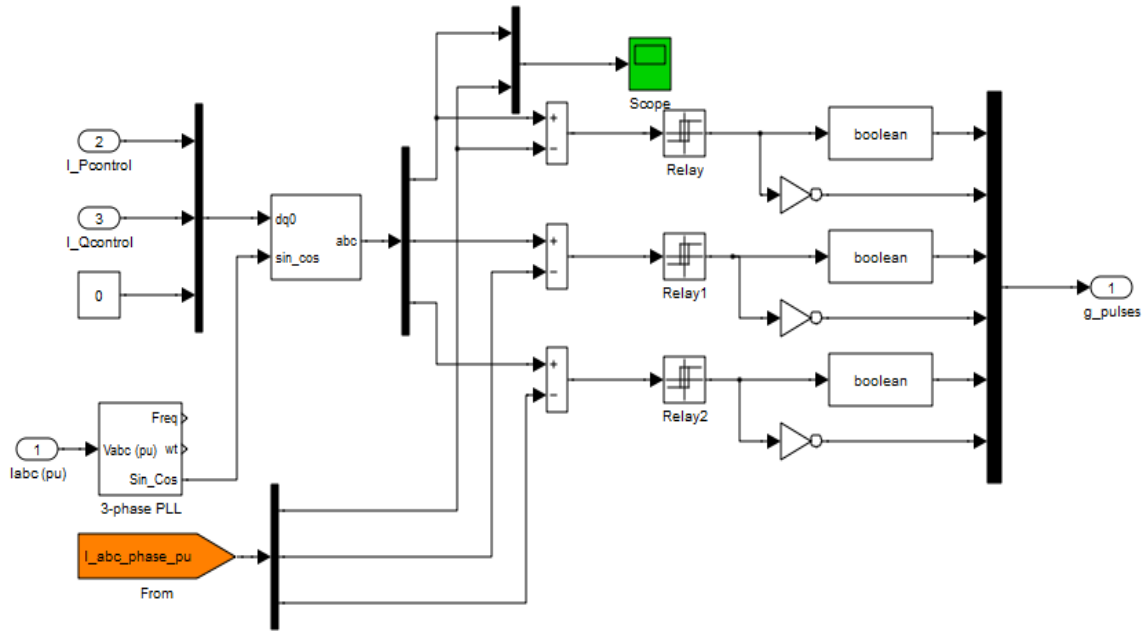
Αυτά εξακολουθούν να συμβαίνουν μέχρι τη χρονική στιγμή 11 sec. Εκείνη τη στιγμή αλλάζει φορά η εντολή της ενεργού ισχύος και από αρνητική γίνεται θετική. Εφόσον λοιπόν το σύστημα βρίσκεται τη δεδομένη στιγμή στα επιτρεπτά όρια φόρτισης, η αλλαγή της κατεύθυνσης της ροής της ισχύος θα σηματοδοτήσει το τέλος της παράκαμψης εντολής ενεργού ισχύος και τη μετάβαση στον αρχικό έλεγχο ενεργού ισχύος. Από τα 11 sec και πέρα το σύστημα κανονικά συνεχίζει να ακολουθά τις εντολές P-Q. Αξιοπρόσεκτη είναι επίσης και η μεταβολή στα όρια φόρτισης των συσσωρευτών τα οποία μετά τα 9sec συνεχίζουν να μειώνονται αργά.

6.3.3 Προσομοίωση διανυσματικού ελέγχου P-Q με χρησιμοποίηση του ρεύματος του δικτύου i_{ref} ως αναφορά για το PLL για τη δημιουργία παλμών μέσω του ελέγχου βρόχου υστέρησης.

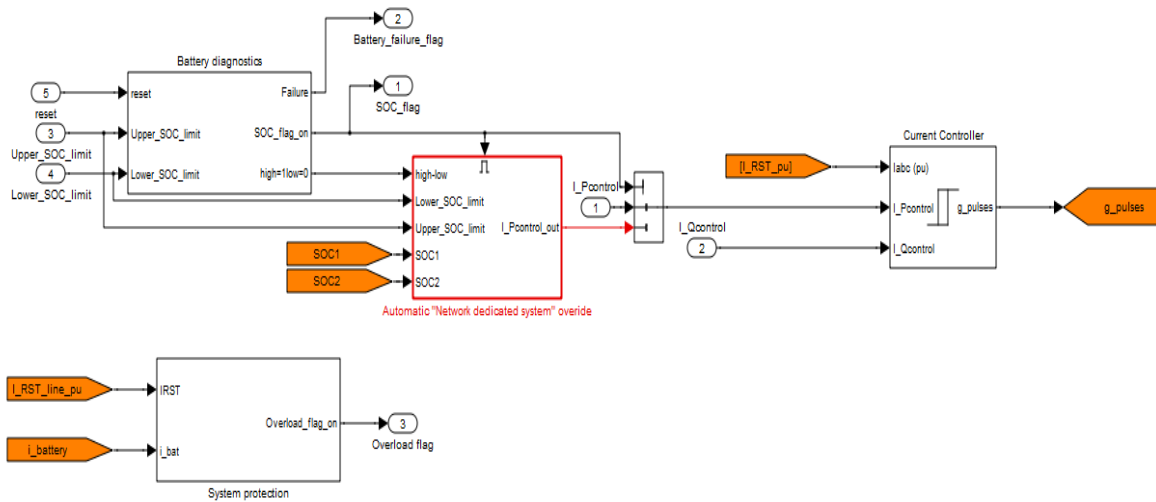
Σε αυτήν την περίπτωση μοντελοποιείται και προσομοιώνεται η τεχνική της παραγράφου 4.2.3. Το μοντέλο του διανυσματικού ελέγχου παρουσιάζεται στο σχήμα 6.32. Όπως παρατηρούμε, είσοδοι στο μπλοκ αυτό είναι τα ρεύματα ευθέως και εγκάρσιου άξονα τα οποία έχουν προέλθει είτε από τον έλεγχο P – Q είτε από τον έλεγχο των ορίων φόρτισης. Επιπλέον είσοδοι είναι το ρεύμα του δικτύου όπως έχει μετρηθεί στο PCC και το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα πριν το φίλτρο εξόδου. Αξίζει να σημειώσουμε επίσης πως το μπλοκ αυτό αποτελεί υποσύστημα του ‘BESS dedicated control and protection system’ όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.33.

Όπως παρατηρούμε, το PLL σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνει ως είσοδο αναφοράς το ρεύμα του δικτύου από το οποίο υπολογίζει τη γωνία θ , δηλαδή τη γωνία της φάσης και τη διοχετεύει στο μετασχηματισμό $dq \rightarrow abc$. Ο μετασχηματισμός αυτός μεταφέρει το ρεύμα του δικτύου σε τριφασικό πλαίσιο abc συγχρονισμένο με τη γωνία που έχει υπολογίσει το PLL. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση του ρεύματος αυτού με το ρεύμα από την έξοδο του αντιστροφέα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.32. Το σφάλμα στη

συνέχεια περνά μέσα από βρόχο υστέρησης, του οποίου η έξοδος θα δώσει τους παλμούς έναυσης των IGBTs.



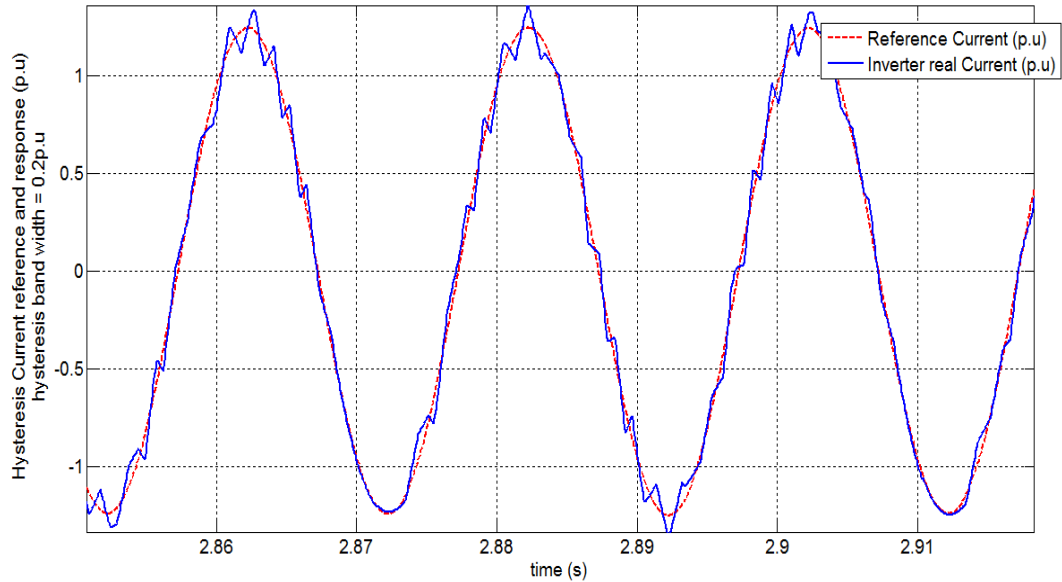
Σχήμα 6.32: Αλγόριθμος διανυσματικού ελέγχου P-Q που χρησιμοποιεί ως σήμα αναφοράς για το PLL το ρεύμα του δικτύου και δημιουργία παλμών μέσω βρόχου υστέρησης



Σχήμα 6.33: Τροποποιημένο μοντέλο του συστήματος ‘BESS dedicated control and protection system’ ώστε να περιλαμβάνει την τεχνική βρόχου υστέρησης

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι δίνει πολύ γρήγορη απόκριση στις εντολές ενεργού και άεργου ισχύος διότι έχει μικρή πολυπλοκότητα. Σε

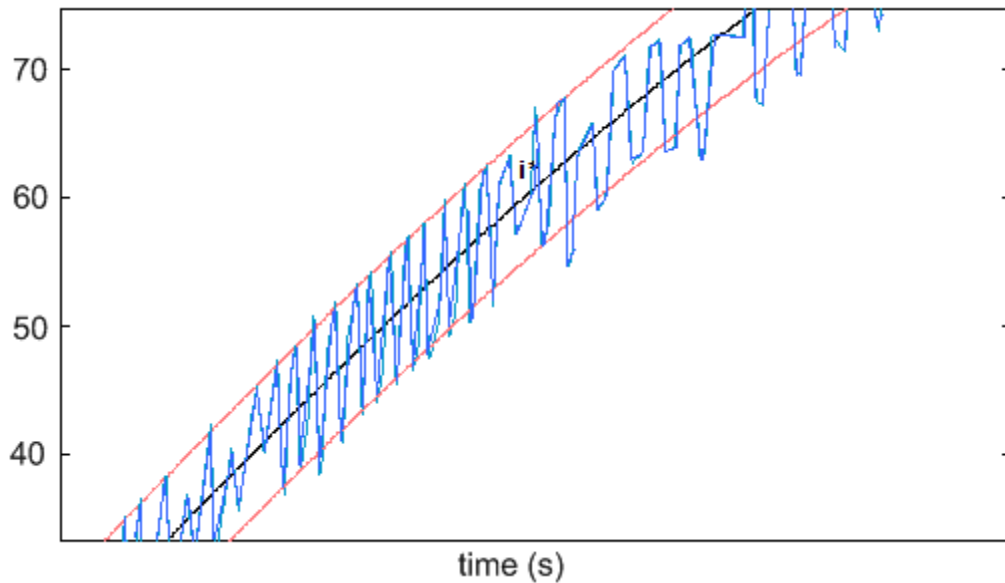
σύγκριση με την άλλη τεχνική, ο εσωτερικός βρόχος ελέγχου των ρευμάτων έχει αντικατασταθεί με τον έλεγχο των ρευμάτων μέσω βρόχου υστέρησης (σχήμα 6.34).



Σχήμα 6.34: Έλεγχος ρεύματος μέσω βρόχου υστέρησης

Απ' την άλλη πλευρά βέβαια, αυτή η τεχνική ελέγχου παρουσιάζει βασικά μειονεκτήματα.

- Μεγάλη κυμάτωση του ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση
- Η διακοπτική συχνότητα δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται στα διάφορα τμήματα της κυματομορφής αναφοράς σε κάθε περίοδο. Έτσι σε κάποιο τμήμα της κυματομορφής αναφοράς η διακοπτική συχνότητα μπορεί να γίνει ιδιαίτερα υψηλή (Σχήμα 6.34). Η μέγιστη διακοπτική συχνότητα εξαρτάται από τις παραμέτρους λειτουργίας του μετατροπέα και αποδεικνύεται ότι ισούται με $V_{dc} / 4hL_f$, όπου h είναι το εύρος της ζώνης υστέρησης. Δηλαδή όπως ήταν το αναμενόμενο, η διακοπτική συχνότητα αυξάνεται όταν μειώνεται η ζώνη υστέρησης
- Δεν υπάρχει επικοινωνία των ελεγκτών υστέρησης μεταξύ των τριών φάσεων και έτσι δεν υφίσταται στρατηγική για την παραγωγή μηδενικών διανυσμάτων. Ως αποτέλεσμα, η διακοπτική συχνότητα αυξάνεται για μικρό M_f και έτσι το σήμα θα φύγει από τη ζώνη υστέρησης όταν το μηδενικό διάνυσμα έχει ενεργοποιηθεί
- Το φάσμα της κυματομορφής, εκτός από συχνότητες πολλαπλάσιες των 50 Hz, περιέχει και ενδιάμεσες αρμονικές ('interharmonics') αλλά και αρμονικές στη περιοχή από 0 έως 50 Hz ('subharmonics').

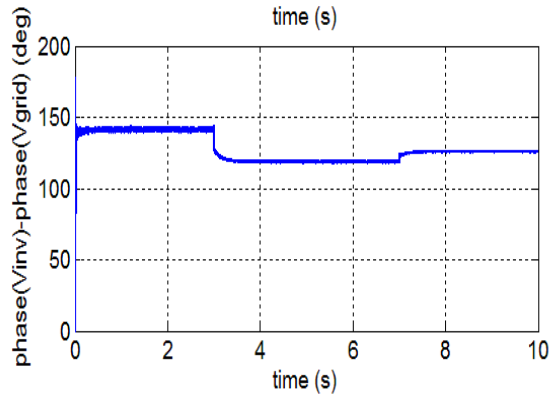
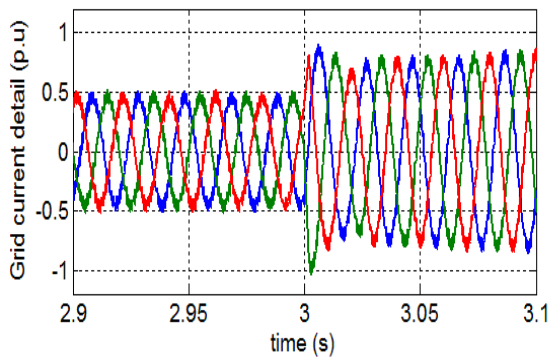
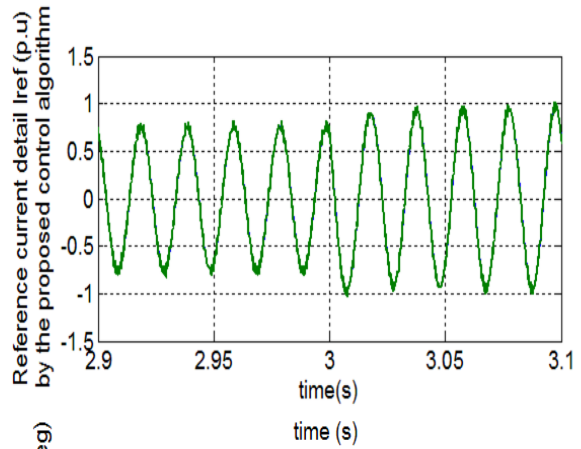
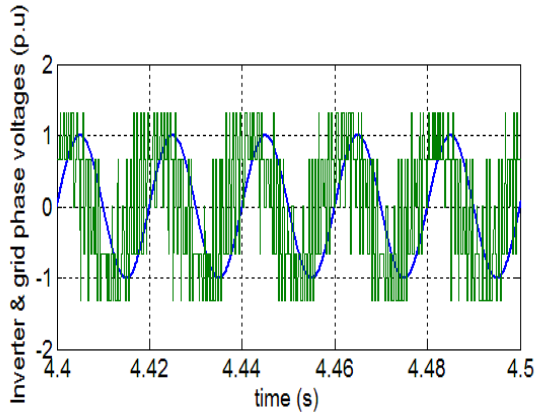
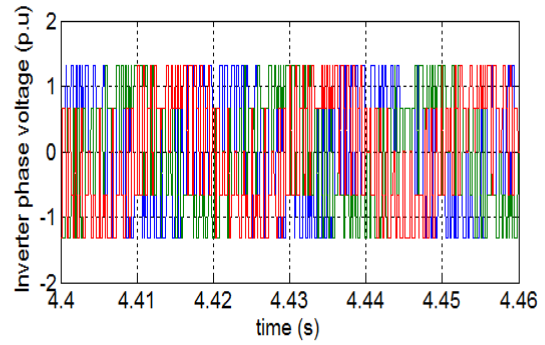
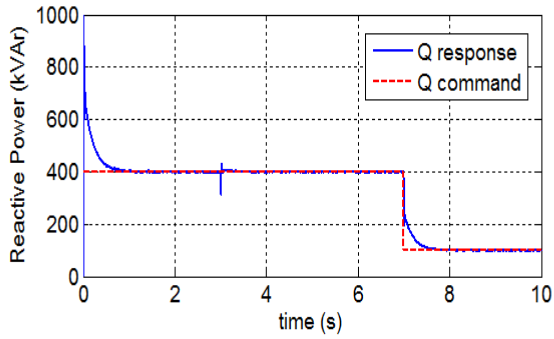
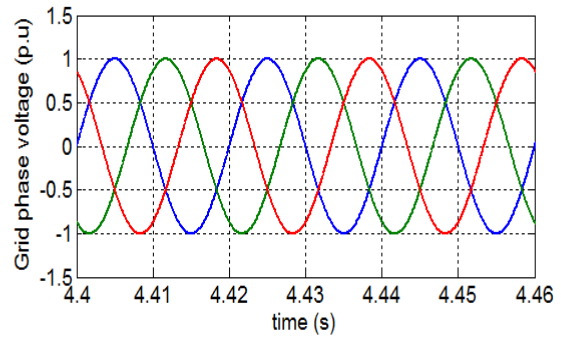
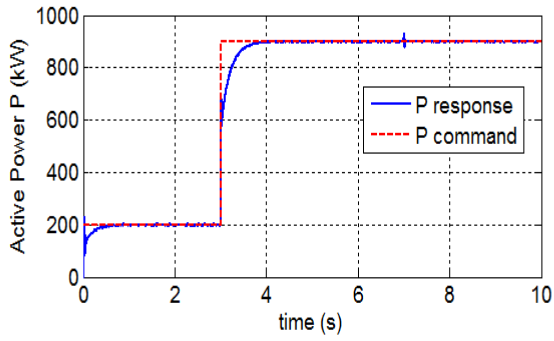


