



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

**Μελέτη αυτόνομων υβριδικών συστημάτων με
προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Σ. Νταβαρίνος

Επιβλέπων: Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



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

**Μελέτη αυτόνομων υβριδικών συστημάτων με
προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Σ. Νταβαρίνος

Επιβλέπων: Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ... Οκτωβρίου 2016.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου

Αναπληρωτής Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργιάκης

Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

.....

Νικόλαος Σ. Νταβαρίνος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Νικόλαος Σ. Νταβαρίνος 2016

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια λόγω της όλο και μεγαλύτερης διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε.), έχει γίνει πιο επιτακτική η ανάγκη για ανάπτυξη αποτελεσματικών τεχνικών ελέγχου του δικτύου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη των αυτόνομων υβριδικών συστημάτων μέσω της προσομοίωσης πραγματικού χρόνου.

Αρχικά, γίνεται μια περιγραφή των μη διασυνδεδεμένων συστημάτων, των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, των σύγχρονων γεννητριών και των διατάξεων ελέγχου τους ενώ αναλύεται και η χαρακτηριστική καμπύλη συχνότητας-φορτίου.

Στη συνέχεια περιγράφονται τα υβριδικά συστήματα που περιλαμβάνουν σύγχρονη γεννήτρια-φωτοβολταϊκά-συσσωρευτές καθώς και τα επιμέρους δομικά τους στοιχεία. Εξετάζονται αναλυτικά οι τεχνικές ελέγχου Load following, Cycle charge καθώς και ένας συνδυασμός αυτών. Τέλος, για το σύστημα σύγχρονης γεννήτριας με φωτοβολταϊκά παρουσιάζονται ο έλεγχος ON-OFF του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα, ο έλεγχος ενεργού ισχύος του και τέλος ο έλεγχος μέσω της χρήσης απορριπτόμενων φορτίων.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την παρουσίαση του ψηφιακού προσομοιωτή πραγματικού χρόνου RTDS, στον οποίο προσομοιώθηκαν όλα τα μοντέλα της παρούσας διπλωματικής. Παρουσιάζονται μοντέλα σύγχρονης γεννήτριας-φορτίου, σύγχρονων γεννητριών σε παράλληλη λειτουργία και σύγχρονης γεννήτριας-φωτοβολταϊκού, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και σε εργαστηριακές ασκήσεις φοιτητών.

Επιπροσθέτως, γίνεται μια εισαγωγή στην τεχνική ελέγχου ενεργού ισχύος που εφαρμόστηκε στο σύστημα σύγχρονης γεννήτριας-φωτοβολταϊκού-φορτίου το οποίο προσομοιώθηκε και αναλύθηκε στο RTDS. Επίσης, πραγματοποιήθηκε πείραμα Power Hardware in Loop, όπου το κομμάτι του hardware προσομοιώθηκε από τα πραγματικά φορτία του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Στο πείραμα μελετήθηκε η αναλυτική ημερήσια λειτουργία ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος και ελέγχθηκε η απόκρισή του σε μεταβατικά φαινόμενα.

Τέλος, εξάγονται συμπεράσματα και κατατίθενται βελτιωτικές προτάσεις.

Λέξεις κλειδιά

Αυτόνομα Υβριδικά Δίκτυα, Πρωτεύουσα Ρύθμιση Φορτίου-Συχνότητας, Απορριπτόμενα φορτία, Δίκτυο Γεννήτριας Φωτοβολταϊκού, Ψηφιακός Προσομοιωτής Πραγματικού Χρόνου (RTDS), καμπύλη droop φωτοβολταϊκού.

ABSTRACT

In recent years, the integration of Renewable Sources of Energy in hybrid islanded grids has been significant, thus it is imperative to develop power control techniques to ensure the stable operation and reliability of system. In this diploma thesis, the structure of islanded grids and different control techniques has been presented.

In the first chapter a general description of hybrid grids, renewable sources of energy and the operation of diesel gensets is provided. Moreover, the primary load – frequency control is described.

The second chapter gives insight on more specific hybrid off-grid systems such as genset-photovoltaic-battery and genset-photovoltaic. For each system, various power control methods have been described.

Chapter three includes the presentation of the Real Time Digital Simulator (RTDS) which was used in all the experiments of this diploma thesis. The models that have been developed are genset with load, parallel operation of two gensets with load and genset with photovoltaic and load.

In the fourth chapter the genset-photovoltaic-load system was simulated in the RSCAD-RTDS and was controlled by a suitable controller (Controller Hardware in the Loop). Subsequently, a Power Hardware in Loop (PHIL) experiment is included where real laboratory loads were used as the hardware part. In this experiment the daily operation of hybrid islanded system was simulated, within the appropriate communication with SCADA systems.

Finally, conclusions are drawn and proposals for improvements and further work are presented.

Key words

Off-grid hybrid grid, primary load – frequency control, damp load, genset photovoltaic grid, real time digital simulator (RTDS), control hardware in loop (CHIL), power hardware in loop (PHIL), photovoltaic droop characteristic.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Κοτσαμπόπουλο, υπό την επίβλεψη του οποίου πραγματοποιήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ερευνητές Δημήτριο Λαγό και Αχιλλέα Μάρκου για τις πολύτιμες συμβουλές τους στην διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της οικογένειάς μου για την αμέριστη συμπαράσταση που μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, ένα ξεχωριστό ευχαριστώ στους φίλους μου, που στηρίζουν τις προσπάθειες μου και με εμπνέουν συνεχώς.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή.....	9
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	9
1.1.1 Ηλιακή ενέργεια	10
1.2 Σύγχρονη γεννήτρια	11
1.2.1 Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z)	11
1.2.2 Διατάξεις ελέγχου γεννητριών.....	13
1.2.2.1 Αυτόματος ρυθμιστής τάσης	13
1.2.2.2 Ρυθμιστής στροφών.....	14
1.3 Ρύθμιση φορτίου-συχνότητας	16
1.3.1 Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας	18
1.3.2 Στατισμός	19
1.4 Παράλληλη λειτουργία γεννητριών.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα.....	27
2.1 Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα Ηλεκτροπαραγωγής.....	27
2.2 Σύστημα σύγχρονης γεννήτριας-φωτοβολταϊκού-συσσωρευτών	29
2.2.1 Τεχνική ελέγχου Load following.....	30
2.2.2 Τεχνική ελέγχου Cycle charge.....	36
2.2.3 Συνδυασμός τεχνικών Load following και Cycle charge.....	38
2.3 Σύστημα σύγχρονης γεννήτριας-φωτοβολταϊκού	40
2.3.1 Τεχνική ελέγχου ON-OFF του αντιστροφέα	42
2.3.2 Τεχνική ελέγχου ενεργού ισχύος	43
2.3.3 Τεχνική ελέγχου με χρήση ελεγχόμενων φορτίων.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Προσομοιώσεις Πρωτεύουσας Ρύθμισης Συχνότητας.....	50
3.1 Προσομοιωτής RTDS.....	50
3.2 Σύστημα σύγχρονης γεννήτριας υπό φορτίο.....	53
3.3 Σύστημα παράλληλης λειτουργίας σύγχρονων γεννητριών υπό φορτίο.....	60
3.4 Σύστημα σύγχρονης γεννήτριας με φωτοβολταϊκό υπό φορτίο	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Προσομοιώσεις και Hardware in Loop Πειράματα (HIL).....	78
4.1 Matlab controller- Έλεγχος ενεργού ισχύος.....	78
4.2 Matlab controller- Απόρριψη φορτίου (Damp load)	83
4.3 Τεχνικές Hardware in Loop (HIL)	85

4.4 Πείραμα PHIL	88
4.4.1 Διάταξη προσομοίωσης PHIL	88
4.4.2 Πρόγραμμα ελέγχου φορτίων μέσω SCADA.....	92
4.4.3 Εκτέλεση πειράματος.....	97
4.4.4 Προσομοίωση PHIL για βηματική αλλαγή της ισχύος του Φ/Β	102
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Συμπεράσματα και Προοπτικές.....	106
5.1 Κυριότερα συμπεράσματα	106
5.2 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση	107
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	109
Κώδικας Matlab για πείραμα PHIL	109
Κώδικας Matlab για ανάγνωση δεδομένων από database στο SCADA.....	112
Κώδικας Matlab για αποστολή set point στο SCADA.....	112
Κώδικας Matlab για βέλτιστη επιλογή διαθέσιμων φορτίων από το SCADA	114
Αρχείο Python για επικοινωνία με SCADA	116
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	117

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Σήμερα, οι ανάγκες για κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνονται με ταχύτατους ρυθμούς σε όλα τα τεχνολογικά αναπτυσσόμενα κέντρα. Πολλές από τις ακολουθούμενες διαδικασίες παραγωγής ενέργειας (συμβατικές μέθοδοι/πυρηνική τεχνολογία) συνδέονται με περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες μπορούν να επιδράσουν είτε σε τοπική είτε σε καθολική κλίμακα. Με δεδομένη την ανησυχία, αλλά και το γενικό ενδιαφέρον των πολιτών σχετικά με τη διατήρηση της ποιότητας του περιβάλλοντος, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) μπορούν να αποτελέσουν την ενδεχόμενη διέξοδο στα προβλήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν οριστεί οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν εν αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος πριν στραφεί έντονα στη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Οι ΑΠΕ πρακτικά είναι ανεξάντλητες, η χρήση τους δεν ρυπαίνει το περιβάλλον ενώ η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνον από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που θα έχουν σαν σκοπό την δέσμευση του δυναμικού τους.

Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών εμφανίσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων την τελευταία δεκαετία. Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό

εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κλάδος που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Η ρύπανση εκφράζεται ως αυξημένη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, για την αντιμετώπιση της οποίας έγιναν ενέργειες και λήφθηκαν πρωτοβουλίες, με σταθμό στην πορεία όλων αυτών το πρωτόκολλο του Κιότο. Το πρωτόκολλο αυτό έχει συνυπογραφεί από 55 χώρες, οι οποίες δεσμεύτηκαν με βραχυπρόθεσμους και μακροπρόθεσμους στόχους.

Ειδικότερα για το σύνολο των Κρατών-Μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέχρι το 2020, προβλέπεται:

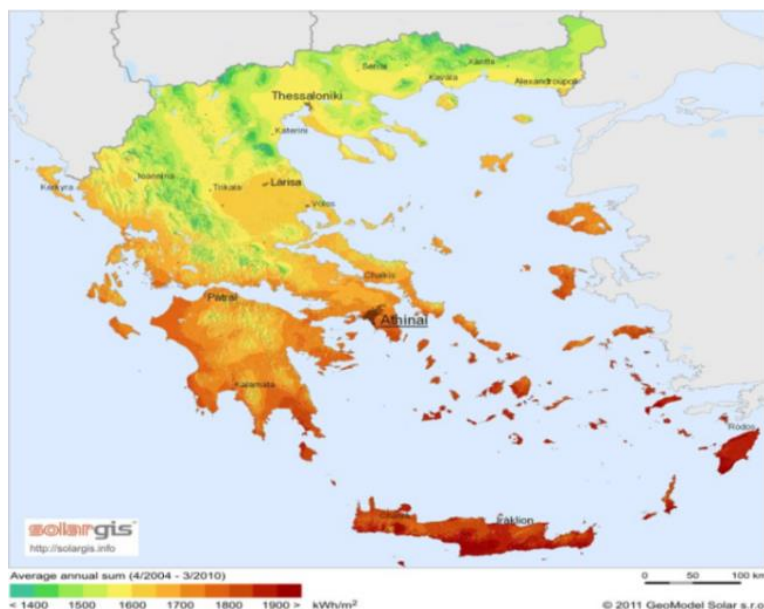
- I. 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990
- II. 20% διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας
- III. 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας. Ειδικά για την Ελλάδα, ο στόχος για τις εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου είναι μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005, και 18% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση [1].

1.1.1 Ηλιακή ενέργεια

Στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εντάσσεται και η φωτοβολταϊκή μετατροπή. Η τεχνική της δημιουργίας ηλεκτρικής ενέργειας από την απορρόφηση του φωτός σε υλικά με ηλεκτροστατικό φράγμα (φωτοβολταϊκό φαινόμενο) δεν είναι κάτι καινούριο. Σε βιομηχανική κλίμακα εφαρμόστηκε στην αρχή της δεκαετίας του 1960 και θεωρείται η κύρια αιτία της κατακόρυφης μείωσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη σύγχρονη εποχή [2]. Η εφαρμογή αναπτύχθηκε προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες τροφοδοσίας των διαστημικών εφαρμογών των ΗΠΑ. Ακολούθησε η αυτόνομη τροφοδοσία σε σταθμούς/αποστολές των απομονωμένων περιοχών του πλανήτη (Αρκτική-Ανταρκτική) και ακολούθως η εφαρμογή της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας επεκτάθηκε σταδιακά καλύπτοντας μέρος των οικιακών ενεργειακών αναγκών των τεχνολογικά αναπτυγμένων χωρών. Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο γεγονός που την καθιστά πρακτικά ανεξάντλητη.

Έτσι λοιπόν, η ηλιακή ακτινοβολία αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού με δύο τρόπους: **με θερμικές και φωτοβολταϊκές εφαρμογές**. Η πρώτη είναι η συλλογή της ηλιακής ενέργειας με στόχο την παραγωγή θερμότητας, με κύρια εφαρμογή τη θέρμανση του νερού και τη μετατροπή του σε ατμό για την κίνηση τουρμπίνων, ενώ στη δεύτερη εφαρμογή

τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές όπου η σύνδεση με το δίκτυο είναι πολύ ακριβή. Αν και όλη η γη δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, η ποσότητά της εξαρτάται κυρίως από τη γεωγραφική θέση, την ημέρα, την εποχή και τη νεφοκάλυψη. Όσον αφορά στην Ελλάδα, στο μεγαλύτερο τμήμα της χώρα μας η ηλιοφάνεια διαρκεί περισσότερες από 2700 ώρες το χρόνο. Στη Δυτική Μακεδονία και την Ήπειρο εμφανίζει τις μικρότερες τιμές κυμαινόμενη από 2200 ως 2300 ώρες, ενώ στη Ρόδο και τη νότια Κρήτη ξεπερνά τις 3100 ώρες ετησίως. Στις περιοχές που βρίσκονται πιο κοντά στον ισημερινό προφανώς παρατηρείται μεγαλύτερη ηλιοφάνεια, συμπέρασμα που προκύπτει και από την παρακάτω φωτογραφία.



Σχήμα 1.1 Η μέση ετήσια ηλιοφάνεια στην Ελλάδα

1.2 Σύγχρονη γεννήτρια

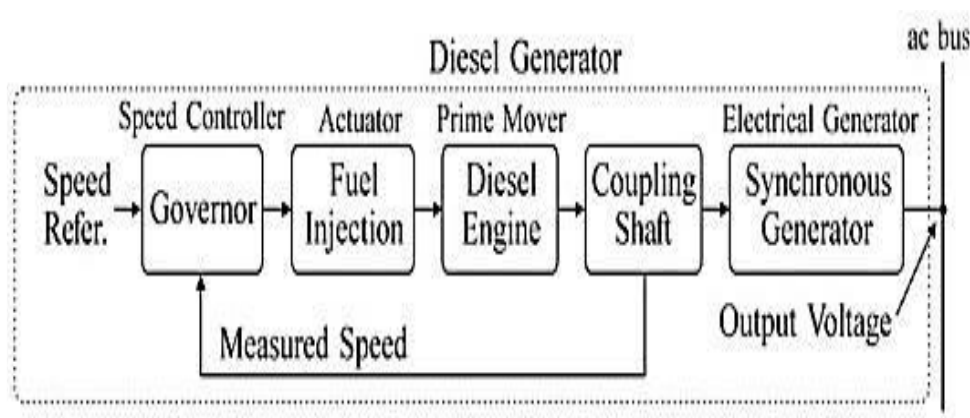
1.2.1 Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z)

Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος είναι ένα σύστημα γεννήτριας που κινείται από μηχανή εσωτερικής καύσης (στη περίπτωση μας κινητήρας ντίζελ). Αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία διανεμημένης παραγωγής και πρόκειται για μια παραδοσιακή και δοκιμασμένη τεχνολογία που συνδυάζει χαμηλό κόστος προμήθειας ανά εγκατεστημένο kW, μεγάλη διαθεσιμότητα σε μεγέθη, δυνατότητα γρήγορης εκκίνησης, υψηλούς συντελεστές απόδοσης και υψηλή λειτουργική αξιοπιστία.

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος είναι η εξής: Οι κινητήρες ντίζελ είναι παλινδρομικές μηχανές στις οποίες η ανάφλεξη του καυσίμου γίνεται με συμπίεση στο

εσωτερικό του συστήματος εμβόλου – κυλίνδρου και η λειτουργία τους έγκειται στην μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε κινητική ενέργεια του άξονα που «οδηγεί» μια περιστρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή. Συνήθως, μια σύγχρονη μηχανή χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας της, δηλαδή μέσω της αλληλεπίδρασης των δυο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Και ο κινητήρας ντίζελ και η σύγχρονη μηχανή είναι εξοπλισμένοι με αρκετούς ελεγκτές και συσκευές προστασίας για την διεκπεραίωση διαφόρων λειτουργιών, όπως η εκκίνηση της μηχανής, η ρύθμιση τάσης/ταχύτητας της σύγχρονης γεννήτριας και η σταθεροποίηση της συχνότητας [3].



Σχήμα 1.2 Γενικό διάγραμμα λειτουργίας του H/Z

Η χρήση ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους για την τροφοδοσία ενός μικροδικτύου ουσιαστικά συνεπάγεται την απαίτηση η μηχανή εσωτερικής καύσης να λειτουργεί συνεχώς σε συγκεκριμένο αριθμό στροφών, ανεξάρτητα από το ηλεκτρικό φορτίο του δικτύου. Στην περίπτωση ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους δηλαδή, από το συνολικό πεδίο λειτουργίας της μηχανής εσωτερικής καύσης αξιοποιείται μόνο το εύρος ροπής που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο αριθμό στροφών. Ανάλογα με τη μηχανή εσωτερικής καύσης, οι στροφές λειτουργίας της μπορεί να ταυτίζονται με αυτές της σύγχρονης γεννήτριας ή να παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο μηχανών μία σταθερή σχέση μετάδοσης, που συνήθως υποβιβάζει τις στροφές της μηχανής εσωτερικής καύσης. Με βάση τα παραπάνω, η επιλογή μηχανής εσωτερικής καύσης για την κίνηση ηλεκτρογεννήτριας είναι μία σχετικά απλή διαδικασία, καθώς η μόνη απαίτηση που θα πρέπει να ικανοποιείται είναι ο κινητήρας να είναι σε θέση να δώσει ροπή τουλάχιστον ίση με τη μέγιστη απαιτούμενη από τη γεννήτρια, στις κατάλληλες στροφές. Το ζητούμενο κατά τη δημιουργία ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους είναι η κάλυψη της αναμενόμενης από το μικροδίκτυο ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας με το ελάχιστο δυνατό κόστος λειτουργίας. Στην περίπτωση σχετικά μεγάλων εγκαταστάσεων, η

αναμενόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνάρτηση του χρόνου, και προφανώς η γεννήτρια θα πρέπει να είναι σε θέση να καλύψει τουλάχιστον το μέγιστο αυτής της συνάρτησης. Συνήθως, προκειμένου να μπορούν να καλυφθούν και κάποιες απρόβλεπτες αιχμές φορτίου, η επιλογή γίνεται λαμβάνοντας υπόψη και ένα συντελεστή ασφάλειας της τάξης του 20 - 25%. Με βάση επομένως το μέγιστο της αναμενόμενης καμπύλης ζήτησης φορτίου, τον επιθυμητό συντελεστή ασφάλειας και τα σχετικά οικονομικά κριτήρια (κόστος απόκτησης, κόστος συντήρησης, κλπ.) επιλέγεται η κατάλληλη γεννήτρια.

1.2.2 Διατάξεις ελέγχου σύγχρονων γεννητριών

Ένα σύστημα Ηλεκτροπαραγωγού Ζεύγους, διαθέτει αρκετούς ελεγκτές - ρυθμιστές οι οποίοι εξασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία του, ακόμη και σε περιπτώσεις απότομης μεταβολής του φορτίου. Οι ελεγκτές με τους οποίους θα ασχοληθούμε στην παρούσα διπλωματική είναι ο ρυθμιστής ταχύτητας και ο αυτόματος ρυθμιστής τάσεως.

Γενικά, η ρύθμιση των στροφών (ταχύτητας) - ενεργού ισχύος, όπως και η ρύθμιση τάσεως που θα αναπτυχθούν παρακάτω, εξυπηρετούνται από δύο βασικές διατάξεις ελέγχου κλειστού βρόχου. Ένα σύστημα του είδους αυτού ανιχνεύει τις μεταβολές των μεταβλητών εξόδων από μια τιμή αναφοράς τους (καθορισμένη από το λειτουργό σύμφωνα με τις ανάγκες του) και θέτει σε λειτουργία σε πραγματικό χρόνο αντίρροπες μεταβλητές ελέγχου οι οποίες θα εξουδετερώσουν όσο πιο γρήγορα και αποτελεσματικά γίνεται τις αποκλίσεις. Σημειώνεται ότι σε περίπτωση που το σύστημα ελέγχου δεν χρησιμοποιεί ολοκληρωτικό έλεγχο, το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δεν επανέρχεται στην προ της διαταραχής κατάσταση, αλλά παραμένουν μόνιμα σφάλματα.

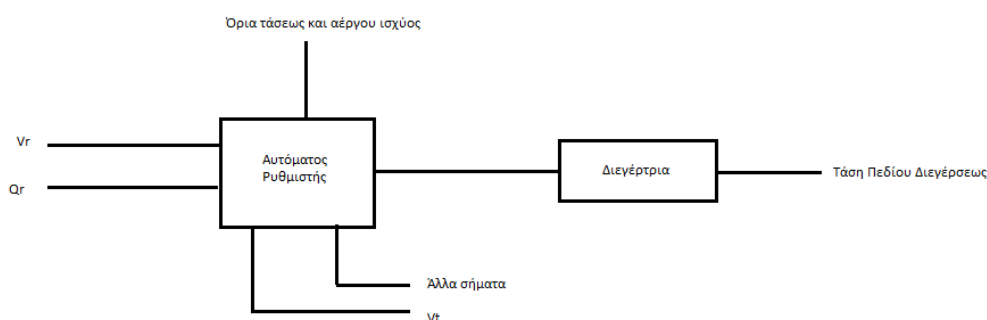
Κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και για μικρές διαταραχές η αλληλεπίδραση των συστημάτων ελέγχου στροφών και τάσεως είναι σχετικά μικρή. Γενικά, το σύστημα ελέγχου της τάσεως είναι ταχύτερο από το σύστημα ελέγχου των στροφών του στρόβιλου και επειδή τα μεταβατικά φαινόμενα της τάσης έχουν σχεδόν τελειώσει πριν αντιδράσει το σύστημα ρυθμίσεως των στροφών, η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο συστημάτων ελέγχου μπορεί καταρχήν να αμεληθεί.

1.2.2.1 Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης

Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης μιας γεννήτριας αναλαμβάνει να διατηρεί κατά το δυνατόν σταθερή την τάση στους τερματικούς ζυγούς της μεταβάλλοντας κατάλληλα τη συνεχή τάση που επιβάλλεται στο πεδίο διεγέρσεως. Η τελευταία τάση παρέχεται στο τύλιγμα του πεδίου από το σύστημα διεγέρσεως της σύγχρονης μηχανής. Στις σύγχρονες μηχανές το τύλιγμα διεγέρσεως τοποθετείται στο δρομέα και τροφοδοτείται με συνεχή τάση. Μέγεθος αντίστοιχο προς τη συνεχή τάση, με την οποία τροφοδοτείται το τύλιγμα πεδίου

είναι κατά μέτρο η τάση (HEΔ) διεγέρσεως της σύγχρονης γεννήτριας, δηλαδή η τάση στους ακροδέκτες της εν κενώ. Η τάση διεγέρσεως καθορίζει την άεργο ισχύ που παράγει (ή καταναλώνει) η γεννήτρια και ρυθμίζεται συνήθως ώστε να διατηρείται σταθερή η τερματική τάση σε μια επιθυμητή τιμή. Το σύστημα διεγέρσεως μιας γεννήτριας που φαίνεται στο σχήμα 1.3, χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα αποκρίσεως, το κέρδος μονίμου καταστάσεως και το μεταβατικό κέρδος. Η ταχύτητα αποκρίσεως είναι σημαντική, γιατί μετά από μια μεγάλη διαταραχή (π.χ ένα βραχυκύκλωμα κοντά στο ζυγό της γεννήτριας), είναι πολλές φορές σωτήριο για το σύστημα να αυξηθεί αμέσως η διέγερση της γεννήτριας. Το κέρδος μονίμου καταστάσεως καθορίζει την ακρίβεια ρυθμίσεως της τάσεως, ενώ το μεταβατικό κέρδος επιδρά στην ευστάθεια του συστήματος.

Γενικότερα, η τάση είναι μέγεθος πιο ευαίσθητο στις μεταβολές του φορτίου από τη συχνότητα, αλλά και η απόκλισή της από την κανονική τιμή είναι λιγότερο κρίσιμη για τη λειτουργία του συστήματος από την απόκλιση της συχνότητας. Για αυτό και οι ανοχές στη ρύθμιση, όπως και στη διακύμανση της τάσεως είναι πολύ μεγαλύτερες.



Σχήμα 1.3 Γενική διάταξη διεγέρσεως και ρυθμίσεως τάσεως

Η τάση της γεννήτριας εξαρτάται από:

- Τον αριθμό των σπειρών του επαγωγικού τυλίγματος
- Τη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και
- Την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Ο αριθμός των σπειρών του επαγωγικού τυλίγματος έχει καθοριστεί από τον κατασκευαστή της γεννήτριας και δε μεταβάλλεται. Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα διατηρείται σταθερή, για να έχουμε την κατάλληλα συχνότητα (50 Hz). Επομένως, μπορούμε να μεταβάλλουμε μόνο την ένταση του μαγνητικού πεδίου, για να διατηρήσουμε σταθερή τη τάση της γεννήτριας. Η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου της συνεχούς τάσης μπορεί να γίνει χειροκίνητα ή αυτόματα. Για να γίνει αυτόματα, πρέπει η γεννήτρια να είναι εξοπλισμένη με Αυτόματο Ρυθμιστή Τάσης (A.V.R), ο οποίος επεξεργάζεται τα σήματα ελέγχου με στόχο να μεταβάλλει το ρεύμα στο τύλιγμα πεδίου με συνεχή και αυτόματο τρόπο ώστε η τάση των

ακροδεκτών της γεννήτριας να παραμένει σταθερή. Επίσης, επεξεργάζεται τάχιστα τις μεταβατικές διαταραχές της γεννήτριας για να εξασφαλίζεται η λειτουργία της σε περιπτώσεις υπερφόρτισης, υπερδιέγερσης ή υποδιέγερσης [4][5]. Ο γενικότερος ρόλος του APT είναι να φροντίζει να διατηρεί σταθερές τις τάσεις των ζυγών με αποτέλεσμα να αυξάνει τη συνολική ευστάθεια του συστήματος. Ο APT αφενός διατηρεί τη γεννήτρια σε συγχρονισμό και αφετέρου ρυθμίζει κατάλληλα το ρεύμα πεδίου ώστε να διατηρείται η ευστάθεια του συστήματος για μικρές διαταραχές.

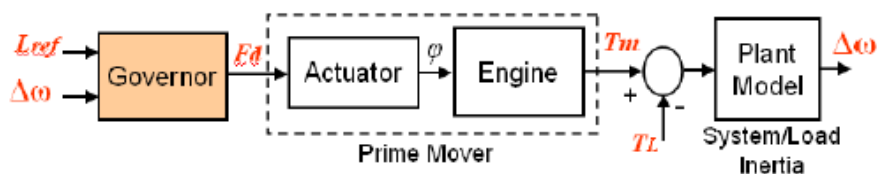
Για την υλοποίηση των παραπάνω λειτουργιών ο APT έχει τρεις διακριτές λειτουργίες:

- Μέτρηση της τερματικής τάσης και σύγκρισή της με την τάση αναφοράς
- Έλεγχος των ορίων φόρτισης, ώστε να μην δουλεύει η γεννήτρια σε όρια ανώτερα της ικανότητας της
- Προστασία της διάταξης σε περιπτώσεις συνεχούς υποδιέγερσης ή υπερδιέγερσης

Οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι ηλεκτρονικοί και διατηρούν την τάση σταθερή, με απόκλιση ± 0.5 έως ± 2 από την τάση αναφοράς, εκτός από τις περιπτώσεις που έχουμε επιβολή ή αφαίρεση σημαντικών φορτίων, οπότε υπάρχει μεγαλύτερη στιγμιαία απόκλιση.

1.2.2.2 Ρυθμιστής στροφών

Ο κύριος στόχος του Ρυθμιστή Ταχύτητας (κυβερνήτη) είναι να ανταποκριθεί στις μεταβολές του φορτίου και τελικά να ρυθμίσει τη συχνότητα ισχύος της γεννήτριας. Οποιαδήποτε απόκλιση στη συχνότητα του συστήματος και στην ταχύτητα της γεννήτριας καθορίζεται από τις αλληλεπιδράσεις της ηλεκτρικής ροπής (T_L), λόγω της ζήτησης φορτίου, και της μηχανικής ροπής της γεννήτριας (T_m). Το άθροισμα της αδράνειας της γεννήτριας και της αδράνειας του φορτίου καθορίζει επίσης τον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας. Είσοδοι για τον Ρυθμιστή Ταχύτητας είναι μια τιμή αναφοράς για την Ισχύ (P_{ref}) ή για το Φορτίο (L_{ref}) καθώς και η απόκλιση στις στροφές του κινητήρα ($\Delta\omega$).

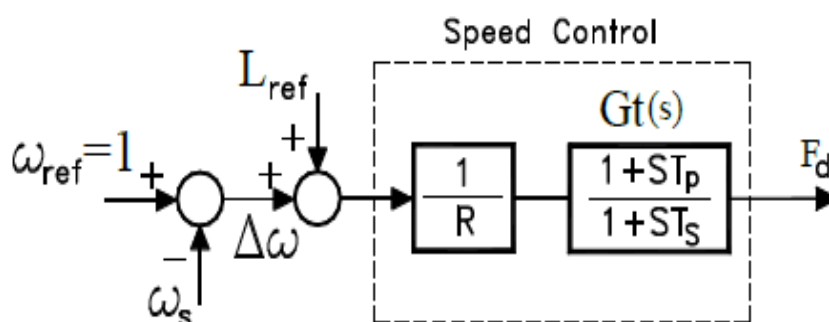


Σχήμα 1.4 Απλοποιημένη απεικόνιση του ρυθμιστή στροφών σε αλληλεπίδραση με το σύστημα [3]

Διακρίνουμε δύο στρατηγικές ελέγχου των Ρυθμιστών Ταχύτητας:

- Πτώση ταχύτητας (droop)
- Ισόχρονη (isochronous)

Η πρώτη κατηγορία ελέγχου της συχνότητας ονομάζεται **έλεγχος ταχύτητας-droop**, και αντιπροσωπεύει μια μέθοδο ελέγχου μεταβλητής συχνότητας. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η αρχή λειτουργίας ενός ρυθμιστή ταχύτητας με τη μέθοδο droop. Στο σύστημα αυτό περιέχονται σαν είσοδοι οι τιμές L_{ref} και ω_{ref} , ω_s και προκύπτει η απόκλιση ταχύτητας $\Delta\omega$. Η σταθερά συχνότητας droop, όπως ονομάζεται, εκφράζεται μέσω της σταθεράς R του διαγράμματος. Ο όρος $Gt(s)$, αντιπροσωπεύει έναν αντισταθμιστή ταχύτητας με υστέρηση, όπου πρώτα σταθεροποιεί την ταχύτητα της γεννήτριας με βάση την καμπύλη droop και εν συνεχεία την επαναφέρει στην ονομαστική τιμή.



Σχήμα 1.5 Κυβερνήτης με έλεγχο droop [3]

Η δεύτερη κατηγορία ελέγχου ονομάζεται **Έλεγχος Ισόχρονης Ταχύτητας** και σπανιότερα **Έλεγχος Σταθερής Συχνότητας**. Στην ισόχρονη λειτουργία, οι Ρυθμιστές Ταχύτητας διατηρούν τη ταχύτητα σταθερή για κάθε φορτίο (από μηδέν έως το πλήρες φορτίο), δηλαδή η μεταβολή της ταχύτητας είναι μηδέν.

Σε εγκαταστάσεις όπου υπάρχουν ηλεκτρονικοί υπολογιστές, συστήματα τηλεπικοινωνίας ή συστήματα τηλεοπτικής εκπομπής, απαιτείται ισόχρονη λειτουργία του κυβερνήτη, δηλαδή συχνότητα 50 Hz με διακύμανση $\pm 0,25\%$.

1.3 Ρύθμιση φορτίου-συχνότητας

Είδαμε στην προηγούμενη ενότητα τους ρυθμιστές ταχύτητας με τους οποίους είναι εξοπλισμένος ο Governor σε μια γεννήτρια ντίζελ και τις δύο μεθόδους με τις οποίες αυτός λειτουργεί. Η ρύθμιση φορτίου συχνότητας περιγράφει αυτή ακριβώς τη διαδικασία.

