



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

**Μελέτη προσομοίωσης «Power Hardware In The Loop» και
διερεύνηση ανύψωσης της τάσης εξαιτίας της διείσδυσης
φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κλεφτάκης Α. Βασίλειος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



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

**Μελέτη προσομοίωσης «Power Hardware In The Loop» και
διερεύνηση ανύψωσης της τάσης εξαιτίας της διείδυσης
φωτοβολταϊκών στη Χαμηλή Τάση**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κλεφτάκης Α. Βασίλειος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη 10^η Οκτωβρίου 2011

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

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

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

.....
Κλεφτάκης Α. Βασίλειος

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

Copyright © Κλεφτάκης Α. Βασίλειος, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται και υλοποιείται ένα πείραμα προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο με το εργαστηριακό μικροδίκτυο, και συγκεκριμένα με τον αντιστροφέα φωτοβολταϊκών, σε ρόλο δοκιμίου. Αυτό το είδος πειράματος ονομάζεται Power Hardware In Loop (PHIL). Αρχικά περιγράφονται συνοπτικά οι συσκευές του μικροδικτύου, ο εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS), ο οποίος θα προσομοιώσει το ηλεκτρικό δίκτυο στο οποίο θα «συνδεθεί» το δοκίμιο μας καθώς και ο «ενδιάμεσος» (Interface) που θα επιτελέσει στη σύνδεση των δυο προηγούμενων στοιχείων.

Παρουσιάζονται συνοπτικά οι δυο τεχνικές Hardware in Loop (HIL) με ιδιαίτερη έμφαση στην PHIL και εξετάζονται ζητήματα που αφορούν στην ευστάθεια και στην ακρίβεια. Παρουσιάζεται το κριτήριο ευστάθειας Nyquist πάνω στο οποίο στηρίζεται η μελέτη της ευστάθειας καθώς και τα δυο είδη σφαλμάτων που εμφανίζονται σε μια προσομοίωση PHIL, το σφάλμα TFP (Transfer Function Perturbation) και το σφάλμα NP (Noise Perturbation). Έπειτα, αναφέρονται οι διάφορες τοπολογίες σύνδεσης του «ενδιάμεσου» (Interface) (με τις οποίες μπορούμε να συνδέσουμε τα στοιχεία του πειράματος με στόχο την αντιμετώπιση των ζητημάτων ευστάθειας και ακρίβειας. Αναλύουμε τη λειτουργία του ενισχυτή AC/DC/AC ο οποίος θα παίζει το ρόλο του Interface στο πείραμα μας

Σε ότι αφορά το πειραματικό κομμάτι της εργασίας εφαρμόζουμε αρχικά την τεχνική PHIL στο κύκλωμα του διαιρέτη τάσης. Παρουσιάζουμε την τοπολογία και μοντελοποιούμε κατά το δυνατόν καλύτερα το σύστημα μας. Μέσω μετρήσεων βρίσκουμε τη συνολική χρονική καθυστέρηση του βρόχου και μοντελοποιούμε το Interface ως έναν ενισχυτή τάσης με μοναδιαίο κέρδος και λαμβάνοντας υπόψη το φίλτρο εξόδου του. Με χρήση του Matlab εφαρμόζουμε το κριτήριο ευστάθειας Nyquist καθώς επίσης και την απαραίτητη μελέτη ακρίβειας, και παραθέτουμε τα αποτελέσματα. Έπειτα ακολουθούν οι offline προσομοιώσεις που έγιναν στο Simulink καθώς επίσης και τα πειραματικά αποτελέσματα της PHIL εφαρμογής. Τέλος, μελετάμε στο Simulink την περίπτωση όπου ένα ασταθές κύκλωμα διαιρέτη τάσης, σε μια εφαρμογή PHIL, μετατρέπεται σε ευσταθές μέσω της χρήσης ενός φίλτρου ανατροφοδότησης στο ρεύμα.

Στο τελευταίο κομμάτι της εργασίας εφαρμόζεται η τεχνική PHIL σε ένα δίκτυο αγροτικής περιοχής Χαμηλής Τάσης στο οποίο λειτουργούν φωτοβολταϊκές μονάδες και λαμβάνονται αποτελέσματα για το επίπεδο της τάσης στους διάφορους κόμβους. Περιγράφεται το υπό μελέτη δίκτυο αγροτικής περιοχής και υλοποιούνται κάποια σενάρια παραγωγής-κατανάλωσης με χρήση της τεχνικής PHIL. Έπειτα με χρήση του Simulink παρουσιάζεται η ανύψωση τάσης που εμφανίζεται στους κόμβους του δικτύου για διάφορα σενάρια παραγωγής – κατανάλωσης (offline προσομοίωση). Τέλος εφαρμόζονται δυο τρόποι αντιμετώπισης της ανύψωσης τάσης με τη βοήθεια του αντιστροφέα φωτοβολταϊκών, η μέθοδος περιορισμού ισχύος (power curtailment) καθώς και η μέθοδος ελέγχου του συντελεστή ισχύος (power factor control).

Λέξεις κλειδιά: φωτοβολταϊκά συστήματα, μικροδίκτυα, MPPT φωτοβολταϊκών, RTDS, προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο, PHIL, ευστάθεια σε PHIL, ακρίβεια σε PHIL, Interface Algorithms, AC/DC/AC μετατροπές 3 κλάδων, ανύψωση τάσης λόγω φωτοβολταϊκών, περιορισμός της ισχύος, έλεγχος του συντελεστή ισχύος

Abstract

This diploma thesis examines the structure of a simulation experiment in real time with the laboratory microgrid, and specific the photovoltaic inverter. The simulation is called Power Hardware In Loop (PHIL). Firstly, we describe the microgrid devices and the real-time simulator (RTDS), which will simulate the electrical network that will connect the Hardware Under Test (HUT) and our "intermediate» (Interface) which will make the connection of the two previous parts.

Both HIL techniques are mentioned with particular emphasis on PHIL and problems concerning stability and accuracy, are studied. It is shown the Nyquist stability criterion on which the study was based concerning the stability issue and it is presented the two types of errors that occur in a simulation PHIL, the TFP error (Transfer Function Perturbation) and the NP error (Noise Perturbation). After that we indicate the various connection topologies of the interface (interface algorithms) by which we can connect the components of the loop, in order to overcome the issues of stability and accuracy. We analyze the operation of the amplifier AC/DC/AC who will play the role of the interface in our experiment.

Regarding the experimental part of the work, we initially apply the PHIL technique on the voltage divider circuit. We present the topology and we model our system in the best possible way. Through measurements we find the total time delay of the loop and we model the interface as an amplifier with unit gain and influence from the output filter. Using Matlab we apply the Nyquist stability criterion as well as the necessary accuracy study, and we present the results. Following this point, the results from the simulations made in Simulink as well as the experimental results from the PHIL application, are shown. Finally, we study in Simulink the case where an unstable voltage divider circuit, in a PHIL application, becomes stable through the use of a filter in the feedback current.

In the last part of the work we apply the PHIL technique to a LV network in a rural area, in which there is photovoltaic production and we present the results of the voltage levels at the connection nodes. The network of the rural area is described and we implement some production-consumption scenarios using the PHIL technique. Then by using Simulink we saw the voltage rise on the connection nodes of the network for different scenarios of production – consumption (offline simulation). Finally we applied two ways to reduce the voltage rise using the capabilities of the photovoltaic inverters, namely the method of power curtailment and the method of power factor control.

Key words: photovoltaic systems, microgrid, MPPT photovoltaic, RTDS, real-time simulation, PHIL, stability in PHIL, accuracy in PHIL, Interface Algorithms, AC/DC/AC inverter with 3 branches, voltage rise due to photovoltaic connection, power curtailment, power factor control

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Κοτσαμπόπουλο για τις υποδείξεις και την καθοδήγηση του καθώς και για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας, καθώς επίσης και στον κ. Σταύρο Παπαθανασίου ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να λύσει τις απορίες μου κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π για την υποστήριξη της πρωτοβουλίας της διπλωματικής και για την δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο.

Επίσης ευχαριστώ και τον συνάδελφο Αλέξανδρο Ρήγα για την άψογη συνεργασία μας κατά το διάστημα εκπόνησης των διπλωματικών μας εργασιών.

Περιεχόμενα

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1 Γενικά περί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	12
1.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα	15
1.2.1 Γενικά – Αρχή λειτουργίας.....	15
1.2.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	17
1.2.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φ/β στοιχείου.....	18
1.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων	19
2.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ	21
2.1 Γενικές πληροφορίες	21
2.2 Μικροδίκτυο του εργαστηρίου ΣΗΕ των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΕΜΠ	22
2.2.1 Λεπτομερής περιγραφή μικροδικτύου εργαστηρίου ΣΗΕ	24
2.2.1.1 Φωτοβολταϊκοί συλλέκτες	24
2.2.1.2 SUNNY BOY 1100.....	26
2.2.1.3 SUNNY BOY CONTROL.....	30
2.2.1.4 Εφαρμογή Maximum Power Point Tracking (MPPT) στα φωτοβολταϊκά για μεγιστοποίηση της ισχύος.....	31
2.2.1.5 Ανεμογεννήτρια εργαστηριακού μικροδικτύου	33
2.2.1.6 WINDY BOY 1700.....	35
2.2.1.7 Οι συσσωρευτές του μικροδικτύου	36
2.2.1.8 SUNNY ISLAND 4500.....	37
2.2.1.9 SUNNY WEB BOX.....	40
3.ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ RTDS	41
3.1 Ψηφιακός Εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS)	41
3.2 Γενική ανάλυση του εξομοιωτή RTDS	41
3.2.1 Ο Εξομοιωτής.....	41
3.2.2 RTDS Υλικό (Hardware)	42
3.2.3 RTDS Λογισμικό (Software).....	44
3.3 Ο εξομοιωτής RTDS στο εργαστήριο ΣΗΕ	45
4.ΤΕΧΝΙΚΕΣ HARDWARE IN LOOP	46
4.1 Τεχνική Hardware In Loop (HIL)	46
4.1.1 Control hardware in loop.....	47
4.1.2 Power Hardware In Loop	48
4.1.2.1 Εισαγωγή	48
4.1.2.2 Ανάλυση PHIL	48
4.1.2.3 Το πρόβλημα της ευστάθειας σε μια προσομοίωση PHIL.....	50
4.1.2.4 Το κριτήριο ευστάθειας Nyquist	53
4.1.2.5 Το πρόβλημα της ακρίβειας σε μια προσομοίωση PHIL.....	54
4.1.2.5.1 Η διαταραχή τύπου TFP	55
4.1.2.5.2 Η διαταραχή τύπου NP.....	58
4.1.2.5.3 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας αξιολόγησης της ακρίβειας μιας PHIL προσομοίωσης.....	59
4.1.2.6 Τοπολογίες σύνδεσης του interface (Interface algorithms).....	59
5.Ο AC/DC/AC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΩΣ INTERFACE ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ PHIL	64

5.1 Εισαγωγή.....	64
5.2 Διπολικά τρανζίστορς με μονωμένη πύλη (IGBT).....	64
5.3 Μονοφασικοί αντιστροφείς DC/AC.....	67
5.4 Μονοφασικοί AC/DC/AC ρυθμιστές τάσης.....	72
6.ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΝΔΕΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΗ ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΣΗ.....	78
6.1 Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	78
6.1.1 Εναέρια δίκτυα ΜΤ.....	79
6.1.2 Υπόγεια δίκτυα ΜΤ.....	80
6.1.3 Εναέρια δίκτυα ΧΤ.....	82
6.1.4 Υπόγεια δίκτυα ΧΤ.....	82
6.2 Ανύψωση τάσης λόγω της σύνδεσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	84
6.2.1 Εισαγωγή.....	84
6.2.2 Προσεγγιστικός τύπος εύρεσης της ανύψωσης τάσης σε έναν κόμβο του δικτύου.....	84
6.2.3 Τρόποι περιορισμού της ανύψωσης τάσης σε ένα δίκτυο χαμηλής τάσης.....	86
6.2.3.1 Μείωση παραγόμενης ισχύος (Power Curtailment).....	86
6.2.3.2 Δυνατότητα ρύθμισης αέργου ισχύος (power factor control, PFC).....	87
7.ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	89
7.1 Εφαρμογή της τεχνικής PHIL σε ένα διαιρέτη τάσης.....	89
7.1.1 Τοπολογία κυκλώματος.....	89
7.1.2 Εύρεση χρονικής καθυστέρησης στον κλειστό βρόχο.....	90
7.1.3 Μελέτη ευστάθειας του κλειστού βρόχου για το κύκλωμα του διαιρέτη τάσης.....	92
7.1.4 Μελέτη ακρίβειας του κλειστού βρόχου για το κύκλωμα του διαιρέτη τάσης.....	93
7.1.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Simulink για τον διαιρέτη τάσης.....	94
7.1.6 Αποτελέσματα από την εφαρμογή της PHIL τεχνικής σε διαιρέτη τάσης με πραγματική αντίσταση.....	95
7.1.7 Μελέτη ευστάθειας του κλειστού βρόχου για το κύκλωμα του διαιρέτη τάσης στην περίπτωση που $R_1 > R_2$	99
7.2 Εφαρμογή της τεχνικής PHIL σε δοκιμαστικά δίκτυα με HUT τον αντιστροφέα φωτοβολταϊκών.....	102
7.2.1 Πρώτο πειραματικό δίκτυο.....	102
7.2.2 Δεύτερο πειραματικό δίκτυο.....	107
7.3 Μελέτη δικτύου αγροτικής περιοχής.....	112
7.3.1 Μελέτη δικτύου αγροτικής περιοχής σε πείραμα με τη χρήση της PHIL τεχνικής.....	113
7.3.2 Σενάρια κατανάλωσης – παραγωγής για το δίκτυο αγροτικής περιοχής.....	118
7.3.3 Τρόποι αντιμετώπισης της ανύψωσης τάσης για το δίκτυο αγροτικής περιοχής.....	121
8.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΣΥΝΕΧΙΣΗΣ.....	127
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	128

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά περί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) (ή ήπιες μορφές ενέργειας, ή νέες πηγές ενέργειας, ή πράσινη ενέργεια) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Έτσι οι ΑΠΕ θεωρούνται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη.

Το ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας ανακινήθηκε τη δεκαετία του 1970, ως αποτέλεσμα κυρίως των απαντών πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής, αλλά και της αλλοίωσης του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής από τη χρήση κλασικών πηγών ενέργειας. Ιδιαίτερα ακριβές στην αρχή, ξεκίνησαν σαν πειραματικές εφαρμογές. Σήμερα όμως λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των ανεπτυγμένων κρατών για την ενέργεια και, αν και αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής, ετοιμάζονται βήματα για παραπέρα αξιοποίησή τους. Το κόστος δε των εφαρμογών ήπιων μορφών ενέργειας πέφτει συνέχεια τα τελευταία είκοσι χρόνια και ειδικά η αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια, αλλά και η βιομάζα, μπορούν πλέον να ανταγωνίζονται στα ίσα παραδοσιακές πηγές ενέργειας όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια. Ενδεικτικά, στις Η.Π.Α. ένα 6% της ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, ενώ στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2010 το 25% της ενέργειας θα προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές (κυρίως υδροηλεκτρικά και βιομάζα) [1]

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι πηγές τα αποθέματα των οποίων ανανεώνονται φυσικά, και οι οποίες συνεπώς θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες. Στην κατηγορία αυτή, συγκαταλέγονται:

- Η αιολική ενέργεια

Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές (π.χ. την άλεση στους ανεμόμυλους). Χρησιμοποιείται πλέον πλατιά για ηλεκτροπαραγωγή.

- Η ηλιακή ενέργεια

Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι) ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος, με την βοήθεια της πολιτικής προώθησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από το ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.

- Οι υδατοπτώσεις

Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, που στο πεδίο των ήπιων μορφών ενέργειας εξειδικεύονται περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.

- Η γεωθερμική ενέργεια

Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται απ' τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών της αναγκών, όσον αφορά τη θέρμανση, και το 20%, όσον αφορά τον ηλεκτρισμό, με γεωθερμική ενέργεια.

- Η βιομάζα

Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε απ' το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές που θα χρησιμοποιηθεί πλατιά στο μέλλον.

- Οι κυψέλες καυσίμου

Μπορούν να χαρακτηριστούν σαν κέντρα ενός συστήματος το οποίο χρησιμοποιεί το υδρογόνο ως καύσιμο. Είναι αυτές οι οποίες αναλαμβάνουν τη μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια, με τη χρήση κατάλληλων διατάξεων και ηλεκτρολυτών.

- Η ενέργεια από θαλάσσια κύματα

Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας και τη μετατρέπει σε ηλεκτρική μέσω κατάλληλων διατάξεων.



Εικόνα 1.1 Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας από τεχνητό φράγμα

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συνοψίζονται ως εξής:

Πλεονεκτήματα

1. Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
2. Δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
3. Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
4. Είναι ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
5. Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει μεγάλο χρόνο ζωής.

Μειονεκτήματα

1. Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.
2. Για τον παραπάνω λόγο προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.

3. Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
4. Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί.
5. Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω απ' το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. [1]

1.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα

1.2.1 Γενικά – Αρχή λειτουργίας

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας είναι εκτεταμένη στις μέρες μας και λαμβάνει πεδία δράσης από τη θέρμανση των χώρων μέχρι και τη θέρμανση νερού στους ηλιακούς θερμοσίφωνες. Ευρύτερη όμως μπορεί να είναι η αξιοποίησή της όταν χρησιμοποιείται για την παραγωγή απ' ευθείας ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία επιτυγχάνεται σήμερα σχεδόν αποκλειστικά μέσω των Φωτοβολταϊκών-Φ/Β συστημάτων. Τα κύρια μέρη ενός Φ/Β συστήματος, που μπορεί και να αναφέρεται και ως Φ/Β σταθμός παραγωγής, είναι:

- A. Η Φ/Β γεννήτρια (ή Φ/Β συλλέκτης)
- B. Οι διατάξεις προσαρμογής μέσω των οποίων η ΦΒ γεννήτρια συνδέεται είτε με το ηλεκτρικό δίκτυο διανομής, είτε με τις καταναλώσεις και τις διατάξεις αποθήκευσης όταν πρόκειται για αυτόνομη εγκατάσταση.

Στο παρακάτω σχήμα δείχνεται ενδεικτικά ένα Φ/Β πλαίσιο (module), το οποίο περιλαμβάνει έναν αριθμό από Φ/Β στοιχεία (cells) και ακολούθως τρία πλαίσια που στηρίζονται στην ίδια μεταλλική κατασκευή και σχηματίζουν ένα Φ/Β πανέλο (panel). Περισσότερα του ενός πανέλα σχηματίζουν την Φ/Β συστοιχία (array).



Εικόνα 1.2 Η σύνθεση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών

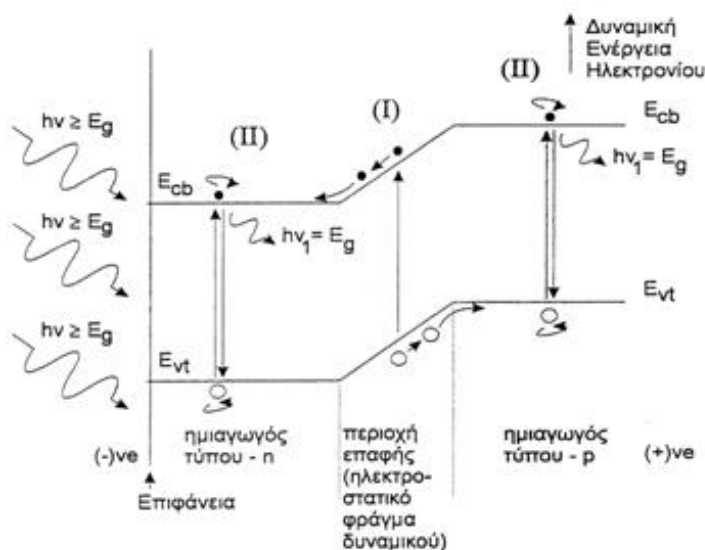
Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι συνήθως τετράγωνο, με πλευρά 120-160mm. Δυο τύποι πυριτίου χρησιμοποιούνται για την δημιουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων: το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο, ενώ το κρυσταλλικό πυρίτιο διακρίνεται σε μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό. Εκτός από το πυρίτιο χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπως το Κάδμιο - Τελλούριο (CdTe) και ο ινδοδισεληνιούχος χαλκός. Σε αυτές τις κατασκευές, η μορφή του στοιχείου διαφέρει σημαντικά από αυτή του κρυσταλλικού πυριτίου, και έχει συνήθως τη μορφή λωρίδας πλάτους μερικών χιλιοστών και μήκους αρκετών εκατοστών.

Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία, που σχεδιάστηκαν τον 19ο αιώνα, δεν είχαν παρά 1-2% απόδοση, ενώ το 1954 τα εργαστήρια Bell Laboratories δημιούργησαν τα πρώτα Φ/Β στοιχεία πυριτίου με απόδοση 6%. Στην πορεία του χρόνου όλο και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης: η αύξηση της απόδοσης, έστω και κατά μια ποσοστιαία μονάδα, θεωρείται επίτευγμα στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13 – 19%, ο οποίος, συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός. Αυτό σημαίνει ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια προκειμένου να αποδώσει την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια Φ/Β συστοιχία είναι συνεχούς ρεύματος (DC), και για το λόγο αυτό οι πρώτες χρήσεις των φωτοβολταϊκών αφορούσαν εφαρμογές DC τάσης: κλασικά παραδείγματα είναι ο υπολογιστής τσέπης («κομπιουτεράκι») και οι δορυφόροι. Με την προοδευτική αύξηση όμως του βαθμού απόδοσης, δημιουργήθηκαν ειδικές συσκευές – οι αντιστροφείς (inverters) - που σκοπό έχουν να μετατρέψουν την έξοδο συνεχούς τάσης της Φ/Β συστοιχίας σε εναλλασσόμενη τάση. Με τον τρόπο αυτό, το Φ/Β σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει μια σύγχρονη εγκατάσταση (κατοικία, θερμοκήπιο, μονάδα παραγωγής κλπ.) που χρησιμοποιεί κατά κανόνα συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος(AC). [2]

1.2.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

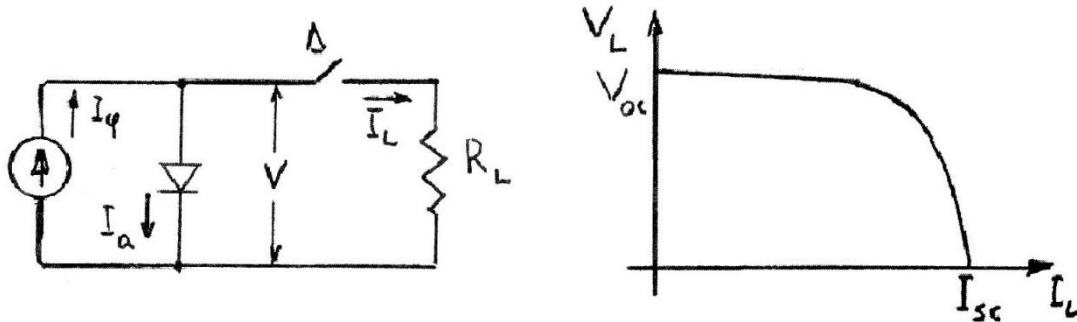
Η λειτουργία των ηλιακών στοιχείων βασίζεται στην ικανότητα των ημιαγωγών να μετατρέπουν αμέσως το ηλιακό φως σε ηλεκτρισμό με τη βοήθεια του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με την μορφή ενός δίσκου, όπου η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου και δέχεται την ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει την δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει το ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι και για όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων ελεύθερων ηλεκτρονίων-οπών, πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n, οπότε θα δεχτούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των τμημάτων της διόδου. Δηλαδή η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δυο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου.



Εικόνα 1.3 Το ηλιακό στοιχείο που αποτελείται από την επαφή ημιαγωγού τύπου-n και τύπου-p. Στην εικόνα παρουσιάζεται το διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας των ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με το βάθος από την επιφάνεια. [3]

1.2.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φ/β στοιχείου

Το Φ/Β στοιχείο παρίσταται με μια πηγή έντασης, η οποία παράγει το φωτόρρευμα I_ϕ , όταν προσπίπτει σε αυτό ηλιακή ακτινοβολία, το δε μέγεθός του είναι ευθέως ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Το σημείο λειτουργίας ορίζεται προφανώς από την τομή της καμπύλης Τάσης-Έντασης του Φ/Β στοιχείου και της ευθείας $I_L = V_L/R_L$.



Εικόνα 1.4 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου καθώς και η χαρακτηριστική τάσεως – εντάσεως. [4]

Όταν το εξωτερικό κύκλωμα είναι ανοιχτό $I_L = 0$, το φωτόρρευμα I_ϕ κυκλοφορεί δια της διόδου και στους ακροδέκτες του Φ/Β στοιχείου εμφανίζεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος $V=V_{oc}$. Το I_ϕ δίνεται από τη γνωστή για τους ημιαγωγούς σχέση:

$$I_\phi = I_o \cdot [\exp(\frac{eV}{\gamma kT}) - 1] \quad (1.1)$$

Όπου: I_o : το ανάστροφο ρεύμα κόρου,

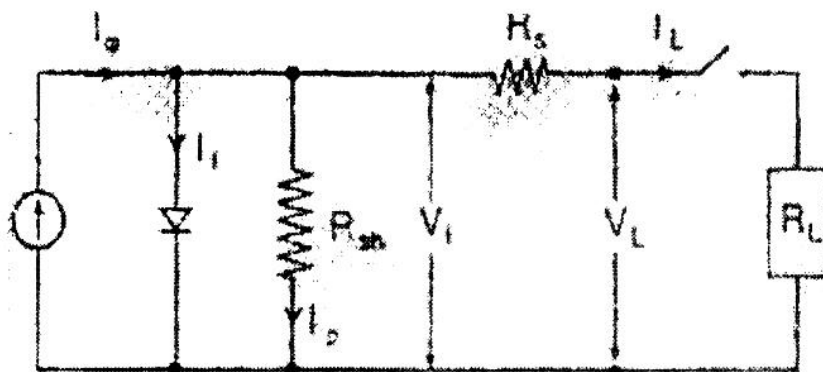
$e = 1,6 \times 10^{-19} C$, το φορτίο του ηλεκτρονίου

$k = 1,38 \times 10^{-23} J/K$, η σταθερά του Boltzman

T : η θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου σε βαθμούς K

γ : συντελεστής ποιότητας της διόδου

Η παραπάνω εξιδανικευμένη παράσταση του Φ/Β στοιχείου δεν έλαβε υπόψη τις απώλειες που λαμβάνουν χώρα εντός του στοιχείου και εκδηλώνονται υπό μορφή υπερθέρμανσης έναντι της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Στην παρακάτω εικόνα δίνεται ένα πληρέστερο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Η αντίσταση R_s εκφράζει τις απώλειες που υπερθερμαίνουν το φ/β στοιχείο ακόμη και όταν είναι ανοιχτοκυκλωμένο, ενώ η αντίσταση R_s τις πρόσθετες απώλειες και την μείωση της τάσης που παρατηρούνται όταν συνδέεται εξωτερικό φορτίο και αυξάνεται η ένταση I_L .



Εικόνα 1.5 Πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου [4]

1.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Τεχνολογία φιλική στο περιβάλλον: δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διατίθεται παντού και δεν στοιχίζει απολύτως τίποτα
- Με την κατάλληλη γεωγραφική κατανομή, κοντά στους αντίστοιχους καταναλωτές ενέργειας, τα Φ/Β συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του δικτύου διανομής
- Η λειτουργία του συστήματος είναι ολοσχερώς αθόρυβη
- Έχουν σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής: οι κατασκευαστές εγγυώνται τα «κρύσταλλα» για 20-30 χρόνια λειτουργίας
- Υπάρχει πάντα η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης, ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών
- Μπορούν να εγκατασταθούν πάνω σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, όπως είναι π.χ. η στέγη ενός σπιτιού ή η πρόσοψη ενός κτιρίου,
- Διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές: τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν άριστα τόσο ως αυτόνομα συστήματα, όσο και ως αυτόνομα υβριδικά συστήματα όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας (συμβατικές ή ανανεώσιμες) και συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Επιπλέον, ένα μεγάλο πλεονέκτημα του Φ/Β συστήματος είναι ότι μπορεί να διασυνδεθεί με το

δίκτυο ηλεκτροδότησης (διασυνδεδεμένο σύστημα), καταργώντας με τον τρόπο αυτό την ανάγκη για εφεδρεία και δίνοντας επιπλέον τη δυνατότητα στον χρήστη να πωλήσει τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια στον διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου, όπως ήδη γίνεται στο Φράιμπουργκ της Γερμανίας.

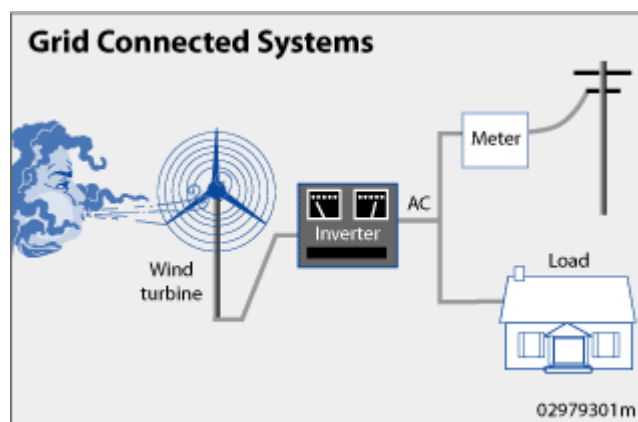
Ως μειονέκτημα θα μπορούσε να καταλογίσει κανείς στα φωτοβολταϊκά συστήματα το κόστος τους, το οποίο, παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις παραμένει ακόμη αρκετά υψηλό. Μια γενική ενδεικτική τιμή είναι 4000 ευρώ ανά εγκατεστημένο κιλοβάτ (kW) ηλεκτρικής ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μια τυπική οικιακή κατανάλωση απαιτεί από 1,5 έως 3,5 κιλοβάτ, το κόστος της εγκατάστασης δεν είναι αμελητέο. Το ποσό αυτό, ωστόσο, μπορεί να αποσβεστεί σε περίπου 5-6 χρόνια και το Φ/Β σύστημα θα συνεχίσει να παράγει δωρεάν ενέργεια για τουλάχιστον άλλα 25 χρόνια. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα είναι πολλά, και το ευρύ κοινό έχει αρχίσει να στρέφεται όλο και πιο πολύ στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στα φωτοβολταϊκά ειδικότερα, για την κάλυψη ή την συμπλήρωση των ενεργειακών του αναγκών.[2]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ

2.1 Γενικές πληροφορίες

Γενικά δύο είναι οι τρόποι παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας προς τους τελικούς καταναλωτές. Στην πρώτη, η ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στους καταναλωτές που βρίσκονται σε μακρινή απόσταση από τις μονάδες παραγωγής, μέσω γραμμών υψηλής τάσης και στη συνέχεια μέσω μετασχηματιστών υποβιβασμού της τάσης που βρίσκονται κοντά στους καταναλωτές. Η δεύτερη προσέγγιση αναφέρεται στη μέθοδο της διεσπαρμένης παραγωγής και στη δημιουργία μικρότερων μονάδων παραγωγής σε τόπους όπου υπάρχει διαθέσιμη η πρωταρχική πηγή ενέργειας και βρίσκεται κοντά σε τόπους κατανάλωσης όπως πόλεις και βιομηχανίες. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζουμε τις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτουν από τη μεταφορά της από την παραγωγή προς την κατανάλωση. Η επιλογή ανάμεσα στους δύο τρόπους παραγωγής είναι αποτέλεσμα μελετών και έχει να κάνει με πολλούς παράγοντες όπως το οικονομικό κόστος ή διάφορα περιβαλλοντικά και κοινωνικά ζητήματα.

Ένα δίκτυο που περιέχει μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και πιθανώς μονάδες αποθήκευσης (όπως συσσωρευτές, σφονδύλους κ.α.) το οποίο σχεδιάζεται ανεξάρτητα από το κεντρικό δίκτυο αποκαλείται μικροδίκτυο. Τα μικροδίκτυα μπορούν να συνδέονται στο κύριο δίκτυο ισχύος ή μπορούν και να λειτουργούν αυτόνομα, όπως τα συστήματα ισχύος νησιωτικών μονάδων. Είναι μία ιδέα που βασίζεται στην ύπαρξη ενός συνόλου ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων τοποθετημένων μαζί με πηγές ηλεκτρικής ισχύος και θερμότητας μικρής κλίμακας. Οι πηγές ισχύος ποικίλλουν, συμπεριλαμβάνοντας ανανεώσιμες πηγές, όπως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες αλλά και γεννήτριες που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα, για την αντιμετώπιση της τοπικής ζήτησης για θερμότητα και ηλεκτρισμό.



Εικόνα 2.1 Μικροδίκτυο που συνδέεται στο κεντρικό δίκτυο και αποτελείται από ανεμογεννήτρια, αντιστροφέα καθώς και ένα οικιακό φορτίο.

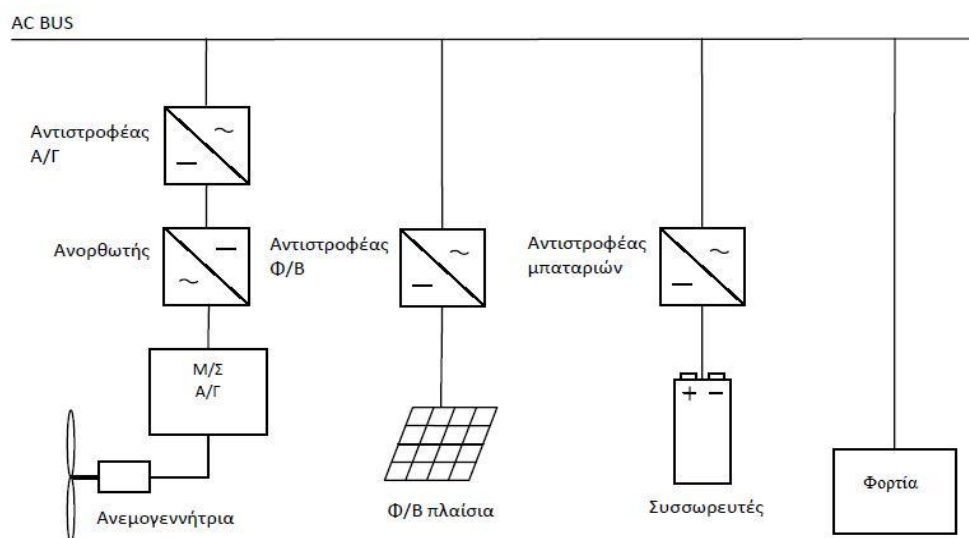
Τα μικροδίκτυα παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα που μπορούμε να τα παρουσιάσουμε συνοπτικά ως εξής: [5] [6]

- Οι πηγές του είναι συνήθως μονάδες Α.Π.Ε ή μονάδες συμπαραγωγής με υψηλή απόδοση που οδηγούν σε περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον
- Η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας αυξάνοντας την απόδοση ως 30%
- Οφέλη για το δίκτυο όπως δυνατότητα τοπικής παραγωγής, ελέγχου τάσης και συχνότητας
- Ο τοπικός χαρακτήρας της παραγωγής μειώνει τις απώλειες μεταφοράς
- Υπάρχει δυνατότητα στήριξης του κεντρικού δικτύου τις ώρες αιχμής και απορρόφησης ενεργού ή αέργου ισχύος όταν απαιτείται.
- Βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος παραγωγής καθώς σε περίπτωση σφάλματος στο κεντρικό δίκτυο το μικροδίκτυο μπορεί να τροφοδοτεί κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις μέρος των καταναλωτών.

Για μικρές εγκαταστάσεις, τα μικροδίκτυα δίνουν τη δυνατότητα ηλεκτροδότησης απομονωμένων περιοχών στις οποίες δεν υπάρχει κεντρικό δίκτυο και όπου πολλές φορές το κόστος σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο είναι μεγαλύτερο από την εγκατάσταση αυτόνομου συστήματος (σε βουνά, δάση κτλ.)

2.2 Μικροδίκτυο του εργαστηρίου ΣΗΕ των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούν συνοπτικά τα βασικά ηλεκτρονικά μέρη, οι συσκευές επικοινωνίας και ελέγχου που περιέχονται σε ένα μικροδίκτυο με μικρές πηγές Α.Π.Ε, συσσωρευτές και φορτία. Ένα τέτοιο μικροδίκτυο είναι και αυτό του εργαστηρίου ΣΗΕ των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.



Εικόνα 2.2 Σχέδιο του μικροδικτύου που υπάρχει στο εργαστήριο ΣΗΕ των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΕΜΠ



Εικόνα 2.3 Το εργαστηριακό μικροδίκτυο

Sunny boy, windy boy: Χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών και της μικρής ανεμογεννήτριας αντίστοιχα στον κοινό ζυγό AC. Αποτελούνται από ένα DC/DC μετατροπέα ώστε να πετυχαίνεται η ανάχνευση της μέγιστης ισχύος (MPPT) και έναν αντιστροφέα για την μετατροπή της DC τάσης της εισόδου στην τάση και συχνότητα του μικροδικτύου.

Sunny island: Πρόκειται για μια διάταξη ενός DC/DC μετατροπέα και ενός αμφίδρομου αντιστροφέα DC/AC. Αποτελεί το βασικό κομμάτι του μικροδικτύου εφόσον ρυθμίζει την τάση και τη συχνότητα του. Ο Sunny Island έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει και ως ανορθωτής αλλά και ως αντιστροφέας. Όταν η παραγόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από αυτή που καταναλώνουν τα φορτία τότε λειτουργεί ως ανορθωτής και φορτίζονται οι συσσωρευτές, ενώ όταν απαιτείται ενέργεια από τις μπαταρίες λειτουργεί ως αντιστροφέας παρέχοντας ισχύ στα φορτία. Καθώς ο Sunny Island είναι συνδεδεμένος με τις μπαταρίες μας, είναι υπεύθυνος για την αποδοτική φόρτιση και εκφόρτιση τους, και φροντίζει να είναι μεγάλη η διάρκεια ζωής τους. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει τη συχνότητα και την τάση με κλίσεις στατισμού, ώστε να μπορεί να επικοινωνεί με τους Sunny boy και Windy boy. Σε περίπτωση διασυνδεδεμένης λειτουργίας με το δίκτυο χαμηλής τάσης το δίκτυο επιβάλλει την τάση και τη συχνότητα και ο sunny island συμπεριφέρεται ως ένας αντιστροφέας πηγής έντασης.

Sunny boy control: Παρακολουθεί την ισχύ εξόδου των αντιστροφέων και μπορεί να συνδέσει ή να αποσυνδέσει τούς αντιστροφεείς. Έχει τη δυνατότητα να επικοινωνήσει με τούς αντιστροφεείς και επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει τιμές σε παραμέτρους, όπως ο χρόνος ένταξης και εξόδου του αντιστροφέα, να εισάγει τη χαρακτηριστική καμπύλη της ανεμογεννήτριας στον windy boy κ.α.

Web box: Επιτρέπει την παρακολούθηση και τον έλεγχο του μικροδικτύου μέσω internet από οποιοδήποτε υπολογιστή. Επικοινωνεί με τούς αντιστροφεείς και επιτρέπει στον χρήστη την εισαγωγή παραμέτρων στους αντιστροφεείς.

Έλεγχος των φορτίων: Τα φορτία μπορεί να είναι τα πραγματικά οικιακά φορτία είτε μπορεί να είναι αντιστάσεις, λαμπτήρες και κινητήρες σε ένα εργαστήριο. Τα φορτία μπορούν να ελέγχονται μέσω PLC που επικοινωνούν με κατάλληλο πρόγραμμα υπολογιστή όπως είναι το Labview. Με το ίδιο πρόγραμμα είναι εφικτή η παρακολούθηση των ηλεκτρικών μεγεθών του μικροδικτύου. Η διαχείριση φορτίου είναι μία σημαντική δυνατότητα που επιτρέπει για παράδειγμα την απόρριψη συγκεκριμένων φορτίων όταν η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών μειωθεί κάτω από το 70% και έχει πληθώρα εφαρμογών.

Περισσότερες πληροφορίες για τα στοιχεία που αποτελούν το μικροδίκτυο του εργαστηρίου ΣΗΕ μπορούν να βρεθούν παρακάτω, καθώς θα ακολουθήσει λεπτομερής καταγραφή και ανάλυση.

2.2.1 Λεπτομερής περιγραφή μικροδικτύου εργαστηρίου ΣΗΕ

2.2.1.1 Φωτοβολταϊκοί συλλέκτες

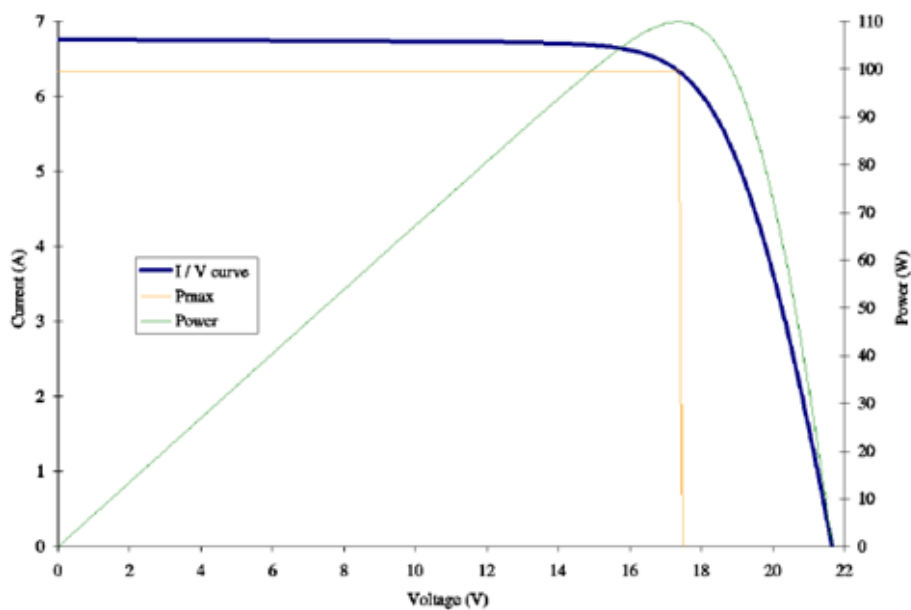
Στην ταράτσα του κτιρίου των ηλεκτρολόγων μηχανικών βρίσκονται εγκατεστημένα 10 panels, το καθένα απ' τα οποία αποτελείται από 36 cells. Η μέγιστη ισχύς κάθε panel είναι 110 Wp, η δε τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι 21,6 volt (καθώς κάθε cell παράγει 0,6 volt), οπότε αυτά συνδεδεμένα σε σειρά δίνουν συνεχή τάση 180 volt. Τα συγκεκριμένα στοιχεία, ισπανικής κατασκευής, είναι από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχουν τη μεγαλύτερη απόδοση, περίπου 15%. Άλλες τεχνολογίες ευρέως διαδεδομένες είναι του πολυκρυσταλλικού και του άμορφου πυριτίου. Η μέθοδος κατασκευής είναι αυτή που διαφοροποιεί τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου τόσο στην απόδοση όσο και στο κόστος παραγωγής. Παρακάτω παραθέτονται φωτογραφίες από τα φωτοβολταϊκά καθώς και ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Δίνεται επίσης η καμπύλη ρεύματος-τάσης καθώς επίσης και η καμπύλη ισχύος.



Εικόνα 2.4 Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στην ταράτσα των ηλεκτρολόγων

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Διαστάσεις	1310*654*39,5 mm
Βάρος	11,5 κιλά
Αριθμός εν σειρά κυψελών	36
Αριθμός κυψελών εν παραλλήλω	2
Αναφορά μετρήσεων	NOCT (800 W/m ² , 25 °C, AM 1,5)
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
(μετρήσεις σε συνθήκες 1000 w/m ² , 25 °C, AM 1.5)	
Ονομαστική τάση λειτουργίας	12 volt
Μέγιστη ισχύς	110 Wp +/- 10%
Ρεύμα βραχυκύκλωσης Isc	6,67 A
Τάση ανοιχτοκύκλωσης Voc	21,6 Volt
Ένταση στη μέγιστη ισχύ Imax	6,32 A
Τάση στη μέγιστη ισχύ Vmax	17,4 volt
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Στοιχεία	Μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με αντανακλαστική επίστρωση
Επαφές	Ενισχυμένες επαφές σε κάθε στοιχείο για αξιοπιστία του κυκλώματος
Κάλυψη	EVA(ethylene vinyl acetate)
Εμπρόσθια όψη	Ενισχυμένο γυαλί με βελτιωμένη μετάδοση φωτός
Πλαίσιο	Ανοδιωμένο αλουμίνιο
Κιβώτια επαφών	IP65 με ενσωματωμένες διόδους παράκαμψης
Ακροδέκτες γείωσης	ναι
Καλώδια επαφών	4-10 mm ²

Εικόνα 2.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων του μικροδικτύου [7]



Εικόνα 2.6 Χαρακτηριστική I-V ενός φ/β πλαισίου ISOFOTON 110Wp μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Διακρίνεται το σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου Pmax (17.4V,6.32A). Η καμπύλη

αυτή ισχύει για συνθήκες $1000W/m^2$ ηλιακής ακτινοβολίας 1.5 AM και $25^{\circ}C$ θερμοκρασία. [7]

2.2.1.2 SUNNY BOY 1100

Ο Sunny boy 1100 grid-tie inverter, είναι ένας αντιστροφέας για τη διασύνδεση φωτοβολταϊκών γεννητριών με ένα δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης. Το συγκεκριμένο μοντέλο που έχει εγκατασταθεί στο εργαστήριο ΣΗΕ έχει τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Τεχνολογία αντιστροφέα	πραγματικού ημιτόνου, πηγής ρεύματος, υψηλής συχνότητας διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM)
Ονομαστική AC τάση εξόδου	213-260 volt ac (standard 240)
Ονομαστική συχνότητα εξόδου	49,3 – 50,5 Hz
DC τάση εισόδου	129-400 volt dc
Τάση για μέγιστη ισχύς εξόδου (MPPT)	145 - 400 Volt DC
Μέγιστη ισχύς εισόδου (dc τάσης)	1440 watt
Μέγιστη ισχύς εξόδου (240 volt ac)	1100 watt
Ονομαστική ισχύς εξόδου	1000 watt
Αρμονική παραμόρφωση ρεύματος THD	Μικρότερη από 4%
Συντελεστής ισχύος	1
Μέγιστη απόδοση αντιστροφέα	93%
Ψύξη	Φυσική απαγωγή (χωρίς ανεμιστήρα)
Τάση εισόδου για έναρξη λειτουργίας	180 volt dc
Μέγιστο ρεύμα εξόδου AC	4,6 Ampere
Μέγιστο ρεύμα εισόδου DC	9,5 Ampere
Κυμάτωση DC τάσης	Μικρότερη από 10%
Κατανάλωση ισχύος	0 watt τη νύχτα, μικρότερη από 4 watt σε λειτουργία, μικρότερη από 0,1 watt σε λειτουργία stand by
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	45 °C

Εικόνα 2.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών του μικροδικτύου. [7]

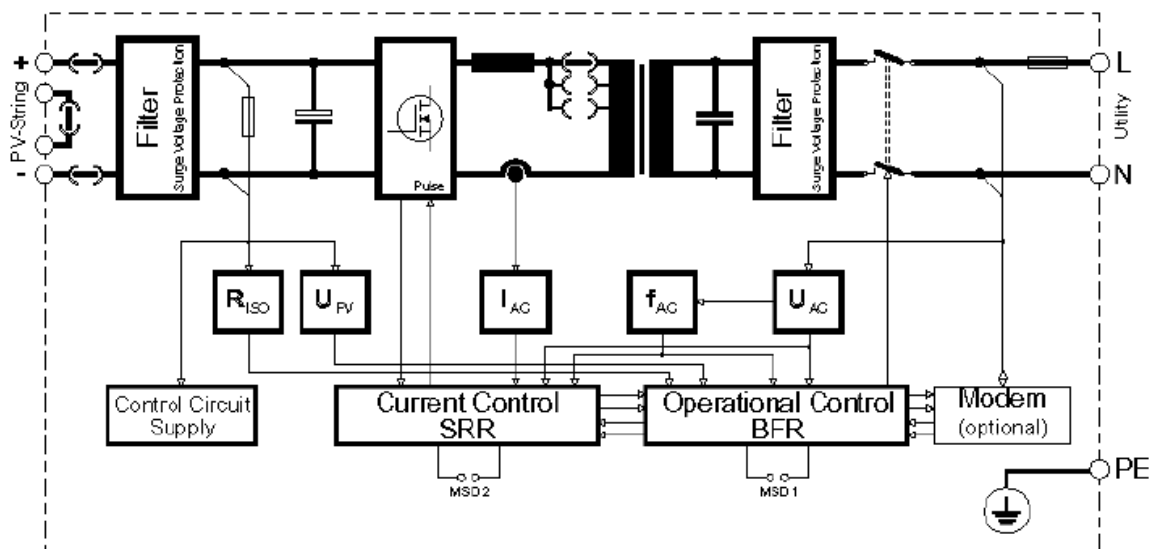


Εικόνα 2.8 Φωτογραφία του Sunny boy 1100

Ο Sunny boy είναι ένας αντιστροφέας ισχύος DC/AC πηγής έντασης. Χρησιμοποιείται όπως προείπαμε για τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο δίκτυο. Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα βλέπουμε πως η τάση εισόδου του πρέπει να κυμαίνεται από 145-400 volt συνεχούς τάσης ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί μια τεχνική μεγιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος γνωστή ως Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T) και η οποία θα αναλυθεί παρακάτω.

Ο αντιστροφέας είναι συνδεδεμένος στην έξοδο του με το εργαστηριακό μικροδίκτυο και κατ' επέκταση με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Όταν στην μεν τάση εξόδου μετρήσει την ονομαστική τάση που του έχει οριστεί και την συχνότητα στα επιθυμητά όρια, είναι ανά πάση στιγμή έτοιμος να λειτουργήσει μετατρέποντας την τάση εισόδου των φ/β σε εναλλασσόμενη. Ταυτόχρονα θα πρέπει η τάση εισόδου του να είναι μεγαλύτερη των 180 Volt, ώστε να εξασφαλίσει ότι δεν θα υπάρχουν συνεχείς διακοπές της διαδικασίας.

Σε ότι αφορά το τεχνικό κομμάτι του αντιστροφέα, ο Sunny Boy 1100 είναι ένας αντιστροφέας DC/AC που χρησιμοποιεί για την μετατροπή της τάσης, τρανζίστορ IGBT. Παρακάτω δίνεται ένα σχεδιάγραμμα της ηλεκτρονικής διάταξης του αντιστροφέα.



Εικόνα 2.9 Ηλεκτρικό σχεδιάγραμμα αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών του μικροδικτύου.[8]

Η συνεχής τάση στην είσοδο του αντιστροφέα περνά από ένα φίλτρο για προστασία από υπερτάσεις καθώς και από ένα βαθυπερατό φίλτρο για εξομάλυνση του ρεύματος εισόδου. Έπειτα ακολουθεί ένας μετατροπέας DC/DC ο οποίος χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της τεχνικής μεγιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος των φωτοβολταϊκών (M.P.P.T).