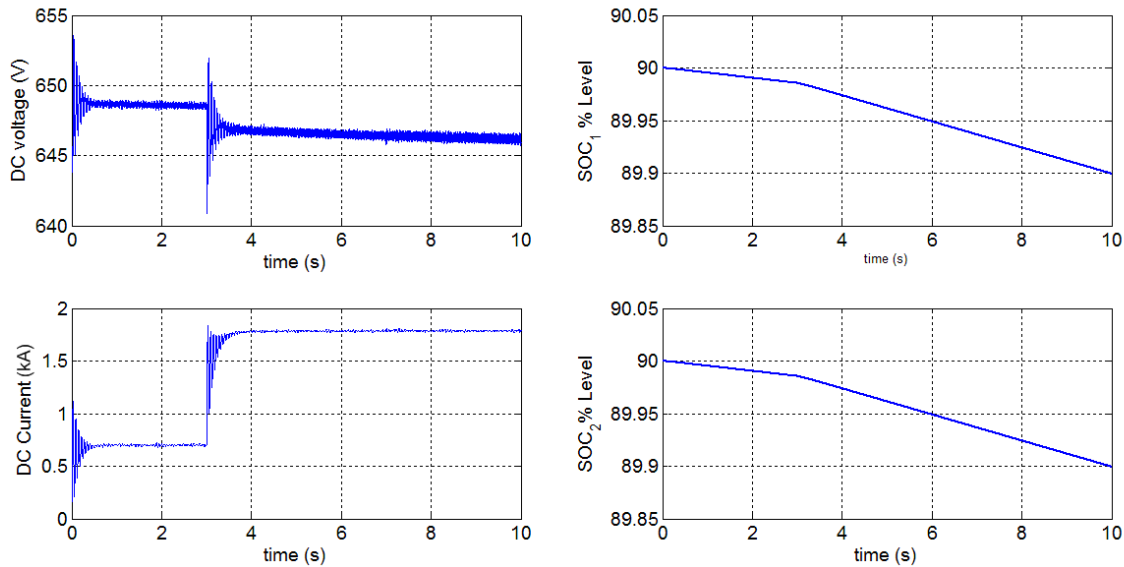
Σχήμα 6.35: Λεπτομέρεια του σχήματος 6.34 όπου φαίνεται μια υψίσυχη ταλάντωση του πραγματικού ρεύματος (σε A) μέσα στη ζώνη υστέρησης (limit cycle). Σ' αυτό το τμήμα της κυματομορφής η διακοπτική συχνότητα είναι ιδιαίτερα υψηλή.

Στα επόμενα θα παρουσιαστούν προσομοιώσεις για τις διάφορες φάσεις λειτουργίας.

6.3.3.1 Φάση εκφόρτισης

Στην προσομοίωση αυτή το σύστημα ζητά ενεργό ισχύ για την κάλυψη του φορτίου. Θεωρούμε πως υπάρχει βηματική μεταβολή της ενεργού ισχύος από 200kW σε 900kW τη χρονική στιγμή 3sec και βηματική μεταβολή της άεργου ισχύος από 400kVA_r σε 100 kVA_r τη χρονική στιγμή 7sec. Τα άνω και κάτω όρια φόρτισης των συσσωρευτών είναι 95% και 30% αντίστοιχα. Τα επίπεδα (SOC_Levels) των δύο συστοιχιών των συσσωρευτών την αρχική χρονική στιγμή είναι 90% και τα δύο. Παρουσιάζονται οι μεταβολές της ενεργού και άεργου ισχύος, η φασική τάση του δικτύου και του αντιστροφέα, το ρεύμα του δικτύου, το ρεύμα αναφοράς, η διαφορά γωνίας μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου, η τάση και το ρεύμα στην DC πλευρά, καθώς και η πορεία των επιπέδων φόρτισης. Η προσομοίωση διαρκεί 10sec και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στο σχήμα 6.36.

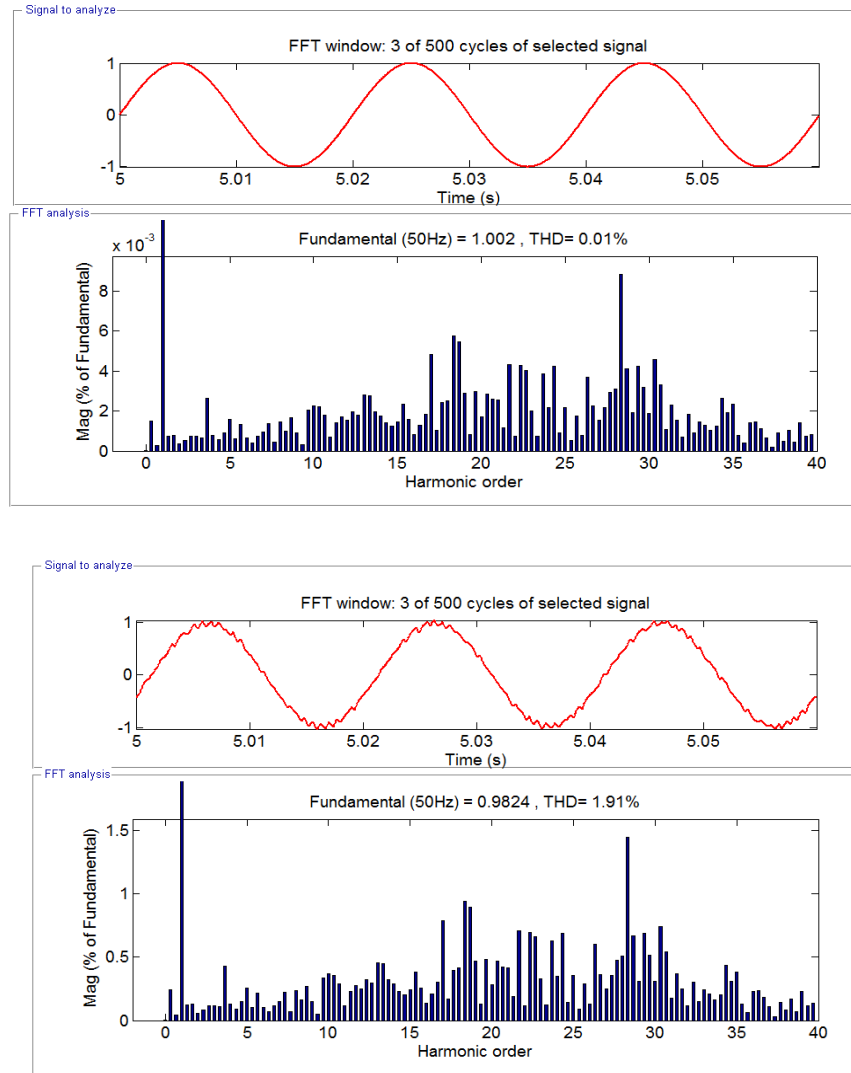




Σχήμα 6.36: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς I_{ref} αυτό του ρεύματος του δικτύου για παραγωγή παλμών μέσω ελέγχου του ρεύματος σε ζώνη υστέρησης (HBCC) την περίοδο εκφόρτισης των συσσωρευτών

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι η απόκριση της ενεργού και της άεργου ισχύος στις εντολές του κέντρου ελέγχου είναι εξαιρετική αφού χρειάζεται λιγότερο από 0.5 sec για να βρεθούν στη μόνιμη κατάσταση, ενώ παρατηρείται και μικρή υπερπήδηση. Η τάση εξόδου του αντιστροφέα και του δικτύου είναι εξαιρετικές, ενώ η διακοπτική συχνότητα είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του φορέα λόγω της τεχνικής SPWM. Η φασική τάση του αντιστροφέα προηγείται σε σχέση με αυτή του δικτύου, γεγονός που δείχνει ότι υπάρχει μεταφορά ισχύος από τους συσσωρευτές (εκφόρτιση) προς το δίκτυο. Η τιμή της διαφοράς φάσης ανάμεσα στον αντιστροφέα και στο δίκτυο σε μοίρες φαίνεται επίσης στο διάγραμμα. Στα αποτελέσματα σημειώνουμε και την αύξηση του ρεύματος του δικτύου τη στιγμή της μεταβολής. Για την dc πλευρά των συσσωρευτών, παρατηρούμε την ομαλή μείωση της dc τάσης και την αύξηση του dc ρεύματος με την πάροδο του χρόνου εφόσον οι συσσωρευτές εκφορτίζονται παρέχοντας περισσότερη ενεργό ισχύ στο φορτίο. Τέλος, τα επίπεδα φόρτισης των συσσωρευτών πέφτουν αργά, σημάδι πως οι συσσωρευτές εκφορτίζονται. Η αργή πτώση τους οφείλεται στο ότι χρειάζονται αρκετές ώρες για να εκφορτιστούν πλήρως οι συσσωρευτές, ενώ η προσομοίωση διεξάγεται μόνο για λίγα δευτερόλεπτα.

Στο σχήμα 6.37 παρουσιάζουμε τις τιμές του συντελεστή THD % σε σχέση με τη συχνότητα των αρμονικών για την τάση και το ρεύμα στο PCC όπως αυτή αναλύθηκε με το fftool από το powergui του MATLAB.



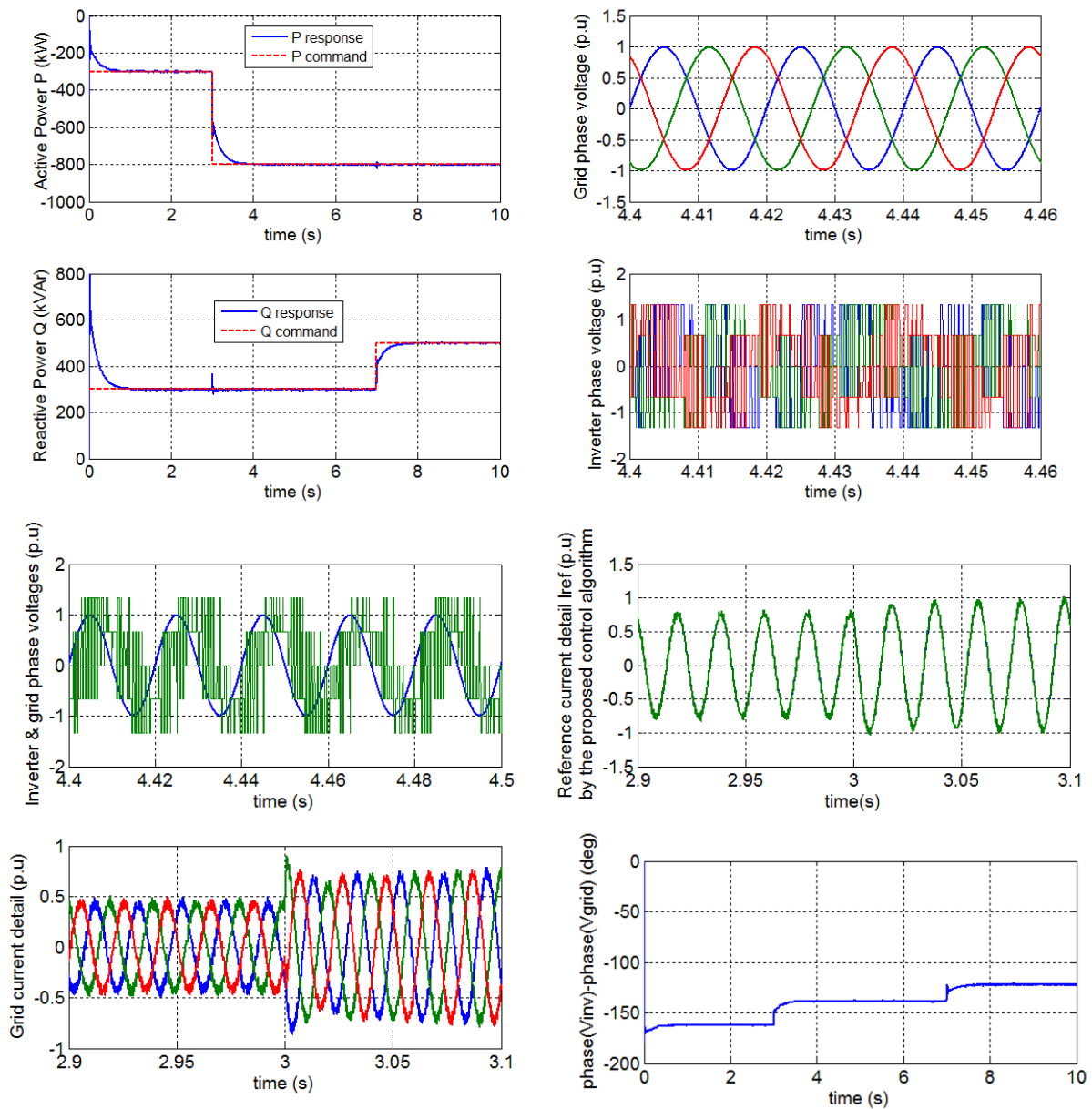
Σχήμα 6.37: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης και THD% τάσεως και ρεύματος στο PCC για την τεχνική που προσομοιώθηκε κατά την εκφόρτιση

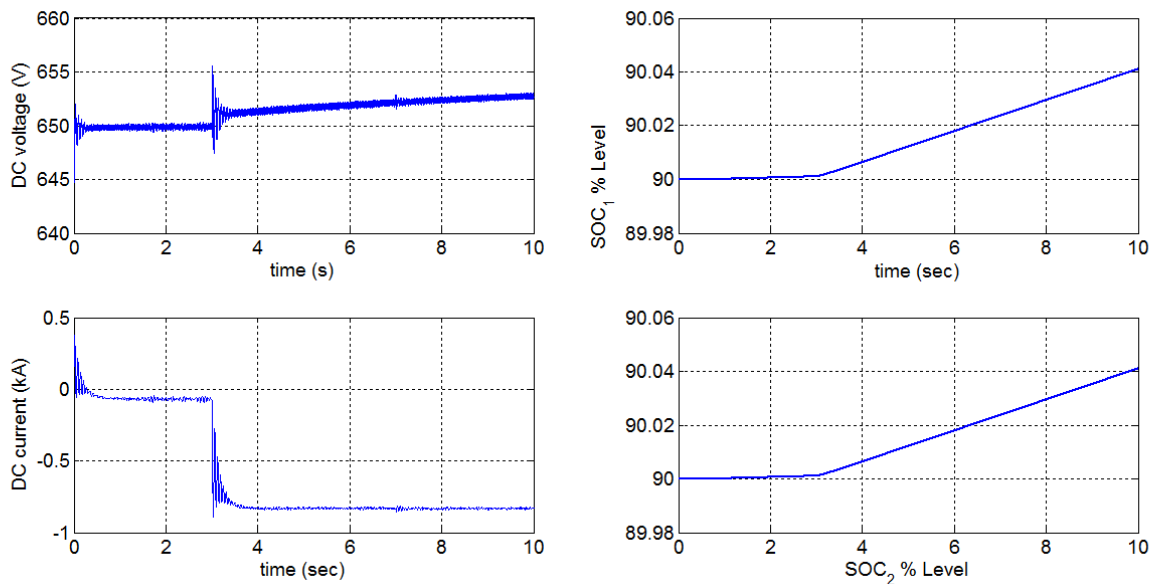
Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι το THD της τάσης είναι σχεδόν μηδενικό, ενώ το THD του ρεύματος είναι περίπου 1.91% μέσα στα όρια του προτύπου 519 του IEEE. Αυτό που είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε είναι ότι το φάσμα της κυματομορφής περιέχει εκτός από συχνότητες πολλαπλάσιες των 50 Hz και ενδιάμεσες αρμονικές ('interharmonics') αλλά και αρμονικές στη περιοχή από 0 έως 50 Hz ('subharmonics'). Αυτό είναι μειονέκτημα σε σχέση με την προηγούμενη τεχνική αφού οι μεγαλύτερες αρμονικές έχουν μεταφερθεί σε χαμηλότερες συχνότητες.