Η διατήρηση μίας σταθερής συχνότητας στα επιθυμητά επίπεδα είναι καθοριστικής σημασίας για την ομαλή και ευσταθή λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Οποιαδήποτε διαταραχή ισχύος είτε στην παραγωγή είτε στην κατανάλωση έχει άμεση επίδραση στη συχνότητα του δικτύου. Η ρύθμιση συχνότητας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται στη συνεχή προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος από τις γεννήτριες

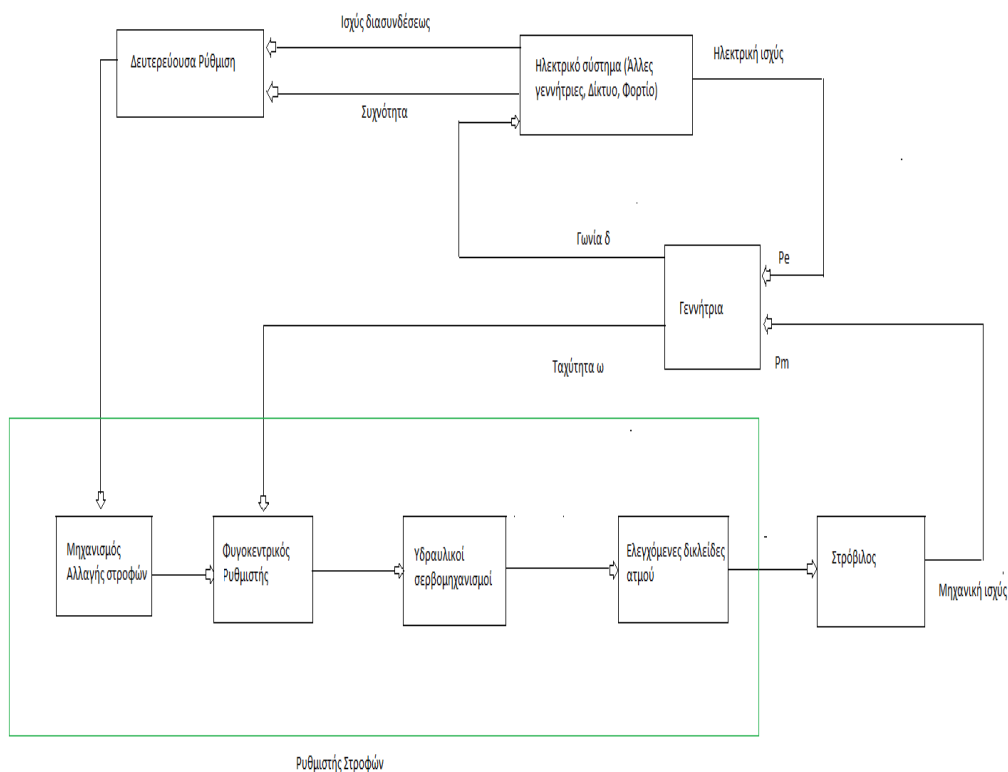
προς το φορτίο του συστήματος, ώστε η συχνότητα να διατηρεί την κανονική της τιμή. Η συχνότητα βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση με την ενεργό ισχύ που διακινείται στο σύστημα και για αυτό το λόγο η ρύθμισή της καθιστά την εξίσωση της παραγόμενης ισχύος με τη ζητούμενη θεμελιώδες ζήτημα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, η ευστάθεια και η ομαλή λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων απαιτούν διατάξεις οι οποίες να ρυθμίζουν τη συχνότητα, ώστε να διατηρείται σε επιθυμητές τιμές. Βασικός λόγος, για τον οποίο επιβάλλεται η λειτουργία των δικτύων με σταθερή συχνότητα είναι η διασφάλιση της ευστάθειας και της σταθερότητας της ταχύτητας περιστροφής των σύγχρονων και ασύγχρονων μηχανών των δικτύων. Χωρίς ρύθμιση, οι γεννήτριες δεν θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν μια αύξηση του φορτίου, καθώς το άνοιγμα των βαλβίδων των στροβίλων θα παρέμενε σταθερό και θα επέτρεπε μια ορισμένη μόνο τιμή της μηχανικής ισχύος, με αποτέλεσμα την επιβράδυνση των μηχανών. Επίσης η μείωση της συχνότητας μπορεί να επιφέρει μεγάλη αύξηση των ρευμάτων μαγνήτισης των ασύγχρονων μηχανών και των μετασχηματιστών. Ένα θέμα άξιο αναφοράς είναι ότι η χρήση της συχνότητας του δικτύου για λόγους μέτρησης χρόνου και η εκτεταμένη χρήση ηλεκτρικών ρολογιών δεν επιτρέπουν μεγάλες αποκλίσεις της συχνότητας από την ονομαστική τιμή της. Επιπρόσθετα, η λειτουργία συστημάτων με μικρότερες τιμές συχνότητας έχει να κάνει με αυξημένες μηχανικές καταπονήσεις από τις δονήσεις των πτερυγίων των θερμικών σταθμών παραγωγής και υπολειτουργία των αντλιών τροφοδότησης στους λέβητες και των ανεμιστήρων που παρέχουν αέρα απαραίτητο για την ανάφλεξη του καυσίμου. Σε περίπτωση πυρηνικού σταθμού παραγωγής, τα προβλήματα υποσυχνότητας μπορεί να αντανακλώνται σε υπερθέρμανση των αντιδραστήρων λόγω χαμηλής ροής των ψυκτικών υγρών. Τέλος, η λειτουργία με συχνότητα μικρότερης της ονομαστικής δύναται να επηρεάσει την απόδοση των βοηθητικών συστημάτων των ασύγχρονων γεννητριών και προφανώς, τέτοια προβλήματα είναι ικανά να οδηγήσουν σε αποκοπή των μονάδων παραγωγής.

Από την άλλη πλευρά, η λειτουργία με συχνότητες μεγαλύτερες της ονομαστικής, που μπορεί να οφείλεται είτε σε περίσσεια παραγόμενης ισχύος είτε σε απώλεια φορτίου προκαλεί επίσης αρκετά προβλήματα. Οι υψηλές στροφές απαιτούν αυξημένη ψύξη των μονάδων παραγωγής και επειδή οι τάσεις του συστήματος έχουν αρκετά μεγάλες τιμές υπάρχει περίπτωση να ενεργοποιηθούν οι ρυθμιστές τάσεως, με σκοπό να επαναφέρουν τις τάσεις των μονάδων στις επιθυμητές τιμές. Σε αυτή την περίπτωση, η αποκοπή μίας μονάδας παραγωγής μπορεί από την μία πλευρά να συμβάλλει θετικά στη γρηγορότερη αποκατάσταση του ισοζυγίου παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος, αλλά από την άλλη υπάρχει και η πιθανότητα κάτω από ορισμένες συνθήκες να οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια, να μειωθεί η αδράνειά του, οι μονάδες παραγωγής να απομονωθούν σε ομάδες και να αποσυγχρονιστούν μεταξύ τους [6].

Σε ένα σύστημα γεννήτριας-φορτίου, μία αύξηση του φορτίου, εφόσον δε συμβαδίζει με αντίστοιχη αύξηση της τροφοδότησης της μηχανής, τροφοδοτείται από την κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μερών της και μεταβάλλει την ταχύτητα της γεννήτριας. Η μείωση των στροφών της μηχανής αντιστοιχεί στο ρυθμό παροχής της ενέργειας, η οποία ισούται με την αύξηση του φορτίου. Συνεπώς, χωρίς ρύθμιση, το ισοζύγιο παραγωγής-καταναλώσεως θα επιτυγχανόταν σε συχνότητα και τάση μικρότερες από τις κανονικές τιμές. Μία μεταβολή στο φορτίο αντανακλάται αυτόματα ως αλλαγή στην ηλεκτρική ροπή εξόδου της γεννήτριας T_e , όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.4. Αυτή η αλλαγή προκαλεί μία διαφορά ανάμεσα στην μηχανική T_m και την ηλεκτρική ροπή T_e , η οποία καταλήγει με τη σειρά της σε μεταβολές της ταχύτητας-συχνότητας σύμφωνα με τη σχέση $T_m - T_e = 2H\Delta\omega$, σε ανά μονάδα τιμές, όπου H η χρονική σταθερά αδρανείας της γεννήτριας. Η μείωση της συχνότητας για μία συγκεκριμένη αύξηση του φορτίου καθορίζεται από την αντίστοιχη χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας της γεννήτριας [5].

1.3.1 Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας

Η εξισορρόπηση και η ομαλή αποκατάσταση του ισοζυγίου παραγόμενης ισχύος και φορτίου, καθώς και η διατήρηση της επιθυμητής συχνότητας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με τους ρυθμιστές στροφών των γεννητριών, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι και ελέγχουν τη μηχανική ισχύ, η οποία παράγεται από τις κινητήριες μηχανές. Οι ρυθμιστές στροφών θεωρούνται μηχανισμοί ελέγχου είτε της συχνότητας, είτε της ισχύος. Σε περίπτωση δηλαδή, κατά την οποία μια γεννήτρια τροφοδοτεί ένα απομονωμένο φορτίο, ο ρυθμιστής στροφών λειτουργεί ελέγχοντας τη συχνότητα. Σε περίπτωση που η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ένα μεγάλο σύστημα, η ταχύτητα περιστροφής είναι δεσμευμένη από τη συχνότητα του συστήματος και ο ρυθμιστής στροφών ελέγχει την παραγόμενη ισχύ. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα ο ρυθμιστής στροφών διαθέτει δύο τύπους ρυθμίσεων:



Σχήμα 1.6 Λειτουργικό διάγραμμα ρυθμιστή στροφών

Μία μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας γίνεται αντιληπτή από το φυγοκεντρικό ρυθμιστή (ή οποιαδήποτε άλλη συσκευή μέτρηση της ταχύτητας) που είναι συνδεδεμένος με τον άξονά της. Η μεταβολή αυτή μετατρέπεται σε σήμα για τη μετακίνηση της δικλείδας του ατμοστροβίλου (ή του αντίστοιχου κινητήρα ντίτζελ) ώστε να προσαρμοστεί ανάλογα η μηχανική ισχύς που παράγεται. Η διαδικασία αυτή αποτελεί την *πρωτεύουσα ρύθμιση*.

Συμπληρωματικά, μπορεί να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός αλλαγής στροφών του ρυθμιστή. Αφού υπολογιστεί το σφάλμα συχνότητας του συστήματος το οποίο έχει προκύψει από την πρωτεύουσα ρύθμιση, καθώς και οι τυχόν διακυμάνσεις στη διακινούμενη ισχύ των εξωτερικών διασυνδέσεων, και με μια κατάλληλη στρατηγική ελέγχου αποστέλλονται σήματα που αντιστοιχούν σε μια νέα ταχύτητα αναφοράς κάθε γεννήτριας. Η διαδικασία αυτή αποτελεί τη *δευτερεύουσα ρύθμιση*.

1.3.2 Στατισμός

Μια ορισμένη θέση του μηχανισμού αλλαγής στροφών (δηλαδή μια δεδομένη ταχύτητα αναφοράς) αντιστοιχεί σε μια ευθύγραμμη χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας, η

αρνητική κλίση της οποίας ονομάζεται *στατισμός* της μονάδας. Ο στατισμός ορίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$R = - \frac{\Delta \omega}{\Delta P} \text{ (α.μ)}$$

Όπου:

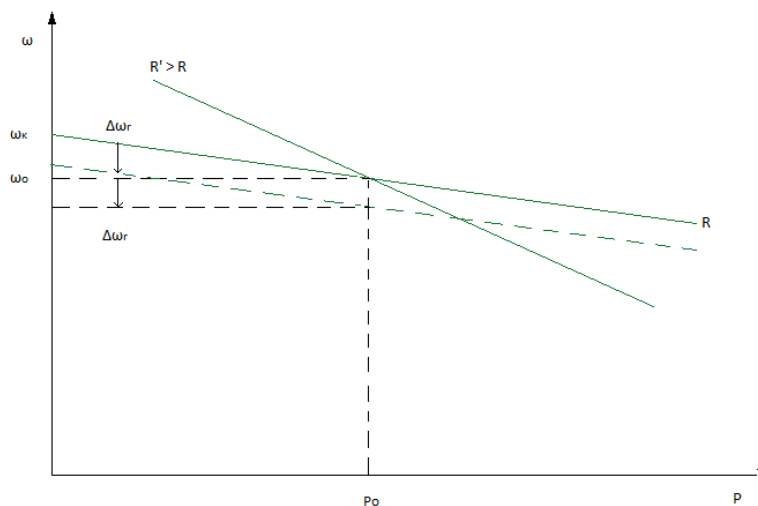
$\Delta \omega$, είναι η ανά μονάδα μεταβολή της συχνότητας (που ταυτίζεται με την ανά μονάδα μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέας της γεννήτριας) που παραμένει μετά τη λειτουργία της πρωτεύουσας ρύθμισης.

ΔP , η ανά μονάδα μεταβολή του φορτίου, η οποία προκάλεσε τη μεταβολή $\Delta \omega$.

Ο στατισμός μετριέται συνήθως σε ποσοστό επί τοις εκατό. Έτσι, στατισμός 5% αντιστοιχεί σε μόνιμη μεταβολή 5%, 2,5 Hz σε σύστημα ονομαστικής συχνότητας 50 Hz μετά από μεταβολή φορτίου ίση με την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας.

Αν μια μονάδα έχει μικρό στατισμό, τότε για σχετικά μικρή μεταβολή συχνότητας, μεταβάλλει σημαντικά το φορτίο της. Μια τέτοια μονάδα λέγεται ρυθμίζουσα, γιατί συμβάλλει καθοριστικά με τη μεταβολή της παραγωγής της στη ρύθμιση της συχνότητας. Αν, αντίθετα μια μονάδα έχει μεγάλο στατισμό, τότε μεταβάλλει ελάχιστα το φορτίο της όταν αλλάζει η συχνότητα και λέγεται μονάδα βάσεως.

Ο στατισμός είναι αυτός που καθορίζει το ρόλο που παίζει κάθε μονάδα σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα καθώς και τον τρόπο, με τον οποίο οι μονάδες που λειτουργούν παράλληλα μοιράζονται το κοινό τους φορτίο.



Σχήμα 1.7 Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα φορτίου-συχνότητας, η κλίση της χαρακτηριστικής είναι αρνητική, όταν ο στατισμός είναι ο θετικός. Αυτό συμβαίνει διότι παρά τη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών, κάθε μεταβολή φορτίου ΔP είναι θετική (αύξηση φορτίου), η συχνότητα θα μειωθεί, η μεταβολή $\Delta\omega$ θα είναι δηλαδή αρνητική (μείωση συχνότητας). Η χαρακτηριστική φορτίου συχνότητας αναφέρεται στη μόνιμη κατάσταση, μετά την πρωτεύουσα και πριν τη δευτερεύουσα ρύθμιση.

Υπάρχουν δύο τρόποι μεταβολής της χαρακτηριστικής φορτίου-συχνότητας μιας μονάδας:

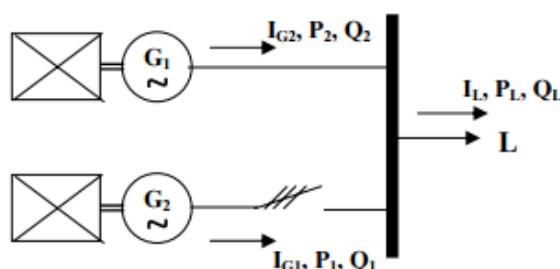
- Με μεταβολή του στατισμού R , η χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας στρέφεται γύρω από το σημείο λειτουργίας (ω_0 , P_0).
- Με μεταβολή της ταχύτητας (συχνότητας) αναφοράς μέσω του μηχανισμού αλλαγής στροφών, όπου η χαρακτηριστική μετακινείται παράλληλα διατηρώντας την κλίση της.

1.4 Παράλληλη λειτουργία γεννητριών

Θεωρούμε δύο γεννήτριες που λειτουργούν παράλληλα και εξυπηρετούν ένα κοινό φορτίο, όπως φαίνεται στην απλοποιημένη διάταξη που ακολουθεί. Προς επίτευξη του συγχρονισμού των δύο γεννητριών απαιτούνται οι εξής συνθήκες:

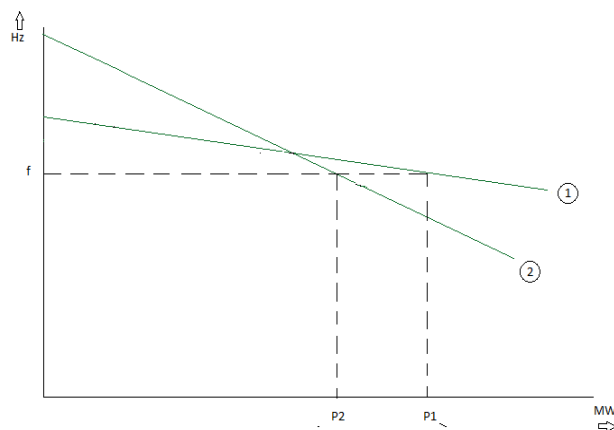
1. Οι φασικές ΗΕΔ των γεννητριών να είναι ίσες
2. Οι συχνότητες τους να είναι ίσες
3. Να υπάρχει διαδοχή φάσεων
4. Η φασική απόκλιση να είναι μηδενική

Η υπ' αριθμόν 1 συνθήκη ελέγχεται με βολτόμετρο στους ακροδέκτες της γεννήτριας και του δικτύου. Οι υπόλοιπες τρεις συνθήκες ελέγχονται συγχρόνως με πλοηγούς λυχνίες που συνδέονται στους ακροδέκτες του διακόπτη παραλληλισμού και σε κάθε φάση. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί συνδεσμολογία σβέσεως [7].



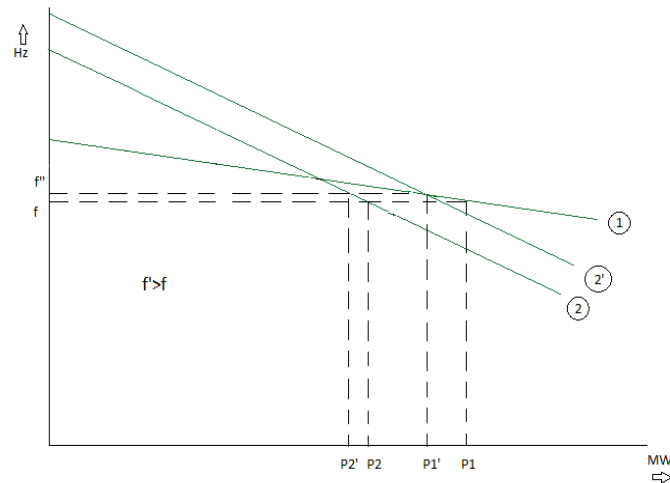
Σχήμα 1.8 Παράλληλη λειτουργία γεννητριών

Θα εξετάσουμε την παράλληλη λειτουργία των γεννητριών από την άποψη της επίδρασης στη συχνότητα και την ενεργό ισχύ. Όπως αναλύσαμε στην προηγούμενη ενότητα κάθε μονάδα παραγωγής έχει μία χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας που υπό κάποιες συνθήκες μπορεί να είναι ρυθμιζόμενη. Η κατανομή της πραγματικής ισχύος του φορτίου μεταξύ δύο γεννητριών, εξαρτάται από τις χαρακτηριστικές τους και στην περίπτωση όπου $P_L = P_1 + P_2$, προκύπτει ο διαμοιρασμός που φαίνεται στο σχήμα 1.9. Η συχνότητα έχει δεδομένη τιμή f και είναι στη μόνιμη κατάσταση η ίδια και για τις δύο γεννήτριες.



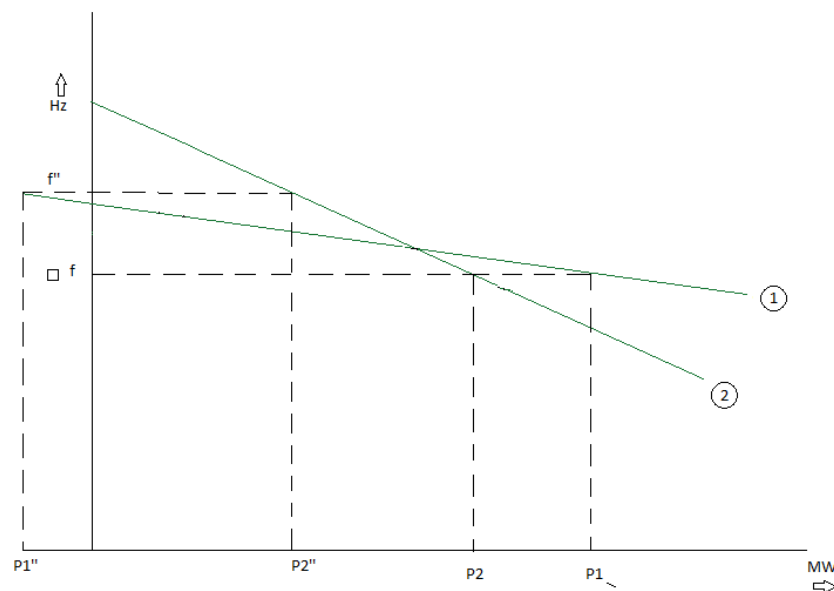
Σχήμα 1.9 Κατανομή της πραγματικής ισχύος του φορτίου μεταξύ δύο μηχανών

Αν τώρα θέλουμε να ρυθμίσουμε τη χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας ώστε η μονάδα 2 να πάρει περισσότερο φορτίο, θα πρέπει να μετατοπίσουμε τη χαρακτηριστική της σε μία νέα θέση παράλληλη προς την παλιά. Η ρύθμιση αυτή της χαρακτηριστικής φορτίου-συχνότητας μιας γεννήτριας επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της ταχύτητας αναφοράς της, μέσω του μηχανισμού αλλαγής στροφών. Το άθροισμα $P_1 + P_2$ παραμένει σταθερό και ίσο με P_L , ενώ η ισορροπία στη νέα θέση συνεπάγεται αύξηση της συχνότητας σε f' , που είναι εμφανής στο σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.10 Κατανομή της πραγματικής ισχύος του φορτίου μεταξύ δύο μηχανών, όταν υπάρχει μετατόπιση της χαρακτηριστικής της μονάδας 2

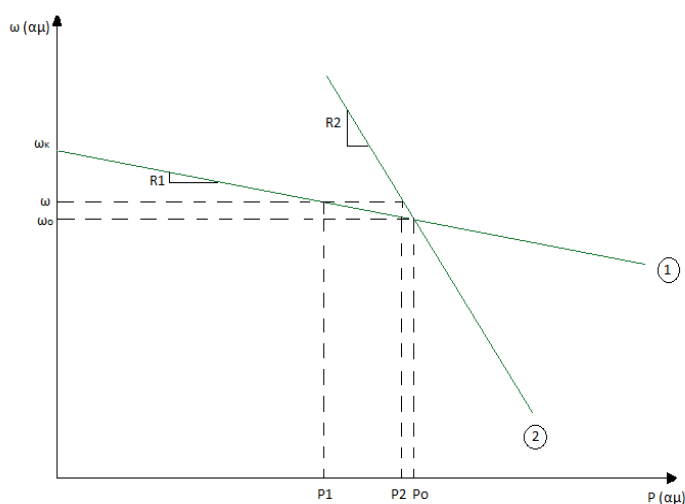
Έστω ότι ξαφνικά ανοίγει ο διακόπτης ΔL πλησίον του φορτίου. Η νέα διανομή των φορτίων θα είναι $P1'' + P2'' = PL'' = 0$ άρα είναι $P1'' = -P2''$, που σημαίνει ότι η γεννήτρια 2 παρέχει ισχύ στη γεννήτρια 1, ενώ η συχνότητα της παράλληλης λειτουργίας των δύο γεννητριών αυξάνει σε f'' . Παρατηρούμε επίσης ότι αν αφαιρεθεί το φορτίο, η μονάδα με το μικρότερο στατισμό θα απορρίψει το φορτίο της ταχύτερα. Η λειτουργία αυτή μπορεί να υποστηριχθεί όταν η μηχανή 1 μπορεί να απορροφήσει φορτίο $P2''$, να λειτουργήσει δηλαδή ως κινητήρας.



Σχήμα 1.11 Κατανομή της πραγματικής ισχύος του φορτίου μεταξύ δύο μηχανών, όταν αφαιρεθεί το φορτίο

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται ένα άλλο παράδειγμα παράλληλης λειτουργίας όπου δύο μονάδες της ίδιας ονομαστικής ισχύος με διαφορετικούς στατισμούς R_1 και R_2 μοιράζονται ένα κοινό φορτίο P_L . Στη μόνιμη κατάσταση το φορτίο αυτό θα είναι ίσο με το άθροισμα της παραγωγής των δύο μονάδων που θεωρείται ότι παράγουν την ονομαστική ισχύ P_o η κάθε μια, όταν η συχνότητα είναι ω_o .

Εάν μεταβληθεί το φορτίο, η μονάδα με το μεγαλύτερο στατισμό διατηρείται πάντα πλησιέστερα προς το ονομαστικό της φορτίο, ενώ η μονάδα με το μικρότερο στατισμό έχει τη μεγαλύτερη απόκλιση από την αρχική της φόρτιση P_o .



Σχήμα 1.12 Παράλληλη λειτουργία δύο γεννητριών με την ίδια ονομαστική ισχύ

Η συχνότητα ω στη μόνιμη κατάσταση είναι κοινή και για τις δύο μονάδες και δίνεται σύμφωνα με τον ορισμό του στατισμού από τις παρακάτω σχέσεις.

$$\omega - \omega_o = -R_1(P_1 - P_o) = -R_2(P_2 - P_o) \quad (1.1)$$

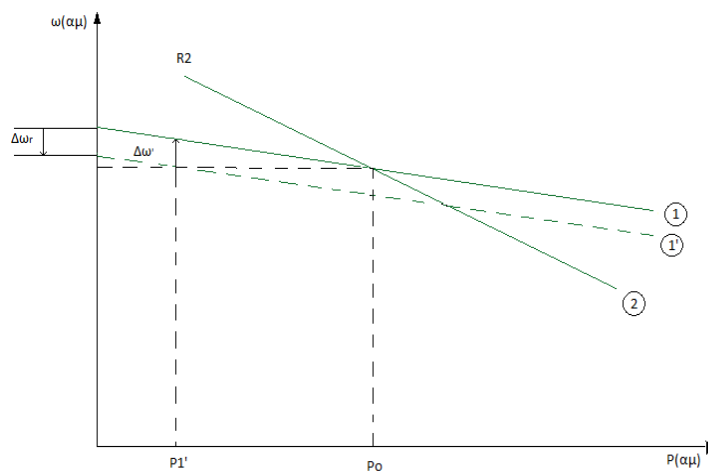
Όπου τόσο η συχνότητα ω , όσο και οι ισχείς P_1, P_2, P_o είναι ανά μονάδα κανονικοποιημένα μεγέθη. Επίσης οι παραγωγές P_1 και P_2 πρέπει να καλύπτουν στη μόνιμη κατάσταση το φορτίο:

$$P_L = P_1 + P_2 \quad (1.2)$$

Αν είναι γνωστοί οι στατισμοί των δυο γεννητριών καθώς και η ισχύς του φορτίου P_L , λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων 1.1 και 1.2, υπολογίζονται οι άγνωστοι P_1, P_2 . Έτσι οι παραγωγές των μηχανών στη μόνιμη κατάσταση καθορίζονται μονοσήμαντα από τους

στατισμούς και το συνολικό φορτίο. Επιπλέον η σχέση 1.1 μας δίνει και τη συχνότητα λειτουργίας ω που αντιστοιχεί στο φορτίο P_L .

Τέλος, αν επιθυμούμε να επανέλθει το σύστημα των δύο σύγχρονων μηχανών στη συχνότητα ω_0 θα πρέπει η μία τουλάχιστον χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας να μετατοπιστεί παράλληλα μέσω του μηχανισμού αλλαγής στροφών, να γίνει δηλαδή στο σύστημα δευτερεύουσα ρύθμιση.



Σχήμα 1.13 Διόρθωση μονίμου σφάλματος συχνότητας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα

2.1 Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα Ηλεκτροπαραγωγής (Α.Υ.Σ.Η)

Τα Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα Ηλεκτροπαραγωγής (Α.Υ.Σ.Η) σχεδιάζονται για την παραγωγή και τη διαχείριση της ηλεκτρικής ισχύος. Είναι ανεξάρτητα από τα μεγάλα εθνικά δίκτυα και ενσωματώνουν πολλούς και διαφορετικούς τύπους ισχύος που συνίστανται από ΑΠΕ αλλά και από μη ΑΠΕ. Τέτοιου είδους δίκτυα βρίσκουν άμεση εφαρμογή σε περιπτώσεις ηλεκτροδότησης απομακρυσμένων περιοχών, μη διασυνδεδεμένων στο δίκτυο ηλεκτρισμού και ιδιαίτερα στα νησιά. Παραδοσιακά, οι απομακρυσμένες περιοχές ανά τον κόσμο προμηθεύονται, σχεδόν αποκλειστικά, ηλεκτρική ενέργεια από συμβατικές μονάδες παραγωγής, με τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Η χρησιμοποίηση τέτοιων Ηλεκτροπαραγωγών Ζευγών εγείρει ολοένα και πιο έντονες περιβαλλοντικές ανησυχίες, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ. Βεβαίως, τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ δεν περιορίζονται μόνο στα οφέλη για το περιβάλλον, δεδομένου ότι συνεισφέρουν στη κατακόρυφη μείωση τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της εξοικονόμησης του εκάστοτε ορυκτού καυσίμου που χρησιμοποιείται.



Σχήμα 2.1 Διάφορες μορφές ΑΠΕ

Η διείσδυση των ΑΠΕ, σε χαμηλά επίπεδα, σε ένα σύστημα με συμβατικές μονάδες παραγωγής είναι μια απλή διαδικασία. Οι μονάδες των ΑΠΕ μπορούν να λειτουργήσουν παθητικά, εκχέοντας όση ενέργεια μπορούν κάθε στιγμή, χωρίς καμία συμμετοχή στη στρατηγική ελέγχου του συστήματος. Ταυτόχρονα, οι μονάδες αυτές μπορούν να θεωρηθούν ως «αρνητικά φορτία» μειώνοντας την απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας από τα Ηλεκτροπαραγωγά Ζεύγη. Όταν όμως έχουμε υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ, η διαδικασία ένταξής τους στο υπάρχον σύστημα είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, καθότι οι εγγενείς διακυμάνσεις που παρουσιάζονται στην παραγόμενη ενέργεια, που ενδεχομένως να συνοδεύεται και από διακοπόμενη τροφοδότηση ηλεκτρικής ενέργειας, λειτουργούν αρνητικά στην ευστάθεια του συστήματος. Την ίδια στιγμή τα Ηλεκτροπαραγωγά Ζεύγη λειτουργούν αδιαλείπτως σε επίπεδα που κρατούν το κόστος λειτουργίας και συντήρησης χαμηλά μη επιτρέποντας στις ΑΠΕ να τροφοδοτήσουν το σύστημα με όση ενέργεια είναι διαθέσιμη ανά πάσα στιγμή. Πιο συγκεκριμένα τα αυτόνομα συστήματα τροφοδοτούνται κατά κανόνα από πετρελαϊκές μονάδες με καύσιμο το μαζούτ ή ντίζελ, οι οποίες δεν είναι αποδεκτό να υποφορτίζονται κάτω από ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ονομαστικής τους ισχύος [8]. Έτσι, σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τίθεται ο ακόλουθος περιορισμός για κάθε συμβατική μονάδα παραγωγής:

$$P_{Dmin} \leq P_D \leq P_{Dn}$$

$$P_{Dmin} = c_T P_{Dn}$$

Όπου, P_D , η παραγόμενη ισχύς από τη γεννήτρια

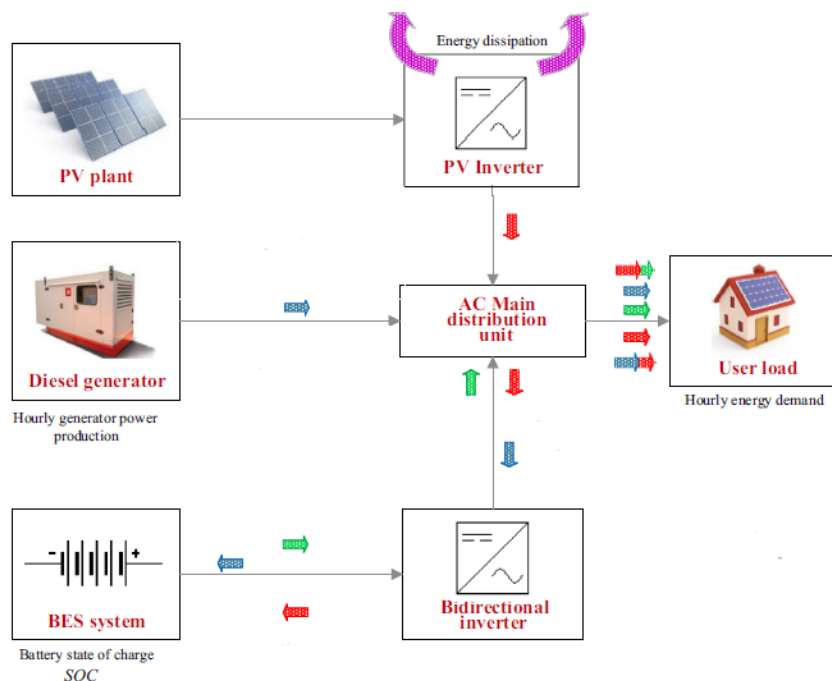
P_{Dn} , η ονομαστικής της ισχύς

P_{Dmin} , Το τεχνικό ελάχιστο

c_T , Συντελεστής τεχνικού ελαχίστου, ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος της μονάδας

2.2 Σύστημα σύγχρονης γεννήτριας-φωτοβολταϊκού-συσσωρευτών

Η υψηλή διεύθυνση των φωτοβολταϊκών στα υβριδικά συστήματα, δημιουργεί δυσκολίες στην ευστάθεια του συστήματος στη μεταβατική αλλά και στη μόνιμη κατάσταση. Συχνά η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια παρουσιάζει διακυμάνσεις, που μπορεί να οφείλονται σε στιγμιαία συννεφιά, στην τοπολογία του συστήματος και στο βαθμό διεύθυνσης. Σε περιπτώσεις όπου οι διακυμάνσεις αυτές είναι υψηλές, υπάρχει κίνδυνος σοβαρών βλαβών στις συνδεδεμένες συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος του δικτύου. Ένας τρόπος αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων είναι η χρήση Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας (ΣΑΕ) και πιο συγκεκριμένα Μπαταρίες Αποθήκευσης Ενέργειας [9]. Το σύστημα των μπαταριών φορτίζεται σε περιπτώσεις που υπάρχει περίσσεια ενέργειας, δηλαδή σε περιπτώσεις που η ζήτηση ενέργειας μέσω των φορτίων είναι μικρότερη από την παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού και της σύγχρονης γεννήτριας. Αντίστοιχα, το σύστημα των μπαταριών καλείται να τροφοδοτήσει με ενέργεια το δίκτυο, σε περιπτώσεις απότομης αύξησης του φορτίου ή σε περιπτώσεις που η εγχεόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό παρουσιάζει διακυμάνσεις. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το υψηλό κόστος αγοράς των μπαταριών καθιστά, τη χρήση προηγμένων στρατηγικών ελέγχου για τη λειτουργία τους, απαραίτητη. Εν γένει υπάρχουν δύο κύριες στρατηγικές ελέγχου ενός τέτοιου συστήματος οι οποίες παρουσιάζονται και αναλύονται στη συνέχεια [10]. Οι στρατηγικές αυτές έχουν ως στόχο την ελαχιστοποίηση του καθημερινού κόστους λειτουργίας του υβριδικού συστήματος.