Η τάση αυτή, τροφοδοτεί μια γέφυρα που αποτελείται από τέσσερα διπολικά τρανζίστορ ελεγχόμενα από την πύλη (IGBT) τα οποία λειτουργούν με φέρουσα συχνότητα $f_s=16$ KHz. Στην γέφυρα αυτή το ρεύμα μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ημιτονοειδούς μορφής και συχνότητας 50 Hz με την τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM). Το εναλλασσόμενο ρεύμα που παράγεται πριν φτάσει στην έξοδο του αντιστροφέα περνά από ένα μετασχηματιστή απομόνωσης για την ηλεκτρική απομόνωση της DC από την AC πλευρά. Τέλος, έχουμε και την παρεμβολή ενός βαθυπερατού φίλτρου στην έξοδο, για την εξουδετέρωση των υψίσυχων αρμονικών που παράγονται από τον αντιστροφέα, καθώς επίσης και για την προστασία από υπερτάσεις του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί πως η λειτουργία της γέφυρας καθώς και ο χρονισμός σύνδεσης – αποσύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο ελέγχεται πλήρως από ψηφιακά κυκλώματα. [9]

Ο αντιστροφέας Sunny boy 1100 είναι ένας αντιστροφέας μονόδρομης ροής ισχύος, καθώς επιτρέπει μονό ροή ισχύος από τα φωτοβολταϊκά προς το δίκτυο, και όχι το αντίστροφο. Παρακάτω θα συναντήσουμε έναν αντιστροφέα ο οποίος επιτρέπει τη ροή ισχύος και προς τις δυο κατευθύνσεις.

Σε αυτό το σημείο θα αναφέρουμε ορισμένες προστασίες του αντιστροφέα. [7],[9] Καταρχήν ο αντιστροφέας διαθέτει προστασίες για την αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας, από υπερτάσεις και σφάλματα γης τόσο στην dc πλευρά εισόδου όσο και στην

ac πλευρά εξόδου. Επίσης η ύπαρξη varistors τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο είναι εκείνη που προστατεύει τον αντιστροφέα από πτώση κεραυνού ή άλλου είδους υπέρταση. Τα varistors είναι συνδεδεμένα σε σειρά με ασφάλεια την οποία ανοίγουν όταν ζεσταθούν απότομα. Έτσι προστατεύεται ο εσωτερικός ηλεκτρονικός εξοπλισμός του αντιστροφέα.

Τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του αντιστροφέα υπάρχουν εσωτερικά αυτόματοι διακόπτες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να συνδέουν τον αντιστροφέα με την dc και την ac πλευρά αντίστοιχα.

Η δυσμενέστερη περίπτωση για τους grid-tied αντιστροφείς είναι η απομονωμένη λειτουργία τους από το δίκτυο (islanding condition), δηλαδή όταν έχει διακοπεί η σύνδεση με το προϋπάρχον δίκτυο αλλά αυτοί εξακολουθούν να τροφοδοτούν τις συσκευές. Αυτή η κατάσταση της απομονωμένης λειτουργίας μπορεί να προκαλέσει διαταραχές στην τάση και τη συχνότητα με αποτέλεσμα οι ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές να αντιμετωπίζουν προβλήματα στη λειτουργία τους. Το πιο σημαντικό όμως πρόβλημα που μπορεί να δημιουργηθεί είναι ο τραυματισμός του συντηρητή του δικτύου, ή όποιου άλλου ατόμου έρθει σε επαφή με το κύκλωμα. Αυτό συμβαίνει καθώς μπορεί μεν να κόπηκε το κεντρικό δίκτυο αλλά υπάρχει τάση στις διατάξεις του μικροδικτύου από τα φωτοβολταϊκά και την ανεμογεννήτρια. Περισσότερες πληροφορίες για αυτού του είδους την προστασία μπορεί κάποιος να βρει στα [7] [9].

Στην πλευρά της dc τάσης δεν υπάρχει αντίστοιχη προστασία όπως στην πλευρά της ac τάσης. Γι' αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την εγκατάσταση του αντιστροφέα. Υπάρχει όμως προστασία από τυχόν διαρροές ρεύματος. Σε περίπτωση που ο αντιστροφέας διαπιστώσει αντίσταση μικρότερη από 1 M Ω μεταξύ ενός άκρου εισόδου και της γης, τότε διακόπτει την τροφοδοσία του συστήματος.

Μια άλλη μορφή προστασίας έχει να κάνει με τη λειτουργία του αντιστροφέα και ιδιαίτερα με τη θερμότητα που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του. Ο αντιστροφέας αποτελείται από IGBT's τα όποια ιδιαίτερα στο πλήρες φορτίο αναπτύσσουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Έκτος από την ψήκτρα που υπάρχει στο εσωτερικό του Sunny boy, έχει εγκατασταθεί ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου το οποίο με χρήση ενός αλγορίθμου μειώνει την ισχύ που παράγεται προκειμένου να μειωθεί η θερμοκρασία.

Ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί ως εξής:

- Μέχρι τους 65 °C ο αντιστροφέας λειτουργεί με τη μέγιστή του απόδοση.
- Μετά τους 65 °C ο αντιστροφέας αρχίζει να μειώνει την ισχύ εξόδου του, κατά συγκεκριμένο ποσό, για κάθε βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας στην ψήκτρα.

Παρόμοιο έλεγχο της ισχύος εξόδου του είναι δυνατόν να υλοποιήσει και σύμφωνα με τη συχνότητα του δικτύου. Ερμηνεύοντας την αύξηση της συχνότητας στο δίκτυο ως ένδειξη πλεονάζουσας ενεργού ισχύος, ο αντιστροφέας μειώνει την ισχύ εξόδου. Ο έλεγχος αυτός αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε απομονωμένα δίκτυα όπου και η συχνότητα ελέγχεται από

αντιστροφέα ισχύος ή μια σύγχρονη γεννήτρια. Έτσι επιτυγχάνεται η συνεργασία των μονάδων αυτών στη βάση της αρνητικής κλίσης ενεργού ισχύος – συχνότητας.

Περισσότερες πληροφορίες όσον αφορά τον αντιστροφέα Sunny boy και την απόδοσή του, μπορούν να αναζητηθούν στο [7].

2.2.1.3 SUNNY BOY CONTROL

Ο αντιστροφέας Sunny boy 1100 για την επικοινωνία με το χρήστη, διαθέτει μονό κάποιες ενδεικτικές λυχνίες ώστε να ενημερώνει για τυχόν σφάλματα στη λειτουργία του. Έτσι είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός άλλου οργάνου που θα καταγράφει την λειτουργία του Sunny boy. Η συσκευή αυτή έλεγχου του αντιστροφέα είναι το Sunny boy control.



Εικόνα 2.10 Φωτογραφία του Sunny boy control

Το Sunny boy control είναι ξεχωριστή συσκευή η οποία είναι συνδεδεμένη μόνιμα με τον αντιστροφέα και χρησιμοποιείται τόσο για την επιθυμητή ρύθμιση της λειτουργίας όσο και για την καταγραφή διαφόρων μεγεθών όπως παραγόμενη τάση, ένταση, ισχύς, ημερήσια ισχύς.

Το Sunny boy control μπορεί να συνδεθεί και να ελέγξει από 1 έως 50 αντιστροφείς Sunny boy, σε ένα ενιαίο δίκτυο λειτουργίας με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

1. Μέσω του δικτύου χαμηλής τάσης. Δεν απαιτείται η ύπαρξη καλωδίου για τη διασύνδεση του Sunny boy με το Sunny boy control και η επικοινωνία γίνεται μέσω του δικτύου χαμηλής τάσης, στο οποίο είναι συνδεδεμένες και οι δύο συσκευές. Η επικοινωνία γίνεται με διαμόρφωση ασθενούς σήματος FSK (frequency shift keying) υψηλής συχνότητας το οποίο μεταβιβάζεται στην ημιτονική μορφή της τάσης του δικτύου. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η απόσταση μεταξύ των δύο συσκευών να μην είναι μεγάλη, καθώς τα καλώδια του δικτύου χαμηλής τάσης, δεν ενδείκνυνται για μεταφορά υψίσυχνων σημάτων.
2. Μέσω καλωδίου RS-232 9 ακροδεκτών. Με το καλώδιο αυτό επιτυγχάνεται η σύνδεση των δυο συσκευών αρκεί όμως το μήκος του καλωδίου να μην υπερβαίνει τα 1200 μέτρα.

3. Μέσω καλωδίου RS-485. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να συνδεθεί μετατροπέας RS232-RS485 στην είσοδο του Sunny boy control.

Στην περίπτωση του μικροδικτύου έχουμε τη σύνδεση του Sunny boy με το Sunny boy control μέσω ενός καλωδίου RS-232. Το Sunny boy control συνδέεται με έναν άλλο αντιστροφέα που υπάρχει στο μικροδίκτυο και ο οποίος πέρα από τη μικρή αναφορά που πραγματοποιήθηκε προηγουμένως θα αναλυθεί διεξοδικά παρακάτω, τον Sunny island. Η σύνδεση πραγματοποιείται μέσω καλωδίου RS-485. Τέλος, μέσω ενός καλωδίου RS-232 έχουμε την επικοινωνία του Sunny island με έναν υπολογιστή του εργαστηρίου και κατ' επέκταση με τους υπολογιστές που ανήκουν στο τοπικό δίκτυο. Ο υπολογιστής αυτός διαθέτει το Labview, ένα λογισμικό το οποίο επιτρέπει τη ρύθμιση των στοιχείων λειτουργίας των δύο αντιστροφέων καθώς και την προβολή των μετρήσεων που καταγράφουν.

Πέρα από τη σύνδεση του Sunny boy control με τον αντιστροφέα υπάρχουν επιπρόσθετα και οι παρακάτω δυνατότητες ελέγχου του αντιστροφέα:

- Στην περίπτωση που υπάρχει ένας μόνο αντιστροφέας Sunny boy είναι δυνατή η σύνδεσή του με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω καλωδίου RS-232 το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνά τα 15 μέτρα.
- Σε περίπτωση πολλών αντιστροφέων, ένα μόντεμ τύπου SWR-COM μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο χαμηλής τάσης καθώς και σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο έλεγχος όλων των αντιστροφέων μπορεί να γίνει μέσω του υπολογιστή.

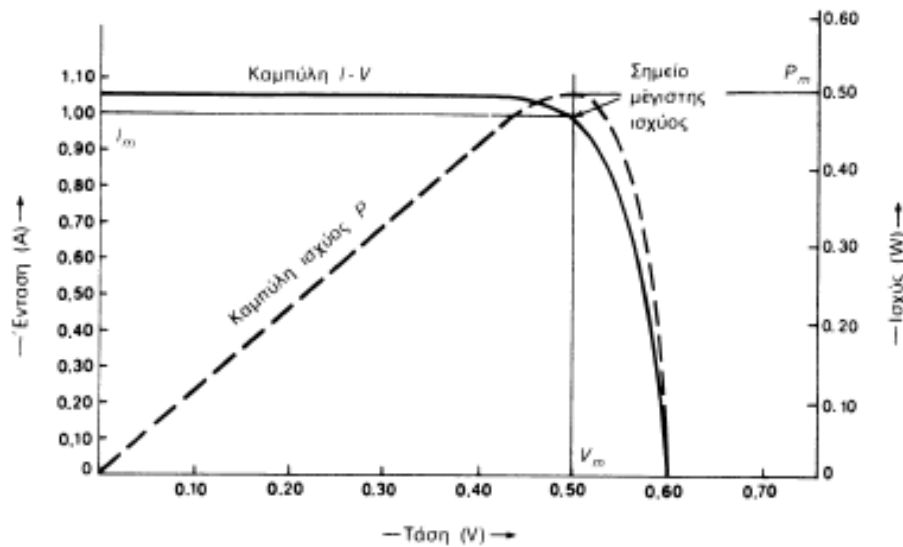
Οι πληροφορίες αυτές αντλήθηκαν από την βιβλιογραφία [7]

2.2.1.4 Εφαρμογή Maximum Power Point Tracking (MPPT) στα φωτοβολταϊκά για μεγιστοποίηση της ισχύος

Όπως έχουμε αναφέρει η τεχνική Maximum Power Point Tracking αποτελεί μια τεχνική μεγιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος. Άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών και αποτελεί πλέον χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών.

Η λογική στη λειτουργία της βασίζεται στο γεγονός ότι η ένταση που παράγεται από ένα φ/β δεν είναι σταθερή, αλλά αντιθέτως μεταβαλλόμενη. Η μεταβολή της έντασης του ρεύματος είναι αντίστροφη από τη μεταβολή της τάσης. Υπάρχει επομένως ένα συγκεκριμένο ζεύγος τάσης-έντασης για το οποίο έχουμε μέγιστη ισχύ. Ωστόσο επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών δεν είναι σταθερή, έτσι δεν είναι σταθερή ούτε και η τάση εξόδου στους ακροδέκτες των φωτοβολταϊκών. Είναι επομένως επιθυμητό το φωτοβολταϊκό στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο, αυτό το ζεύγος τάσης – έντασης που

μεγιστοποιεί την ισχύ του. Ακολουθεί η χαρακτηριστική τάσης-έντασης και ισχύος-τάσης στο ίδιο διάγραμμα για την εύκολη εξαγωγή συμπερασμάτων.



Εικόνα 2.11 Χαρακτηριστική I-V και καμπύλη ισχύος

Η διάταξη που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή του M.P.P.T. στα φωτοβολταϊκά είναι ένας μετατροπέας DC/DC ανύψωσης - υποβιβασμού τάσης που όπως έχουμε δει υπάρχει ενσωματωμένος στον Sunny boy.

Θα αναπτύξουμε σε αυτό το σημείο τη θεωρία πάνω στην οποία στηρίζεται η λειτουργία του M.P.P.T. Η παραγόμενη ισχύς από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι $P = V \cdot I$. Όταν η λειτουργία του στοιχείου μετατοπιστεί σε διαφορετικό σημείο της καμπύλης V-I λόγω μεταβολής στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ή μεταβολή του φορτίου, τότε η τάση μεταβάλλεται κατά dV και η ένταση κατά dI . Τότε η ισχύς είναι $P = V \cdot I = (V + dV) \cdot (I + dI)$. Αγνοώντας τους όρους δεύτερης τάξης έχουμε:

$$dP = dV \cdot I + dI \cdot V \quad (2.1)$$

Όπως είναι φανερό απ' την καμπύλη ισχύος του φωτοβολταϊκού, ο όρος dP (η κλίση δηλαδή της καμπύλης ισχύος) είναι μηδέν στο σημείο μέγιστης ισχύος. Στο σημείο αυτό (maximum power point) λοιπόν η άνωθεν εξίσωση γίνεται:

$$0 = dV \cdot I + dI \cdot V \Rightarrow \frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad (2.2)$$

Με βάση αυτή την εξίσωση υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος [7]:

1. Μία διαταραχή ρεύματος εισάγεται περιοδικά στην φωτοβολταϊκή πηγή μέχρι να ισχύσει η παραπάνω συνθήκη $\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I}$
2. Μια δεύτερη μέθοδος ελέγχου είναι να αυξάνεται η τάση όσο ισχύει η συνθήκη $\frac{dP}{dV} > 0$ ενώ αν $\frac{dP}{dV} < 0$ η τάση μειώνεται. Για κάποια τιμή της τάσης θα ισχύει $\frac{dP}{dV} = 0$. Αυτή η τιμή της τάσης είναι και η επιθυμητή.
3. Μια τρίτη κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός, δηλ $\frac{V_{mpp}}{V_{oc}} = K = \sigma\tau\alpha\theta$ (περίπου 0,72 για τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου). Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση τότε των παραγωγικών φ/β στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο $K \cdot V_{oc}$ που εξασφαλίζει τη μέγιστη ισχύ.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ο DC/DC μετατροπέας θα πρέπει να λειτουργεί είτε ως μετατροπέας ανύψωσης είτε ως μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης.

2.2.1.5 Ανεμογεννήτρια εργαστηριακού μικροδικτύου

Η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιείται στο εργαστηριακό μικροδίκτυο έχει κατασκευαστεί από φοιτητές ηλεκτρολόγους μηχανικούς και έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά. Είναι μια τριφασική ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών και ισχύος $P_{\eta\lambda} = 850W$ (σε λειτουργία Μ.Ρ.Ρ.Τ). Είναι 12 πόλων και η φασική της τάση είναι 53 Volt, ενώ η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής είναι $n_{nom} = 560\Sigma\Lambda\Lambda$. Ταχύτητα ένταξης της ανεμογεννήτριας είναι $V_{cut-in} = 2,5 \frac{m}{s}$ ενώ η ταχύτητα αποκοπής πάνω από $15 \frac{m}{s}$. Στην ανεμογεννήτρια του εργαστηρίου εφαρμόζεται η τεχνική της μεγιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος μέσω του αντιστροφέα Windy boy.



Εικόνα 2.12 Ανεμογεννήτρια στην ταράτσα του κτιρίου ηλεκτρολόγων

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί το παρακάτω. Η ανεμογεννήτρια παράγει 3Φ τάση, ενώ ο αντιστροφέας Windy boy απαιτεί στην είσοδο του DC τάση. Για να επιτύχουμε τη σύνδεση απαιτούνται 2 ενδιάμεσα στοιχεία. Ένας μετασχηματιστής ώστε να μετατρέπεται η 3Φ τάση σε μονοφασική και ένας ανορθωτής που θα μετατρέπει την τάση από εναλλασσόμενη σε συνεχή. Ο μετασχηματιστής είναι συνδεσμολογίας Y-Y, ονομαστικής ισχύος 1KW και τριών λήψεων στην έξοδο (100/350V, 100/360V, 100/370V). Ο ανορθωτής της ανεμογεννήτριας είναι ένα Whisper link το οποίο είναι το σύστημα έλεγχου της ανεμογεννήτριας και ταυτόχρονα μετατρέπει την τριφασική εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή για τη σύνδεση με το Windy boy. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το Whisper link.



Εικόνα 2.13 Φωτογραφία Whisper link

2.2.1.6 WINDY BOY 1700

Πρόκειται για έναν αντιστροφέα ισχύος ο οποίος χρησιμοποιείται για τη σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το κυρίως δίκτυο. Αποτελείται από έναν DC/DC μετατροπέα για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια και από έναν μονοφασικό αντιστροφέα που επιτρέπει μονόδρομη ροή ισχύος. Είναι πανομοιότυπος με τον Sunny Boy που παριστάνεται στην εικόνα 2.9 και ακολουθεί τις ίδιες αρχές λειτουργίας. Η διαφορά του Windy Boy με τον Sunny Boy βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο έχουν προγραμματιστεί ώστε να εφαρμόζουν την αρχή του Maximum Power Point Tracking για την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Το Windy Boy 1700 φαίνεται στην εικόνα 2.14 ενώ τα κυριότερα χαρακτηριστικά του φαίνονται στην 2.15.



Εικόνα 2.14 Φωτογραφία Windy boy 1700 εργαστηρίου ΣΗΕ

Windy Boy 1700	
Είσοδος (DC)	
Μεγ. ισχύς DC	1850 W
Συνιστώμενη ισχύς γεννήτριας για 2500 / 5000 ώρες πλήρους φορτίου ετησίως	1400 W / 1300 W
Μεγ. τάση DC	400 V
Ονομαστική τάση DC	180 V
Ελαχ. τάση χωρίς φορτίο για ενεργοποίηση "Turbine Mode"	150 V
Εύρος λειτουργίας "Turbine Mode"	139 V - 400 V
Μεγ. ρεύμα εισόδου / ανά είσοδο	12,6 A / 12,6 A
Έξοδος (AC)	
Ονομαστική ισχύς AC	1550 W
Μεγ. ισχύς AC	1700 W
Μεγ. ρεύμα εξόδου	8,6 A
Ονομαστική τάση AC / εύρος λειτουργίας AC	220 V, 230 V , 240 V / 180 V – 260 V
Ονομαστική συχνότητα AC / εύρος	50 Hz, 60 Hz / ± 4,5 Hz
Συντελεστής ισχύος (cos φ)	1
Φάσεις τροφοδοσίας / Φάσεις σύνδεσης	1 / 1
Βαθμός απόδοσης	
Μεγ. βαθμός απόδοσης / Euro-Eta	93,5 % / 91,8 %

Εικόνα 2.15 Χαρακτηριστικά Windy boy 1700 [10]

2.2.1.7 Οι συσσωρευτές του μικροδικτύου

Στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου ΣΗΕ είναι εν σειρά εγκατεστημένοι 30 συσσωρευτές Ergon OPzS των 2 volt, και ονομαστικής χωρητικότητας C10=250Ah ή C120=370Ah, δίνοντας συνολικά μια τάση εξόδου 60 Volt. Σε ότι αφορά τις δυο τιμές που αναφέρθηκαν για τις μπαταρίες σημειώνεται πως οι τιμές αυτές αναφέρουν τη μέγιστη χωρητικότητα του κάθε στοιχείου των 2 Volt όπως προκύπτει από την εξίσωση Peukert για χρόνο εκφόρτισης 10 και 120 ωρών αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση, εννοείται ότι το στοιχείο μπορεί να δίνει 25A για 10 ώρες, ενώ στη δεύτερη ότι το στοιχείο μπορεί να δίνει ρεύμα 3A για 120 ώρες. Προφανές είναι ότι η χωρητικότητα των στοιχείων μειώνεται συναρτήσει του ρεύματος εξόδου. Έτσι η συνολική ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν είναι $60 \cdot 250 = 15000 \text{ Wh} = 15 \text{ KWh}$ για ρεύματα εκφόρτισης 25A, ή $60 \cdot 370 = 22,2 \text{ KWh}$ για ρεύματα εκφόρτισης 3A.

Η μεγάλη διάρκεια ζωής τους σε συνδυασμό με τη βαθιά εκφόρτισή τους, τους καθιστούν ιδανικούς για εφαρμογές φωτοβολταϊκών. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους, η διάρκεια ζωής τους μπορεί να φτάσει τα 15 χρόνια όταν δεν φορτίζονται και εκφορτίζονται συνεχώς. Είναι τεχνολογίας μολύβδου-αντιμονίου και περιέχουν σαν ηλεκτρολύτη διάλυμα θειικού οξέος. Οι θετικές πλάκες αποτελούνται από συμπαγείς χοντρές σωλήνες μολύβδου (tubular plates) πάνω σε πλαστικό υλικό ενώ οι αρνητικές από σχάρες μολύβδου.

Για κυκλική χρήση, οι προδιαγραφές τους αναφέρουν ότι μπορούν να πραγματοποιήσουν το λιγότερο 1200 κύκλους για ένα βαθμό εκφόρτισης έως και 80% με ρεύμα $C/10$, δηλαδή $250/10 = 25 \text{ A}$, για την περίπτωση των συσσωρευτών του εργαστηρίου. Για βαθμούς εκφόρτισης μέχρι και 50% οι κύκλοι μπορούν να φτάσουν και τους 3000. Οι τιμές αυτές βάθους εκφόρτισης και ρεύματος είναι οι μέγιστες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό τον τύπο συσσωρευτών. Δεδομένου ότι ο αντιστροφέας sunny island μπορεί να εξάγει μέγιστη ισχύ 6,6KW για διάστημα 20 sec., ένα ρεύμα 110A απαιτείται. Συνεπώς οι συσσωρευτές είναι ικανοί να παρέχουν μέγιστη ισχύ των 6,6KW [7]. Ακολουθεί εικόνα των συσσωρευτών καθώς επίσης και πίνακας με τα βασικά χαρακτηριστικά τους.



Εικόνα 2.16 Φωτογραφία συσσωρευτών

Τάση μέγιστης φόρτισης (Voltage regulation, VR)	2,40-2,44 volts/cell
Τάση συντήρησης (float charge)	2,23 volts/cell
Τάση βελτιστοποίησης φόρτισης (equalizing charge)	2,50 volts/cell
Συνιστώμενη θερμοκρασία λειτουργίας	10 – 30 °C
Πυκνότητα ηλεκτρολύτη	1,25 gr/cm ³

Εικόνα 2.17 Βασικά χαρακτηριστικά συσσωρευτών [7]

2.2.1.8 SUNNY ISLAND 4500

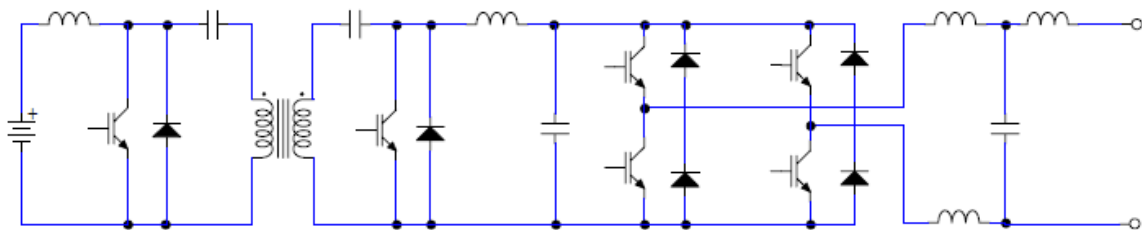
Ο αντιστροφέας Sunny Island 4500 αποτελεί τη κύρια συσκευή του μικροδικτύου. Χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των μπαταριών με το κεντρικό δίκτυο και μπορεί να λειτουργήσει ως πηγή ενέργειας σε αυτόνομα δίκτυα, αλλά και ως μονάδα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS) σε δίκτυα διασυνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο.

Σε αυτόνομα μικροδίκτυα χαμηλής τάσης βασικός σκοπός του αντιστροφέα είναι να ρυθμίζει την τάση και τη συχνότητα του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται με το να συμπληρώνουν την απαιτούμενη ισχύ που παρέχουν οι αντιστροφείς Sunny Boy και Windy Boy στο δίκτυο μέσω της ισχύος που μπορούν να δώσουν οι συσσωρευτές. Με άλλα λόγια όταν υπάρχει περίσσεια παραγόμενης ισχύος από τα φωτοβολταϊκά και την ανεμογεννήτρια, ο Sunny Island φορτίζει τις μπαταρίες, ενώ όταν υπάρχει έλλειψη ισχύος, οι μπαταρίες δίνουν μέσω του αντιστροφέα ισχύ προς το δίκτυο. Σε περίπτωση που έχουμε περίσσεια παραγόμενης ισχύος και οι συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι, ο Sunny

Island μπορεί να θέσει σε λειτουργία ένα φορτίο για να απορροφήσει την υπερπαραγωγή (π.χ. αντιστάσεις), είτε να διακόψει τη λειτουργία της παραγωγής.

Από την άλλη πλευρά, όταν ο Sunny Island χρησιμοποιείται σε δίκτυο που βρίσκεται σε σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο, λειτουργεί ως συσκευής αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS), παρέχοντας ισχύ στο δίκτυο του κτιρίου που είναι εγκατεστημένο, όταν το δίκτυο αυτό αποκοπεί από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Ακολουθεί μια τεχνική περιγραφή του αντιστροφέα Sunny Island.

Ο Sunny Island 4500 είναι ένας αντιστροφέας πηγής τάσης τεσσάρων τεταρτημορίων και ονομαστικής ισχύος 3300 VA. Συγκεκριμένα πρόκειται για μια διάταξη μετατροπέα DC/DC με μετασχηματιστή απομόνωσης υψηλής συχνότητας, και αντιστροφέα διακοπτικού τύπου DC/AC που χρησιμοποιεί πλήρη γέφυρα τρανζίστορς IGBT. Παρακάτω δίνεται ένα απλοποιημένο σχεδιάγραμμα του αντιστροφέα.



Εικόνα 2.18 Κυκλωματικό σχεδιάγραμμα του αντιστροφέα sunny island. Περιλαμβάνει φίλτρα πυκνωτών και πηνίων, αμφίδρομο μετατροπέα CUK (DC DC) με ενδιάμεσο μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας και πλήρη γέφυρα τεσσάρων IGBT και διόδων ισχύος DC-AC αμφίδρομης ροής ισχύος. Τελευταίο το πηνίο σύνδεσης (coupling inductor) [7].

Ο Sunny Island χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των συσσωρευτών με το δίκτυο. Έτσι η τάση στην είσοδο του αντιστροφέα είναι η dc τάση των συσσωρευτών. Η συνεχής αυτή τάση μέσω πηνίου, εισέρχεται στον αμφίδρομο μετατροπέα CUK (DC/DC) που περιλαμβάνει μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας. Ο μετατροπέας αυτός στην βασική του μορφή επιτρέπει ροή της ισχύος μόνο κατά μια κατεύθυνση, ωστόσο στη συγκεκριμένη διάταξη πρόκειται για μια τροποποιημένη του μορφή ώστε να επιτρέπει ροή ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ο μετατροπέας περιλαμβάνει στο ενδιάμεσο του στάδιο και μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας, ώστε να εξασφαλίζεται η γαλβανική απομόνωση της εισόδου από την έξοδο. Η συχνότητα των παλμών της τάσης στον μετασχηματιστή είναι 16,6KHz. Ο μετατροπέας CUK ελέγχεται από ένα κεντρικό ελεγκτή του αντιστροφέα (ελεγκτή που χρησιμοποιεί υπερτιθέμενο PI ελεγκτή) ελέγχει την τάση του ενδιάμεσου κυκλώματος. Ο ελεγκτής αυτός λειτουργεί με τη μισή συχνότητα από αυτήν των παλμών της τάσης (8,3KHz). Η έξοδος του CUK είναι μια ελεγχόμενη τάση 360 Volt. Η συνεχής αυτή τάση, πάλι μέσω φίλτρων επαγωγών και πυκνωτών εισέρχεται σε μια πλήρη γέφυρα των IGBT's όπου με τη μέθοδο της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη 230V/50Hz [7].

Κρίνεται σημαντικό να σημειωθεί σ'αυτό το σημείο πως και ο DC/DC μετατροπέας, και η γέφυρα των IGBT's επιτρέπουν την αμφίδρομη ροή ισχύος ώστε να επιτυγχάνουμε ροή ισχύος από τους συσσωρευτές προς το δίκτυο και αντίστροφα.

Τέλος η ημιτονοειδής τάση της γέφυρας μέσω του φίλτρου οδηγείται στην έξοδο του αντιστροφέα για να συνδεθεί με το δίκτυο χαμηλής τάσης. Το στάδιο εξόδου περιλαμβάνει επαγωγή συνδέσεως (coupling inductor) τιμής 0.8mH και φίλτρο πυκνωτή. Στην είσοδο του αντιστροφέα υπάρχει διπολικός αυτόματος διακόπτης συνεχούς ρεύματος (63A) και στην έξοδό του διπολικός αυτόματος διακόπτης 16A. Παρακάτω δίνονται τα περισσότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του Sunny Island καθώς επίσης και μια φωτογραφία του.

SI 4500		
Output data		
Rated AC voltage (adjustable)	U_{AC}	230 V (200 - 260 V)
Grid frequency (adjustable)	f	50 or 60 Hz (40 - 70 Hz)
Continuous AC output at 25 °C / 45 °C	P_{nom}	3700 / 3300 W
Continuous AC output at 25 °C for 30 / 5 / 1 min	$P_{30} / 5 / 1$	4500 / 5200 / 6000 W
Rated AC current	$I_{AC, nom}$	16 A
Max. current (peak value) for 5 s		70 A
Output voltage harmonic distortion factor	K_{VAC}	< 3 %
Power factor	$\cos \varphi$	-1 to +1
Input data		
Input voltage	$U_{AC, ext}$	230 V (150 - 260 V)
Input frequency	f_{ext}	50 or 60 Hz (40 - 70 Hz)
Max. AC input current	$I_{AC, ext}$	0 - 500 A (depends on external wiring)
Max. input power	$P_{AC, ext}$	depends on external wiring
Battery data		
Battery voltage (range)	U_{Bat}	48 - 60 V (41 - 81 V)
Max. battery charging current	$I_{Bat, max}$	125 A
Continuous charging current	$I_{Bat, nom}$	60 A
Battery capacity	C_{Bat}	100 - 10000 Ah
Charge control		IU ₀ U with automatic full charge and equalization charge
Efficiency/power consumption		
Max. efficiency (typical)	η	> 91 %
Own consumption (no load/standby)		60 W (< 9 W)

Εικόνα 2.19 Τεχνικά χαρακτηριστικά Sunny Island 4500 [8]



Εικόνα 2.20 Φωτογραφία του Sunny Island 4500

2.2.1.9 SUNNY WEB BOX

Το Sunny Web Box αποτελεί το εργαλείο παρακολούθησης και ελέγχου του μικροδικτύου. Συλλέγει συνεχώς όλα τα δεδομένα των μετατροπέων και ενημερώνει ανά πάσα στιγμή για την κατάσταση της εγκατάστασης, προβάλλοντας τα αποτελέσματα στην οθόνη του υπολογιστή μας. Με τη χρήση μιας διεπαφής bluetooth που είναι εγκατεστημένη, η επιτήρηση του όλου συστήματος γίνεται εύκολα, χωρίς τη χρήση καλωδίου σύνδεσης του υπολογιστή με το Web Box. Ακολουθεί μια εικόνα του Web Box που έχει εγκατασταθεί στο μικροδίκτυο.



Εικόνα 2.21 Το Sunny web box

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ RTDS

3.1 Ψηφιακός Εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS)

Ο ψηφιακός εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (Real Time Digital Simulator-RTDS) άρχισε να αναπτύσσεται στο ερευνητικό κέντρο του Manitoba HVDC προς το τέλος της δεκαετίας του '80 στον Καναδά. Το 1994, η ευθύνη για τον προσομοιωτή RTDS μεταβιβάστηκε στο RTDS Technologies όπου έχει υποβληθεί από τότε σε πολυάριθμες εξελίξεις υλικού και λογισμικού. Ο προσομοιωτής τώρα χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας, από κατασκευαστές εξοπλισμού και ερευνητικές οργανώσεις [12].



Εικόνα 3.1 RTDS Simulator

3.2 Γενική ανάλυση του εξομοιωτή RTDS

3.2.1 Ο Εξομοιωτής

Ο ψηφιακός εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS) είναι μια συσκευή που έχει την δυνατότητα εξομοίωσης διαφορών μοντέλων ,πχ ενός μοντέλου ντιζελογεννήτριας ή ακόμα και ολοκλήρου συστήματος ηλεκτρικής ενεργείας. Ο εξομοιωτής χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή δοκιμών κλειστού βρόγχου, σε πραγματικό χρόνο, διαφόρων συσκευών, όπως συσκευών προστασίας και συσκευών αυτόματου ελέγχου. Είναι επομένως ένα χρήσιμο μηχανήμα το οποίο χρησιμοποιείται σε τομείς της βιομηχανίας όπως τη δόκιμη και τον έλεγχο ηλεκτρικών συσκευών(πχ ηλεκτρονόμων) αλλά και σε τομείς της εκπαίδευσης νέων μηχανικών στα πλαίσια πανεπιστημιακών διδακτικών εφαρμογών. Μέσω του εξομοιωτή ο χρήστης μπορεί να διερευνήσει τις επιπτώσεις διαταραχών στον εξοπλισμό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να ληφθούν μέτρα για την αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων ή και καταστροφών.

Ο εξομοιωτής είναι ένας συνδυασμός εξελιγμένου υπολογιστικού υλικού και εξεζητημένου λογισμικού. Μέσω ενός υπολογιστή και χρησιμοποιώντας το απαραίτητο πρόγραμμα για την επικοινωνία του RTDS με τον χρήστη, μπορούμε να προσομοιώσουμε διάφορα συστήματα ηλεκτρικής ενεργείας καθώς και να εξάγουμε τα κατάλληλα αποτελέσματα. Ο

εξομοιωτής είναι πλήρως επεκτάσιμος, επιτρέποντας μας έτσι να δουλέψουμε ακόμα και με τα πιο πολύπλοκα και ακριβή μοντέλα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Το γεγονός που καθίστα το RTDS ξεχωριστό από τους άλλους ψηφιακούς εξομοιωτές είναι ότι επιλύει τα προβλήματα σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι εφικτό επειδή ο εξομοιωτής μπορεί να επιλύσει τις εξισώσεις του συστήματος αρκετά γρήγορα ώστε η έξοδος του να αντιπροσωπεύει συνεχώς και ρεαλιστικά τις συνθήκες στο πραγματικό δίκτυο. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται η επίλυση των προβλημάτων σε πραγματικό χρόνο θα αναλυθεί παρακάτω.

Στις μέρες μας ο εξομοιωτής χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς, τυπικά στην ανάπτυξη, δοκιμή και μελέτη μεθόδων προστασίας με ηλεκτρονόμους, ενσωματωμένης προστασίας και συστημάτων αυτόματου ελέγχου. Επίσης, χρησιμοποιείται για συστήματα ελέγχου για HVDC, SVC, σύγχρονες μηχανές και συσκευές FACTS, για γενικές λειτουργίες συστημάτων AC και DC και για την αλληλεπίδραση διάφορων ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Επίσης, ο εξομοιωτής έχει πολύτιμη συνεισφορά στην εκπαίδευση και στις επιδείξεις.

3.2.2 RTDS Υλικό (Hardware)

Ένας ψηφιακός εξομοιωτής διαφέρει από έναν αναλογικό στο γεγονός ότι ο υπολογισμός της κατάστασης του μοντέλου που αναπαριστά το ΣΗΕ γίνεται σε διακριτές χρονικά στιγμές. Ο χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών διακριτών στιγμών καλείται βήμα της εξομοίωσης (Δt). Οι συνηθισμένες μελέτες μεταβατικών φαινομένων, για τις οποίες χρησιμοποιείται το RTDS, απαιτούν ένα χρονικό βήμα Δt της τάξης των 50 έως 100 μsec .

Ο εξομοιωτής εκμεταλλεύεται την αρχιτεκτονική της παράλληλης επεξεργασίας χρησιμοποιώντας πολλαπλούς επεξεργαστές που βρίσκονται σε ανεξάρτητες μονάδες που ονομάζονται racks. Κάθε rack αποτελείται από διάφορες κάρτες. Ένα backbone συνδέει όλες τις κάρτες ενός rack και διεκπεραιώνει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους.

Υπάρχουν διαθέσιμες πολλές διαφορετικές κάρτες στις οποίες περιλαμβάνονται και οι ακόλουθες: GPC (Giga Processor Card), 3PC (Triple Processor Card), IRC (Workstation Inter Rack Communications Card), WIF (Workstation InterFace Card), TPC (Tandem Processor Card) κτλ.



Εικόνα 3.2 GPC κάρτα

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθούμε εκτενεστέρα στους 3 βασικούς τύπους καρτών:

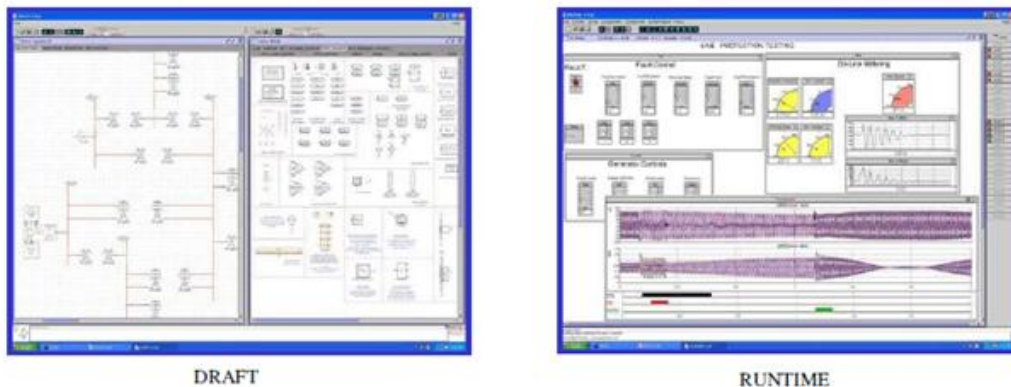
- **Tandem Processor Cards (TPC):** πρόκειται για τις κυρίες κάρτες επεξεργασίας. Κάθε TPC κάρτα φέρει δύο ανεξάρτητους ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος NEC77240. Ο συνολικός αριθμός καρτών επεξεργασίας που βρίσκονται σε κάθε βάση είναι δεκαοκτώ (18). Κάθε κάρτα TPC περιλαμβάνει τις ακόλουθες θύρες εισόδου/εξόδου:
 - 1) 8 αναλογικά κανάλια εξόδου (12 bit +/- 10 volt εύρος)
 - 2) 4 ψηφιακούς επιλογείς (16 θέσεις)
 - 3) 2 αναλογικές θύρες εισόδου (12 bit +/- 5 volt εύρος)
 - 4) 2 ψηφιακές θύρες εισόδου (16 bit η καθεμιά)
 - 5) 2 ψηφιακές θύρες εξόδου (16 bit καθεμιά). Οι θύρες εισόδου/εξόδου διαμοιράζονται μεταξύ των δύο επεξεργαστών (A& B) που υπάρχουν στην κάρτα TPC.
- **Workstation Interface Card (WIC):** πρόκειται για την κάρτα επικοινωνίας μεταξύ της γραφικής διεπιφάνειας (graphical interface) του λογισμικού που είναι εγκατεστημένο σε ένα σταθμό εργασίας (PC) και τη βάση (rack) του RTDS. Η κάρτα WIC διαθέτει έναν ελεγκτή Ethernet που είναι σε θέση να διαβιβάζει πακέτα δεδομένων μεταξύ του σταθμού εργασίας και του RTDS. Έτσι, η κάρτα WIC παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να φορτώνει, να ξεκινά, να σταματά και να ελέγχει τις εξομοιώσεις στο RTDS.
- **Inter-Rack Communication Card (IRC):** πρόκειται για την κάρτα που ανταλλάσσει δεδομένα μεταξύ επεξεργαστών που βρίσκονται σε διαφορετικές βάσεις (racks). Κάθε κάρτα IRC περιλαμβάνει έναν αριθμό από κανάλια εκπομπού/δέκτη (transmitter/receiver) επιτρέποντας έτσι την απευθείας επικοινωνία μεταξύ πολλών βάσεων (racks).

Επειδή μία από τις βασικές χρήσεις του RTDS είναι ο έλεγχος φυσικού εξοπλισμού, τα ψηφιακά σήματα πραγματικού χρόνου που παράγονται μετατρέπονται σε αναλογικά χρησιμοποιώντας μια 16 bit D/A κάρτα [13].

3.2.3 RTDS Λογισμικό (Software)

Το λογισμικό του RTDS αποτελείται από δύο διακριτά επίπεδα: τη γραφική διεπιφάνεια χρήστη (Graphical User Interface–GUI) και το μεταγλωττιστή (compiler).

Η γραφική διεπιφάνεια χρήστη (GUI) είναι υπεύθυνη για τη σωστή επικοινωνία του RTDS με τον χρήστη. Η επικοινωνία αυτή επιτυγχάνεται μέσω του RSCAD, ενός γραφικού περιβάλλοντος υψηλού επιπέδου. Το πρόγραμμα RSCAD αποτελείται από πολλά τμήματα. Δυο από αυτά θα μας απασχολήσουν σε αυτό το σημείο. Το Draft και το Run Time. Στο στάδιο Draft γίνεται ο σχεδιασμός του δικτύου που θέλουμε να προσομοιάσουμε. Χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες του προγράμματος μπορούμε να προσομοιάσουμε μια πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών και καταστάσεων λειτουργίας. Στο στάδιο Run Time γίνεται η προσομοίωση του δικτύου που έχει δημιουργηθεί στο Draft και λαμβάνονται τα αποτελέσματα της. Στο στάδιο Run Time ο χρήστης μπορεί να επέμβει δυναμικά στην εξομοίωση, κάνοντας χειρισμούς ελέγχου των διακοπών, αυξομειώνοντας άλλες παραμέτρους της εξομοίωσης κτλ. Επίσης στο περιβάλλον Run Time ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί τα μετρούμενα μεγέθη που έχει ορίσει, χρησιμοποιώντας γραφικά εικονίδια μετρητών, γραφήματα με κυματομορφές από μεγέθη της εξομοίωσης κτλ.

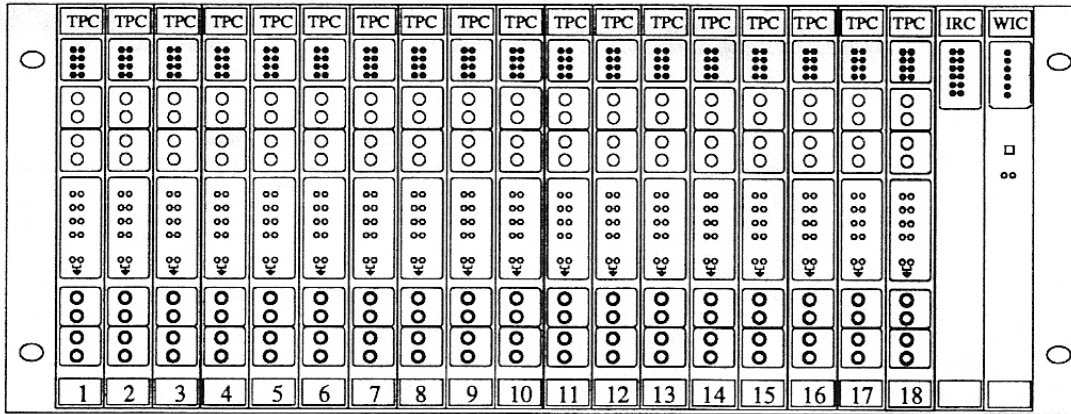


Εικόνα 3.3 RSCAD Draft και Runtime οθόνες

Ο μεταγλωττιστής (compiler) του RTDS δέχεται ως είσοδο τα δεδομένα του ηλεκτρικού δικτύου που εισάγει ο χρήστης. Ως έξοδο, ο μεταγλωττιστής παράγει τον εκτελέσιμο κώδικα παράλληλης επεξεργασίας που απαιτείται για τους ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος. Ο μεταγλωττιστής δημιουργεί συγχρόνως ένα αρχείο κειμένου (.MAP file) που καταδεικνύει τι έχει καταχωρηθεί σε κάθε επεξεργαστή, ώστε ο χρήστης να μπορεί να έχει πρόσβαση στις εξόδους του [13].

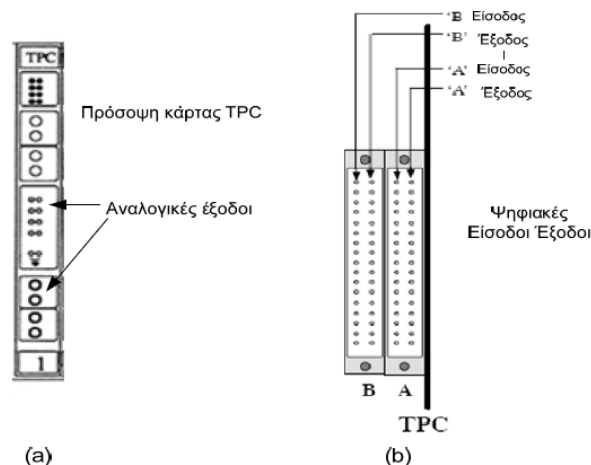
3.3 Ο εξομοιωτής RTDS στο εργαστήριο ΣΗΕ

Η μονάδα εξομοιωτή που διαθέτει το εργαστήριο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από ένα rack με 18 κάρτες επεξεργασίας TPC (Tandem Processor Cards) και μια κάρτα WIC (Workstation Interface Card).



Εικόνα 3.4 Τυπικό rack του εξομοιωτή [14]

Κάθε κάρτα TPC διαθέτει δύο επεξεργαστές καθώς και αναλογικές και ψηφιακές εισόδους και εξόδους. Οι αναλογικές εξόδοι βρίσκονται στην πρόσοψη του εξομοιωτή και μπορούν να συνδεθούν με εξωτερικό υλικό είτε με ακροδέκτες τύπου ‘μπανάνα’, είτε με ομοαξονικά καλώδια. Κάθε επεξεργαστής διαθέτει 4 τέτοιες εξόδους, οι οποίες φαίνονται στην εικόνα 3.4. Οι ψηφιακές εισοδοί-εξοδοί βρίσκονται στην πίσω όψη του εξομοιωτή. Κάθε κάρτα TPC διαθέτει δύο ψηφιακές υποδοχές σύνδεσης, μία για κάθε επεξεργαστή, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.6(b). Οι υποδοχές είναι θυρίδες των 34 ακροδεκτών οι οποίες μπορούν να συνδεθούν με εξωτερικές συσκευές με τη χρήση καλωδίου κορδέλας. Κάθε υποδοχή αποτελείται από 2 στήλες 17 ακροδεκτών, μια για τις εισόδους και μια για τις εξόδους κάθε επεξεργαστή. Η κάθε στήλη μπορεί να φέρει μέχρι 16 ψηφιακά σήματα με τον 17ο ακροδέκτη, που βρίσκεται στη βάση της υποδοχής, να είναι ο ακροδέκτης αναφοράς (γης).



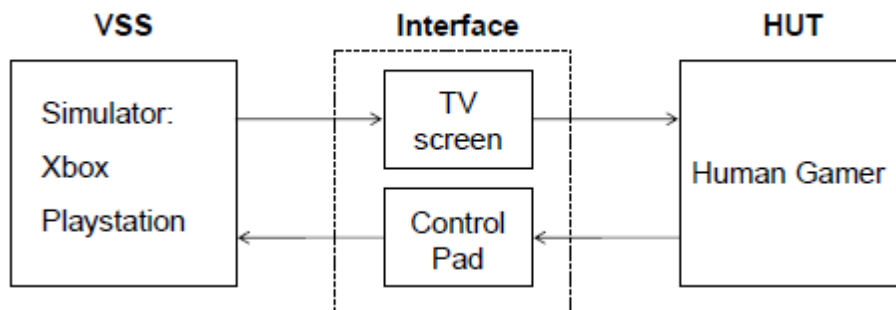
Εικόνα 3.5 Αναλογικές και ψηφιακές εισοδοί-εξοδοί των καρτών TPC [14]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΤΕΧΝΙΚΕΣ HARDWARE IN LOOP

4.1 Τεχνική Hardware In Loop (HIL)

Η Hardware in loop προσομοίωση είναι μια τεχνική κατά την οποία ένα κομμάτι εξοπλισμού έχει ενσωματωθεί στην προσομοίωση ενός μεγάλου συστήματος. Αυτή η προσέγγιση παρέχει πολλά πλεονεκτήματα που άλλες αναλύσεις και μέθοδοι δεν παρέχουν. Επιτρέπει σε μια συσκευή να διερευνηθεί κατ'επανάληψη και ενδελεχώς σε πραγματικές συνθήκες δοκιμής, ακόμη και πολύ πριν από την κατασκευή του πραγματικού συστήματος. Αυτό ελαχιστοποιεί το κόστος και τον κίνδυνο για να εξεταστούν διάφορες ακραίες συνθήκες και μεγιστοποιεί την ευκαιρία να εντοπιστούν κρυφά ελαττώματα της συσκευής πριν προκαλέσει οποιαδήποτε βλάβη. Επιπλέον, η παρούσα μέθοδος έχει τη δυνατότητα να αποκαλύψει την πλήρη έκταση των αλληλεπιδράσεων του συστήματος που πρέπει να αναμένεται στο τελικό σχέδιο. Παραδείγματα προσομοίωσης HIL περιλαμβάνουν τη δοκιμή του συστήματος ανάρτησης ενός πρωτότυπου αυτοκινήτου σε προσομοιωμένες συνθήκες ανωμάλου δρόμου ή ακόμα και την εκπαίδευση ενός χειριστή αεροσκάφους σε προσομοιωτή πτήσης [15].

Ένα σύστημα HIL αποτελείται από τρία απαραίτητα μέρη: ένα κομμάτι του υλικού υπό δοκιμή (Hardware Under Test - HUT), ένα προσομοιωμένο σύστημα (Virtually Simulated System - VSS), καθώς και ένα μια συσκευή (interface) που συνδέει το HUT και το VSS μαζί. Στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται ένα πρακτικό παράδειγμα του HIL. Στην περίπτωση αυτή, ο προσομοιωτής (π.χ. ένα XBOX360) μιμείται μια εικονική πολεμική σκηνή που αλλάζει συνεχώς ανάλογα με την αντίδραση του υλικού (ο ανθρώπινος χρήστης). Όταν ο χρήστης λάβει την εικόνα μέσα από την οθόνη της τηλεόρασης, λαμβάνει αποφάσεις πραγματικού χρόνου και στέλνει εντολές πίσω στον προσομοιωτή μέσω του χειριστηρίου. Η οθόνη, τα μάτια του ανθρώπου, και το χειριστήριο περιλαμβάνονται στο περιβάλλον HIL.