6.3.3.2 Φάση φόρτισης

Στην προσομοίωση αυτή το σύστημα αποθηκεύει ενέργεια εφόσον η ζήτηση ισχύος από το φορτίο είναι χαμηλή ή η ενέργεια είναι φτηνή τη συγκεκριμένη χρονική

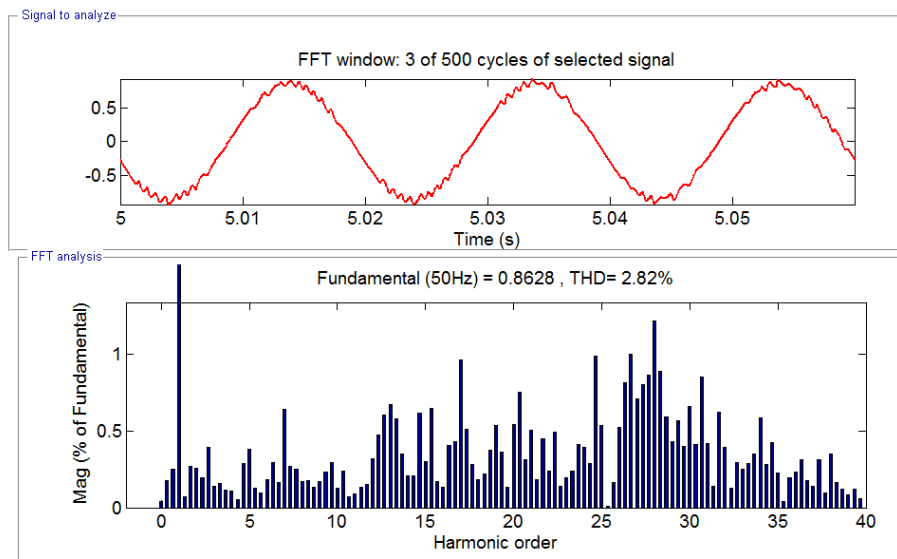
στιγμή. Θεωρούμε πως υπάρχει βηματική μεταβολή της ενεργού ισχύος από -300kW σε -800kW τη χρονική στιγμή 3sec και βηματική μεταβολή της άεργου ισχύος από 100kVAr σε 500 kVAr τη χρονική στιγμή 7sec. Τα άνω και κάτω όρια φόρτισης των συσσωρευτών είναι 95% και 30% αντίστοιχα. Τα επίπεδα (SOC_Levels) των δύο συστοιχιών των συσσωρευτών την αρχική χρονική στιγμή είναι 80% και 85% αντίστοιχα. Παρουσιάζονται οι μεταβολές της ενεργού και άεργου ισχύος, η φασική τάση του δικτύου και του αντιστροφέα, το ρεύμα του δικτύου, η τάση αναφοράς, η διαφορά γωνίας μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου, η τάση και το ρεύμα στην DC πλευρά, καθώς και η πορεία των επιπέδων φόρτισης. Η προσομοίωση διαρκεί 10sec και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στο σχήμα 6.38





Σχήμα 6.38: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς I_{ref} αυτό του ρεύματος του δικτύου για παραγωγή παλμών μέσω ελέγχου του ρεύματος σε ζώνη υστέρησης (HBCC) την περίοδο φόρτισης των συσσωρευτών

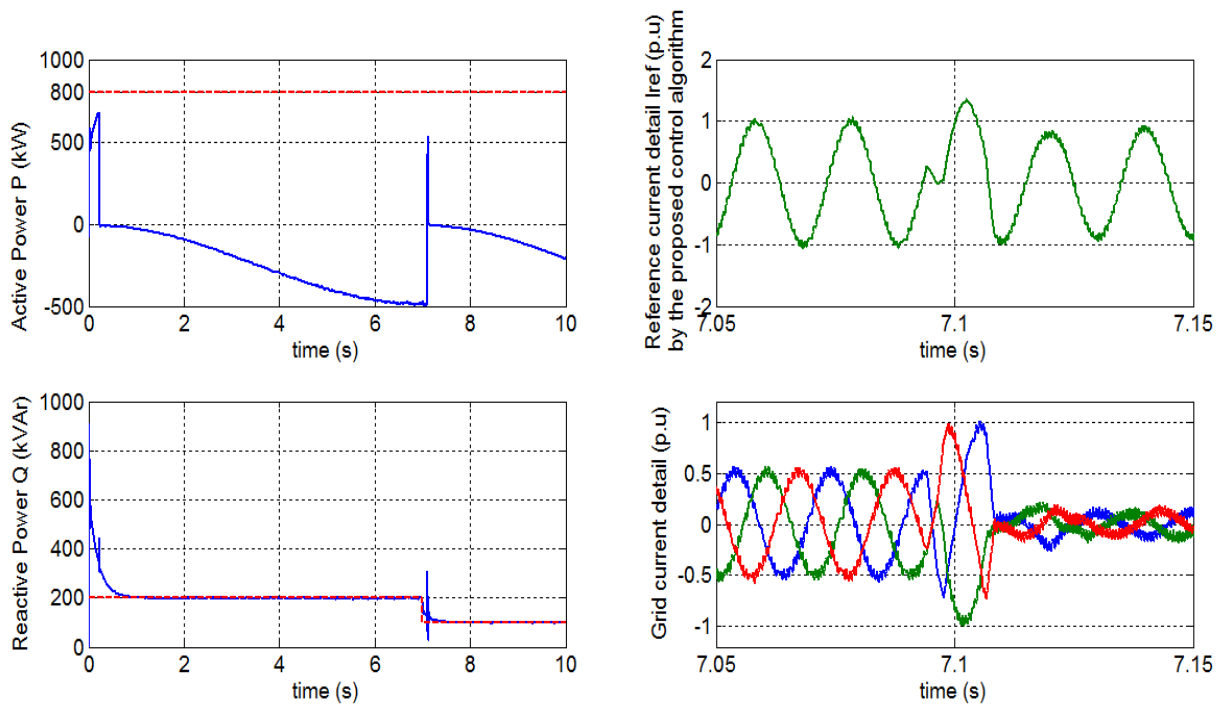
Στο σχήμα 6.39 παρουσιάζουμε τις τιμές του συντελεστή THD % σε σχέση με τη συχνότητα των αρμονικών για το ρεύμα στο PCC όπως αυτή αναλύθηκε με το fftool από το powergui του MATLAB.

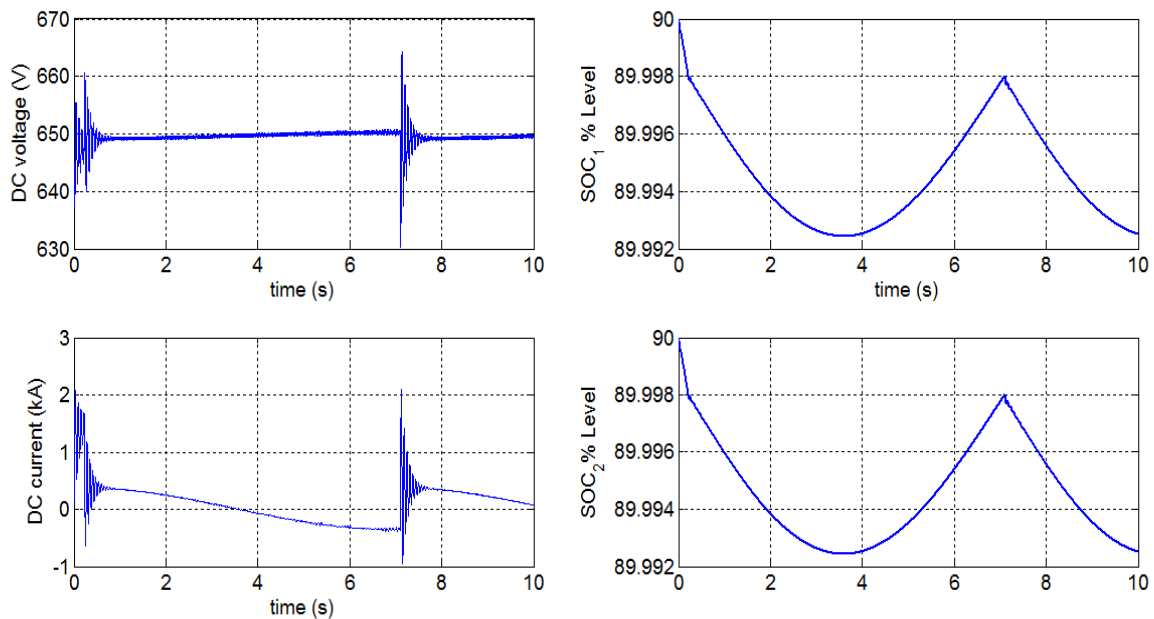


Σχήμα 6.39: Αποτελέσματα φασματικής ανάλυσης και THD% τάσεως και ρεύματος στο PCC για την τεχνική που προσομοιώθηκε κατά την εκφόρτιση

6.3.3.3 Φάση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος

Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα δεν ακολουθεί την εντολή ενεργού ισχύος αλλά προτιμά να ικανοποιήσει αυτόματα τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών παρακάμπτοντας το ‘Network dedicated system’. Το σύστημα μπορεί να επανέλθει στην αρχική κατάσταση (ικανοποίηση της εντολής P) μόνο εάν μετά από κάποιο χρονικό διάστημα ικανοποιηθούν τα όρια φόρτισης και αλλάξει η κατεύθυνση της ροής της ενεργού ισχύος. Στο παράδειγμα αυτό θεωρούμε ότι υπάρχει σταθερή εντολή της ενεργού ισχύος στα 800kW και βηματική μεταβολή της άεργου ισχύος από 200kVAr σε 100 kVAr τη χρονική στιγμή 7sec. Τα άνω και κάτω όρια φόρτισης των συσσωρευτών είναι 90% και 89.998% αντίστοιχα ώστε να μην εκφορτιστεί η μπαταρία τη δεδομένη χρονική αλλά σε κάποια μεγαλύτερη αιχμή στο μέλλον. Τα επίπεδα φόρτισης των δύο συσσωρευτών στην αρχή είναι τα ίδια και ίσα με 90%. Παρουσιάζονται οι μεταβολές της ενεργού και άεργου ισχύος, το ρεύμα του δικτύου, η τάση αναφοράς, η τάση και το ρεύμα στην DC πλευρά, καθώς και η πορεία των επιπέδων φόρτισης. Η προσομοίωση διαρκεί 10sec και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στο σχήμα 6.40.





Σχήμα 6.40: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB/SIMULINK της τεχνικής ελέγχου P-Q με διάνυσμα αναφοράς I_{ref} αυτό του ρεύματος του δικτύου για παραγωγή παλμών μέσω ελέγχου του ρεύματος σε ζώνη υστέρησης (HBCC) την περίοδο εκφόρτισης των συσσωρευτών

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι ενώ αρχικά το σύστημα έχει την τάση να ακολουθήσει τις εντολές P –Q, ξαφνικά ξεπερνά το κάτω όριο φόρτισης του 89.998 . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο έλεγχος για την παραγωγή του ρεύματος ευθέως άξονα να μην εξαρτάται πλέον από τον έλεγχο P αλλά από τον έλεγχο που περιλαμβάνει ικανοποίηση των ορίων φόρτισης. Έτσι η επιθυμητή τιμή τώρα είναι η μέση τιμή των δύο επιπέδων των δύο συστοιχιών, τιμή που βρίσκεται σίγουρα ανάμεσα στα όρια που θέλουμε να διατηρήσουμε. Ως αποτέλεσμα, παρατηρούμε από τα διαγράμματα ότι η μπαταρία αρχίζει να φορτίζεται για να διατηρήσει τα επιθυμητά επίπεδα φόρτισης. Το γεγονός αυτό αμέσως αντικατοπτρίζεται από το αρνητικό ρεύμα στο dc και τη σταθεροποιημένη dc τάση. Το ρεύμα και η τάση αναφοράς υφίστανται και αυτά τις αναγκαίες μεταβολές. Αξιοπρόσεκτη είναι επίσης και η μεταβολή στα όρια φόρτισης των συσσωρευτών τα οποία ακολουθούν μια περιοδική μεταβολή ανάμεσα στο ανώτερο και στο κατώτερο όριο με ένα συγκεκριμένο χρόνο απόκρισης φυσικά .

6.4 Προσομοίωση τεχνικών ελέγχου συστήματος BESS στην περίπτωση ασυμμετρίας και διαταραχών στο δίκτυο

Στην προηγούμενη παράγραφο διαπιστώσαμε πως το σύστημα αποκρίνεται εξαιρετικά στις μεταβολές του φορτίου και στις εντολές του κέντρου ελέγχου. Οι προσομοιώσεις που έγιναν θεώρησαν δεδομένο ότι η συχνότητα και η τάση του δικτύου είναι σταθερές και ρυθμίζονται από τους σταθμούς βάσης, δηλαδή τους συμβατικούς σταθμούς diesel.

Αυτή η υπόθεση μπορεί να στηριχτεί αν το σύστημα BESS διασυνδέεται σε άπειρο ζυγό (π.χ. στο διασυνδεδεμένο σύστημα). Στην περίπτωση όμως που το σύστημα BESS συνδεθεί σε ένα απομονωμένο ή αυτόνομο σύστημα (π.χ. μικρό νησιωτικό σύστημα), τότε είναι πιθανότερο να υπάρξουν περιπτώσεις ασυμμετρίας ή διαταραχών.

Όπως αναλύσαμε στο κεφάλαιο 4, για τη λειτουργία του συστήματος είναι απαραίτητη η εκτίμηση της γωνίας φάσης της τάσης ή του ρεύματος του δικτύου για το συγχρονισμό του τριφασικού αντιστροφέα με το δίκτυο. Έτσι επιλέξαμε τελικά το PLL έναντι του ανιχνευτή μηδενικών (Zero Crossings) και της εκτίμησης της εικονικής ροής από την τάση του δικτύου. Αναδειξαμε ότι η πρώτη είχε το μειονέκτημα ότι μετρά εσφαλμένες τιμές της γωνίας στην περίπτωση που η τάση είχε αρμονικές, ενώ η δεύτερη μέθοδος, που είναι και ανοιχτού βρόχου προσφέρει ακρίβεια μέτρησης της γωνίας μόνο εντός ενός τεταρτημορίου.

Το PLL όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3, είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου το οποίο περιλαμβάνει ένα PID ελεγκτή καθώς και ένα πολυμεταβλητό φίλτρο το οποίο έχει την ικανότητα να απομακρύνει τις διαταραχές, είτε αυτές είναι ασυμμετρία, είτε αρμονική παραμόρφωση, είτε μικρή μεταβολή στη συχνότητα του δικτύου.

Οι διαταραχές που θα εξετάσουμε θα είναι :

- i) Ασυμμετρία τάσεων δικτύου (πλάτους και φάσης)
- ii) Ασυμμετρία ρεύματος δικτύου λόγω ασύμμετρης μεταβολής του φορτίου
- iii) Μεταβολή στη συχνότητα του δικτύου (ανάλογα για διασυνδεδεμένο και απομονωμένο σύστημα)
- iv) Συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα στους ζυγούς του δικτύου(τριφασικό, L-G, L-L, L-L-G Faults)

Θα εξετάσουμε συνοπτικά κάθε περίπτωση σφάλματος και θα αποφανθούμε για τη στιβαρότητα του συστήματος BESS σε διαταραχές. Θα θεωρήσουμε δε ότι ασυμμετρία στις τάσεις επηρεάζει αρνητικά μόνο την τεχνική που λαμβάνει ως σήμα αναφοράς την τάση

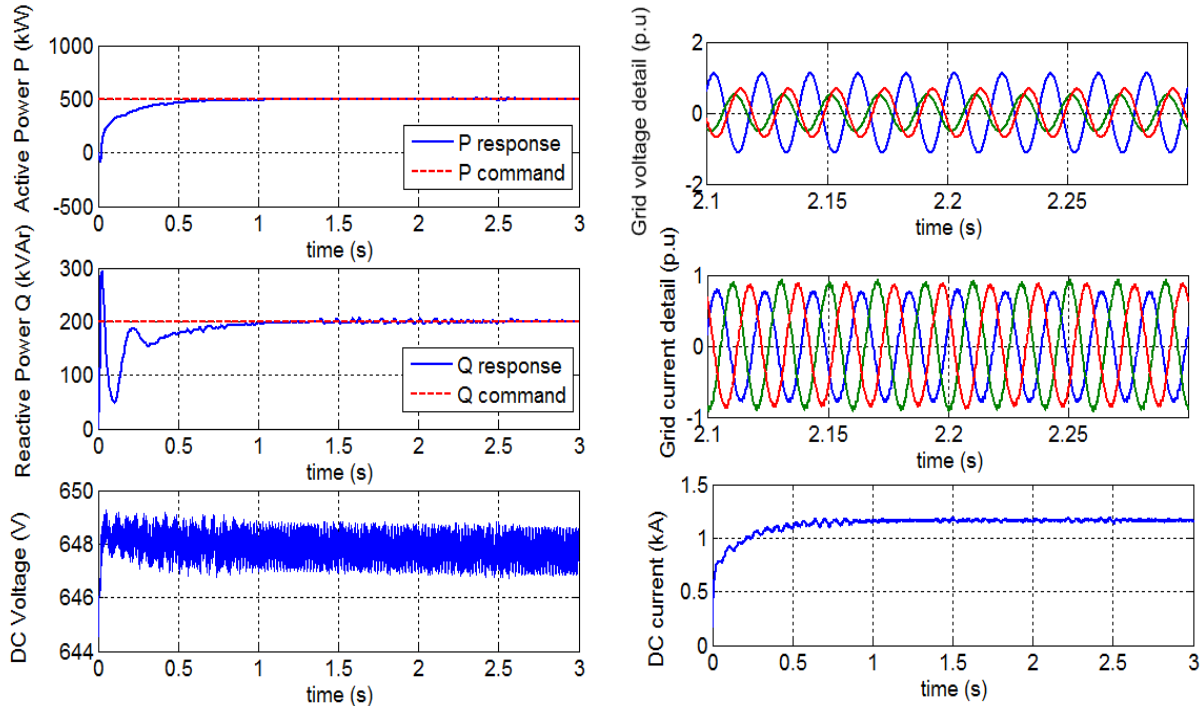
6.4.1 Ασυμμετρία τάσεων δικτύου

Ασυμμετρία τάσεων στο δίκτυο μπορεί να προκληθεί από πολλούς παράγοντες (υψηλές αρμονικές, βυθίσεις, χειρισμοί εγκαταστάσεων, λειτουργία Α/Γ κλπ.). Η ασυμμετρία της τάσης μπορεί να προκύψει τόσο ως προς το πλάτος της τάσης όσο και ως προς τη φάση.