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα υβριδικού συστήματος σύγχρονης γεννήτριας-φωτοβολταϊκού-συσσωρευτών [9]

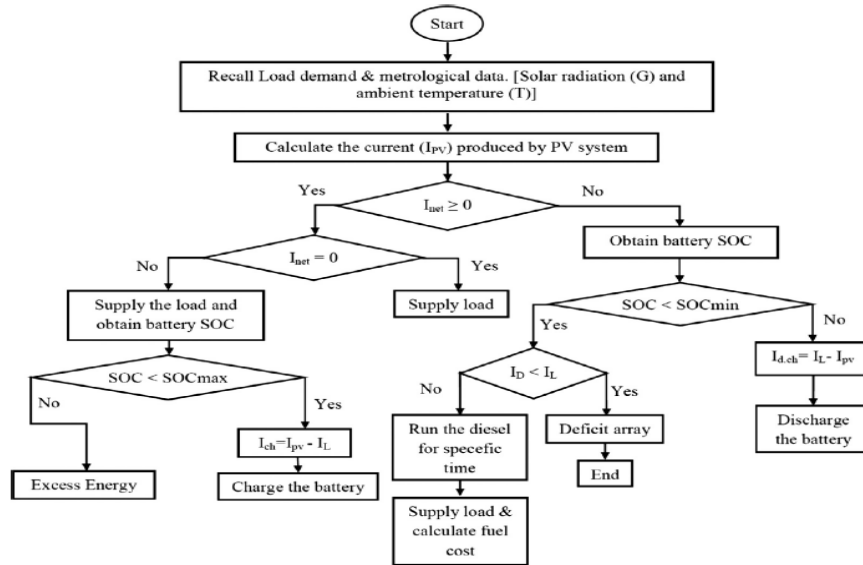
Πριν αναλυθούν οι διάφορες τεχνικές ελέγχου να τονίσουμε ότι οι χρησιμοποιούμενες μπαταρίες σε τέτοιου είδους συστήματα έχουν κάποια όρια φόρτισης τα οποία πρέπει να τηρούνται. Το κατώτατο όριο φόρτισης (SOC_{min}) είναι συνήθως στο 20-25% της ονομαστικής τιμής φόρτισης ενώ το ανώτατο όριο φόρτισης (SOC_{max}) είναι συνήθως στο 90-95%. Η τήρηση των ορίων φόρτισης συνδέεται άμεσα με τον κύκλο ζωής της μπαταρίας. Σε φωτοβολταϊκά συστήματα συχνά χρησιμοποιούνται μπαταρίες τεχνολογίας μολύβδου-αντιμονίου που περιέχουν σαν ηλεκτρολύτη διάλυμα θειικού οξέος. Ο λόγος που θεωρούνται κατάλληλες για τέτοιου είδους εφαρμογές είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής τους και η ικανότητα τους να εκφορτίζονται βαθιά. Οι μπαταρίες περιέχουν θετικές πλάκες που αποτελούνται από συμπαγείς χοντρές σωλήνες μολύβδου (tubular plates) πάνω σε πλαστικό υλικό καθώς και αρνητικές πλάκες από σχάρες μολύβδου. Οι προδιαγραφές τους αναφέρουν διάρκεια ζωής 15 έτη, όταν χρησιμοποιούνται σαν εφεδρικοί (stand-by use), δηλαδή χωρίς να εκφορτίζονται/φορτίζονται διαρκώς [11].



Εικόνα 2.1 Μπαταρίες τεχνολογίας μολύβδου-οξέως

2.2.1 Τεχνική ελέγχου Load Following

Το διάγραμμα ροής του υβριδικού μοντέλου Φωτοβολταϊκό-Γεννήτρια-Μπαταρία που ελέγχεται με τη μέθοδο Load Following παρουσιάζεται παρακάτω. Αρχικά, γίνεται χρήση μετεωρολογικών δεδομένων που αφορούν στην ακτινοβολία του ηλίου και στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, το μοντέλο προς χρησιμοποίηση πρέπει να διαστασιολογηθεί, να ορισθεί με ακρίβεια η ισχύς και ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού, η χωρητικότητα και τα όρια φόρτισης των μπαταριών καθώς και η ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας.



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα ροής τεχνικής Load Following [10]

Η διαδικασία της προσομοίωσης ξεκινάει, αφού γίνει ο υπολογισμός του παραγόμενου ρεύματος από το φωτοβολταϊκό (I_{pv}) το οποίο εν συνέχεια συγκρίνεται με το απαιτούμενο ρεύμα φορτίου (I_L). Ως αρχικό όριο φόρτισης της μπαταρίας θεωρούμε, το ανώτατο όριο φόρτισης, SOC_{max} . Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου, κρίνεται σκόπιμο να χωρισθεί σε τρεις περιπτώσεις.

Στην πρώτη περίπτωση το παραγόμενο ρεύμα από το φωτοβολταϊκό I_{pv} είναι ίσο με το ρεύμα φορτίου I_L , άρα το ρεύμα δικτύου, $I_{net} = I_{pv} - I_L = 0$. Σε αυτήν την περίπτωση, η απαίτηση ρεύματος από το φορτίο καλύπτεται πλήρως από το φωτοβολταϊκό, άρα δεν υπάρχει ρεύμα εγχόμενο ούτε από τη γεννήτρια ούτε από τις μπαταρίες. Επομένως δεν υπάρχει ούτε περίσσεια ούτε έλλειψη ενέργειας.

Στην δεύτερη περίπτωση, το παραγόμενο ρεύμα από το φωτοβολταϊκό είναι μεγαλύτερο από το απαιτούμενο ρεύμα του φορτίου. Άρα η ζήτηση του φορτίου ικανοποιείται πλήρως από το φωτοβολταϊκό και ταυτοχρόνως υπάρχει περίσσεια ενέργειας. Σε αυτό το σημείο ελέγχεται το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας για να διαπιστωθεί αν η περισσευούμενη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την φόρτισή της. Έτσι, αν το επίπεδο φόρτισης της στη δεδομένη επανάληψη είναι το ανώτατο, η περίσσεια ενέργεια απορρίπτεται. Αντιθέτως αν το επίπεδο φόρτισης της είναι μικρότερο του ανώτατου τότε η μπαταρία χρησιμοποιεί το I_{net} για να φορτιστεί και υπολογίζεται το καινούριο επίπεδο φόρτισης.

Η τρίτη περίπτωση, στην οποία το ρεύμα του φωτοβολταϊκού είναι μικρότερο από το ρεύμα φορτίου, περιλαμβάνει δύο σενάρια:

- Αν το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι μεγαλύτερο από το ελάχιστο επίπεδο φόρτισης τότε η μπαταρία αποφορτίζεται και μαζί με το φωτοβολταϊκό καλύπτουν τη ζήτηση. Αμέσως μετά την εκφόρτιση το νέο επίπεδο φόρτισης υπολογίζεται εκ νέου.

- Αν το επίπεδο φόρτισης είναι μικρότερο του κατώτατου ορίου, ενεργοποιείται η γεννήτρια και προκύπτουν δύο επιμέρους σενάρια:
 1. Το πρώτο σενάριο αφορά στην περίπτωση που το ζητούμενο ρεύμα είναι μικρότερο από το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να δώσει η γεννήτρια. Εδώ, η γεννήτρια θα τροφοδοτήσει αποκλειστικά το φορτίο και δεν παρατηρείται έλλειμμα ενέργειας. Επιπλέον, το ρεύμα που προέρχεται από το φωτοβολταϊκό χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των μπαταριών. Απορριπτόμενο ρεύμα θα υπάρξει μόνο στη περίπτωση που το ρεύμα από το φωτοβολταϊκό υπερκαλύψει το ρεύμα που χρειάζεται η μπαταρία για την πλήρη φόρτισή της.
 2. Το δεύτερο σενάριο αφορά στην περίπτωση που το μέγιστο παραγόμενο ρεύμα από τη γεννήτρια δεν είναι αρκετό να καλύψει το φορτίο, οπότε έχουμε έλλειμμα ενέργειας.

Συμπερασματικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι σύμφωνα με την Load Following στρατηγική ελέγχου, οι σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται μόνο για να καλύψουν την διαφορά της ζητούμενης ισχύος με τη παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά.

Όπως προαναφέρθηκε στόχος των στρατηγικών που θα περιγραφούν είναι η ελαχιστοποίηση του καθημερινού κόστους λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε μια αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης, η οποία περιλαμβάνει το κόστος του καυσίμου που χρησιμοποιείται από τη γεννήτρια, κόστη εκκίνησης και παύσης λειτουργίας, κόστη λειτουργίας και συντήρησης, κόστη φθοράς των μπαταριών, πρόστιμο μη κάλυψης της ζήτησης, κόστος περικοπής της εφεδρείας [12].

Οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν για τη θεμελίωση των εξισώσεων του προβλήματος είναι οι εξής:

i	Δείκτης για τις Γεννήτριες	$P_{ren,t}^{tot}$	Συνολική παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ
t	Δείκτης Ώρας	D_t	Συνολική ζήτηση φορτίου την ώρα t
T	Τελευταία προγραμματισμένη ώρα	$P_{sb,ch,t}$	Ισχύς φόρτισης των μπαταριών την ώρα t
N_{dg}	Αριθμός γεννητριών	$P_{dg,ch,t}$	Ισχύς της γεννήτριας για τη φόρτιση των μπαταριών την ώρα t
(F(P_{dg,t}ⁱ))	Κατανάλωση καυσίμου για να παραχθεί P[kW] ισχύς	$P_{ren,ch,t}$	Ισχύς ΑΠΕ για φόρτιση των μπαταριών την ώρα t
C_{fuel}	Τιμή του καυσίμου	$R_{dg,t}^{i,up}$	Άνω εφεδρεία από τη γεννήτρια i

			την ώρα t
u_t^i	Δείκτης εκκίνησης γεννήτριας i , $\in \{0,1\}$	$R_{dg,t}^{i,down}$	Κάτω εφεδρεία από τη γεννήτρια i την ώρα t
SUC_{dg}^i	Κόστος εκκίνησης γεννήτριας i	$R_{sb,t}^{up}$	Άνω εφεδρεία από τις μπαταρίες την ώρα t
z_t^i	Δείκτης παύσης γεννήτριας i την ώρα t , $\in \{0,1\}$	$R_{sb,t}^{down}$	Κάτω εφεδρεία από τις μπαταρίες την ώρα t
SDC_{dg}^i	Κόστος παύσης γεννήτριας i	$R_{tot,t}^{up}$	Συνολική απαιτούμενη άνω εφεδρεία την ώρα t
u_t^i	Δείκτης δεσμευμένης γεννήτριας την ώρα t , $\in \{0,1\}$	$R_{tot,t}^{down}$	Συνολική απαιτούμενη κάτω εφεδρεία την ώρα t
OMC_{dg}^i	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης της γεννήτριας	$P_{dg}^{i,min}$	Τεχνικό ελάχιστο γεννήτριας i
$P_{sb,dch,t}$	Ισχύς αποφόρτισης μπαταρίας την ώρα t	$P_{dg}^{i,max}$	Τεχνικό μέγιστο γεννήτριας i
$C_{d,shed}$	Κόστος για απορριπτόμενη ενέργεια	SOC_t	Επίπεδο φόρτισης μπαταρίας την ώρα t
$D_{shed,t}$	Απορριπτόμενη ενέργεια την ώρα t	η_{ch}	Αποδοτικότητα φόρτισης μπαταρίας
C_{curt}	Κόστος για περικοπτόμενη ενέργεια από ΑΠΕ	η_{dch}	Αποδοτικότητα αποφόρτισης μπαταρίας
$P_{curt,t}$	Περικοπτόμενη ενέργεια από ΑΠΕ την ώρα t	SOC^{min}	Κατώτατο όριο φόρτισης μπαταρίας
$C_{r,shed}$	Κόστος για απορριπτόμενη ενέργεια από άνω/κάτω εφεδρεία	SOC^{max}	Ανώτατο όριο φόρτισης μπαταρίας
$R_{shed,t}^{down}$	Απορριπτόμενη ενέργεια κάτω εφεδρείας	x	Δείκτης φόρτισης μπαταριών, $\in \{0,1\}$
$P_{dg,t}^i$	Παραγόμενη ισχύς από τη γεννήτρια i την ώρα t	Δt	Βήμα χρόνου
$P_{sb,dch}^{max}$	Μέγιστη ισχύς αποφόρτισης της μπαταρίας	$P_{sb,ch}^{max}$	Μέγιστη ισχύς φόρτισης της μπαταρίας

Πίνακα 2.1 Πίνακας μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης

Σημειώνεται ότι η άνω (εναλλακτικά αναφέρεται και ως θετική) ή κάτω (εναλλακτικά αναφέρεται και ως αρνητική) Εφεδρεία Δευτερεύουσας Ρύθμισης είναι τα περιθώρια αύξησης

ή μείωσης αντίστοιχα της παραγόμενης ενεργού ισχύος μίας μονάδας λαμβάνοντας υπόψη το τρέχον επίπεδο της παραγόμενης ενεργού ισχύος [13].

Η συνάρτηση η οποία περιλαμβάνει τις παραμέτρους αυτές είναι η εξής :

$$\begin{aligned} \text{Min } TOC = & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{Ndg} (F(P_{dg,t}^i) C_{fuel} + v_t^i SUC_{dg}^i + z_t^i SDC_{dg}^i + u_t^i OMC_{dg}^i + \\ & \sum_{t=1}^T (C_{bw} P_{sb,dch,t} + C_{d,shed} D_{shed,t} + C_{curt} P_{curt,t}) + \\ & \sum_{t=1}^T (C_{r,shed} (R_{shed,t}^{down})) \end{aligned}$$

Η συνάρτηση αυτή υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι ανάλογα με την τεχνική ελέγχου που θα ακολουθήσουμε, διαφοροποιούνται. Έτσι στην τεχνική Load Following έχουμε:

Οι γεννήτριες ενεργοποιούνται μόνο για να καλύψουν το έλλειμμα φορτίου και οι μπαταρίες φορτίζονται μόνο σε περίπτωση που έχουμε περίσσεια ισχύος από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το ισοζύγιο ενεργού ισχύος που προκύπτει είναι το εξής:

$$(D_{n,t} \geq 0) \rightarrow \sum_{i=1}^{Ndg} P_{dg,t}^i + P_{ren,t}^{tot} + P_{sb,dch,t} + D_{shed,t} - D_t = 0, \forall t \in T$$

Η ενέργεια φόρτισης, η ενέργεια αποφόρτισης, καθώς και η απορριπτόμενη ενέργεια δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} P_{sb,ch,t} &= P_{dg,ch,t} + P_{ren,ch,t}, \text{ με } P_{dg,ch,t} = 0, \forall t \in T \\ (D_{n,t} \geq 0) &\rightarrow P_{sb,dch,t} \leq D_t - P_{ren,t}^{tot}, \forall t \in T \\ (D_{n,t} \leq 0) &\rightarrow P_{curt,t} = P_{ren,t}^{tot} - D_t - P_{ren,ch,t}, \forall t \in T \end{aligned}$$

Η ζήτηση του φορτίου είναι:

$$D_{n,t} = D_t - P_{ren,t}^{tot}, \forall t \in T$$

Η άνω και η κάτω εφεδρεία που παρέχονται από τη σύγχρονη γεννήτρια και από τις μπαταρίες είναι:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{Ndg} R_{dg,t}^{i,up} + R_{sb,t}^{down} &\geq R_{tot,t}^{up} \quad \forall i \in N, \forall t \in T \\ \sum_{i=1}^{Ndg} R_{dg,t}^{i,down} + R_{sb,t}^{up} &\geq R_{tot,t}^{down} \quad \forall i \in N, \forall t \in T \end{aligned}$$

Τα όρια παραγωγής της σύγχρονης γεννήτριας είναι :

$$P_{dg,t}^i \geq v_t^i P_{dg}^{i,min} + R_{dg,t}^{i,dwn} \quad \forall i \in N, \forall t \in T$$

$$P_{dg,t}^i \leq v_t^i P_{dg}^{i,max} + R_{dg,t}^{i,up} \quad \forall i \in N, \quad \forall t \in T$$

Γραμμικοποιημένη σταθερά χρόνου ανόδου/καθόδου:

$$\begin{aligned} u_t^i - u_{t-1}^i &< u_t^i, \quad \forall \tau \in [t+1, \min \{t+UT^i, T\}], \quad \forall t \in [2, T] \\ u_{t-1}^i - u_t^i &< 1 - u_t^i, \quad \forall \tau \in [t+1, \min \{t+DT^i, T\}], \quad \forall t \in [2, T] \end{aligned}$$

Λογικές σταθερές σχετικά με την εκκίνηση και την παύση της γεννήτριας:

$$v_t^i - z_t^i = u_t^i - u_{t-1}^i, \quad \forall i \in N, \quad \forall t \in T$$

Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας υπολογίζεται ως εξής:

$$SOC_{t+1} = SOC_t + \Delta t \left(\eta_{ch} P_{sb,ch,t} - \frac{P_{sb,dch,t}}{\eta_{dch}} \right)$$

Το ανώτατο και κατώτατο όριο φόρτισης της μπαταρίας είναι:

$$SOC^{min} \leq SOC_t \leq SOC^{max}$$

Μέγιστη και ελάχιστη ενέργεια φόρτισης και αποφόρτισης της μπαταρίας:

$$\begin{aligned} 0 &\leq P_{sb,ch,t} \leq x P_{sb,ch}^{max}, \quad \forall t \in T \\ 0 &\leq P_{sb,dch,t} \leq (1-x) P_{sb,dch}^{max}, \quad \forall t \in T \end{aligned}$$

Ανώτατο και ελάχιστο όριο φόρτισης των μπαταριών λαμβάνοντας υπόψιν την άνω και κάτω εφεδρεία:

$$SOC^{min} + \frac{\Delta t R_{sb,t}^{up}}{\eta_{ch}} \leq SOC_t \leq SOC^{max} - \Delta t \eta_{ch} R_{sb,t}^{down}, \quad \forall t \in T$$

Μέγιστη και ελάχιστη ενέργεια φόρτισης και αποφόρτισης των μπαταριών λαμβάνοντας υπόψιν την άνω και κάτω εφεδρεία:

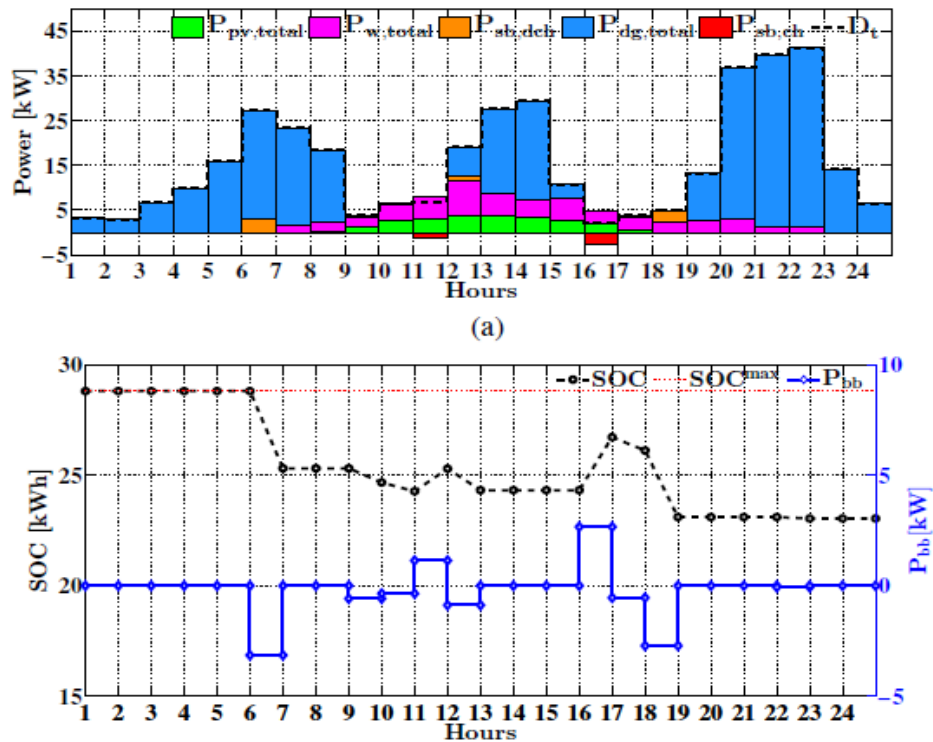
$$\begin{aligned} P_{sb,dch,t} - P_{sb,ch,t} + R_{sb,t}^{up} &\leq P_{sb,dch}^{max}, \quad \forall t \in T \\ P_{sb,ch,t} - P_{sb,dch,t} + R_{sb,t}^{down} &\leq P_{sb,ch}^{max}, \quad \forall t \in T \end{aligned}$$

Περιορισμός που εξασφαλίζει την επαναληψιμότητα του κύκλου φόρτισης και αποφόρτισης των μπαταριών:

$$SOC_{T+1} \leq SOC_1$$

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του δικτύου, το οποίο αποτελείται από 4 γεννήτριες ντίτζελ διαφορετικής

ονομαστικής ισχύος, 20 φωτοβολταϊκά πάνελ ισχύος 300 W το καθένα, 3 ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 6 kW, σύστημα μπαταριών 28.8 kWh και φορτίο με αιχμή 41.22 kW.



Σχήμα 2.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την τεχνική ελέγχου Load following [12]

Στην διάρκεια την ημέρας είναι φανερό ότι οι μπαταρίες φορτίζονται μόνο στην περίπτωση που έχουμε περίσσεια ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό συμβαίνει δύο φορές, την 11^η και την 16^η ώρα, όπου η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες ξεπερνούν τη ζήτηση του φορτίου.

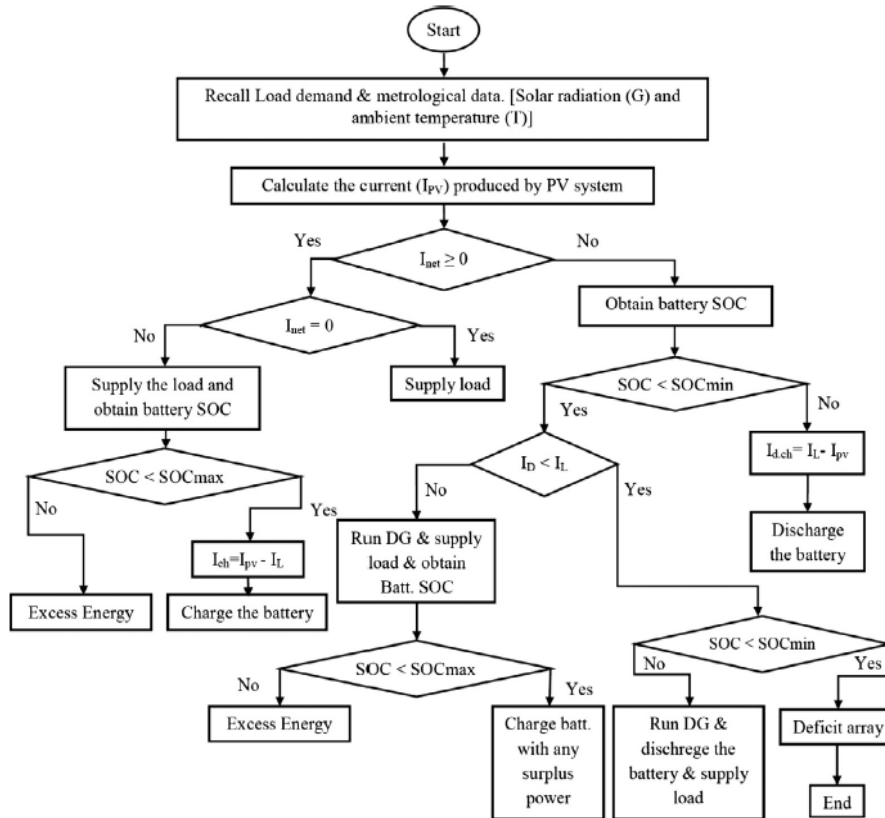
2.2.2 Τεχνική ελέγχου Cycle charge

Η τεχνική ελέγχου Cycle charge παρουσιάζει μεγάλες ομοιότητες με την τεχνική ελέγχου load following. Η διαφοροποίηση τους εντοπίζεται μόνο στην περίπτωση που η μπαταρία, λόγω του επιπέδου φόρτισής της, δεν επαρκεί για να τροφοδοτήσει το φορτίο. Έτσι, προκύπτουν οι 3 ακόλουθες περιπτώσεις:

- Η πρώτη περίπτωση αφορά στο σενάριο όπου το ρεύμα φορτίου είναι μικρότερο από το ρεύμα που δύναται να παράγει η γεννήτρια. Η γεννήτρια θα ενεργοποιηθεί και θα παράγει την ονομαστική της ισχύ για να καλύψει το φορτίο και με το περίσσευμα ενέργειας να φορτίσει την μπαταρία μέχρι το επίπεδο μέγιστης φόρτισης.
- Στην δεύτερη περίπτωση το ρεύμα φορτίου είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα που μπορεί να παράγει η γεννήτρια και η μπαταρία βρίσκεται σε επίπεδα φόρτισης

μεγαλύτερα του κατώτατου ορίου. Τότε η γεννήτρια μαζί με την μπαταρία θα συνεισφέρουν στην κάλυψη του φορτίου

- Στην τελευταία περίπτωση το ρεύμα φορτίου είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα που μπορεί να παράγει η γεννήτρια και η μπαταρία βρίσκεται σε επίπεδα φόρτισης μικρότερα του κατώτατου ορίου. Σε αυτήν την περίπτωση εφόσον η μπαταρία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, θα έχουμε έλλειμμα ενέργειας.



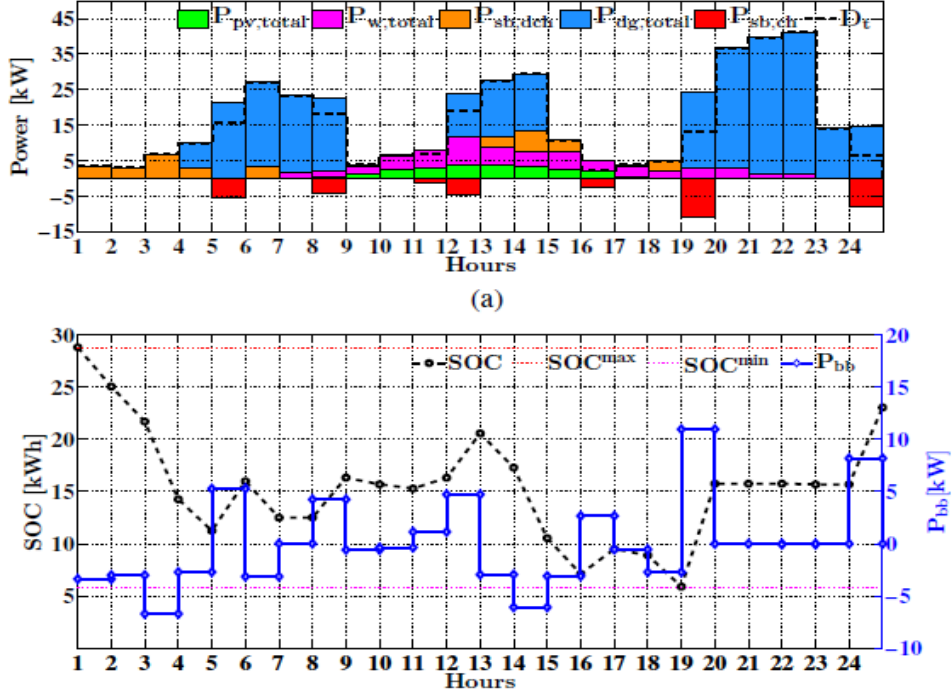
Σχήμα 2.5 Διάγραμμα ροής τεχνικής Cycle charge [10]

Στην προηγούμενη τεχνική ελέγχου (Load following) αναλύσαμε την αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης και θέσαμε τους περιορισμούς στους οποίους αυτή υπόκειται. Στην παρούσα τεχνική ελέγχου, η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί παραμένουν αναλλοίωτοι, εκτός από τον περιορισμό που καθορίζει το ισοζύγιο ενεργού ισχύος του συστήματος.

Όπως αναλύσαμε πρωτίτερα, στην τεχνική Cycle Charge, όταν οι σύγχρονες γεννήτριες κληθούν να παράγουν ενέργεια, δουλεύουν μόνο στο μέγιστο σημείο λειτουργίας τους. Αυτό σημαίνει ότι με την ενέργεια αυτή καλύπτουν τη ζήτηση φορτίου αλλά φορτίζουν και τις μπαταρίες μέχρι να φθάσουν στο μέγιστο επίπεδο φόρτισης. Έτσι έχουμε:

$$(D_{n,t} \geq 0) \rightarrow \sum_{i=1}^{Nd_g} P_{dg,t}^{i,max} + P_{ren,t}^{tot} + P_{sb,dch,t} - P_{dg,ch,t} - D_t = 0, \forall t \in T$$

Ομοίως με προηγούμενως ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με την προηγούμενη τεχνική.



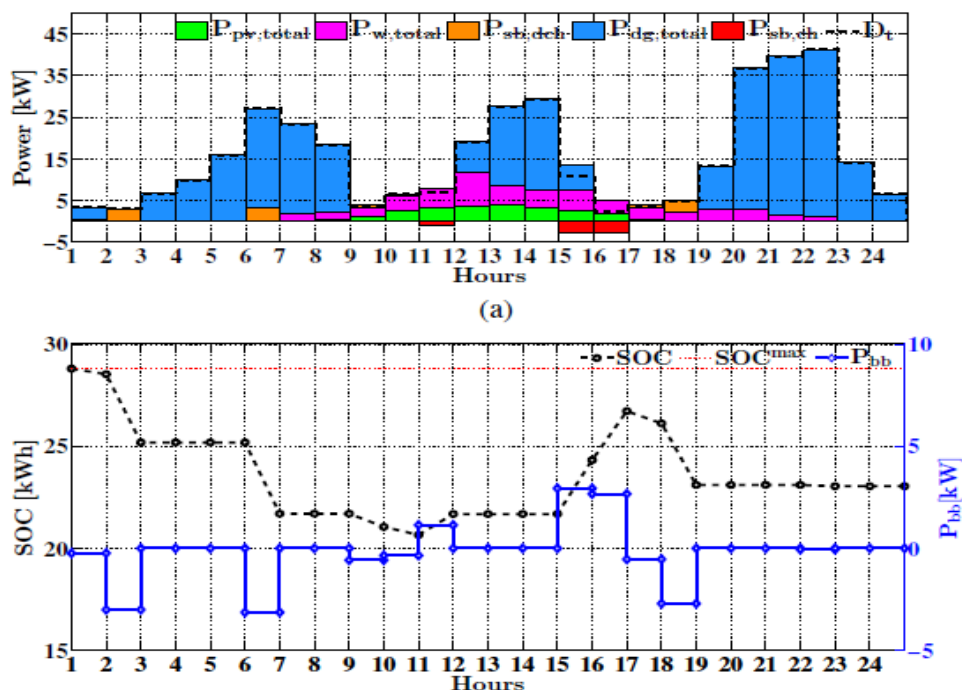
Σχήμα 2.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την τεχνική ελέγχου Cycle charge [12]

Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρούμε ότι όταν η ενέργεια των ΑΠΕ και του συστήματος των μπαταριών δεν είναι αρκετή για την κάλυψη της ζήτησης, ενεργοποιείται κάποια ή κάποιες από τις γεννήτριες, οι οποίες θα λειτουργήσουν στις ονομαστικές τους τιμές. Σε περίπτωση που υπάρχει περίσσεια ενέργειας, αυτή χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η εκφόρτιση των μπαταριών ξεκινάει από την αρχή της ημέρας σε αντίθεση με την προηγούμενη τεχνική όπου η πρώτη εκφόρτιση της μπαταρίας παρατηρήθηκε την 6^η ώρα. Επίσης παρατηρούμε, ότι σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση όπου οι μπαταρίες φορτίστηκαν μόνο δύο φορές στη διάρκεια της ημέρας, στη συγκεκριμένη περίπτωση φορτίστηκαν 7 φορές.

2.2.3 Συνδυασμός τεχνικών Load following και Cycle charge

Σε διάφορες προσομοιώσεις που έγιναν, προέκυψε ότι η τεχνική ελέγχου Cycle Charge υπερτερεί της Load Following σε ορισμένες περιπτώσεις. Τότε όμως προέκυψε το εξής ερώτημα, αν είναι πράγματι αποδοτικό οι μπαταρίες να φορτίζονται από τη γεννήτρια.

Για αυτό το σκοπό δημιουργήθηκε μια τροποποιημένη μέθοδος, που ουσιαστικά αποτελεί έναν συνδυασμό των δύο προαναφερθέντων. Στη μέθοδο αυτή, ορίζεται ένα «κρίσιμο φορτίο», για την αλλαγή από τη μια τεχνική στην άλλη, δηλαδή για την αλλαγή από Load Following σε Cycle Charge αλλά και το αντίθετο[12].

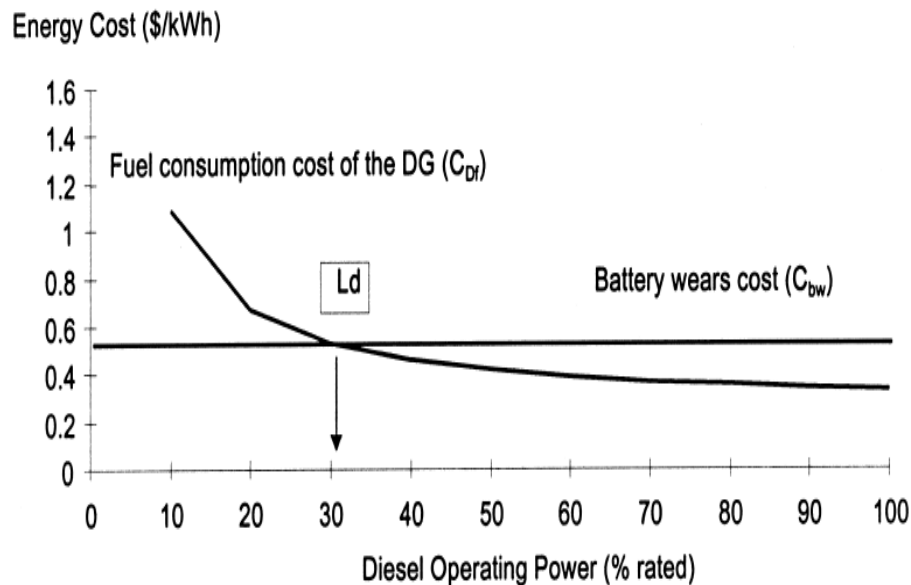


Σχήμα 2.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την τεχνική ελέγχου που συνδυάζει Load following και Cycle charge [12]

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση, η απόφαση για το αν θα χρησιμοποιηθεί γεννήτρια ή μπαταρία για την κάλυψη του φορτίου λαμβάνεται από τον κατάλληλο αλγόριθμο βελτιστοποίησης με βάση όσα περιγράφονται παρακάτω. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι οι γεννήτριες ντίζέλ τροφοδοτούν στο δίκτυο ίδια ποσότητα ενέργειας είτε ακολουθούμε την τεχνική Load following είτε το συνδυασμό Load following-Cycle charge. Η διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι τη 2^η ώρα της ημέρας, η ζητούμενη ενέργεια καλύπτεται από τις μπαταρίες και όχι από τις γεννήτριες όπως είδαμε στην τεχνική Load following. Ένας από τους περιορισμούς που αναπτύξαμε προηγουμένως, αφορούσε στο SOC του συστήματος μπαταριών και σύμφωνα με το οποίο την 1^η ώρα κάθε ημέρας το SOC πρέπει να βρίσκεται στο 80%. Για να επιτευχθεί αυτό, την 15^η ώρα η γεννήτρια παράγει επιπλέον ενέργεια που απορροφάται εν μέρει από τις μπαταρίες.