Εικόνα 4.1 Τα τρία στοιχεία μιας προσομοίωσης HIL [15]

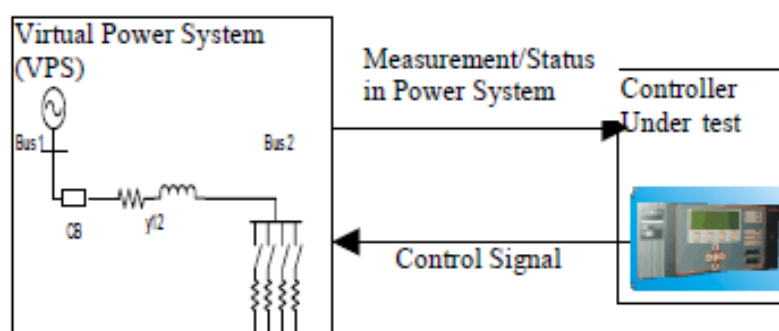
Παρουσιάζουμε συγκεντρωμένα μερικούς από τους λόγους που μπορεί να επιβάλλουν τη χρήση της τεχνικής HIL [16]:

- Το σύστημα είναι δυσπρόσιτο. Για παράδειγμα, ένας δορυφόρος που έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί στο περιβάλλον μηδενικής βαρύτητας του διαστήματος δε μπορεί να δοκιμαστεί κάτω από τις συνθήκες που επικρατούν στη γη. Ο μόνος τρόπος είναι να μοντελοποιηθεί η δυναμική του δορυφόρου και να ασκηθεί ο έλεγχος με κατάλληλο hardware.
- Η δόκιμη ενδέχεται να βλάψει το σύστημα
- Η δόκιμη με το φυσικό σύστημα μπορεί να θύσει σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές
- Άλλοι οικονομικοί λόγοι

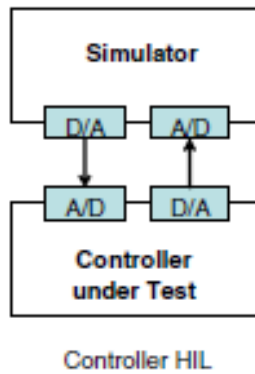
Διακρίνουμε 2 κατηγορίες της τεχνικής Hardware-in-loop. Την τεχνική Control Hardware In Loop και την Power Hardware In Loop. Οι δυο αυτές τεχνικές αναπτύσσονται παρακάτω.

4.1.1 Control hardware in loop

Όταν δεν υπάρχει μεταφορά ενέργειας από ή προς το υλικό υπό δοκιμή, η δοκιμή είναι μια Control Hardware In Loop προσομοίωση. Σε αυτή τη περίπτωση, όλες οι συσκευές ισχύος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι απεικονισμένες σε μια προσομοίωση ως Virtual Power System (VPS) και το εξωτερικό υλικό δίνει σήματα ελέγχου στον υπολογιστή. Έτσι, το πλήρες σύστημα προσομοίωσης και η συσκευή είναι συνδεδεμένα σε χαμηλό επίπεδο τάσης της τάξης των ± 10 volt και γίνεται ανταλλαγή ψηφιακών / αναλογικών σημάτων. Έτσι, ο ελεγκτής θα μπορούσε να δοκιμαστεί με τη λήψη σήματος εξόδου από την προσομοίωση και τη χρησιμοποίησή του ως είσοδος σε μια συσκευή υπό δοκιμή. Η έξοδος της συσκευής υπό δοκιμή, στη συνέχεια, ανατροφοδοτεί την προσομοίωση, με αποτέλεσμα την αλληλεπίδραση της με το προσομοιωμένο σύστημα. Η δομή αυτού του τύπου δοκιμής φαίνεται στην εικόνα 4.2 ενώ στην εικόνα 4.3 βλέπουμε την γενική τοπολογία του CHIL.



Εικόνα 4.2 Δομή μιας CHIL προσομοίωσης [17]



Εικόνα 4.3 Γενική τοπολογία της CHIL προσομοίωσης

Αυτός ο τύπος ελέγχου παρέχει βασική αξιολόγηση της απόδοσης μιας συσκευής πριν αυτή πραγματικά συνδεθεί με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Εξοπλισμός προστασίας, έλεγχος κινητήρα και PWM ελεγκτές είναι κατάλληλα για μια δοκιμή CHIL. Τέλος, η χρήση της τεχνικής CHIL επιτρέπει πολλαπλά σενάρια δοκιμής χωρίς να γίνει μεγάλη επένδυση.

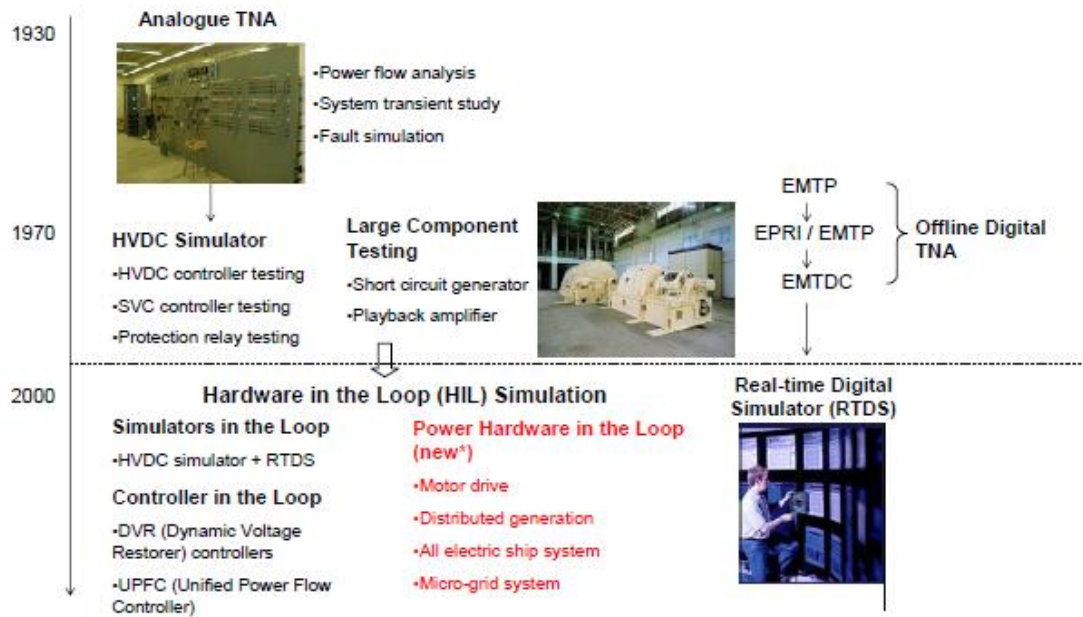
4.1.2 Power Hardware In Loop

4.1.2.1 Εισαγωγή

Η δεύτερη τεχνική HIL είναι η Power Hardware In Loop. Αναφέρεται σε περιπτώσεις όπου το δοκίμιο (Hardware under test, HUT) είναι μια συσκευή ισχύος, πχ ένας κινητήρας, ένας αντιστροφέας ισχύος κτλ. Απαραίτητη είναι σε αυτήν την περίπτωση η χρήση μιας συσκευής (interface) για την διακίνηση της ισχύος ανάμεσα στο δοκίμιο και την προσομοίωση.

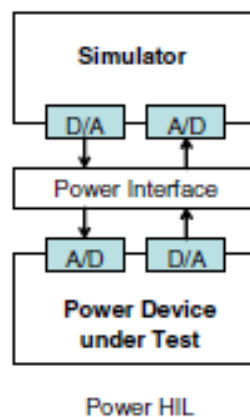
4.1.2.2 Ανάλυση PHIL

Η πρώτη προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενεργείας, πραγματοποιήθηκε στη δεκαετία του 1930. Από τότε και έπειτα έχουν πραγματοποιηθεί πολλές αλλαγές, οι οποίες συνοψίζονται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 4.4 Η ιστορική εξέλιξη της PHIL προσομοίωσης [15]

Αναλυτικές πληροφορίες για την ιστορική εξέλιξη του PHIL μπορούν να βρεθούν στο [15]. Η τεχνική PHIL εφαρμόζεται στις περιπτώσεις όπου υπάρχει μεταφορά ισχύος από ή προς το εξέταση υλικό. Σε αυτήν την περίπτωση, μέρος του συστήματος ισχύος έχει προσομοιωθεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και ένα μέρος του συστήματος βρίσκεται συνδεδεμένο εξωτερικά. Η τοπολογία αυτή είναι ικανή για μεταφορά ισχύος μεταξύ του εικονικού συστήματος και του δοκιμαζόμενου υλικού. Οι PHIL τεχνικές είναι διαφορετικές από ότι οι CHIL τεχνικές, οι οποίες περιορίζονται σε εφαρμογές ελέγχου. Μια γενική τοπολογία για την τεχνική PHIL παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 4.5 Γενική τοπολογία της PHIL προσομοίωσης

Βλέπουμε ότι χρησιμοποιείται μια συσκευή (interface) για την διασύνδεση της προσομοίωσης με την υπό εξέταση συσκευή (HUT). Αυτή η συσκευή θα πρέπει είτε να παράγει, είτε να απορροφά ισχύ ώστε πραγματική ισχύς να μπορεί να ανταλλαχτεί μεταξύ της προσομοίωσης και του HUT. Η ύπαρξη αυτού του interface επηρεάζει τα αποτελέσματα

της προσομοίωσης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του. Η επιλογή επομένως θα πρέπει να γίνει προσεκτικά, μελετώντας πάντα το είδος των φαινομένων που θα εξεταστούν, αν πρόκειται δηλαδή για μεταβατικά φαινόμενα ή μόνιμης κατάστασης φαινόμενα.

Στην ιδανική περίπτωση το interface μεταξύ του HUT και του προσποιομένου δικτύου θα πρέπει να έχει μοναδιαίο κέρδος, άπειρο bandwidth και να μην προσθέτει χρονική καθυστέρηση στην προσομοίωση, με στόχο την καλύτερη αναπαράσταση του ιδανικού δικτύου. Στην πραγματικότητα όμως αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί, με αποτέλεσμα όλες οι PHIL προσομοιώσεις να περιέχουν σφάλματα που προέρχονται από τις επιδράσεις του interface. Η μη ιδανικότητα του interface μπορεί να προκαλέσει επομένως εσφαλμένα αποτελέσματα ή και ακόμα αστάθεια στην προσομοίωση της ιδανικής τοπολογίας. Παρακάτω θα αναλυθούν διεξοδικά τα ζητήματα αυτά της ευστάθειας και της ακρίβειας μιας προσομοίωσης PHIL.

4.1.2.3 Το πρόβλημα της ευστάθειας σε μια προσομοίωση PHIL

Ένα από τα πιο σημαντικά βήματα στην πραγματοποίηση μιας PHIL προσομοίωσης είναι η ευστάθεια του κλειστού βρόχου. Σε περίπτωση αστάθειας όχι μόνον λαμβάνουμε εσφαλμένα αποτελέσματα αλλά είναι πιθανόν να καταστρέψουμε ακριβό εξοπλισμό όπως για παράδειγμα το HUT. Λόγω των φυσικών ανακρίβειών, όπως χρονική καθυστέρηση (time delay), περιορισμένο εύρος ζώνης (bandwidth), αρμονικές που παράγονται από τον ενισχυτή interface, μια προσομοίωση PHIL είναι επιρρεπής σε αστάθεια [18]. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος. Για να φανεί αυτό, μια απλή εφαρμογή PHIL απεικονίζεται στην εικόνα 4.6. Αποτελείται από ένα κύκλωμα διαιρέτη τάσης όπου η αντίσταση φορτίου Z_L , είναι μια φυσική αντίσταση, ενώ τα υπόλοιπα μέρη του κυκλώματος (πηγή τάσης V_S , και η αντίσταση της πηγής Z_S) είναι προσομοιωμένες. Για να υλοποιηθεί αυτό, ένας ενισχυτής τάσης αναπαράγει την προσομοιωμένη τάση V_1 ως μια φυσική τάση V_2 και την επιβάλλει πάνω στην αντίσταση φορτίου. Το πραγματικό ρεύμα I_2 που ρέει από την αντίσταση μετριέται και το σήμα μέτρησης ανατροφοδοτείται στην προσομοίωση μέσω πηγής ρεύματος I_1 .

Ακόμα κι αν το αρχικό κύκλωμα είναι γνωστό ότι είναι ευσταθές, η εφαρμογή του στο πλαίσιο της προσομοίωσης PHIL δεν είναι. Μια εξήγηση δίνεται κάτω από την παραδοχή ότι η προσομοίωση γίνεται σε διακριτό χρόνο, πράγμα το οποίο συμβαίνει συνήθως στην πράξη.

Ας υποθέσουμε ότι την χρονική στιγμή t_k ένα σφάλμα ε συμβαίνει κατά την ενίσχυση της τάσης V_2 . Το σφάλμα στην περίπτωση αυτήν μεταφέρεται ως σφάλμα στο ρεύμα I_2 .

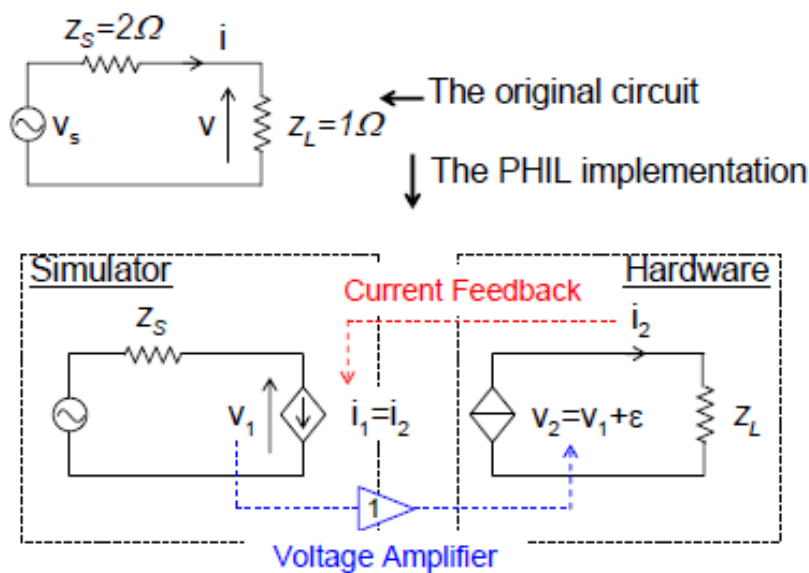
$$\Delta V_2(t_k) = \varepsilon \ \& \ I_2 = V_2/Z_L \rightarrow \Delta I_2(t_k) = \varepsilon/Z_L \quad (4.1)$$

Όταν το ρεύμα αυτό επιστρέψει πίσω στην προσομοίωση θα προκαλέσει ένα περαιτέρω σφάλμα στην τάση V_1 :

$$\Delta I_2(t_k) = \varepsilon / Z_L \quad \& \quad V_1 = V_S - Z_S * I_1$$

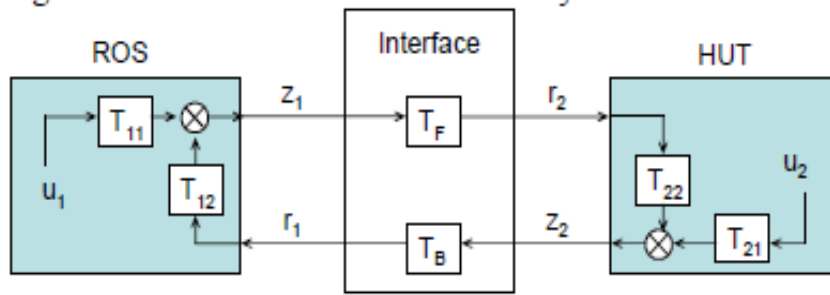
$$\rightarrow \Delta V_1(t_{k+1}) = -(Z_S / Z_L) \varepsilon \quad (4.2)$$

Με την αποστολή αυτής της ενημερωμένης τιμής του V_1 στο νέο χρονικό βήμα, το προηγούμενο σφάλμα ουσιαστικά ενισχύεται από έναν παράγοντα $- Z_S / Z_L$. Όσο $Z_S / Z_L > 1$, το σφάλμα θα συνεχίσει να αυξάνεται σε μέγεθος μέχρι να φτάσει το όριο του υλικού. Αυτό το φαινόμενο θα εξεταστεί μέσω της ανάλυσης ευστάθειας στην επόμενη ενότητα.



Εικόνα 4.6 Μια εφαρμογή PHIL σε ένα διαίρετη τάσης [18]

Ένα σύστημα PHIL μπορεί να αναπαρασταθεί από μια σειρά μπλοκ συναρτήσεων μεταφοράς, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.7. Στο διάγραμμα, u_1 , u_2 είναι οι εισοδοί στην προσομοίωση του συστήματος και στο υλικό αντίστοιχα, και z_1 , z_2 , r_1 , r_2 είναι τα σήματα του interface που μεταδίδονται μεταξύ των δυο υποσυστημάτων.



Εικόνα 4.7 Μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος σε μια προσομοίωση PHIL. Το μοντέλο του προσομοιωμένου δικτύου βρίσκεται στα αριστερά ενώ το μοντέλο του Hardware Under Test στα δεξιά [18]

Για να είναι το σύστημα PHIL στην εικόνα 4.7 ευσταθές θα πρέπει τόσο η προσομοίωση του δικτύου όσο και του υλικού υπό δοκιμή, να είναι ευσταθή συστήματα και ο βρόχος ανάδρασης θα πρέπει να έχει μόνο πόλους, με αρνητικά πραγματικά μέρη. Με άλλα λόγια θα πρέπει η συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου G_{OL} να πληρεί τις προϋποθέσεις που θέτει το κριτήριο Nyquist.

$$G_{OL} = T_{12} T_B T_{22} T_F \quad (4.3)$$

Εφαρμόζοντας αυτήν την ανάλυση στο σύστημα της εικόνας 4.6 και υποθέτοντας ότι το interface είναι ιδανικό με μοναδιαίο κέρδος, εκτός από μια χρονική καθυστέρηση που εισάγει στην ενίσχυση του σήματος, λαμβάνουμε τα εξής:

$$\begin{aligned} u_1 &= v_s, T_{11} = 1, T_{12} = -z_s \\ z_1 &= v_1, r_2 = v_2, T_F = e^{-s\Delta t} \\ u_2 &= 0, T_{21} = 0, T_{22} = 1/z_L \\ z_2 &= i_2, r_1 = i_1, T_B = 1 \end{aligned}$$

Έτσι η συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου θα γίνει:

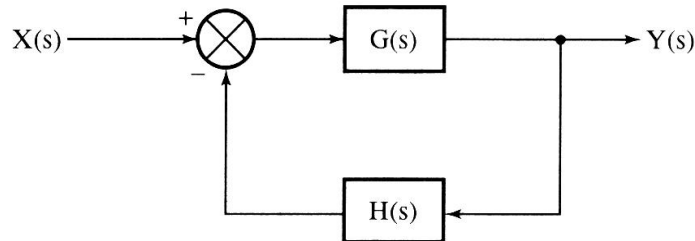
$$G_{OL} = T_{12} T_B T_{22} T_F = -\frac{Z_s}{Z_L} e^{-s\Delta t} \quad (4.4)$$

Καθώς Z_s / Z_L ισούται με 2 και $e^{-s\Delta t}$ αντιπροσωπεύει μια σταθερή πτώση φάσης όταν η συχνότητα αυξάνεται, το διάγραμμα Nyquist του G_{OL} είναι ένα σύνολο από κύκλους με ακτίνα 2. Το σημείο (-1, 0) είναι περικυκλωμένο από το διάγραμμα του G_{OL} άπειρες φορές, πράγμα που δείχνει ένα ασταθές σύστημα.

4.1.2.4 Το κριτήριο ευστάθειας Nyquist

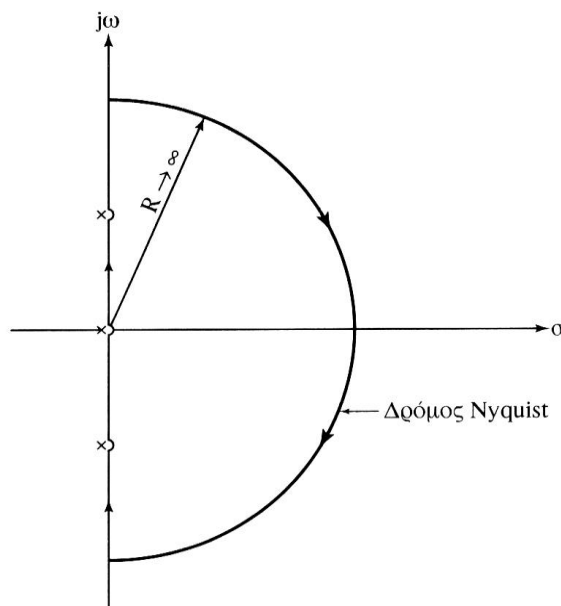
Έστω το κλειστό σύστημα της εικόνας 4.8. Η συνάρτηση μεταφοράς $H(s)$ του κλειστού συστήματος θα είναι

$$H(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (4.5)$$



Εικόνα 4.8 Διάγραμμα βαθμίδων κλειστού συστήματος

Το κριτήριο ευστάθειας Nyquist βασίζεται στη γραφική παράσταση της συνάρτησης μεταφοράς ανοιχτού βρόχου $G(s)H(s)$, για ένα ειδικό κλειστό δρόμο στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας s και παρέχει πληροφορίες όχι μόνο για την ευστάθεια των κλειστών συστημάτων αλλά και για την σχετική ευστάθεια τους. Ο ειδικός κλειστός δρόμος ονομάζεται δρόμος Nyquist ή περίγραμμα Nyquist και περικλείει όλο το δεξιό ημιεπίπεδο s . Το περίγραμμα Nyquist περιλαμβάνει ολόκληρο τον άξονα $j\omega$ από $\omega = -\infty$ έως $\omega = +\infty$ και μια ημικυκλική διαδρομή με άπειρη ακτίνα στο δεξιό ημιεπίπεδο, διανύεται δε δεξιόστροφα (εικόνα 4.9) [19].



Εικόνα 4.9 Κλειστός δρόμος Nyquist [19]

$$\text{Ισχύει } Z = N + P \quad (4.6)$$

όπου

Z = οι ρίζες της Χαρακτηριστικής Εξίσωσης $1 + G(s)H(s) = 0$ στο δεξιό ημιεπίπεδο

N = ο αριθμός των περικυκλώσεων του σημείου $-1 + j0$ δεξιόστροφα από την $G(j\omega)H(j\omega)$

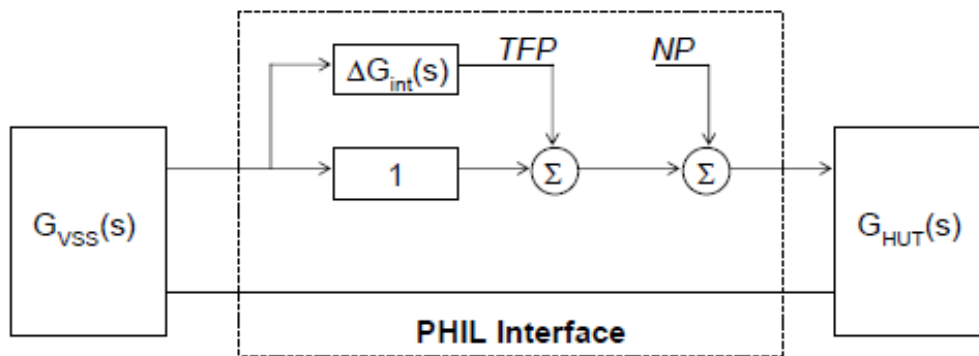
P = ο αριθμός των πόλων της $G(s)H(s)$ στο δεξιό ημιεπίπεδο s

Βάσει του κριτηρίου Nyquist για να είναι το κλειστό σύστημα ευσταθές πρέπει $Z = 0$ δηλαδή να μην υπάρχουν ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης στο δεξιό μιγαδικό ημιεπίπεδο και επομένως πρέπει $N = -P$. Αυτό σημαίνει ότι το περίγραμμα $G(j\omega)H(j\omega)$ περικυκλώνει το σημείο $-1 + j0$ P φορές, με φορά αριστερόστροφη [19].

4.1.2.5 Το πρόβλημα της ακρίβειας σε μια προσομοίωση PHIL

Ακόμα και ένα ευσταθές PHIL σύστημα δεν εξασφαλίζει την καταλληλότητα του συστήματος. Εκτός από ευσταθές μια PHIL προσομοίωση θα πρέπει να είναι και ακριβής. Παρόλα αυτά όμως η εκτίμηση της ακρίβειας μιας τέτοιας προσομοίωσης μπορεί να είναι δύσκολη ή και αδύνατη αν δεν υπάρχει κάποιο σύστημα αναφοράς. Διαφορετικά θα είχαμε τα αποτελέσματα οπότε μια PHIL προσομοίωση δεν θα ήταν αναγκαία από την αρχή. Η ακρίβεια σε μια προσομοίωση PHIL επηρεάζεται από σφάλματα που πιθανόν να προκύψουν σε μια προσομοίωση.

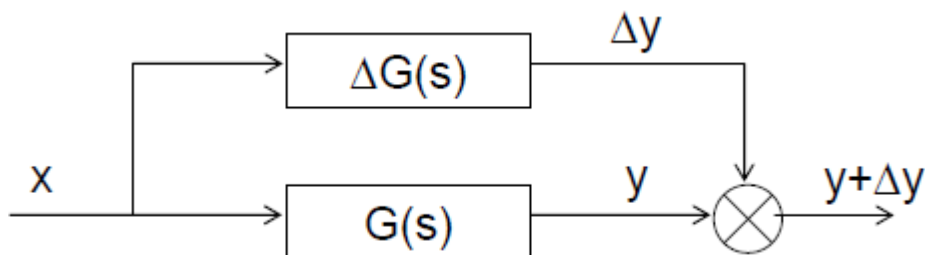
Τα σφάλματα σε μια προσομοίωση PHIL προέρχονται κυρίως από διαταραχές που προκαλούνται από την μη ιδανικότητα του interface. Αυτές οι διαταραχές μπορεί να είναι η χρονική καθυστέρηση στη μετάδοση σήματος, το βαθυπερατό φίλτρο που βρίσκεται συνήθως στην έξοδο του ενισχυτή interface, ή στο θόρυβο του αισθητήρα. Για τη διευκόλυνση της ανάλυσής μας, δύο κατηγορίες διαταραχών ορίζονται και απεικονίζονται στην εικόνα 4.10. Η συνάρτηση μεταφοράς της διαταραχής (Transfer Function Perturbation, TFP) οφείλεται στην μη ιδανικότητα του interface. Παραδείγματα αυτού του τύπου της διαταραχής μπορεί να είναι η χρονική καθυστέρηση στην μετάδοση του σήματος ή η επίδραση του χαμηλοπερατού φίλτρου στην έξοδο του ενισχυτή. Η διαταραχή λόγω του θορύβου (Noise Perturbation, NP) αναφέρεται σε σφάλματα που οφείλονται σε εξωτερικούς θορύβους όπως για παράδειγμα θορύβους από τον αισθητήρα μέτρησης του σήματος ανατροφοδότησης ή υψηλής συχνότητας αρμονικές που παράγονται από διαμόρφωση PWM [15].



Εικόνα 4.10 Οι δυο τύποι διαταραχών του interface σε μια προσομοίωση PHIL [15]

4.1.2.5.1 Η διαταραχή τύπου TFP

Για να αξιολογηθεί το σφάλμα που προκαλείται από αυτό το είδος της διαταραχής, ας ορίσουμε πρώτα το σφάλμα εξετάζοντας έναν ανοικτό βρόχο όπως αυτόν της εικόνας 4.11. Σε αυτό το σύστημα, το x είναι η είσοδος, το $G(s)$ είναι η σωστή (ή αυτή που θα έπρεπε να είναι) συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος, ενώ ΔG αντιπροσωπεύει μια διαταραχή της συνάρτησης μεταφοράς. Η σωστή έξοδος του συστήματος είναι y ενώ το αποτέλεσμα της διαταραχής, λόγω του ΔG , είναι Δy . Επειδή το σύστημα είναι γραμμικό, τόσο το Δy όσο και το y περιέχουν τα ίδια χαρακτηριστικά όπως συχνότητα με το σήμα x στην είσοδο. Επομένως ένα λογικό μέτρο για να αξιολογηθεί το σφάλμα του συστήματος αυτού είναι να ληφθεί η αναλογία του μεγέθους του Δy προς y [15].



Εικόνα 4.11 Ένα απλό σύστημα ανοικτού βρόχου με μια ΔG διαταραχή στη συνάρτηση μεταφοράς

Ας θεωρήσουμε ως είσοδο στο σύστημα της μορφής:

$$x(t) = x_0 e^{j\omega t} \quad (4.7)$$

Στο παραπάνω, x_0 είναι το πλάτος της εισόδου και ω είναι η συχνότητα σε rad / sec. Η έξοδος y μπορεί στη συνέχεια να υπολογιστεί με την υπόθεση ότι οι αρχικές συνθήκες είναι μηδέν.

$$y(t) = \int_{-\infty}^t g(t-\tau)x_0 e^{j\omega\tau} d\tau = \int_{-\infty}^t g(t-\tau)e^{j\omega\tau} d\tau x_0 \quad (4.8)$$

Αντικαθιστώντας $t_1 = t - \tau$ θα έχουμε

$$y(t) = \int_0^{\infty} g(t_1)e^{-j\omega t_1} dt_1 x_0 e^{j\omega t} = G(j\omega)x_0 e^{j\omega t} \quad (4.9)$$

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιεί τον ορισμό του μετασχηματισμού Fourier. Με τον ίδιο τρόπο θα έχουμε:

$$\Delta y(t) = \Delta G(j\omega)x_0 e^{j\omega t} \quad (4.10)$$

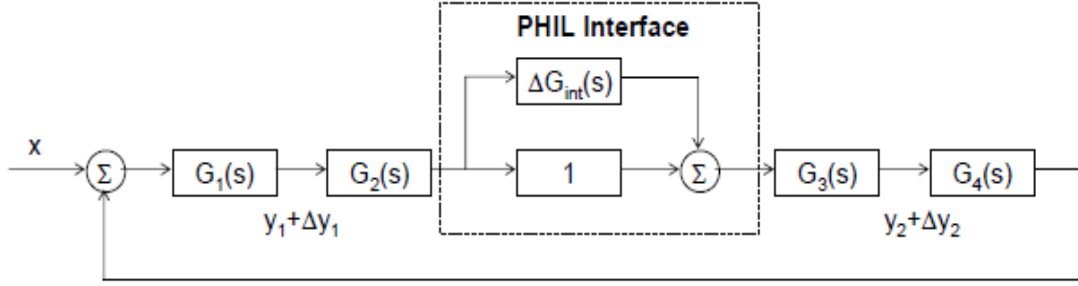
Το σφάλμα E_{TFP} ως ο λόγος του Δy προς y για κάθε συχνότητα θα είναι.

$$E_{TFP} = \frac{|\Delta y|}{|y|} = \frac{|\Delta G(j\omega)x_0 e^{j\omega t}|}{|G(j\omega)x_0 e^{j\omega t}|} = \frac{|\Delta G(j\omega)|}{|G(j\omega)|} = \left| \frac{\Delta G(j\omega)}{G(j\omega)} \right| \quad (4.11)$$

Όταν διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας απαιτούνται για διαφορετικές συχνότητες, ο συντελεστής W_o εισέρχεται στην παραπάνω σχέση και επομένως έχουμε [15]:

$$E_{TFP} = \left| W_o(j\omega) \frac{\Delta G(j\omega)}{G(j\omega)} \right| \quad (4.12)$$

Η συνάρτηση σφάλματος που βρέθηκε δεν μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα σε κλειστού βρόχου συστήματα, όπως μια προσομοίωση PHIL. Για να βρούμε την αντίστοιχη συνάρτηση μεταφοράς G εδώ, ας θεωρήσουμε το γενικευμένο διάγραμμα ενός συστήματος PHIL όπως φαίνεται στην εικόνα 4.12. Αφού ένας ιδανικός PHIL ενισχυτής έχει μοναδιαίο κέρδος, μηδενική χρονική καθυστέρηση και άπειρο εύρος ζώνης, χρησιμοποιούμε το "1" ως την ιδανική συνάρτηση μεταφοράς του interface. Επίσης παριστάνουμε την διαταραχή του interface ως ΔG_{int} . Οι έξοδοι του συστήματος μπορεί και μόνο μπορεί να είναι είτε y_1 είτε y_2 καθορίζοντας κατάλληλα τα μπλοκ από το G_1 στο G_4 . Για να μελετήσουμε το σφάλμα προσομοίωσης, θα πρέπει να βρούμε το σφάλμα για καθεμία από τις δύο εξόδους.



Εικόνα 4.12 Ένα σύστημα κλειστού βρόχου με ΔG_{int} διαταραχή στο interface [15]

Ας θεωρήσουμε y_1 την έξοδο του συστήματος που μας ενδιαφέρει. Το σωστό αποτέλεσμα του y_1 , όταν δεν υπάρχει διατάραξη από το interface, είναι:

$$y_1(t) = \frac{G_1(j\omega)}{1 - G_4(j\omega)G_3(j\omega)G_2(j\omega)G_1(j\omega)} x_0 e^{j\omega t} = \frac{G_1(j\omega)}{1 - G_{LP}(j\omega)} x_0 e^{j\omega t} \quad (4.13)$$

Όπου $G_{LP}(j\omega) = G_4(j\omega)G_3(j\omega)G_2(j\omega)G_1(j\omega)$ η συνάρτηση μεταφοράς του ανοικτού βρόχου χωρίς τη διατάραξη από το interface. Και πάλι υποθέτουμε ότι η είσοδος είναι της μορφής $x = e^{j\omega t}$. Η πραγματική έξοδος y_1 που προκύπτει, με τη διαταραχή στο interface είναι:

$$y_1(t) + \Delta y_1(t) = \frac{G_1}{1 - G_4 G_3 (1 + \Delta G_{int}) G_2 G_1} x_0 e^{j\omega t} = \frac{G_1}{1 - G_{LP} (1 + \Delta G_{int})} x_0 e^{j\omega t} \quad (4.14)$$

Ο όρος του $j\omega$ παραλείπεται από την παραπάνω εξίσωση για λόγους απλότητας. Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις έχουμε:

$$\Delta y_1(t) = \frac{G_1}{1 - G_{LP}} \frac{G_{LP} \Delta G_{int}}{1 - G_{LP} (1 + \Delta G_{int})} x_0 e^{j\omega t} \quad (4.15)$$

Διαιρώντας $\frac{\Delta y_1}{y_1}$ έχουμε:

$$E_{TFP_y1} = \left| W_O \frac{G_{LP} \Delta G_{int}}{1 - G_{LP} (1 + \Delta G_{int})} \right| \quad (4.16)$$

Με τον ίδιο τρόπο η συνάρτηση σφάλματος για την έξοδο y_2 είναι:

$$E_{TFP_y2} = \left| W_O \frac{\Delta G_{int}}{1 - G_{LP} (1 + \Delta G_{int})} \right| \quad (4.17)$$

Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι και οι δύο συναρτήσεις σφάλματος εκφράζονται από την διαταραχή ΔG_{int} του interface και τη συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου $G_{LP} j\omega = G_4 j\omega G_3 j\omega G_2 j\omega G_1 j\omega$. Η ατομική έκφραση των μπλοκ G1 μέχρι G4 δεν επηρεάζει τα σφάλματα αρκεί το γινόμενο τους να είναι ίδιο. Το γεγονός αυτό επικυρώνει τη γενικότητα του διαγράμματος της εικόνας 4.12 [15].

Η χρήση είτε του E_{TFP_y1} είτε του E_{TFP_y2} καθορίζεται από το μέγεθος που ενδιαφέρει κάθε φορά και το συνολικό σφάλμα προσομοίωσης είναι το μέγιστο των δυο μεγεθών

$$E_{TFP} = \max(E_{TFP_y1}, E_{TFP_y2}) \quad (4.18)$$

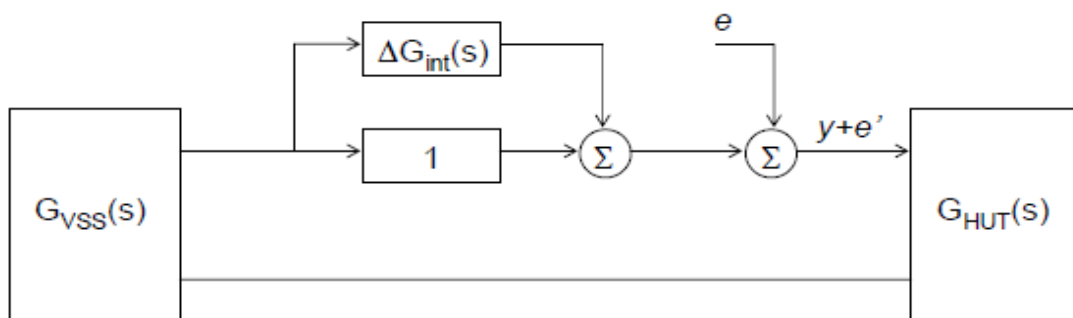
4.1.2.5.2 Η διαταραχή τύπου NP

Σε αντίθεση με το TFP, το δεύτερο είδος της διαταραχής έρχεται απευθείας από εξωτερικούς θορύβους που εγχέονται στο σύστημα. Ο θόρυβος δεν επηρεάζει το σήμα εισόδου x αλλά επηρεάζει το σήμα εξόδου y . Ως εκ τούτου, διακρίνουμε αυτό το είδος σφάλματος θορύβου (NP) από το TFP.

Η συνάρτηση σφάλματος αυτού του είδους περιγράφεται στην παρακάτω σχέση:

$$E_{NP} = \left| \frac{e'}{e} W_I \right| = \left| \frac{W_I}{1 - G_{LP}(1 + \Delta G_{int})} \right| \quad (4.19)$$

ενώ το σχεδιάγραμμα του συστήματος στην εικόνα 4.13.



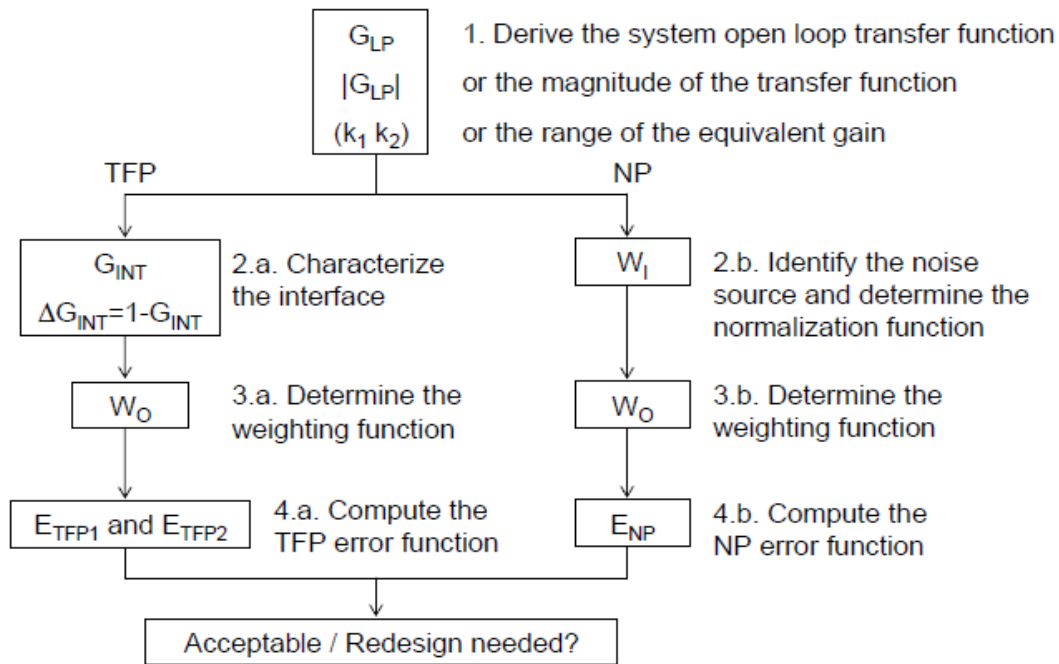
Εικόνα 4.13 Το διάγραμμα της προσομοίωσης PHIL όταν ένα σφάλμα NP είναι παρόν

Σημειώνεται πως W_I είναι ένας συντελεστής βαρύτητας. Για παράδειγμα, πολλοί αισθητήρες καθορίζουν το μέγιστο θόρυβο τους ως ένα ορισμένο ποσοστό της ονομαστικής μετρούμενης τιμής. Αυτή η τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί το W_I . Και πάλι, αν επιθυμούμε διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας για διαφορετικές συχνότητες, χρησιμοποιούμε έναν συντελεστή W_o στη συνάρτηση σφάλματος τύπου NP.

$$E_{NP} = \left| W_O \frac{W_I}{1 - G_{LP} (1 + \Delta G_{int})} \right| \quad (4.20)$$

4.1.2.5.3 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας αξιολόγησης της ακρίβειας μιας PHIL προσομοίωσης

Συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτει το διάγραμμα ροής της εικόνας 4.14.



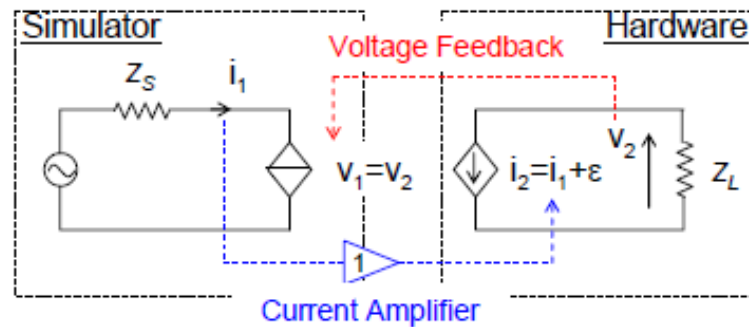
Εικόνα 4.14 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας αξιολόγησης της ακρίβειας μιας PHIL προσομοίωσης [15]

4.1.2.6 Τοπολογίες σύνδεσης του interface (Interface algorithms)

Για να καταλάβουμε τι σημασία των διαφόρων τρόπων με τους οποίους μπορούμε να συνδέσουμε το interface με το πραγματικό αλλά και το προσομοιωμένο σύστημα, ας θεωρήσουμε το κύκλωμα της εικόνας 4.6. Το σχήμα αυτό δείχνει μια εφαρμογή PHIL πάνω σε έναν διαιρέτη τάσης στον οποίο το Z_L είναι μια πραγματική αντίσταση, ενώ τα υπόλοιπα μέρη του κυκλώματος (πηγή και Z_S αντίσταση) είναι προσομοιωμένες.

Είδαμε προηγουμένως ότι για $Z_S > Z_L$ το σύστημα είναι ασταθές, ασχέτως αν το αρχικό ιδανικό κύκλωμα είναι ευσταθές. Αν το ίδιο κύκλωμα υλοποιηθεί με διαφορετικό τρόπο, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.15 θα βρούμε ένα εντελώς διαφορετικό αποτέλεσμα. Σε αυτή

τη νέα ρύθμιση, το ρεύμα I_1 (αντί της τάσης V_1) ενισχύεται και η τάση V_2 (αντί του ρεύματος I_2) μετριέται και επιστρέφει πίσω στον εξομοιωτή. Ακολουθώντας τα ίδια βήματα όπως κάναμε στην προηγούμενη ανάλυση θα δούμε ότι ο παράγοντας ενίσχυσης για το σφάλμα ισούται με $-(Z_L/Z_S)$, αυτή τη φορά. Το μέγεθος του όρου αυτού είναι μικρότερο του 1, επομένως το σφάλμα θα μειώνεται συνεχώς οδηγώντας σε μια ευσταθής προσομοίωση [15].



Εικόνα 4.15 Μια εναλλακτική PHIL τοπολογία του διαιρέτη τάσης

Το παράδειγμα αυτό δείχνει ότι με τη λήψη διαφορετικής τοπολογίας για την υλοποίηση μιας PHIL προσομοίωσης, η ευστάθεια του συστήματος και η ακρίβεια μπορούν να αλλάξουν. Για να γίνει διαχωρισμός των τοπολογιών, εισάγουμε το όνομα "Αλγόριθμος Interface" (Interface Algorithm, IA)". Κάθε τοπολογία IA ορίζει τον τύπο των μεταδιδόμενων σημάτων (π.χ., τάση, ρεύμα, ισχύς, ροπή, κ.α.) σε ένα PHIL σύστημα, και τον τρόπο με τον οποίο τα σήματα υποβάλλονται σε επεξεργασία. Παρακάτω θα αναφέρουμε πέντε υπάρχουσες τοπολογίες IA. Αξίζει να σημειωθεί ένα πράγμα σε αυτό το σημείο. Αν και τα σήματα σε μια προσομοίωση PHIL μπορεί να είναι οποιοδήποτε είδους, η τάση και το ρεύμα είναι τα δύο που χρησιμοποιούνται πιο συχνά σε μια εφαρμογή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό, και οι πέντε αλγόριθμοι που περιγράφονται παρακάτω θεωρούν την τάση και το ρεύμα ως τα μεταφερόμενα σήματα.

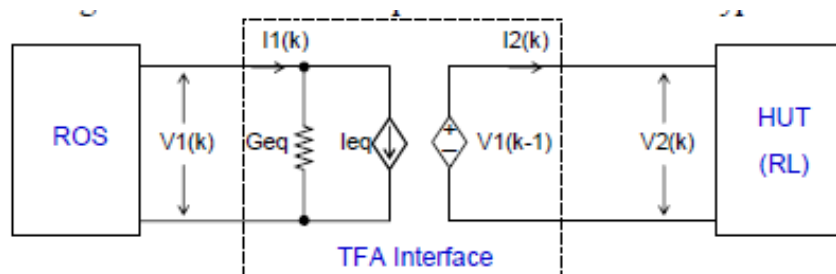
A) Ideal Transformer Model (ITM)

Ο αλγόριθμος ιδανικού μοντέλου μετασχηματιστή ITM είναι ένας από τους πιο συμβατικούς και απλούς σε μια προσομοίωση PHIL. Ανάλογα με το είδος των σημάτων που θα ενισχυθούν, κατηγοριοποιείται είτε ως τάσης (όπως αυτό στην εικόνα 4.6) είτε ως ρεύματος (όπως αυτό στην εικόνα 4.15).

B) Time-variant First-Order Approximation (TFA)

Ο αλγόριθμος (TFA) βασίζεται στην απλουστευτική παραδοχή ότι το υλικό υπό δοκιμή σε μια προσομοίωση HIL μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα πρώτης τάξης γραμμικό σύστημα (RL ή RC κύκλωμα). Με τα καταγεγραμμένα δεδομένα της προσομοίωσης, οι συντελεστές

του υλικού υπό δοκιμή μπορούν να λυθούν και να ενημερώνονται αμέσως κατά τη διάρκεια του πειράματος. Ο αλγόριθμος TFA είναι ουσιαστικά μια μέθοδος πρόβλεψης. Μοντελοποιεί το υλικό υπό δοκιμή και χρησιμοποιεί το μοντέλο αυτό για να προβλέψει τις μεταβλητές κατάστασης.



Εικόνα 4.16 Τοπολογία του TFA IA

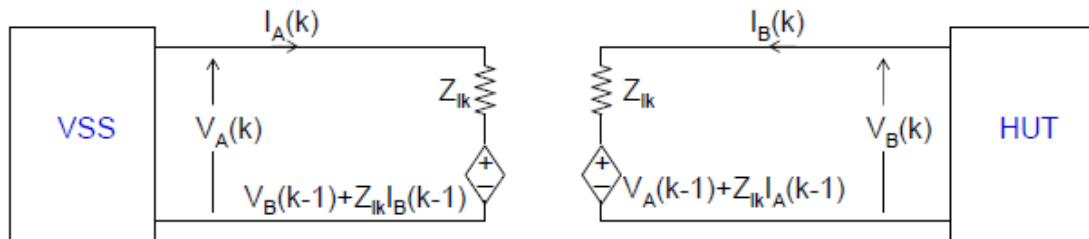
Όπως κάθε άλλη μέθοδο πρόβλεψης, ο αλγόριθμος TFA έχει περιορισμούς σε μη γραμμικά συστήματα και υψηλής συχνότητας σήματα. Άλλα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν [18]:

- Αστάθεια: Λόγω της πρόβλεψης της συμπεριφοράς της, η μέθοδος είναι ακόμη πιο ευάλωτη στην αστάθεια από τον αλγόριθμο ιδανικού μοντέλου μετασχηματιστή.
- Διαφορετικοί τύποι φορτίων (δηλ., RC ή RL) απαιτούν διαφορετικούς αλγορίθμους TFA. Αυτό καθιστά τη χρήση του περίπλοκη και μερικές φορές ακατάλληλη, αν το φορτίο εναλλάσσεται μεταξύ RL και RC φορτίου.
- Ειδική μέριμνα πρέπει να ληφθεί κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας. Κατάλληλα αρχικά δεδομένα πρέπει να επιλέγονται για να μειωθεί ο χρόνος σύγκλισης.
- Η μέθοδος TFA είναι ευαίσθητη στο θόρυβο. Δεδομένου ότι το χρονικό βήμα της προσομοίωσης είναι συνήθως μικρό, η μεταβολή της τάσης και του ρεύματος από δύο διαδοχικά χρονικά βήματα είναι επίσης μικρή. Ως εκ τούτου, τυχόν θόρυβος στον αισθητήρα στην τρέχουσα μέτρηση μπορεί να προκαλέσει μεγάλο σφάλμα στην προβλεπόμενη ανατροφοδότηση. Επιπλέον, αυτός ο θόρυβος δεν μπορεί να φιλτραρισθεί επειδή κάτι τέτοιο θα μειώσει κατά πολύ το εύρος ζώνης του συστήματος.

Γ) Transmission Line Model (TLM)

Η βασική ιδέα πίσω από τον αλγόριθμο είναι η μοντελοποίηση του reactive συνδετικού στοιχείου(π.χ. ενός πηνίου ή ενός πυκνωτή) μεταξύ δυο μερών ενός μεγάλου συστήματος, ως μια γραμμή μεταφοράς. Μια τέτοια μοντελοποίηση είναι έγκυρη, καθόσον η έκφραση EMTP (ElectroMagnetic Transient Program) των reactive στοιχείων μπορεί να αποδειχθεί ότι είναι η ίδια με μια γραμμή μεταφοράς. Δεδομένου ότι η γραμμή μεταφοράς έχει την ιδιότητα το κύκλωμα από τη μια πλευρά να μην μπορεί να δει την αλλαγή στο κύκλωμα της άλλης πλευράς, μέχρι τη στιγμή που φτάνει το οδεύων κύμα, το πλεονέκτημα αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί για την ξεχωριστή προσομοίωση των δύο τμημάτων του αρχικού

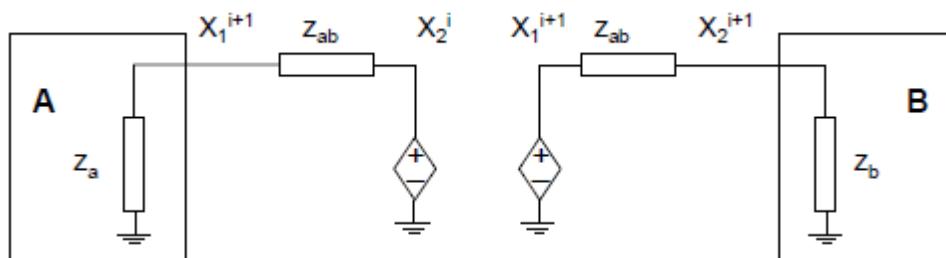
συστήματος. Δεν έχει σημασία αν το linking reactive component είναι ένα πηνίο ή πυκνωτής. Μπορεί να θεωρηθεί ως μια γραμμή μεταφοράς πρώτα και έπειτα να μοντελοποιηθεί ως Thevenin ισοδύναμο κύκλωμα (ή ένα κύκλωμα Norton). Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την τοπολογία του TLM αλγορίθμου.



Εικόνα 4.17 Τοπολογία του TLM IA

Δ) Partial Circuit Duplication (PCD)

Ο αλγόριθμος PCD προέρχεται από την τεχνική relaxation, η οποία χρησιμοποιείται σε μεγάλα λογισμικά προσομοίωσης κυκλωμάτων, όπως το SPICE. Χωρίζει το αρχικό κύκλωμα σε πολλά υποκυκλώματα και χρησιμοποιεί μεθόδους επανάληψης για τη λύση. Στο ακόλουθο σχήμα δίνεται η τοπολογία της μεθόδου αυτής.