Θεωρούμε την ακόλουθη αρκετά μεγάλη διαταραχή στις φασικές τάσεις του δικτύου χαμηλής τάσης :

$$\begin{aligned}
 v_a &= 200\sqrt{2} \sin(\omega t + 60) \\
 v_b &= 180\sqrt{2} \sin(\omega t - 150) \\
 v_c &= 250\sqrt{2} \sin(\omega t + 170)
 \end{aligned}
 \tag{6.4.1}$$

Λαμβάνουμε τις αποκρίσεις της ενεργού και άεργου ισχύος, της τάσεως και του ρεύματος του δικτύου, καθώς και μετρήσεις από την dc πλευρά των συσσωρευτών και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα στο σχήμα 6.41, χρησιμοποιώντας τη τεχνική που θεωρεί την τάση του δικτύου ως σήμα αναφοράς για το PLL.

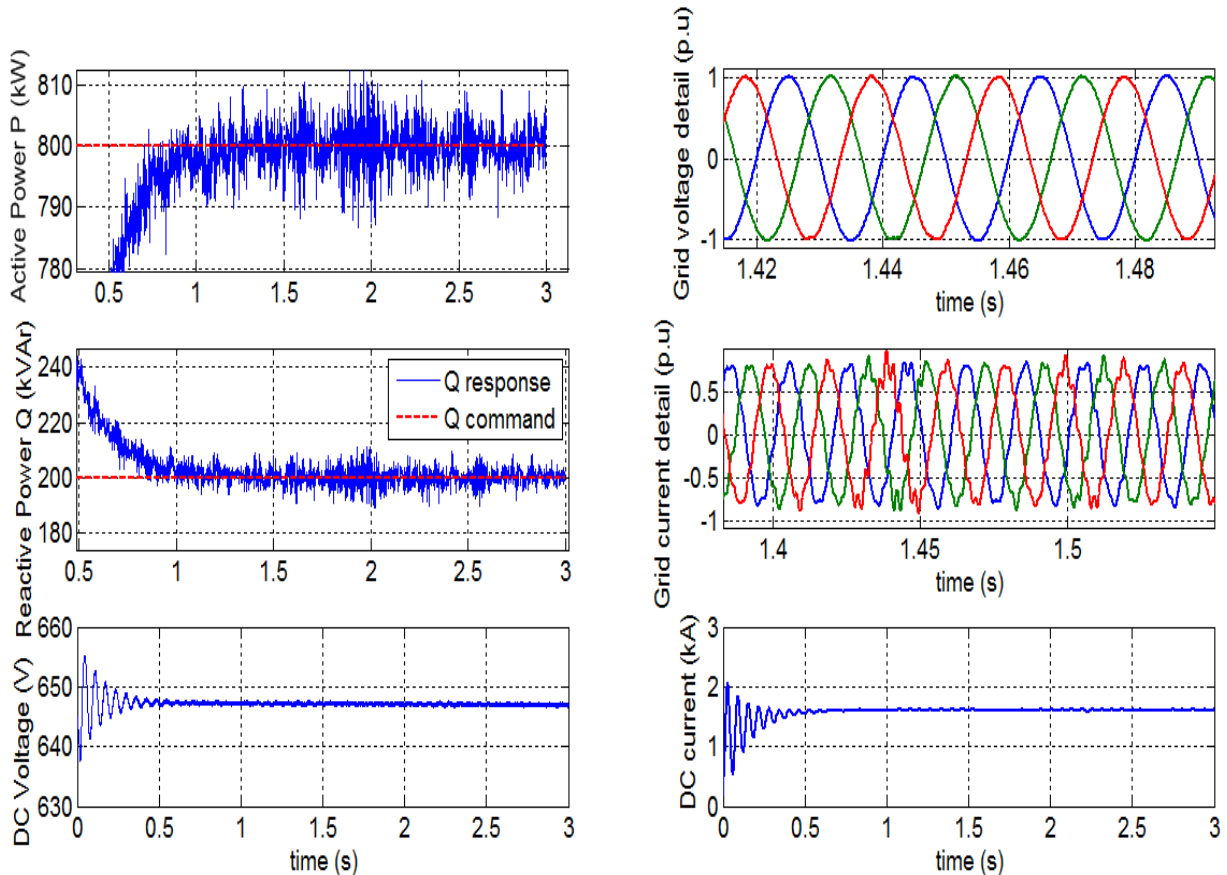


Σχήμα 6.41: Αποτελέσματα προσομοίωσης στην περίπτωση ασυμμετρίας στις τάσεις του δικτύου

Όπως παρατηρούμε από τα αποτελέσματα, το σύστημα ανταποκρίθηκε εξαιρετικά και το μόνο που παρουσιάστηκε ήταν μια μεγάλη υπερπήδηση στην αρχή στην άεργο ισχύ. Παρά την ασυμμετρία στην τάση, το PLL μέσω του φίλτρου βρόχου και του πολυμεταβλητού φίλτρου κατάφερε γρήγορα να υπολογίσει τη γωνία της τάσης και να συγχρονίσει τον αντιστροφέα με το δίκτυο. Το αποτέλεσμα αυτό το αναμέναμε, καθώς την κύρια επίδραση στην εκτίμηση της γωνίας θα έχει η αλλαγή της συχνότητας του δικτύου.

6.4.2 Ασυμμετρία ρευμάτων δικτύου

Ασυμμετρία ρευμάτων μπορεί να δημιουργηθεί από ένα ασύμμετρο ωμικο-επαγωγικό φορτίο το οποίο θα καταναλώνει διαφορετική άεργο ισχύ στην κάθε φάση. Για να δημιουργήσουμε ασυμμετρία στα ρεύματα, μεταβάλαμε τις τιμές της άεργου ισχύος που καταναλώνει η κάθε φάση κατά 5%. Χρησιμοποιούμε την τεχνική που θεωρεί το ρεύμα του δικτύου ως αναφορά για το PLL και λαμβάνουμε τις αποκρίσεις του συστήματος στο σχήμα 6.42



Σχήμα 6.42: Αποτελέσματα προσομοίωσης στην περίπτωση ασυμμετρίας των ρευμάτων του δικτύου

Όπως παρατηρούμε από τα αποτελέσματα, η ασυμμετρία στο ρεύμα έχει επίδραση και στη μεταβατική και στη μόνιμη απόκριση. Από τη λεπτομέρεια των διαγραμμάτων μπορούμε να δούμε πως υπάρχουν αρκετές ταλαντώσεις στην ενεργό και στην άεργο ισχύ, αλλά το σύστημα αποδίδει αρκετά καλά. Επιπλέον θα πρέπει να σημειώσουμε το υψηλό ρεύμα στο dc κατά τη μεταβατική περίοδο, το οποίο όμως βρίσκεται εντός των προδιαγραφών κατασκευής του αντιστροφέα. Στην περίπτωση που αυτό ξεπεράσει τα επιτρεπόμενα όρια τότε θα ενεργοποιηθούν οι κατάλληλες προστασίες που επενεργούν στο διακόπτη αποσύζευξης της εγκατάστασης. Ως συμπέρασμα, παρατηρούμε ότι το PLL λειτουργεί σωστά και μπορεί να υπολογίσει τη γωνία θ με ελάχιστο σφάλμα παρά την ασυμμετρία.

6.4.3 Μεταβολές στη συχνότητα του δικτύου

Στο διασυνδεδεμένο σύστημα, η συχνότητα και η τάση του δικτύου παραμένουν σταθερές αφού μιλάμε για άπειρο ζυγό, διασυνδεδεμένο σε ένα πολύ μεγαλύτερο σύστημα. Ιδιαίτερα η συχνότητα διατηρείται σταθερή μέσω της πρωτεύουσας ρύθμισης

που διαθέτουν οι γεννήτριες των σταθμών παραγωγής. Μια μικρή μεταβολή στη συχνότητα μπορεί να προκύψει όταν δεν εξισορροπείται το ισοζύγιο παραγωγής ζήτησης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P_m - P_e = 2H \cdot \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \quad (6.4.2)$$

όπου H είναι η χρονική σταθερά αδρανείας της γεννήτριας.

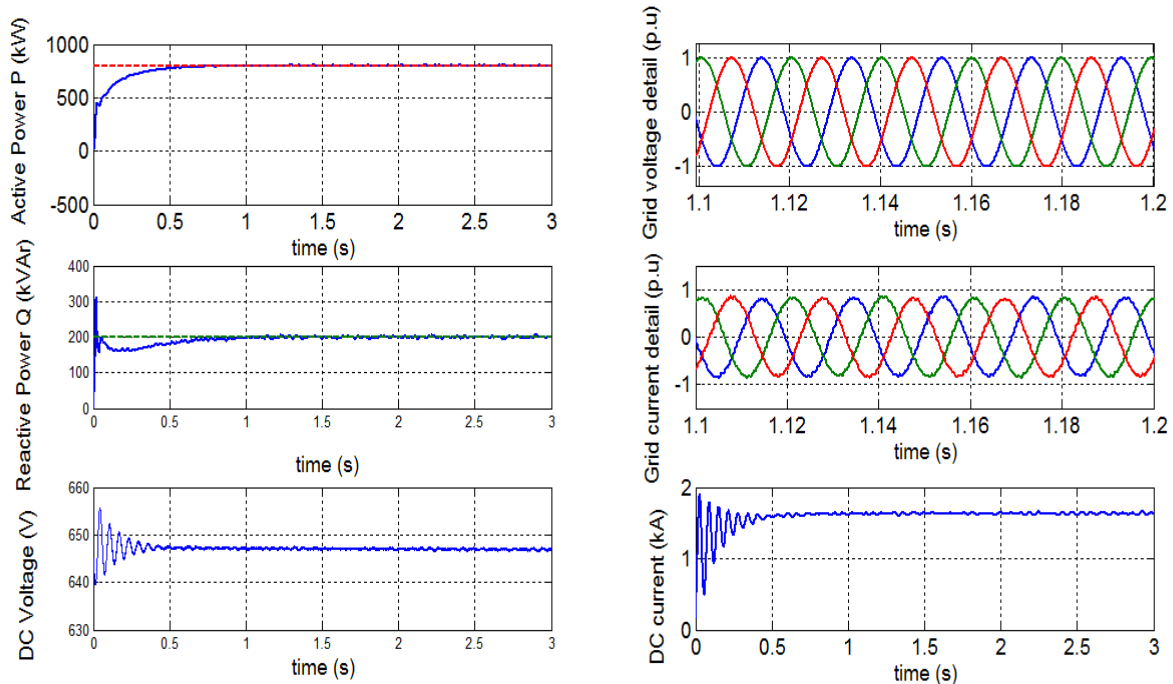
Σύμφωνα με το πρότυπο EN 50160 της CENELEC [1], για το διασυνδεδεμένο σύστημα, για τις μεταβολές της συχνότητας θα ισχύει:

- $50\text{Hz} \pm 1\%$ (49,5...50,5Hz) για το 95% της εβδομάδας
- $50\text{Hz} \pm 4\% / -6\%$ (47...52Hz) για το 100% της εβδομάδας

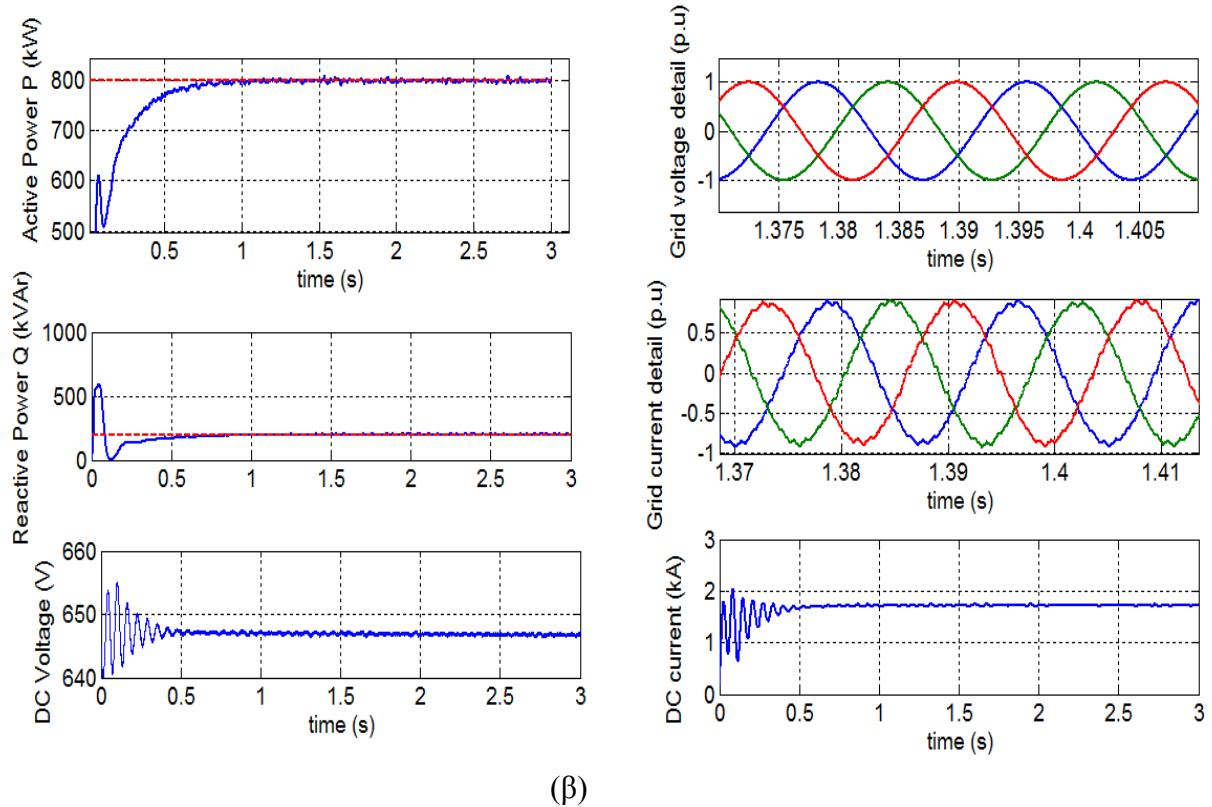
Αντίστοιχα, για το απομονωμένο σύστημα είναι μεγαλύτερες οι μεταβολές της συχνότητας:

- $50\text{Hz} \pm 2\%$ (49...51Hz) για το 95% της εβδομάδας
- $50\text{Hz} \pm 15\%$ (42,5...57,5Hz) για το 100% της εβδομάδας

Είναι σίγουρο ότι οι μεταβολές της συχνότητας θα επηρεάσουν τον τρόπο λειτουργίας του PLL. Εφόσον ως στόχο έχουμε την εγκατάσταση του συστήματος σε νησιωτικό σύστημα θα πρέπει να ικανοποιήσουμε τις πιο απαιτητικές προδιαγραφές. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για συχνότητες λειτουργίας 51Hz και 57,5Hz φαίνονται στο σχήμα 6.43.