Αυτό το κρίσιμο φορτίο αποτελεί το όριο, πάνω από το οποίο είναι πιο συμφέρον οικονομικά να καλύψουμε τη ζήτηση κατευθείαν με τις σύγχρονες γεννήτριες. Κάτω από αυτό το όριο είναι πιο συμφέρον, να καλύψουμε τη ζήτηση με την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες. Όταν η ζήτηση είναι ακριβώς το κρίσιμο φορτίο, είναι το ίδιο

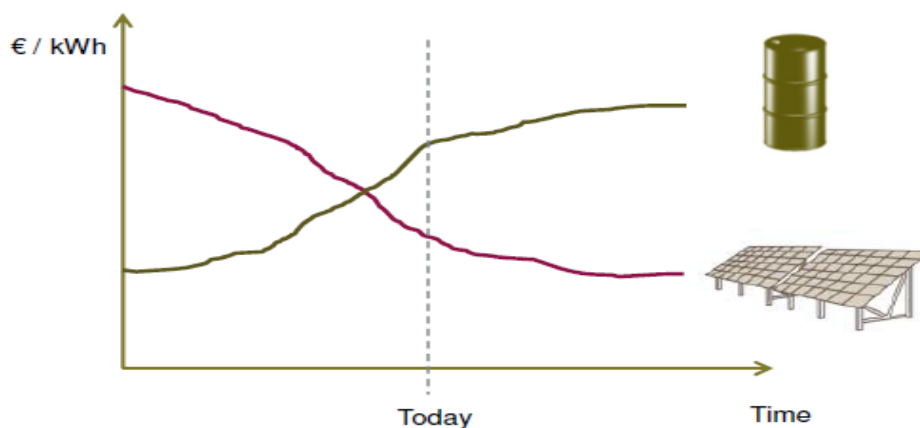
συμφέρον να το καλύψουμε είτε με τις γεννήτριες είτε με τις μπαταρίες. Γίνεται κατανοητό ότι με τη μέθοδο αυτή, ο περιορισμός της τεχνικής ελέγχου Cycle charge, σύμφωνα με την οποία οι γεννήτριες παράγουν πάντα το μέγιστο της ισχύος τους, «χαλαρώνει». Έτσι, η απόφαση αν θα φορτιστούν ή όχι οι μπαταρίες από τις γεννήτριες και πότε, καθορίζεται από τον αλγόριθμό βελτιστοποίησης.



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα σύγκρισης κόστους λειτουργίας γεννήτριας και μπαταρίας ανάλογα με το φορτίο εξυπηρέτησης [14]

2.3 Σύστημα σύγχρονης γεννήτριας-φωτοβολταϊκού

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως η ηλεκτροδότηση απομονωμένων περιοχών, όπου η επέκταση του υπάρχοντος δικτύου είναι αδύνατη ή ασύμφορη, πραγματοποιείται με Ηλεκτροπαραγωγά Ζεύγη. Υπολογίζεται ότι παγκοσμίως τα Η/Ζ παράγουν 500 GW εξυπηρετώντας βιομηχανικούς καταναλωτές. Παρόλα αυτά το κόστος του πετρελαίου αυξάνεται συνεχώς και δεν παρουσιάζει σταθερότητα. Στο συνολικό κόστος χρήσης του πετρελαίου πρέπει να συνυπολογίσουμε και τα έξοδα μεταφοράς του στις απομονωμένες περιοχές τα οποία είναι ιδιαίτερα υψηλά. Την ίδια στιγμή που το κόστος των φωτοβολταϊκών έχει πέσει κατά τουλάχιστον 50% τα τελευταία χρόνια.



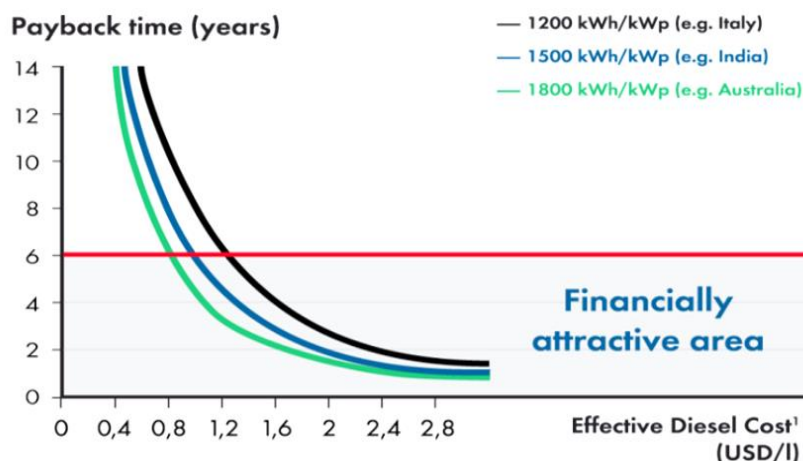
Σχήμα 2.9 Σύγκριση κόστους φωτοβολταϊκών και πετρελαίου [18]

Έτσι λοιπόν, γίνεται κατανοητό ότι η υλοποίηση ενός υβριδικού δικτύου φαντάζει ως η ιδανική λύση. Στις προηγούμενες ενότητες αναλύσαμε το μοντέλο του υβριδικού δικτύου που περιελάμβανε σύγχρονη γεννήτρια, φωτοβολταϊκό και μπαταρίες. Στην πραγματικότητα ένα υβριδικό δίκτυο χωρίς σύστημα αποθήκευσης, φαίνεται να θεωρείται πιο αξιόπιστη και συχνά πιο υλοποιήσιμη πρόταση και αυτό διότι το σύστημα των μπαταριών παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα μερικά από τα οποία είναι:

- Το υψηλό κόστος επένδυσης και απόκτησής τους
- Το υψηλό κόστος αντικατάστασής τους
- Η χαμηλή διάρκεια ζωής (3 έως 5 χρόνια)
- Η ρύπανση του περιβάλλοντος από τα χημικά των μπαταριών, καθότι στις απομακρυσμένες περιοχές οι δομές ανακύκλωσης είναι συνήθως ανεπαρκείς [15].

Τα φωτοβολταϊκά παρά το σχετικά υψηλό κόστος απόκτησής τους, προσφέρουν τη δυνατότητα απόσβεσης του αρχικού κεφαλαίου σε μικρό χρονικό διάστημα (4-6 χρόνια) και έχουν ταυτόχρονα χαμηλό κόστος λειτουργίας. Είναι ευέλικτα συστήματα και δεν αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα σε περίπτωση επέκτασης του δικτύου. Ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα (Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος και Φωτοβολταϊκό) εξασφαλίζει:

- Μείωση του κόστους πετρελαίου
- Μειωμένο ρίσκο σε περίπτωση κατακόρυφης αύξησης της τιμής του πετρελαίου
- Μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα



Σχήμα 2.10 Διάγραμμα με χρόνο αποπληρωμής μια επένδυσης σε φωτοβολττικά [18]

Πριν προχωρήσουμε στην διεξοδικότερη ανάλυση του δικτύου θα πρέπει να τονίσουμε ότι ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένος για χρήση σε ασθενή δίκτυα, δηλαδή να είναι ικανός να λειτουργεί σε δίκτυα που εμφανίζονται συχνά υπερτάσεις και διακύμανση στη συχνότητα. Θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψιν οι ενδεχόμενες έντονες καιρικές συνθήκες περιβάλλοντος, όπως είναι η υψηλή θερμοκρασία, η υγρασία και η υψηλή συγκέντρωση αλατιού σε παραθαλάσσιες περιοχές.

Γίνεται κατανοητό ότι για την άρτια λειτουργία, την αξιοπιστία αλλά και την βέλτιστη απόδοση ενός τέτοιου συστήματος, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη τεχνικών ελέγχου. Παρουσιάζεται έτσι η *τεχνική ελέγχου ON-OFF του αντιστροφέα*, η *τεχνική ελέγχου ενεργού ισχύος* και η *τεχνική ελέγχου με τη χρήση ελεγχόμενων φορτίων* [16].

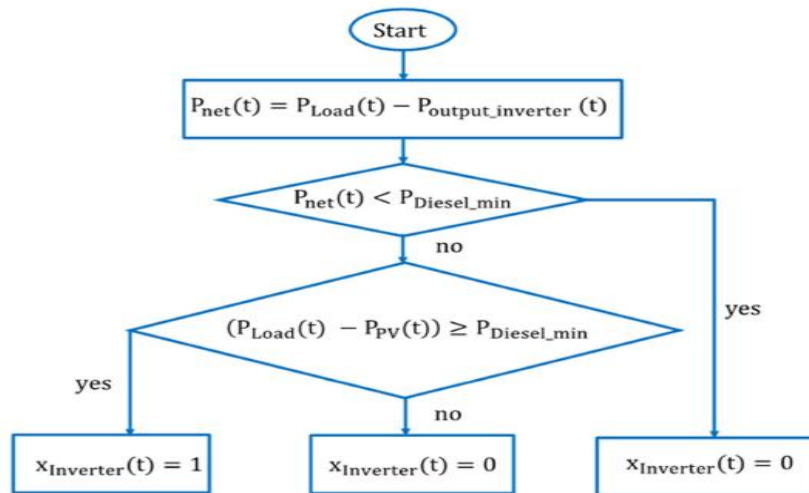
2.3.1 Τεχνική ελέγχου ON-OFF του αντιστροφέα

Αυτή η τεχνική ελέγχου ονομάζεται τεχνική ON-OFF του αντιστροφέα, καθότι γίνεται προσπάθεια ελέγχου του συστήματος με το να «ανοίγει» (ON) ή με το «κλείνει» (OFF) τον αντιστροφέα, σύμφωνα με τις συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν και τις διακυμάνσεις του φορτίου.

Να σημειωθεί, ότι τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη παρουσιάζουν ένα τεχνικό ελάχιστο, δηλαδή ένα όριο κάτω από το οποίο όταν λειτουργούν, η απόδοσή τους ελαττώνεται σημαντικά. Ταυτόχρονα κάτω από αυτό το όριο η γεννήτρια καταπονείται ιδιαίτερα με αποτέλεσμα να αυξάνονται τα κόστη συντήρησης. Στην πράξη, αυτό το όριο κυμαίνεται στο 30-40% της ονομαστικής της ισχύος [17].

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί, όταν η σύγχρονη γεννήτρια καλείται να παράγει ενέργεια λιγότερη από την ελάχιστη δυνατή που μπορεί να παράγει

($P_{\text{Diesel_min}}$), ο αντιστροφέας τίθεται εκτός λειτουργία για την προστασία της γεννήτριας. Υπολογίζεται λοιπόν, η παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό και ο αντιστροφέας είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο, όσο η σύγχρονη γεννήτρια παράγει περισσότερο από το τεχνικό της ελάχιστο. Έτσι η κατάσταση $X_{\text{Inverter}} = 0$ σημαίνει ότι ο αντιστροφέας είναι αποσυνδεδεμένος από το δίκτυο, ενώ κατάσταση $X_{\text{Inverter}} = 1$ σημαίνει ότι ο αντιστροφέας είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο και το φορτίο θα τροφοδοτείται από το φωτοβολταϊκό και από τη σύγχρονη γεννήτρια. Αντιλαμβάνεται εύκολα κάποιος, ότι αυτή η τεχνική ελέγχου είναι η πιο απλή μέθοδος ελέγχου και δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική.



Σχήμα 2.11 Διάγραμμα ροής για την τεχνική ελέγχου ON-OFF [16]

2.3.2 Τεχνική ελέγχου ενεργού ισχύος

Ασχέτως με τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή που βρίσκεται το δίκτυό μας και τις διακυμάνσεις στο φορτίο, το σύστημά μας θα πρέπει να ανταποκρίνεται σωστά, δηλαδή να μεταφέρει την απαιτούμενη ενέργεια χωρίς διακοπές και να διασφαλίζει την ευστάθεια του δικτύου. Αυτή η τεχνική ελέγχου, στόχο έχει τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος και τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης της ηλιακής ενέργειας, πάντα με γνώμονα τη μη παραβίαση του τεχνικού ελαχίστου της γεννήτριας. Η παραβίαση του ορίου συμβαίνει κυρίως σε περιπτώσεις υψηλής ηλιοφάνειας και χαμηλής ζήτησης. Σύμφωνα με το διάγραμμα, έχουμε:

1) Αν $P_{\text{net}}(t) < P_{\text{Diesel_min}}$ θα προκύψουν δύο σενάρια:

- Αν η παραγόμενη ισχύς από το φωτοβολταϊκό ($P_{\text{output_inverter}}(t)$) είναι μικρότερη από την ισχύ που πρέπει να περικοπεί ($P_{\text{Diesel_min}} - P_{\text{net}}(t)$) για να διατηρηθεί η ισχύς της γεννήτριας μεγαλύτερη από το τεχνικό ελάχιστο, τότε όλη η παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό περικόπτεται. Σε αυτήν την περίπτωση μόνο η γεννήτρια θα καλύψει τη ζήτηση του φορτίου.

$$P_{\text{inverter_limit}}(t) = 0$$

- Αν η παραγόμενη ισχύς από το φωτοβολταϊκό ($P_{\text{output_inverter}}(t)$) είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια $P_{\text{Diesel_min}} - P_{\text{net}}(t)$, η εγγεόμενη ισχύς από το φωτοβολταϊκό μειώνεται μέσω του αντιστροφέα. Σε αυτήν την περίπτωση:

$$P_{\text{inverter_limit}}(t) = P_{\text{output_inverter}}(t) - [P_{\text{Diesel_min}} - P_{\text{net}}(t)]$$

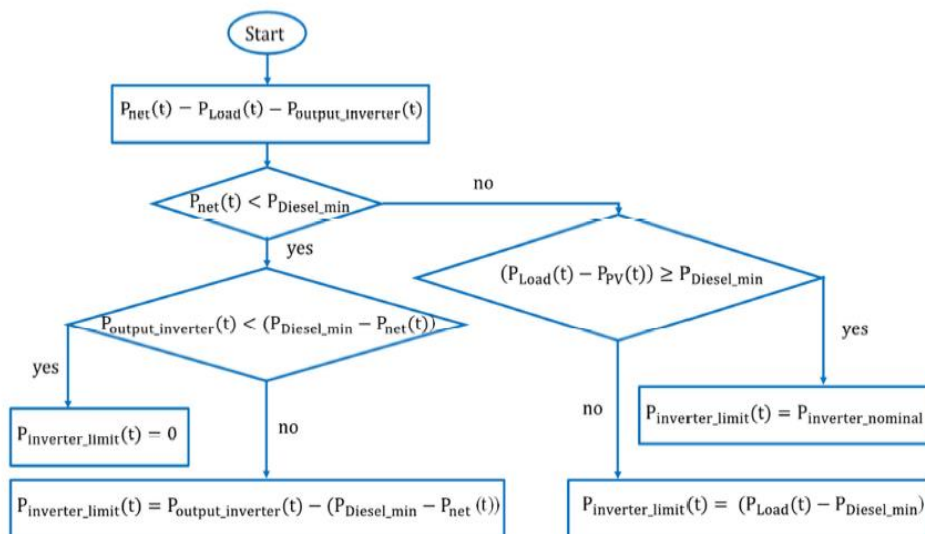
2) Αν $P_{\text{net}}(t) \geq P_{\text{Diesel_min}}$, πάλι θα έχουμε δύο σενάρια:

- Αν η ισχύς $[P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{PV}}(t)]$ είναι μεγαλύτερη από το τεχνικό ελάχιστο της γεννήτριας, τότε το όριο ισχύος του αντιστροφέα τίθεται ίσο με την ονομαστική του ισχύ.

$$P_{\text{inverter_limit}}(t) = P_{\text{inverter_nominal}}$$

- Αν η ισχύς $[P_{\text{Load}}(t) - P_{\text{PV}}(t)]$ είναι μικρότερη από το τεχνικό ελάχιστο της γεννήτριας, τότε το όριο ισχύος του αντιστροφέα είναι:

$$P_{\text{inverter_limit}}(t) = P_{\text{Load}} - P_{\text{Diesel_min}}$$



Σχήμα 2.12 Διάγραμμα ροής για την τεχνική ελέγχου ενεργού ισχύος [16]

Η παρούσα τεχνική ελέγχου, θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστη και έχει βρει ευρεία εμπορική εφαρμογή στην παγκόσμια αγορά από εταιρίες που ασχολούνται με τα εν λόγω συστήματα.

Εμπορικές εφαρμογές εξοικονόμησης καυσίμου

Πολλές εταιρίες ανά τον κόσμο έχουν δημιουργήσει εμπορικές εφαρμογές για υβριδικά συστήματα με στόχο την εξοικονόμηση καυσίμου της γεννήτριας. Η SMA, εταιρία που ειδικεύεται σε συστήματα φωτοβολταϊκών, ανέπτυξε έναν *fuel save controller* για χρήση σε συστήματα γεννήτριας-φωτοβολταϊκού, που υλοποιεί την παραπάνω τεχνική. Ο controller είναι αυτός που παρέχει την επικοινωνία ανάμεσα στις γεννήτριες, στα φωτοβολταϊκά και στα φορτία. Διαχειρίζεται το επίπεδο διείσδυσης ισχύος των φωτοβολταϊκών στο δίκτυο, εξασφαλίζοντας την ελαχιστοποίηση του πετρελαίου και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ενώ την ίδια στιγμή ενδέχεται να αυξήσει το επίπεδο διείσδυσης της φωτοβολταϊκής ισχύος στο 60% της συνολικής ισχύος. Ο ελεγκτής τον οποίο έχει αναπτύξει, έχει ευρεία εφαρμογή καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σε μικρά υβριδικά συστήματα της τάξεως 2-300 kW είτε σε βιομηχανικές εφαρμογές ισχύος 0.3-6 MW.

Ο fuel save controller αποτελείται από τρεις επιμέρους ελεγκτές, καθένας από τους οποίους επιτελεί και διαφορετική λειτουργία. Οι ελεγκτές αυτοί είναι:

Κύριος ελεγκτής του φωτοβολταϊκού

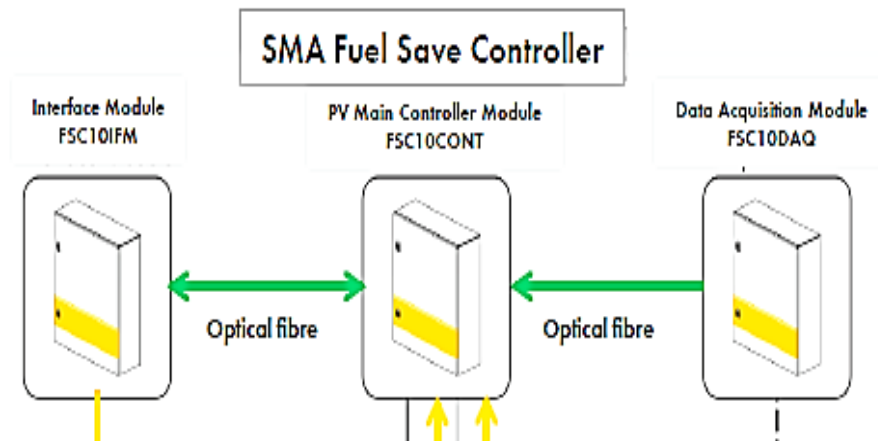
- Ελέγχει την εναλλασσόμενη ισχύ που εγχέεται στο δίκτυο από το φωτοβολταϊκό, με γνώμονα την κάλυψη της ζήτησης και τη βέλτιστη λειτουργία των μηχανών.
- Εξασφαλίζει ότι οι γεννήτριες θα δουλεύουν εντός των ορίων που προβλέπεται, μεγιστοποιώντας τη διάρκεια ζωής τους.
- Διευκολύνει την ενσωμάτωση περισσότερης ενέργειας από το φωτοβολταϊκό στο τοπικό δίκτυο, σύμφωνα πάντα με την ονομαστική ισχύ των γεννητριών.
- Χρησιμοποιώντας Modbus/TCP, επικοινωνεί με τον ελεγκτή των γεννητριών και λαμβάνει πληροφορίες για την κατάστασή τους (ON/OFF) και τα επίπεδα παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος.
- Παρέχει άμεση απενεργοποίηση του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα σε περίπτωση βλάβης

Μονάδα με λειτουργία αλληλεπίδρασης

- Καταγράφει και μεταδίδει δεδομένα και τιμές ισχύος λειτουργώντας ως μονάδα αλληλεπίδρασης μεταξύ του κύριου ελεγκτή του φωτοβολταϊκού και του αντιστροφέα.
- Δέχεται τιμές αναφοράς για την ενεργό και άεργο ισχύ από τον κύριο ελεγκτή του φωτοβολταϊκού (λειτουργία που αναλύθηκε προηγουμένως) και ρυθμίζει κατάλληλα την ισχύ που θα σταλεί στον αντιστροφέα.

Μονάδα με λειτουργία απόκτησης δεδομένων

- Αναλύει με υψηλή ταχύτητα και ακρίβεια τα δεδομένα για το εκάστοτε φορτίο και τις συνθήκες του δικτύου και μεταδίδει στον κύριο ελεγκτή του φωτοβολταϊκού.
- Μετράει και αναλύει δεδομένα ηλεκτρονικής φύσεως, για το τριφασικό δίκτυο που αποτελείται από τέσσερα καλώδια (L1,L2,L3,N) [18].



Σχήμα 2.13 Γενικό μοντέλο λειτουργίας του SMA Fuel Save Controller

Ομοίως με την SMA, η εταιρία JUWI δημιούργησε τον δικό της εξοικονομητή καυσίμου με την ονομασία Solar Fuel Saver. Οι αρχές λειτουργίας του είναι παρόμοιες με αυτές της SMA. Η χρονική διάρκεια απόσβεσης των χρημάτων που δαπανήθηκαν για την απόκτηση του υπολογίζεται ότι είναι προσεγγιστικά τα 4 χρόνια, θεωρώντας τιμή πετρελαίου ίση με 1 Ευρώ/Λίτρο. Επίσης, ο ελεγκτής αυτός μπορεί να συνδεθεί σε ήδη υπάρχον δίκτυο και δεν επηρεάζεται από τον τρόπο λειτουργίας των γεννητριών, είτε λειτουργεί με ισόχρονη τεχνική ελέγχου είτε με droop [19].



Σχήμα 2.14 Fuel Solar Saver της εταιρίας JUWI [19]

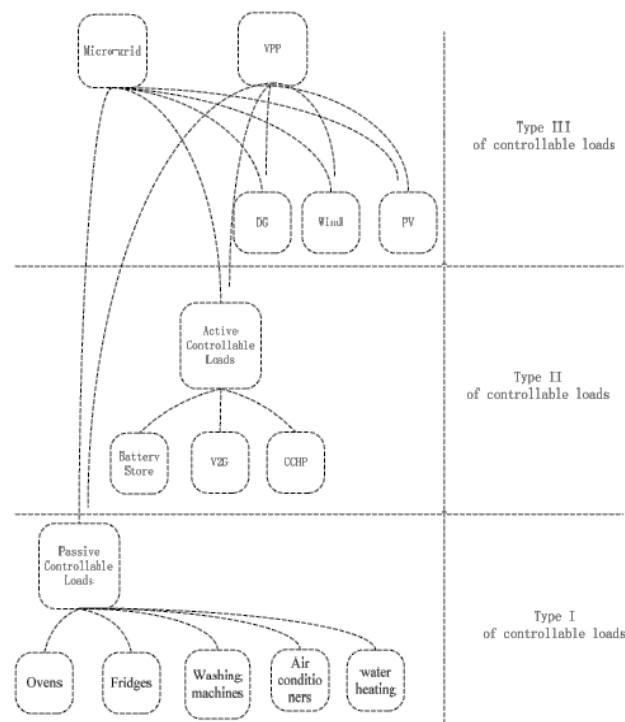
2.3.3 Τεχνική ελέγχου με χρήση ελεγχόμενων φορτίων

Τα ελεγχόμενα φορτία θα μπορούσαμε να τα διαχωρίσουμε σε 3 κατηγορίες:

1^η κατηγορία: Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει διάφορα φορτία καθημερινής χρήσης σε οικίες, όπως τα ψυγεία, τα πλυντήρια, τα κλιματιστικά. Τα φορτία αυτά ονομάζονται παθητικά φορτία και είναι ελεγχόμενα καθώς μπορούμε να μετατοπίσουμε την καμπύλη φορτίου προς τα κάτω, μειώνοντας τα φορτία αυτά.

2^η κατηγορία: Στην κατηγορία αυτήν περιλαμβάνονται ελεγχόμενα φορτία όπως μπαταρίες, ηλεκτρικά οχήματα που τροφοδοτούν και τροφοδοτούνται με ενέργεια από το δίκτυο, αντλίες θερμότητας και ψύξης του νερού. Τα φορτία αυτά χαρακτηρίζονται ως ενεργά φορτία, καθότι μπορούν να αντλήσουν ισχύ από το δίκτυο αλλά και να το τροφοδοτήσουν.

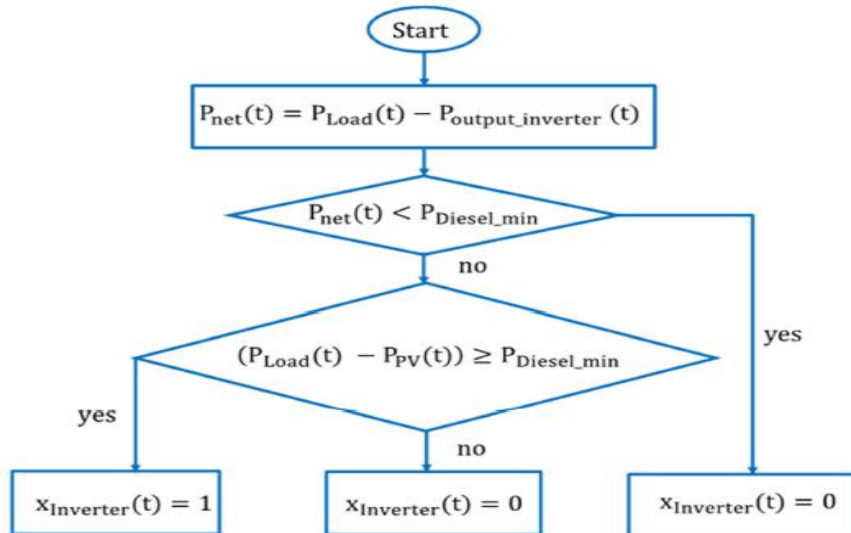
3^η κατηγορία: Αποτελείται από τις εικονικές μονάδες παραγωγής ενέργειας (Virtual Power Plant), που περιλαμβάνουν γεννήτριες, καθώς και φορτία από τις προηγούμενες κατηγορίες. Είναι ουσιαστικό ένα σύστημα που δύναται να συνδέεται και να αποσυνδέεται από το υβριδικό μας δίκτυο ανάλογα με τις ανάγκες που προκύπτουν [20].



Σχήμα 2.15 Διάφοροι τύποι ελεγχόμενων φορτίων [20]

Στην στρατηγική ελέγχου με τα ελεγχόμενα φορτία, όταν η ισχύς των φωτοβολταϊκών είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση του φορτίου, ή όταν η γεννήτρια είναι

έτοιμη να παράγει ισχύ χαμηλότερη από το τεχνικό της ελάχιστο, τα ελεγχόμενα φορτία συνδέονται στο δίκτυο για να καταναλώσουν την περίσσεια ισχύ των φωτοβολταϊκών ή να προσθέσουν φορτίο στο ήδη υπάρχον, επιτρέποντας στη γεννήτρια να λειτουργήσει σε αποδεκτές τιμές. Το διάγραμμα ροής είναι αυτό που φαίνεται στη συνέχεια:



Σχήμα 2.16 Διάγραμμα ροής για την τεχνική ελέγχου με χρήση ελεγχόμενων φορτίων
[16]

Κεφάλαιο 3ο

Προσομοιώσεις Πρωτεύουσας Ρύθμισης Συχνότητας

3.1 Προσομοιωτής RTDS

Τα μοντέλα που ακολουθούν στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκαν στον προσομοιωτή RTDS του εργαστηρίου. Ο ψηφιακός εξομοιωτής πραγματικού χρόνου RTDS (Real Time Digital Simulator) ξεκίνησε να αναπτύσσεται στα τέλη της δεκαετίας του 80 στο ερευνητικό κέντρο του Manitoba HVDC στον Καναδά. Το 1994 η ευθύνη για τον προσομοιωτή RTDS μεταβιβάστηκε στο RTDS Technologies όπου έχει υποστεί από τότε πολλές εξελίξεις υλικού και λογισμικού. Ο προσομοιωτής πια χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας, από κατασκευαστές εξοπλισμού και ερευνητικές οργανώσεις.



Εικόνα 3.1 Προσομοιωτής RTDS του εργαστηρίου

Ο προσομοιωτής

Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS) είναι μια συσκευή που έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης διαφόρων μοντέλων, ακόμα και ολόκληρου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ο προσομοιωτής χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή δοκιμών κλειστού βρόχου, σε πραγματικό χρόνο, διαφόρων συσκευών, όπως συσκευών προστασίας και συσκευών αυτόματου ελέγχου. Είναι λοιπόν ένα χρήσιμο μηχάνημα, το οποίο χρησιμοποιείται σε τομείς της βιομηχανίας, όπως στη δοκιμή και στον έλεγχο των ηλεκτρικών συσκευών, για παράδειγμα ηλεκτρονόμους, αλλά και σε τομείς εκπαίδευσης νέων μηχανικών στα πλαίσια πανεπιστημιακών διδακτικών εφαρμογών. Μέσω του προσομοιωτή ο χρήστης μπορεί να διερευνήσει τις επιπτώσεις διαταραχών στον εξοπλισμό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο τη λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων ή και καταστροφών.

Ο προσομοιωτής είναι ένας συνδυασμός εξελιγμένου υπολογιστικού υλικού και εξεζητημένου λογισμικού. Μέσω ενός υπολογιστή και χρησιμοποιώντας το απαραίτητο πρόγραμμα για την επικοινωνία του RTDS με το χρήστη, μπορούμε να προσομοιώσουμε διάφορα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και να εξάγουμε τα κατάλληλα αποτελέσματα. Ο προσομοιωτής είναι πλήρως επεκτάσιμος, δίνοντας τη δυνατότητα έτσι να δουλέψουμε ακόμα και με τα πιο πολύπλοκα και ακριβή μοντέλα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεγονός που καθιστά το RTDS ξεχωριστό από τους άλλους ψηφιακούς προσομοιωτές είναι ότι επιλύει τα προβλήματα σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι εφικτό, επειδή ο προσομοιωτής μπορεί να επιλύσει τις εξισώσεις του συστήματος αρκετά γρήγορα, ώστε η έξοδος του να αντιπροσωπεύει συνεχώς και ρεαλιστικά τις συνθήκες στο πραγματικό δίκτυο.

Στις μέρες μας ο προσομοιωτής χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς, όπως για παράδειγμα 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.

RTDS Hardware

Ένας ψηφιακός προσομοιωτής διαφέρει από έναν αναλογικό, καθώς ο υπολογισμός της κατάστασης του μοντέλου που αναπαριστά το Σ.Η.Ε. γίνεται σε διακριτές χρονικές στιγμές. Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών διακριτών στιγμών καλείται βήμα της προσομοίωσης (Δt). Οι συνηθισμένες μελέτες μεταβατικών φαινομένων, για τις οποίες χρησιμοποιείται το RTDS, απαιτούν ένα χρονικό βήμα Δt της τάξης των 50 έως 100μsec. Ο

προσομοιωτής 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. Κάποιες από αυτές είναι και οι παρακάτω: GPC(Giga Processor Card), 3PC (Triple Processor Card), IRC (Workstation Inter Rack Communications Card), WIF (Workstation InterFace Card), TPC (Tandem Processor Card).

Η μονάδα προσομοιωτή που διαθέτει το εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου αποτελείται από ένα rack με κάρτες επεξεργασίας 3PC (Triple Processor Card), GPC(Giga Processor Card) και WIF (Workstation InterFace Card).



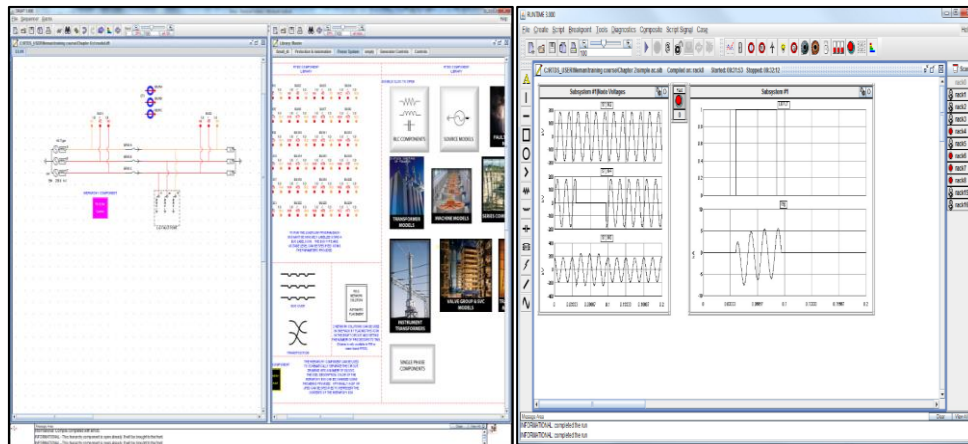
Σχήμα 3.1 GPC και 3PC κάρτες για το RTDS

RTDS 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 είναι αρμόδια για τη σωστή επικοινωνία του RTDS με το χρήστη. Το εργαλείο και το μέσο της επικοινωνίας είναι το RSCAD, ένα γραφικό περιβάλλον υψηλού επιπέδου. Το πρόγραμμα RSCAD αποτελείται από πολλά τμήματα. Τα δύο πιο κύρια για έναν χρήστη του, είναι το *Draft* και το *Runtime*. Στο στάδιο *Draft* γίνεται ο σχεδιασμός του δικτύου που θέλουμε να προσομοιώσουμε. Με τη βοήθεια των βιβλιοθηκών του προγράμματος μπορούμε να προσομοιώσουμε μια πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών και καταστάσεων λειτουργίας. Στο στάδιο *Runtime* γίνεται η προσομοίωση του δικτύου που έχει δημιουργηθεί στο *Draft* και λαμβάνονται τα αποτελέσματά της. Σ' αυτό το στάδιο μπορούμε να επέμβουμε δυναμικά στην εξομοίωση, όπως για παράδειγμα κάνοντας χειρισμούς ελέγχου των διακοπών, αυξομειώνοντας άλλες παραμέτρους της εξομοίωσης. Επίσης στο περιβάλλον *Runtime* ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί τα μετρούμενα μεγέθη

που έχει ορίσει, χρησιμοποιώντας γραφικά εικονίδια μετρητών, γραφήματα με κυματομορφές από μεγέθη της εξομοίωσης.