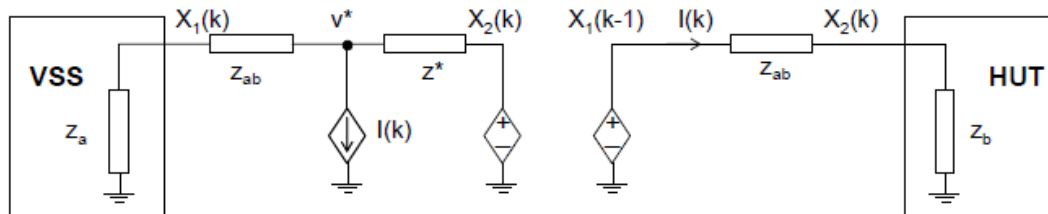


Εικόνα 4.18 Τοπολογία του PCD IA

Για ωμικά συστήματα ο αλγόριθμος PCD έχει μεγαλύτερη ευστάθεια από τη μέθοδο του ιδανικού μετασχηματιστή. Υπό την προϋπόθεση ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει σε κάθε περίπτωση, επαρκή ακρίβεια προσομοίωσης μπορεί να επιτευχθεί με την εκτέλεση επαρκή αριθμού επαναλήψεων. Ωστόσο, σε προσομοιώσεις πραγματικού χρόνου, μόνο μία επανάληψη μπορεί να ληφθεί κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος. Έτσι, το σφάλμα σε κάθε επανάληψη πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Για να διατηρηθεί η υψηλή ακρίβεια, η αξία της κοινής συνιστώσας Z_{ab} είναι προτιμότερο να είναι μεγάλη σε σύγκριση με Z_a και Z_b . Στην πράξη, όμως, αυτό είναι συνήθως δύσκολο να επιτευχθεί και, επομένως, η ακρίβεια της μεθόδου αυτής είναι συχνά χαμηλή.

E) Damping Impedance Method (DIM)

Η μέθοδος DIM είναι μία σύνθεση από τους αλγορίθμους ITM και PCD. Η εφαρμογή της σε μια τεχνική HIL παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 4.19 Τοπολογία του DIM IA

Για να ελέγξουμε τη συνέπεια με όσα έχουμε πει, θεωρούμε το εξής: όταν z^* είναι μηδέν, η τάση V^* ισούται με V_1 και η μέθοδος DIM γίνεται μέθοδος PCD. Όταν z^* είναι άπειρο, η ροή ρεύματος στο προσομοιωμένο σύστημα ισούται με I_1 και η μέθοδος DIM γίνεται μέθοδος ITM. Κατά συνέπεια, ανάλογα με την τιμή του z^* , η ευστάθεια αυτής της διασύνδεσης κινείται μεταξύ της PCD και της ITM.

Παρουσιάζουμε ένα συγκεντρωτικό πίνακα με τα διάφορα χαρακτηριστικά των interface algorithms.

Interface Algorithm	Accuracy	Stability	Ease for Implementation
ITM	***	*	***
TFA	***		
TLM	*	***	
PCD		***	**
DIM	***	**	**

Εικόνα 4.20 Πίνακας με συγκριτικά στοιχεία για τα πέντε IA σε σχέση με την ευστάθεια και την ακρίβεια

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα διάφορα IA μπορούν να αναζητηθούν στις εξής αναφορές [15] και [18].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Ο AC/DC/AC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΩΣ INTERFACE ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ PHIL

5.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος αποτελούν στις μέρες μας απαραίτητο εξοπλισμό για τον έλεγχο της συμπεριφοράς, όλων σχεδόν των διατάξεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Χρησιμοποιούνται επομένως για τον έλεγχο των μικροδικτύων, αλλά και γενικά όλων των πηγών ηλεκτρικής ενέργειας. Με τη χρήση τους επιτυγχάνουμε την παραγόμενη τάση από μια πηγή να την μετατρέψουμε είτε σε συνεχή μεταβλητής στάθμης, είτε σε εναλλασσόμενη ελεγχόμενου πλάτους και συχνότητας. Γεγονός είναι ότι χωρίς τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς θα ήταν δύσκολος ο έλεγχος όλων σχεδόν των πηγών ηλεκτρικής ενέργειας.

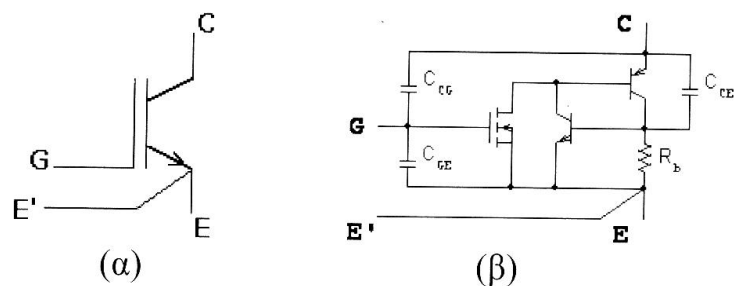
Οι μετατροπείς ισχύος χωρίζονται στις εξής βασικές κατηγορίες:

- Μετατροπείς AC/DC (ανορθωτές)
- Διακοπτικοί μετατροπείς DC/DC
- Αντιστροφείς DC/AC
- Ρυθμιστές τάσης AC/AC (AC choppers)

Σαφώς υπάρχουν και παραλλαγές των κατηγοριών αυτών όπως οι μετατροπείς AC/DC/AC, οι οποίοι λαμβάνουν στην είσοδο τους μια εναλλασσόμενη τάση και στην έξοδο δίνουν εναλλασσόμενη τάση με ελεγχόμενα πλάτος και συχνότητα. Οι βασικοί τύποι μετατροπέων που εξετάζουμε παρακάτω είναι ο αντιστροφέας DC/AC και ο μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσης AC/DC/AC. Κοινό χαρακτηριστικό και των δυο, αποτελούν τα τρανζίστορ ισχύος. Οι σύγχρονες διατάξεις χρησιμοποιούν ως επί το πλείστον τρανζίστορς τύπου IGBT.

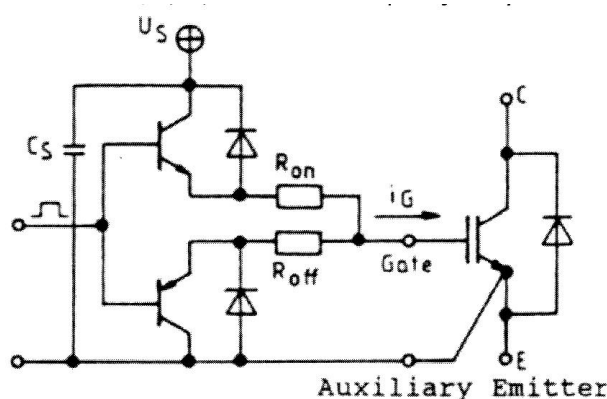
5.2 Διπολικά τρανζίστορς με μονωμένη πύλη (IGBT)

Το βασικότερο στοιχείο μιας διάταξης μετατροπέα ή αντιστροφέα ισχύος είναι τα τρανζίστορς τα οποία χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της τάσης εισόδου από τις πηγές, είτε σε άλλης στάθμης συνεχή τιμή (DC/DC) είτε σε εναλλασσόμενη (DC/AC). Η μετατροπή αυτή στηρίζεται στις διακοπτικές ικανότητες των τρανζίστορς ισχύος. Διάφοροι τύποι τρανζίστορς χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Το IGBT προέκυψε σαν ένας συμβιβασμός μεταξύ των χαρακτηριστικών του MOSFET ισχύος και του τρανζίστορ ισχύος. Έτσι μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες διακοπτικές συχνότητες από το τρανζίστορ, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να χειριστεί υψηλότερες τάσεις και ρεύματα από ένα MOSFET [7][20]. Στην εικόνα 5.1 παρουσιάζεται το σύμβολο του ημιαγωγικού διακόπτη IGBT καθώς και το ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας του.



Εικόνα 5.1 α) Σύμβολο β) ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας IGBT [20]

Οι απαιτήσεις ισχύος του κυκλώματος οδήγησης των παλμών είναι μικρές, ενώ η υψίσυχη διακοπτική λειτουργία του, δημιουργεί μεγάλες κλίσεις dv/dt . Οι μετατροπείς ισχύος με IGBT καλύπτουν ένα εύρος ισχύος που μπορεί να ξεπερνά το 1 MW με κατάλληλο παραλληλισμό των διακοπών και αποτελούν ίσως την πιο δημοφιλή λύση σε συστήματα ηλεκτρικής κίνησης σήμερα [20].

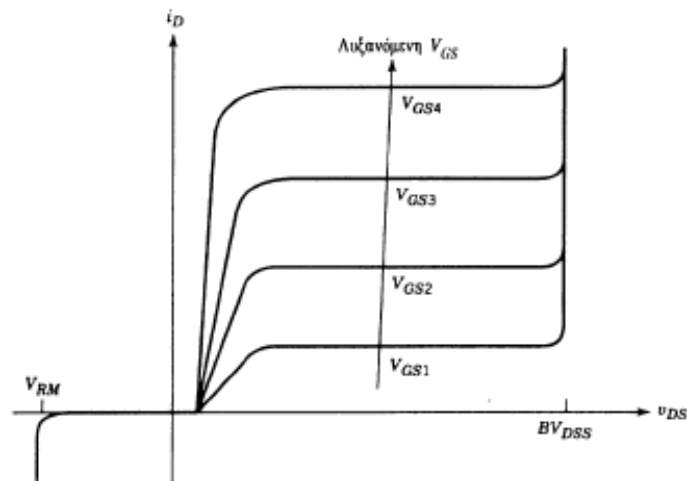


Εικόνα 5.2 Κύκλωμα οδήγησης ενός IGBT.

Στην εικόνα 5.2 παρουσιάζεται ένα απλό κύκλωμα οδήγησης για IGBTs. Αυτό το κύκλωμα οδήγησης χρησιμοποιεί δύο τρανζίστορ, ένα pnp για την έναυση του IGBT και ένα npn για την αποκοπή του. Όταν δοθεί θετικός παλμός τάσης στην είσοδο του κυκλώματος οδήγησης του IGBT τότε το npn τρανζίστορ άγει και στη συνέχεια εφαρμόζει την τάση V_s στην πύλη του IGBT και έτσι αυτό να μεταβεί στην κατάσταση αγωγής (turn-on). Η τάση V_s που εφαρμόζεται στην πύλη του IGBT είναι 13 έως 15 volts. Όταν δοθεί μηδενική ή αρνητική τάση στην είσοδο του κυκλώματος οδήγησης του IGBT τότε το pnp τρανζίστορ άγει και στη συνέχεια γειώνει την πύλη του IGBT με αποτέλεσμα αυτό να μεταβεί στην κατάσταση αποκοπής (turn-off) εκφορτίζοντας τις παρασιτικές χωρητικότητες του μέσω του pnp τρανζίστορ. Οι παρασιτικές χωρητικότητες του IGBT (Εικόνα 5.1 (β)) πρέπει να εκφορτίζονται κατά την αποκοπή του στοιχείου έτσι ώστε να μην δημιουργείται πρόβλημα διακοπτικής ταχύτητας. Ο χρόνος μετάβασης αγωγής (turn-on time) και ο χρόνος

μετάβασης αποκοπής (turn off time) του IGBT ρυθμίζονται από τις τιμές των αντιστάσεων R_{on} και R_{off} αντίστοιχα. Στα άκρα της τάσης V_s του κυκλώματος οδήγησης εφαρμόζεται ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής $C_s = 4.7\mu F$ για την μείωση της κυμάτωσης της τάσης V_s και ένας κεραμικός πυκνωτής της τάξης των $0.22\mu F$ παράλληλα συνδεδεμένος με τον ηλεκτρολυτικό για την μείωση κυματώσεων υψηλών συχνοτήτων της τάσης V_s . Με τον τρόπο αυτό μειώνουμε τις κυματώσεις παντός είδους από τους παλμούς έναυσης που εφαρμόζονται στην πύλη του IGBT. Το καλώδιο σύνδεσης μεταξύ του κυκλώματος οδήγησης και της πύλης του IGBT πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερο (≤ 10 cm) έτσι ώστε να μην δημιουργεί ανεπιθύμητη αυτεπαγωγή, χωρητικότητα και αντίσταση πράγμα το οποίο θα άλλαζε την μορφή των παλμών της πύλης. Εάν το καλώδιο είναι μεγαλύτερο από 3 cm τότε οι δύο αγωγοί που έχει το καλώδιο σύνδεσης πρέπει να είναι στριμμένοι μεταξύ τους ή να χρησιμοποιηθεί καλώδιο επίπεδο έτσι ώστε το καλώδιο να παρουσιάζει την λιγότερη δυνατή αυτεπαγωγή, χωρητικότητα και αντίσταση. Η τάση που εφαρμόζεται στην πύλη του IGBT δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 20 Volts. Οι αντιπαράλληλες διόδους της εικόνας 5.2 περιορίζουν την τάση της πύλης του IGBT σε περίπτωση που υπάρξει ανάδραση μεταξύ του συλλέκτη και της πύλης του IGBT μέσω της εσωτερικής χωρητικότητας C_{CG} (Εικόνα 5.1 (β)). Λόγω της ανάδρασης του συλλέκτη προς την πύλη μέσω της χωρητικότητας C_{CG} , το IGBT μπορεί να μεταβεί σε κατάσταση αγωγής όταν η κλίση dv/dt πάρει μεγάλες τιμές [20].

Στο πιο κάτω σχήμα φαίνονται οι χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης του IGBT.



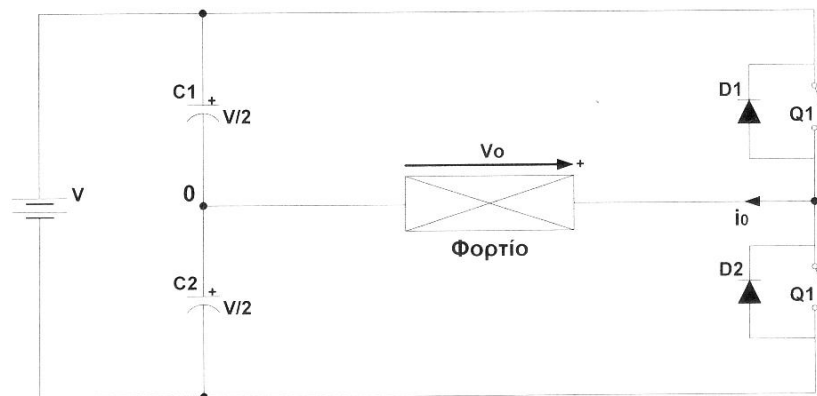
Εικόνα 5.3 Χαρακτηριστική λειτουργίας I-V για IGBT τύπου -n [7].

5.3 Μονοφασικοί αντιστροφεείς DC/AC

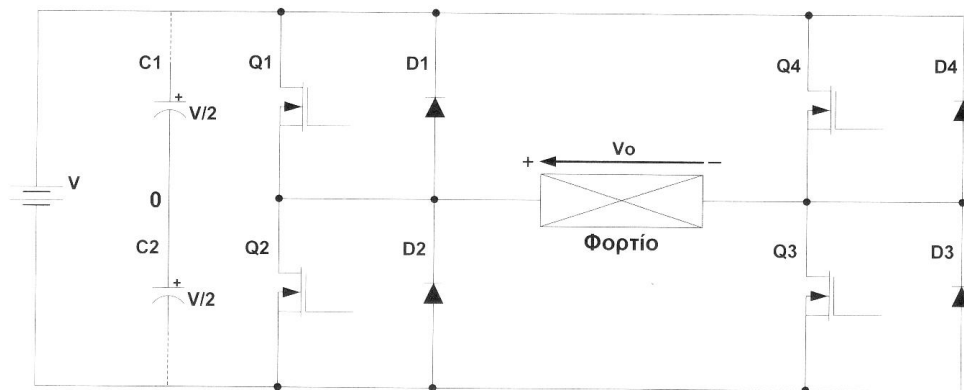
Οι αντιστροφεείς είναι ένα είδος μετατροπέων, οι οποίοι έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος σε εναλλασσόμενη με μεταβλητή συχνότητα και πλάτος. Οι αντιστροφεείς βρίσκουν εφαρμογές στις εξής περιοχές [20] :

- Συστήματα ελέγχου εναλλασσόμενων ηλεκτρικών μηχανών
- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας(ΑΠΕ)
- Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες υδρογόνου
- Ενεργά φίλτρα για μείωση αρμονικών για την καλυτέρευση της ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας
- Ενεργά συστήματα διόρθωσης συντελεστή ισχύος
- Συστήματα Αδιάκοπης Παροχής Ισχύος (Uninterruptible Power Supplies, UPS)

Οι αντιστροφεείς μπορούν να διαιρεθούν κυρίως σε δύο κατηγορίες. Στους αντιστροφεείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης και στους αντιστροφεείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος. Επίσης, οι δύο παραπάνω κατηγορίες μπορούν να υποδιαιρεθούν στους μονοφασικούς αντιστροφεείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας, στους μονοφασικούς αντιστροφεείς σε συνδεσμολογία γέφυρας και τέλος στους τριφασικούς αντιστροφεείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας.



Εικόνα 5.4 Αντιστροφέας σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας



Εικόνα 5.5 Αντιστροφέας σε συνδεσμολογία γέφυρας

Για την παραγωγή της ημιτονοειδούς κυματομορφής εξόδου η οποία μπορεί να ελεγχθεί τόσο κατά πλάτος όσο και κατά συχνότητα χρησιμοποιείται η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) και είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο στα συστήματα σύνδεσης πηγών ΑΠΕ και δικτύου χαμηλής τάσης.

Σύμφωνα με την τεχνική της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM) μια τριγωνική κυματομορφή πλάτους V_{tri} συγκρίνεται με μια ημιτονοειδή κυματομορφή, η οποία είναι και η κυματομορφή ελέγχου $V_{control}$. Η συχνότητα f_s της τριγωνικής κυματομορφής ονομάζεται φέρουσα συχνότητα, και είναι αυτή που καθορίζει την συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα. Το σήμα ελέγχου $V_{control}$ χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής των διακοπών και έχει συχνότητα f_1 . Αυτή ονομάζεται συχνότητα διαμόρφωσης και είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Η παραγόμενη αυτή τάση, δεν είναι τέλεια ημιτονοειδής, αλλά περιέχει και αρμονικές συνιστώσες της συχνότητας διαμόρφωσης f_1 .

Από τον λόγο της φέρουσας συχνότητας προς τη συχνότητα διαμόρφωσης προκύπτει ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας m_f :

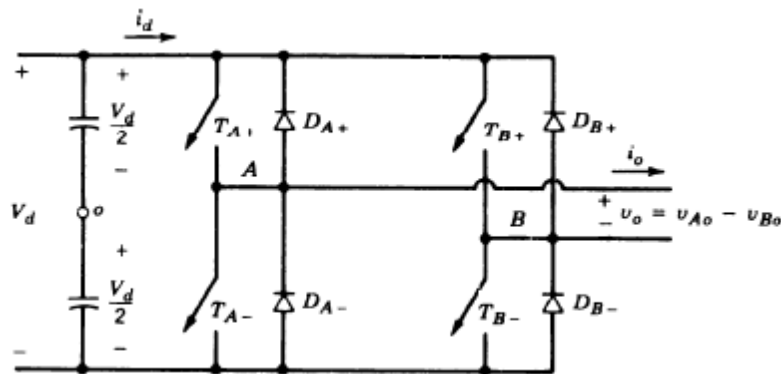
$$m_f = f_s / f_1 \quad (5.1)$$

Ομοίως ορίζεται και ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους ως ο λόγος του πλάτους του σήματος ελέγχου προς το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής:

$$m_a = V_{CONTROL} / V_{TRI} \quad (5.2)$$

Στην διαμόρφωση PWM για τους μονοφασικούς αντιστροφείς η μετατροπή της DC τάσης μπορεί να γίνεται είτε από μισή γέφυρα (2 ζεύγη διακοπών – διόδων) είτε από πλήρη γέφυρα (4 ζεύγη διακοπών – διόδων), που είναι και η συνηθέστερη περίπτωση για

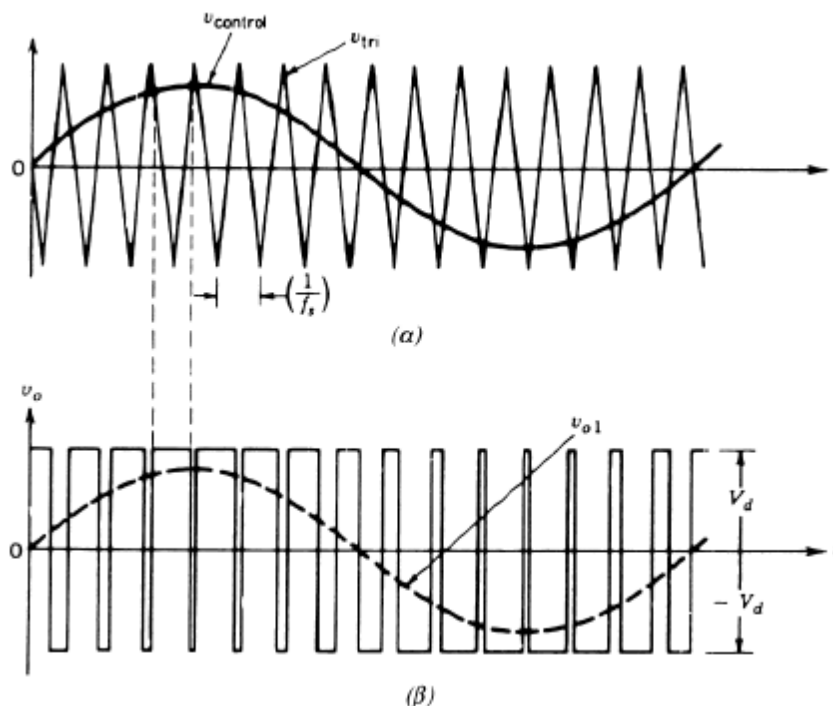
αντιστροφείς ισχύος. Η διαμόρφωση μπορεί να γίνεται είτε με διπολική είτε με μονοπολική τάση εξόδου.



Εικόνα 5.6 Αντιστροφέας DC/AC με πλήρη γέφυρας [7]

Κατά την διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου τα ζεύγη διακοπών T_{A+}, T_{B-} και T_{A-}, T_{B+} αλλάζουν κατάσταση ως ζεύγη διακοπών 1 και 2 αντίστοιχα. Τα δύο ζεύγη διακοπών αυτά ελέγχονται με βάση τη σύγκριση των κυματομορφών $V_{control}$ και V_{tri} , και ανεξάρτητα από τη φορά του ρεύματος εξόδου i_o , προκύπτει τάση εξόδου [21]:

- $V_o = V_d$, όταν $V_{control} > V_{tri}$ οπότε οι (T_{A+}, T_{B-}) άγουν
- $V_o = -V_d$, όταν $V_{control} < V_{tri}$, οπότε οι (T_{A-}, T_{B+}) άγουν



Εικόνα 5.7 Διαμόρφωση εύρους παλμών με διπολική τάση εξόδου στον αντιστροφέα DC/AC ημιτονοειδούς εξόδου [7].

Έτσι, η μέση τάση εξόδου V_0 στο διάστημα μιας περιόδου μετάβασης αγωγής - αποκοπής ($T_s=1/f_s$) για τάση εισόδου V_d , και για κυματομορφή ελέγχου $V_{control} \leq V_d$ θα είναι:

$$V_0 = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \cdot V_d = m_a \cdot V_d \quad (5.3)$$

Για διάφορες τιμές των συντελεστών διαμόρφωσης συχνότητας και πλάτους m_f και m_a αντίστοιχα, διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις [7]:

- $m_f < 21$: Συγχρονισμένη διαμόρφωση. Στην περίπτωση μικρού συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας, τα δύο σήματα $V_{control}$ και V_{tri} πρέπει να είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους, πράγμα που με τη σειρά του απαιτεί ακέραια τιμή του m_f . Μάλιστα αυτός πρέπει να είναι περιττός ακέραιος καθώς αυτό έχει ως αποτέλεσμα περιττή συμμετρία στην συνάρτηση εξόδου. Περιττή συμμετρία σημαίνει ότι υπάρχουν μόνο περιττές αρμονικές σ' αυτή.
- $m_f > 21$: Ασύγχρονη διαμόρφωση: Στην περίπτωση αυτή, η μεν συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής διατηρείται σταθερή, ενώ η συχνότητα του σήματος ελέγχου μεταβάλλεται, έχοντας ως αποτέλεσμα μη ακέραιες τιμές του συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας.
- $m_a > 1$: Στην θεώρηση που έγινε θεωρήθηκε δεδομένο ότι το πλάτος του σήματος ελέγχου είναι μικρότερο ή ίσο από το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής, οπότε η τάση εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με το συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους. Στην περίπτωση αυτή, οι αρμονικές της τάσης εξόδου εμφανίζονται σε μια περιοχή υψηλών συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα μετάβασης f_s και τις πολλαπλάσιες αυτής. Όταν ο συντελεστής m_a είναι μεγαλύτερος της μονάδας έχουμε υπερδιαμόρφωση, με αποτέλεσμα η τάση εξόδου V_0 να περιέχει περισσότερες αρμονικές στις πλευρικές ζώνες σε σύγκριση με τη γραμμική περιοχή. Για μεγάλες τιμές του λόγου m_a , η κυματομορφή εξόδου του αντιστροφέα εκφυλίζεται σε τετραγωνική. Τότε η τάση εξόδου λαμβάνει τιμές:

$$V_d < V_0 < \frac{4}{\pi} \cdot V_d \quad (5.4)$$

Κατά τη διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου οι διακόπτες στα δύο σκέλη του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας δεν αλλάζουν κατάσταση ταυτόχρονα. Το σκέλος A ελέγχεται με σύγκριση της τάσης V_{tri} με την $V_{control}$, ενώ οι διακόπτες του σκέλους B ελέγχονται με τη σύγκριση των κυματομορφών V_{tri} και $-V_{control}$. Έτσι για το σκέλος A θα έχουμε [21]:

$$V_{\text{control}} > V_{\text{tri}}: T_{A+} \text{ on και } V_{AN} = V_d$$

$$V_{\text{control}} < V_{\text{tri}}: T_{A-} \text{ on και } V_{AN} = 0$$

και για το σκέλος B:

$$-V_{\text{control}} > V_{\text{tri}}: T_{B+} \text{ on και } V_{BN} = V_d$$

$$-V_{\text{control}} < V_{\text{tri}}: T_{B-} \text{ on και } V_{BN} = 0$$

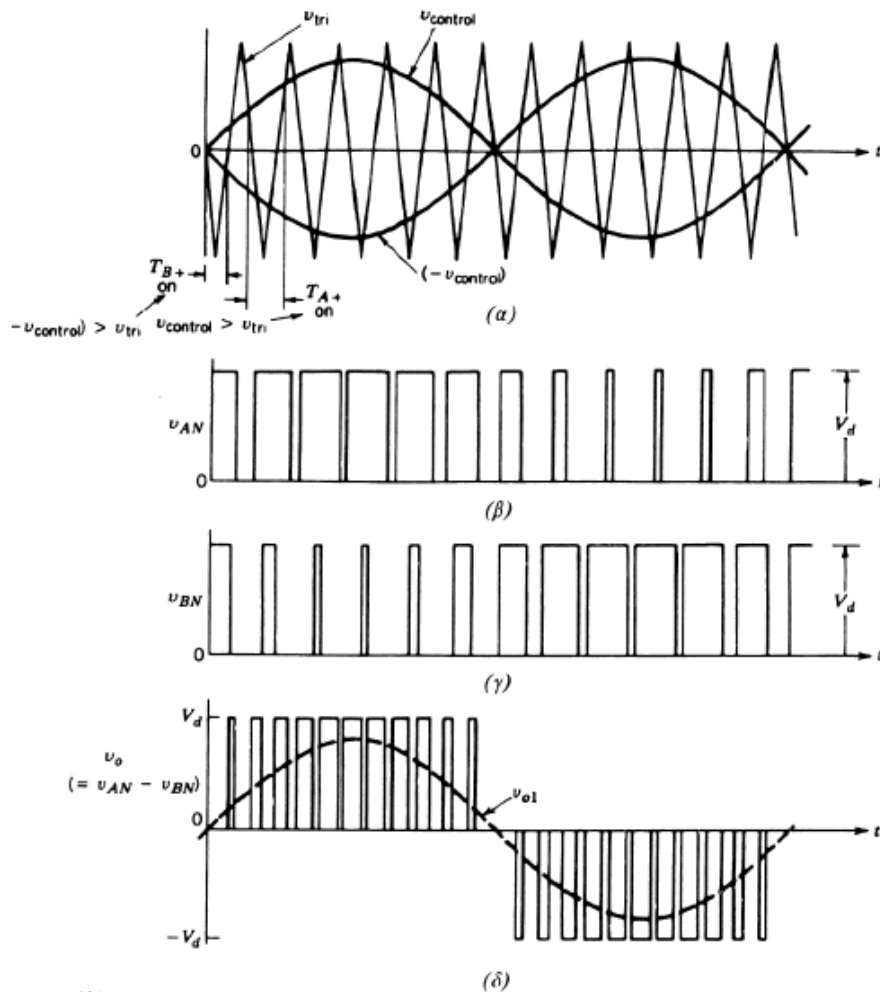
Τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί κλειστών διακόπτων υπάρχουν δίνοντας τα εξής επίπεδα τάσης εξόδου:

$$T_{A+}, T_{B-}, \text{κλειστοί} : V_{AN} = V_d, V_{BN} = 0, V_0 = V_d$$

$$T_{A-}, T_{B+}, \text{κλειστοί} : V_{AN} = 0, V_{BN} = V_d, V_0 = -V_d$$

$$T_{A+}, T_{B+}, \text{κλειστοί} : V_{AN} = V_d, V_{BN} = V_d, V_0 = 0$$

$$T_{A-}, T_{B-}, \text{κλειστοί} : V_{AN} = 0, V_{BN} = 0, V_0 = 0$$



Εικόνα 5.8 Διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου [21]

Με τη μέθοδο αυτή, τα άλματα της τάσης εξόδου μειώνονται σε V_d (από $2V_d$ στη διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου), ενώ διπλασιάζεται η συχνότητα μετάβασης όσον αφορά τις αρμονικές εξόδου. Κάτι τέτοιο είναι επιθυμητό, καθώς οι χαμηλότερες αρμονικές εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες σε συχνότητα διπλάσια της θεμελιώδους. Εάν επιλεγεί άρτιος συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας m_f , οι κυματομορφές της τάσης V_{AN} και V_{BN} μετατοπίζονται κατά 180° από τη θεμελιώδη συχνότητα f_1 , η μια σε σχέση με την άλλη. Οι αρμονικοί όροι στη συχνότητα μετάβασης στις V_{AN} και V_{BN} έχουν την ίδια φάση, με αποτέλεσμα να απαλείφεται ο αρμονικός όρος στη συχνότητα μετάβασης στην τάση εξόδου $V_0 = V_{AN} - V_{BN}$. Το ίδιο εξαλείφονται και οι πλευρικές ζώνες των αρμονικών της συχνότητας μετάβασης.

Για λόγο:

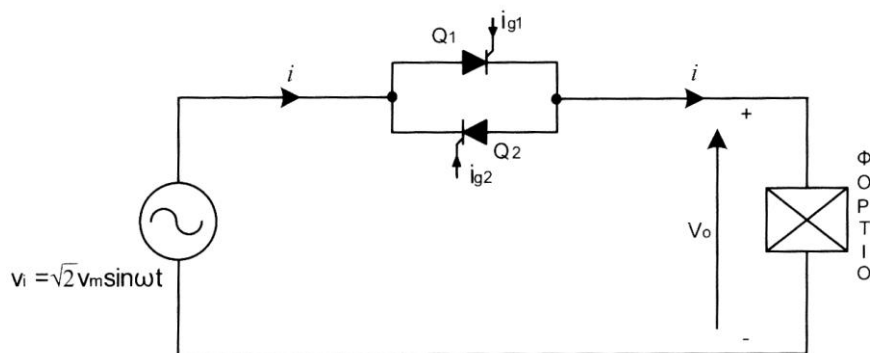
$$m_a \leq 1, \text{ έχουμε ότι } V_{01} = m_a \cdot V_d$$

$$m_a > 1, \text{ έχουμε ότι } V_d < V_{01} < \frac{4}{\pi} \cdot V_d$$

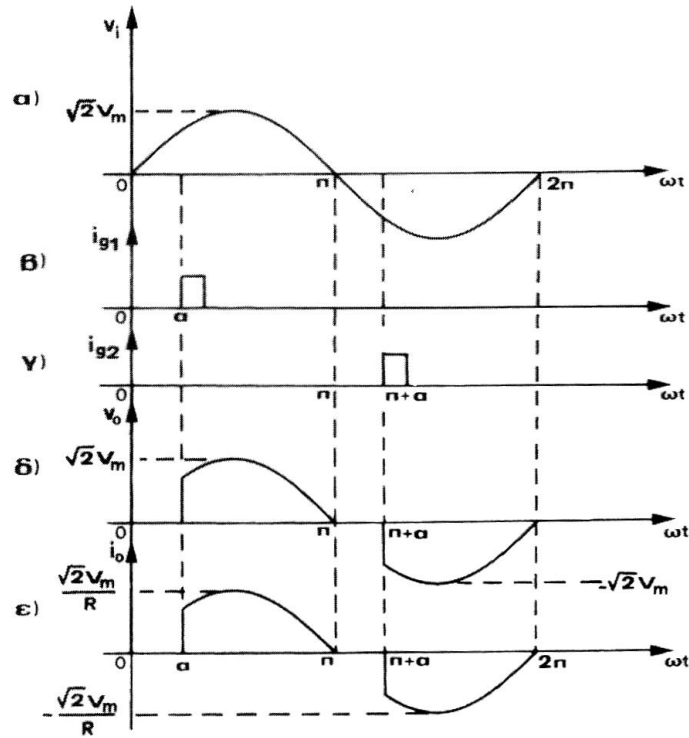
5.4 Μονοφασικοί AC/DC/AC ρυθμιστές τάσης

Στις μέρες μας γίνεται όλο και πιο σημαντική η απαίτηση για παροχή υψηλής ποιότητας ισχύος από τις εναλλασσόμενες πηγές, ειδικά όταν πρόκειται να τροφοδοτηθούν ευαίσθητα φορτία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξηθεί η ανάγκη, για ποιοτικές πηγές τάσης, για το αρμονικό περιεχόμενο, το θόρυβο και την σταθερότητα της τάσης στα συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί πάρα πολλές τοπολογίες μονοφασικών μετατροπέων ρύθμισης τάσης (SVRs).

Ανάμεσα σε αυτές τις τοπολογίες ανήκουν και οι ψαλιδιστές τάσης (ac choppers) οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί για να παράγουμε μια μεταβλητή τάση AC από μια σταθερή πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος. Τα ac choppers έχουν εκτενώς απασχοληθεί σε AC εφαρμογές ελέγχου της ισχύος όπως η βιομηχανική θέρμανση και ο έλεγχος ac κινητήρων.



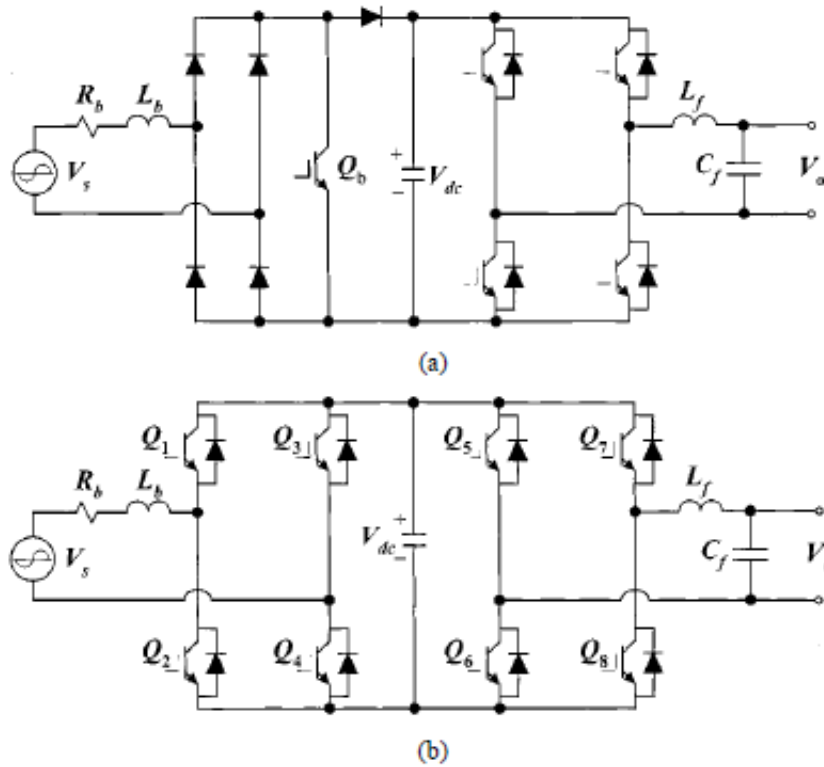
Εικόνα 5.9 Συνδεσμολογία μονοφασικού ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης [20].



Εικόνα 5.10 Κυματομορφές μονοφασικού ρυθμιστή με ωμικό φορτίο [20]

- α) Τάση εισόδου β-γ) Παλμοί έναυσης των θυρίστρον
 δ) Τάση εξόδου ε) Ρεύμα εξόδου

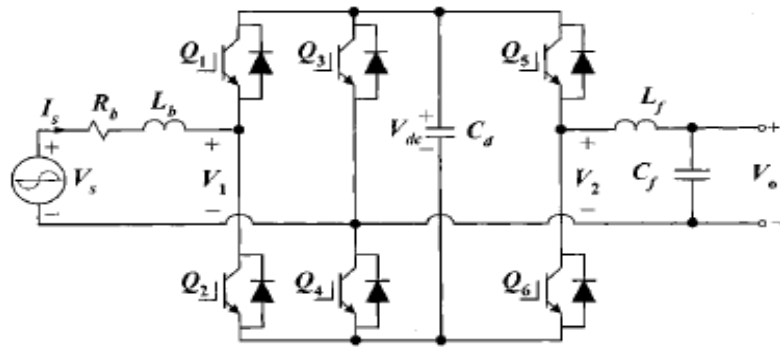
Οι μετατροπείς αυτοί προσφέρουν τα πλεονεκτήματα της απλότητας και της ικανότητας να ελέγχεται ένα μεγάλο μέρος της ισχύος οικονομικά. Ωστόσο μειονεκτήματα των ac choppers αποτελούν η εισαγωγή σημαντικών αρμονικών τόσο στην τάση εξόδου όσο και στο ρεύμα εξόδου, καθώς επίσης και η ασυνέχεια της ροής ισχύος. Αν και αυτά τα προβλήματα μπορούν εν μέρει να βελτιωθούν με τη χρήση πιο προηγμένων μεθόδων ελέγχου, παρόλα αυτά δεν καθιστούν τα ac choppers κατάλληλα για εφαρμογές όπου επιθυμούμε υψηλής ποιότητας πηγές τάσης. Ως εκ τούτου, ένας AC/DC/AC ρυθμιστής τάσης χρησιμοποιείται παραδοσιακά στις περισσότερες μονοφασικές εφαρμογές.



Εικόνα 5.11 Συμβατικές τοπολογίες ενός SVR [22] α) Ασυνεχές ρεύμα εισόδου
β) Συνεχές ρεύμα εισόδου

Οι δύο πιο χαρακτηριστικές τοπολογίες ενός SVR φαίνονται στην εικόνα 5.11. Και στις δύο συνδεσμολογίες βλέπουμε να έχει χρησιμοποιηθεί ένας αντιστροφέας πλήρους γέφυρας ο οποίος οδηγείται από μια PWM τεχνική, με αποτέλεσμα την παραγωγή υψηλής ποιότητας τάσης εξόδου αλλά και τη μείωση του φίλτρου εξόδου (L_f - C_f).

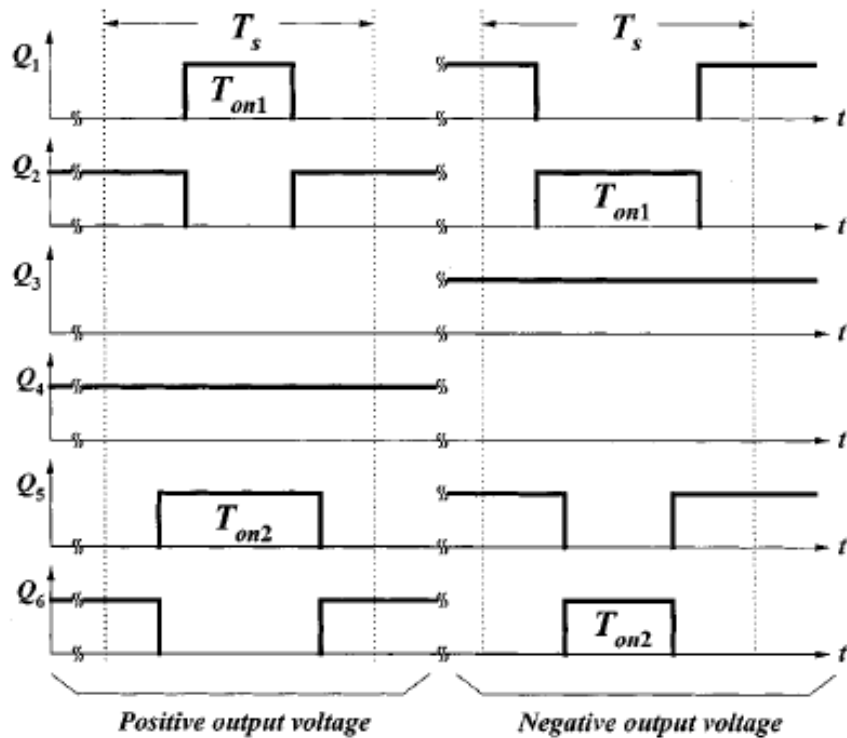
Έκτος από τις δυο αυτές τοπολογίες έχει αναπτυχτεί και μια παραλλαγή της δεύτερης η οποία αντί να έχει 4 κλάδους (legs), έχει 3. Με αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο τριφασικού αντιστροφέα με τρεις κλάδους διακοπών IGBTs (6 συνολικά), μπορούμε να μειώσουμε το κόστος και το μέγεθος του εξοπλισμού χωρίς να χάνονται όμως οι ιδιότητες της αρχικής τοπολογίας. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται κυκλωματικά αυτή η τοπολογία.



Εικόνα 5.12 Μονοφασικός AC/AC μετατροπέας με 3 κλάδους [22]

Ο κεντρικός κλάδος (leg) που αποκαλείται κοινός κλάδος και περιλαμβάνει τους διακόπτες Q3 και Q4 χρησιμοποιείται και για τη λειτουργία της ανόρθωσης και για την λειτουργία του αντιστροφέα ταυτόχρονα. Οι διακόπτες ελέγχονται με τη μέθοδο PWM (διαμόρφωση εύρους παλμών) με στόχο τη δημιουργία της τάσης εξόδου και του ρεύματος εισόδου σύμφωνα με τις τιμές αναφοράς που έχουν τεθεί. Η αυτεπαγωγή L_b παρέχει ενίσχυση της τάσης και η σύνθετη αντίσταση Z_f παρέχει το φιλτράρισμα της τάσης εξόδου. Ο πυκνωτής C_d στο επικαλούμενο dc-link (σημείο όπου η τάση είναι σταθερή V_{dc}) λειτουργεί ως πηγή dc τάσης ενώ παράλληλα φιλτράρει την έξοδο της ανόρθωσης. Οι αρχές λειτουργίας της διάταξης αυτής μπορούν να συνοψιστούν παρακάτω [22]:

- Οι τάσεις V1 (είσοδος του ανορθωτή) και V2 (έξοδος του αντιστροφέα) έχουν πάντα την ίδια πολικότητα.
- Οι συχνότητες των V1 και V2 είναι επίσης ίδιες.
- Τα δύο IGBTs κάθε κλάδου δεν μπορεί να άγουν ταυτόχρονα.
- Οι πολικότητες των V1 και V2 καθορίζονται από την κατάσταση αγωγής (ON-OFF) των διακοπών Q3 και Q4. Όταν το Q3 είναι κλειστό (ON) οι τάσεις είναι αρνητικές ή μηδέν ενώ όταν το Q4 είναι κλειστό τότε οι τάσεις είναι θετικές ή μηδέν.
- Τα πλάτη της θεμελιώδους συνιστώσας των V1 και V2 καθορίζονται απευθείας από τον λόγο αγωγής (duty ratio) των Q1 και Q3 για θετική πολικότητα και από το duty ratio των Q2 και Q6 για αρνητική πολικότητα.



Εικόνα 5.13 Διακοπτική ακολουθία [22]

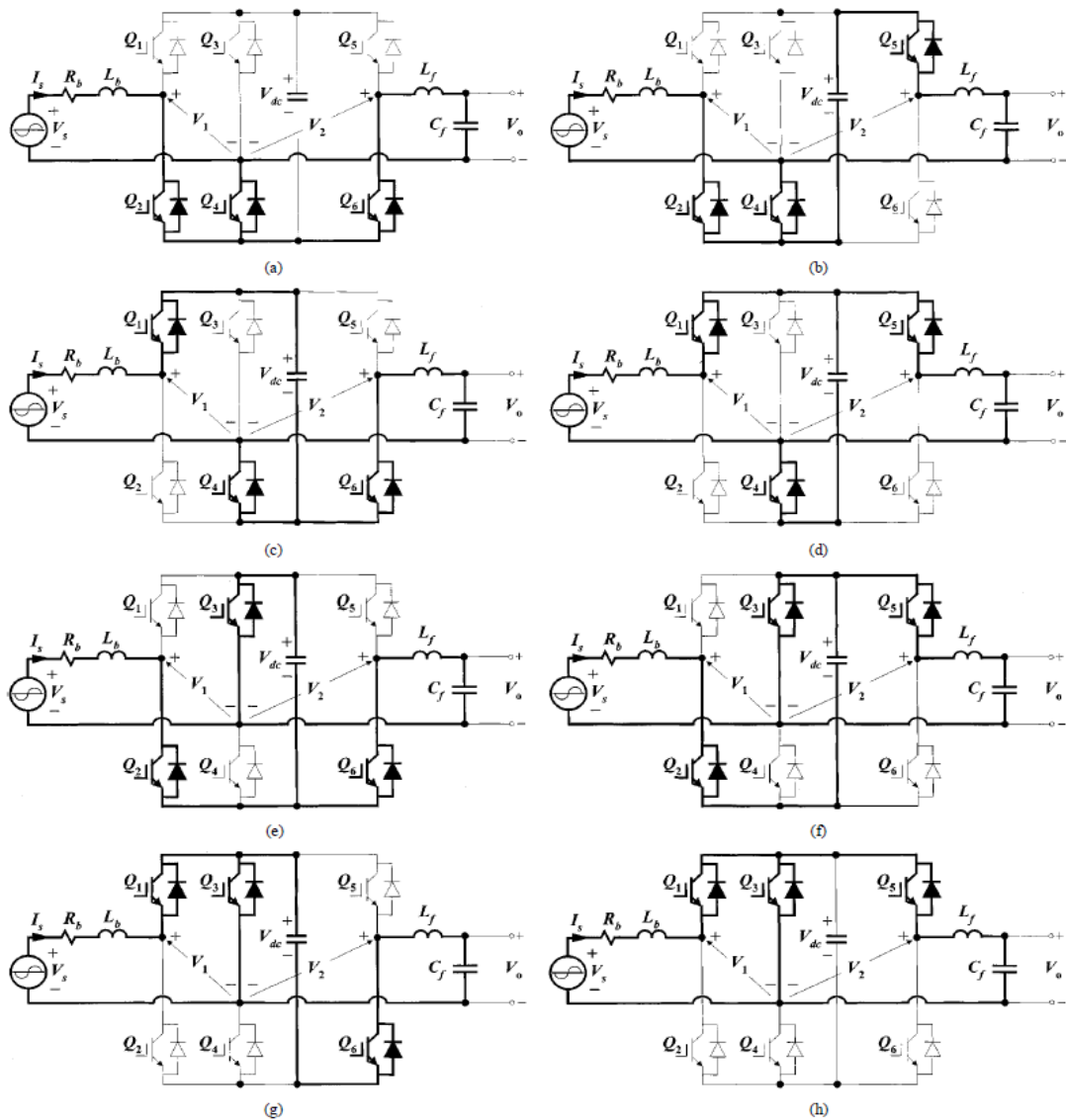
Mode	Q_1	Q_3	Q_5	V_1	V_2
1	OFF	OFF	OFF	0	0
2	OFF	OFF	ON	0	V_{dc}
3	ON	OFF	OFF	V_{dc}	0
4	ON	OFF	ON	V_{dc}	V_{dc}
5	OFF	ON	OFF	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
6	OFF	ON	ON	$-V_{dc}$	0
7	ON	ON	OFF	0	$-V_{dc}$
8	ON	ON	ON	0	0

Εικόνα 5.14 Καταστάσεις του μετατροπέα και τάσεις εισόδου-εξόδου [22]

Σύμφωνα με τους παραπάνω κανόνες, η διακοπτική ακολουθία και οι καταστάσεις λειτουργίας του μετατροπέα δίνονται στις εικόνες 5.13 και 5.14 αντίστοιχα. Στην εικόνα 5.13 ο χρόνος T_s αντιπροσωπεύει την περίοδο του υψίσυχνου φέροντος σήματος και τα T_{on1} και T_{on2} είναι οι χρόνοι αγωγής του ανορθωτή και του αντιστροφέα αντίστοιχα. Με βάση αυτά προκύπτουν τα duty ratios για τον ανορθωτή (d_R) και τον αντιστροφέα (d_I):

$$d_R = \frac{T_{on1}}{T_s} \quad d_I = \frac{T_{on2}}{T_s} \quad (5.5)$$

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα οι πολικότητες και τα duty ratios του ανορθωτή και του αντιστροφέα καθορίζονται από τους άνω διακόπτες κάθε κλάδου. Στην εικόνα 5.15 φαίνεται το ηλεκτρικό κύκλωμα του αντιστροφέα για κάθε διακοπτική κατάσταση προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία της διάταξης.



Εικόνα 5.15 (a) Κατάσταση 1
 (b) Κατάσταση 2
 (c) Κατάσταση 3
 (d) Κατάσταση 4
 (e) Κατάσταση 5
 (f) Κατάσταση 6
 (g) Κατάσταση 7
 (h) Κατάσταση 8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΝΔΕΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΗ ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΣΗ.

6.1 Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Με τον όρο «διανομή» ηλεκτρικής ενέργειας εννοούμε το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων αυτή φτάνει έως τους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Τα δίκτυα διανομής φθάνουν μέχρι το μετρητή της παρεχόμενης στον καταναλωτή ενέργειας. Μετά το μετρητή αρχίζει η εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση.