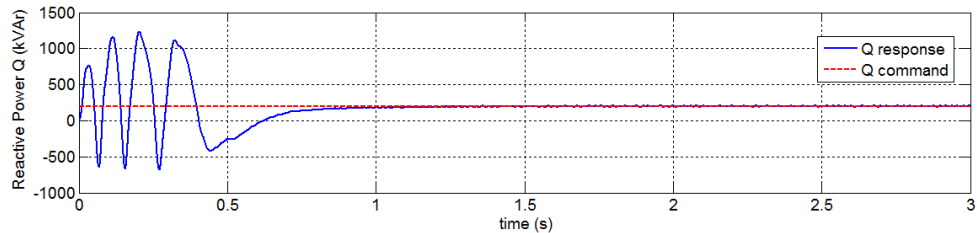
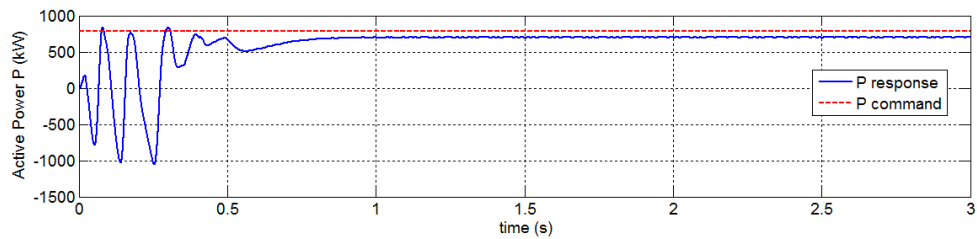


(α)

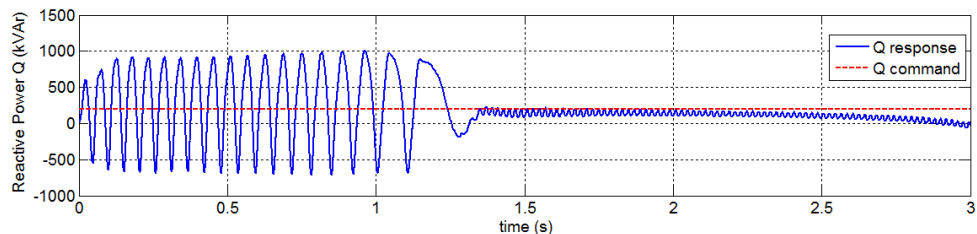
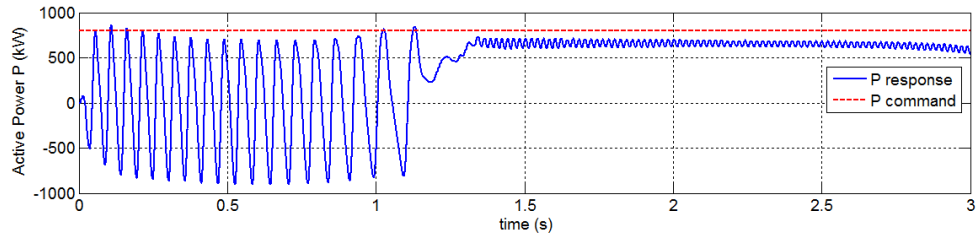


Σχήμα 6.43: Αποτελέσματα προσομοίωσης στην περίπτωση μεταβολής της συχνότητας δικτύου
 (α) Ελάχιστη μεταβολή 2% σύμφωνα με το πρότυπο EN 50160
 (β) Μέγιστη μεταβολή 15% σύμφωνα με το πρότυπο EN 50160

Όπως παρατηρούμε, στην πρώτη περίπτωση το σύστημα αποκρίθηκε εξαιρετικά αφού το PLL διόρθωσε εύκολα τη μικρή μεταβολή της συχνότητας. Στη δεύτερη περίπτωση βέβαια έχουμε μια σοβαρή μεταβολή στη συχνότητα με αποτέλεσμα το PLL να χρειάζεται χρόνο για να διορθώσει το σφάλμα συχνότητας. Μετά την πάροδο ενός δευτερολέπτου, το σύστημα αποκρίνεται εξαιρετικά, με μόνο κόστος την μεγάλη τιμή υπερπήδησης κατά τη μεταβατική περίοδο. Στο σχήμα 6.42 ερευνούμε ποια πρέπει να είναι η μεταβολή στη συχνότητα ώστε το σύστημα να γίνει ασταθές. Τα αποτελέσματά μας αφορούν μεταβολή 30% και 40% αντίστοιχα.



(α)



(β)

Σχήμα 6.44: Αποτελέσματα προσομοίωσης για διερεύνηση ευστάθειας του συστήματος στη μεταβολή της συχνότητας

(α) Αποτελέσματα για μεταβολή 30% της συχνότητας

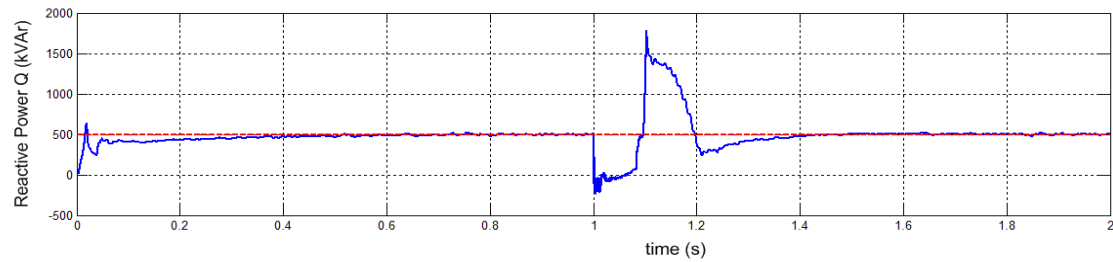
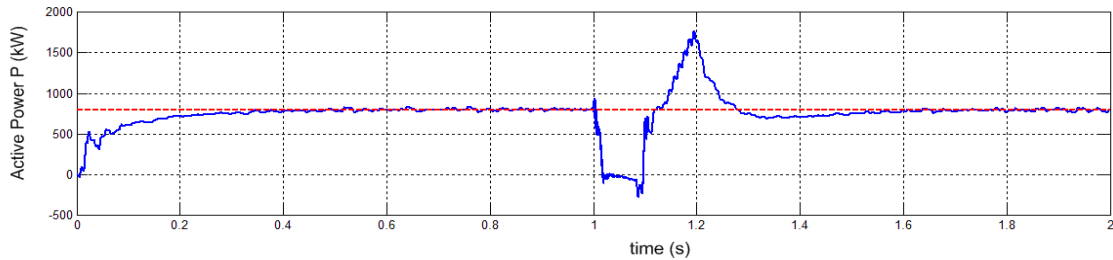
(β) Αποτελέσματα για μεταβολή 40% της συχνότητας

Για μεγάλες μεταβολές τη συχνότητας το σύστημα αρχικά γίνεται ασταθές, όπως ήταν αναμενόμενο, αφού το PLL δεν μπορεί να διορθώσει άμεσα αυτό το μεγάλο σφάλμα. Με την πάροδο του χρόνου διαπιστώνουμε πως αυτή είναι μια αστάθεια συγκεκριμένου αριθμού κύκλων αφού το σύστημα επανέρχεται στην πορεία που χαράσσουν οι εντολές P-Q με κάποιο σφάλμα μόνιμης κατάστασης.

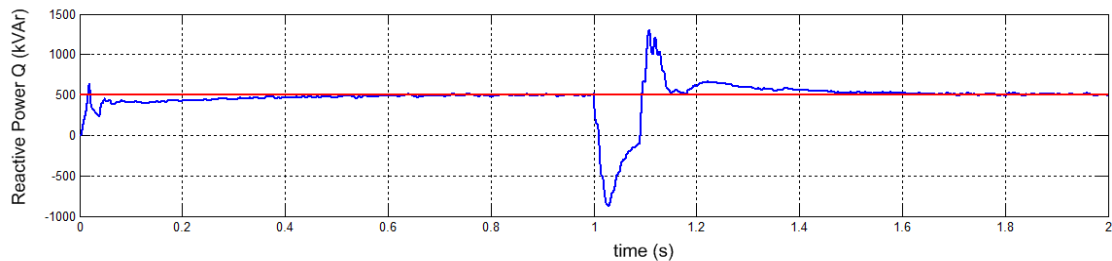
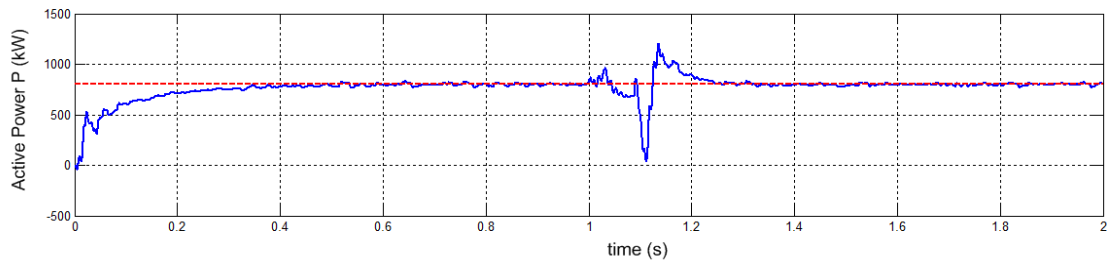
6.4.4 Συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα

Η μεγαλύτερη μεταβολή που μπορεί να συμβεί στα μεγέθη ενός δικτύου προέρχεται από τα συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα, συνήθως λόγω πτώσης γραμμών αλλά και εξωτερικών παραγόντων (φυσικές καταστροφές, κεραυνοί). Συνήθως τα σφάλματα αυτά εκκαθαρίζονται μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα από τις προστασίες του δικτύου. Τα σφάλματα αυτά χωρίζονται σε σφάλματα γης και σφάλματα μεταξύ γραμμών

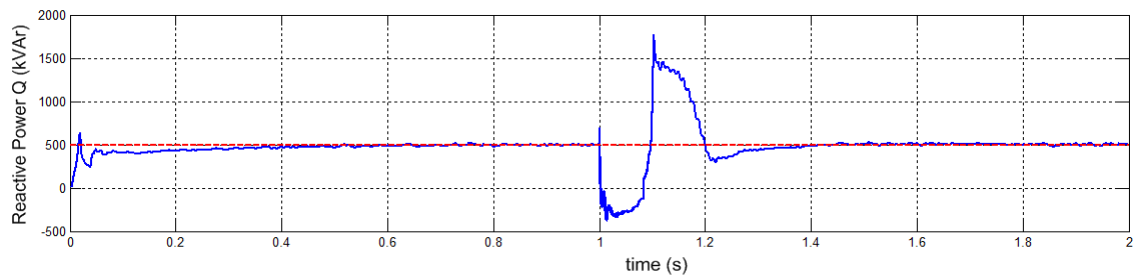
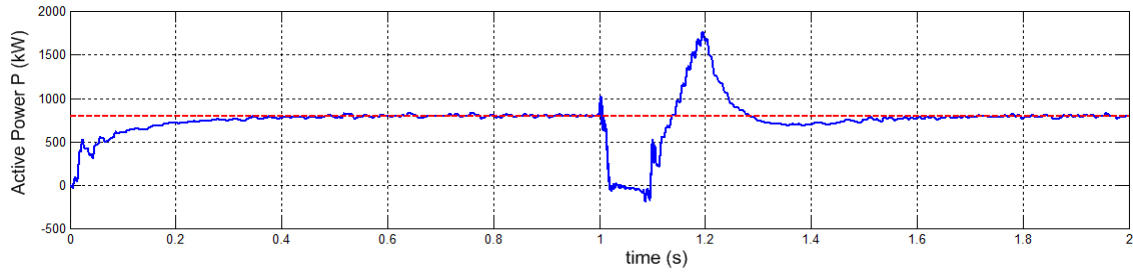
Το σύστημα BESS διαθέτει τις δικές του προστασίες έτσι ώστε αν συμβεί κάποιο τέτοιο σφάλμα, να ενεργοποιηθεί ο διακόπτης απόζευξης της εγκατάστασης. Βέβαια για την ενεργοποίησή του χρειάζεται κάποιος χρόνος. Στις παρακάτω προσομοιώσεις (σχήμα 6.45) εξετάζουμε τις τέσσερις περιπτώσεις σφαλμάτων, για σφάλμα στο ζυγό μέσης τάσης τη χρονική στιγμή 1sec, το οποίο εκκαθαρίζεται μετά από 0.1 sec. Για τα σφάλματα γης θεωρήθηκε αντίσταση σφάλματος ίση με 2 Ω.



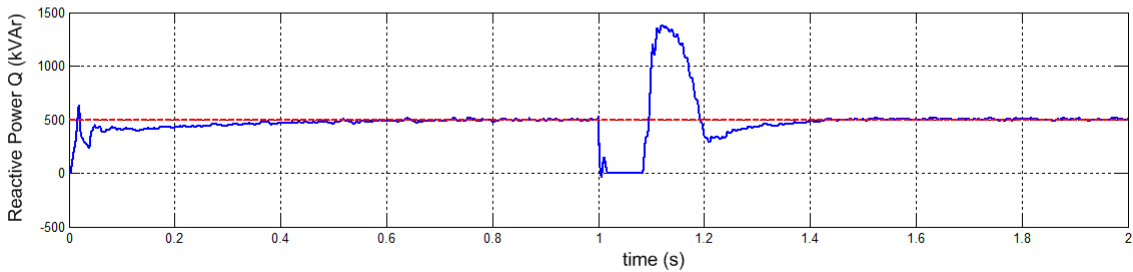
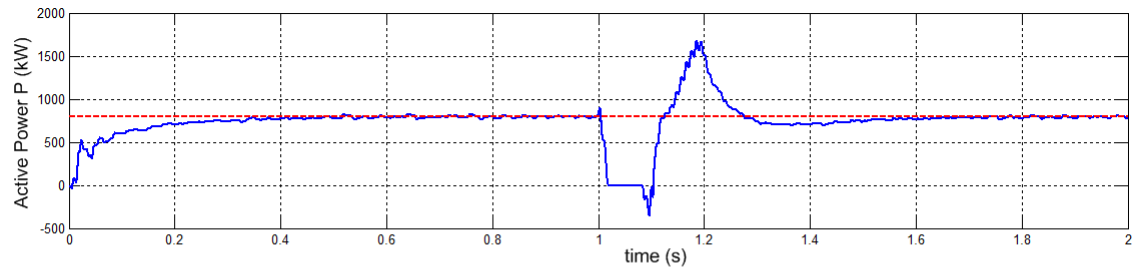
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 6.45: Αποτελέσματα προσομοίωσης για συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα στο ζυγό χαμηλής τάσης από την χρονική στιγμή 1sec έως 1.1sec

(α) Αποτελέσματα για σφάλμα μεταξύ φάσεων L-L

(β) Αποτελέσματα για σφάλμα φάσης προς γη L-G ($Z_f=2\Omega$)

(γ) Αποτελέσματα για σφάλμα μεταξύ φάσεων προς γη L-L-G ($Z_f=2\Omega$)

(δ) Τριφασικό σφάλμα προς γη ($Z_f=2\Omega$)

Στα παραπάνω αποτελέσματα μπορούμε να διακρίνουμε τις διαταραχές που συνέβησαν μέχρι να επενεργήσει η προστασία του δικτύου στο διακόπτη αποσύζευξης.

6.5 Βιβλιογραφία - Αναφορές έκτου Κεφαλαίου

- [1] European Norm EN 50160, “*Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*”.CENELEC, 1999.
- [2] IEEE 1459 «*Standard definition for the measurement of active and reactive power power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced grid*», 2000
- [3] *MathWorks* - MATLAB and Simulink for Technical Computing, διαθέσιμο www.mathworks.com
- [4] Hadi Saadat, «*Power System Analysis*» & «*Introduction to MATLAB/Simulink*»,Mc Graw Hill, International Edition, 2004
- [5] Duane C. Hanselman, Bruce L. Littlefield,«*Mastering Matlab 7*», Prentice Hall, 2004

Κεφάλαιο 7

Σύνοψη και Συμπεράσματα

7.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε η μελέτη, υλοποίηση και διαχείριση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές (Battery Energy Storage System –BESS), με απώτερο στόχο τη χρησιμοποίηση του σε αυτόνομα νησιωτικά συστήματα. Η ανάπτυξη αυτού του συστήματος προέκυψε από την ανάγκη κάλυψης ενός συνεχώς αυξανόμενου και απρόβλεπτου φορτίου, που περιλαμβάνει απότομες αιχμές. Στο ισοζύγιο ισχύος συμμετέχει και η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ, ειδικά στα νησιά, με αποτέλεσμα το ΣΗΕ να είναι ευάλωτο σε διαταραχές που προκαλούν διάφορα προβλήματα λειτουργίας.

Μια πιθανή μέθοδος για έλεγχο του φορτίου είναι η αποθήκευση ενέργειας όταν υπάρχει μικρή ζήτηση και η έγχυση της αποθηκευμένης ενέργειας πίσω στο δίκτυο κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται από ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές (BESS) το οποίο, λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα από SCADA σε καίριες θέσεις του δικτύου αλλά και μετρώντας το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών, θα παρέχει γρήγορο έλεγχο ενεργού και άεργου ισχύος, από και προς το σύστημα, βελτιώνοντας τη λειτουργικότητα, τον έλεγχο, την αξιοπιστία, τη διαχείριση ενέργειας και την ποιότητα ισχύος.