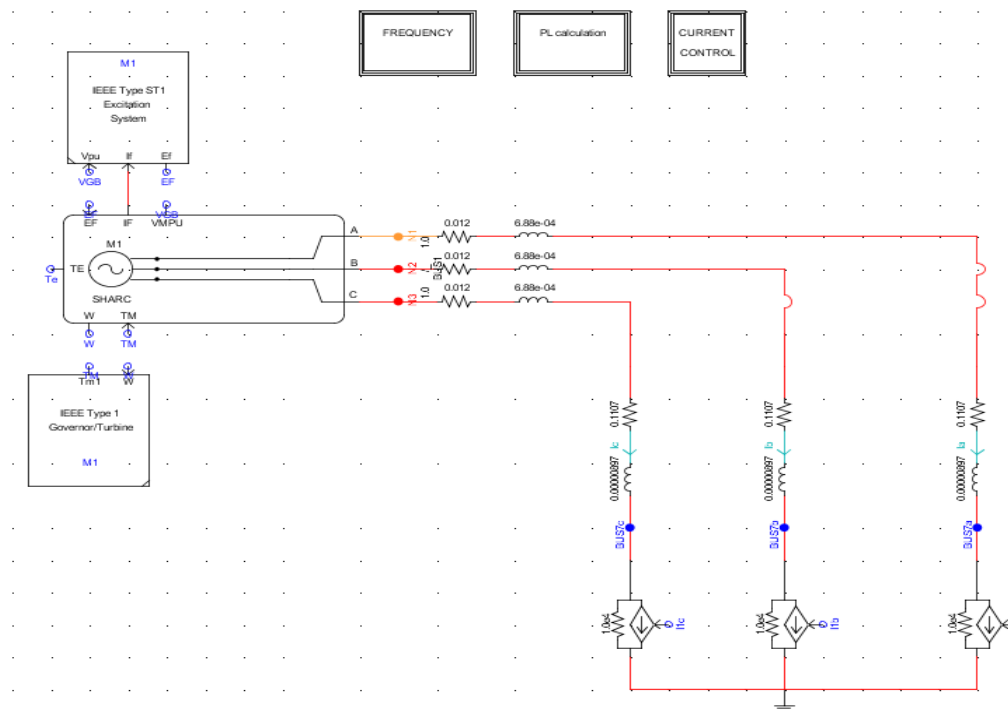


Σχήμα 3.2 Draft και Runtime στο RTDS user interface

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 είναι απαιτητό για τους ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος. Ο μεταγλωττιστής δημιουργεί ταυτόχρονα ένα αρχείο κειμένου (.MAP file) που δείχνει τι έχει κατοχυρωθεί σε κάθε επεξεργαστή, ώστε ο χρήστης να μπορεί να έχει πρόσβαση στις εξόδους του.

3.2 Σύστημα σύγχρονης γεννήτριας υπό φορτίο

Προτού αναλυθούν τα επόμενα κυκλώματα, κρίνουμε σκόπιμο να παρουσιάσουμε στο RTDS το δίκτυο μια γεννήτριας υπό φορτίο και να αναλύσουμε τη μέθοδο λειτουργίας την οποία θα ακολουθήσουμε και στις επόμενες εφαρμογές. Αρχικά, το δίκτυο που πραγματοποιήσαμε είναι το παρακάτω:



Σχήμα 3.3 Δίκτυο σύγχρονης γεννήτριας-φορτίου στο RTDS

Στο σχήμα βλέπουμε το μοντέλο της τριφασικής σύγχρονης AC γεννήτριας συνδεδεμένη με το μοντέλο του AVR (Automatic Voltage Regulator) και με το μοντέλο του Governor/Turbine που προσομοιώνει τη λειτουργία του κινητήρα ντίζελ. Τα μοντέλα που έχουν επιλεγεί είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα για τέτοιου είδους εφαρμογές.

Το block της σύγχρονης γεννήτριας μέσω του οποίου ρυθμίζουμε όλες τις παραμέτρους της φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Μέσω του block μπορούμε και ρυθμίζουμε τις ανά μονάδα τιμές των αντιστάσεων και αντιδράσεων της γεννήτριας, την αδράνειά της καθώς και επίσης να αρχικοποιήσουμε όποιες μεταβλητές μας ενδιαφέρουν.

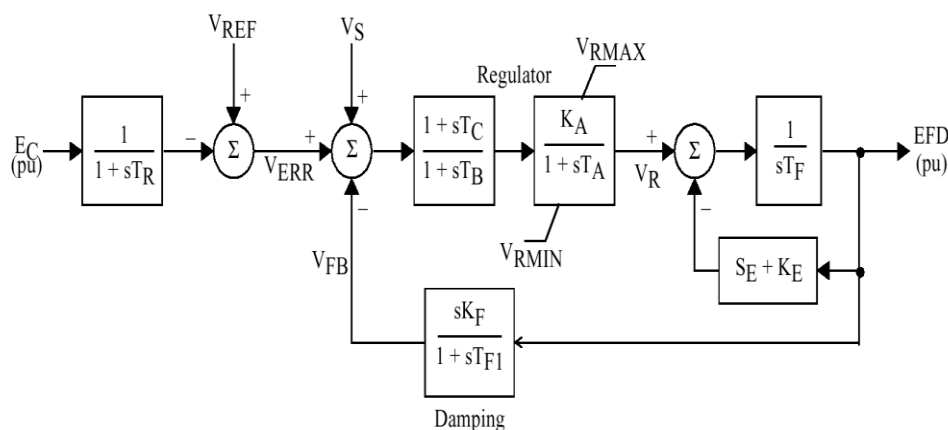
If_rtds_sharc_sld_MACV31					
SIGNAL NAMES FOR RUNTIME AND D/A: MAC					
D/A CHANNEL ASSIGNMENTS (Continued): MAC					
ENABLE D/A OUTPUT (MAX = 8 SIGNALS): MAC			D/A CHANNEL ASSIGNMENTS: MAC		
SIGNAL MONITORING IN RT AND CC: MAC					
MACHINE ZERO SEQUENCE IMPEDANCES			OUTPUT OPTIONS		
MACHINE ELECT DATA: GENERATOR FORMAT					
MECHANICAL DATA AND CONFIGURATION			MACHINE INITIAL LOAD FLOW DATA		
GENERAL MODEL CONFIGURATION			3PC CONFIGURATION		
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Machine name:		M1			
cnfg	Format of Machine electrical data input:	Generator			
cfgr	Number of Q-axis rotor windings:	Two			
trfa	Is D-axis transfer admittance known ?	No			
mmva	Rated MVA of the Machine:	0.01	MVA	0.0001	
Vbsll	Rated RMS Line-to-Line Voltage:	0.4	kV		
HTZ	Base Angular Frequency:	50	Hertz		
satur	Specification of Mach Saturation Curve	Linear			
MM	Get Delta Speed Order (r/s) from CC ?	No			
spdin	Initial Speed in the first time steps is:	Rated			
tecc	Send Elect Torque in PU, TE to CC ?	Yes			
vcc	Send Mach Bus V in PU, VMPU to CC ?	Yes			
trfmr	Include Optional Y-D Transformer ?	No			
ldmh1	Include Optional Machine Load No. 1 ?	No			
ldmh2	Include Optional Machine Load No. 2 ?	No			
Sbrk	Enable Stator Side Breaker ?	No		0	1

Update Cancel Cancel All

Σχήμα 3.4 Block παραμετροποίησης της σύγχρονης γεννήτριας

Όπως φαίνεται θεωρήσαμε γεννήτρια με ονομαστική ισχύ 10 kW και πολική τάση εξόδου 400 V, συχνότητας 50 Hz ενώ το φορτίο ρυθμίστηκε και αυτό στα 10 kW.

AVR



Σχήμα 3.5 Σύστημα διεγέρσεως και ρυθμίσεως τάσεως τύπου 1 κατά IEEE [21]

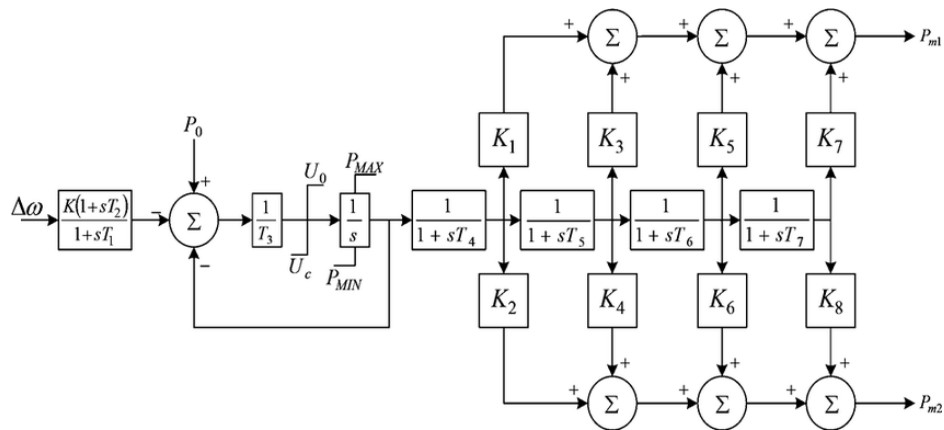
Στο παραπάνω μοντέλο περιγράφεται ένα σύστημα διεγέρσεως (AVR) Τύπου 1 (ST1) το οποίο περιλαμβάνει 2 βρόχους. Έναν εξωτερικό, *ρυθμίσεως της τάσεως* και έναν εσωτερικό, *σταθεροποιήσεως*. Υπάρχει ένας ακόμη εσωτερικός βρόχος, ο οποίος παριστάνει τον κορεσμό της διεγέρτριας, όταν αυτή είναι στρεφόμενη. Η τάση εξόδου (ή τερματική τάση του ζυγού) EFD συγκρίνεται στην είσοδο με την τάση αναφοράς EC. Τα πρόσθετα σήματα που φαίνονται στο σχήμα είναι σταθεροποιητικά και βελτιώνουν την απόσβεση των ταλαντώσεων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Το φίλτρο μετρήσεως της τάσεως $\frac{1}{1+sT_R}$, αποκόπτει την εναλλασσόμενη συνιστώσα (κυμάτωση) της ανορθωμένης τάσεως.

Η βαθμίδα του ρυθμιστή τάσεως περιλαμβάνει ένα κέρδος KR, που αποτελεί τη βασική ενίσχυση του συστήματος ελέγχου. Η σταθερά χρόνου TR είναι συνήθως μικρότερη από 100 ms. Η παράσταση της διεγέρτριας είναι το πιο σύνθετο μέρος του μοντέλου. Η διεγέρτρια είναι βασικά ένας ενισχυτής με απλή συνάρτηση μεταφοράς, περιλαμβάνει όμως και μια ανατροφοδότηση, η οποία δίνει την επίδραση του κορεσμού. Η συνάρτηση κορεσμού $S_k = f(E_f)$ εκφράζει τη διαφορά που προκύπτει στο ρεύμα διεγέρσεως από τη σύγκριση της καμπύλης κορεσμού με την ευθύγραμμη χαρακτηριστική διακένου αέρος της διεγέρτριας, η οποία έχει κλίση $1/K_E$.

Ο βρόχος σταθεροποιήσεως έχει σκοπό να βελτιώσει την ευστάθεια του συστήματος ρυθμίσεως τάσεως, κυρίως στις μεγάλες τιμές του κέρδους μονίμου καταστάσεως. Η αναγκαιότητα του βρόχου φαίνεται από το εξής:

Ο βρόχος ρυθμίσεως της τάσεως που παρουσιάσαμε, περιέχει τρεις σταθερές χρόνου T_R , T_E / a και T'_d και συνεπώς η συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου του συστήματος έχει τρεις πραγματικούς αρνητικούς πόλους. Όπως είναι γνωστό, ευστάθεια υπάρχει όταν οι πόλοι του κλειστού βρόχου βρίσκονται στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο. Έτσι σε περίπτωση χάραξης του γεωμετρικού τόπου των ριζών στην περίπτωση αυτή ο βρόχος δεν θα ήταν ευσταθής.

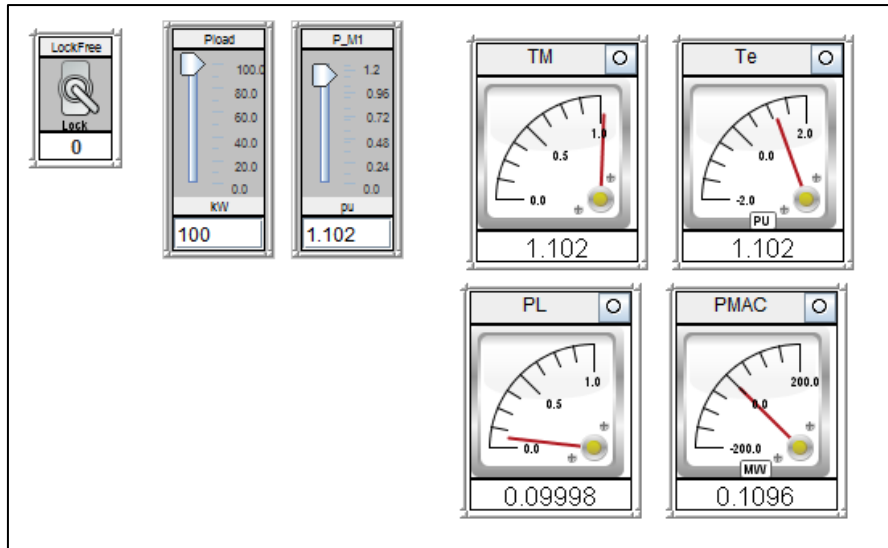
Governor /Turbine



Σχήμα 3.6 Μοντέλο λειτουργίας Governor/Turbine IEEE G1 [21]

Το παραπάνω μοντέλο αποτελεί ένα μοντέλο Κυβερνήτη-Τουρμπίνας γενικού σκοπού και επιλέχθηκε στις εφαρμογές μας, λόγω χαμηλής πολυπλοκότητας σε σχέση με άλλα μοντέλα του RTDS. Στην εφαρμογή μας, τα κέρδη K_2 , K_4 , K_6 , K_8 θεωρούνται ίσα με το μηδέν. Στο παραπάνω μοντέλο το κέρδος K ισούται με $1/R$. Επομένως, η ρύθμιση droop που μας ενδιαφέρει γίνεται μέσω του ελέγχου της τιμής K . Έτσι, για καμπύλη με στατισμό 2% αντιστοιχεί κέρδος $K=50$.

Επίσης τα φορτία στο δίκτυό μας, τα οποία θέλουμε να ελέγχονται δυναμικά υλοποιήθηκαν μέσω εξαρτημένων πηγών ρεύματος, ο έλεγχος των οποίων επιτυγχάνεται μέσω του παρακάτω block.



Σχήμα 3.9 Διάφορα Blocks στο Runtime του συστήματος σύγχρονης γεννήτριας-φορτίου

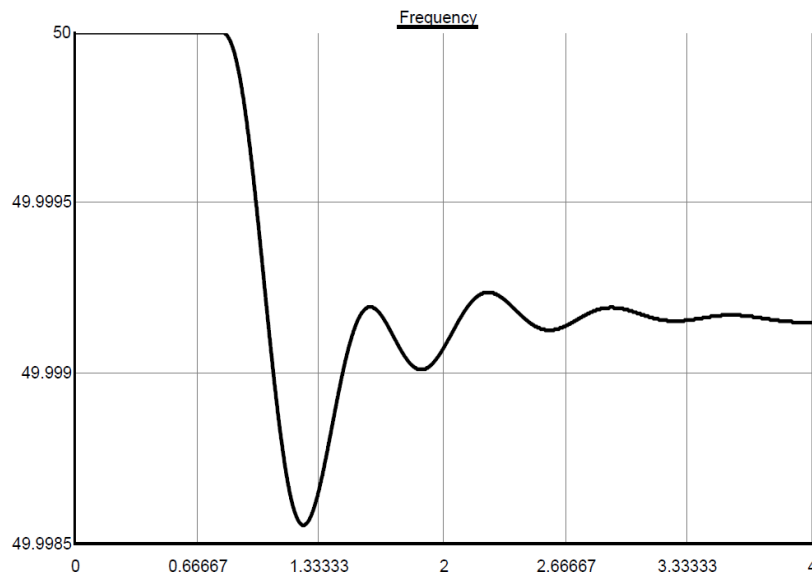
Τα δύο *sliders* που υπάρχουν, αφορούν στον έλεγχο του φορτίου και στον έλεγχο του set point στον governor όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω. Τα 4 επόμενα blocks είναι *μετρητές* και είναι ως εξής:

- TM, Μηχανική ροπή στον άξονα της γεννήτριας
- TE, Ηλεκτρική ροπή διακένου
- PL, Ισχύς φορτίου σε MW
- PMAC, Ισχύς γεννήτριας σε MW

Τέλος, ο *διακόπτης* που υπάρχει αφορά στον έλεγχο της γεννήτριας. Ο διακόπτης αυτός έχει 2 θέσεις, “Lock” και “Free”. Στη θέση Lock η μηχανή στρέφεται πάντα με τη σύγχρονη ταχύτητα μένοντας ανεπηρέαστη από τις διαταραχές του δικτύου. Στη θέση Free η μηχανή περιστρέφεται με ταχύτητα που υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν τις διαταραχές και τις αλλαγές στο φορτίο.

Όλες οι προσομοιώσεις που ακολουθούν αρχίζουν με το διακόπτη στη θέση Free. Πριν θέσουμε το διακόπτη από τη θέση “Set” στη θέση “Free” πρέπει οι τιμές της TM και της TE να παρουσιάζουν μικρή ή μηδενική απόκλιση. Στην περίπτωση μας που χρησιμοποιούμε Governor, η ταύτιση των δύο τιμών επιτυγχάνεται μέσω του Slider P_M1, όπου ρυθμίζει ουσιαστικά το set point του governor.

Ακολουθεί διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η απόκριση συχνότητας τη στιγμή που θέτουμε το διακόπτη στη θέση Free:

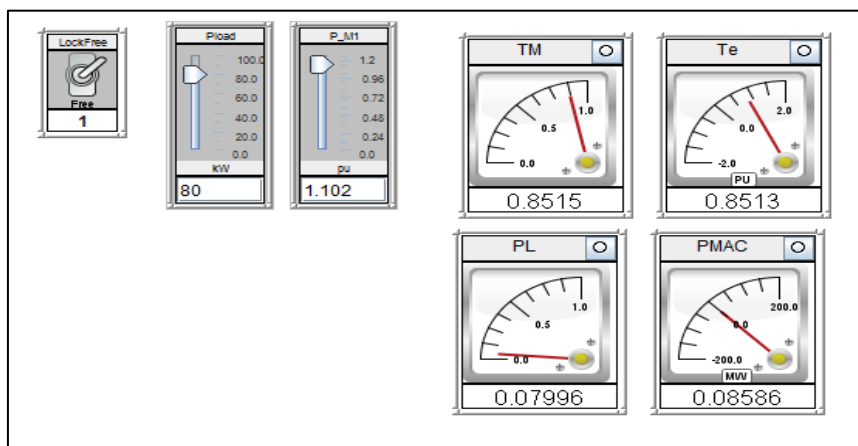


Σχήμα 3.10 Απόκριση συχνότητας τη στιγμή της μετάβασης του διακόπτη από τη θέση lock στη θέση free

Είναι εμφανές ότι μεταβολή της συχνότητας είναι αμελητέα, κατά το άνοιγμα του διακόπτη.

Όταν επιτευχθεί αυτή η ταύτιση στα μεγέθη TM,TE και ανοίξει ο διακόπτης, τότε σε οποιαδήποτε αλλαγή του φορτίου τα μεγέθη θα συνεχίζουν να ταυτίζονται. Αυτό που παρατηρούμε στην πραγματικότητα είναι ταυτόχρονη αλλαγή της τιμής TE με την αλλαγή του φορτίου και μετά από μικρό χρονικό διάστημα, η τιμή TM ισορροπεί στη νέα τιμή της TE. Ο χρόνος που μεσολαβεί για την ισορροπία των δύο μεγεθών, καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας και είναι προφανώς ρυθμιζόμενος.

Έτσι, στην εφαρμογή μας, αν υπάρξει αλλαγή στο φορτίο από τα 100kW στα 80 στο Runtime θα εμφανιστεί:



Σχήμα 3.11 Διάφορα Blocks στο Runtime για Δίκτυο σύγχρονης γεννήτριας-φορτίου

Παρατηρούμε λοιπόν ότι έχει επιτευχθεί ισορροπία στις τιμές TM και TE. Τέλος, η απόκλιση στην ισχύ που εμφανίζεται στα μετρητικά PMAC και PL υπάρχει λόγω των απωλειών ενεργού ισχύος στις αντιστάσεις του δικτύου.

3.3 Σύστημα παράλληλης λειτουργίας σύγχρονων γεννητριών υπό φορτίο

Το πρώτο δίκτυο που υλοποιήσαμε στο RTDS αφορούσε στο διαμοιρασμό φορτίου από δύο σύγχρονες γεννήτριες με πανομοιότυπα χαρακτηριστικά που λειτουργούν σε παράλληλη σύνδεση. Όσον αφορά στη διαστασιολόγηση θεωρήσαμε ότι έχουμε ένα μικρό νησί, μη διασυνδεδεμένο με το ηπειρωτικό δίκτυο.

Θεωρητικοί υπολογισμοί

Το πρόβλημα του οποίου ακολουθεί η λύση περιλαμβάνει δύο σύγχρονες γεννήτριες που έχουν την ίδια ονομαστική ισχύ 100 kW σε δίκτυο συχνότητας 100 Hz. Η πρώτη σύγχρονη γεννήτρια έχει στατισμό $R_1=2\%$ ενώ η δεύτερη $R_2=6\%$. Αρχικά εξυπηρετούν φορτίο 200 kW το οποίο στη συνέχεια πέφτει στα 120 kW. Θα υπολογιστεί η παραγωγή κάθε γεννήτριας και η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος.

Αρχικά γνωρίζουμε ότι η συχνότητα f (αντίστοιχα και η γωνιακή ταχύτητα ω) στη μόνιμη κατάσταση είναι κοινή και για τις δύο μονάδες και δίνεται από τον ορισμό του στατισμού από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\omega - \omega_0 = -R_1(P_1 - P_0) = -R_2(P_2 - P_0) \quad (3.1)$$

Το σύστημα των εξισώσεων είναι σε αυτήν την περίπτωση και αφού θεωρήσουμε βάση ισχύος τα 100 kW:

$$P_1 + P_2 = 1,2 \text{ αμ} \quad (3.2)$$

$$-0,02(P_1 - 1) = -0,06(P_2 - 1) \quad (3.3)$$

Η δεύτερη σχέση μπορεί να γραφεί συναρτήσει των ανά μονάδα μεταβολών ΔP_1 , ΔP_2 από την ονομαστική λειτουργία:

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{P_1 - 1}{P_2 - 1} = \frac{0,06}{0,02} = 3$$

Αντικαθιστώντας τα ΔP στην πρώτη σχέση:

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 = 1,2 - 2,0 = -0,8$$

Οπότε

$$3\Delta P_1 + \Delta P_2 = -0,8$$

H

$$\Delta P_2 = -0,2 \text{ } \kappa\alpha l \quad \Delta P_1 = -0,6$$

Με άλλα λόγια η μονάδα με το μεγαλύτερο στατισμό θα έχει τη μικρότερη απόκλιση από την ονομαστική ισχύ των 100 kW και θα παράγει τελικά:

$$P_2 = 0,8 \alpha\mu \acute{\eta} 80 \text{ kW}$$

Ενώ η πρώτη μονάδα, που έχει μικρότερο στατισμό θα έχει τη μεγαλύτερη απόκλιση από την ονομαστική ισχύ και θα παράγει:

$$P_1 = 0,4 \alpha \mu \dot{\eta} 40 \text{ kW}$$

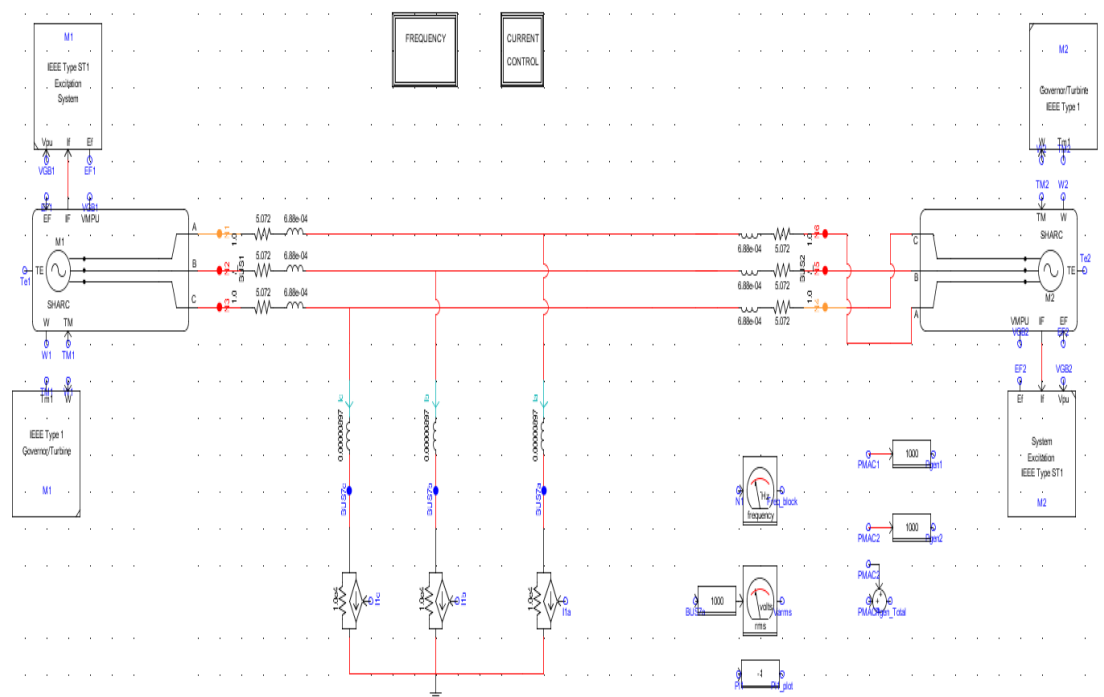
Η συχνότητα βρίσκεται με αντικατάσταση στη σχέση (3.1):

$$\omega - \omega_0 = (-0,02)(-0,6) = 0,12 \text{ } \mu\text{m και σε Hz } \Delta f = 0,012 * 50 = 0,6 \text{ Hz}$$

Ενώ η συχνότητα λειτουργίας είναι $f = 50 + 0,6 \text{ Hz} = 50,6 \text{ Hz}$

Πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων

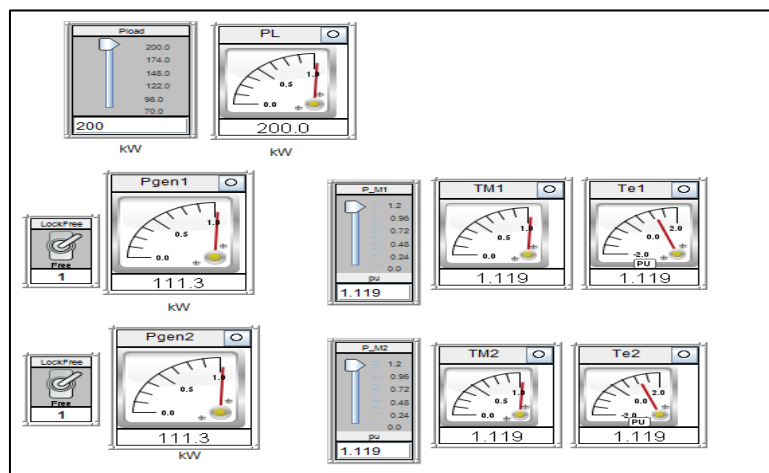
Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το δίκτυο που υλοποιήσαμε.



Σχήμα 3.12 Δίκτυο με δύο γεννήτριες υπό φορτίο σε παράλληλη λειτουργία στο RTDS

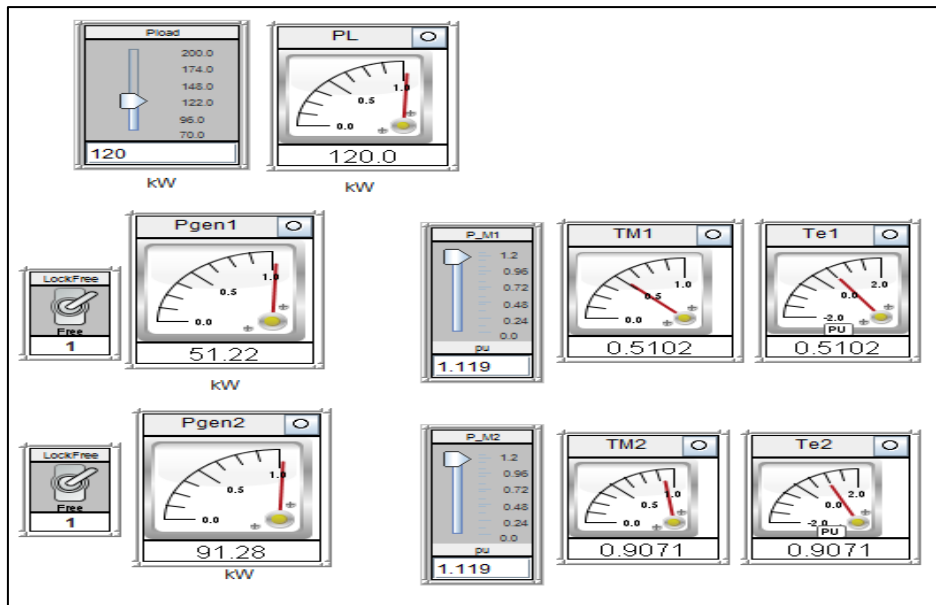
Οι δύο γεννήτριες έχουν την ίδια ονομαστική ισχύ 100 kW, και η πρώτη έχει στατισμό $R_1=2\%$ ενώ η δεύτερη $R_2=6\%$. Ο στατισμός ρυθμίζεται μέσω του block της κάθε γεννήτριας. Η απόσταση των δύο γεννητριών είναι 9 km και θεωρούμε ότι το φορτίο συνδέεται στη μέση αυτής. Το αρχικό φορτίο θεωρήθηκε 200kW και ως εκ τούτου θεωρείται καταναλωτής μέσης τάσης στα 15 kV [22]. Οι γραμμές μεταφοράς επιλέχθηκαν να είναι τύπου 3x16 ACSR με αντίσταση, $R= 1,268\Omega/\text{km}$ και $X= 0,422\Omega/\text{km}$.

Η προσομοίωση που θα πραγματοποιήσουμε αφορά σε μια βηματική αλλαγή του φορτίου και στην ανταπόκριση της συχνότητας σε αυτήν την αλλαγή. Θα εξετάσουμε επίσης, πως διαμοιράζεται το φορτίο μεταξύ των δύο γεννητριών και ποια είναι η απόκρισή τους στο χρόνο. Αρχικά λοιπόν, αφού πραγματοποιήσουμε τη διαδικασία με το διακόπτη της γεννήτριας που περιγράψαμε προηγουμένως, έχουμε στο Runtime:



Σχήμα 3.13 Διάφορα Blocks στο Runtime για δίκτυο δύο γεννητριών-φορτίου

Παρατηρούμε, λοιπόν ότι και οι δύο γεννήτριες βρίσκονται σε κατάσταση “Free”. Το φορτίο των 200 kW μοιράζεται ισομερώς και στις δύο γεννήτριες, οι οποίες πρέπει να παράγουν και οι δύο παραπάνω φορτίο για να καλύψουν τις απώλειες του δικτύου. Επίσης παρατηρούμε ότι τα μεγέθη TM,TE ταυτίζονται και στις δύο περιπτώσεις. Θα ακολουθήσει βηματική αλλαγή από τα 200 στα 120 kW .

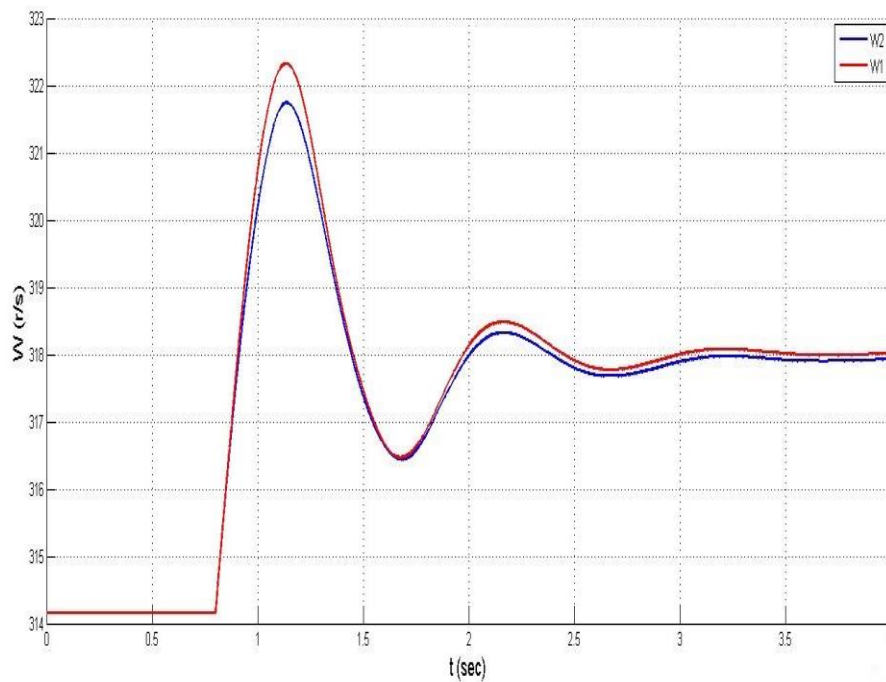


Σχήμα 3.14 Διάφορα Blocks στο Runtime για δίκτυο δύο γεννητριών-φορτίου, μετά το άνοιγμα των διακοπών

Πράγματι παρατηρούμε ότι $P_{gen1} = 51.22 \text{ kW}$ και $P_{gen2} = 91.28 \text{ kW}$, δηλαδή επιβεβαιώνεται το αρχικό μας συμπέρασμα ότι η μονάδα με το μεγάλο στατισμό θα έχει τη μικρότερη απόκλιση από την ονομαστική ισχύ των 100 kW. Οι θεωρητικοί υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι ο διαμοιρασμός της ισχύος, σε ένα ιδανικό δίκτυο χωρίς απώλειες θα ήταν $P_{gen1} = 40 \text{ kW}$ και $P_{gen2} = 80 \text{ kW}$. Η απόκλιση στην τιμή των δύο γεννητριών οφείλεται στις απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου.