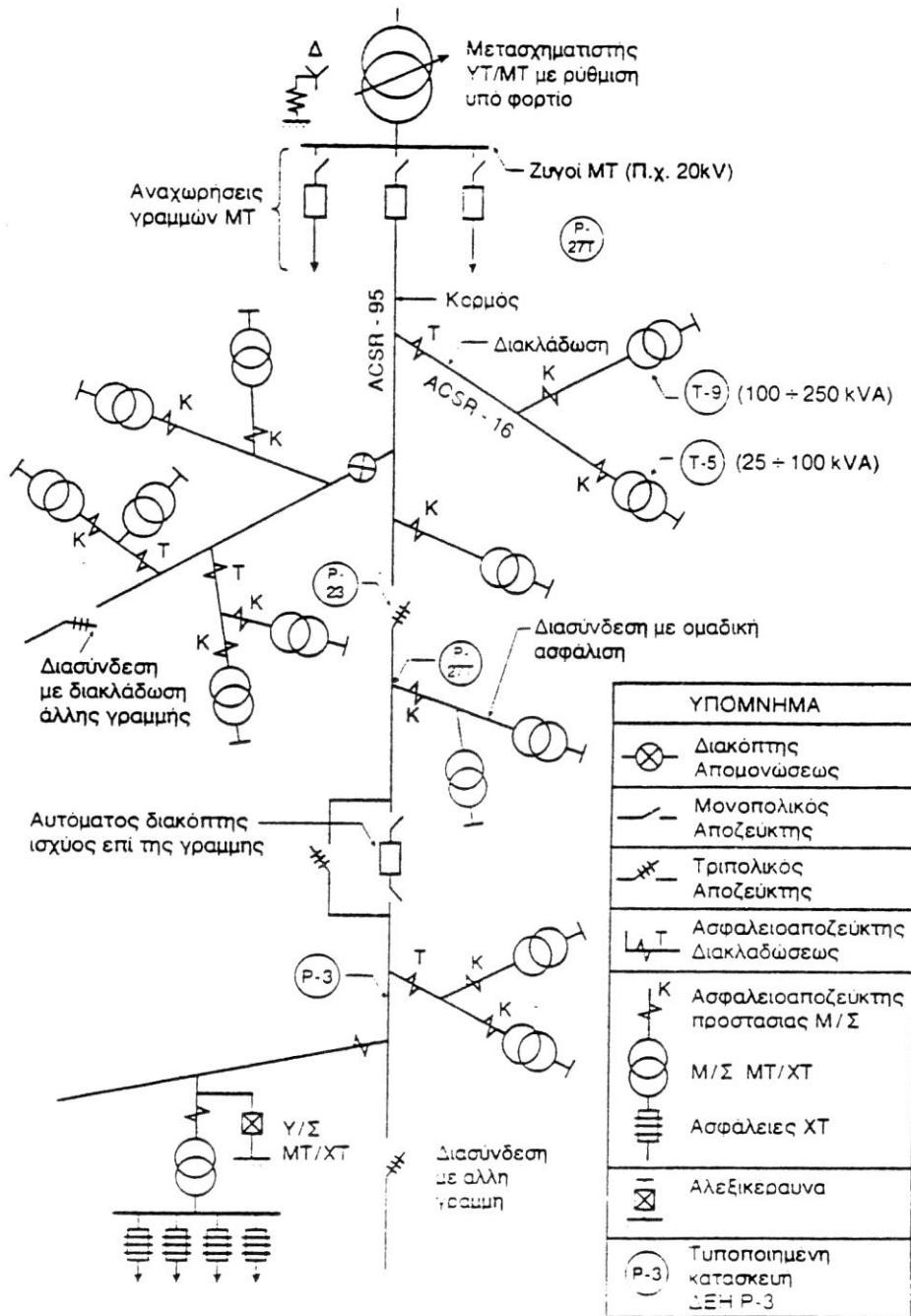
Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται, ανάλογα με την τάση, σε δίκτυα υψηλής τάσης (ΥΤ) (35-150 kV), δίκτυα μέσης τάσης (ΜΤ) (1-35 kV) και δίκτυα χαμηλής τάσης (ΧΤ) (100-1000 V). Οι αναφερόμενες τάσεις είναι οι πολικές τριφασικού συστήματος, δηλαδή οι τάσεις μεταξύ φάσεων. Ανάλογα με την κατασκευαστική τους διαμόρφωση τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε εναέρια και υπόγεια. Πλεονέκτημα των εναέριων δικτύων έναντι των υπόγειων είναι ότι είναι λιγότερο δαπανηρά και επί πλέον η εύρεση και η αποκατάσταση των βλαβών είναι ταχύτερη. Καταλαμβάνουν όμως σημαντικό χώρο, η διάθεση του οποίου είναι αδύνατη σε σχετικά πυκνοκατοικημένες περιοχές πόλεων.

Οι χρησιμοποιούμενοι στύλοι ανάρτησης γραμμών στα εναέρια δίκτυα είναι συνήθως ξύλινοι ή τσιμεντένιοι και σπανιότερα μεταλλικοί. Οι χρησιμοποιούμενοι αγωγοί είναι συνήθως από αλουμίνιο, απλό στα δίκτυα χαμηλής τάσης ή ενισχυμένο με χαλύβδινη ψυχή στα δίκτυα μέσης ή υψηλής τάσης, ή κράματα αλουμινίου. Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν αγωγοί χαλκού, σήμερα όμως η χρήση τους περιορίζεται σε περιοχές έντονης διάβρωσης. Τα τελευταία χρόνια οι εναέρια γραμμές χαμηλής τάσης κατασκευάζονται, σε ολοένα αυξανόμενο ποσοστό, με μονωμένους αγωγούς συνεστραμμένων αγωγών, με τάση κατάρτησης των γυμνών αγωγών. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η ασφάλεια λειτουργίας και μειώνεται η ενόχληση στο περιβάλλον.

Στις πυκνοκατοικημένες περιοχές τα δίκτυα διανομής κατασκευάζονται συνήθως υπόγεια, διότι δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος ώστε να τηρούνται οι αποστάσεις ασφαλείας από τα κτήρια, αλλά και για λόγους αισθητικής. Επιπλέον στις περιοχές αυτές η πυκνότητα του φορτίου καθιστά πρακτικά επιβεβλημένη την κατασκευή υπόγειου δικτύου ΧΤ. Οι υποσταθμοί υποβιβασμού της μέσης σε χαμηλή τάση των υπόγειων δικτύων κατασκευάζονται συνήθως στα υπόγεια πολυκατοικιών ή κάτω από τα πεζοδρόμια ή τις πλατείες. Σπανιότερα κατασκευάζονται επίγειοι εντός οικίσκων.

6.1.1 Εναέρια δίκτυα MT

Τα εναέρια δίκτυα MT ενδείκνυνται να έχουν 'δενδροειδή' μορφή όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 6.1. Αποτελούνται δηλαδή από τον 'κορμό' (ή την 'κύρια γραμμή') που κατασκευάζεται με αγωγούς μεγάλης διατομής, (π.χ. στη ΔΕΗ συνήθως 95 mm= ισοδύναμου Cu) και τις 'διακλαδώσεις' πάνω στις οποίες συνδέονται (κατά κανόνα) οι Υ/Σ MT/XT. Οι διακλαδώσεις κατασκευάζονται με αγωγούς μικρότερης, απ' ότι ο κορμός, διατομής (π.χ. στη ΔΕΗ συνήθως 35 ή 16 mm ισοδυνάμου Cu) [23].



Εικόνα 6.1 Τυπικό σχήμα εναερίου αγροτικού δικτύου MT [23]

Η 'δενδροειδής' μορφή επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα στις αγροτικές περιοχές, όχι όμως και στις ημιαστικές, όπου οι υπάρχοντες περιορισμοί στην όδευση των γραμμών δεν το επιτρέπουν.

Οποσδήποτε τα εναέρια δίκτυα ΜΤ λειτουργούν σχεδόν πάντα 'ακτινικά' (ή 'ανοιχτά'), δηλαδή όλες οι γραμμές, από τις οποίες αποτελείται το δίκτυο, τροφοδοτούνται από το ένα μόνο άκρο τους.

Η τροφοδότηση του κορμού της γραμμής στο ένα άκρο της γίνεται από τους ζυγούς ΜΤ του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ μέσω ενός Διακόπτη Ισχύος, εξοπλισμένου με τις κατάλληλες προστασίες, ενώ στο άλλο άκρο της ο κορμός μπορεί να διασυνδέεται, μετά από χειρισμό, με άλλη γραμμή του ίδιου ή και άλλου Υ/Σ "ΥΤ/ΜΤ. Κατά μήκος του κορμού μπορεί να εγκαθίστανται Αποζεύκτες, Διακόπτες Φορτίου ή και Διακόπτες Ισχύος. Οι δύο πρώτοι χρησιμεύουν στο να μπορεί ο κορμός να απομονώνεται κατά τμήματα, όταν είναι αναγκαίο είτε για την εκτέλεση εργασιών συντηρήσεως είτε για την αποκατάσταση (επισκευή) μιας βλάβης, ενώ τα λοιπά τμήματα μπορούν να ανατροφοδοτηθούν.

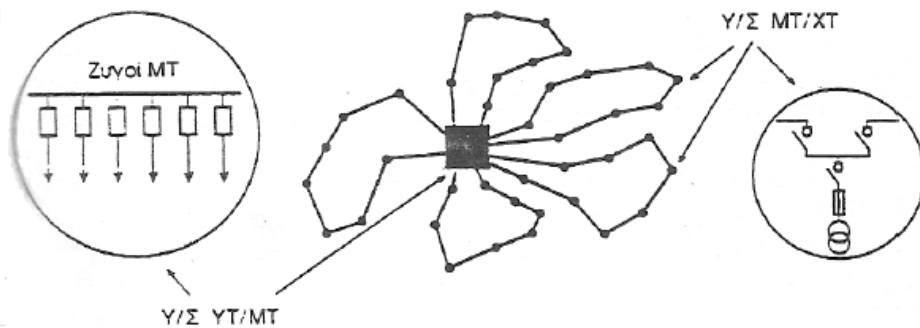
Στις Ευρωπαϊκές χώρες, γενικά, οι γραμμές των εναερίων δικτύων Διανομής ΜΤ, περιλαμβάνουν μόνο τους τρεις αγωγούς των φάσεων, δηλαδή δεν ακολουθεί ο ουδέτερος. Αντίθετα στις ΗΠΑ, στον Καναδά κλπ, ο ουδέτερος των εναερίων δικτύων ΜΤ κατά κανόνα διανέμεται μαζί με τις φάσεις και γειώνεται κατά διαστήματα. Όπως γίνεται στην Ευρώπη μόνο για τις γραμμές ΧΤ. Έτσι κατά κανόνα ο κορμός του δικτύου περιλαμβάνει 4 αγωγούς (3 Φάσεις και ουδέτερος), ενώ οι διακλαδώσεις, όταν δεν απαιτείται η παροχή τριφασικής τάσεως από τους καταναλωτές, περιλαμβάνουν 2 μόνο αγωγούς (1 φάση και ουδέτερο), οι δε Μ/Σ στην πλευρά ΧΤ δίδουν τάσεις =120 V και 240 V. Η κατασκευή διακλαδώσεων με δύο αγωγούς στην Ευρώπη περιορίζεται κυρίως στη Μ. Βρετανία και Ιρλανδία (καθώς και την Κύπρο), γίνεται όμως χωρίς διανομή του ουδετέρου αλλά με δύο φάσεις [23].

6.1.2 Υπόγεια δίκτυα ΜΤ

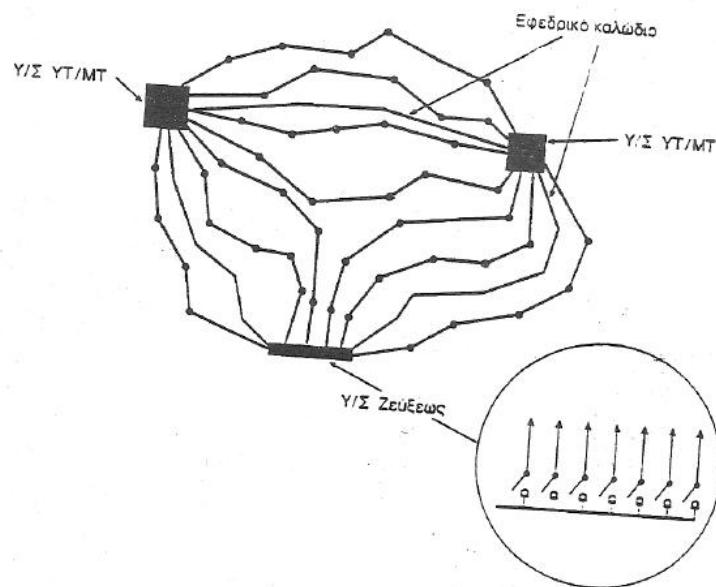
Ο εντοπισμός της θέσεως μια βλάβης και η αποκατάσταση της σε ένα εναέριο δίκτυο είναι γενικά εύκολη και απαιτεί χρόνο μερικών ωρών. Αντίθετα ο εντοπισμός της θέσεως μιας βλάβης υπογείου καλωδίου και ακολούθως η αποκατάστασή της είναι πολύ πιο σύνθετη εργασία που μπορεί να διαρκέσει συνολικά και περισσότερο από 24 ώρες. Αν ληφθεί υπόψη ότι γενικά ένα υπόγειο δίκτυο ΜΤ τροφοδοτεί περιοχές με μεγάλη σχετικά πυκνότητα φορτίου αλλά και με αυξημένες απαιτήσεις συνεχούς τροφοδοτήσεως, έπεται ότι το απλό και οικονομικό ακτινικό σχήμα δικτύου που εφαρμόζεται στα εναέρια δίκτυα ΜΤ, εικόνα 6.1, δεν επαρκεί. Έτσι στα υπόγεια δίκτυα ΜΤ ακολουθείται συνήθως ο κανόνας του να υπάρχει η δυνατότητα, μετά από μια βλάβη, να επανατροφοδοτηθούν οι Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ από άλλη οδό, μετά την εκτέλεση ορισμένων χειρισμών ή και αυτόματα, χωρίς να προηγείται κατ' ανάγκη η επισκευή της βλάβης.

Η απαίτηση αυτή ικανοποιείται με τα παρακάτω τρία βασικά σχήματα, με τις αντίστοιχες παραλλαγές τους:

- 1) Το 'βρογχοειδές', που χαρακτηρίζεται από το ότι οι γραμμές αποτελούν τμήματα βρόγχου που αρχίζουν και τελειώνουν στον ίδιο Y/Σ YT/MT
- 2) Το 'ατρακτοειδές' που χαρακτηρίζεται από το ότι οι γραμμές αρχίζουν από ένα Y/Σ YT/MT και καταλήγουν σε ένα άλλο ή καταλήγουν σε ένα 'Y/Σ Ζεύξεως'.
- 3) Το δίκτυο διπλής τροφοδότησης που ουσιαστικά, συνίσταται από παράλληλες ακτινικές γραμμές και σε κάθε Y/Σ MT/XT φέρονται τροφοδοτήσεις από δύο γραμμές. Από αυτές η μία χρησιμεύει ως «κανονική» τροφοδότηση, και η άλλη ως «εφεδρική».



Εικόνα 6.2 Βρογχοειδές Δίκτυο [23]



Εικόνα 6.3 Ατρακτοειδές Δίκτυο [23]

6.1.3 Εναέρια δίκτυα ΧΤ

Η διαμόρφωση των εναέριων δικτύων ΧΤ, είτε αυτά κατασκευάζονται με γυμνούς ή με μονωμένους αγωγούς, είναι απλούστερη των υπογείων, κατά γενικό δε κανόνα δεν προβλέπονται δυνατότητες διπλών τροφοδοτήσεων.

Χρησιμοποιούνται συνήθως περισσότερες της μιας διατομές αγωγών, συχνά δε, ιδίως στις αγροτικές περιοχές, οι γραμμές δεν είναι τριφασικές, αλλά μονοφασικές (ουδέτερος και μια φάση).

Η τυποποιημένη τάση λειτουργίας των δικτύων διανομής Χ.Τ. είναι τα 400/230 V. Γίνεται η χρήση των εξής τυποποιημένων ειδών αγωγών και μεγεθών διατομών:

Γυμνοί Αγωγοί

- Αγωγοί Al 16 mm² , 35 mm² , 50 mm² (Διατομές ισοδυνάμου χαλκού).
- Αγωγοί Cu 16 mm² , 35 mm² , 50 mm²

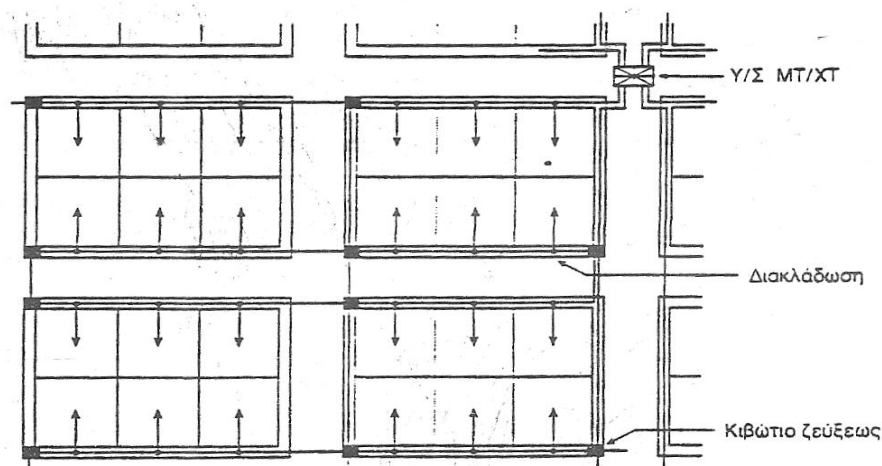
Συνεστραμμένα καλώδια (θωρακισμένου τύπου)

- 3 x 35 mm² Al + 54,6 mm² AAAC
- 3 x 70 mm² Al + 54,6 mm² Al

6.1.4 Υπόγεια δίκτυα ΧΤ

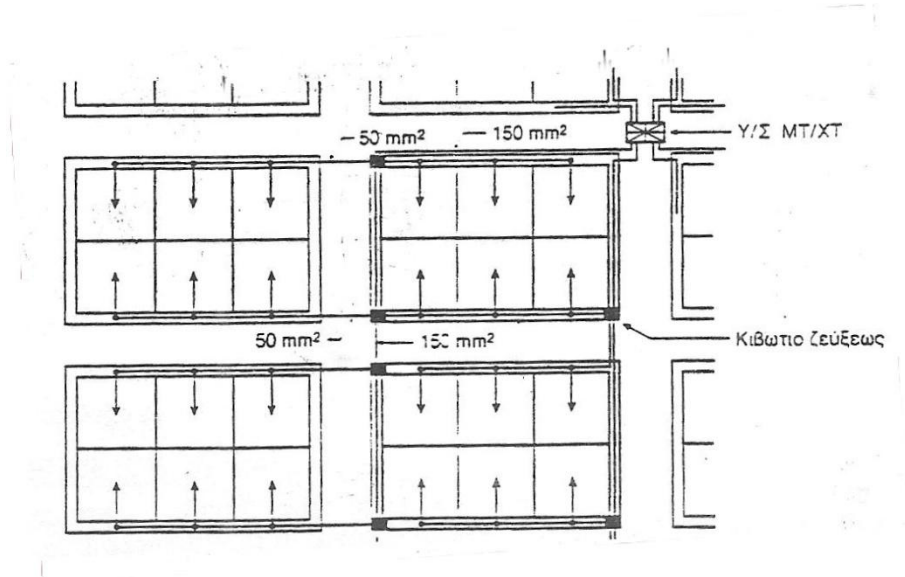
Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να σχεδιαστεί ένα ακτινικό υπόγειο δίκτυο ΧΤ.

- a) Χρησιμοποιούνται καλώδια ενιαίας διατομής. Το δίκτυο διαμορφώνεται ώστε να υπάρχει δυνατότητα διπλής τροφοδότησης (μετά από χειρισμούς) κάθε πλευράς οικοδομικού τετραγώνου, με το σχηματισμό βρόχων (κατασκευαστικά κλειστών, αλλά λειτουργικά ανοικτών), όπως ενδεικτικά δείχνεται στην εικόνα 6.4



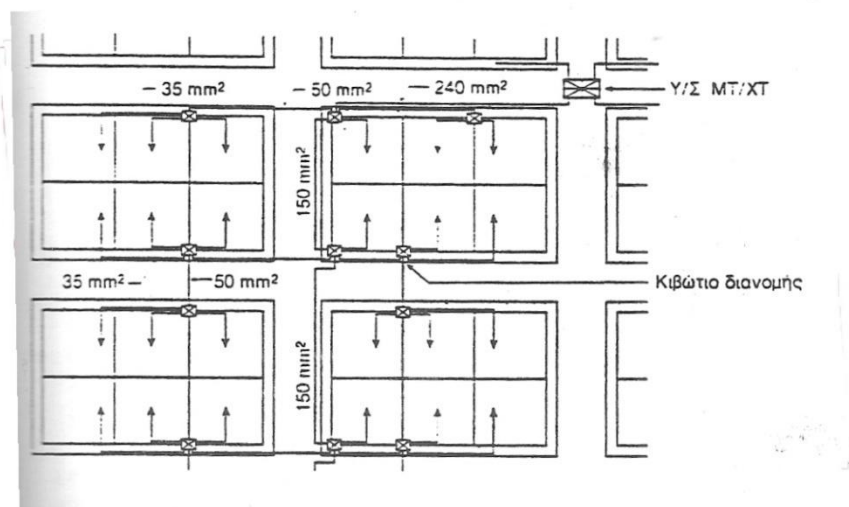
Εικόνα 6.4 Υπόγειο δίκτυο ΧΤ με διπλή δυνατότητα τροφοδότησης [23]

- b) Διαμορφώνονται κύριοι βρόχοι, ανά δύο αναχωρήσεις από τον Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ, αλλά η τροφοδότηση των καταναλωτών γίνεται ακτινικά με καλώδια μικρότερης (ή της ίδιας) διατομής, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.5 Υπόγειο δίκτυο ΧΤ με απλή τροφοδότηση των καταναλωτών [23]

- c) Δεν υπάρχουν κατασκευαστικά κλειστοί βρόχοι, χρησιμοποιούνται δε καλώδια πολλών διατομών, ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί φόρτισης και πτώσης τάσης, χωρίς όμως να υπάρχει η δυνατότητα διπλής τροφοδοτήσεως σε περίπτωση βλάβης, εικόνα 6.6.



Εικόνα 6.6 Υπόγειο δίκτυο ΧΤ με χρησιμοποίηση κιβωτίων διανομής

6.2 Ανύψωση τάσης λόγω της σύνδεσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων

6.2.1 Εισαγωγή

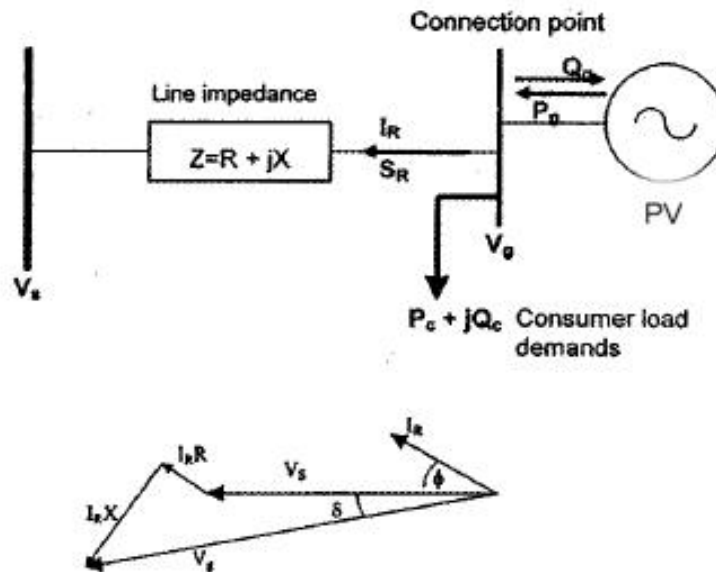
Τα σύγχρονα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάστηκαν για να αποδέχονται τη συνολική ισχύ που χρειάζονται στους Μ/Σ και να τη διανέμουν στους καταναλωτές. Έτσι η ροή τόσο της ενεργού όσο και της αέργου ισχύος ήταν πάντοτε από τα υψηλότερα προς τα χαμηλότερα επίπεδα τάσης.

Ωστόσο με τη σημαντική διείσδυση των φωτοβολταϊκών και γενικότερα της διεσπαρμένης παραγωγής η ροή ισχύος μπορεί να αναστραφεί και το δίκτυο διανομής να μην είναι πλέον ένα παθητικό δίκτυο που τροφοδοτεί φορτία, αλλά ενεργό σύστημα όπου η ροή ισχύος και οι τάσεις καθορίζονται από τη διείσδυση και από τα φορτία.

Η αλλαγές στη ροή της ενεργού και της αέργου ισχύος που προκαλείται από τη διεσπαρμένη παραγωγή έχει σημαντικές τεχνικές και οικονομικές επιπτώσεις για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι σήμερα εξετάζονται κυρίως τα τεχνικά ζητήματα της σύνδεσης και της λειτουργίας της διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής, και οι περισσότερες χώρες έχουν αναπτύξει κριτήρια και πρακτικές για να αντιμετωπίζουν τέτοιες περιπτώσεις. Γενικά η προσέγγιση που υιοθετείται είναι να βεβαιώνεται ότι η διεσπαρμένη παραγωγή δεν επηρεάζει την ποιότητα της ισχύος που παρέχεται στους καταναλωτές, και να θεωρούνται οι γεννήτριες σαν «αρνητικά φορτία». Οι οικονομικές συνέπειες τώρα αρχίζουν να μελετώνται, και γίνονται περισσότερο εμφανείς σε εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε απελευθερωμένες αγορές, όπου υπάρχει σαφής διαχωρισμός ανάμεσα στην παραγωγή και στη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως και στη χώρα μας.

6.2.2 Προσεγγιστικός τύπος εύρεσης της ανύψωσης τάσης σε έναν κόμβο του δικτύου

Ας θεωρήσουμε το απλό δίκτυο της εικόνας 6.7. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από έναν ζυγό με τάση V_S , μια γραμμή με αντίσταση $Z = R + jX$ και από έναν ζυγό με τάση V_G στον οποίο έχει συνδεθεί η μονάδα φωτοβολταϊκής παραγωγής.



Εικόνα 6.7 Δίκτυο με διείσδυση φωτοβολταϊκής παραγωγής

Η ενεργός και άεργος ισχύς των φωτοβολταϊκών είναι P_G και Q_G ενώ η ενεργός και άεργος κατανάλωση των φορτίων είναι P_C και Q_C αντίστοιχα.

Η φαινόμενη ισχύς στο ζυγό των φωτοβολταϊκών ισούται με:

$$S_R = P_R + jQ_R = P_G - jQ_G - P_C - jQ_C \quad (6.1) \text{ και καθώς}$$

$$S_R = V_G I_R^*, \quad I_R = (P_R - jQ_R) / V_G^* \quad (6.2)$$

θα έχουμε:

$$\begin{aligned} V_G &= V_S + I_R Z \\ &= V_S + (R + jX)(P_R - jQ_R) / V_G^* \\ &= V_S + (P_R R + X Q_R) / V_G^* + j(P_R X - R Q_R) / V_G^* \end{aligned} \quad (6.3)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν και το διάγραμμα της εικόνας 6.7 έχουμε:

$$V_G \sin \delta = (P_R X - Q_R R) / V_S \quad (6.4)$$

Αφού η γωνία δ είναι πολύ μικρή ο όρος $(P_R X - Q_R R) / V_S$ είναι επίσης πολύ μικρός και έτσι τελικά η ανύψωση τάσης μπορεί να υπολογιστεί με σχετικά καλή ακρίβεια από τον τύπο:

$$\Delta V = (P_R R + Q_R X) / V_G \quad (6.5)$$

6.2.3 Τρόποι περιορισμού της ανύψωσης τάσης σε ένα δίκτυο χαμηλής τάσης

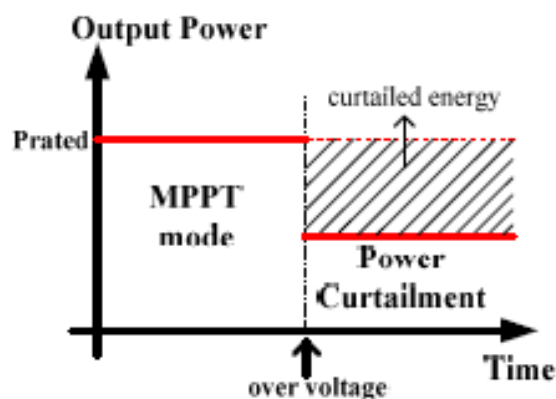
Υπάρχουν ορισμένοι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να αποφύγουμε την ανύψωση τάσης στους κόμβους σύνδεσης των φωτοβολταϊκών. Οι τρόποι αυτοί συνοψίζονται ως εξής [29]:

- Μείωση της παραγόμενης ισχύος των φωτοβολταϊκών
- Δυνατότητα έλεγχου της άεργου ισχύος των αντιστροφικών φωτοβολταϊκών
- Δυνατότητα αποθήκευσης περίσσειας ισχύος
- DVR, STATCOM, SVC

Παρακάτω θα αναλυθούν δυο από τους τρόπους αυτούς, δηλαδή η δυνατότητα μείωσης της παραγόμενης ισχύος καθώς επίσης και ελέγχου άεργου ισχύος.

6.2.3.1 Μείωση παραγόμενης ισχύος (Power Curtailment)

Με τη μέθοδο αυτή όταν η τάση στον αντιστροφέα φτάσει πάνω από ένα όριο η ενεργός ισχύς περιορίζεται, μεταφέροντας το σημείο λειτουργίας από το σημείο MPPT σε σημείο πιο κοντά στην τάση ανοιχτοκύκλωσης του φωτοβολταϊκού panel. Αν η τάση στο σημείο σύνδεσης παραμένει πάνω από το επιτρεπτό όριο (π.χ. $U_{LIMIT} = U_N + 10\%U_N$) τότε ο αντιστροφέας παύει τη λειτουργία του.



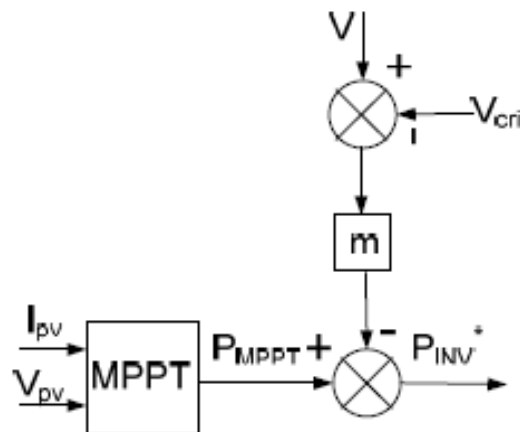
Εικόνα 6.8 Περιορισμός ενεργού ισχύος έπειτα από ανύψωση τάσης [29]

Πιο συγκεκριμένα προτείνεται η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο από τον αντιστροφέα να είναι συνάρτηση της τάσης κατά τον ακόλουθο τρόπο

$$P_{inv} = \begin{cases} P_{MPPT} - m (V - V_{cri}) & \forall V \geq V_{cri} \\ P_{MPPT} & \forall V < V_{cri} \end{cases} \quad (6.6)$$

Όπου P_{MPPT} είναι η μέγιστη δυνατή ισχύς από τη συστοιχία των φωτοβολταϊκών για μια δεδομένη τιμή ηλιακής ακτινοβολίας (kW), m είναι ένας παράγοντας κλίσης (kW/V) και

V_{cri} είναι η τάση (V) πάνω από την οποία η ισχύς που προσφέρεται από τον αντιστροφέα μειώνεται με τον συντελεστή κλίσης m . Για $V < V_{cri}$ ο inverter διοχετεύει στο δίκτυο ισχύ P_{MPPT} , όπως κάνουν οι περισσότεροι φωτοβολταϊκοί αντιστροφέες ενώ για $V > V_{cri}$ μειώνει την ισχύ εξόδου του. Χρησιμοποιεί την τάση στους ακροδέκτες για να καθορίσει πόση ισχύς θα πρέπει να περιοριστεί από κάθε αντιστροφέα PV. Οι παράμετροι (m και V_{cri}) μπορούν να επιλεγούν για τον αντιστροφέα ώστε να ικανοποιούν τα όρια τάσης στους ακροδέκτες τους. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συντονίσουν τους φωτοβολταϊκούς μετατροπείς, ώστε να περιορίζουν από κοινού την ενεργό ισχύς με αποτέλεσμα τη διατήρηση της τάσης εντός αποδεκτών ορίων σε όλο το μήκος της γραμμής, δίχως κανάλι επικοινωνίας.



Εικόνα 6.9 Λογική περιορισμού της ενεργού ισχύος για μείωση της ανύψωσης τάσης [30]

Τέλος πρέπει να σημειωθεί πως η στρατηγική αυτή περιορισμού της ενεργού ισχύος δεν είναι η καλύτερη δυνατή αφού είμαστε αναγκασμένοι να περιορίσουμε την εκμεταλλεύσιμη ισχύ που παράγουν τα φωτοβολταϊκά. Επίσης η στρατηγική αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μερικές περιπτώσεις σε σημαντική μείωση της παραγόμενης ισχύος, γεγονός που αδικεί ορισμένους παραγωγούς έναντι άλλων με σημαντικές οικονομικές απώλειες.

6.2.3.2 Δυνατότητα ρύθμισης αέργου ισχύος (power factor control, PFC)

Όπως έχουμε δει η ανύψωση τάσης σε ένα κόμβο του δικτύου δίνεται από την σχέση:

$$\Delta V = \frac{(P_R R + Q_R X)}{V_G} \quad (6.7)$$

Από τη σχέση αυτή γίνεται αντιληπτό ότι η ανύψωση τάσης ΔV εξαρτάται από την ενεργό ισχύ στον κόμβο σύνδεσης του φωτοβολταϊκού αλλά και από την άεργο. Το μέτρο επίδρασης των δυο αυτών μεγεθών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του δικτύου, δηλαδή

από τις τιμές R και X της γραμμής σύνδεσης. Στη ΜΤ ο επαγωγικός χαρακτήρας της γραμμής είναι περισσότερο έντονος από τον ωμικό, για αυτό ο έλεγχος της τάσης με τη μεταβολή της άεργου ισχύος είναι πιο αποδοτικός από ότι στη ΧΤ. Επίσης στη ΧΤ χρειάζεται μεγαλύτερη ποσότητα απορροφούμενης άεργου ισχύος για να επιτύχουμε μείωση της ανύψωσης τάσης. Παρόλα αυτά η δυνατότητα των αντιστροφών φωτοβολταϊκών να παράγουν ισχύ με συντελεστή ισχύος διάφορο της μονάδας, καθιστά τη ρύθμιση της άεργου ισχύος ένα δυνατό τρόπο μείωσης της ανύψωσης τάσης στον κόμβο σύνδεσης. Τέλος πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα ότι η στρατηγική αυτή προκαλεί και αρνητικές επιπτώσεις καθώς λόγω της ροής άεργου ισχύος στο δίκτυο, έχουμε αύξηση των απωλειών στις γραμμές αλλά και υπερφόρτιση της γραμμής και του μετασχηματιστή.

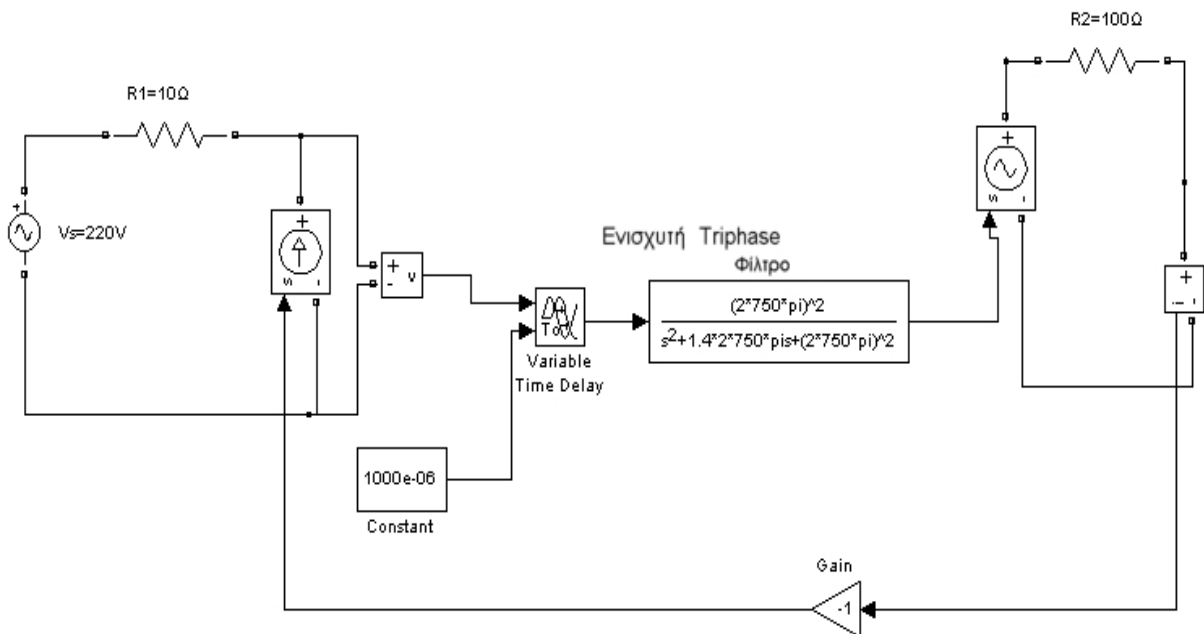
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 Εφαρμογή της τεχνικής PHIL σε ένα διαιρέτη τάσης

Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με την εφαρμογή της τεχνικής PHIL σε έναν απλό διαιρέτη τάσης και θα μελετήσουμε τα ζητήματα ευστάθειας και ακρίβειας τα όποια προκύπτουν. Περισσότερες πληροφορίες για τα ζητήματα αυτά αλλά και για την τεχνική PHIL μπορούν να αναζητηθούν στο κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας.

7.1.1 Τοπολογία κυκλώματος

Το κύκλωμα που μελετήσαμε παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 7.1 Εφαρμογή της τεχνικής PHIL σε διαιρέτη τάσης

Το κύκλωμα στην ιδανική περίπτωση αποτελείται από μια πηγή τάσης και δυο αντιστάσεις. Εφαρμόζοντας εδώ την συγκεκριμένη τεχνική η πηγή τάσης και η αντίσταση R_1 είναι στοιχεία του δικτύου που βρίσκονται μόνο στην προσομοίωση ενώ η αντίσταση R_2 (το HUT δηλαδή) βρίσκεται ως μια πραγματική αντίσταση του εργαστηρίου. Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να επαναλάβουμε την πειραματική μας διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε σε σχεδόν όλα τα πειράματα.

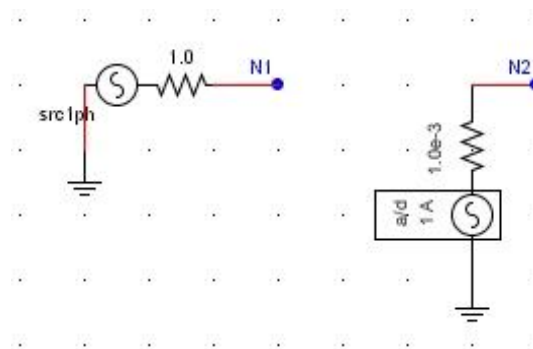
Αρχικά, το προσομοιωμένο δίκτυο κατασκευάζεται στο πρόγραμμα RSCAD του RTDS. Έπειτα, όπως βλέπουμε και από την εικόνα 7.1 η τάση μετά την αντίσταση μετρείται και δίνεται ως είσοδος στον ενισχυτή μας, ο οποίος είναι ένας ενισχυτής AC/DC/AC της εταιρείας TRIPHASE (η τοπολογία περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5) και τελικά το σήμα της

τάσης ενισχύεται και εφαρμόζεται στην πραγματική αντίσταση R_2 . Έπειτα το ρεύμα μετρείται από τα μετρητικά του ενισχυτή και δίνεται ως είσοδος στο RTDS με αποτέλεσμα να κλείνει ο βρόχος που περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 4. Σημειώνεται πως στη μετάδοση του σήματος υπάρχει και μια χρονική καθυστέρηση περί τα $1000\mu s$, ενώ για την ενίσχυση του σήματος ιδιαίτερη επίδραση έχει κυρίως το φίλτρο εξόδου του ενισχυτή το οποίο και ήταν δεύτερης τάξης με συχνότητα αποκοπής τα 750 Hz .

7.1.2 Εύρεση χρονικής καθυστέρησης στον κλειστό βρόχο

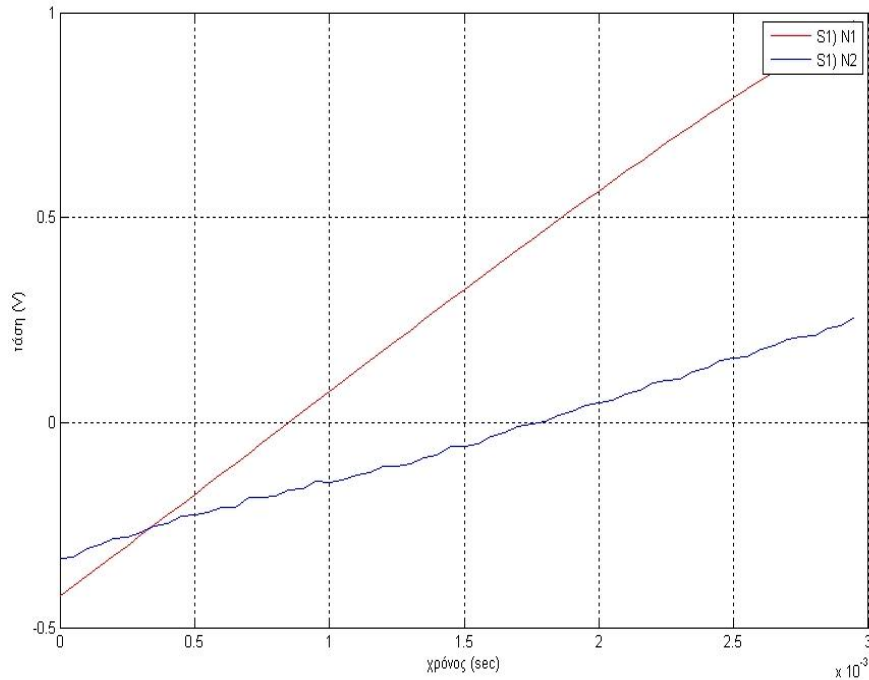
Όπως αναφέρθηκε μια καλή αναπαράσταση του κυκλώματος σε μια τεχνική PHIL προϋποθέτει τον καλό προσδιορισμό της χρονικής καθυστέρησης (time delay) στη μετάδοση των σημάτων. Για τον λόγο αυτό αρχικό πείραμα ήταν η εύρεση του time delay για την δική μας τοπολογία.

Καταρχήν δημιουργήσαμε στο RSCAD το δίκτυο της εικόνας 7.2



Εικόνα 7.2 Κύκλωμα για εύρεση του time delay

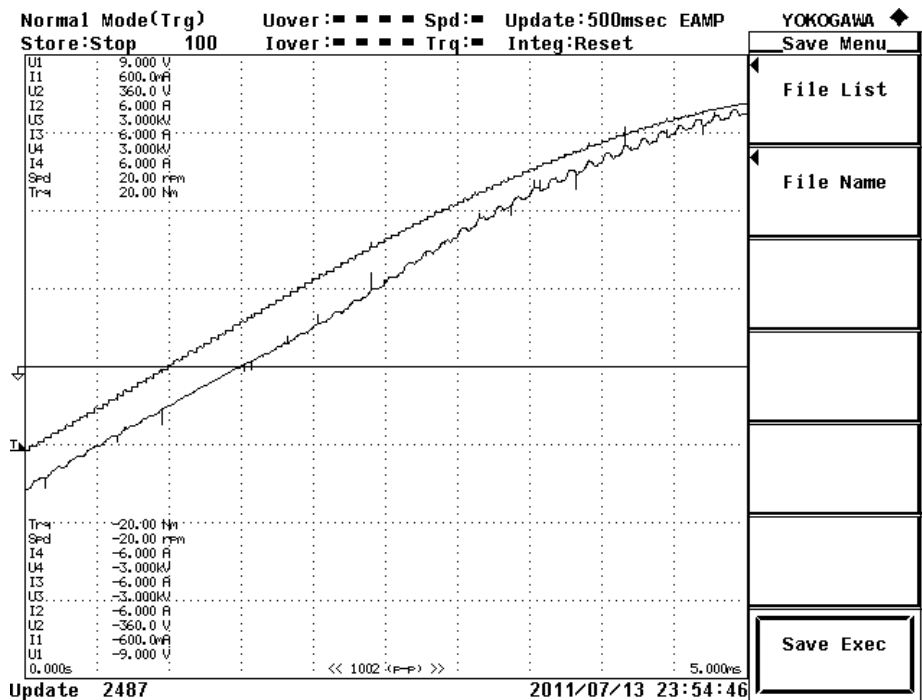
Με την πρώτη πηγή τάσης παρήγαμε μια τάση η οποία ενισχυόταν από τον ενισχυτή της TRIPHASE και εφαρμοζόταν σε μια πραγματική αντίσταση ισχύος. Το ρεύμα που κυκλοφορούσε στην αντίσταση ερχόταν σαν ανατροφοδότηση στο RTDS και μέσω αυτού του σήματος χαμηλής τάσης μπορούσαμε με την ανάστροφη διαδικασία να παράγουμε στο RSCAD μια τάση από την δεύτερη πηγή στο σχήμα. Αυτά τα δυο σήματα είχαμε την δυνατότητα να τα έχουμε στον ίδιο άξονα και να βρούμε την μετατόπιση του αρχικού από το παραγόμενο, δηλαδή να βρούμε το συνολικό time delay.



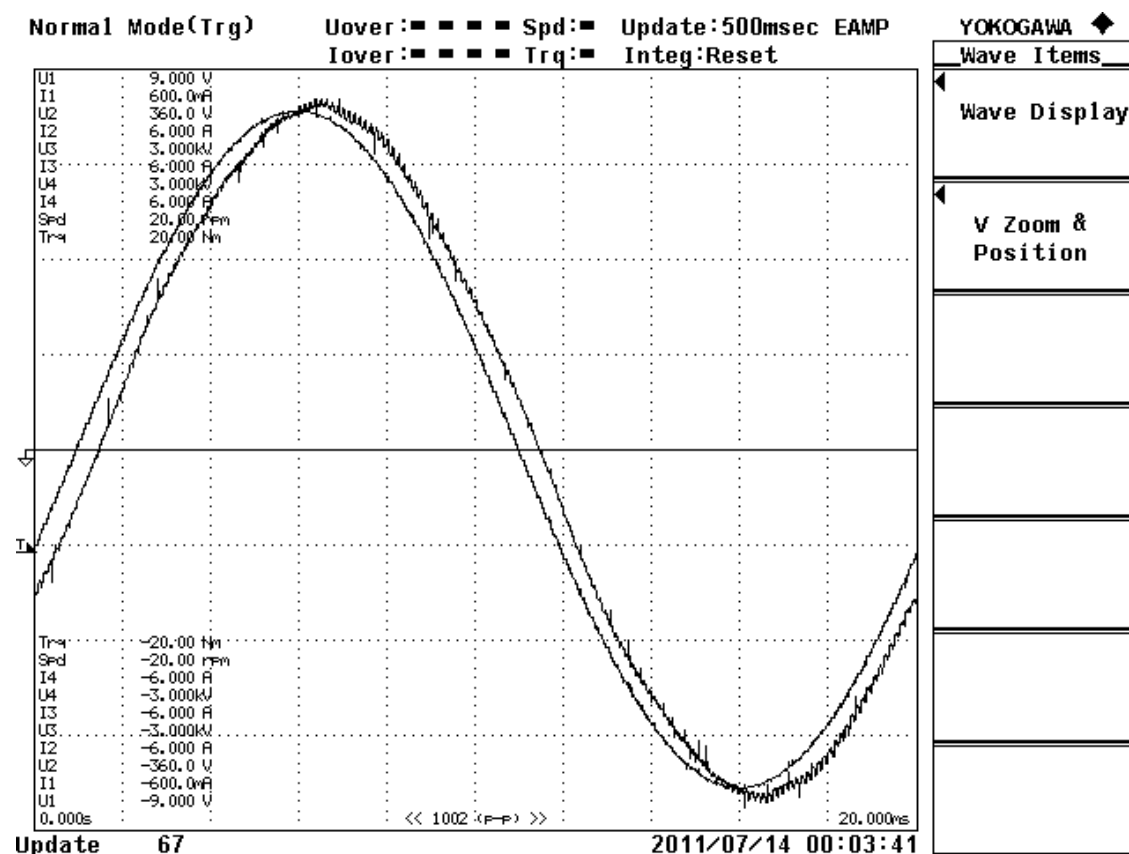
Εικόνα 7.3 Συνολικό time delay της τοπολογίας μας.

Η διαδικασία αυτή έγινε για περίπου δέκα μετρήσεις και μετά λάβαμε τον μέσο όρο των τιμών αυτών και καταλήξαμε στην τιμή των 1000μs.

Με την διαδικασία αυτή ήμασταν σε θέση να μετρήσουμε και την χρονική καθυστέρηση που δημιουργούσε ο ενισχυτής της TRIPHASE μέσω ενός power analyzer YOKOGAWA.



Εικόνα 7.4 Χρονική καθυστέρηση του ενισχυτή της TRIPHASE (περίπου 500μs)



Εικόνα 7.5 Σύγκριση σήματος εισόδου – εξόδου με την βοήθεια κατάλληλου scaling για τον ενισχυτή της TRIPHASE

7.1.3 Μελέτη ευστάθειας του κλειστού βρόχου για το κύκλωμα του διαιρέτη τάσης

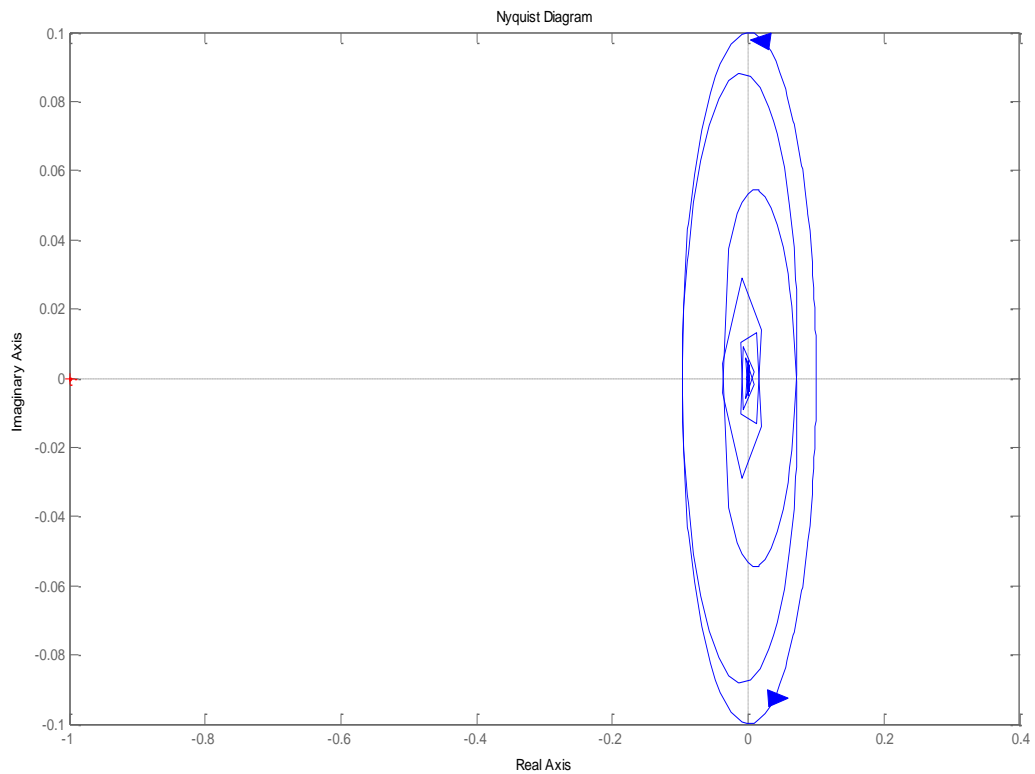
Προτού υλοποιήσουμε το κύκλωμα θα πρέπει όπως έχουμε ήδη αναφέρει να προηγηθεί μια μελέτη ευστάθειας για την τοπολογία μας. Η μελέτη αυτή θα γίνει με χρήση του κριτηρίου nyquist.