Το σύστημα αυτό είναι ένα δυναμικό σύστημα, αφού ο αμφίπλευρος αντιστροφάας με IGBT επιτρέπει τη λειτουργία 4 τεταρτημορίων με αποτέλεσμα τη γρήγορη μεταβολή ενεργού και άεργου ισχύος, τόσο ως προς το μέτρο όσο και ως προς την κατεύθυνση, αλλά και την ενίσχυση της ευστάθειας ως προς την τάση εφόσον αυτή ελέγχεται από την άεργο ισχύ. Επιπλέον η γρήγορη απόκριση των ηλεκτρονικών συστημάτων και των μικροεπεξεργαστών που αποτελούν την καρδιά του BESS, προσφέρει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών πέρα από τη ρύθμιση φορτίου, όπως προστασία καταναλωτών σε περίπτωση βλάβης του δικτύου, ενίσχυση στρεφόμενης εφεδρείας, διόρθωση συντελεστή ισχύος, ενίσχυση ευστάθειας τάσης και συχνότητας και αδιάλειπτη τροφοδοσία ισχύος.

Στην εργασία αυτή, παρουσιάστηκε και αναλύθηκε ενδελεχώς μια νέα τοπολογία ενός τέτοιου συστήματος. Στο κύκλωμα ισχύος, εφαρμόστηκε έλεγχος P-Q στον τριφασικό αντιστροφάα ο οποίος πραγματοποιήθηκε υλοποιώντας δύο ξεχωριστές τεχνικές ελέγχου. Στην πρώτη μέθοδο, το σήμα αναφοράς ήταν η τάση του δικτύου, ενώ στη δεύτερη το ρεύμα.

Για το συγχρονισμό του αντιστροφέα με το δίκτυο μελετήθηκαν τρεις διαφορετικοί τρόποι εκτίμησης της γωνίας της φάσης είτε της τάσης είτε του ρεύματος του δικτύου. Πρώτα εξετάστηκε η μέθοδος της εικονικής ροής της τάσης η οποία όμως δεν έδωσε ακριβή αποτελέσματα αφού έδινε εκτίμηση της γωνίας με ακρίβεια μόνο ενός τεταρτημορίου. Έπειτα εξετάστηκε η ανίχνευση μηδενικών η οποία αποδείχθηκε ότι δίνει λάθος μετρήσεις όταν η τάση του δικτύου περιέχει αρμονικές. Τελικά επιλέχθηκε το PLL το οποίο δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα στην εκτίμηση της γωνίας εφόσον είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου που ενσωματώνει πολυμεταβλητό φίλτρο και PID ελεγκτή.

Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές τεχνικές ελέγχου του τριφασικού αντιστροφέα (SPWM, SVPWM, HBCC) που ανταποκρίνονται στις δύο μεθόδους ελέγχου του BESS και παρουσιάστηκαν αποτελέσματα που αφορούν στην απόκριση της ενεργού και άεργου ισχύος, του ρεύματος και της τάσης, των στοιχείων των συσσωρευτών, ενώ πραγματοποιήθηκε και φασματική ανάλυση των κυματομορφών. Παράλληλα έγινε αξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος σε περιπτώσεις ασυμμετρίας τάσης, ρεύματος και μεταβολής συχνότητας. Κρίθηκε δε απαραίτητη η εκτίμηση των επιπέδων φόρτισης των συσσωρευτών (SOC levels), πληροφορία που διαβιβάζεται στο κέντρο ελέγχου. Αυτό γιατί αναπτύχθηκε τεχνική παράκαμψης της εντολής ενεργού και άεργου ισχύος έτσι ώστε να ικανοποιηθούν τα όρια φόρτισης.

Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου παρουσιάζει ενδιαφέρον στη φιλοσοφία και στη μέθοδο υλοποίησης, αφού είναι δομημένο ιεραρχικά με μορφή ‘master-slave’ και βασίζεται στη χρήση ψηφιακών επεξεργαστών σήματος. Αποτελείται από δύο κύρια υποσυστήματα: το ‘Σύστημα ελέγχου εστιασμένο στο δίκτυο’ ή ‘Network dedicated control system’ και το ‘Σύστημα ελέγχου και προστασίας εστιασμένο στο BESS’ ή ‘BESS dedicated control and protection system’. Τα δύο αυτά υποσυστήματα επικοινωνούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας δεδομένα μέσω των υπολογιστών ξενιστών των δύο μικροεπεξεργαστών και έχουν σχέση ‘αφεντικού-δούλου’ με το δεύτερο να είναι υψηλότερο στην ιεραρχία.

Το σύστημα προσομοιώθηκε στο MATLAB/SIMULINK για κάθε τεχνική στις περιπτώσεις φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών, καθώς και στην περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος, προκειμένου το σύστημα να ικανοποιήσει τα όρια φόρτισης.

Στη συνέχεια θα συνοψίσουμε τα κυριότερα σημεία μελέτης σε κάθε κεφάλαιο.

7.2 Σύνοψη κυριότερων σημείων μελέτης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε η μελέτη, υλοποίηση και διαχείριση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές. Εναλλακτικά το σύστημα ονομάζεται ‘Battery Energy Storage System’ ή BESS.

Αρχικά παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στα ΣΗΕ, ενώ δόθηκε έμφαση στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές. Αξιολογήθηκαν μηχανικά και

ηλεκτρικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως: στρεφόμενες μάζες, υπερπυκνωτές, υπεραγωγία πηνία, αντλησιοταμίευση, συστήματα συμπίεσης αέρα και η τεχνολογία υδρογόνου. Αναφορικά με τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές, αξιολογήθηκε: η τεχνολογία μολύβδου – οξέος, η τεχνολογία νικελίου καδμίου, η τεχνολογία θειούχου νατρίου, η τεχνολογία ιόντων λιθίου, και η τεχνολογία συσσωρευτών ροής. Αφού συνοψίστηκαν οι εφαρμογές στους στα ΣΗΕ, δόθηκε συγκριτικός πίνακας των χαρακτηριστικών και της επίδοσης τους. Παράλληλα παρουσιάστηκε ένα γενικό δομικό διάγραμμα για το σύστημα BESS, του οποίου τα υποσυστήματα μελετήθηκαν και μοντελοποιήθηκαν στη συνέχεια. Τα υποσυστήματά αυτά είναι : οι συστοιχίες των συσσωρευτών, ο αντιστροφέας ισχύος, τα φίλτρα εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα, το κύκλωμα ελέγχου, το PLL, το δίκτυο και τα μετρητικά ή τηλεμετρικά συστήματα.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η διαχείριση ισχύος και ο προγραμματισμός του συστήματος BESS. Αρχικά παρουσιάστηκαν οι τεχνικές προϋποθέσεις σύνδεσης της εγκατάστασης του συστήματος BESS στο δίκτυο μέσης τάσης. Οι προϋποθέσεις αυτές βασίζονται στο πρότυπο EN 50160 της CENELEC και στις οδηγίες της ΔΕΗ και περιλαμβάνουν όρια για τις αργές και τις γρήγορες μεταβολές της τάσης, τις τιμές Flicker χειρισμών και κανονικής λειτουργίας καθώς και όρια για τις εκπομπές αρμονικών. Αφού μελετήθηκαν οι προϋποθέσεις σύνδεσης, αναλύεται η πολιτική λειτουργίας του συστήματος BESS και καθορίζεται η στρατηγική φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών. Η στρατηγική αυτή επιτυγχάνει βέλτιστη οικονομική λειτουργία αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα εξομάλυνσης του φορτίου και αποκοπής των αιχμών, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές ισχύος από άλλες συνιστώσες του δικτύου όπως ΑΠΕ και σταθμοί diesel. Έπειτα παρουσιάστηκε με διανυσματικά διαγράμματα η ροή της ενεργού και άεργου ισχύος στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) που γίνονται όλες οι μετρήσεις ενεργού και άεργου ισχύος. Επιπλέον εξετάστηκε η λειτουργία του βρόχου κλειδωμένης φάσης (PLL) που είναι υπεύθυνος για το συγχρονισμό του αντιστροφέα με το δίκτυο. Το σύστημα αυτό είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου το οποίο περιέχει ελεγκτή PID και πολυμεταβλητό φίλτρο. Με την ευκαιρία αυτή δόθηκαν και εκφράσεις των μετασχηματισμών Clarke και Park. Στο τέλος του συγκεκριμένου κεφαλαίου έγινε μια σύντομη ανασκόπηση στα συστήματα SCADA/RTU αλλά και στην τεχνολογία ευρυζωνικής μετάδοσης πληροφορίας μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ισχύος (BPL), στοιχεία που εφαρμόστηκαν στο συγκεκριμένο σύστημα.

Στη συνέχεια, το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου του BESS αναλύθηκε ενδελεχώς και οι διαφορετικές τεχνικές ελέγχου μοντελοποιήθηκαν με τρόπο μεθοδολογικό. Ο κοινός άξονας των προτεινόμενων τεχνικών είναι ο έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος που πραγματοποιείται με τη σύγκριση των μετρούμενων τιμών ισχύος με εντολές που δίνονται από το κέντρο ελέγχου για την παραγωγή ρευμάτων αναφοράς ευθέως και εγκάρσιου άξονα. Αυτός είναι ο εξωτερικός βρόχος ελέγχου που είναι κοινός για όλες τις τεχνικές. Τα ρεύματα αυτά θα χρειαστεί να περάσουν από ένα εσωτερικό βρόχο ελέγχου ώστε να συγκριθούν με πραγματικές τιμές ρευμάτων αφού όμως πρώτα

έχουν μετασηματιστεί κατάλληλα σε πλαίσιο αναφοράς το οποίο θα είναι συγχρονισμένο με το δίκτυο.

Ο τρόπος συγχρονισμού διαφέρει ανάλογα με την κάθε τεχνική. Στην πρώτη τεχνική διανυσματικού ελέγχου που εξετάζεται, το σήμα συγχρονισμού προέρχεται από την τάση του δικτύου οπότε ο εσωτερικός βρόχος ρευμάτων θα δώσει μια τάση αναφοράς V_{ref} που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή των παλμών του αντιστροφέα μέσω της τεχνικής SPWM ή SV-PWM. Στη δεύτερη τεχνική διανυσματικού ελέγχου, το σήμα συγχρονισμού προέρχεται από το ρεύμα του δικτύου οπότε τα συγχρονισμένα με το ρεύμα του δικτύου πλέον ρεύματα αναφοράς θα συγκριθούν μέσω της τεχνικής του βρόχου υστερήσεως με τα ρεύματα από την έξοδο του αντιστροφέα πριν το φίλτρο και θα παράγουν κατάλληλη ακολουθία παλμών. Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία θα συγκριθούν στη συνέχεια.

Ένα άλλο σημαντικό σημείο είναι το σύστημα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για το συγχρονισμό του αντιστροφέα με το δίκτυο αφού η εκτίμηση της γωνίας και η παραγωγή κατάλληλων σημάτων ημιτόνου και συνημίτονου είναι καίριας σημασίας για τη σωστή λειτουργία κάθε τεχνικής. Για το σκοπό αυτό αξιολογήθηκαν τρία διαφορετικά συστήματα από τα οποία το καλύτερο ήταν το PLL το οποίο τελικά χρησιμοποιήθηκε. Ένα από τα συστήματα που απορρίφθηκαν ήταν η τεχνική της εικονικής ροής από την τάση του δικτύου και ο προσδιορισμός της γωνίας μέσω του τόξου εφαπτομένης του λόγου των ροών εγκάρσιου και ευθέως άξονα. Με αυτόν τον τρόπο όμως, η ακρίβεια μέτρησης της γωνίας είναι πολύ μικρή αφού έχει ένα εύρος ενός τεταρτημορίου. Ο άλλος τρόπος είναι η ανίχνευση μηδενικών του σήματος εισόδου. Αυτός ο τρόπος εκτίμησης της γωνίας του δικτύου αποδίδει σωστά μόνο αν το σήμα εισόδου δεν περιέχει αρμονικές, αλλιώς η μέτρηση μπορεί να είναι λάθος. Αυτά τα σοβαρά μειονεκτήματα μας οδήγησαν στην χρήση του PLL το οποίο μπορεί να αντιμετωπίσει ασυμμετρίες του δικτύου και μεταβολές στη συχνότητα. Έτσι αμέσως μετά υπολογίστηκαν οι παράμετροι του PLL για την καλύτερη απόδοση.

Παράλληλα, για την υλοποίηση των τεχνικών αυτών προτάθηκε ένα σύστημα ελέγχου το οποίο περιλαμβάνει δύο μικροεπεξεργαστές DSP σε δομή master-slave οι οποίοι επικοινωνούν μέσω υπολογιστών ξενιστών διαμέσου παράλληλης θύρας SCI. Καθένα από αυτά τα συστήματα έχει τις δικές του υπορουτίνες και το δικό του αλγόριθμο ελέγχου. Το ένα σύστημα έχει την ονομασία 'BESS dedicated control and protection system' και έχει ως βασικό σκοπό την εφαρμογή της εκάστοτε τεχνικής ελέγχου για την παραγωγή των παλμών του αντιστροφέα. Παράλληλα το σύστημα ελέγχει αν ικανοποιούνται τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών και ενεργοποιεί ανάλογα διαφορετικούς αλγόριθμους ελέγχου, ενώ περιλαμβάνει και τις διατάξεις προστασίας των συσσωρευτών. Το άλλο σύστημα έχει την ονομασία Network dedicated control system' και είναι υπεύθυνο για την υλοποίηση του εξωτερικού βρόχου ελέγχου ισχύος και για τη διαβίβαση των ορίων φόρτισης στο 'BESS dedicated control and protection system'. Για τα συστήματα αυτά προτείνονται και υλοποιήσεις σε επίπεδο hardware.

Ένα σημαντικό τμήμα του ελέγχου που υλοποιήθηκε είναι και η περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος για την ικανοποίηση των ορίων φόρτισης των

συσσωρευτών. Πολλές φορές είναι απαραίτητο το σύστημα να διατηρήσει τα όρια φόρτισης είτε γιατί η εκφόρτιση πρόκειται να γίνει σε μια μελλοντική χρονική στιγμή όπου η αιχμή του φορτίου είναι μεγαλύτερη, είτε γιατί το σύστημα προτιμά να φορτιστεί σε μια επόμενη χρονικά στιγμή όπου η ενέργεια που θα αποθηκευτεί θα είναι φθηνότερη. Έτσι μπορεί να ενεργοποιηθεί ή όχι μια επίτρεψη η οποία διαβιβάζει τον έλεγχο για την παραγωγή του ρεύματος αναφοράς ευθέως άξονα στην ικανοποίηση των ορίων φόρτισης.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η λειτουργία του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης αμφίπλευρης λειτουργίας. Η ανάλυση ξεκίνησε από τον αντιστροφέα ημιγέφυρας με τετραγωνικό παλμό και προχώρησε στη διερεύνηση των κυριότερων τεχνικών διαμόρφωσης του εύρους των παλμών. Αυτές ήταν η ημιτονοειδής διαμόρφωση του εύρους παλμών (SPMW), η διαμόρφωση του εύρους παλμών με διανύσματα κατάστασης (SV-PWM) και η διαμόρφωση για τον έλεγχο ρεύματος σε ζώνη υστέρησης (HBCC). Επιπλέον εξετάστηκαν και οι συνδεσμολογίες των φίλτρων εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα (τύπου LC και LCL).

Στη συνέχεια το ολοκληρωμένο σύστημα BESS μοντελοποιήθηκε και προσομοιώθηκε στο MATLAB/SIMULINK για κάθε τεχνική έλεγχου ενεργού και άεργου ισχύος. Οι προσομοιώσεις αφορούσαν αρχικά την απόκριση του συστήματος για μεταβολές του φορτίου στην περίπτωση συμμετρικού δικτύου. Έγιναν μια σειρά από αρκετές προσομοιώσεις για τις φάσεις φόρτισης και εκφόρτισης, αλλά και για την περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος, προκειμένου να ικανοποιηθούν τα όρια φόρτισής τους. Χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω κυριότερες τεχνικές διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (SPWM, SV-PWM, HBCC). Σε δεύτερη φάση, έγιναν προσομοιώσεις για την περίπτωση ασυμμετρίας και διαταραχών στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, θεωρήσαμε τις διαταραχές: ασυμμετρία στην τάση (φάση και πλάτος), ασυμμετρία στο ρεύμα, μεταβολή της συχνότητας f του δικτύου και τριφασικά ή ασύμμετρα σφάλματα. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση των παραπάνω τεχνικών ήταν εξαιρετικά ενθαρρυντικά, εφόσον το η απόκριση του συστήματος ήταν πολύ καλή και σε μερικές περιπτώσεις εξαιρετική. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται στην επόμενη παράγραφο.

7.3 Σύγκριση και συγκέντρωση αποτελεσμάτων

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει η συγκέντρωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη διαδικασία της μελέτης του συστήματος BESS και από τις διάφορες προσομοιώσεις. Στο τέλος κάθε παραγράφου θα παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες.