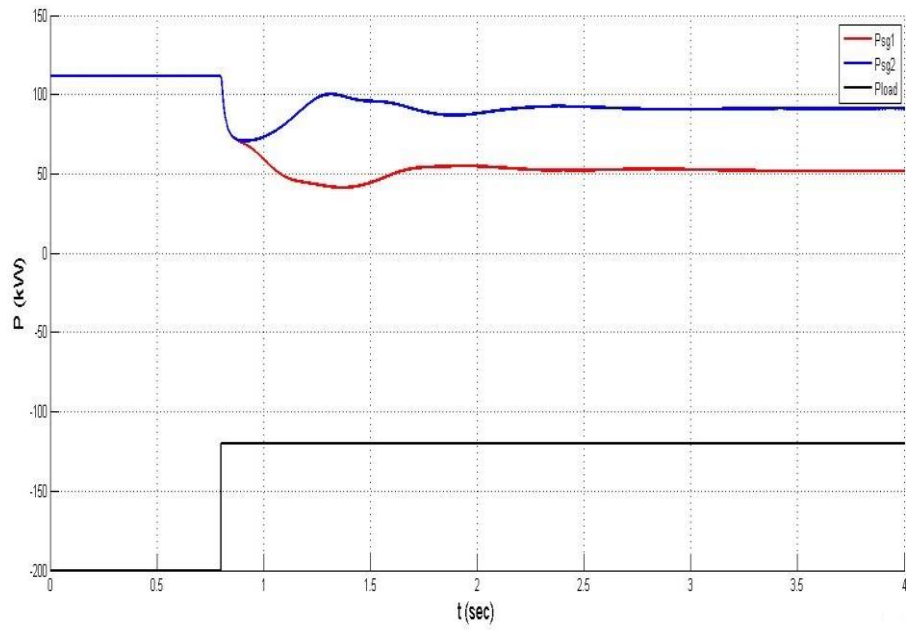
Η συχνότητα του συστήματος από τα 50 Hz, αυξήθηκε στα **50.6 Hz**, αναμενόμενο αφού είχαμε μείωση του φορτίου και έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τους υπολογισμούς που είχαμε πραγματοποιήσει.

Ακολουθεί το διάγραμμα που περιέχει τις μεταβολές στη γωνιακή ταχύτητα των δύο γεννητριών:



Σχήμα 3.15 Απόκριση των γωνιακών ταχυτήτων των σύγχρονων γεννητριών στη βηματική μεταβολή του φορτίου

Το επόμενο διάγραμμα αφορά στην μεταβολή της παραγωγής ισχύος των μονάδων. Οι θετικές τιμές ισχύος αντιστοιχούν στις παραγωγές των γεννητριών ενώ η τιμή του φορτίου παρουσιάζεται αρνητική. Παρατηρούμε ότι από τη στιγμή που συμβαίνει το μεταβατικό στην τιμή του φορτίου, οι γεννήτριες ισορροπούν στις νέες τιμές ύστερα από 1.5 περίπου δευτερόλεπτο. Παρατηρούμε ότι η διαφορά που παρουσιάζεται στους στατισμούς των δύο γεννητριών, επηρεάζει αντιστοίχως και τη γραφική παράστασή τους.

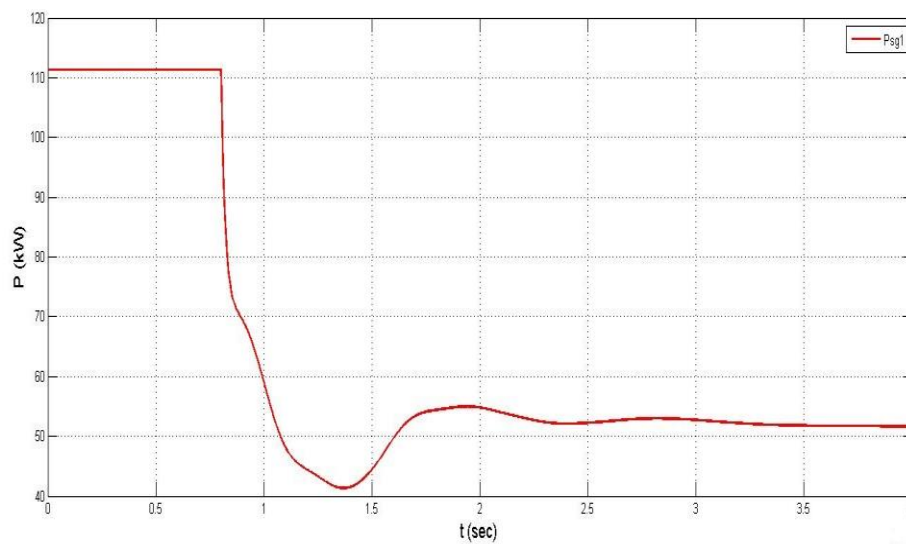


Σχήμα 3.16 Διάγραμμα με τις παραγωγές των σύγχρονων γεννητριών στη βηματική μεταβολή του φορτίου

Παρατηρείται ότι η διαδικασία ισορρόπησης στις νέες ισχύεις διαρκεί περίπου 1,5 δευτερόλεπτο.

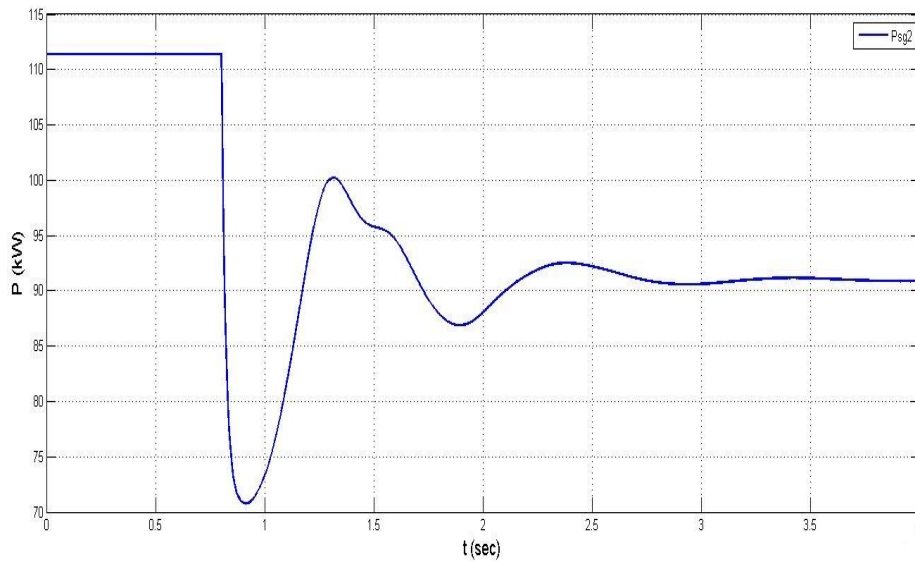
Τέλος παρουσιάζεται η απόκριση κάθε γεννήτριας ξεχωριστά:

Γεννήτρια 1



Σχήμα 3.17 Απόκριση της σύγχρονης γεννήτριας 1 στη βηματική μεταβολή του φορτίου

Γεννήτρια 2



Σχήμα 3.18 Απόκριση της σύγχρονης γεννήτριας 2 στη βηματική μεταβολή του φορτίου

Συμπερασματικά

Παρατηρούμε ότι υπάρχει ταύτιση των θεωρητικών υπολογισμών και των πειραματικών αποτελεσμάτων. Το γεγονός ότι και οι δύο γεννήτριες παράγουν περισσότερη ισχύ από ότι υπολογίσθηκε οφείλεται στις απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου. Αυτό που είναι άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι οι παραγωγές των μηχανών (στη μόνιμη κατάσταση) καθορίζονται μονοσήμαντα από τους στατισμούς και το συνολικό φορτίο. Επιπλέον, η σχέση (3.1) μας δίνει και τη συχνότητα λειτουργίας κάθε στιγμή που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο φορτίο.

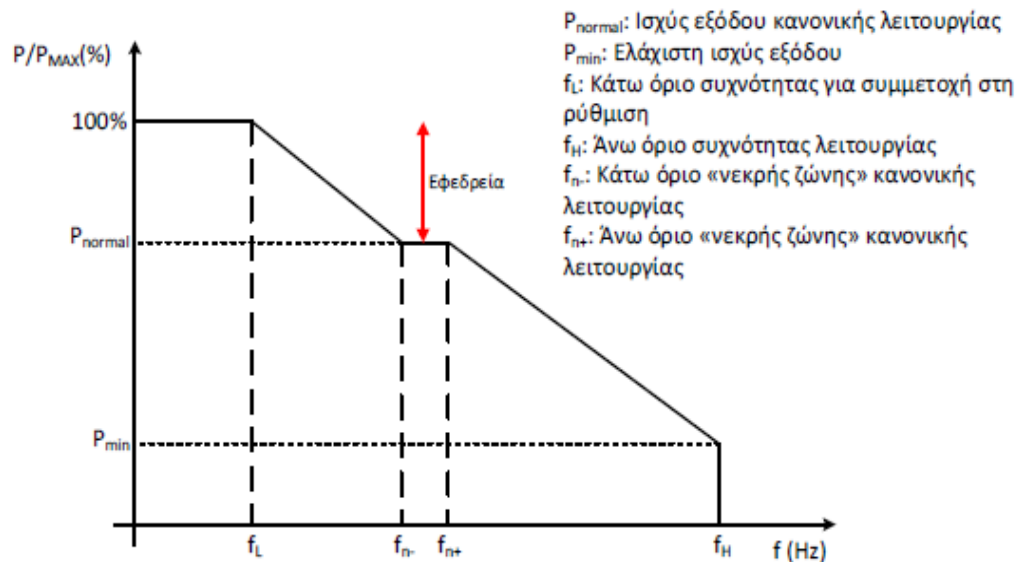
3.4 Σύστημα σύγχρονης γεννήτριας με φωτοβολταϊκό υπό φορτίο

Στην επόμενη προσομοίωση θέλουμε να μελετήσουμε το αυτόνομο υβριδικό σύστημα με γεννήτρια, φωτοβολταϊκό και φορτίο. Το φωτοβολταϊκό έχει προσομοιωθεί σαν μια πηγή ρεύματος όπως και το φορτίο, αλλά με αντίθετη φορά.

Όπως αναλύσαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια ο έλεγχος της ενεργού ισχύος δυναμικά επηρεάζει την συχνότητα. Σε συνδυασμό και με τις απαιτήσεις των διαφόρων κωδίκων του δικτύου για όλες τις μονάδες, υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική μία καμπύλη στατισμού (Droop curve), ώστε να ελέγχεται η ενεργός ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού πάρκου ανάλογα με την εκάστοτε συχνότητα του δικτύου.

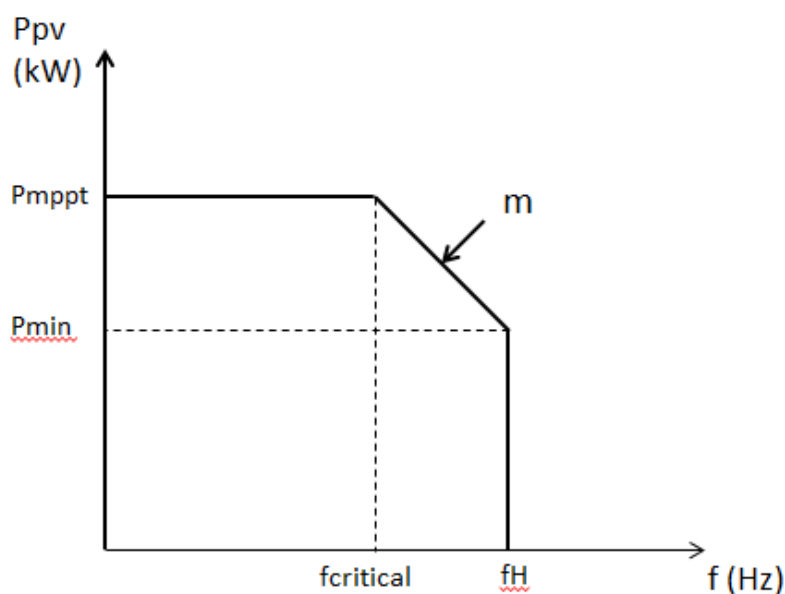
Για τη δημιουργία μιας πλήρους καμπύλης στατισμού αρχικά επιλέγεται μία «νεκρή ζώνη» γύρω από την ονομαστική συχνότητα του δικτύου (50Hz), πχ 49.8Hz – 50.2Hz, στην οποία το φωτοβολταϊκό δεν μεταβάλλει την ισχύ του, καθώς και το ποσοστό από την

εκάστοτε μέγιστη ισχύ που θα αποδίδεται στο δίκτυο. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η τιμή της συχνότητας (υποσυχνότητα) στην οποία το φωτοβολταϊκό πάρκο θα αποδίδει την μέγιστη ισχύ, καθώς και η τιμή της συχνότητας (υπερσυχνότητα) που το σύστημα θα διακόπτει τη λειτουργία του. Η γενική ιδέα μια καμπύλης, όπως περιγράφεται παραπάνω, φαίνεται στο σχήμα.



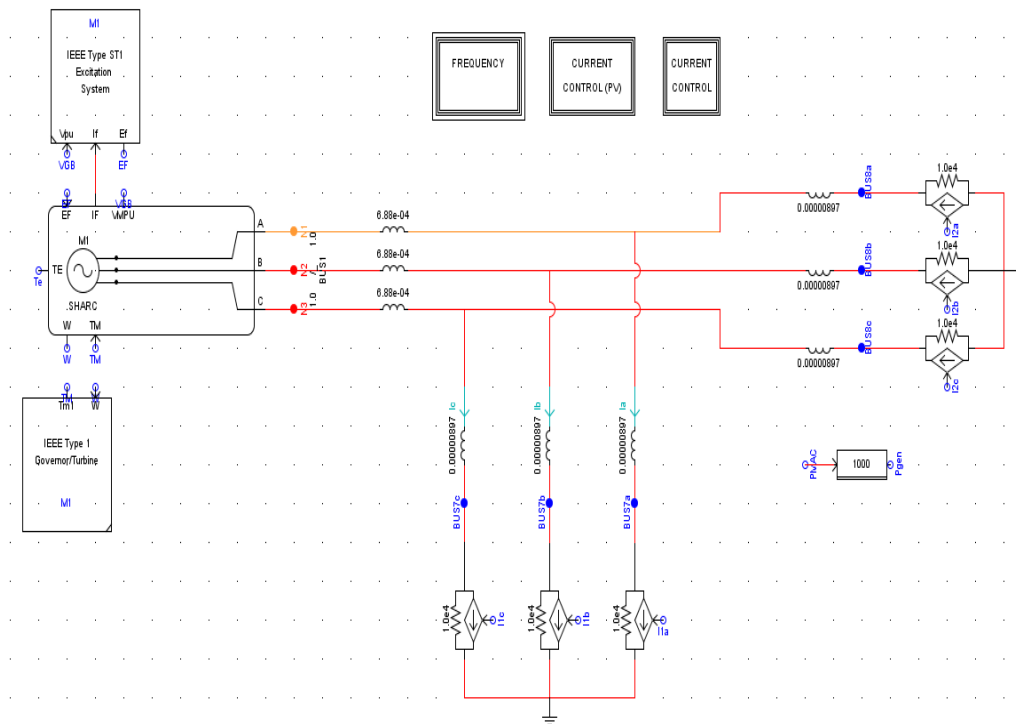
Σχήμα 3.19 Τυπική καμπύλη droop του φωτοβολταϊκού

Η υλοποίηση μας στο RTDS αφορά μια ενδεικτική απλοποιημένη καμπύλη droop, στην οποία υπάρχει περικοπή της ισχύος του φωτοβολταϊκού για την περίπτωση που η συχνότητα υπερβαίνει την τιμή των 50.2 Hz. Ακολουθεί η καμπύλη droop που εφαρμόστηκε στη διάταξή μας.



Σχήμα 3.20 Διάγραμμα $P(f)$ φωτοβολταϊκού που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση

Το δίκτυο που υλοποιήσαμε στο RTDS είναι αυτό που φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 3.21 Δίκτυο Σύγχρονης Γεννήτριας-Φωτοβολταϊκού-Φορτίου στο RTDS

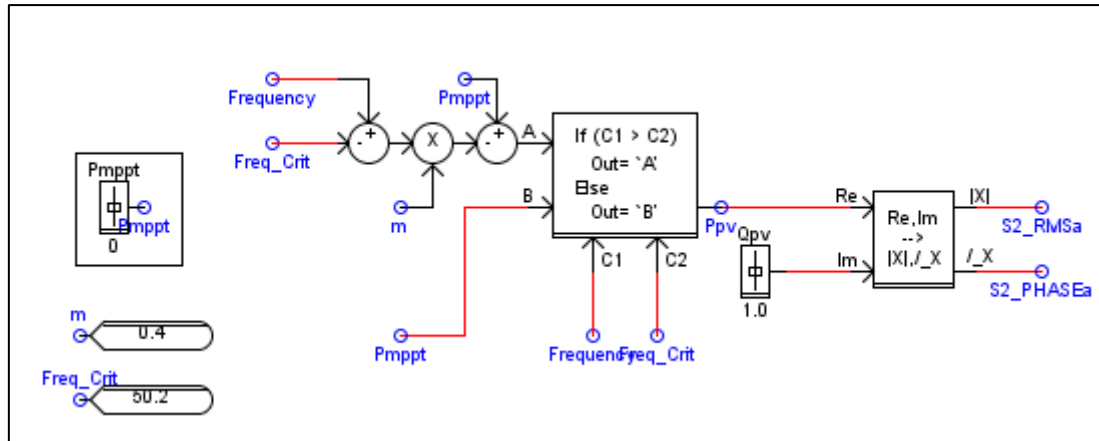
Τα χαρακτηριστικά του δικτύου είναι:

Γεννήτρια	
Ονομαστική Ισχύς	10 kW
Στατισμός	R=7%

Τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού είναι:

Φωτοβολταϊκό και αντιστροφέας	
P_{MPPT}	3 kW
Κρίσιμη Συχνότητα	50.2 Hz
Droop factor της Χαρακτηριστικής καμπύλης	40% της διαθέσιμης ισχύος

Ακολουθεί η υλοποίηση της παραπάνω χαρακτηριστικής στο RTDS:



Σχήμα 3.22 Υλοποίηση χαρακτηριστικής droop το φωτοβολταϊκού στο RTDS

Θεωρητικοί υπολογισμοί

Για να δημιουργήσουμε μια χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας της σύγχρονης γεννήτριας μας αρκεί να γνωρίζουμε το στατισμό της R και ένα σημείο λειτουργία της. Ένα τέτοιο σημείο μπορεί να είναι η συχνότητα κενής λειτουργίας της γεννήτριας. Έτσι, η παρακάτω εξίσωση δίνει τη συχνότητα της σύγχρονης γεννήτριας για δεδομένη ισχύ P:

$$f = f_k - \frac{Rf_N}{P_N} * P$$

Όπου,
 f_k , η συχνότητα κενού φορτίου
 f_N , η ονομαστική συχνότητα
 P_N , η ονομαστική ισχύς

Όταν το φορτίο είναι 10 kW, καλύπτεται πλήρως από τη γεννήτρια (7 kW) και από το φωτοβολταϊκό (3 kW) ενώ η συχνότητα του δικτύου είναι 50 Hz. Θα μελετήσουμε την περίπτωση όπου υπάρχει βηματική μεταβολή του φορτίου στα 7 kW και θα εξετάσουμε το διαμοιρασμό της ισχύος μεταξύ της σύγχρονης γεννήτριας και του φωτοβολταϊκού. Ξεκινώντας τους υπολογισμούς, η συχνότητα κενής λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας δίνεται από τη σχέση [6]:

$$f = f_o + \frac{Rf_N}{P_N} * P_o = 50 - \frac{0,07 * 50}{10} * 7 = 52,45 \text{ Hz}$$

Άρα η συχνότητα της γεννήτριας για δεδομένη τιμή P_{gen} θα προκύπτει από τη σχέση:

$$f = 52,45 - \frac{0,07*50}{10} * P_{gen} \quad (3.4)$$

Η εξίσωση της ευθείας τους φωτοβολταϊκού θα είναι :

$$P_{pv} = P_{mppt} - m(f - f_{crit}) = 3 - 0.4(f - 50.2) \quad (3.5)$$

Όπου, P_{mppt} , η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς από το φωτοβολταϊκό
 m , η κλίση της χαρακτηριστικής
 f_{crit} , η κρίσιμη συχνότητα του φωτοβολταϊκού
 f , η συχνότητα του δικτύου

Όταν το φορτίο μεταβληθεί στα 7 kW θα ισχύει η σχέση

$$P_{gen} + P_{pv} = 7 \quad (3.6)$$

Λόγω του ότι η γεννήτριας δημιουργεί τη συχνότητα στο δίκτυο, θα πρέπει να ισχύει $f_{gen}=f_{pv}$.
 Επιλύοντας τη σχέση (3.4) ως προς τη συχνότητα και εξισώνοντας την με τη σχέση (3.4) θα προκύψει:

$$52,45 - \frac{0,07*50}{10} * P_{gen} = 50,2 + \frac{(3-P_{pv})}{0,4} \quad (3.7)$$

Επιλύοντας το σύστημα των σχέσεων (3.6),(3.7) προκύπτει ότι **$P_{gen}=4.3 \text{ kW}$ και $P_{pv}=2.7 \text{ kW}$** .

Η συχνότητα του δικτύου υπολογίζεται :

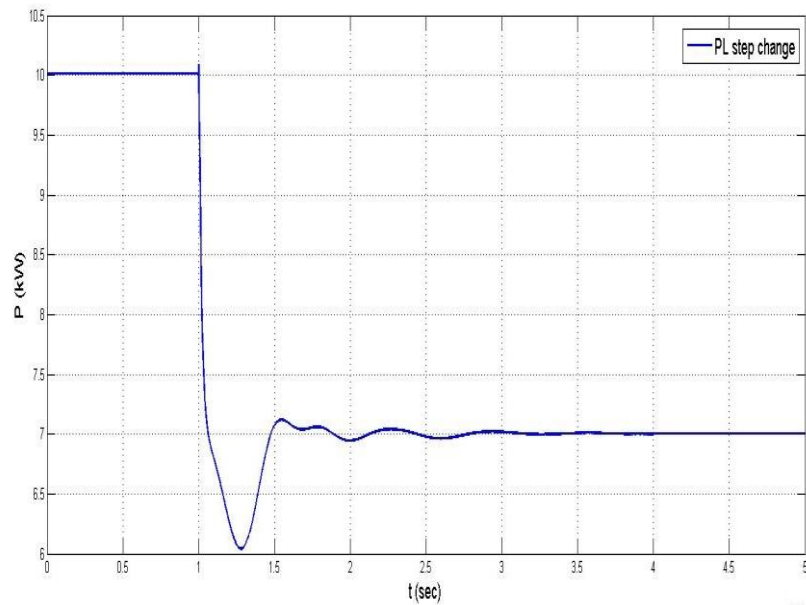
$$f = 52,45 - \frac{0,07 * 50}{10} * 4,3 = \mathbf{50,95 \text{ Hz}}$$

Σε περίπτωση που ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας λειτουργούσε χωρίς καμπύλη στατισμού
 θα είχαμε: **$P_{gen}=4\text{kW}$ και $P_{pv}=3 \text{ kW}$** και η συχνότητα θα ήταν ίση με:

$$f = 52,45 - \frac{0,07 * 50}{10} * 4 = \mathbf{51.05 \text{ Hz}}$$

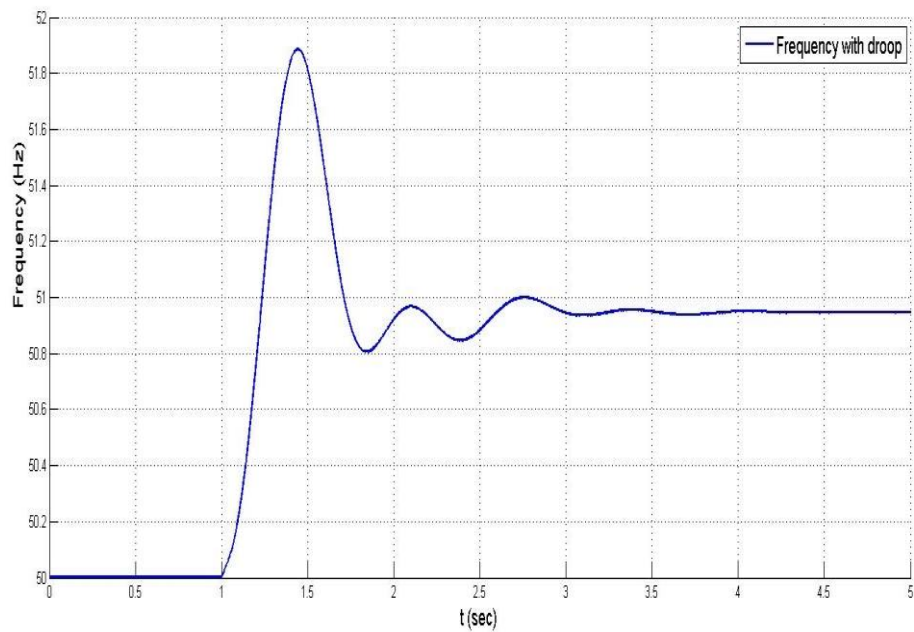
Πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων

Στην αρχική κατάσταση, το φορτίο είναι 10kW και εξυπηρετείται και από τη γεννήτρια (7 kW) και από το φωτοβολταϊκό (3 kW). Στη συνέχεια γίνεται βηματική μεταβολή στο φορτίο το οποίο πέφτει στα 7 kW και απεικονίζεται στην παρακάτω γραφική παράσταση:



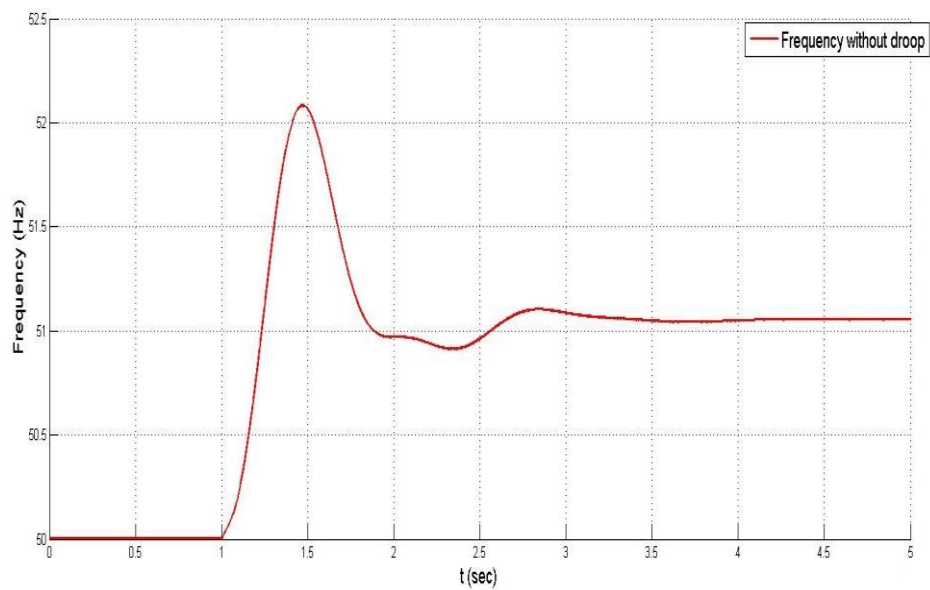
Σχήμα 3.23 Η βηματική μεταβολή του φορτίου

Ακολουθεί η απόκριση της συχνότητας σε περίπτωση που το φωτοβολταϊκό συμμετέχει στη ρύθμιση συχνότητας (droop):



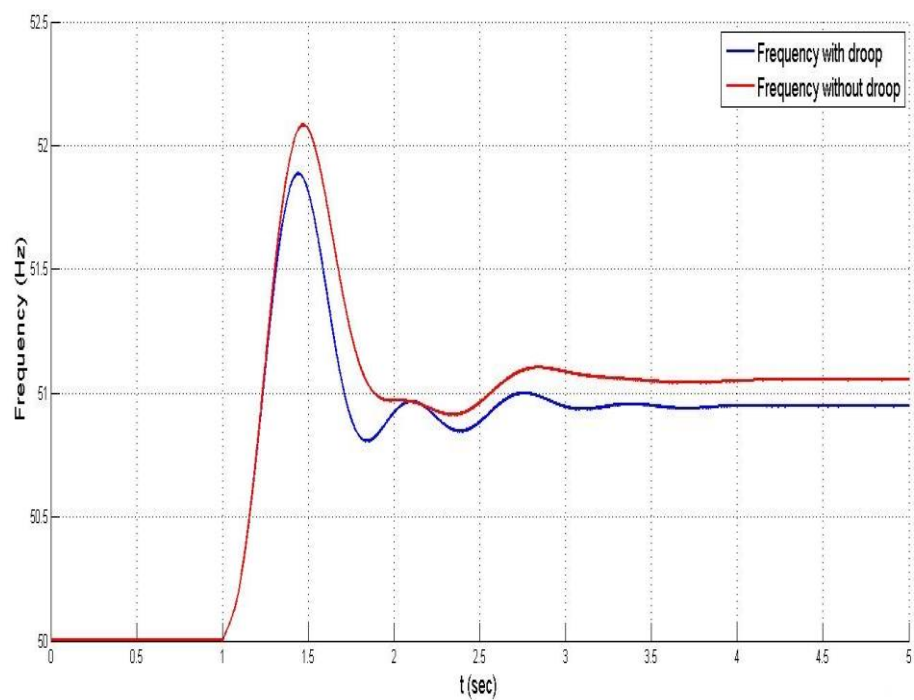
Σχήμα 3.24 Απόκριση συχνότητας σε απότομη μεταβολή του φορτίου με droop στο φωτοβολταϊκό

Απόκριση συχνότητας σε περίπτωση που το φωτοβολταϊκό δεν συμμετέχει στη ρύθμιση συχνότητας:



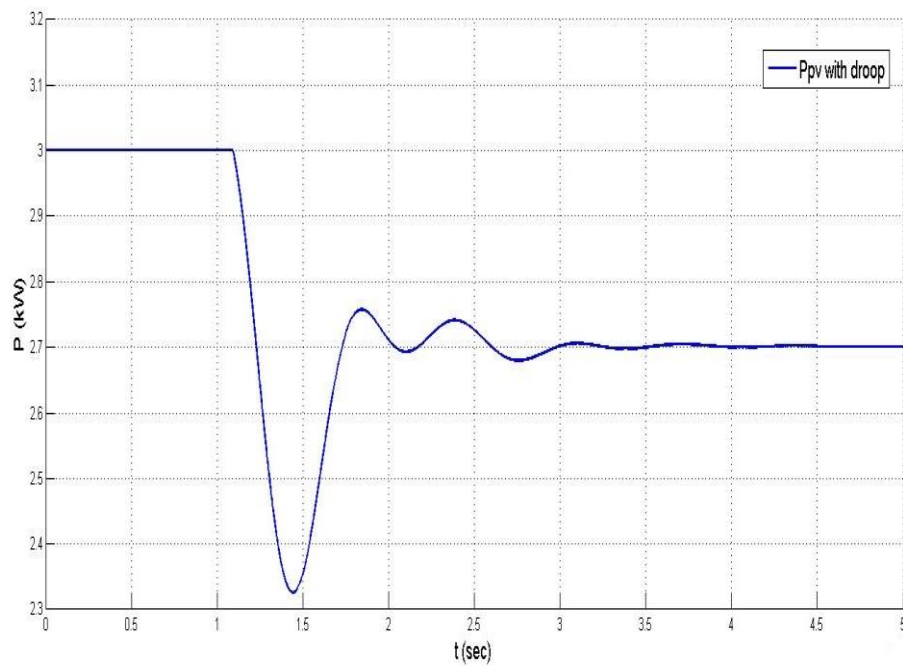
Σχήμα 3.25 Απόκριση συχνότητας σε απότομη μεταβολή του φορτίου χωρίς droop στο φωτοβολταϊκό

Ακολουθεί κοινό διάγραμμα, για τις μεταβολές της συχνότητας στις δύο περιπτώσεις:



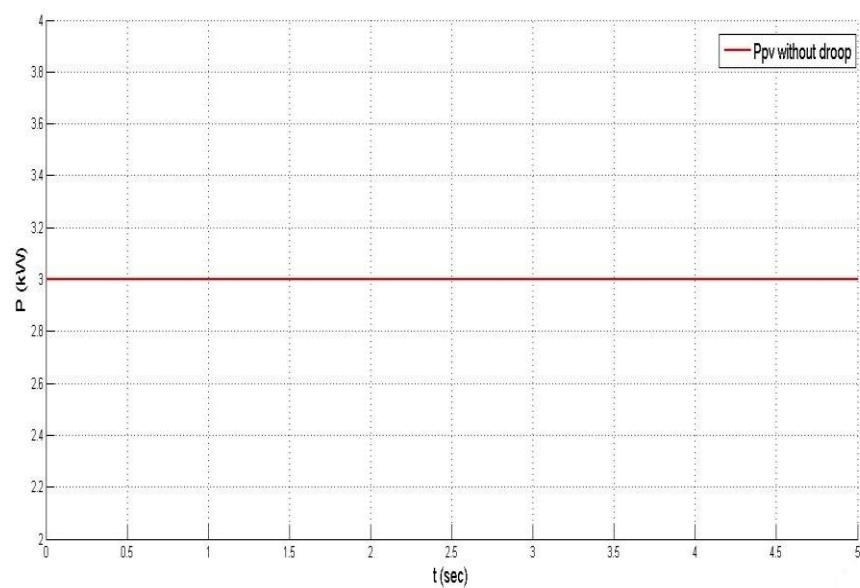
Σχήμα 3.26 Κοινό διάγραμμα απόκρισης συχνότητας σε απότομη μεταβολή του φορτίου με και χωρίς droop του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα

Στην περίπτωση που έχουμε droop στο φωτοβολταϊκό η απόκριση της ισχύος του είναι:



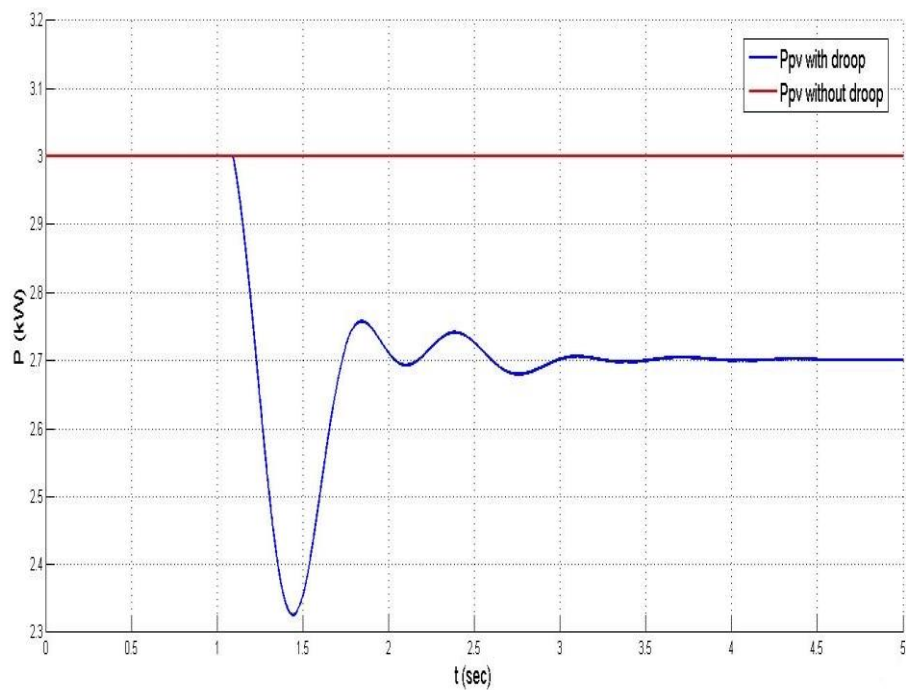
Σχήμα 3.27 Απόκριση ισχύος φωτοβολταϊκού σε απότομη μεταβολή του φορτίου, με droop στο φωτοβολταϊκό

Στην περίπτωση που δεν έχουμε droop στο φωτοβολταϊκό η απόκριση της ισχύος του πρακτικά παραμένει αμετάβλητη και σταθερή με την τιμή που είχε πριν το μεταβατικό φαινόμενο.