Η συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου είναι:

$$G_{OL} = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{(2 \cdot 750 \cdot \pi)^2}{s^2 + 1,4 \cdot 2 \cdot 750 \cdot \pi \cdot s + (2 \cdot 750 \cdot \pi)^2} \cdot \exp(-1000 \cdot 10^{-6} \cdot s) \quad (7.1) \text{ όπου}$$

$$R_1 = 10\Omega \text{ και } R_2 = 100\Omega$$

Το διάγραμμα nyquist είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 7.6 Διάγραμμα nyquist ανοικτού βρόχου

Όπως βλέπουμε και από το διάγραμμα nyquist ανοικτού βρόχου το σύστημα μας είναι ευσταθές. Αυτό προκύπτει καθώς το σημείο $(-1,0)$ δεν περικυκλώνεται από το διάγραμμα ενώ ταυτόχρονα το χαρακτηριστικό πολυώνυμο (παρονομαστής του κλάσματος) της συνάρτησης μεταφοράς, δεν περιέχει ρίζες στο δεξιό μιγαδικό ημιεπίπεδο.

7.1.4 Μελέτη ακρίβειας του κλειστού βρόχου για το κύκλωμα του διαιρέτη τάσης

Για την μελέτη της ακρίβειας θα θεωρήσουμε δυο μεγέθη τα όποια ορίζονται ως εξής:

$$q_{IDEAL} = \frac{V_{R2}}{V_S} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (7.2)$$

$$q_{REAL} = \frac{V_{R2}(s)}{V_S(s)} = \frac{R_2}{R_2 + \exp(-s \cdot Tdelay) \cdot G_{INT} \cdot R_1} \quad (7.3)$$

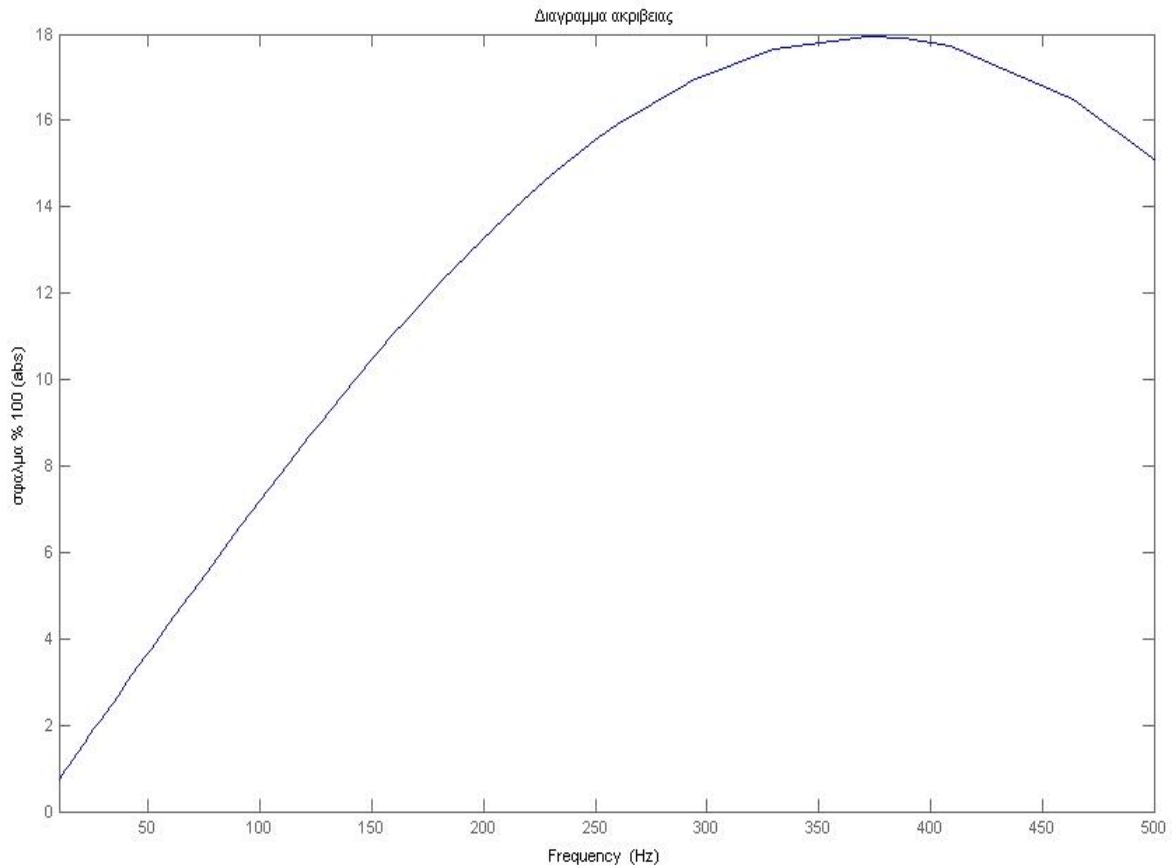
$$\text{Όπου } Tdelay = 1000\mu s \text{ και } G_{INT} = \frac{(2 \cdot 750 \cdot \pi)^2}{s^2 + 1,4 \cdot 2 \cdot 750 \cdot \pi \cdot s + (2 \cdot 750 \cdot \pi)^2} \quad (7.4)$$

δηλαδή η χρονική καθυστέρηση και η συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή αντίστοιχα. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι ο ενισχυτής εδώ αλλά και όπου χρειαστεί να χρησιμοποιηθεί, θεωρήθηκε ως ιδανικός με μια χρονική καθυστέρηση που έχει ενσωματωθεί στο ολικό time delay αλλά και μια παραμόρφωση της τάσης λόγω του φίλτρου του.

Ως μέτρο της ακρίβειας θεωρούμε το μέγεθος:

$$a(\%) = \frac{|q_{REAL} - q_{IDEAL}|}{q_{IDEAL}} \cdot 100\% \quad (7.5)$$

Παρουσιάζουμε σε αυτό το σημείο την επίδραση της συχνότητας λειτουργίας στο σφάλμα.

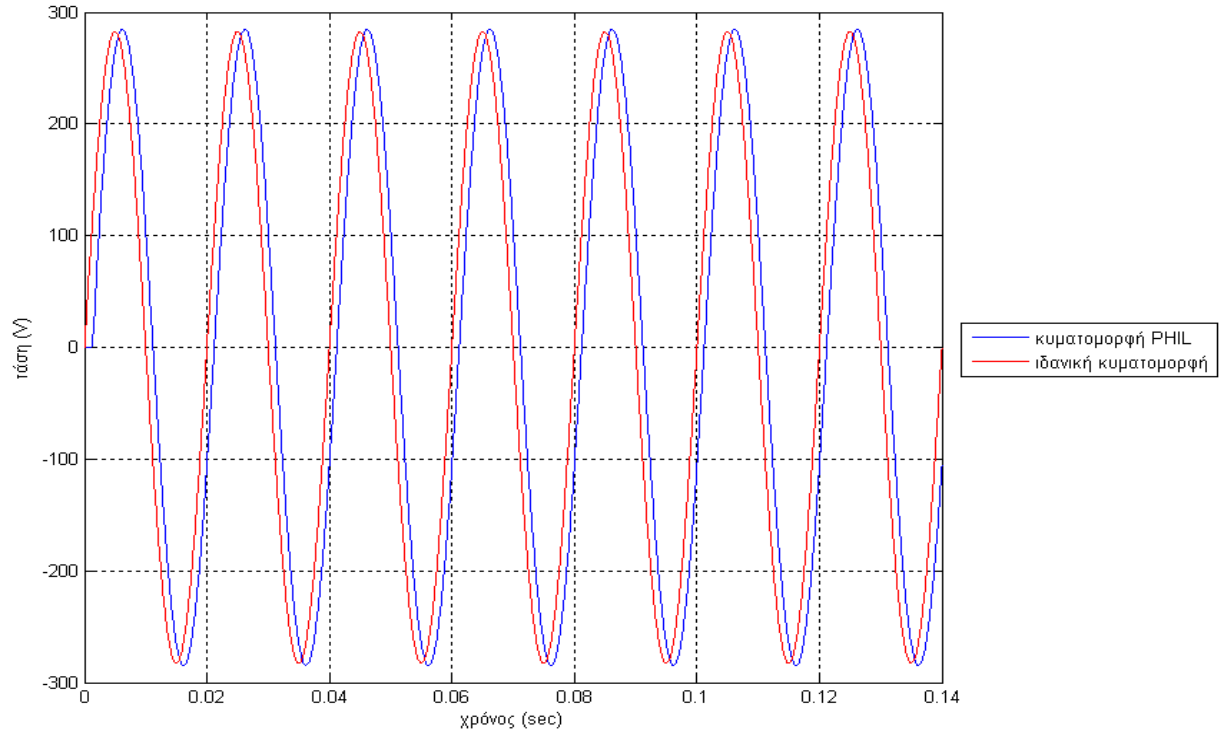


Εικόνα 7.7 Διάγραμμα ακρίβειας για την τοπολογία

Σημαντική παρατήρηση από το διάγραμμα αυτό είναι ότι στα 50 Hz που θα δουλέψει το κύκλωμα, το σφάλμα ανέρχεται μόνο στα 3.68% ενώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι για αύξηση της συχνότητας λειτουργίας παρατηρούμε αύξηση στο τελικό σφάλμα.

7.1.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Simulink για τον διαιρέτη τάσης

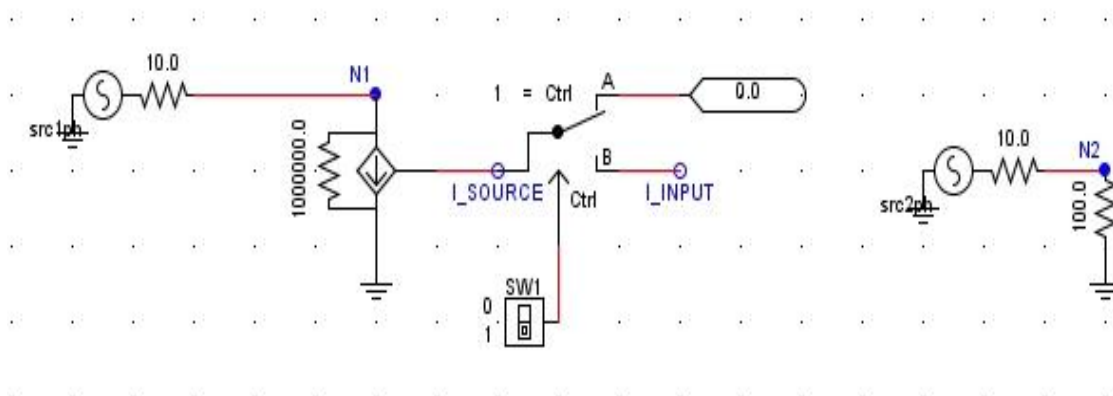
Στην εικόνα 7.8 παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάσης που εφαρμόζεται πάνω στην αντίσταση R_2 εκτελώντας μια προσομοίωση σε Simulink. Η κυματομορφή με χρώμα κόκκινο είναι η τάση στην ιδανική περίπτωση ενώ η κυματομορφή με μπλε είναι η κυματομορφή της τάσης που παράγεται στην PHIL προσομοίωση αν την εκτελέσουμε καθαρά στο Simulink (offline). Η εικόνα 7.1 δείχνει το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για τον σκοπό αυτό.



Εικόνα 7.8 Κυματομορφή τάσης πάνω στην αντίσταση R_2 όπου με κόκκινο χρώμα έχουμε την ιδανική περίπτωση ενώ με μπλε χρώμα την περίπτωση εφαρμογής του PHIL σε offline προσομοίωση

7.1.6 Αποτελέσματα από την εφαρμογή της PHIL τεχνικής σε διαιρέτη τάσης με πραγματική αντίσταση

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το κύκλωμα που κατασκευάσαμε στο RSCAD.

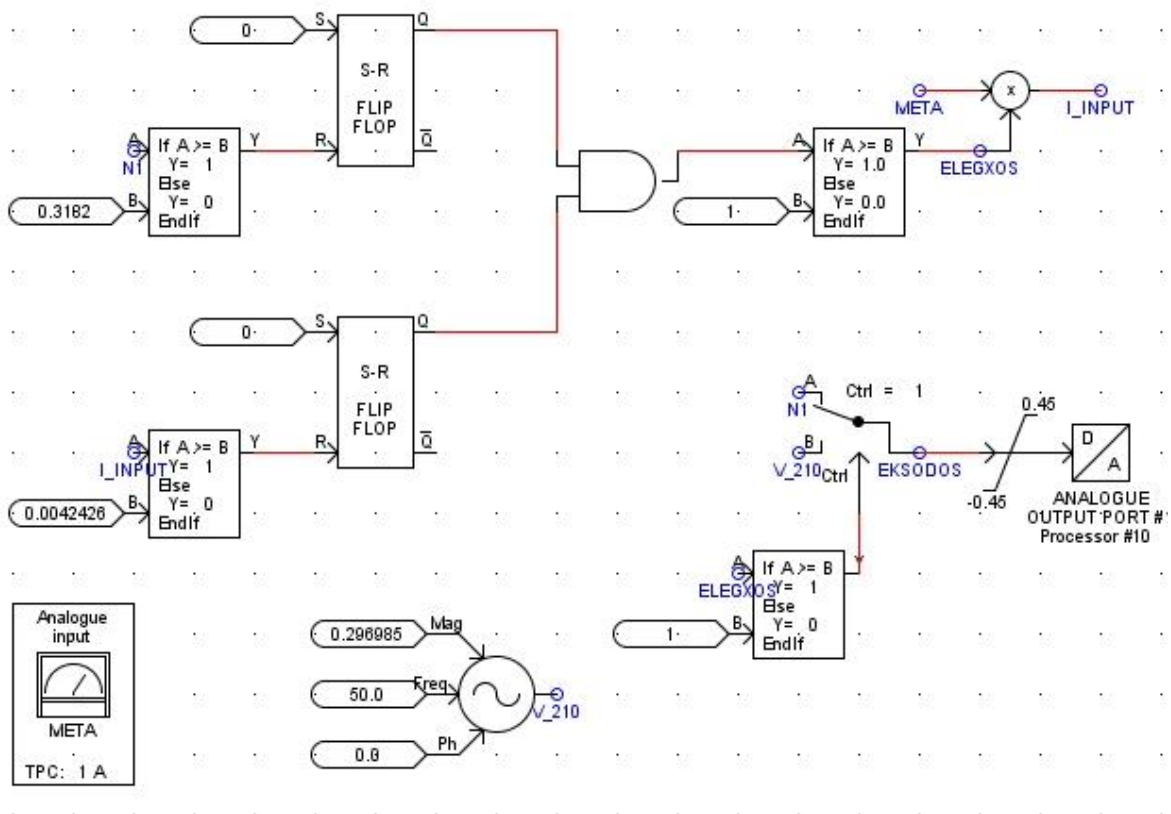


Εικόνα 7.9 Κύκλωμα του διαιρέτη τάσης στο RSCAD

Στην εικόνα αυτή βλέπουμε δυο κυκλώματα. Αυτό που βρίσκεται στα δεξιά είναι το ιδανικό κύκλωμα με το οποίο και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που θα λάβουμε από την

εκτέλεση του πειράματος. Στα αριστερά έχουμε την πηγή τάσεως μαζί με μια εξαρτημένη πηγή ρεύματος για να πραγματοποιήσουμε τον αλγόριθμο του ιδανικού μετασχηματιστή, όπως αυτός περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο διακόπτης υπάρχει ώστε αρχικά το κύκλωμα να ξεκινήσει σε ανοικτό βρόχο και μετά να κλείσουμε τον διακόπτη και να περάσουμε σε κλειστό.

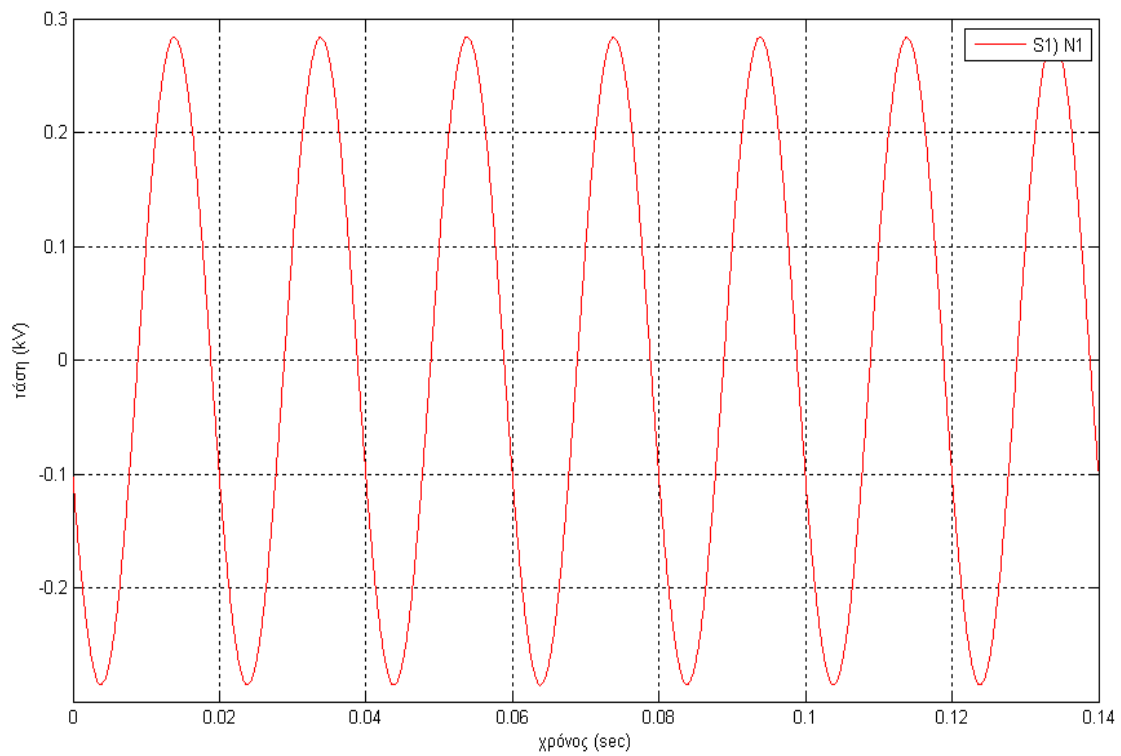
Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να παρουσιάσουμε και τις προστασίες που τοποθετήσαμε στο κύκλωμα του RSCAD ώστε να προστατεύουμε το RTDS από τυχόν αστάθεια, η οποία θα αύξανε το ρεύμα και την τάση στην είσοδο και στην έξοδο αντίστοιχα.



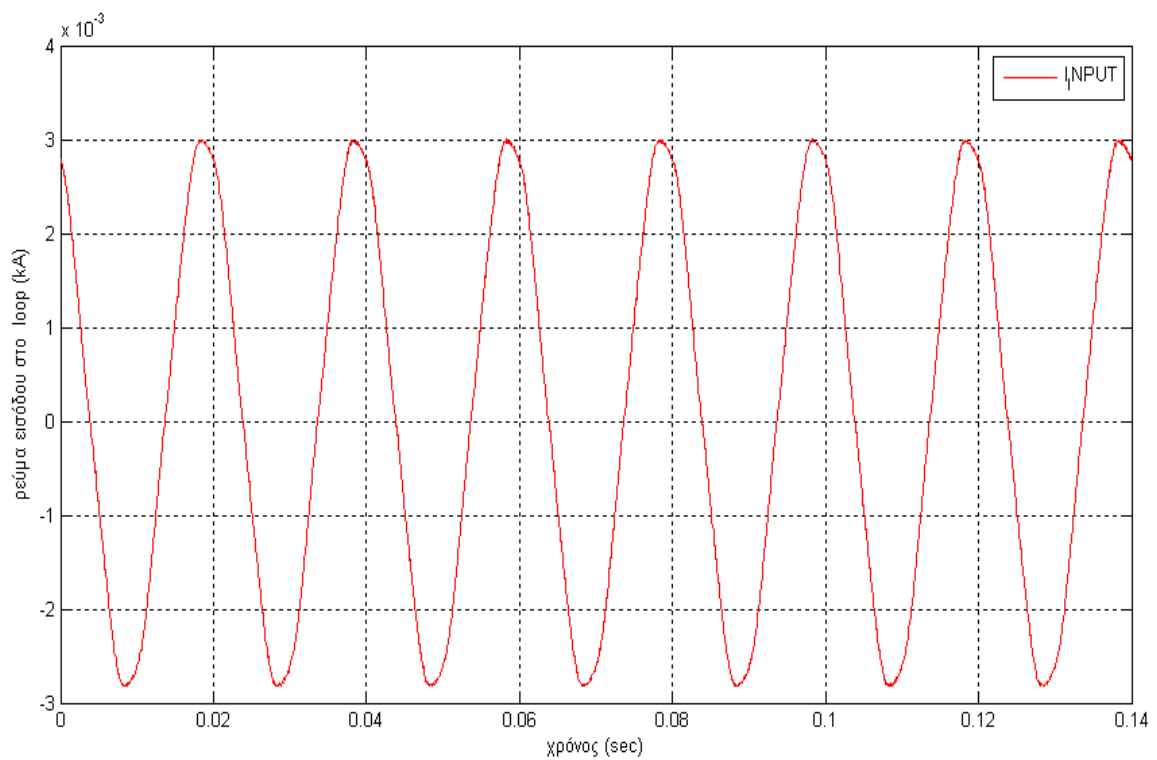
Εικόνα 7.10 Προστασίες από υπέρταση και υπερρένταση στο κύκλωμα του RSCAD

Με τη διάταξη αυτή μπορούμε να πετύχουμε προστασία από υπερρένταση και υπέρταση ταυτόχρονα. Στην μια περίπτωση η τάση N1 ελέγχεται με μια άνω τιμή και αν την ξεπερνά μηδενίζει το ρεύμα στην είσοδο της εξαρτημένης πηγής ρεύματος. Το ίδιο συμβαίνει και με το ρεύμα και αρκεί μια συνθήκη να ξεπεραστεί ώστε να μηδενίσουμε το ρεύμα και να ανοίξει ο βρόχος. Τα flip-flop χρησιμοποιήθηκαν ώστε να παραμείνει ο μηδενισμός στο ρεύμα και να μην κλείσει πάλι ο βρόχος όταν η τάση ή το ρεύμα περάσουν σε επιτρεπτά επίπεδα. Τέλος, στην περίπτωση σφάλματος η τάση εξόδου από το RTDS και είσοδο στον ενισχυτή της TRIPHASE γίνεται 210 V καθώς δεν πρέπει να δώσουμε σε καμία περίπτωση μηδενικό σήμα αναφοράς στον ενισχυτή.

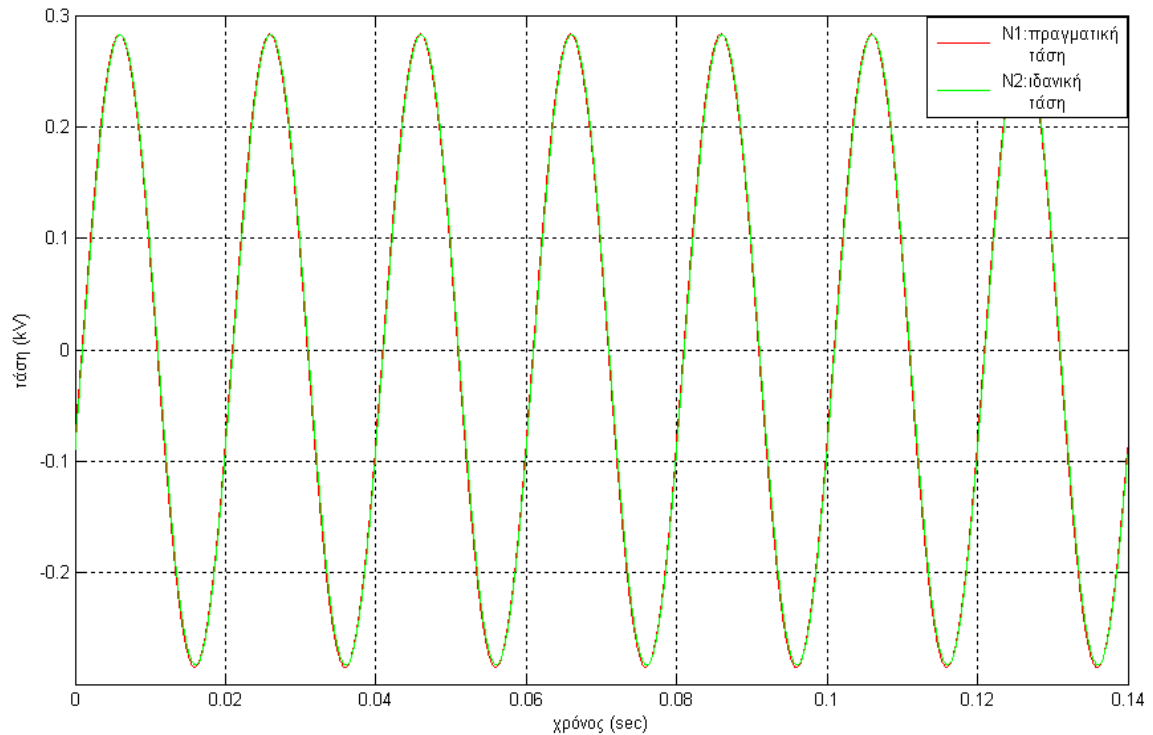
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις για το ρεύμα και την τάση.



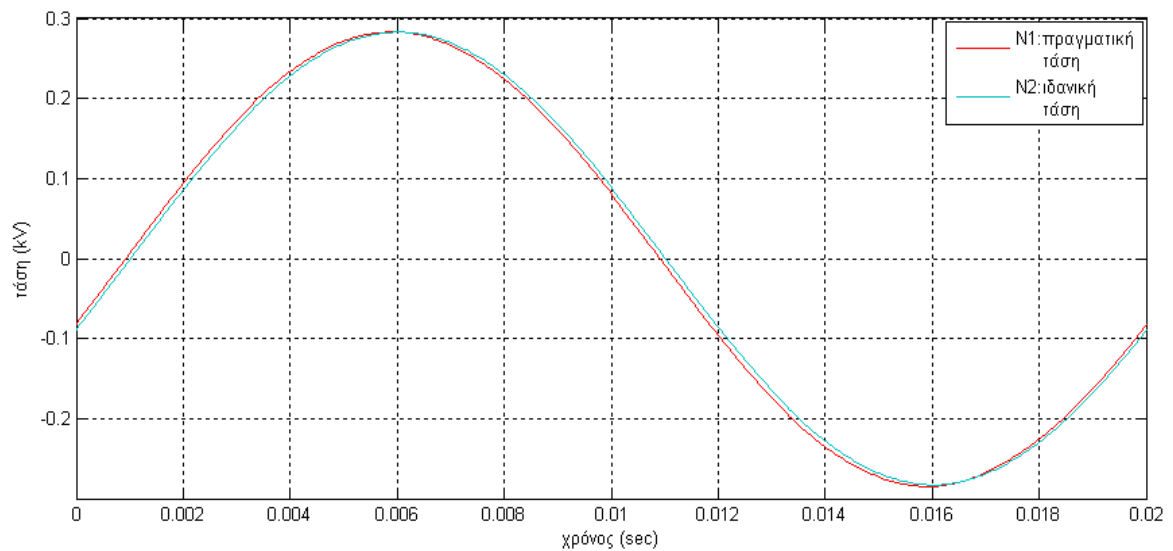
Εικόνα 7.11 Κυματομορφή της τάσης N1 του διαιρέτη τάσεως, σε μια τεχνική PHIL



Εικόνα 7.12 Κυματομορφή του ρεύματος εισόδου στον διαιρέτη τάσεως, σε μια τεχνική PHIL



Εικόνα 7.13 Σύγκριση των κυματομορφών της τάσης στην ιδανική και την περίπτωση εφαρμογή της τεχνικής PHIL

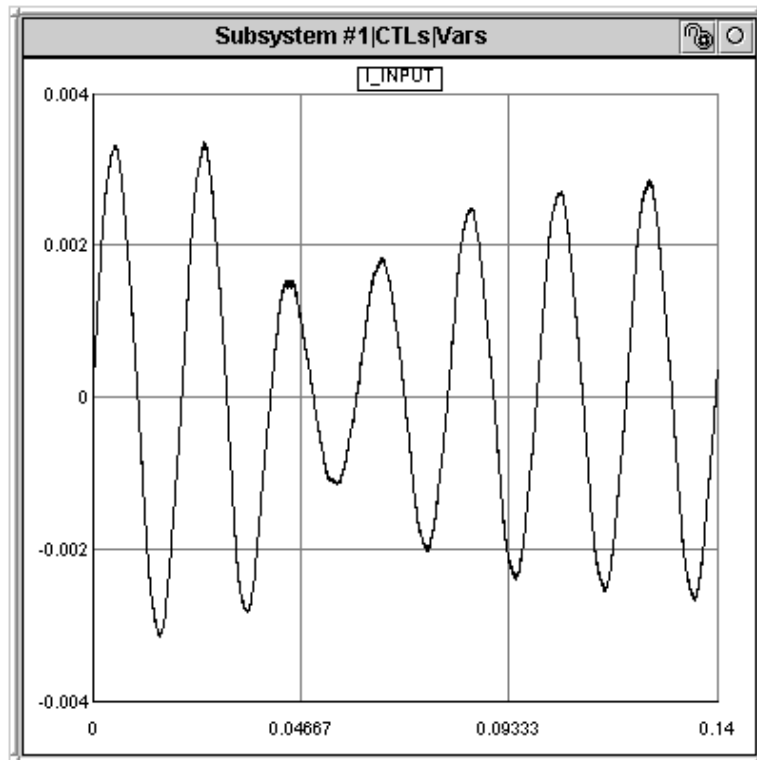


Εικόνα 7.14 Σύγκριση των κυματομορφών της τάσης στην ιδανική και την περίπτωση εφαρμογή της τεχνικής PHIL,σε καλύτερη κλίμακα

Όπως βλέπουμε από τις εικόνες η πραγματική τάση ακολουθεί την ιδανική πάρα πολύ καλά. Το σφάλμα ακρίβειας εφαρμόζοντας τη σχέση (7.5) για τη μέγιστη διάφορα των δυο σημάτων και για τιμή του χρόνου $t = 0.0132 \text{ sec}$ προκύπτει ίσο με 4,97% κοντά δηλαδή στην θεωρητική τιμή του 4%. Έχουμε δηλαδή

$$a(\%) = \frac{|q_{REAL} - q_{IDEAL}|}{q_{IDEAL}} \cdot 100\% = \frac{|0.1879 - 0.1791|}{0.179} \cdot 100\% = 4.97\% \quad (7.6)$$

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει το μεταβατικό φαινόμενο που πραγματοποιείται στο ρεύμα την στιγμή που κλείνουμε τον διακόπτη.



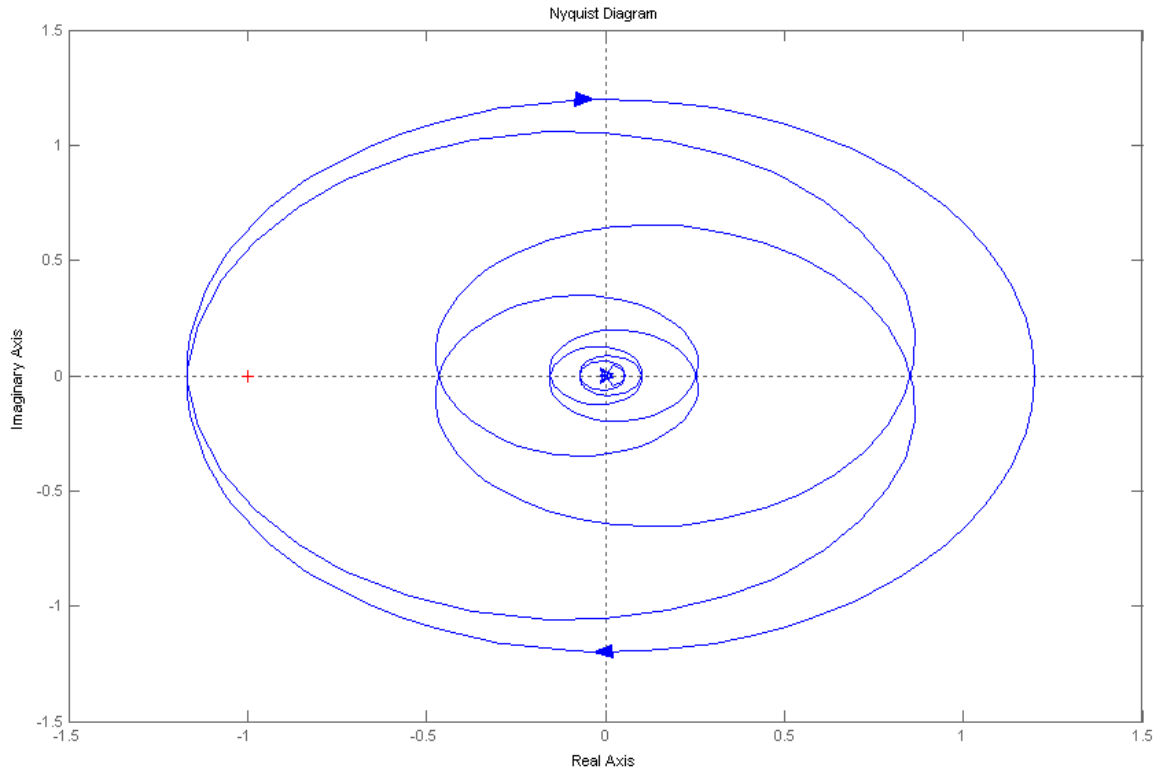
Εικόνα 7.15 Μεταβατικό φαινόμενο στο ρεύμα εισόδου του RTDS

7.1.7 Μελέτη ευστάθειας του κλειστού βρόχου για το κύκλωμα του διαιρέτη τάσης στην περίπτωση που $R_1 > R_2$

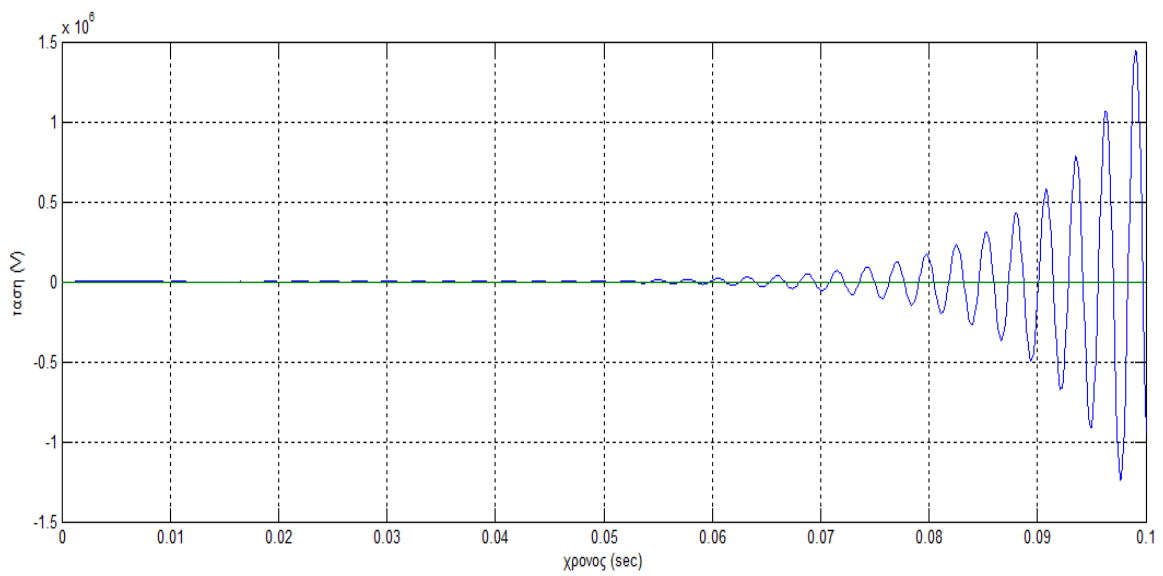
Ας θεωρήσουμε μια περίπτωση όπου $R_1 > R_2$. Για παράδειγμα $R_1 = 60\Omega$ και $R_2 = 50\Omega$. Η συνάρτηση μεταφοράς σε αυτήν την περίπτωση, και δεδομένου ότι η τοπολογία και τα χαρακτηριστικά της παραμένουν τα ίδια με πριν, θα είναι:

$$G_{OL} = \frac{60}{50} \cdot \frac{(2 \cdot 750 \cdot \pi)^2}{s^2 + 1,4 \cdot 2 \cdot 750 \cdot \pi \cdot s + (2 \cdot 750 \cdot \pi)^2} \cdot \exp(-1000 \cdot 10^{-6} \cdot s) \quad (7.7)$$

Το διάγραμμα nyquist στην περίπτωση αυτήν είναι θα είναι:



Εικόνα 7.16 Διάγραμμα nyquist ανοικτού βρόχου στην περίπτωση που $R_1 > R_2$



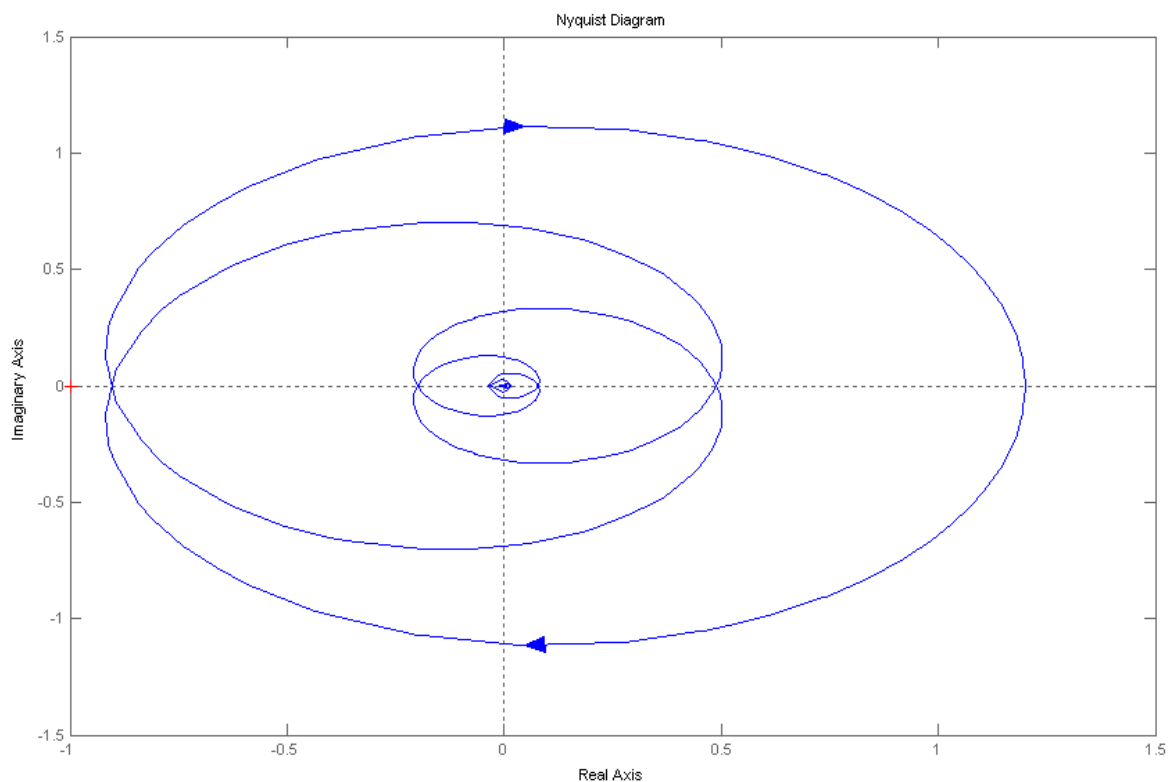
Εικόνα 7.17 Κυματομορφή της τάσης που εφαρμόζεται στην αντίσταση στην περίπτωση που $R_1 > R_2$ σε μια εκτέλεση στο simulink

Από τις εικόνες 7.16 και 7.17 βλέπουμε πως το σύστημα μας μεταβαίνει στην αστάθεια για αυτές τις τιμές των αντιστάσεων, πράγμα το οποίο έρχεται σε συμφωνία με την θεωρητική ανάλυση που έγινε στο κεφάλαιο 4.

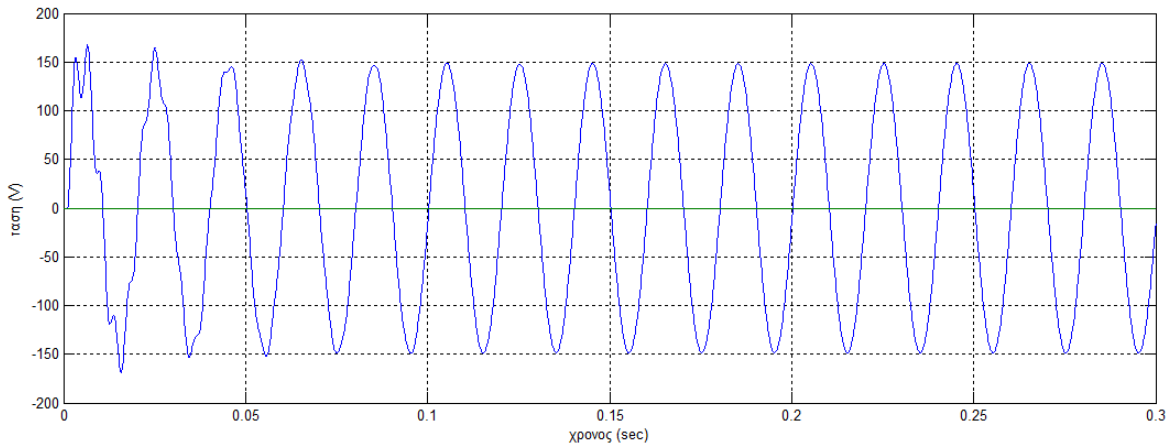
Παρόλα αυτά υπάρχει στη βιβλιογραφία [24] ένας τρόπος με τον οποίο μπορούμε μια τέτοια κατάσταση να την αντιμετωπίσουμε. Η χρήση ενός φίλτρου ανατροφοδότησης θα έλυνε το πρόβλημα της αστάθειας με το μειονέκτημα βέβαια πως θα επηρέαζε αρνητικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Για την απόδειξη των λεγομένων επιλέχτηκε ένα πρώτης τάξεως φίλτρο με συχνότητα αποκοπής τα 350 Hz και συνάρτηση μεταφοράς ίση με

$$G_{FILTER} = \frac{1}{\left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 350}\right)s + 1} \quad (7.8)$$

Ακολουθούν το διάγραμμα nyquist για την περίπτωση που εφαρμόζουμε το φίλτρο ανατροφοδότησης καθώς επίσης και τα αποτελέσματα από μια προσομοίωση στο simulink.



Εικόνα 7.18 Διάγραμμα nyquist ανοικτού βρόχου στην περίπτωση που $R_1 > R_2$ και υπάρχει φίλτρο ανατροφοδότησης στο ρεύμα



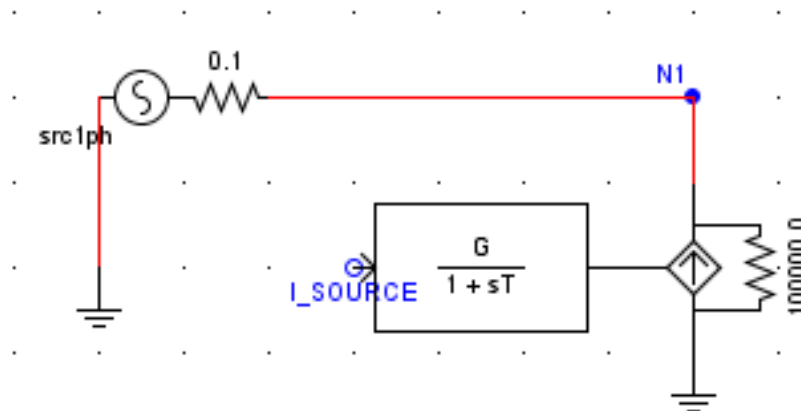
Εικόνα 7.19 Κυματομορφή της τάσης που εφαρμόζεται στην αντίσταση στην περίπτωση που $R_1 > R_2$ με φίλτρο ανατροφοδότησης, σε μια εκτέλεση στο simulink

Από τις δυο παραπάνω εικόνες γίνεται αντιληπτό ότι το φίλτρο στην ανατροφοδότηση του ρεύματος ήταν εκείνο που μετέτρεψε την αρχική ασταθής περίπτωση σε ευσταθής. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το φίλτρο αλλά και με άλλες μεθόδους σταθεροποίησης του συστήματος μπορούν να αναζητηθούν στο [24].

7.2 Εφαρμογή της τεχνικής PHIL σε δοκιμαστικά δίκτυα με HUT τον αντιστροφέα φωτοβολταϊκών

7.2.1 Πρώτο πειραματικό δίκτυο

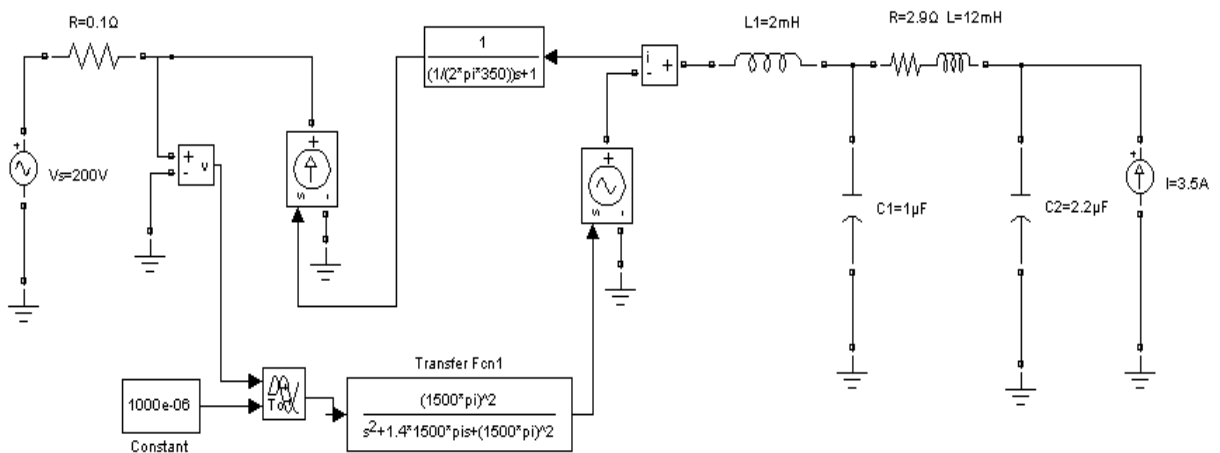
Το επόμενο βήμα στα πειράματα μας ήταν να συνδέσουμε τον αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών σε ένα απλό δίκτυο χωρίς πρακτική σημασία, αλλά με τη σημασία του να καταλάβουμε τις συνθήκες με τις οποίες πρέπει να γίνει η σύνδεση αυτή. Το κύκλωμα που κατασκευάσαμε στο RSCAD φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Σαφώς και παρέμειναν οι προστασίες ρεύματος και τάσης, για να προστατέψουμε το RTDS. Αξίζει να αναφερθεί η μικρή τιμή της προσομοιωμένης αντίστασης ώστε να εξασφαλίσουμε την ευστάθεια.



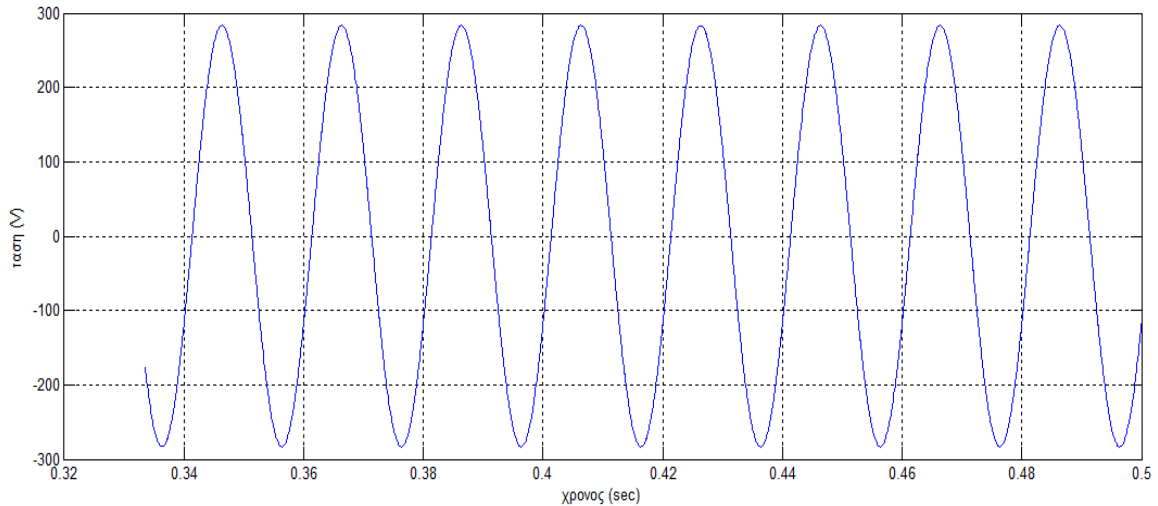
Εικόνα 7.20 Κύκλωμα που δημιουργήθηκε στο RSCAD για την πραγματοποίηση του πειράματος.

Η τάση της προσομοιωμένης πηγής ήταν 200 V rms ενώ το ρεύμα του αντιστροφέα ήταν 3,5 A rms . Επίσης αναπαριστάναμε τον αντιστροφέα φωτοβολταϊκών ως μια πηγή ρεύματος η όποια εγχέει ισχύ στο δίκτυο. Όπως είδαμε και στον διαιρέτη τάσης η χρήση ενός φίλτρου στο ρεύμα κάνει το σύστημα περισσότερο ευσταθές και για το λόγο αυτό πραγματοποιήσαμε όλα τα πειράματα με τη χρήση του φίλτρου αυτού.

Πριν δοκιμάσουμε να τα συνδέσουμε βέβαια πραγματοποιήσαμε στο simulink προσομοίωση για να λάβουμε ορισμένα αποτελέσματα σχετικά με την ευστάθεια του συστήματος. Ακολουθεί το κύκλωμα που χρησιμοποιήσαμε στο simulink.