7.3.1 Σύνοψη και σύγκριση χαρακτηριστικών των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας

Η πρώτη σύγκριση αφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στα ΣΗΕ. Αξιολογήθηκαν μηχανικά

και ηλεκτρικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως: στρεφόμενες μάζες, υπερπυκνωτές, υπεραγωγία πηνία, αντλησιοταμίευση, συστήματα συμπίεσης αέρα και η τεχνολογία υδρογόνου. Αναφορικά με τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές, αξιολογήθηκε: η τεχνολογία μολύβδου – οξέος, η τεχνολογία νικελίου καδμίου, η τεχνολογία θειούχου νατρίου, η τεχνολογία ιόντων λιθίου, και η τεχνολογία συσσωρευτών ροής. Στο συγκριτικό πίνακα 7-1 που ακολουθεί, οι τεχνολογίες των συσσωρευτών αξιολογούνται με βάση τα παρακάτω κριτήρια επίδοσης: απόδοση (η%), κόστος (€/kWh), διάρκεια ζωής σε κύκλους, βάθος εκφόρτισης, θερμοκρασία λειτουργίας, πυκνότητα ενέργειας και ποσοστό αυτοεκφόρτισης.

Πίνακας 7-1: Σύνοψη των τεχνολογιών και των χαρακτηριστικών των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (BESS)

Τύπος Μπαταρίας	Μεγαλύτερη χωρητικότητα (Εμπορική μονάδα)	Περιοχή & εφαρμογή	απόδοση η(%)	Κόστος €/kWh	Διάρκεια ζωής (κύκλους)	Βάθος εκφόρτισης (%)	Θερμοκρασία λειτουργίας	Ειδική Ενέργεια (wh/kg)	Αυτό-εκφόρτιση (%)/μήνα	Σχόλια
Μολύβδου οξέος (flooded type)	10MW/40MWh	California-Chino /Εξομάλυνση φορτίου	72-78	50-150	1000-1200	70	(-5 με 40)	25	2 με 5	συνεχής συντήρηση για πλήρωση νερού, μεγάλο βάρος, τοξικός ηλεκτρολύτης
Μολύβδου οξέος (ρυθμιζόμενη από βαλβίδα)	300kW/580kWh	Turn Key System/Εξομάλυνση φορτίου	72-78	50-150	200-300	80	(-5 με 40)	30-50	2 με 5	λιγότερο σπιβαρή, αμελητέα συντήρηση, πιο φορητή, ασφαλής
Νικελίου Καδμίου (NiCd)	27MW/6.75MWh	GVEA Alaska Control power supply/Αντιστάθμιση ισχύος	72-78	200-600	3000	100	(-40 με 50)	45-80	5 με 20	μεγάλος ρυθμός αυτό-εκφόρτισης, τα κύτταρα NiCd είναι δηλητηριώδη και βαριά
Θειούχου Νατρίου (NaS)	9.6MW/64MWh	Tokyo Japan/Εξομάλυνση φορτίου	89	200-300	2500	100	325	100	ΟΧΙ	καθόλου αυτό-εκφόρτιση, χρειάζεται εξωτερική πηγή θερμότητας, για 30s 6 φορές μεγαλύτερη ισχύ
Ιόντων Λιθίου (Li-ion)	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ	100	700-100	3000	80	(-30 με 60)	90-190	1	μεγάλο κόστος εξαιτίας ειδικού πακεταρίσματος και εσωτερικής προστασίας από υπέρταση
ροής VRB	1.5MW/1.5MWh	Japan Voltage Sag/Αποκοπή φορτίου αιχμής	85	360-1000	10000	75	0-40	30-50	ΟΧΙ	αμελητέα αυτό-εκφόρτιση
ροής ZnBr	1MW/4MWh	Kyushuu EPC	75	360-1000	10000	70	0-40	70	ΟΧΙ	αμελητέα αυτό-εκφόρτιση, μικρή ισχύς, ογκώδης, επικίνδυνα υλικά
Μεταλλου αέρα (Metal air)	μικρή		50	50-200	100	50	(-20 με 40)	450-650	ΟΧΙ	αμελητέα αυτό-εκφόρτιση, η επαναφόρτιση είναι πολύ δύσκολη και όχι αποδοτική, συμπαγής

Στον πίνακα 7-2 συνοψίζονται οι εφαρμογές και τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα των αποθηκευτικών διατάξεων ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα αξιολογείται και η ικανότητα τους σε εφαρμογές ενέργειας και ισχύος.

Πίνακας 7-2: Σύνοψη εφαρμογών και πλεονεκτημάτων – μειονεκτημάτων αποθηκευτικών διατάξεων ηλεκτρικής ενέργειας

Αποθηκευτική Διάταξη	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Εφαρμογές Ισχύος	Εφαρμογές Ενέργειας	Συνήθης Εφαρμογή
Μπαταρίες ροής (flow): PSB, VRB, ZnBr	Υψηλή χωρητικότητα, ανεξάρτητη εκτίμηση ισχύος και ενέργειας	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	++	+++	Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών
Μολύβδου οξέος (ρυθμιζόμενη από βαλβίδα)	Χαμηλό αρχικό κόστος	Περιορισμένος κύκλος ζωής σε βαθιά εκφόρτιση	+++	-	Εξομάλυνση αιχμών
Νικελίου Καδμίου (NiCd)	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, απόδοση	επικίνδυνα υλικά	+++	++	Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών-λεπτών
Θειούχου Νατρίου (NaS)	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, υψηλή απόδοση	Κόστος παραγωγής, χρήση εξωτερικής πηγής θερμότητας, μέτρα ασφαλείας (λόγω σχεδιασμού)	+++	+++	Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών-λεπτών
Ιόντων λιθίου (Li-ion)	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, υψηλή απόδοση	Υψηλό κόστος παραγωγής (λόγω σχεδιασμού), απαιτεί ειδικό κύκλωμα φόρτισης	+++	-	Κινητή τηλεφωνία, Υποσταθμοί ενέργειας
Σφόνδυλοι (flywheels)	Υψηλή Ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	+++	-	Εξομάλυνση ισχύος για λίγα λεπτά
SMES (Υπεραγωγίμη μαγνητική αποθήκευση)	Υψηλή Ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας, υψηλό κόστος παραγωγής	+++	--	Εφαρμογές ποιότητας ισχύος, διανομή
E.C Capacitors (Υπερπυκνωτές)	Μεγάλος κύκλος ζωής, υψηλή απόδοση	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	+++	++	Εφαρμογές ποιότητας ισχύος, διανομή
Αντλησιοταμίευση	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία	--	+++	Εξομάλυνση ζήτησης σε μεγάλο χρονικό διάστημα
Ενεργειακή Αποθήκευση Συμπιεσμένου Αέρα	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία για τις χρησιμοποιούμενες κοιλότητες	--	+++	Εξομάλυνση ζήτησης σε μεγάλο χρονικό διάστημα

7.3.2 Σύνοψη της στρατηγικής φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών

Στο κεφάλαιο 3 καθορίστηκε η πολιτική φόρτισης / εκφόρτισης του συστήματος BESS για βέλτιστη οικονομική λειτουργία. Το σύστημα περιλαμβάνει τις εξής φάσεις λειτουργίας:

- **Φάση εκφόρτισης:** Το σύστημα βρίσκεται εντός των περιορισμών φόρτισης των συσσωρευτών (SOC_levels) και αποδίδει ενεργό ισχύ στο δίκτυο.

- **Φάση φόρτισης:** Το σύστημα βρίσκεται εντός των περιορισμών φόρτισης των συσσωρευτών (SOC_levels) και απορροφά ενεργό ισχύ από το δίκτυο.

- **Φάση παράκαμψης εντολής ενεργού ισχύος:** Το σύστημα παρακάμπτει την εντολή ενεργού ισχύος για να ικανοποιήσει τα όρια φόρτισης. Αυτή η φάση λειτουργίας έχει προγραμματιστεί για να επιτρέψει την απαιτούμενη προγνωστικότητα του ελέγχου. Αν και ο διαχειριστής ζητά ενεργό ισχύ, το σύστημα ελέγχου του BESS προτιμά να μην τη τροφοδοτήσει αλλά να διατηρήσει το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών του έτσι ώστε να τροφοδοτήσει την αμέσως επόμενη και μεγαλύτερη αιχμή φορτίου που προβλέπεται.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του αλγορίθμου φόρτισης /εκφόρτισης συνοψίζονται στον πίνακα 7-3

Πίνακας 7-3: Σύνοψη στρατηγικής φόρτισης / εκφόρτισης του συστήματος BESS

Πολιτική φόρτισης και εκφόρτισης συστήματος BESS		
Φάση φόρτισης	Φάση εκφόρτισης	Φάση παράκαμψης εντολής ενεργού ισχύος
Οι συσσωρευτές φορτίζονται όταν υπάρχει χαμηλή ζήτηση ενέργειας από το φορτίο	Οι συσσωρευτές εκφορτίζονται όταν υπάρχει υψηλή ζήτηση ενέργειας από το φορτίο ώστε να αποφευχθεί ένταξη επιπλέον μονάδας diesel	Οι εντολές φόρτισης - εκφόρτισης παρακάμπτονται ώστε να ικανοποιηθούν τα όρια φόρτισης των συσσωρευτών
Η φόρτιση γίνεται κατά προτίμηση όταν η ενέργεια έχει χαμηλή τιμή χρέωσης και προσφέρεται από τους συμβατικούς σταθμούς κατά τη χαμηλή περίοδο ζήτησης	Η εκφόρτιση γίνεται κατά τη διάρκεια των αιχμών του φορτίου, έχοντας ως στόχο την εξομάλυνση της καμπύλης φορτίου και τη μείωση των αιχμών	Η εντολή εκφόρτισης παρακάμπτεται όταν αναμένεται στο άμεσο μέλλον μεγαλύτερη αιχμή της καμπύλης φορτίου άρα βελτιστοποίηση του οικονομικού και λειτουργικού οφέλους
Η φόρτιση γίνεται πάντα όταν δε χρειάζεται δέσμευση επιπλέον μονάδας diesel ,ενώ αξιοποιείται και η περίσσεια αιολικής και φ/β παραγωγής	Η βέλτιστη οικονομική λειτουργία κατά την εκφόρτιση επιτυγχάνεται από τη διαφορά της ακριβής καταναλισκόμενης ενέργειας από τη φθηνή αποθηκευμένη	Η εντολή φόρτισης παρακάμπτεται όταν είναι επιθυμητό οι συσσωρευτές να φορτιστούν κάποια άλλη χρονική στιγμή αξιοποιώντας είτε τη φθηνή ενέργεια είτε την περίσσεια της αιολικής και φ/β παραγωγής

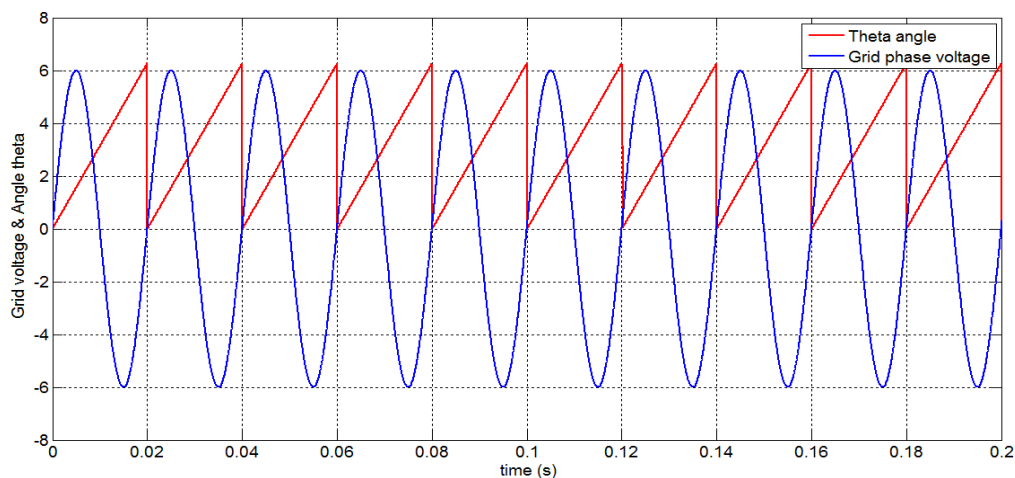
7.3.3 Σύνοψη των μεθόδων συγχρονισμού του αντιστροφέα του συστήματος BESS με το δίκτυο

Ένα άλλο σημαντικό σημείο είναι το σύστημα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για το συγχρονισμό του αντιστροφέα με το δίκτυο, αφού η εκτίμηση της γωνίας και η παραγωγή κατάλληλων σημάτων ημιτόνου και συνημίτονου είναι καίριας σημασίας για τη σωστή λειτουργία κάθε τεχνικής. Για το σκοπό αυτό συγκρίνονται και αξιολογούνται τρία διαφορετικά συστήματα από τα οποία προέκυψε ότι το καλύτερο ήταν το PLL, το οποίο τελικά χρησιμοποιήθηκε. Τα συστήματα αυτά ήταν :

- **Εκτιμητής ροής δικτύου:** Το σύστημα αυτό (σχήμα 4.4) λαμβάνει την τάση του δικτύου ως είσοδο και την ολοκληρώνει παράγοντας έτσι μια εικονική ροή. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η γωνία θ μέσω του τόξου εφαπτομένης του λόγου των ροών εγκάρσιου και ευθέως άξονα. Με αυτόν τον τρόπο όμως, η ακρίβεια μέτρησης της γωνίας είναι πολύ μικρή αφού έχει ένα εύρος ενός τεταρτημορίου, δηλαδή 90° . Επιπλέον η ρύθμιση των PI ελεγκτών στη συνέχεια είναι αρκετά δύσκολη

- **Ανίχνευση μηδενικών (Zero Crossings Detection):** Ο άλλος τρόπος είναι η ανίχνευση της φάσης του δικτύου από τα σημεία μηδενισμού της τάσης ή του ρεύματος εισόδου. Το σχήμα του ‘zero-crossing detection’ είναι ανοικτού βρόχου και παίρνει ως είσοδο τη μία φάση της τάσης. Αρχικά εντοπίζονται τα σημεία μηδενισμού υπό θετική κλίση. Ο μετρητής χρόνου μηδενίζεται κάθε φορά που εμφανίζεται ένα τέτοιο σημείο. Η μέτρηση που προκύπτει από το μετρητή πριν το μηδενισμό του, ‘κρατιέται’ μέχρι να εμφανιστεί η επόμενη μέτρηση. Αυτός ο τρόπος εκτίμησης της γωνίας του δικτύου αποδίδει σωστά μόνο αν το σήμα εισόδου δεν περιέχει αρμονικές, αλλιώς η μέτρηση μπορεί να είναι λάθος. Αυτά τα σοβαρά μειονεκτήματα μας οδήγησαν στην χρήση του PLL το οποίο αντιμετωπίζει ασυμμετρίες του δικτύου και μεταβολές στη συχνότητα.

- **Βρόχος κλειδωμένης φάσης (PLL):** Είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου που περιλαμβάνει φίλτρο βρόχου με ελεγκτή PID και πολυμεταβλητό φίλτρο. Η περιγραφή και ο υπολογισμός των παραμέτρων του PLL έγιναν στις παραγράφους 3.5 και 4.6. Το PLL χρησιμοποιείται ώστε να συγχρονίσει τη γωνία ρεύματος του αντιστροφέα θ_{inv} , με τη γωνία του δικτύου θ_{grid} ώστε να επιτύχει συντελεστή ισχύος κοντά στη μονάδα. Η γωνία θ_{inv} χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το ρεύμα αναφοράς το οποίο συγκρίνεται με το πραγματικό ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα. Η λειτουργία του είναι εξαιρετική για το σύστημα μας, εφόσον οι αναδράσεις και τα φίλτρα που περιέχει μπορούν να απομακρύνουν τυχόν διαταραχές ή περιπτώσεις ασυμμετρίας από το σήμα. Στο σχήμα 7.1 φαίνεται η λειτουργία του PLL και ο τρόπος που συγχρονίζεται τελικά το ρεύμα με την τάση.



Σχήμα 7.1: Εκτίμηση της γωνίας θ από την τάση του δικτύου μέσω του PLL για το συγχρονισμό του δικτύου και του αντιστροφέα

Στον πίνακα 7-4 δίνονται συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά των τριών μεθόδων εκτίμησης της φάσης του δικτύου, καθώς και τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματά τους.

Πίνακας 7-4: Χαρακτηριστικά μεθόδων εκτίμησης της φάσης της τάσης ή του ρεύματος δικτύου

Διάταξη μέτρησης γωνίας χαρακτηριστικά	Εκτιμητής εικονικής ροής δικτύου Ψx,Ψy	Ανίχνευση Μηδενικών σήματος (Zero Crossings detection)	Βρόχος κλειδωμένης φάσης (PLL)
Μορφή συστήματος ελέγχου	Ανοιχτού βρόχου	Ανοιχτού βρόχου	Κλειστού Βρόχου, Κυκλώματα ανάδρασης
Υλοποίηση	Ολοκληρωτής τάσης	Μετρητής χρόνου, Καταχωρητής	Φίλτρο Βρόχου PID, Πολυμεταβλητό φίλτρο, Ταλαντωτής ελέγχου τάσεως
Ευκολία ρύθμισης παραμέτρων συστήματος BESS	Μικρή	Μέτρια	Μεγάλη
Ακρίβεια μέτρησης της φάσης του σήματος	Πολύ μικρή, Εύρος εκτίμησης 90°	Καλή, μόνο αν το σήμα δεν περιέχει αρμονικές, αλλιώς πιθανότητα λάθους	Εξαιρετική
Συμπεριφορά σε διαταραχές	Μικρή ευαισθησία	Μεγάλη ευαισθησία	Μικρή ευαισθησία
Πολυπλοκότητα	Ασήμαντη	Μέτρια	Μεγάλη
Αξιολόγηση (1-5)	1	3	5

7.3.4 Σύνοψη και σύγκριση αποτελεσμάτων των τεχνικών ελέγχου του συστήματος BESS.