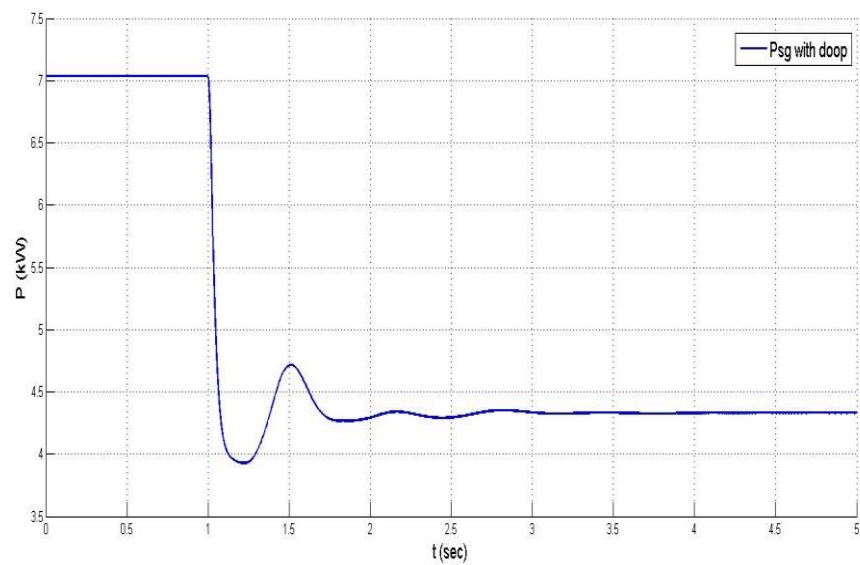
Σχήμα 3.28 Παραγωγή Φωτοβολταϊκού χωρίς droop μετά τη απότομη αλλαγή στο φορτίο

Ακολουθεί κοινό διάγραμμα, για τη μεταβολή της παραγωγής του φωτοβολταϊκού στις δύο περιπτώσεις:



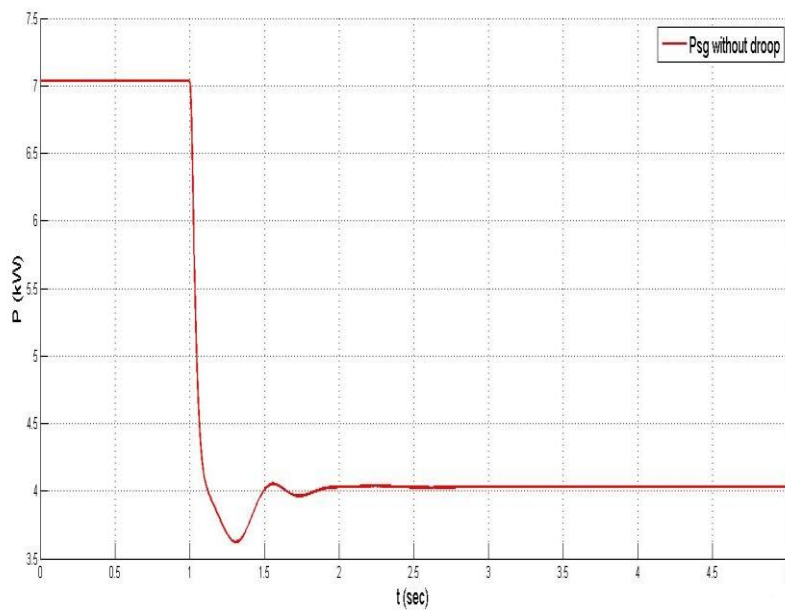
Σχήμα 3.29 Παραγωγή Φωτοβολταϊκού με και χωρίς droop μετά τη απότομη αλλαγή στο φορτίο

Στην περίπτωση που έχουμε droop στο φωτοβολταϊκό η απόκριση της παραγωγής της γεννήτριας είναι:



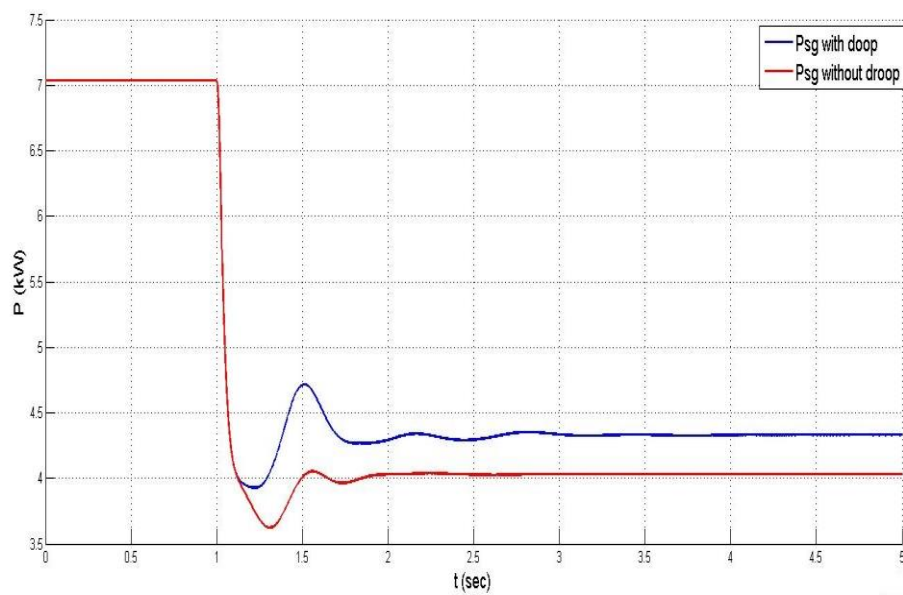
Σχήμα 3.30 Παραγωγή σύγχρονης γεννήτριας με droop μετά τη απότομη αλλαγή στο φορτίο

Στην περίπτωση που έχουμε droop στο φωτοβολταϊκό η απόκριση της ισχύος της γεννήτριας του είναι:



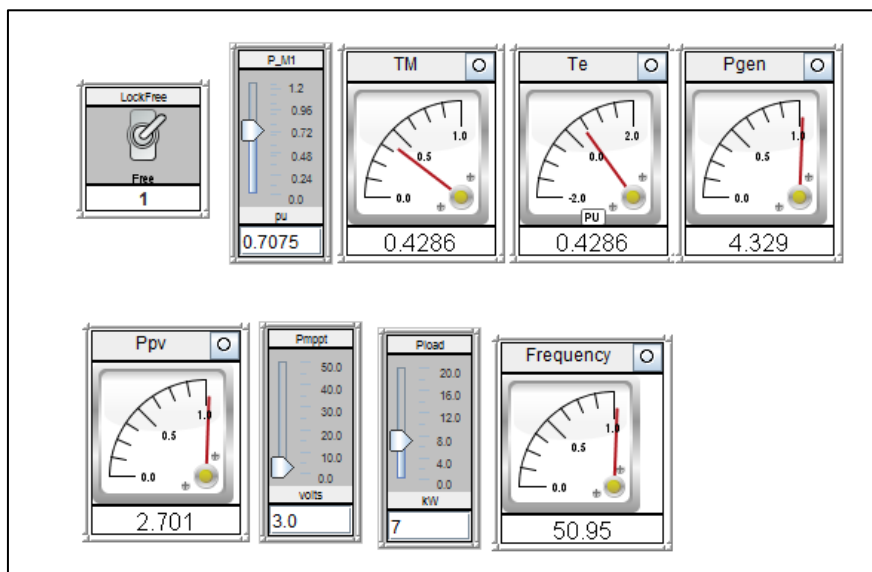
Σχήμα 3.31 Παραγωγή σύγχρονης γεννήτριας με droop μετά τη βηματική αλλαγή στο φορτίο

Ακολουθεί κοινό διάγραμμα, για τις μεταβολές της παραγωγής της σύγχρονης γεννήτριας στις δύο περιπτώσεις:



Σχήμα 3.32 Κοινό διάγραμμα παραγωγής ισχύος της σύγχρονης γεννήτριας με και χωρίς droop μετά τη βηματική αλλαγή στο φορτίο

Οι μετρήσεις που πήραμε για την παραγωγή του φωτοβολταϊκού, της γεννήτριας και τη συχνότητα του δικτύου φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.33 Μετρήσεις στο Runtime

Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι ο έλεγχος droop του φωτοβολταϊκού, συνεισφέρει στη ρύθμιση της συχνότητας, αφού συνεισφέρει στις μικρές μεταβολές της συχνότητας. Χαρακτηριστικά, στο παράδειγμά μας είδαμε ότι με τον έλεγχο droop στο φωτοβολταϊκό η συχνότητα μετά την μεταβολή του φορτίου ισορρόπησε στην τιμή των 50,95 Hz, ενώ όταν το φωτοβολταϊκό λειτουργεί χωρίς καμπύλη droop στην τιμή των 51,05 Hz. Οι πειραματικές τιμές παρατηρούμε ότι ταυτίζονται πλήρως με τους θεωρητικούς υπολογισμούς που πραγματοποιήσαμε. Επίσης σύμφωνα με τα μετρητικά στο RTDS η παραγωγή της γεννήτριας όταν έχουμε droop στο φωτοβολταϊκό είναι 4,3 kW, ίδια με την θεωρητική τιμή.

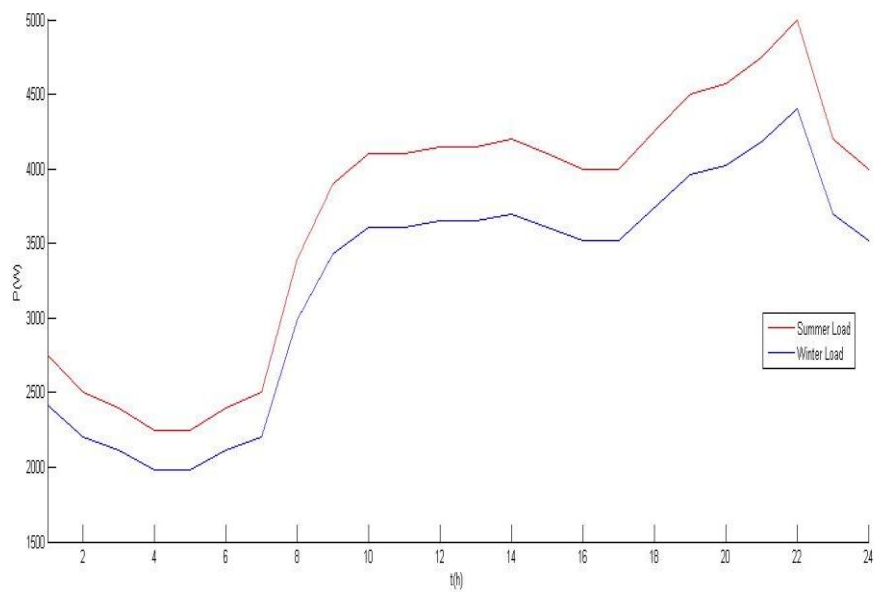
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Προσομοιώσεις και Hardware in Loop Πειράματα (HIL)

4.1 Matlab controller – Έλεγχος ενεργού ισχύος

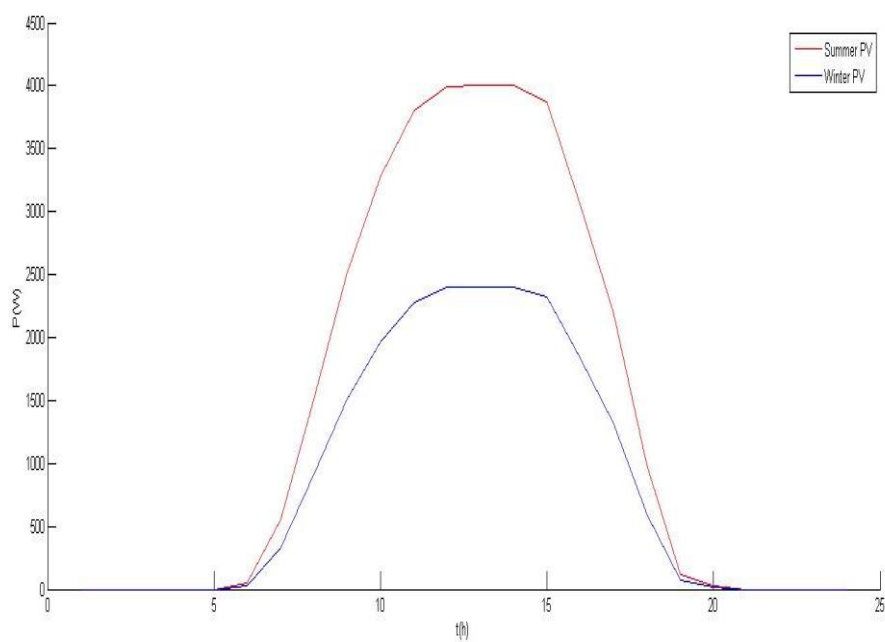
Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι τεχνικές ελέγχου ενός υβριδικού συστήματος σύγχρονης γεννήτριας-φωτοβολταϊκού. Οι δύο πιο σημαντικές και αποδοτικές μέθοδοι, δηλαδή ο έλεγχος ενεργού ισχύος και ο έλεγχος με απορριπτόμενο φορτίο, αναπτύχθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab.

Σαν είσοδο στο πρόγραμμά μας θεωρούμε την ημερήσια καμπύλη φορτίου και τη μέγιστη δυνατή παραγωγή του φωτοβολταϊκού (P_{MPPT}) για κάθε μία ώρα της ημέρας. Η έξοδος του συστήματος είναι η τελική παραγωγή ισχύος της σύγχρονης γεννήτριας και του φωτοβολταϊκού. Για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης θεωρήσαμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις, μία για την καλοκαιρινή και μία για την χειμερινή περίοδο. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται οι καμπύλες φορτίου για τις αντίστοιχες περιπτώσεις. Παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών οι απαιτήσεις του φορτίου είναι μεγαλύτερες από ότι στους χειμερινούς μήνες.



Σχήμα 4.1 Χειμερινή και θερινή ημερήσια καμπύλη φορτίου

Αντιστοίχως, ακολουθεί το σχήμα που περιλαμβάνει την παραγωγή των φωτοβολταϊκών σε κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 4.2 Χειμερινή και θερινή ημερήσια καμπύλη παραγωγής ισχύος του φωτοβολταϊκού

Η πρώτη προσομοίωση αφορά την τεχνική ελέγχου ενεργού ισχύος κατά τα πρότυπα της SMA. Η διαστασιολόγηση του δικτύου επιλέχθηκε με βάση τα εξής κριτήρια:

- 1) Το φορτίο να ανταποκρίνεται στο φορτίο ενός μικρού ελληνικού νησιού
- 2) Η γεννήτρια να είναι ικανή να καλύψει την αιχμή του φορτίου
- 3) Η μέγιστη ισχύς το Φωτοβολταϊκών να είναι το 80% της ονομαστικής ισχύος του φορτίου[18]

Μέγιστη ισχύς φορτίου (Load Peak)	5 kW
Ονομαστική ισχύς των εγκαταστημένων φωτοβολταϊκών	4 kW
Ονομαστική ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας	5,5 kW

Πίνακας 4.1 Διαστασιολόγηση του συστήματος

Όσον αφορά στη γεννήτρια επιλέχθηκε να προσομοιωθεί μια γεννήτρια του εμπορίου [23].

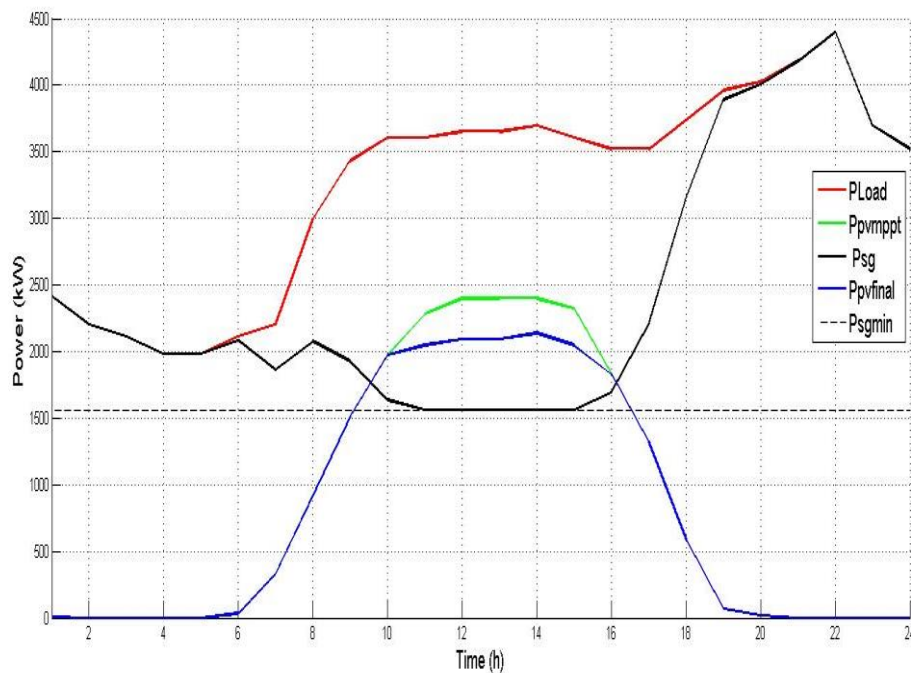
Έτσι λοιπόν η διαστασιολόγηση της γεννήτριας περιλαμβάνει:

Μέγιστη ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας (Load Peak)	5,5 k W
Τεχνικό ελάχιστο	30%
Κατανάλωση καυσίμου σε φορτίο 50%	0.91 Liter/Hour
Κατανάλωση καυσίμου σε φορτίο 75%	1.14 Liter/Hour
Κατανάλωση καυσίμου σε φορτίο 100%	1.23 Liter/Hour

Πίνακας 4.2 Διαστασιολόγηση της γεννήτριας

Χειμερινό Φορτίο

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για χειμερινό φορτίο. Στο διάγραμμα περιλαμβάνονται οι καμπύλες για το ημερήσιο φορτίο, για την παραγόμενη ισχύ της γεννήτριας, για τη μέγιστη φωτοβολταϊκή παραγωγή που μπορεί να εγχυθεί στο δίκτυο, η τελική εγχεόμενη παραγωγή των φωτοβολταϊκών καθώς και η περικοπτόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια.



Σχήμα 4.3 Αποτέλεσμα προσομοίωσης για την τεχνική ελέγχου περικοπής ενεργού ισχύος για χειμερινό φορτίο

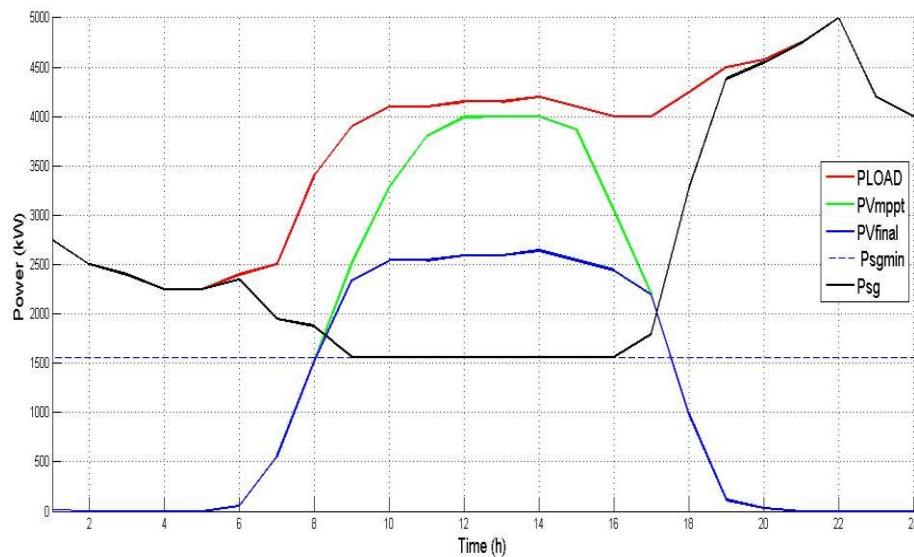
Όπως αναμέναμε, παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι εφόσον η ηλιοφάνεια είναι σχετικά χαμηλή, δεν υπάρχει μεγάλη περικοπή στη παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά. Τα ημερήσια στοιχεία που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι:

- Συνολική ενέργεια φορτίου: 74,84 kWh
- Συνολική ενέργεια γεννήτριας: 55,84 kWh
- Συνολική ενέργεια φωτοβολταϊκού : 19,00 kWh
- Ενέργεια περικοπτόμενη από το φωτοβολταϊκό : 1,38 kWh
- Εξοικονόμηση ενέργειας της γεννήτριας λόγω ενσωμάτωσης των φωτοβολταϊκών: 25,39 %
- Συνολική κατανάλωση καυσίμου: 23,81 λίτρα
- Εξοικονόμηση καυσίμου: 2,3 λίτρα / ημέρα
- Εξοικονόμηση χρημάτων: 2,53 Ευρώ / ημέρα

Θερινό φορτίο

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για θερινό φορτίο. Σε αυτήν την περίπτωση η ηλιακή ακτινοβολία αναμένεται μεγαλύτερη και η συνεισφορά του φωτοβολταϊκού στην εξοικονόμηση καυσίμου ακόμη μεγαλύτερη.

Ταυτόχρονα όμως, αναμένεται ότι θα υπάρχει σημαντική περικοπή στην δυνατή παραγόμενη φωτοβολταϊκή ισχύ.



Σχήμα 4.4 Αποτέλεσμα προσομοίωσης για την τεχνική ελέγχου περικοπής ενεργού ισχύος για θερινό φορτίο

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι πράγματι, από την 8^η έως την 17^η ώρα της ημέρας υπάρχει περικοπή στην παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού, η οποία για να πραγματοποιηθεί πρέπει να σταλούν τα κατάλληλα set points στον φωτοβολταϊκό αντιστροφέα της διάταξής μας.

Τα στοιχεία που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι :

- Συνολική ενέργεια φορτίου: 85,05 kWh
- Συνολική ενέργεια γεννήτριας :60,09 kWh
- Συνολική ενέργεια φωτοβολταϊκού : 33,97 kWh
- Ενέργεια περικοπτόμενη από το φωτοβολταϊκό : 9,01 kWh
- Εξοικονόμηση της ενέργειας της γεννήτριας λόγω ενσωμάτωσης των φωτοβολταϊκών: 29,43%
- Συνολική κατανάλωση καυσίμου : 26 λίτρα
- Εξοικονόμηση καυσίμου: 3,2 λίτρα / ημέρα
- Εξοικονόμηση χρημάτων: 3,52 Ευρώ / ημέρα

Είναι εμφανής η επίδραση του τεχνικού ελαχίστου της γεννήτριας στην τελική παραγωγή του φωτοβολταϊκού. Το όριο αυτό δεν επιτρέπει τη μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, για αυτό η σωστή διαστασιολόγηση του συστήματος είναι εξαιρετικά

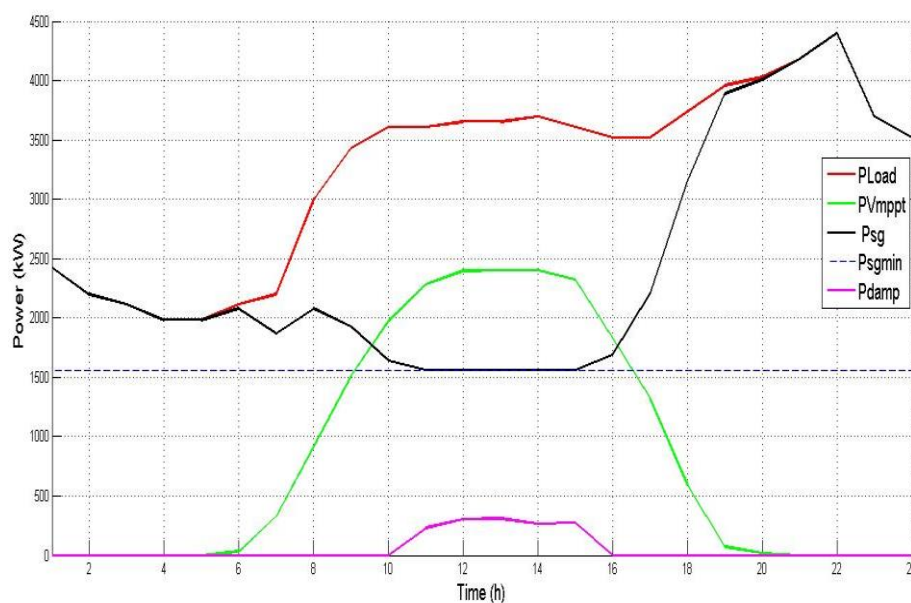
σημαντική, αφού πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι περισσότερη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά δεν συνεπάγεται περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο. Υπάρχει λοιπόν μια τιμή στην εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών, άνω της οποίας ο επενδυτής δεν θα πρέπει να εγκαταστήσει επιπλέον φωτοβολταϊκά.

4.2 Matlab controller – Απόρριψη φορτίου (Damp load)

Στην επόμενη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της απόρριψης φορτίου, στην περίπτωση που παραβιαζόταν ο περιορισμός του τεχνικού ελάχιστου της γεννήτριας. Ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου είναι πανομοιότυπος με την προηγούμενη περίπτωση και παρουσιάζεται παρακάτω.

Χειμερινό Φορτίο

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το χειμερινό φορτίο. Στο διάγραμμα περιλαμβάνονται οι καμπύλες για το ημερήσιο φορτίο, για την παραγόμενη ισχύ της γεννήτριας, για τη μέγιστη φωτοβολταϊκή παραγωγή που μπορεί να εγχυθεί στο δίκτυο καθώς και για την ενέργεια των απορριπτόμενων φορτίων.



Σχήμα 4.5 Αποτέλεσμα προσομοίωσης για την τεχνική ελέγχου περικοπής ενεργού ισχύος για χειμερινό φορτίο

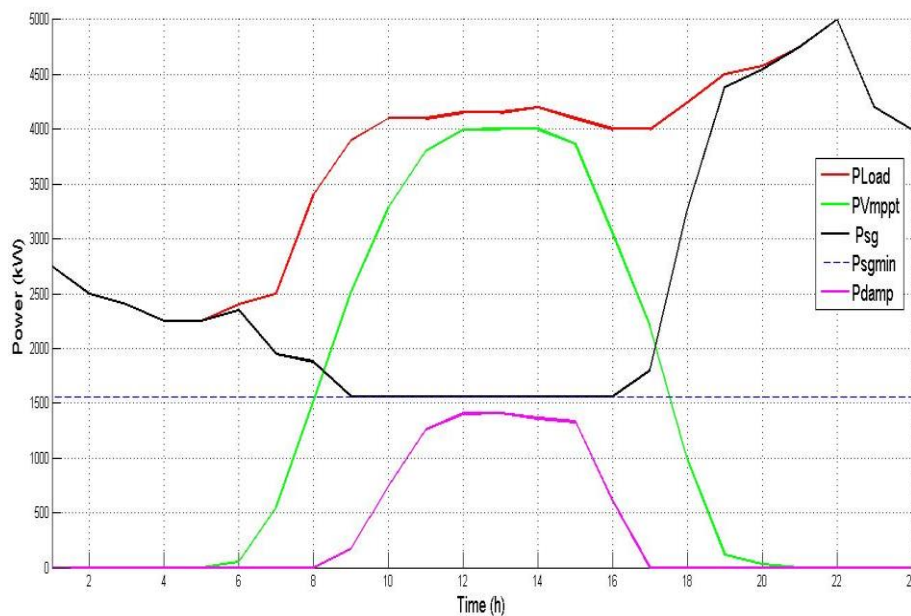
Στην περίπτωση του χειμερινού φορτίου παρατηρούμε ότι όλη η δυνατή ηλιακή ενέργεια απορροφάται από το δίκτυο οπότε δεν υπάρχει απόρριψη φορτίου.

- Συνολική ενέργεια φορτίου: 74,84 kWh
- Συνολική ενέργεια γεννήτριας: 55,84 kWh

- Συνολική ενέργεια φωτοβολταϊκού : 19,00 kWh
- Ενέργεια απορριπτόμενου φορτίου: 1,38 kWh
- Εξοικονόμηση της ενέργειας της γεννήτριας λόγω ενσωμάτωσης των φωτοβολταϊκών: 25,39 %
- Συνολική κατανάλωση καυσίμου :23,81 λίτρα
- Εξοικονόμηση καυσίμου: 2,3 λίτρα / ημέρα
- Εξοικονόμηση χρημάτων: 2,53 Ευρώ / ημέρα

Θερινό φορτίο

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για θερινό φορτίο.



Σχήμα 4.6 Αποτέλεσμα προσομοίωσης για την τεχνική ελέγχου απόρριψης φορτίου για θερινό φορτίο

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι πράγματι, από την 8^η έως την 17^η ώρα της ημέρας, η συνολική παραγωγή ενέργειας ξεπερνάει την ζήτηση, οπότε για να επιτευχθεί το ισοζύγιο ισχύος πρέπει να απορριφθεί η περίσσεια ενέργεια σε κατάλληλα φορτία.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι :

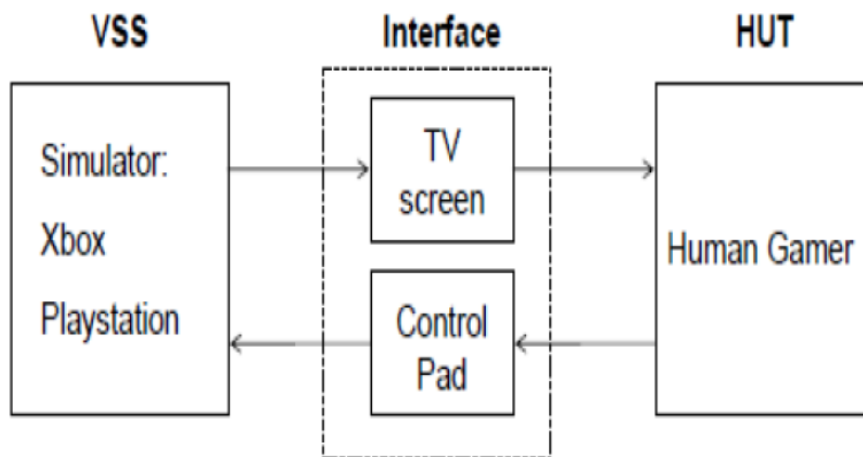
- Συνολική ενέργεια φορτίου: 85,05 kWh
- Συνολική ενέργεια γεννήτριας :60,09 kWh
- Συνολική ενέργεια φωτοβολταϊκού : 29,43 kWh
- Ενέργεια απορριπτόμενου φορτίου : 9,01 kWh

- Εξοικονόμηση της ενέργειας της γεννήτριας λόγω ενσωμάτωσης των φωτοβολταϊκών: 41,53%
- Συνολική κατανάλωση καυσίμου : 26 λίτρα
- Εξοικονόμηση καυσίμου: 3,2 λίτρα / ημέρα
- Εξοικονόμηση χρημάτων: 3,52 Ευρώ / ημέρα

Συμπερασματικά, όπως και αναμέναμε άλλωστε, τα αποτελέσματα από τις δύο τεχνικές ελέγχου είναι πανομοιότυπα και καταδεικνύουν το γεγονός, ότι ο τρόπος απόρριψης της περίσσειας ενέργειας δεν επηρεάζει τη γενικότερη λειτουργία του δικτύου. Και οι δύο τρόποι λειτουργίας, χρήζουν διερεύνησης και επιμέρους ανάλυσης. Ωστόσο, από τις δύο μεθόδους θα διερευνήσουμε σε βάθος, με προσομοιώσεις και πειράματα (PHIL) την τεχνική απόρριψης φορτίου, την οποία και θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια.

4.3 Τεχνικές Hardware in Loop (HIL)

Η Hardware in Loop προσομοίωση είναι μια τεχνική στην οποία ένα κομμάτι εξοπλισμού έχει ενσωματωθεί στην προσομοίωση ενός μεγάλου συστήματος. Αυτό μας προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, τα οποία και δεν τα έχουμε σε περιπτώσεις άλλων αναλύσεων και μεθόδων. Επιτρέπει να διερευνήσουμε μια συσκευή κατ' επανάληψη και ενδελεχώς σε πραγματικές συνθήκες δοκιμής, ακόμη και πολύ πριν την κατασκευή του πραγματικού συστήματος. Αυτό ελαχιστοποιεί το κόστος και τον κίνδυνο, με στόχο να εξεταστούν διάφορες ακραίες συνθήκες και παράλληλα μεγιστοποιεί την πιθανότητα να εντοπιστούν κρυφά ελαττώματα της συσκευής πριν προκαλέσει την οποιαδήποτε βλάβη. Επιπρόσθετα, η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα να αποκαλύψει την πλήρη έκταση των αλληλεπιδράσεων του συστήματος, οι οποίες πρέπει να αναμένονται στο τελικό σχέδιο. Παραδείγματα προσομοίωσης HIL περιλαμβάνουν τη δοκιμή του συστήματος ανάρτησης ενός πρωτότυπου αυτοκινήτου σε προσομοιωμένες συνθήκες ανώμαλου δρόμου. Ένα σύστημα HIL αποτελείται από τρία απαραίτητα μέρη: ένα κομμάτι υλικού υπό δοκιμή (Hardware Under Test-HUT) , ένα προσομοιωμένο σύστημα (Virtually Simulated System-VSS), καθώς και μια συσκευή (interface) που συνδέει το HUT με το VSS. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται ένα παράδειγμα του HIL [24].