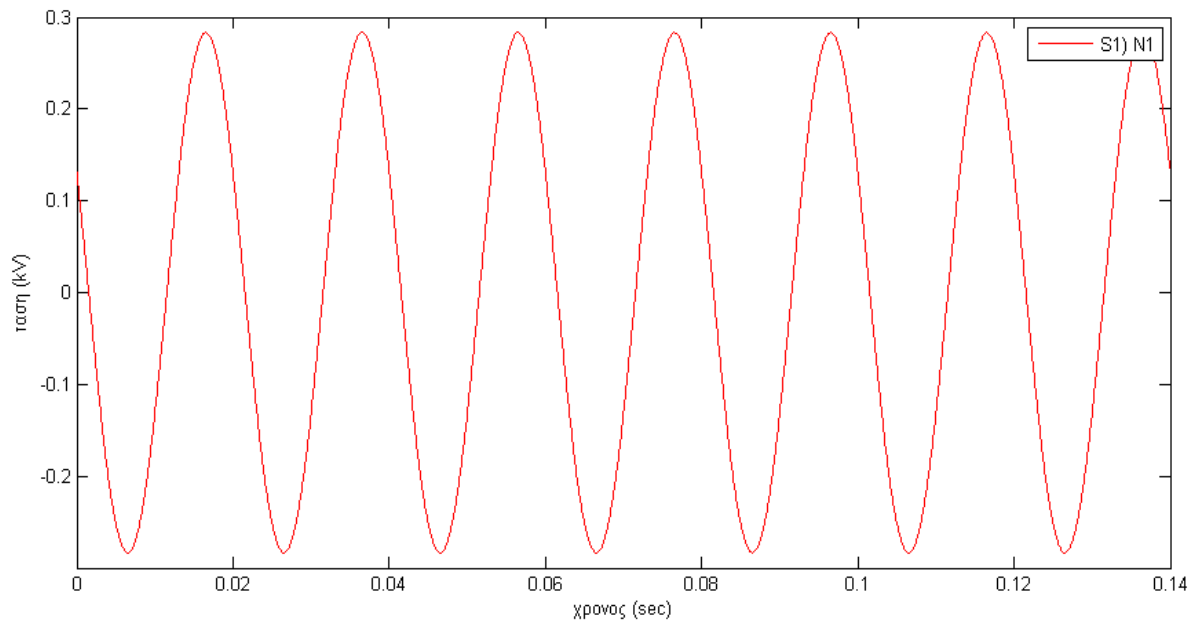


Εικόνα 7.20 Κύκλωμα που δημιουργήθηκε στο simulink για την μελέτη της ευστάθειας

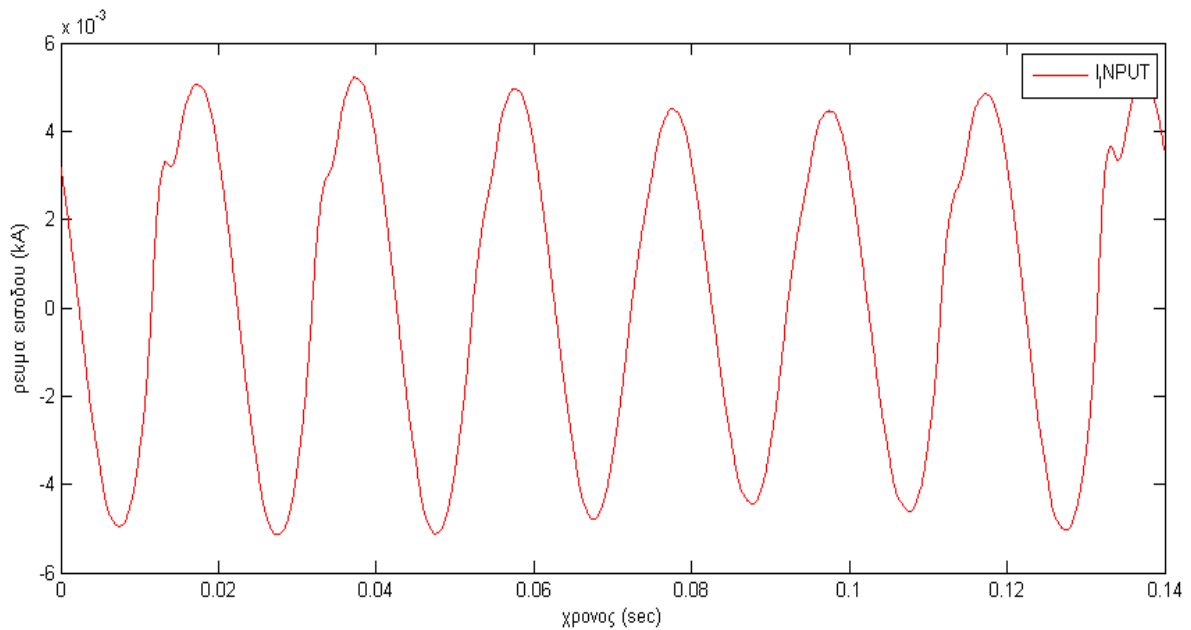


Εικόνα 7.21 Κυματομορφή της τάσης μετά την αντίσταση με την εκτέλεση της προσομοίωσης

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ορισμένα πράγματα. Πρώτον, ο αντιστροφέας φωτοβολταϊκών μοντελοποιήθηκε ως πηγή ρεύματος μαζί το φίλτρο εξόδου. Επιλέχτηκε αυτή η μοντελοποίηση καθώς βρέθηκε στη βιβλιογραφία [24],[25]. Οι τιμές που επιλέχθηκαν για το φίλτρο εξόδου του αντιστροφέα προκύπτουν μέσα από την βιβλιογραφία σχετικά με φίλτρο εξόδου ενός inverter φωτοβολταϊκών με ισχύ περίπου στα 1Kw [24], και συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε δυο εγκάρσιους πυκνωτές 1 μ F και 2,2 μ F καθώς και πηνία και αντιστάσεις με τιμές 12mH, 2mH και 2,9 Ω .



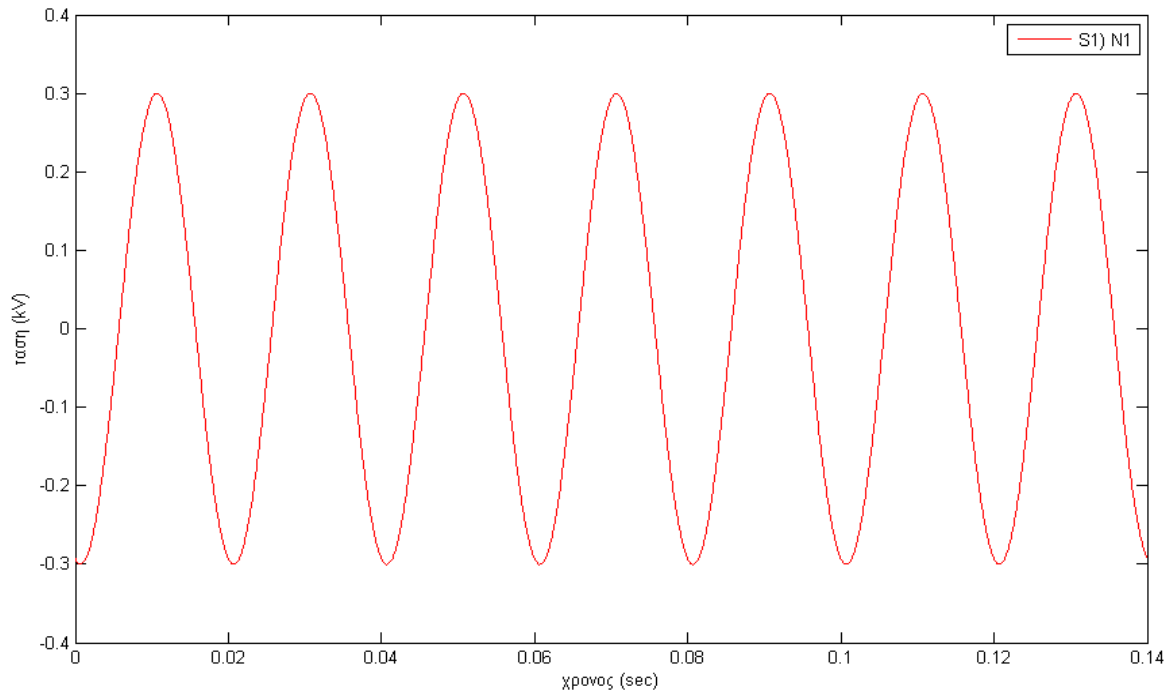
Εικόνα 7.22 Κυματομορφή της τάσης στον κόμβο N1 κατά την εκτέλεση του PHIL πειράματος για αντίσταση 0,1 Ω , τάση πηγής 200 V και ρεύμα αντιστροφέα I=3,5 A.



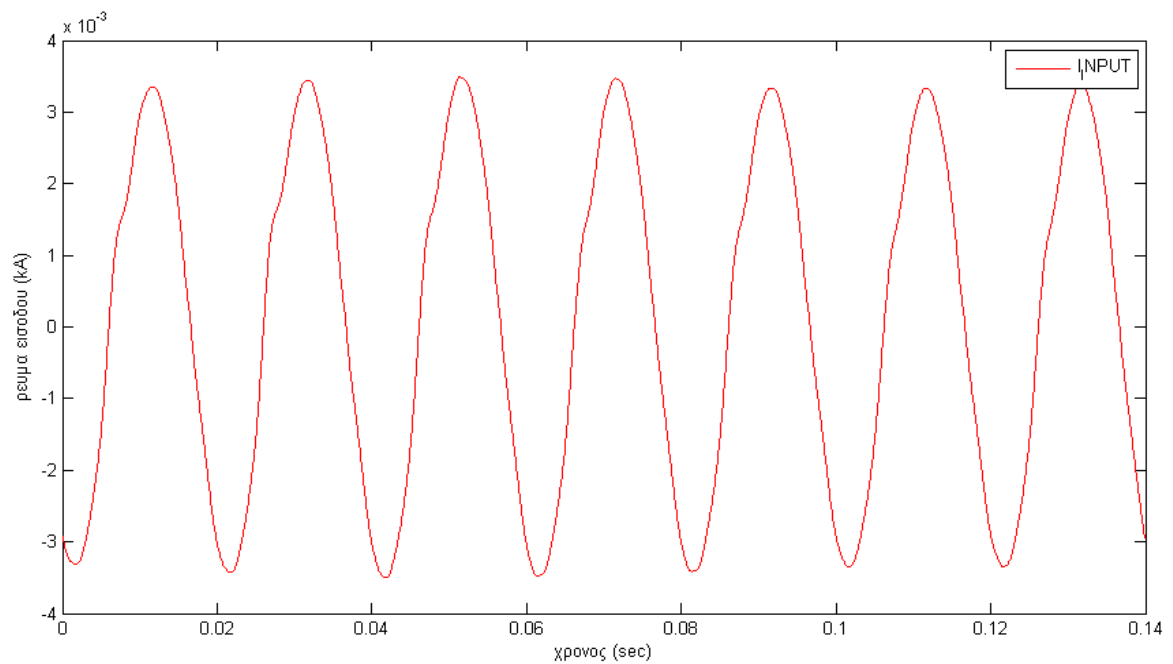
Εικόνα 7.23 Κυματομορφή του ρεύματος που στέλνει ο αντιστροφέας κατά την εκτέλεση του PHIL πειράματος για αντίσταση $0,1\Omega$, τάση πηγής 200 V και ρεύμα αντιστροφέα $I=3,5\text{ A}$

Όπως παρατηρούμε και από την κυματομορφή της τάσης η είσοδος του ρεύματος δεν είχε πολύ μεγάλη επιρροή. Αυτό είναι λογικό αφού η αντίσταση είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μεγάλη αύξηση της τάσης στο σημείο σύνδεσης. Το ρεύμα που έρχεται από τον αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών είναι καλής μορφής και δεν περιέχει πολλές αρμονικές αφού το ρεύμα βρίσκεται κοντά στις ονομαστικές του τιμές.

Μετά δοκιμάσαμε να αλλάξουμε λίγο την τοπολογία με αύξηση της αντίστασης από $0,1\Omega$ σε 1Ω . Η τάση της πηγής τώρα ήταν 210 V rms , ενώ το ρεύμα του αντιστροφέα όταν πραγματοποιήθηκε το πείραμα ήταν $2,5\text{ A rms}$. Προτού βέβαια τρέξουμε το πείραμα είδαμε σε μια προσομοίωση στο Simulink τα αποτελέσματα που θα αναμέναμε.

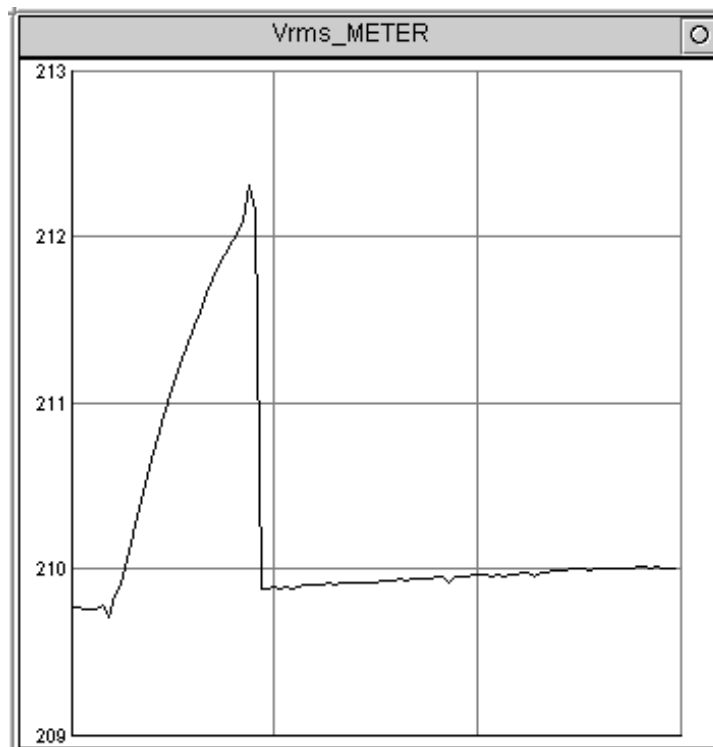


Εικόνα 7.24 Κυματομορφή της τάσης στον κόμβο N1 κατά την εκτέλεση του PHIL πειράματος για αντίσταση 1Ω , τάση πηγής 210 V και ρεύμα αντιστροφής $I=2,5\text{ A}$



Εικόνα 7.25 Κυματομορφή του ρεύματος που στέλνει ο αντιστροφέας κατά την εκτέλεση του PHIL πειράματος για αντίσταση 1Ω , τάση πηγής 210 V και ρεύμα αντιστροφής $I=2,5\text{ A}$

Μια γραφική παράσταση με ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η ακόλουθη.

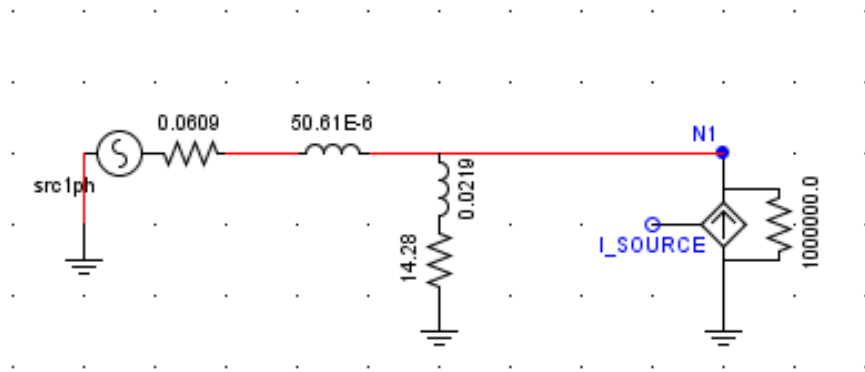


Εικόνα 7.26 Μεταβολή της τάσης N1 λόγω της επίδρασης του ρεύματος από τα φωτοβολταϊκά.

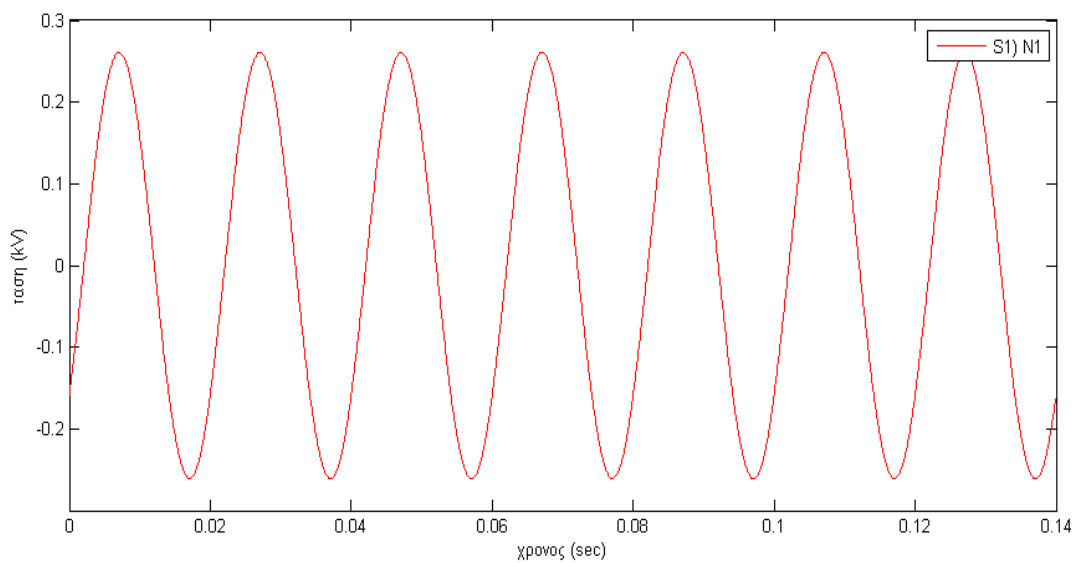
Το στιγμιότυπο αυτό δείχνει τη μεταβολή της τάσης στον κόμβο N1 από τη στιγμή που εισέρθουν στο σύστημα τα φωτοβολταϊκά. Παρατηρούμε αύξηση της τάσης από τα 210 μέχρι τα 212 V, τάση στην όποια δυστυχώς ενεργοποιήθηκαν οι προστασίες του RTDS. Παρόλα αυτά όμως η επίδραση του ρεύματος από τον αντιστροφέα είναι εμφανής στην τάση του κόμβου N1.

7.2.2 Δεύτερο πειραματικό δίκτυο

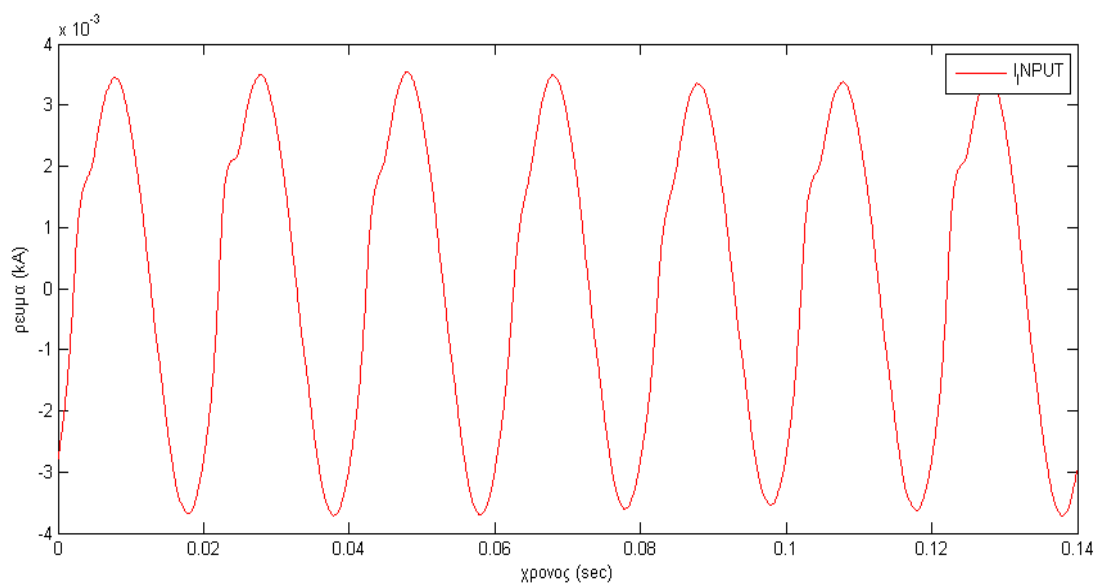
Το επόμενο πείραμα που πραγματοποιήθηκε βρίσκεται πιο κοντά σε ένα ρεαλιστικό δίκτυο. Το δίκτυο αυτό περιλαμβάνει μια πηγή τάσης 185 V, μια γραμμή χαμηλής τάσης 50m (αγωγοί αλουμινίου $4 \times 16 \text{mm}^2$ όπου $R/X = 1.218/0.318 \Omega/\text{Km}$), ένα φορτίο που καταναλώνει περίπου 2kW με συντελεστή ισχύος 0,9 επαγωγικό σε αυτό το επίπεδο τάσης και τέλος το φωτοβολταϊκό. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι σε σειρά με τον inverter των φωτοβολταϊκών είχαμε σύνδεση μια πραγματική αντίσταση 6,1 Ω ώστε να περιορίσουμε υπερεντάσεις που δημιουργούνται από κάποια spikes στο ρεύμα. Με την είσοδο της αντίστασης βέβαια η τάση στο φωτοβολταϊκό κυμαινόταν σε υψηλότερα επίπεδα από τα 185 V λόγω της ανύψωσης τάσης που προκαλούσε η αντίσταση.



Εικόνα 7.27 Δοκιμαστικό δίκτυο χαμηλής τάσης με μια γραμμή, φορτίο και αντιστροφή φωτοβολταϊκών



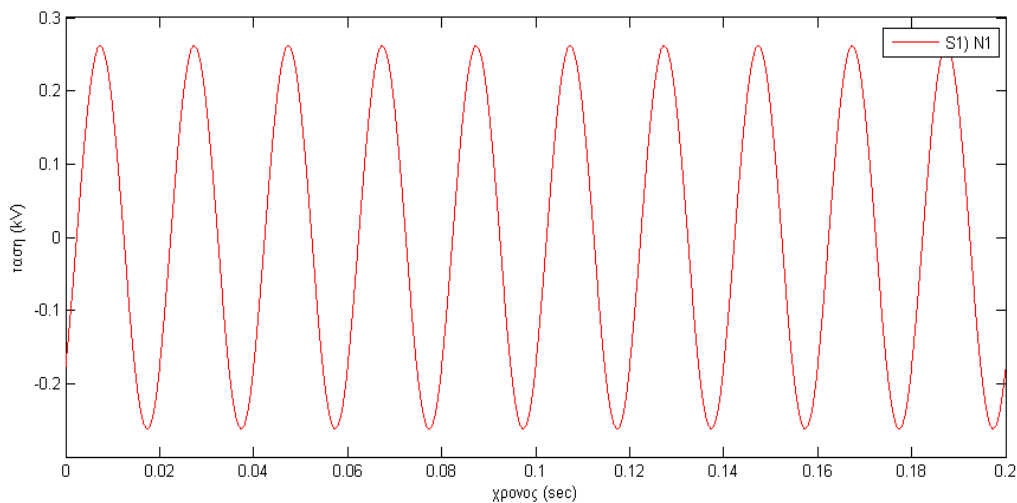
Εικόνα 7.28 Κυματομορφή της τάσης στον κόμβο N1 μετά τη σύνδεση του φωτοβολταϊκού.



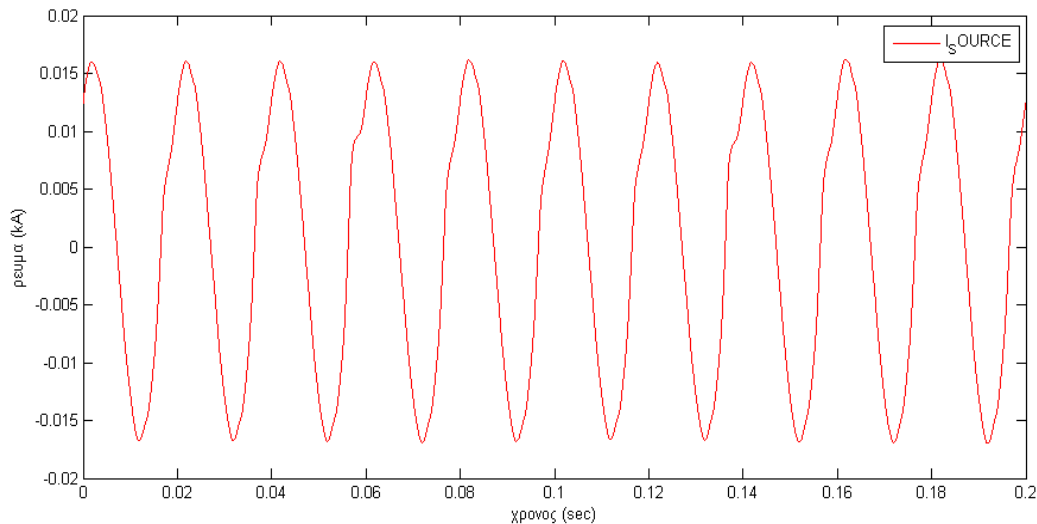
Εικόνα 7.29 Κυματομορφή του ρεύματος εισόδου από το φωτοβολταϊκό

Στις δυο παραπάνω κυματομορφές βλέπουμε στη μεν πρώτη την τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης, στη δε δεύτερη το ρεύμα που στέλνουν τα φωτοβολταϊκά προς το δίκτυο. Η τάση του δικτύου ήταν 185 V και η τάση στον κόμβο N1, μετά και την είσοδο των φωτοβολταϊκών, έγινε 183,36 V. Σαφώς και δεν θα είχαμε ανύψωση τάσης στο σημείο σύνδεσης αφού τα φωτοβολταϊκά έδιναν συνολικό ρεύμα $I = 2.5A_{rms}$ ενώ το φορτίο κατανάλωνε ρεύμα περίπου στα 11 A. για να πετύχουμε ανύψωση τάσης θα έπρεπε το ρεύμα από τα φωτοβολταϊκά να καλύψουν τις ανάγκες των φορτίων και να υπάρξει από εκεί και έπειτα αντίστροφη ροή ισχύος προς το δίκτυο.

Έπειτα πραγματοποιήσαμε το ίδιο πείραμα με την ίδια ακριβώς τοπολογία με τη διάφορα όμως ότι μέσω ενός κατάλληλου scaling κάθε φορά στο ρεύμα, μπορούσαμε να αυξάνουμε το ρεύμα εισόδου των φωτοβολταϊκών στο δίκτυο. Καταφέραμε στο σημείο αυτό και με αύξηση του ρεύματος των φωτοβολταϊκών στα 11,66 A, να αντισταθμίσουμε τις απώλειες στη γραμμή και η τάση στον κόμβο N1 να φτάσει την τάση του δικτύου δηλαδή να γίνει 185 V. Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις που λάβαμε στο στάδιο αυτό.



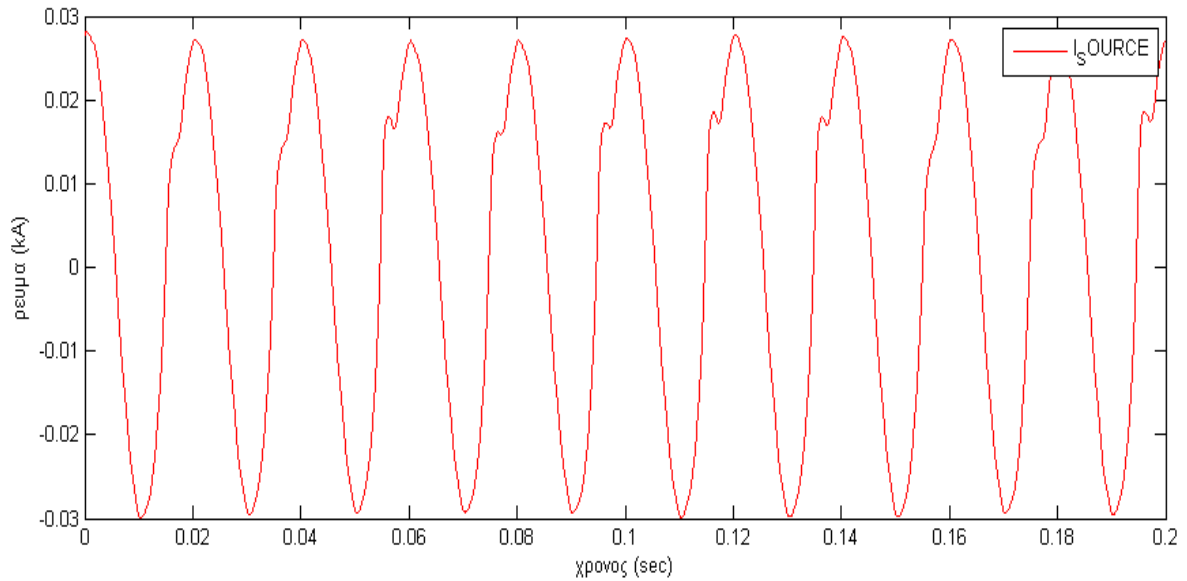
Εικόνα 7.30 Κυματομορφή της τάσης στον κόμβο N1 μετά τη σύνδεση του φωτοβολταϊκού με ρεύμα εξόδου 11,66 A.



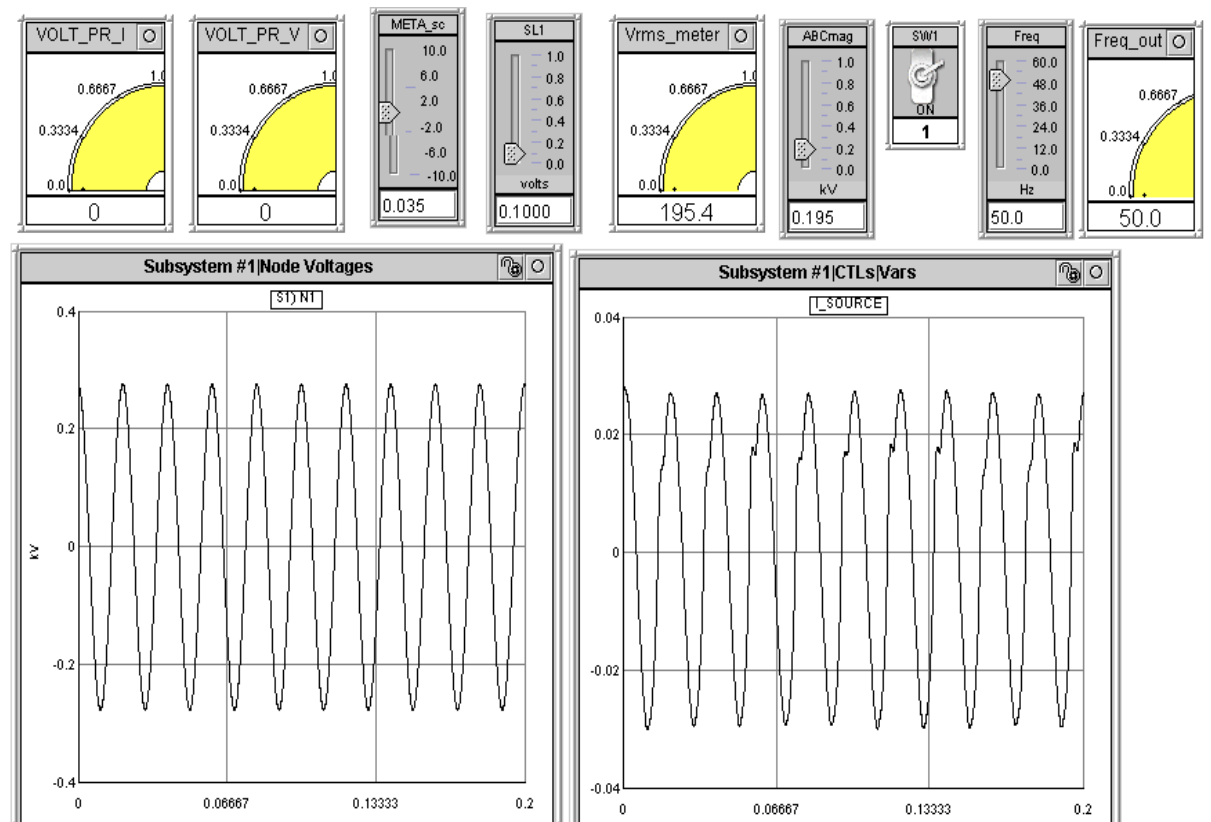
Εικόνα 7.31 Κυματομορφή του ρεύματος εισόδου από το φωτοβολταϊκό με συνολική rms τιμή 11,66 A μέσω κατάλληλου scaling στο RSCAD.

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα μπορέσαμε έναν αντιστροφέα φωτοβολταϊκών του 1 kW με μεγίστη διαχειρίσιμο ρεύμα περίπου τα 4 A, να τον χειριστούμε ως έναν αντιστροφέα που να μπορεί να δώσει ρεύματα σχεδόν τριπλάσια τον δυνατοτήτων του. Το αρχικό ρεύμα που έδινε ο αντιστροφέας στην πραγματικότητα ήταν 1,7 A και καταφέραμε μέσα από το RSCAD να δώσουμε ρεύμα πολλαπλάσιο και ίσο με 11.66 A. Τέλος όπως προείπαμε η τάση στον κόμβο κοινής σύνδεσης έφτασε την τάση του δικτύου δηλαδή από τα 184,3 V που ήταν αρχικά, έφτασε τα 185 V.

Τέλος πραγματοποιήσαμε ένα ακόμη πείραμα στο δοκιμαστικό αυτό δίκτυο. Η τοπολογία του δικτύου παραμένει αυτή που φαίνεται στην εικόνα 7.27 με την μόνη διάφορα ότι η τάση του δικτύου ήταν στα 195 V. Η έγχυση ρεύματος από τον αντιστροφέα μέσω κατάλληλου scaling πάλι έφτασε τα 19 A. Το ρεύμα αυτό όχι μόνο καλύπτει τις ανάγκες του φορτίου το οποίο φτάνει με την νέα τιμή της τάσης τα 2,4 kW αλλά και μέρος του ρέει αντίστροφα προς την πηγή, προκαλώντας έτσι ανύψωση τάσης στον κόμβο N1. Πράγματι η τάση αυτή ξεπερνά τα 195 V και φτάνει τα 195,4 V. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται το ρεύμα αλλά και η ένδειξη της τάσης στο RSCAD.



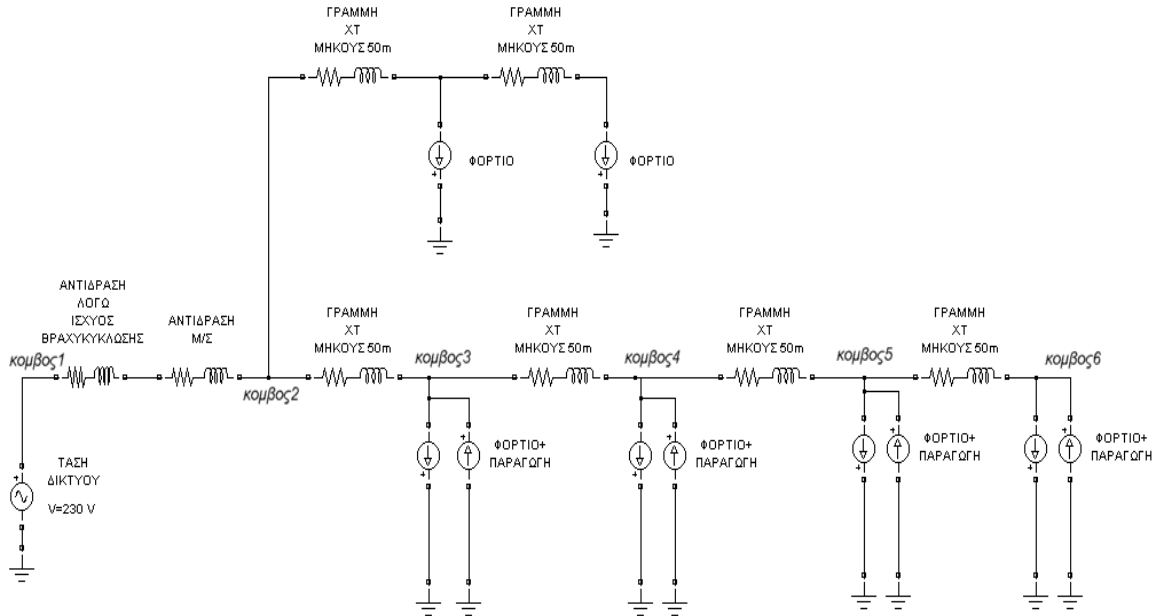
Εικόνα 7.32 Κυματομορφή του ρεύματος εισόδου από το φωτοβολταϊκό με συνολική rms τιμή 19,18 A μέσω κατάλληλου scaling στο RSCAD



Εικόνα 7.33 Εικόνα που παρουσιάζει κυματομορφές τάσεως N1 και ρεύματος εισόδου στο δίκτυο αλλά και μετρητική ένδειξη της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης

7.3 Μελέτη δικτύου αγροτικής περιοχής

Το δίκτυο με το οποίο ασχοληθήκαμε είναι ένα δίκτυο αγροτικής περιοχής με 6 καταναλωτές οι 4 από τους οποίους διαθέτουν φωτοβολταϊκή παραγωγή. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το δίκτυο μελέτης.



Εικόνα 7.34 Δίκτυο αγροτικής περιοχής με 6 φορτία και 4 παραγωγές από φωτοβολταϊκά.

Στην εικόνα 7.34 παρουσιάζεται το υπό μελέτη δίκτυο. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από την σταθερή τάση του δικτύου, από την αντίδραση λόγω της ισχύος βραχυκύκλωσης του δικτύου ΜΤ, από την αντίδραση του Μ/Σ, γραμμές ΧΤ 50m καθώς και τις καταναλώσεις και τις παραγωγές. Ακολουθεί ο υπολογισμός των τιμών του δικτύου ΧΤ:

Υπολογισμός στοιχείων δικτύου ΧΤ:

- Ισχύς βραχυκύκλωσης 200MVA [26]:

$$X_s = \frac{(400V)^2}{200 \cdot 10^6 VA} = 8 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (7.9) \quad \text{όπου } 400V \text{ πολική τάση}$$

$$L = \frac{X_s}{100 \cdot \pi} = \frac{8 \cdot 10^{-4}}{100 \cdot \pi} = 2,546 \cdot 10^{-6} H \quad (7.10)$$

$$R \approx 0,1 \cdot X_s = 8 \cdot 10^{-5} \Omega$$

- Μετασχηματιστής 20KV/400V , 400 KVA [27]:

$$Z_{400V} = 0,04 \cdot \frac{(400V)^2}{400 \cdot 10^3 VA} = 0,016\Omega \quad (7.11) \quad , \acute{o}που \ 0,04 \ \eta \ \acute{\alpha}\sigma\eta \ \beta\rho\alpha\chi\upsilon\kappa\acute{\upsilon}\kappa\lambda\omega\sigma\eta\varsigma \ 4\%$$

$$R_{400V} = 0,013 \cdot \frac{(400V)^2}{400 \cdot 10^3 VA} = 0,0052\Omega \quad (7.12) \quad \acute{o}που \ 0,013 \ \eta \ \sigma\chi\epsilon\tau\iota\kappa\acute{\eta} \ \omega\mu\iota\kappa\acute{\eta} \ \acute{\alpha}\sigma\eta \ \beta\rho\alpha\chi\upsilon\kappa\acute{\upsilon}\kappa\lambda\omega\sigma\eta\varsigma \ 1,3\%$$

$$X_{400V} = \sqrt{0,016^2 - 0,0052^2} = 0,01513\Omega \quad (7.13)$$

άρα

$$L = \frac{0,01513}{100\pi} = 48,16\mu F \quad (7.14)$$

- Γραμμές καλωδίων [28]:

Οι γραμμές που χρησιμοποιήθηκαν είναι γυμνοί αγωγοί αλουμινίου $4 \times 16mm^2$ όπου $R / X = 1.218 / 0.318 \ \Omega / Km$

Επομένως για τα 50m απόστασης μεταξύ των κατοικιών θα έχουμε:

$$R = 0,0609\Omega$$

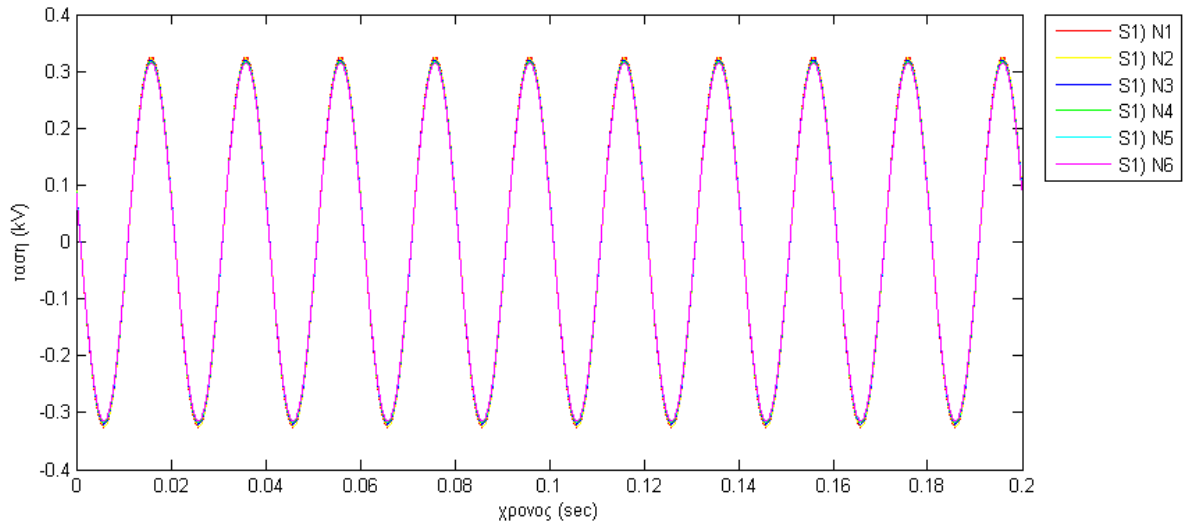
$$L = 50,61\mu F$$

Τέλος, οι τιμές των πηγών ρεύματος που αναπαριστούν τα φορτία και τις παραγωγές αλλάζουν για κάθε σενάριο που εξετάζεται.

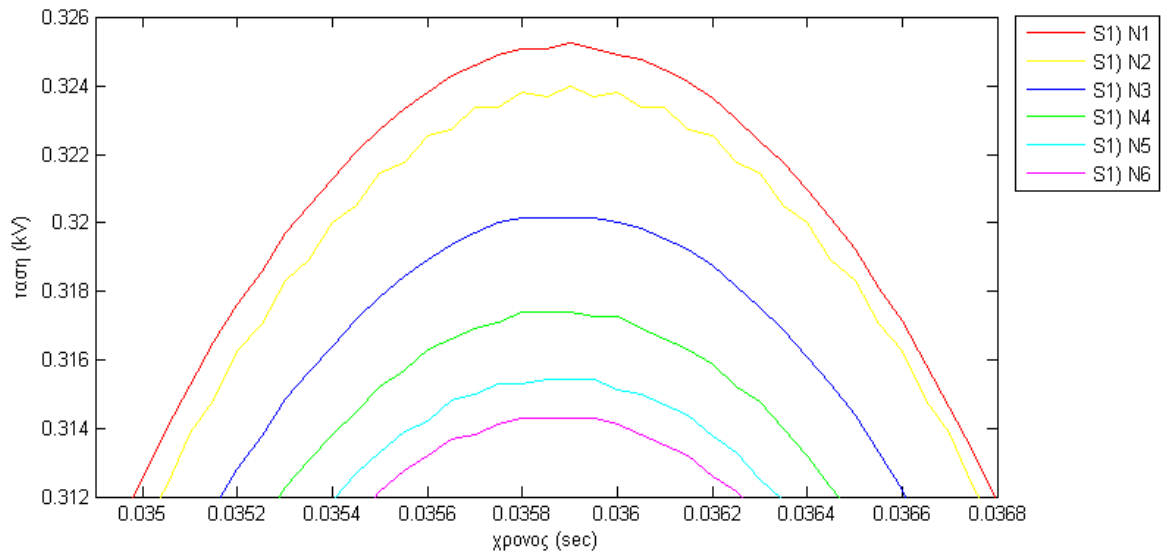
7.3.1 Μελέτη δικτύου αγροτικής περιοχής σε πείραμα με τη χρήση της PHIL τεχνικής

Το δίκτυο το οποίο εξετάστηκε είναι το ίδιο με αυτό της εικόνας 7.34. Ο πραγματικός αντιστροφέας είναι ο τελευταίος από τους τέσσερις. Οι τιμές των στοιχείων υπολογίστηκαν παραπάνω και μένει να διευκρινίσουμε της τιμές κατανάλωσης και παραγωγής που εξετάσαμε.

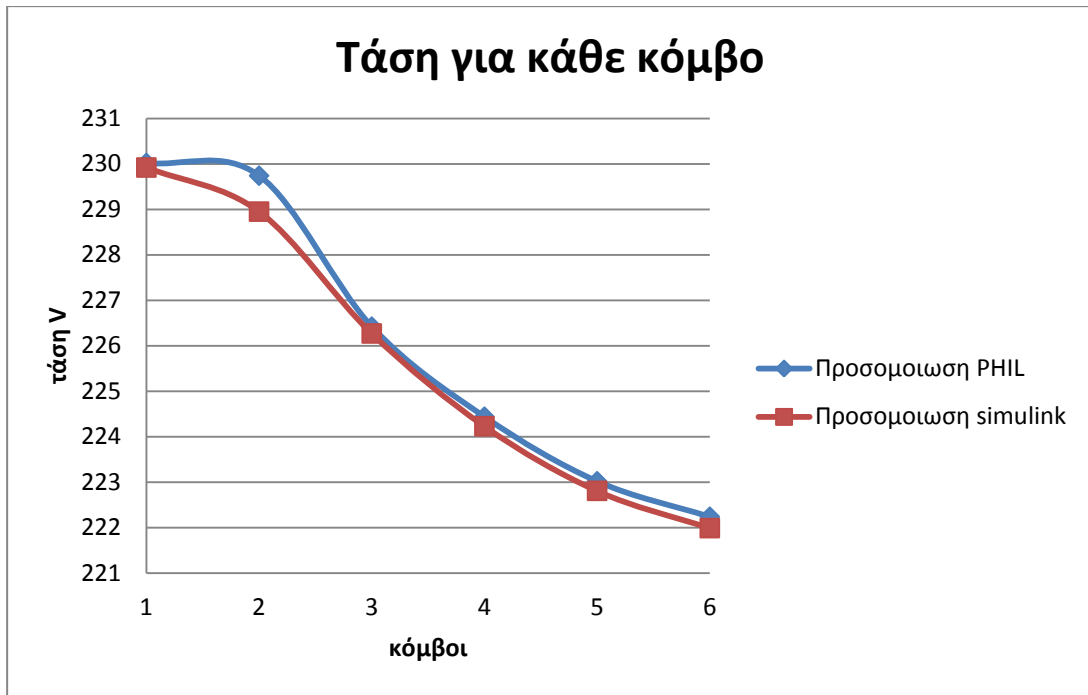
Τα φωτοβολταϊκά θεωρήσαμε ότι παράγουν 1kW ισχύ, εκτός από τον πραγματικό αντιστροφέα ο οποίος παράγει 1,3 A ρεύματος δηλ περίπου 250 W. Τα φορτία καταναλώνουν περίπου 3 kW με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0,9$. Ακολουθούν τα διαγράμματα της τάσης στους αριθμούμενους κόμβους, σε μια PHIL εφαρμογή αλλά και σε μια προσομοίωση στο Simulink.



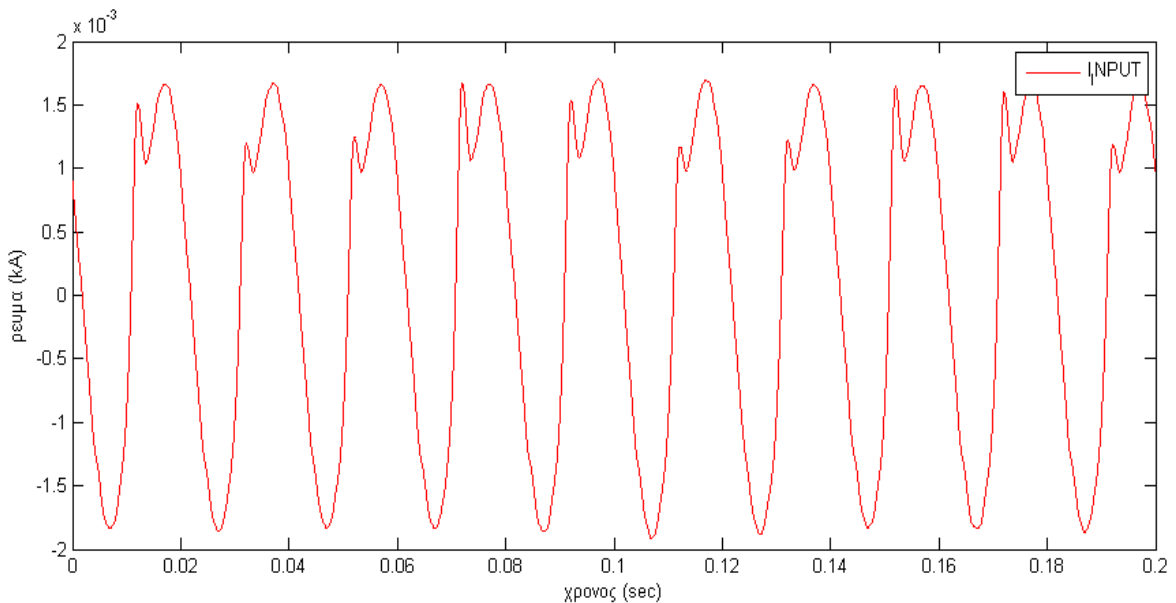
Εικόνα 7.35 Κυματομορφές τάσεων στην PHIL εφαρμογή για παράγωγη πραγματικού αντιστροφέα 250W



Εικόνα 7.36 Κορυφές των κυματομορφών τάσεων στην PHIL εφαρμογή για παράγωγη πραγματικού αντιστροφέα 250W



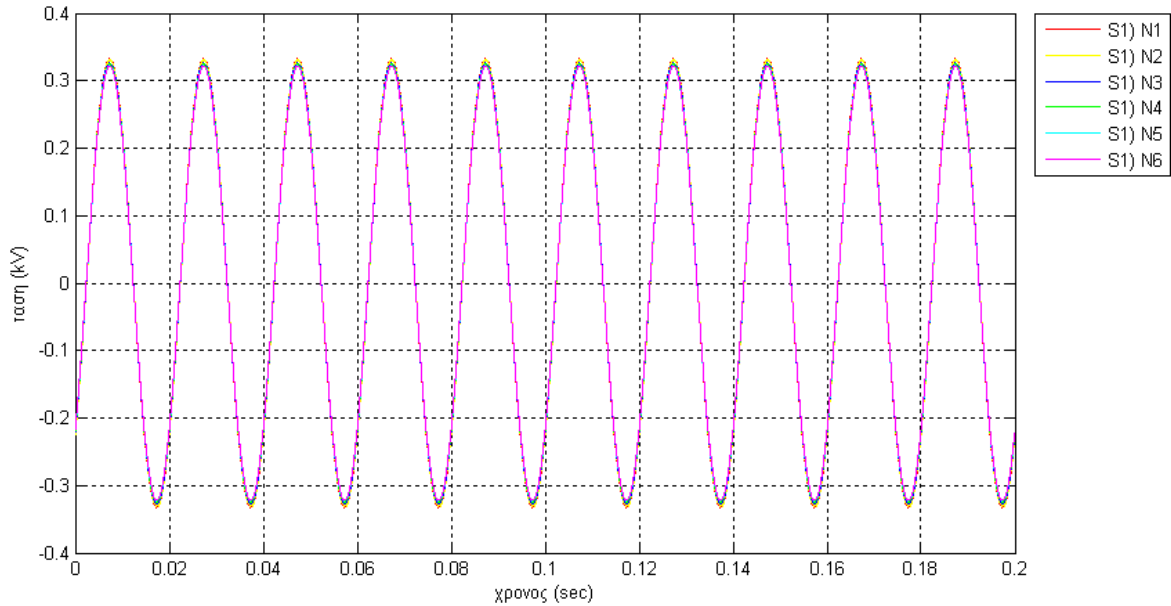
Εικόνα 7.37 Τάσεις ανά κόμβο σε εφαρμογή PHIL και σε προσομοίωση στο simulink για παράγωγη πραγματικού αντιστροφέα 250W



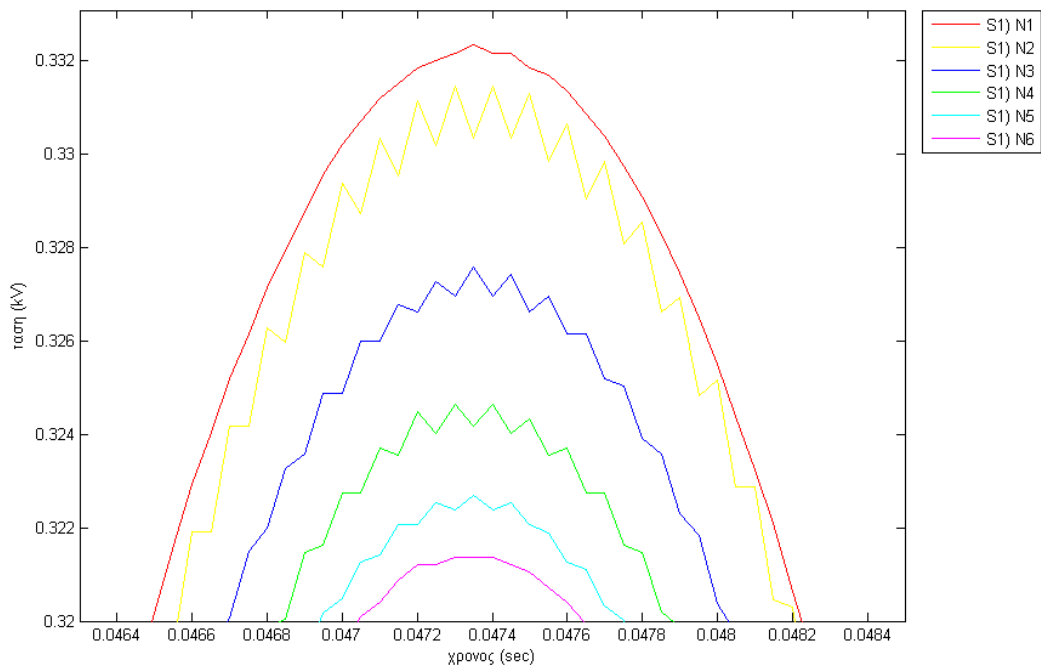
Εικόνα 7.38 Κυματομορφή ρεύματος από τον αντιστροφέα φωτοβολταϊκών για παράγωγη 1,3 A

Παρατηρούμε πως οι τάσεις που διαμορφώθηκαν στους κόμβους κατά την PHIL τεχνική βρίσκονταν σε συμφωνία με τις τάσεις από την προσομοίωση του ιδανικού δικτύου στο Simulink. Και στις δυο περιπτώσεις είδαμε μείωση της τάσης καθώς το φορτίο είναι μεγαλύτερο από την παράγωγη με αποτέλεσμα να έχουμε πτώση τάσης στις γραμμές.