Στο κεφάλαιο 5 το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου εξετάστηκε ενδελεχώς και οι προτεινόμενες τεχνικές ελέγχου μοντελοποιήθηκαν με τρόπο μεθοδολογικό. Στο κεφάλαιο 6 έγιναν μια σειρά από προσομοιώσεις αυτών των τεχνικών στο MATLAB /SIMULINK για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας. Τότε είχε δοθεί λεπτομερής σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Στην παράγραφο αυτή θα γίνει η σύγκριση των τεχνικών ελέγχου σε επίπεδο απόδοσης και χαρακτηριστικών.

7.3.4.1 Διανυσματικός έλεγχος P- Q με σήμα αναφοράς V_{ref} για το συγχρονισμό του αντιστροφέα με το δίκτυο

Ο κοινός άξονας των προτεινόμενων τεχνικών είναι ο έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος που πραγματοποιείται με τη σύγκριση των μετρούμενων τιμών ισχύος με εντολές που δίνονται από το κέντρο ελέγχου για την παραγωγή ρευμάτων αναφοράς ευθέως και εγκάρσιου άξονα. Αυτός είναι ο εξωτερικός βρόχος ελέγχου που είναι κοινός για όλες τις τεχνικές. Τα ρεύματα αυτά θα χρειαστεί να περάσουν από ένα εσωτερικό βρόχο ελέγχου ώστε να συγκριθούν με πραγματικές τιμές ρευμάτων αφού όμως πρώτα έχουν μετασχηματιστεί κατάλληλα σε πλαίσιο αναφοράς το οποίο θα είναι συγχρονισμένο με το δίκτυο.

Σύμφωνα με αυτήν την τεχνική διανυσματικού ελέγχου P-Q, το σήμα συγχρονισμού προέρχεται από την τάση του δικτύου και δίνεται ως είσοδος στο PLL, οποίο θα εκτιμήσει τη γωνία της τάσης αναφοράς ώστε να παράγει τα φιλτραρισμένα ημίτονα για το μετασχηματισμό από abc→dq των ρευμάτων του δικτύου. Στη συνέχεια, τα ρεύματα αυτά συγκρίνονται με τα ρεύματα αναφοράς μέσω του εσωτερικού βρόχου ελέγχου PI για την παραγωγή τάσεων αναφοράς στον ευθύ και στον εγκάρσιο άξονα. Στη συνέχεια γίνεται μετασχηματισμός σε πλαίσιο abc συγχρονισμένο με τη γωνία που έχει υπολογίσει το PLL. Η τριφασική τάση αναφοράς V_{ref} που προκύπτει, θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή των παλμών του αντιστροφέα μέσω της τεχνικής SPWM ή SV-PWM.

Από τις προσομοιώσεις που έγιναν, παρατηρήθηκε αρχικά η απόκριση στις εντολές ενεργού και άεργου ισχύος του κέντρου ελέγχου. Διαπιστώθηκε πως η απόδοση της τεχνικής ήταν πολύ καλή αφού:

- Η απόκριση παρουσίαζε ελάχιστες ταλαντώσεις στη μόνιμο κατάσταση και πολύ μικρή υπερύψωση. Συγκεκριμένα ο χρόνος ανόδου και καθόδου εκτιμήθηκε στα 0,7sec
- Η ποιότητα του ρεύματος και της τάσης του δικτύου παραμένει μέσα στα επιτρεπτά όρια που καθορίζει το πρότυπο 519 της IEEE, αφού για το ρεύμα προέκυψε ότι το THD ήταν περίπου 3% και για την τάση σχεδόν μηδενικό. Το πλεονέκτημα χρησιμοποίησης αυτής της τεχνικής είναι ότι λόγω της SPWM οι αρμονικές εμφανίζονται μόνο στις υψηλές συχνότητες και συγκεκριμένα είναι τάξης $F_{nc} \pm 2$ και $2F_{nc} \pm 1$. Ανάμεσα στις τάξεις αυτές υπάρχει ασήμαντο αρμονικό περιεχόμενο.
- Η τάση V_{ref} προέρχεται από δύο πολύ σταθερούς βρόχους ελέγχου, έναν εξωτερικό βρόχο ελέγχου ισχύος και έναν εσωτερικό βρόχο ελέγχου ρευμάτων.
- Η διακοπτική συχνότητα PWM για τις τεχνικές SPWM και SVPWM είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του φορέα ενώ το πλάτος της εξόδου ελέγχεται από το V_{ref} το οποίο έχει προέλθει μετά από τον ακριβή συγχρονισμό της τάσης του δικτύου με τον αντιστροφέα.
- Το PLL θα μπορεί να υπολογίσει καλύτερα τη γωνία με βάση την τάση του δικτύου ως αναφορά σε σχέση με το ρεύμα γιατί η τάση συνήθως περιέχει λιγότερες αρμονικές.

- Από την πλευρά των συσσωρευτών, η dc τάση και το dc ρεύμα λαμβάνουν την τιμή της μόνιμης κατάστασης σε πολύ μικρό χρόνο και με μικρές ταλαντώσεις μέσα στα επιτρεπτά όρια.
- Αν χρησιμοποιηθεί ο έλεγχος SVPWM έναντι του SPWM, τότε η τάση εξόδου έχει ακόμη καλύτερη ποιότητα ισχύος αναφορικά με την αρμονική παραμόρφωση. Μάλιστα ο έλεγχος SVPWM χρησιμοποιεί πιο αποδοτικά την τάση τροφοδοσίας. Αυτό γιατί ισχύει ότι η dc τάση χρησιμοποιείται $2/\sqrt{3}$ φορές περισσότερο σε σχέση με την τεχνική SPWM.
- Στη μεταβατική κατάσταση όταν υπάρχει ασυμμετρία στην τάση, η απόκριση παραμένει πολύ καλή, ενώ μόνο αν υπάρξουν μεταβολές στη συχνότητα μεγαλύτερες του 20% εμφανίζεται αστάθεια.

7.3.4.2 Έλεγχος P-Q με σήμα αναφοράς I_{ref} για το συγχρονισμό του αντιστροφέα με το δίκτυο

Στη δεύτερη τεχνική διανυσματικού ελέγχου, είσοδοι θεωρούνται τα ρεύματα ευθέως και εγκάρσιου άξονα τα οποία έχουν προέλθει είτε από τον έλεγχο P – Q είτε από τον έλεγχο των ορίων φόρτισης. Επιπλέον είσοδοι είναι το ρεύμα του δικτύου όπως έχει μετρηθεί στο PCC και το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα πριν το φίλτρο εξόδου. Το PLL σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνει ως είσοδο αναφοράς το ρεύμα του δικτύου από το οποίο υπολογίζει τη γωνία θ , δηλαδή τη γωνία της φάσης και τη διοχετεύει στο μετασχηματισμό $dq \rightarrow abc$. Ο μετασχηματισμός αυτός μεταφέρει το ρεύμα του δικτύου σε τριφασικό πλαίσιο abc συγχρονισμένο με τη γωνία που έχει υπολογίσει το PLL. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση του ρεύματος αυτού με το ρεύμα από την έξοδο του αντιστροφέα. Το σφάλμα στη συνέχεια περνά μέσα από βρόχο υστέρησης, του οποίου η έξοδος θα δώσει τους παλμούς έναυσης των IGBTs.

Αυτός ο τρόπος ελέγχου παρουσιάζει επίσης υψηλή απόδοση αφού:

- Παρουσιάζει πολύ γρήγορη απόκριση στις εντολές ενεργού και άεργου ισχύος διότι έχει μικρή πολυπλοκότητα. Σε σύγκριση με την άλλη τεχνική, ο εσωτερικός βρόχος ελέγχου των ρευμάτων έχει αντικατασταθεί με τον έλεγχο ρευμάτων μέσω βρόχου υστέρησης. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποδείχθηκε ότι η αποκρίσεις ισχύος λαμβάνουν την τιμή μόνιμης κατάστασης σε λιγότερο από 0.5 sec.
 - Η ποιότητα του ρεύματος και της τάσης του δικτύου παραμένει μέσα στα επιτρεπτά όρια που καθορίζει το πρότυπο 519 της IEEE, αφού για το ρεύμα προέκυψε ότι το THD ήταν περίπου 2% και για την τάση σχεδόν μηδενικό.
 - Εκτός από την εξαιρετική δυναμική συμπεριφορά, η μέθοδος αυτή είναι εύκολο να υλοποιηθεί και έχει μικρό κόστος.
- Απ' την άλλη πλευρά βέβαια, αυτή η τεχνική ελέγχου παρουσιάζει βασικά μειονεκτήματα.
- Μεγάλη κυμάτωση του ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση

- Η διακοπτική συχνότητα δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται στα διάφορα τμήματα της κυματομορφής αναφοράς σε κάθε περίοδο. Έτσι σε κάποιο τμήμα της κυματομορφής αναφοράς η διακοπτική συχνότητα μπορεί να γίνει ιδιαίτερα υψηλή (Σχήμα 6.34). Η μέγιστη διακοπτική συχνότητα εξαρτάται από τις παραμέτρους λειτουργίας του μετατροπέα και αποδεικνύεται ότι ισούται με $V_{dc} / 4hL_f$, όπου h είναι το εύρος της ζώνης υστέρησης. Δηλαδή όπως ήταν το αναμενόμενο, η διακοπτική συχνότητα αυξάνεται όταν μειώνεται η ζώνη υστέρησης.

- Δεν υπάρχει επικοινωνία των ελεγκτών υστέρησης μεταξύ των τριών φάσεων και έτσι δεν υφίσταται στρατηγική για την παραγωγή μηδενικών διανυσμάτων. Ως αποτέλεσμα το σήμα μπορεί να φύγει εκτός της ζώνης υστέρησης

- Το φάσμα της κυματομορφής, εκτός από συχνότητες πολλαπλάσιες των 50 Hz, περιέχει και ενδιάμεσες αρμονικές ('interharmonics') αλλά και αρμονικές στη περιοχή από 0 έως 50 Hz ('subharmonics').

- Στην περίπτωση ασυμμετρίας ρεύματος, αποδείχθηκε ότι τα μεταβατικά φαινόμενα και οι ταλαντώσεις είναι μεγαλύτερες σε σχέση με πριν.

7.3.4.3 Περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος

Ένα σημαντικό τμήμα του ελέγχου που υλοποιήθηκε είναι και η περίπτωση παράκαμψης της εντολής ενεργού ισχύος για την ικανοποίηση των ορίων φόρτισης των συσσωρευτών. Πολλές φορές είναι απαραίτητο το σύστημα να διατηρήσει τα όρια φόρτισης είτε γιατί η εκφόρτιση πρόκειται να γίνει σε μια μελλοντική χρονική στιγμή όπου η αιχμή του φορτίου είναι μεγαλύτερη, είτε γιατί το σύστημα προτιμά να φορτιστεί σε μια επόμενη χρονικά στιγμή όπου η ενέργεια που θα αποθηκευτεί θα είναι φθηνότερη. Έτσι μπορεί να ενεργοποιηθεί ή όχι μια επίτρεψη η οποία διαβιβάζει τον έλεγχο για την παραγωγή του ρεύματος αναφοράς ευθέως άξονα στην ικανοποίηση των ορίων φόρτισης. Η τεχνική αυτή επιδρά μόνο στον εξωτερικό βρόχο ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος και αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα των άλλων δύο τεχνικών.

Ο συγκεντρωτικός πίνακας 7-5 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων τεχνικών ελέγχου του BESS.

Πίνακας 7-5: Συγκεντρωτική κατάσταση των κυριότερων χαρακτηριστικών των εξεταζόμενων τεχνικών ελέγχου του συστήματος BESS

Τεχνική ελέγχου Ιδιότητα	Έλεγχος P-Q με σήμα αναφοράς την τάση του δικτύου V_{ref} για συγχρονισμό με τον τριφασικό αντιστροφέα	Έλεγχος P-Q με σήμα αναφοράς το ρεύμα του δικτύου I_{ref} για συγχρονισμό με τον τριφασικό αντιστροφέα
Μορφή συστήματος ελέγχου	Κλειστού βρόχου	Κλειστού βρόχου
Βρόχοι ελέγχου	1. Εξωτερικός βρόχος ελέγχου ισχύος 2. Εσωτερικός βρόχος ελέγχου ρεύματος	1. Εξωτερικός βρόχος ελέγχου ισχύος 2. Εσωτερικός βρόχος ζώνης υστέρησης
Τρόπος ελέγχου αντιστροφέα	SPWM , SV-PWM	Έλεγχος ρεύματος με ζώνη υστέρησης HBCC
Χρησιμοποίηση συστήματος PLL για συγχρονισμό	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Ταχύτητα απόκρισης στις εντολές ενεργού και άεργου ισχύος	Πολύ καλή	Εξαιρετική
Ενσωμάτωση λειτουργίας παράκαμψης εντολής ενεργού ισχύος	ΝΑΙ, στον εξωτερικό βρόχο ελέγχου με τη μορφή επίτρεψης	ΝΑΙ, στον εξωτερικό βρόχο ελέγχου με τη μορφή επίτρεψης
Ακρίβεια απόκρισης και υπερύψωση για συμμετρικό δίκτυο	Πολύ καλή / Μικρή	Εξαιρετική / Μικρή
Ακρίβεια απόκρισης και υπερύψωση για ασύμμετρο δίκτυο	Πολύ καλή / Μέτρια Δυσκολία όταν υπάρχει σφάλμα τάσης	Μέτρια / Μέτρια Δυσκολία όταν υπάρχει σφάλμα ρεύματος

Ποιότητα ρεύματος εξόδου (THD %)	Πολύ καλή (THD = 3%)	Πολύ καλή (THD = 2%)
Κατανομή φάσματος αρμονικών	Διακριτό φάσμα. Αρμονικές υπάρχουν μόνο στις υψηλές συχνότητες και συγκεκριμένα για SPWM θα είναι τάξης $F_{nc} \pm 2$	Συνεχές. Το φάσμα της κυματομορφής, εκτός από συχνότητες πολλαπλάσιες των 50 Hz, περιέχει και ενδιάμεσες αρμονικές αλλά και αρμονικές στη περιοχή από 0 έως 50 Hz
Διακοπτική συχνότητα	Σταθερή και ίση με τη συχνότητα του φορέα. Όταν αυτή είναι πολύ μεγάλη μπορεί να προκληθούν προβλήματα EMI	Μεταβαλλόμενη και εξαρτώμενη από την τάση στην dc πλευρά. Κίνδυνος εξόδου από τη ζώνη υστέρησης λόγω τυχαίας παραγωγής μηδενικών διανυσμάτων
Ικανότητα εκμετάλλευσης της dc τάσης των συσσωρευτών	Με την SPWM η μέγιστη ικανότητα είναι 1/2 της Vdc Με την SVPWM η μέγιστη ικανότητα είναι $1/\sqrt{3}$ της Vdc	Ανάλογα με το εύρος της ζώνης υστέρησης
Ευαισθησία στις μεταβολές της συχνότητας	Ικανοποιητικά αποτελέσματα για τα όρια μεταβολής που θέτονται από το πρότυπο EN50160 της CENELEC για τα αυτόνομα συστήματα	Ικανοποιητικά αποτελέσματα για τα όρια μεταβολής που θέτονται από το πρότυπο EN50160 της CENELEC για τα αυτόνομα συστήματα
Μέθοδος υλοποίησης	Με δύο DSP σε διάταξη master - slave	Με δύο DSP σε διάταξη master - slave
Υπολογιστική πολυπλοκότητα	Μέτρια	Μικρή
Αξιολόγηση (1-5)	5	3,5

7.4 Μελλοντική ενασχόληση

Αυτή η διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο τη σχεδίαση, μελέτη, υλοποίηση και διαχείριση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές. Στα πλαίσια της εργασίας εξετάστηκαν τόσο διαφορετικές τεχνικές ελέγχου όσο και διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης του εύρους των παλμών του αντιστροφέα. Επιπλέον οι αποκρίσεις του συστήματος εξετάστηκαν για όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση. Έτσι θεωρούμε ότι το θέμα καλύφθηκε από όλες τις πλευρές.

Βέβαια υπάρχουν σημεία τα οποία μπορούν να διερευνηθούν περισσότερο, τόσο σε επίπεδο διπλωματικής εργασίας, όσο και διδακτορικού. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι :

- Χρησιμοποίηση αντιστροφέα τοπολογίας πολλαπλών επιπέδων ή διαδοχικούς αντιστροφεείς σε μορφή cascade.
- Εξέταση χρήσης τεχνικής ελέγχου τύπου predictive control για την πρόβλεψη των λειτουργικών καταστάσεων του συστήματος
- Εξέταση ορίων ρύθμισης άεργου ισχύος.
- Έλεγχος THD της τάσης όταν υπάρχουν συνθήκες μεγάλης παραμόρφωσης στο φορτίο.
- Εξέταση χρήσης ελεγκτή ασαφούς λογικής για την επεξεργασία των σημάτων ενεργού και άεργου ισχύος.