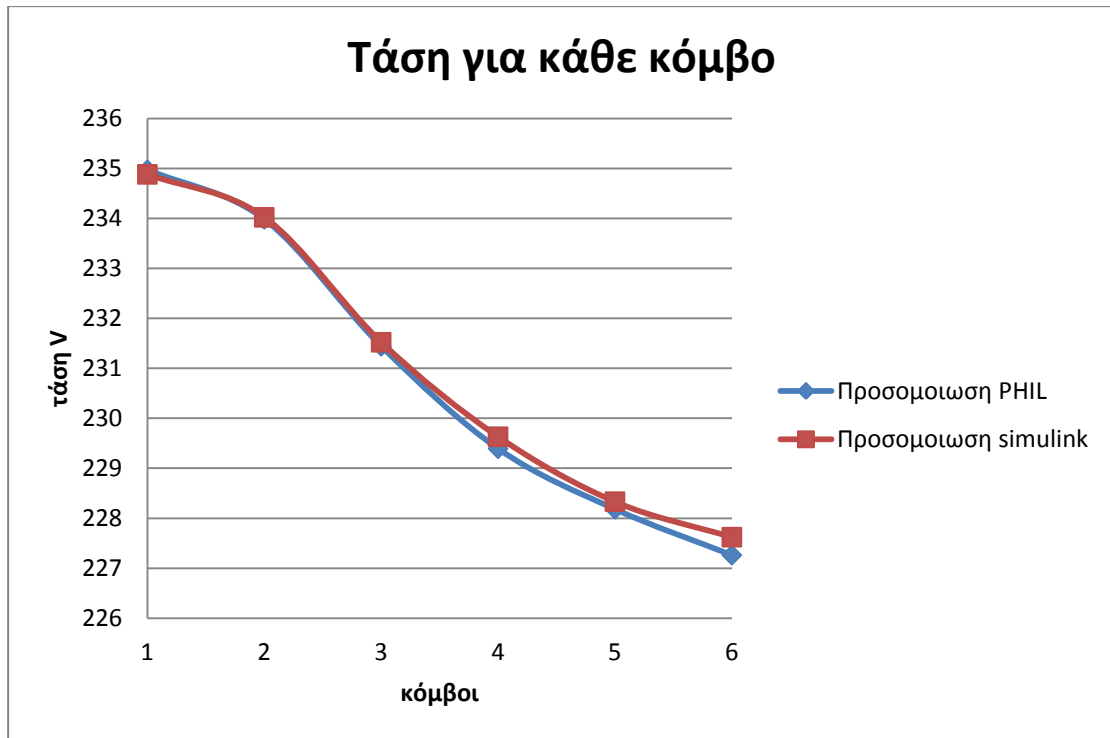
Πραγματοποιήθηκε και δεύτερο πείραμα με την τεχνική PHIL. Στο δεύτερο αυτό πείραμα το μόνο που αλλάζουμε είναι η παράγωγη του πραγματικού αντιστροφέα σε 2,2 A δηλαδή περίπου 500W καθώς επίσης και η ονομαστική τάση του δικτυού από 230V στα 235V. Η παράγωγη των άλλων αντιστροφέων καθώς και οι καταναλώσεις παραμένουν οι ίδιες.



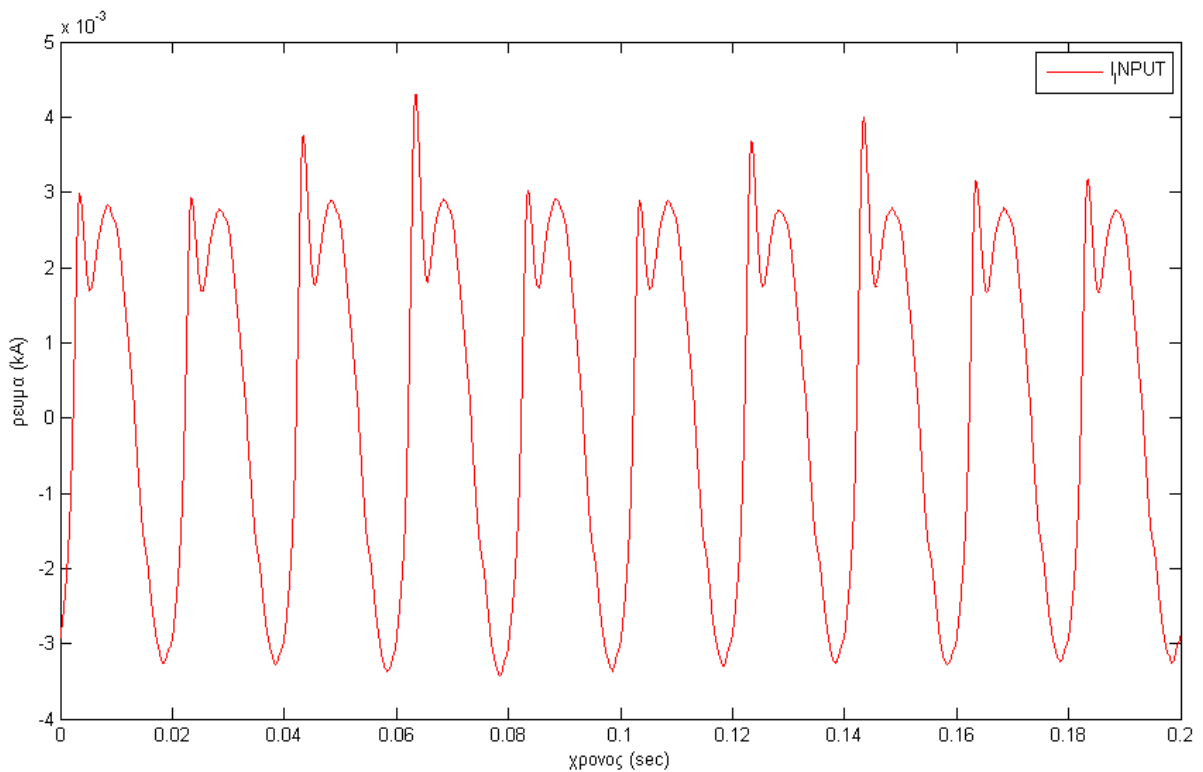
Εικόνα 7.39 Κυματομορφές τάσεων στην PHIL εφαρμογή για παράγωγη πραγματικού αντιστροφέα 250W



Εικόνα 7.40 Κορυφές των κυματομορφών τάσεων στην PHIL εφαρμογή για παράγωγη πραγματικού αντιστροφέα 500W



Εικόνα 7.41 Τάσεις ανά κόμβο σε εφαρμογή PHIL και σε προσομοίωση στο simulink για παράγωγη πραγματικού αντιστροφέα 500W



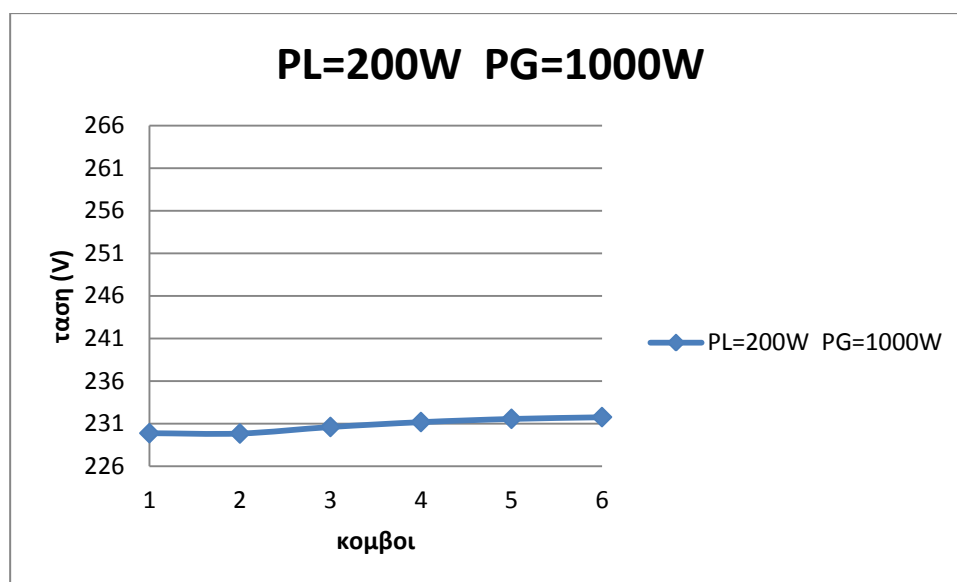
Εικόνα 7.42 Κυματομορφή ρεύματος από τον αντιστροφέα φωτοβολταϊκών για παράγωγη 2,2 A

Από τη σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα που λάβαμε από την PHIL τεχνική και τη προσομοίωση στο Simulink βλέπουμε και πάλι μια ικανοποιητική ακρίβεια. Σημειώνουμε βέβαια το γεγονός ότι το ρεύμα του πραγματικού αντιστροφέα δεν είναι καθαρό ημίτονο αλλά μπορούμε να πούμε πως περιέχει αρκετές αρμονικές, πράγμα το οποίο δικαιολογείται αν αναλογιστούμε το γεγονός ότι ο αντιστροφέας δεν δουλεύει στις ονομαστικές του τιμές και ότι το ύψος του ρεύματος επετεύχθηκε με κατάλληλο scaling από το RSCAD.

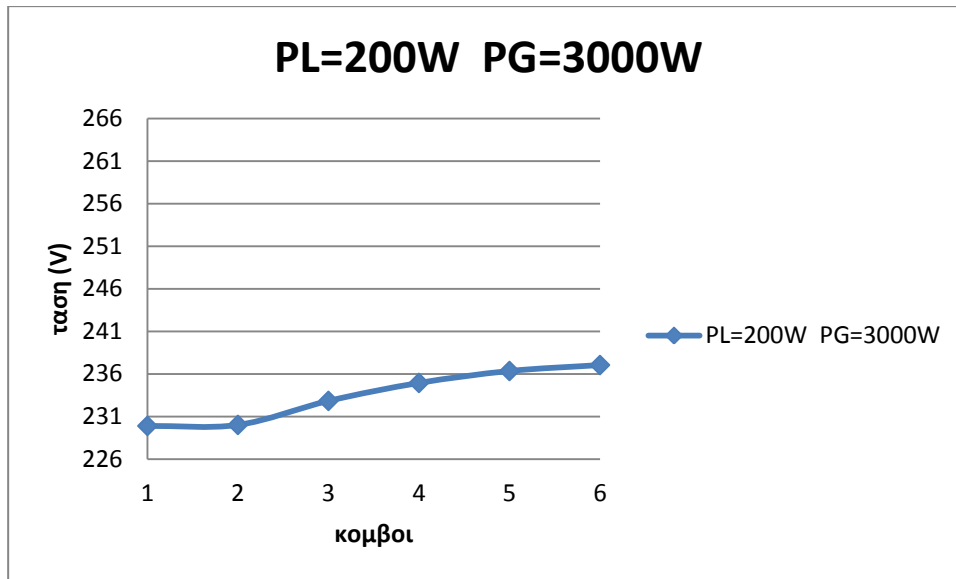
7.3.2 Σενάρια κατανάλωσης – παραγωγής για το δίκτυο αγροτικής περιοχής

Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε με διάφορα σενάρια κατανάλωσης - παραγωγής για το δίκτυο της εικόνας 7.34. Οι προσομοιώσεις γίνονται στο Simulink και ασχολούνται με την ανύψωση τάσης που μπορεί να εμφανιστεί σε μια γραμμή XT από την είσοδο φωτοβολταϊκών στο δίκτυο.

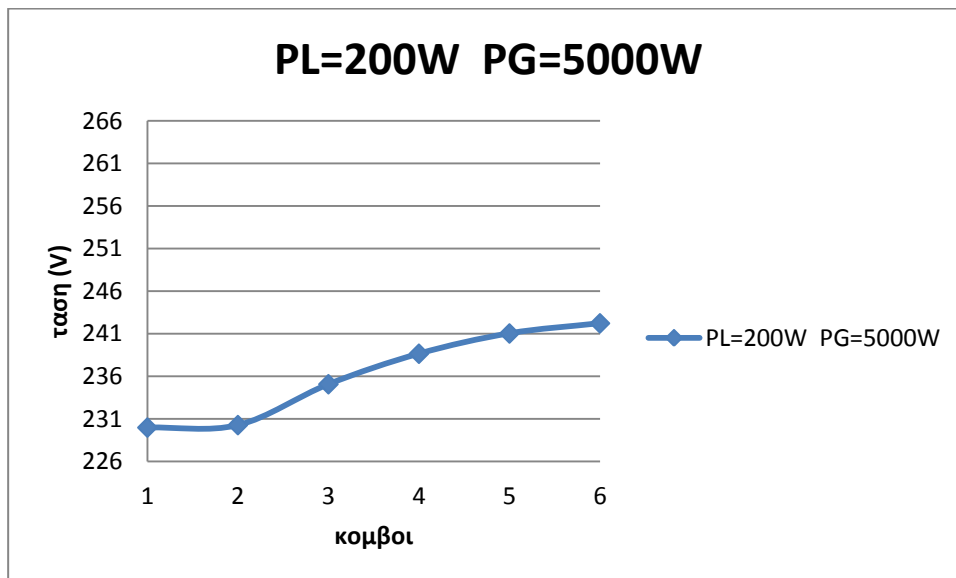
Τα σενάρια χωρίζονται στις εξής κατηγορίες. Αρχικά το φορτίο που καταναλώνεται στους κόμβους είναι 200W με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0,6$ επαγωγικό και αναφέρεται στην ελάχιστη κατανάλωση που μπορεί να εμφανιστεί σε μια κατοικία (πχ το ψυγείο). Για την τιμή αυτή της κατανάλωσης εφαρμόζουμε διάφορες παραγωγές με τιμές 1kW, 3kW και 5kW. Έπειτα αλλάζουμε το φορτίο στα 3kW με συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0,9$ επαγωγικό που αντιστοιχεί σε μια μέση κατανάλωση και δοκιμάζουμε πάλι τις παραπάνω τιμές παραγωγής.



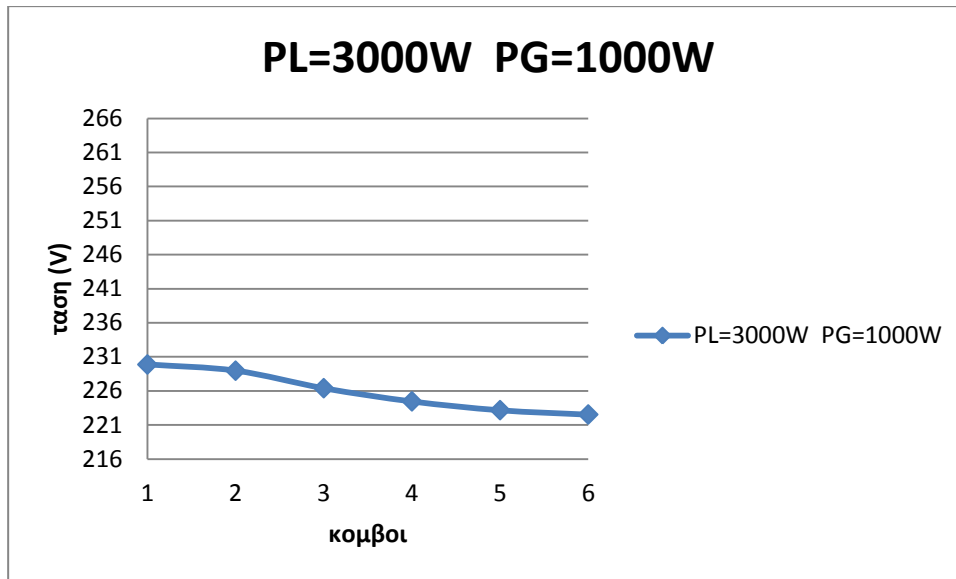
Εικόνα 7.43 Τάσεις ανά κόμβο σε προσομοίωση στο simulink για κατανάλωση 200W($\cos\phi=0,6$ επαγωγικό) και παραγωγή 1kW



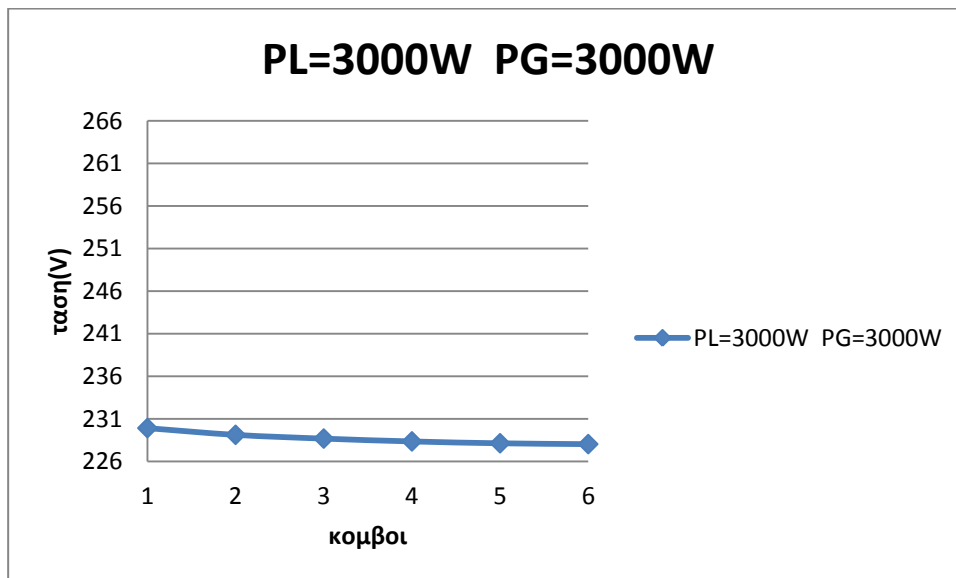
Εικόνα 7.44 Τάσεις ανά κόμβο σε προσομοίωση στο simulink για κατανάλωση 200W($\cos\phi=0,6$ επαγωγικό) και παραγωγή 3kW



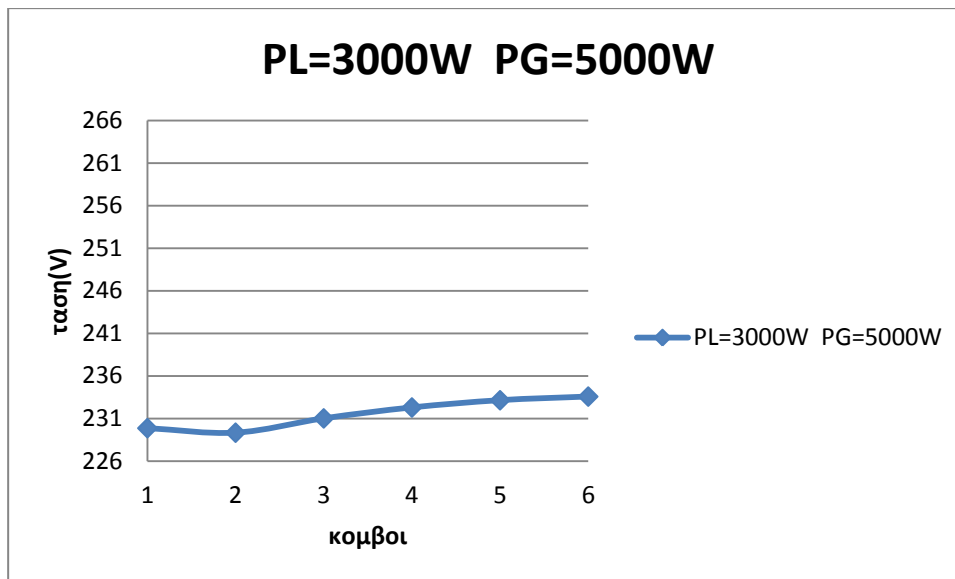
Εικόνα 7.45 Τάσεις ανά κόμβο σε προσομοίωση στο simulink για κατανάλωση 200W($\cos\phi=0,6$ επαγωγικό) και παραγωγή 5kW



Εικόνα 7.46 Τάσεις ανά κόμβο σε προσομοίωση στο simulink για κατανάλωση 3kW($\cos\phi=0,9$ επαγωγικό) και παραγωγή 1kW



Εικόνα 7.47 Τάσεις ανά κόμβο σε προσομοίωση στο simulink για κατανάλωση 3kW($\cos\phi=0,9$ επαγωγικό) και παραγωγή 3kW



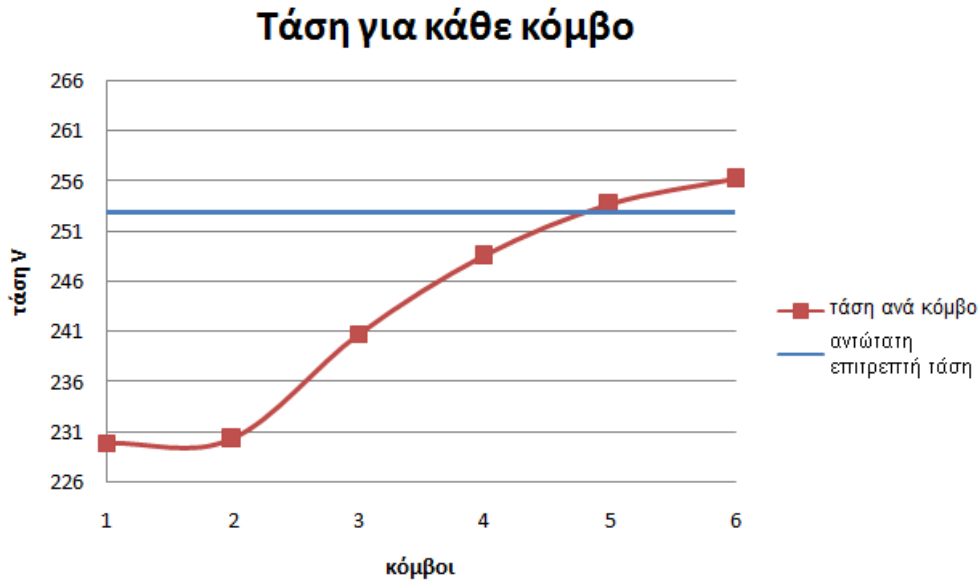
Εικόνα 7.48 Τάσεις ανά κόμβο σε προσομοίωση στο simulink για κατανάλωση 3kW($\cos\phi=0,9$ επαγωγικό) και παραγωγή 5kW

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη ανύψωση τάσης εμφανίζεται για ελάχιστο φορτίο - μέγιστη παράγωγη, ενώ η ελάχιστη τάση εμφανίζεται για μέγιστο φορτίο – ελάχιστη παράγωγη. Αυτές οι δυο καταστάσεις είναι και οι πιο σημαντικές για τη μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών σε ότι αφορά της αργές μεταβολές της τάσης.

7.3.3 Τρόποι αντιμετώπισης της ανύψωσης τάσης για το δίκτυο αγροτικής περιοχής

Τέλος στο παραπάνω δίκτυο της εικόνας 7.34 εξετάζουμε δυο από τους τρόπους μείωσης της ανύψωσης τάσης λόγω της εισόδου των φωτοβολταϊκών στο δίκτυο. Οι δυο αυτοί τρόποι αναπτύχθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο και στο κομμάτι εδώ της εργασίας θα τους εξετάσουμε μέσα από προσομοιώσεις στο Simulink. Η τοπολογία του δικτύου παραμένει η ίδια με τη διαφορά όμως ότι οι γραμμές σύνδεσης ΧΤ ανάμεσα στους κόμβους έχουν μήκος 80m με αποτέλεσμα η ανύψωση τάσης στους κόμβους του δικτύου να είναι μεγαλύτερη σχετικά με αυτήν που είχαμε στο ίδιο δίκτυο με απόσταση 50m. Επίσης, στο κομμάτι αυτό των προσομοιώσεων γίνεται η παραδοχή ότι μπορούμε σε μονοφασική παροχή να διοχετεύσουμε στο δίκτυο ισχύ φωτοβολταϊκών 7kW. Το φορτίο που καταναλώνεται σε κάθε σημείο είναι 200W $\cos\phi=0.6$ στοχεύοντας πάλι στην αντιμετώπιση της περίπτωσης με τη μέγιστη δυνατή ανύψωση τάσης.

Ακολουθεί το διάγραμμα τάσης σε κάθε κόμβο του δικτύου στην περίπτωση που δεν έχουμε κάποιου είδους έλεγχο στην τάση εξόδου των αντιστροφών.



Εικόνα 7.49 Τάσεις ανά κόμβο στην περίπτωση που δεν έχουμε κάποιου είδους έλεγχο στην τάση εξόδου των αντιστροφών

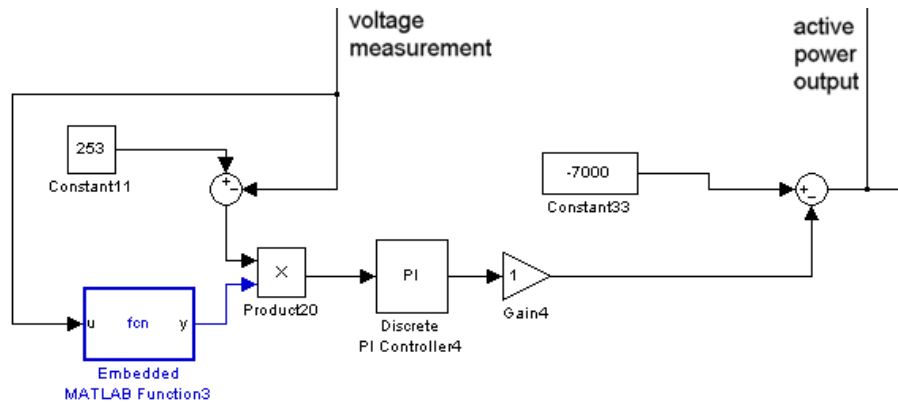
Όπως βλέπουμε και από το διάγραμμα η τάση στους δυο τελευταίους κόμβους ξεπερνά το όριο του 10% που ισχύει στη χώρα μας σε κανονική λειτουργία. Παρακάτω θα δούμε πως ο έλεγχος της παραγόμενης ενεργού ισχύος αλλά και ο έλεγχος του συντελεστή ισχύος στην έξοδο των φωτοβολταϊκών, μπορούν να μειώσουν την τάση.

A. Μείωση παραγόμενης ισχύος (Power Curtailment):

Ακολουθώντας αυτά που αναπτύχθηκαν στο κομμάτι της θεωρίας και ειδικότερα βασισμένοι στη σχέση

$$P_{inv} = \begin{cases} P_{MPPT} - m (V - V_{cri}) & \forall V \geq V_{cri} \\ P_{MPPT} & \forall V < V_{cri} \end{cases} \quad (7.15)$$

κατασκευάστηκε στο simulink ένα τμήμα ελέγχου το οποίο και εφαρμόστηκε μετά στην προσομοίωση.



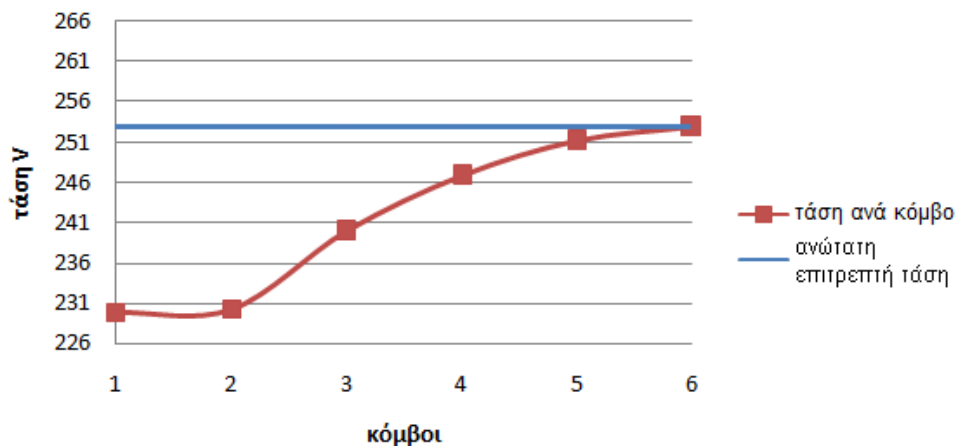
Εικόνα 7.50 Τμήμα ελέγχου ενεργού ισχύος με ανατροφοδότηση την τάση εξόδου στην περίπτωση Power Curtailment

Στο σχήμα ελέγχου αυτό -7000 είναι η ισχύς που δίνουν τα φωτοβολταϊκά όταν λειτουργούν σε MPPT. Όταν η τάση στους ακροδέκτες του αντιστροφέα ξεπεράσει την τιμή των 253 V τότε αρχίζει να μειώνεται η ισχύς στην έξοδο μέχρι η διαφορά της τάσης αναφοράς και της πραγματικής τάσης να μηδενιστεί. Το ρόλο αυτό τον επιτελεί ο PI ελεγκτής, ο οποίος είναι στην ουσία ο παράγοντας m του παραπάνω τύπου. Το μπλοκ fcn υπάρχει ώστε η μείωση της ενεργού ισχύος να γίνεται μόνο στην περίπτωση όπου η τάση ξεπερνά το όριο των 253 V. Ακολουθεί ο κώδικας στο matlab για την υλοποίηση του μπλοκ αυτού:

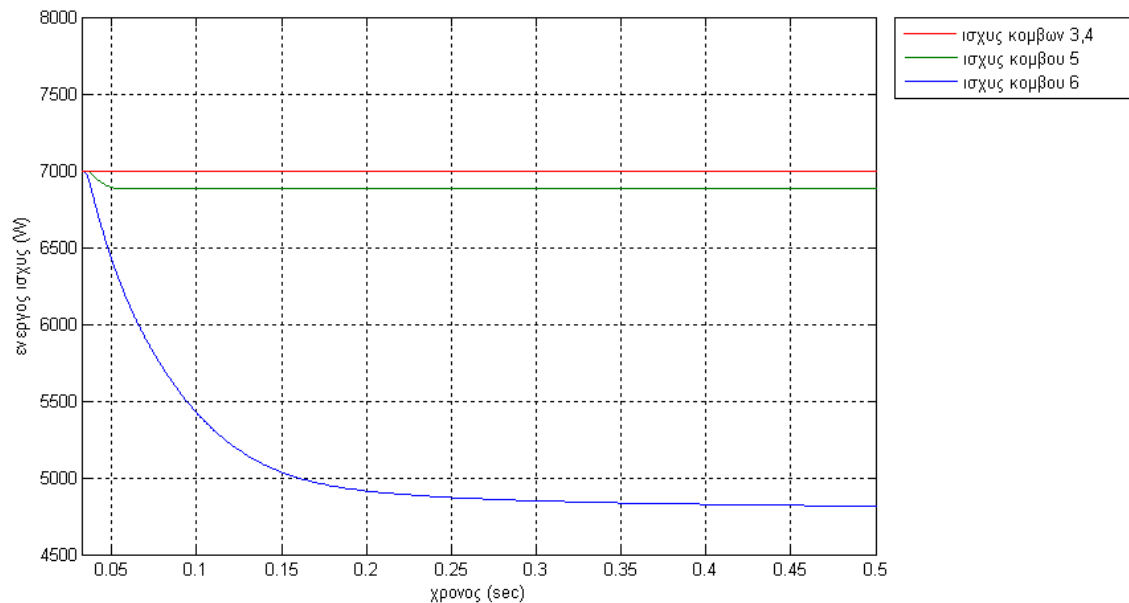
```
if u>253 then y=1
else y=0
Endif
```

Ακολουθεί το προφίλ της τάσης όταν εφαρμόσουμε τον παραπάνω έλεγχο.

Τάση για κάθε κόμβο



Εικόνα 7.51 Τάσεις ανά κόμβο στην περίπτωση που έχουμε έλεγχο στην τάση εξόδου των αντιστροφέων (Power Curtailment)

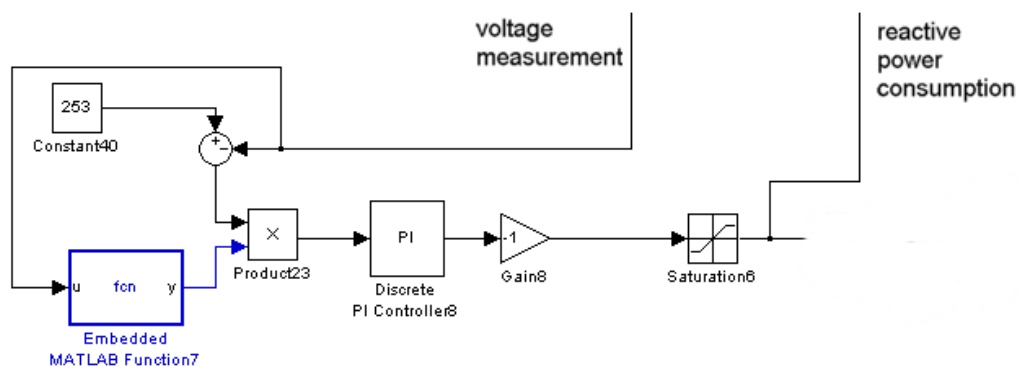


Εικόνα 7.52 Ισχύς ανά κόμβο στην περίπτωση που έχουμε έλεγχο στην τάση εξόδου των αντιστροφών (Power Curtailment)

Από την εικόνα 7.52 βλέπουμε ότι ο προτελευταίος και ο τελευταίος κόμβος μειώνουν την ισχύ στην έξοδο τους με τιμές 6,883 kW και 4,781 kW αντίστοιχα.

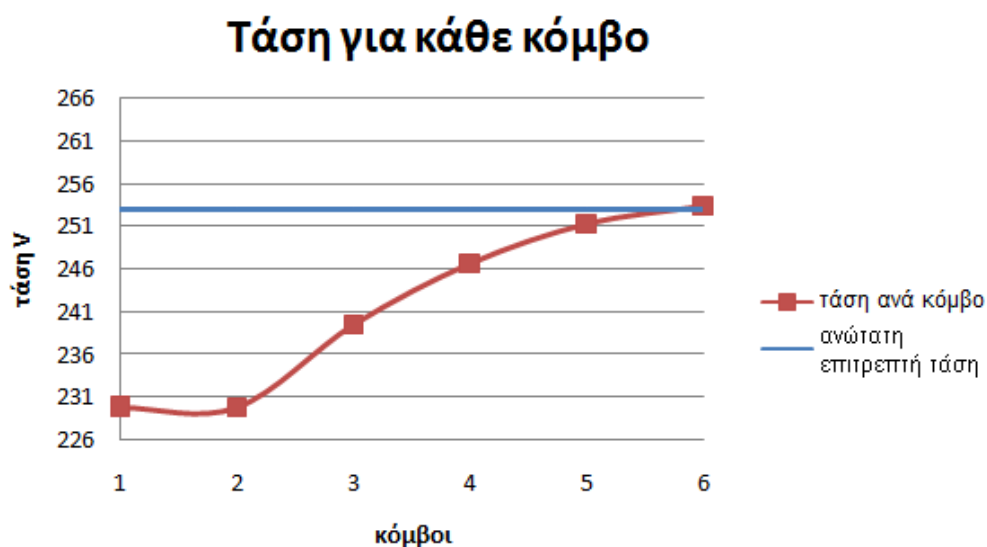
B. Ρύθμισης αέργου ισχύος (power factor control, PFC):

Η λογική ελέγχου για το σύστημα μας είναι παρόμοια με αυτήν που ακολουθήθηκε στον προηγούμενο έλεγχο. Μετρείται δηλαδή η τάση στην έξοδο του αντιστροφέα και αφαιρείται η τιμή αναφοράς δίνοντας τη διαφορά τους σε έναν PI ελεγκτή που δίνει αναφορά για την καταναλισκόμενη άεργο ισχύ του αντιστροφέα.



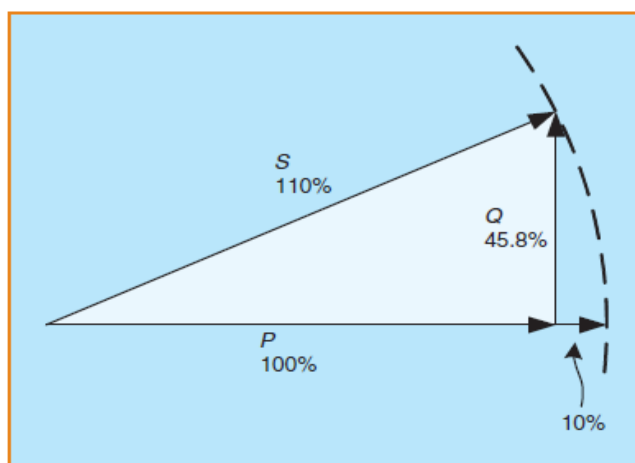
Εικόνα 7.53 Τμήμα ελέγχου αέργου ισχύος με ανατροφοδότηση την τάση εξόδου στην περίπτωση PFC

Ακολουθεί το προφίλ της τάσης όταν εφαρμόσουμε τον παραπάνω έλεγχο.



Εικόνα 7.54 Τάσεις ανά κόμβο στην περίπτωση που έχουμε έλεγχο στην τάση εξόδου των αντιστροφών (PFC)

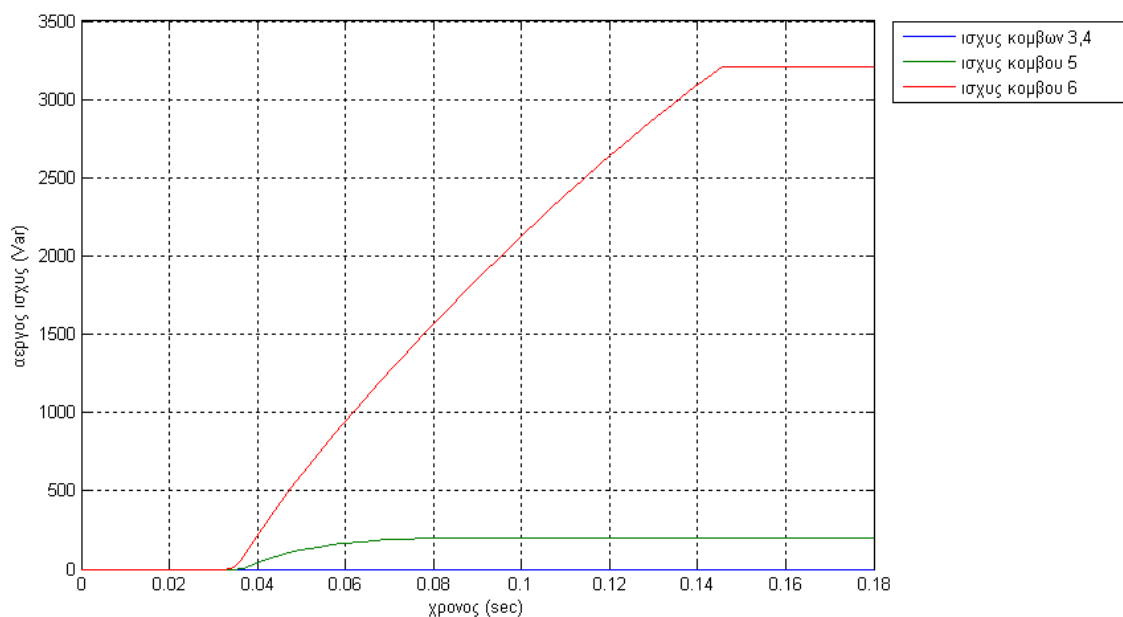
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστούν κάποια πράγματα. Κάθε αντιστροφέας έχει ένα όριο στην φαινόμενη ισχύ εξόδου του, που προκύπτει από το μέγιστο ρεύμα εξόδου του. Το όριο στο ρεύμα είναι αποτέλεσμα του ρεύματος αντοχής των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα. Έτσι μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να είναι αδύνατο να καταναλώσει την απαιτούμενη άεργο ώστε να φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα η τάση. Γι' αυτό το λόγο είναι ευεργετική η χρήση αντιστροφέα με μεγαλύτερη ονομαστική φαινόμενη ισχύ από την ονομαστική ισχύ εξόδου των φωτοβολταϊκών. Για παράδειγμα σε μια εγκατάσταση φωτοβολταϊκών με ονομαστική ισχύ 1 pu, η χρήση αντιστροφέα ονομαστικής ισχύος μόλις κατά 10% μεγαλύτερης ισχύος είναι αρκετή, ώστε να έχουμε δυνατότητα καταπόνησης ή παραγωγής αέργου ισχύος [31] [32].



Εικόνα 7.55 Σχέση φαινόμενης ισχύς του αντιστροφέα και ικανότητας διαχείρισης αέργου ισχύος [32]

Όπως φαίνεται στην εικόνα 7.55, η αύξηση της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα κατά 10% αυξάνει την ικανότητα αέργου ισχύος από μηδέν έως περίπου 46% κατά τη διάρκεια της μέγιστης παραγωγής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Αυτό θα οδηγήσει σε ένα συντελεστή ισχύος από 0,91 επαγωγικό έως 0,91 χωρητικό [32].

Για το παραπάνω λόγο χρησιμοποιήσαμε αντιστροφέα με ονομαστική φαινόμενη ισχύ ίση με 7,7 KVA έτσι ώστε για παραγωγή 7 KW από τα φωτοβολταϊκά να μπορεί να καταναλώσει άεργο ίση με 3,208 KVar. Παρατηρούμε πως σ' αυτή την περίπτωση δεν πέφτουμε κάτω από το τιθέμενο όριο των 253 V. Αυτό συμβαίνει καθώς οι αντιστροφείς μας έχουν όριο κατανάλωσης αέργου ισχύος και το οποίο υλοποιείται στο Simulink με τη χρήση του περιοριστή στο τέλος του ελέγχου.



Εικόνα 7.56 Καταναλισκόμενη από τον κάθε αντιστροφέα άεργος ισχύς ανά κόμβο στην περίπτωση που έχουμε έλεγχο στην τάση εξόδου των αντιστροφέων (PFC)

Από την εικόνα 7.56 βλέπουμε ότι ο προτελευταίος και ο τελευταίος κόμβος καταναλώνουν 0,201 kVar και 3,208 kVar αντίστοιχα καθώς και ότι ο τελευταίος αντιστροφέας φτάνει στη μέγιστη τιμή φαινόμενης ισχύος που μπορεί να διαχειριστεί.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι οι δυο παραπάνω τρόποι θα μπορούσαν να συνδυαστούν με στόχο την αποδοτικότερη λειτουργία των αντιστροφέων και γενικότερα του συστήματος. Θα μπορούσαν δηλαδή οι αντιστροφείς να έχουν και τα δυο τμήματα έλεγχου. Αρχικά θα καταναλώνουν άεργο ισχύ και στην περίπτωση που η τάση δεν λαμβάνει επιθυμητές τιμές θα μπορούν να μειώσουν την ενεργό ισχύ στην έξοδο τους σύμφωνα με τη λογική έλεγχου Power Curtailment.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΣΥΝΕΧΙΣΗΣ

Τα πειράματα PHIL (Power Hardware In Loop) αποτελούν ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για τις δοκιμές ηλεκτρικών συσκευών. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η χρησιμοποίησή τους στην δοκιμή μικροδικτύων διεσπαρμένης παραγωγής καθώς με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υποβληθεί το μικροδίκτυο σε διάφορα σενάρια και ακραίες συνθήκες λειτουργίας. Έτσι μπορεί να παρατηρηθεί η απόκριση του σε πραγματικές συνθήκες χωρίς όμως να είναι συνδεδεμένο με το πραγματικό ηλεκτρικό δίκτυο ή σύστημα.

Καθοριστικό ρόλο στις PHIL προσομοιώσεις παίζει ο εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (στην περίπτωση μας το RTDS), που μπορεί να προσομοιώσει ολόκληρα ηλεκτρικά συστήματα, και το οποίο θα συνδεθεί με τη συσκευή που βρίσκεται υπό δοκιμή. Όμως για να πραγματοποιηθεί η σύνδεση αυτή απαιτείται η παρουσία ενός «ενδιάμεσου» (interface) που να μπορεί να παράγει ή να καταναλώνει ισχύ και να επιβάλει μια ελεγχόμενη τάση στην έξοδο του. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε ως interface ένας μονοφασικός ενισχυτής AC/DC/AC τριών κλαδών.

Ένα σημείο το οποίο μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω σε μελλοντική εργασία είναι η εφαρμογή ενός κριτηρίου ευστάθειας και σε ένα δίκτυο περά από αυτό του διαιρέτη τάσης. Στην εργασία μας βασίσαμε το ζήτημα της ευστάθειας στις προσομοιώσεις που έγιναν στο Simulink γεγονός το οποίο μπορεί να φέρει διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με την πραγματικότητα λόγω της αδυναμίας επακριβούς αναπαράστασης του συστήματος. Ιδιαίτερη προσοχή και έμφαση μπορεί να δοθεί στην αναπαράσταση των αντιστροφών φωτοβολταϊκών καθώς δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες στη βιβλιογραφία για μοντελοποίηση αντιστροφών σε PHIL τεχνικές. Για την εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων μπορεί να εφαρμοστεί ένας έλεγχος στην ανατροφοδότηση ώστε να απαλείψουμε τυχόν αρμονικές που μπορούν να εμφανιστούν στο σήμα ανατροφοδότησης και θα προκαλέσουν προβλήματα στην προσομοίωση. Τέλος σε ότι αφορά στο κομμάτι των προσομοιώσεων πρέπει να τονίσουμε ότι η ανύψωση τάσης που προκαλείται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ένα ζήτημα που απαιτεί μεγάλη προσοχή. Μια επέκταση του ελέγχου της τάσης θα είναι ο συνδυασμός των δυο μεθόδων, power curtailment και power factor control, και η δημιουργία μιας νέας που θα περιέχει στοιχεία και των δυο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] http://el.wikipedia.org/wiki/Ήπιες_μορφές_ενέργειας
- [2] [http:// el.wikipedia.org/wiki/Φωτοβολταϊκό_σύστημα](http://el.wikipedia.org/wiki/Φωτοβολταϊκό_σύστημα)
- [3] Δέρβος Κ.Θ., "Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις", έκδοση ΕΜΠ, 2009
- [4] Παπαθανασίου Σ., "Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σημειώσεις παραδόσεων", έκδοση ΕΜΠ, 2008
- [5] Κοτσαμπόπουλος Π., "Μελέτη, κατασκευή, και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής", διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2010
- [6] Τάγκας Ν., "Μοντελοποίηση διεσπαρμένης παραγωγής", διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2008
- [7] Αναστόπουλος Χ., "Ανάλυση της λειτουργίας εργαστηριακού πρωτότυπου μικροδικτύου", Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. 2004
- [8] Manual της εταιρίας SMA για τις συσκευές Sunny boy 1100E, Sunny island 4500
- [9] Κεμενε Ε., "Ανάλυση και σχεδιασμός επιδεικτικού μικροδικτύου - μελέτη συμπεριφοράς ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος", διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010
- [10] Ιστοσελίδα sma: www.sma.de/en/products/wind-energy-inverters/windy-boy-1200-1700.html
- [11] Μιχαλός Μ., "Ανάπτυξη συστήματος καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων εργαστηριακού μικροδικτύου", διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2008
- [12] Paul Forsyth, Rick Kuffel., "Utility applications of a RTDS Simulator", RTDS Technologies Inc
- [13] Γ. Κορρές, Χ. Αποστολόπουλος, Π. Κάτσικας, Δ. Τσακίρης., "Έλεγχος λειτουργίας ψηφιακών ηλεκτρονόμων με τον ψηφιακό εξομοιωτή πραγματικού χρόνου και υπολογιστικά μοντέλα ψηφιακών ηλεκτρονόμων", cigre 2005
- [14] Αδάμου Γ., "Έλεγχος ρυθμίσεων ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας με τον ψηφιακό εξομοιωτή πραγματικού χρόνου", διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2008
- [15] Wei Ren, "Accuracy evaluation of power-hardware-in-the-loop (PHIL) simulation", Florida state university, 2007
- [16] Τζάκας Α., "Προσομοίωση HIL (Hardware-in-the-loop) με τον μικροελεγκτή INFINEON C167CS. Έλεγχος συστημάτων με τη μέθοδο βέλτιστου πλάτους", διπλωματική εργασία, ΑΠΘ, 2006
- [17] Jian Wu, Noel N. Schulz, "Experimental design for remote hardware-in-the-loop testing", *Proceedings of ASNE Reconfiguration and Survivability Symposium*, Jacksonville, Florida, Feb. 2005
- [18] Wei Ren, Michael Steurer, Thomas L. Baldwin, "Improve the Stability and the Accuracy of Power Hardware-in-the-Loop Simulation by Selecting Appropriate Interface Algorithms", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 44, NO. 4, JULY/AUGUST 2008
- [19] Βελώνη Α., "Συστήματα αυτομάτου έλεγχου λυμένες ασκήσεις", έκδοση Παπασωτηρίου, 1997

- [20] Μανιάς Σ., "Ηλεκτρονικά ισχύος", εκδόσεις Συμεών, 2007
- [21] Δώδα Σ., "Εξομοίωση Φωτοβολταϊκού Συστήματος Διασυνδεδεμένου στο Δίκτυο Χαμηλής Τάσης", διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010
- [22] Han-Woong Park, Sung-Jun Park, Jin-Gil Park, Cheul-U Kim, "A Novel High-Performance Voltage Regulator for Single-Phase AC Sources", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 48, NO. 3, JUNE 2001
- [23] Παπαδόπουλος Μ., "Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, τόμος 1", εκδόσεις ΕΜΠ, 1994
- [24] Alexander Viehweider, Georg Lauss, Lehfuss Felix, "Stabilization of Power Hardware-in-the-Loop simulations of electric energy systems", Simulation Modelling Practice and Theory 19 (2011) 1699–1708, science direct
- [25] Alexander Viehweider, Georg Lauss, Felix Lehfuss (AIT), "Stable and accurate MIMO Power Hardware in the Loop Simulation –Theory and Applications", AIT
- [26] Μπούρκας Π.Δ., "Εφαρμογές κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων", εκδόσεις ΕΜΠ, 1998
- [27] Παπαϊωάννου Ι., "Επίδραση της ένταξης φ/β μονάδων στην ποιότητα ισχύος δικτύων διανομής", διπλωματική εργασία, ΑΠΘ, 2010
- [28] Γκιλφέςης Χ., "Μελέτη επίδρασης φωτοβολταϊκών σε δίκτυα Χ.Τ.", διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2010
- [29] Erhan Demirok, Dezso Sera, Remus Teodorescu, Pedro Rodriguez, and U. Borup, "Clustered PV Inverters in LV Networks: An Overview of Impacts and Comparison of Voltage Control Strategies"
- [30] R. Tonkoski, L. A. C. Lopes, T. H. M. EL-Fouly, "Droop-based Active Power Curtailment for Overvoltage Prevention in Grid Connected PV Inverters", Concordia University – Montreal, QC - Canada
- [31] Βλαχόπουλος Σ., "Σχεδίαση τριφασικού αντιστροφέα για διασύνδεση φωτοβολταϊκών στο δίκτυο με δυνατότητα ρύθμισης άεργης ισχύος", διπλωματική εργασία, ΑΠΘ, 2010
- [32] J. Bebic, R. Walling, K. O'Brien, and B. Kroposki, "The Sun Also Rises – Planning for Large-Scale Solar Power", IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 7(3), May/June 2009.