Σχήμα 4.7 Παράδειγμα ενός συστήματος HIL [24]

Στην περίπτωση αυτή ο προσομοιωτής, για παράδειγμα ένα XBOX360 μιμείται μια εικονική πολεμική σκηνή που αλλάζει συνεχώς ανάλογα με την αντίδραση του υλικού, δηλαδή του ανθρώπινου χρήστη. Όταν ο χρήστης λάβει την εικόνα μέσω της οθόνης 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.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωμένα μερικοί από τους λόγους που μπορεί να επιβάλουν τη χρήση της τεχνικής HIL.

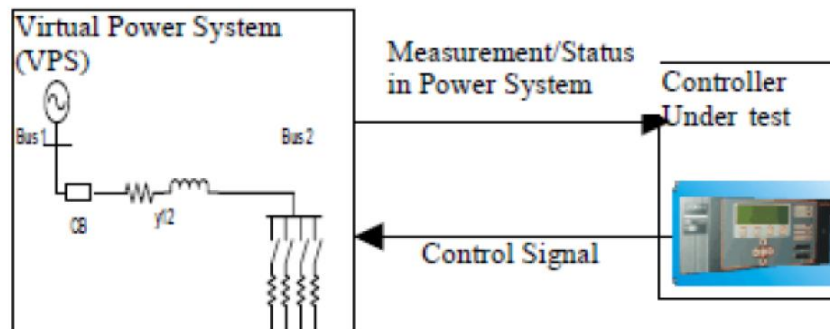
- Το σύστημα είναι δυσπρόσιτο. Για παράδειγμα, ένας δορυφόρος που έχει σχεδιαστεί, για να λειτουργεί στο περιβάλλον μηδενικής βαρύτητας του διαστήματος, δεν μπορεί να δοκιμαστεί κάτω από τις συνθήκες που επικρατούν στη Γη. Ο μόνος τρόπος είναι να μοντελοποιηθεί η δυναμική του δορυφόρου και να ασκηθεί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

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

Control Hardware In Loop

Σε περιπτώσεις που δεν έχουμε μεταφορά ενέργειας από ή προς το υλικό υπό δοκιμή, τότε η δοκιμή είναι μια Control Hardware In Loop προσομοίωση. Σε μια τέτοια 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 $\pm 10\text{V}$ και γίνεται ανταλλαγή ψηφιακών/αναλογικών σημάτων. Με αυτό τον τρόπο, ο ελεγκτής θα μπορούσε να δοκιμαστεί με τη λήψη σήματος εξόδου από την προσομοίωση και τη χρησιμοποίησή του ως είσοδο σε μια συσκευή υπό δοκιμή. Έπειτα η έξοδος της συσκευής υπό δοκιμή ανατροφοδοτεί την προσομοίωση, με αποτέλεσμα την αλληλεπίδρασή της με το προσομοιωμένο σύστημα. Η δομή αυτού του τύπου δοκιμής φαίνεται στην εικόνα, ενώ στην επόμενη εικόνα βλέπουμε τη γενική τοπολογία του CHIL.



Σχήμα 4.8 Παράδειγμα ενός συστήματος CHIL [24]

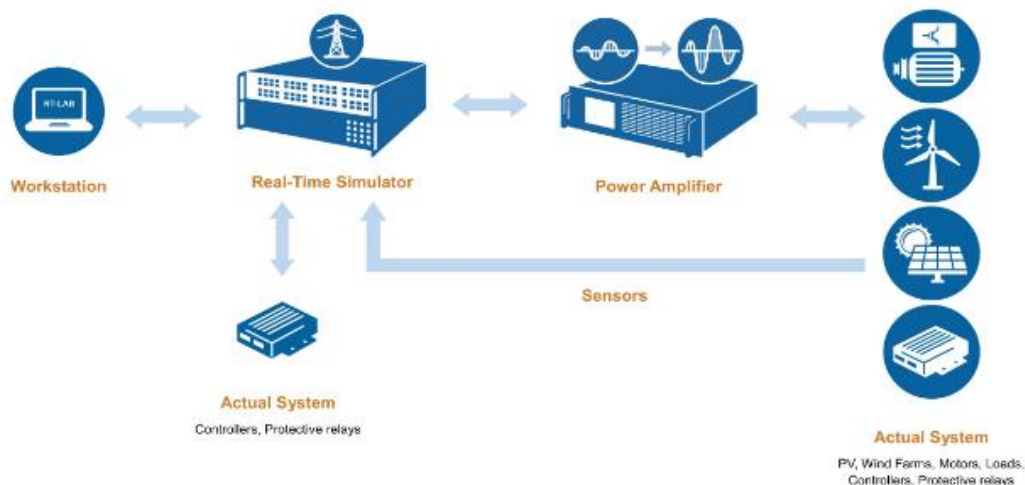
Μέσω αυτού του τύπου ελέγχου δίνεται η δυνατότητα βασικής αξιολόγησης της απόδοσης μιας συσκευής πριν αυτή πραγματικά συνδεθεί με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Εξοπλισμός προστασίας, ο έλεγχος ενός κινητήρα και οι PWM ελεγκτές είναι κατάλληλοι για μια δοκιμή CHIL. Τέλος, η χρήση της τεχνικής CHIL επιτρέπει πολλαπλά σενάρια δοκιμής, χωρίς να γίνει μεγάλη επένδυση.

Power hardware in loop

Η Power Hardware In Loop είναι η δεύτερη τεχνική HIL. Αναφέρεται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το δοκίμιο (Hardware Under Test – HUT) είναι μια συσκευή ισχύος, για παράδειγμα ένας κινητήρας ή ένας αντιστροφέας ισχύος. Απαραίτητη είναι σ' αυτήν την περίπτωση η χρήση μιας συσκευής (interface) για τη διακίνηση της ισχύος ανάμεσα στο δοκίμιο και την προσομοίωση.

Η PHIL τεχνική εφαρμόζεται στις περιπτώσεις που υπάρχει μεταφορά ισχύος από ή προς το υπό εξέταση υλικό. Με αυτό τον τρόπο, μέρος του συστήματος ισχύος προσομοιώνεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και 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 στην παρακάτω εικόνα:



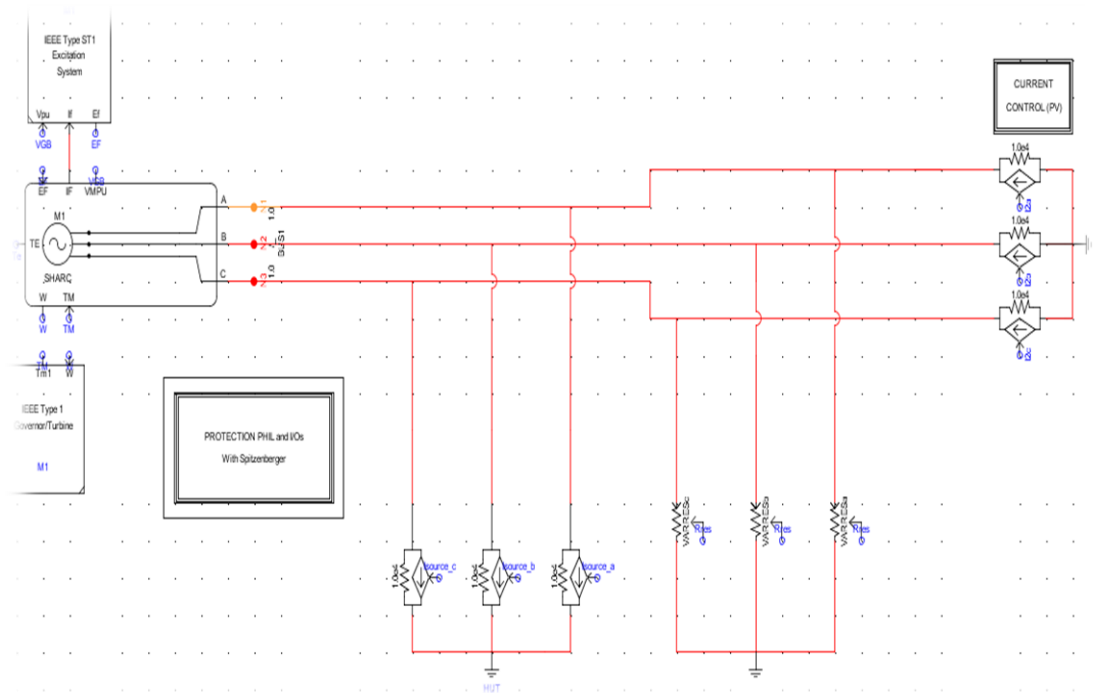
Σχήμα 4.9 Παράδειγμα ενός συστήματος PHIL [24]

4.4 Πείραμα PHIL

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήσαμε προσομοίωση PHIL για ένα μη διασυνδεδεμένο δίκτυο που περιλαμβάνει σύγχρονη γεννήτρια, φωτοβολταϊκές διατάξεις, φορτία αλλά και ελεγχόμενα φορτία ως μέθοδο ελέγχου ενεργού ισχύος. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ιδρύματός μας υπό την επίβλεψη του υπευθύνου. Στη συνέχεια θα περιγραφεί η διαδικασία διεξαγωγής του πειράματος, η διάταξη, οι διάφορες επικοινωνίες μεταξύ των επιμέρους συστημάτων καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Ακόμη θα περιγραφεί ο έλεγχος ευστάθειας που πραγματοποιήθηκε στο RSCAD πριν τη διεξαγωγή του πειράματος, ο οποίος εξασφάλιζε την ευστάθεια του συστήματος ακόμη και για μεγάλες τιμές ισχύος. Επίσης θα αναλυθεί η μέθοδος που αναπτύχθηκε για την ενεργοποίηση των φορτίων στο SCADA. Ο αλγόριθμος που επιτελεί αυτήν την λειτουργία παρουσιάζεται στο παράρτημα της εργασίας.

4.4.1 Διάταξη προσομοίωσης PHIL

Το μοντέλο (Simulated Circuit) που δημιουργήθηκε στο RSCAD για τη διεξαγωγή του πειράματος είναι το εξής:



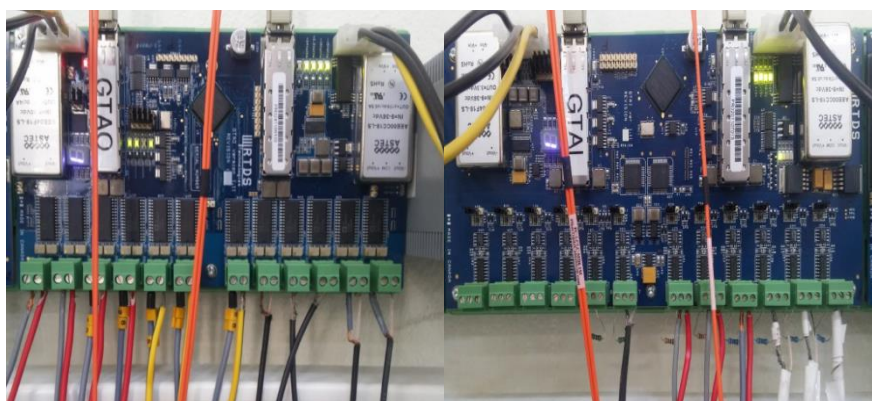
Σχήμα 4.10 Μοντέλο διεξαγωγής πειράματος

Παρατηρούμε ότι στο μοντέλο το HUT (Hardware Under Test) υλοποιείται ουσιαστικά μέσω εξαρτημένων πηγών ρεύματος, και προσομοιώνει το Damp Load, δηλαδή το απορριπτόμενο φορτίο που εξασφαλίζει το ισοζύγιο ενεργού ισχύος. Δεξιά από το HUT υπάρχει τριφασικό ελεγχόμενο φορτίο που υλοποιείται μέσω μεταβλητής αντίστασης, το οποίο ελέγχεται από το RUNTIME του RSCAD και προσομοιώνει το φορτίο την κάθε ώρα της ημέρας. Η παραγωγή του φωτοβολταϊκού, επίσης προσομοιώνεται μέσω εξαρτημένων πηγών ρεύματος. Τέλος, υπάρχει ένα επιπλέον block που περιέχει τις απαραίτητες προστασίες σε περίπτωση σφάλματος καθώς και τα κατάλληλα blocks I/O για την επικοινωνία του RTDS με τον ενισχυτή ισχύος Spitzenberger and Spies. Ο ενισχυτής είναι αυτός που μετατρέπει τα “control” σήματα του RTDS σε “power” σήματα.



Εικόνα 4.1 Ενισχυτής ισχύος του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι κάρτες εισόδου-εξόδου του RTDS με τον ενισχυτή, βρίσκονται εξωτερικά της διάταξης και φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 4.2 Κάρτες εισόδου και εξόδου από το RTDS στον ενισχυτή ισχύος

Ο ενισχυτής στη συνέχεια συνδέεται στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου το οποίο πλέον βρίσκεται σε απομονωμένη λειτουργία (islanded mode). Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το μικροδίκτυο το οποίο έχει απομονωθεί από το κεντρικό δίκτυο στα πλαίσια διεξαγωγής του πειράματος.



Εικόνα 4.3 Μικροδίκτυο Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τέλος στο μικροδίκτυο συνδέονται και τα φορτία, τα οποία στο πείραμα μας αποτελούν το απορριπτόμενο φορτίο και ενεργοποιούνται μέσω του αλγορίθμου που θα περιγράψουμε παρακάτω.



Εικόνα 4.4 Ελεγχόμενα φορτία στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Επικοινωνία των επιμέρους στοιχείων του συστήματος

Σε ένα πείραμα PHIL είναι απαραίτητη η επικοινωνία των επιμέρους συστημάτων. Αρχικά ο ελεγκτής ο οποίος έχει προγραμματισθεί στο Matlab, επικοινωνεί με το RTDS μέσω μιας διεύθυνσης I.P και έτσι εξασφαλίζεται αμφίδρομη ανταλλαγή δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε άμεσα να διαβάσουμε τιμές που υπάρχουν στα μετρητικά του RTDS καθώς και επίσης να ελέγχουμε μέσω sliders τις τιμές σε διάφορα στοιχεία του δικτύου. Στη συνέχεια το RTDS επικοινωνεί με τον ενισχυτή μέσω των καρτών εισόδου/εξόδου. Επίσης, έχει εξασφαλιστεί η επικοινωνία του ελεγκτή με το σύστημα SCADA του εργαστηρίου μέσω του οποίου ελέγχονται τα φορτία. Παρακάτω γίνεται αναφορά στα συστήματα SCADA και της μεθόδου ελέγχου που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο των φορτίων.

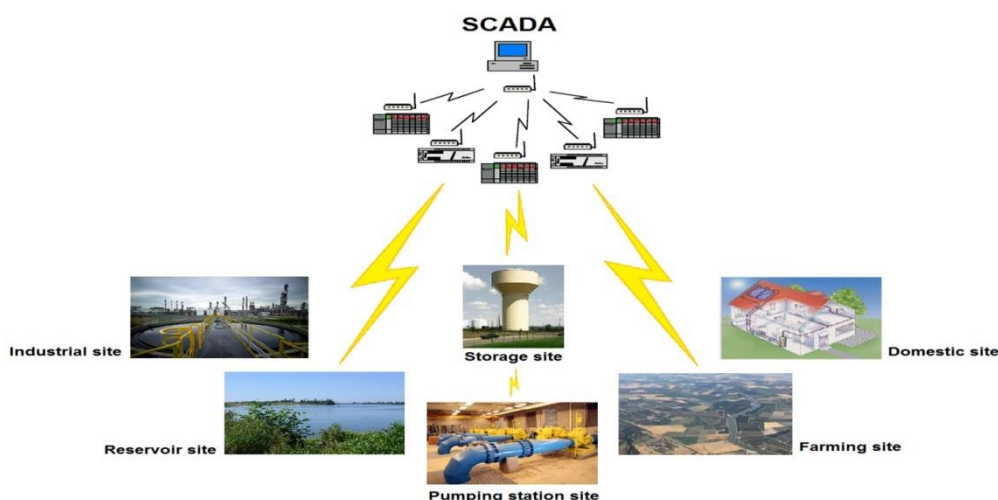
Ελεγκτής (controller)

Ο ελεγκτής του συστήματος, είναι αυτός που δέχεται δεδομένα από το SCADA και αναλόγως «αποφασίζει» αν θα πρέπει να ενεργοποιηθεί το damp load και να στείλει το κατάλληλο set point στο SCADA. Αφού σταλεί το set point, με ένα μετρητικό ρεύματος (αμπεροτσιμπίδα) μετριέται το ρεύμα στην είσοδο του ενισχυτή, το οποίο στη συνέχεια και μέσω της κάρτας εισόδου, φτάνει στο δίκτυο του RSCAD και γίνεται κατάλληλο σήμα για τις ελεγχόμενες πηγές ρεύματος που υλοποιούν τη λειτουργία του damp load στη διάταξή μας. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ο ελεγκτής είναι ταυτόχρονα «υπεύθυνος» για την επικοινωνία όλων των επιμέρους διατάξεων.

4.4.2 Πρόγραμμα ελέγχου φορτίων μέσω PLC (SCADA)

Ο όρος SCADA είναι ακρωνύμιο του όρου Supervisory Control And Data Acquisition, που σημαίνει Εποπτικός Έλεγχος και Συλλογή Δεδομένων. Ένα τέτοιο σύστημα επιτρέπει στον χειριστή να εποπτεύει και να ελέγχει διεργασίες οι οποίες βρίσκονται καταναμεμημένες μεταξύ διαφόρων απομακρυσμένων σημείων [25].

Ένα σύστημα SCADA δεν είναι ένα πλήρες σύστημα ελέγχου, αλλά εστιάζει κυρίως στην εποπτεία. Οι λειτουργίες που επιτελεί ένα τέτοιο σύστημα είναι η συλλογή των πληροφοριών, η αποστολή τους σε ένα κεντρικό σημείο επεξεργασίας, η εκτέλεση της απαραίτητης ανάλυσης και ελέγχου και τέλος η παρουσίαση της πληροφορίας σε διάφορες οθόνες χειρισμού και εποπτείας, σε πραγματικό χρόνο ή κατ' απαίτηση. Ο έλεγχος μπορεί να είναι αυτόματος, ή να ενεργοποιείται κατόπιν εντολής του χειριστή.

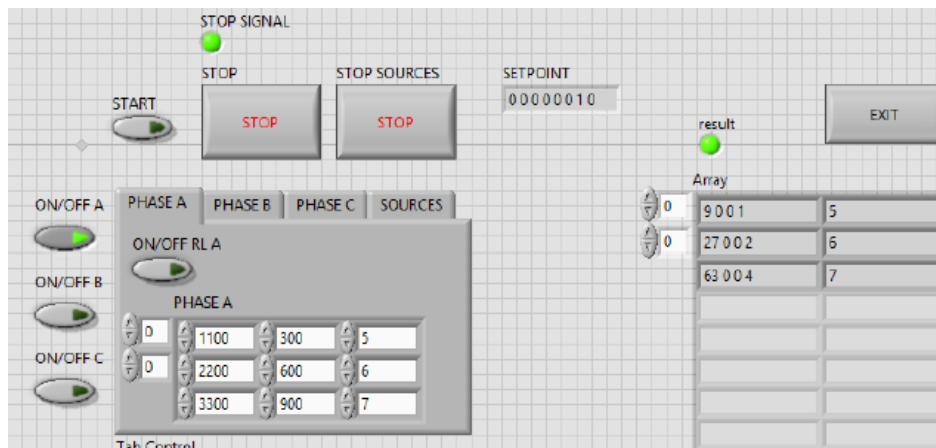


Σχήμα 4.11 Εφαρμογές ενός συστήματος SCADA [25]

Ένα σύστημα SCADA επιτρέπει στους χειριστές να ελέγχουν και να παρατηρούν διαδικασίες με μεγάλη τοπολογική διανομή, από μια κεντρική τοποθεσία. Τα πλεονεκτήματα ενός SCADA γίνονται περισσότερο ορατά όταν μια διαδικασία ή ένα σύστημα καλύπτει μια μεγάλη γεωγραφική έκταση. Αντί να αποστέλλεται προσωπικό σε διάφορα σημεία για μετρήσεις και ρυθμίσεις, η εποπτεία και ο έλεγχος όλου του συστήματος μπορούν να πραγματοποιηθούν από μια τοποθεσία, και κυρίως με μεγάλες ταχύτητες απόκρισης.

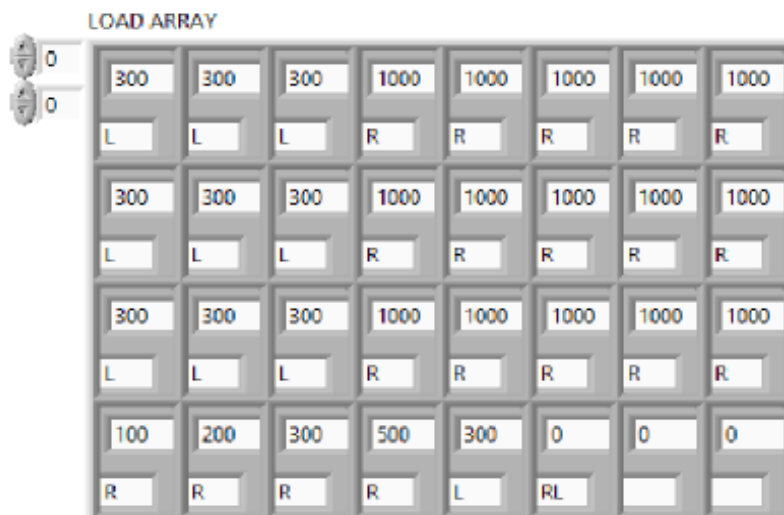
Ένα από τα πιο απαιτητικά προγράμματα του SCADA είναι το πρόγραμμα ελέγχου και φορτίων που αφορά το προγραμματισμό της *καμπύλης φορτίου*. Όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί, η γενική ιδέα του προγράμματος είναι ο προγραμματισμός από το χρήστη ενός πίνακα τριών στηλών που αποτελεί την καμπύλη φορτίου και τους αντίστοιχους χρονισμούς. Η πρώτη στήλη είναι η ενεργός ισχύς, η δεύτερη η άεργος ισχύς και η τρίτη στήλη αφορά τους χρονισμούς σε δευτερόλεπτα, δηλαδή πόση διάρκεια θέλουμε να έχει το εκάστοτε φορτίο. Επίσης υπάρχει κουμπί για τον έλεγχο του RL φορτίου (ON/OFF RL A)

καθώς και κουμπί ελέγχου για την κάθε φάση (ON/OFF PHASE A). Αφού συμπληρωθεί ο πίνακας υλοποιείται η μετατροπή του πίνακα της ισχύος σε πίνακα που να μπορεί να διαβαστεί από το PLC όπως φαίνεται στον πίνακα ARRAY. Μέχρι να πατηθεί το κουμπί START το πρόγραμμα δεν στέλνει καμία τιμή στο PLC. Το SETPOINT μας δείχνει την τρέχουσα επιθυμητή τιμή ενώ αργότερα θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο γίνονται οι παραπάνω μετατροπές [26].



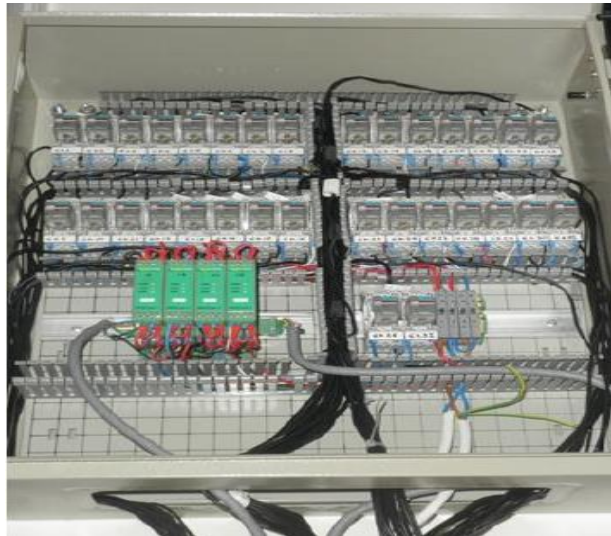
Σχήμα 4.12 Στιγμιότυπο από την οθόνη του SCADA του εργαστηρίου [26]

Ο τύπος κάθε φορτίου, η ισχύς του αλλά και η θέση του φαίνεται παρακάτω. Η πρώτη και η τελευταία σειρά του πίνακα ανταποκρίνονται στη φάση A, ενώ τα φορτία της δεύτερης και τρίτης σειράς, στις φάσεις B και C αντιστοίχως.



Σχήμα 4.13 Πίνακας με τα φορτία κάθε φάσης στο πρόγραμμα LabView [26]

Ο πίνακας έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε κελί του να ταιριάζει με το αντίστοιχο ρελέ της επόμενης φωτογραφίας. Επιπλέον, κάθε σειρά ρελέ αντιστοιχεί σε διαφορετική ψηφιακή κάρτα.



Εικόνα 4.5 Πίνακας με τους ηλεκτρονόμους (ρελέ) των φορτίων κάθε φάσης

Το πρόγραμμα ελέγχου φορτίου θα χρησιμοποιηθεί στο πείραμα που θα εκτελέσουμε για την απόρριψη φορτίου. Θα δίνονται set point για την ισχύ του φορτίου που θέλουμε να απορρίψουμε και μέσω της διαδικασίας που θα περιγράψουμε παρακάτω θα ενεργοποιείται το φορτίο ή ο συνδυασμός φορτίων που ικανοποιούν τη συνθήκη που έχουμε ορίσει.

Τώρα θα αναλυθεί βήμα-βήμα η διαδικασία αυτή με ένα απλό παράδειγμα. Σε πρώτο στάδιο δημιουργήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα στο Matlab που υλοποιεί το διαχωρισμό του πίνακα των αντιστάσεων, πηνίων και RL φορτίων ανάλογα με αυτά που μας χρησιμεύουν. Δεδομένου ότι ο έλεγχος μας αφορά την ενεργό ισχύ, μας ενδιαφέρουν μόνο τα φορτία R ενώ ταυτόχρονα υποθέτουμε ότι δουλεύουμε στη φάση A.

Σε πρώτη φάση, όποια φορτία δεν είναι R, μηδενίζονται και δεν λαμβάνονται υπόψιν. Έτσι η νέα μορφή του πίνακα είναι:

ΦΑΣΗ	0	0	0	1000	1000	1000	1000	1000
A	L	L	L	R	R	R	R	R
ΦΑΣΗ	0	0	0	1000	1000	1000	1000	1000
C	L	L	L	R	R	R	R	R
ΦΑΣΗ	0	0	0	1000	1000	1000	1000	1000
B	L	L	L	R	R	R	R	R
ΦΑΣΗ	100	200	300	500	0	0	0	0
A	R	R	R	R	L	RL	-	-

Εφόσον, θα ασχοληθούμε μόνο με τη φάση A, ταξινομούμε τα R φορτία σε αύξουσα σειρά και δημιουργείται ο παρακάτω πίνακας:

100	200	300	500	1000	1000	1000	1000	1000
-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------

Ο παρακάτω πίνακας είναι η είσοδος σε ένα υποπρόγραμμα, το οποίο επίσης σχεδιάστηκε στο Matlab. Η λειτουργία αυτού του προγράμματος είναι να δέχεται σαν είσοδο ένα set point, δηλαδή μια τιμή ισχύος για το φορτίο, καθώς και τον παραπάνω πίνακα. Έξοδος του υποπρογράμματος είναι ο ελάχιστος αριθμός φορτίων που καλύπτουν το set point, φορτία τα οποία στέλνονται στο αρχικό μας πρόγραμμα.

Για παράδειγμα, αν το set point που δοθεί στο υποπρόγραμμα είναι 800 (Watt):

Set point = 800	Συνδυασμός Φορτίων	Αποτέλεσμα
	500+300	✓
	500+200+100	✗

Αυτή η τεχνική ελέγχου πραγματοποιήθηκε, ώστε να γίνεται σωστή διαχείριση των διαθέσιμων φορτίων, με άμεσο σκοπό την αποφυγή περιττής καταπόνησής τους. Επίσης σε περίπτωση που το υποπρόγραμμά μας δεχτεί set point που δεν δύναται να εξυπηρετηθεί από τα διαθέσιμα φορτία, το set point στρογγυλοποιείται στην πλησιέστερη εκατοντάδα. Έτσι θα προκύπτει:

Set point (Watt)	Διαθέσιμο set point (Watt)
856	900
743	700
56	100

Το υποπρόγραμμα έχει υλοποιηθεί έτσι ώστε να διαλέγει τον πιο κοντινό συνδυασμό αντιστάσεων χωρίς όμως να ξεπερνούν την επιθυμητή τιμή ισχύος. Έστω ότι το φορτίο που δεν είναι διαθέσιμο είναι τα 100 Watt. Σε περίπτωση που το set point από τον χρήστη ορισθεί στα 400 Watt, το φορτίο δεν δύναται να εξυπηρετηθεί. Έτσι διαλέγεται το αμέσως επόμενο διαθέσιμο που είναι τα 300 Watt. Επίσης υπάρχει ένδειξη σφάλματος αν διαπιστωθεί ότι η δοθείσα επιθυμητή τιμή ισχύος ξεπερνά τις δυνατότητες του εργαστηρίου. Αν ζητηθούν από το πρόγραμμα 7000W θα έχει ως έξοδο το ERROR και μηδενικές τιμές στους πίνακες.

Όπως αναφέραμε το κυρίως μας πρόγραμμα, δέχεται σαν είσοδο (έξοδο του υποπρογράμματος) το συνδυασμό φορτίων που ικανοποιούν το set point. Εν συνεχεία δημιουργείται ο παρακάτω πίνακας (για λόγους πληρότητας εμφανίζονται και οι φάσεις B,C), στον οποίο κάτω από κάθε φορτίο υπάρχει η ένδειξη '0'. Σε αυτόν τον πίνακα, γίνεται

σειριακή αναζήτηση και σε όποιο φορτίο περιέχεται στο συνδυασμό φορτίων (που στάλθηκαν από το υποπρόγραμμα) η ένδειξη '0' γίνεται '1'.

0	0	0	1000	1000	1000	1000	1000
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1000	1000	1000	1000	1000
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1000	1000	1000	1000	1000
0	0	0	0	0	0	0	0
100	200	300	500	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Κάνοντας χρήση του προηγούμενου παραδείγματος, αν το set point που σταλεί είναι 800 Watt το υποπρόγραμμά μας θα επιστρέψει στο κυρίως πρόγραμμα τα φορτία 500,300. Έτσι, ο παραπάνω πίνακας γίνεται:

0	0	0	1000	1000	1000	1000	1000
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1000	1000	1000	1000	1000
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1000	1000	1000	1000	1000
0	0	0	0	0	0	0	0
100	200	300	500	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0

Οι σειρές που βρίσκονται κάτω από τις σειρές των φορτίων σχηματίζουν έναν δυαδικό αριθμό που αποτελείται από 8 bits. Ο αριθμός αυτός μετατρέπεται στον αντίστοιχο δεκαδικό. Έτσι έχουμε:

Σειρά 1	0 0 0 0 0 0 0 0	0
Σειρά 2	0 0 0 0 0 0 0 0	0
Σειρά 3	0 0 0 0 0 0 0 0	0
Σειρά 4	0 0 1 1 0 0 0 0	12

Τελικώς, δημιουργείται έναν 8ψήφιος αριθμός, που είναι ο αριθμός που θα σταλεί σαν set point στο PLC. Ο αριθμός αυτός αποτελείται από το φορτίο που πρέπει να

ενεργοποιηθεί στην κάθε φάση (τα 4 πρώτα ψηφία) και από την πηγή που πρέπει να ενεργοποιηθεί (4 τελευταία ψηφία), λειτουργία που δεν μας απασχολεί στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Στο παράδειγμά μας, ο αριθμός αυτός θα ήταν: **00012000**.

Αντιστοίχως προκύπτει ότι για φορτίο 1100 Watt, στην φάση A, ο αριθμός θα ήταν: **8001000**.

Όλα τα δεδομένα που υπάρχουν στο SCADA καταγράφονται σε μια βάση δεδομένων η οποία ανανεώνεται συνεχώς. Έτσι, για να μπορούμε ανά πάσα στιγμή να διαβάσουμε μια τιμή η οποία μας ενδιαφέρει από τη βάση, δημιουργήσαμε στο Matlab μια κατάλληλη συνάρτηση. Στο πείραμα PHIL που πραγματοποιήσαμε, η τιμή που διαβάζαμε από το SCADA είναι η τιμή του φορτίου, την οποία είχαμε στείλει σαν set point προηγουμένως.

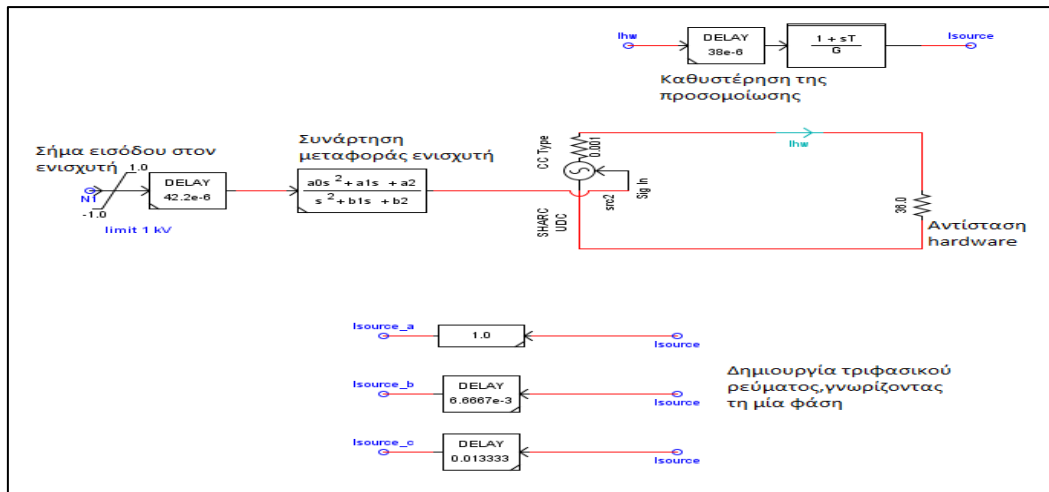
4.4.3 Εκτέλεση πειράματος

Πριν την εκτέλεση του πειράματος, για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος μας, πραγματοποιήσαμε έλεγχο ευστάθειας ο οποίος περιγράφεται παρακάτω.

Ευστάθεια σε ένα πείραμα PHIL

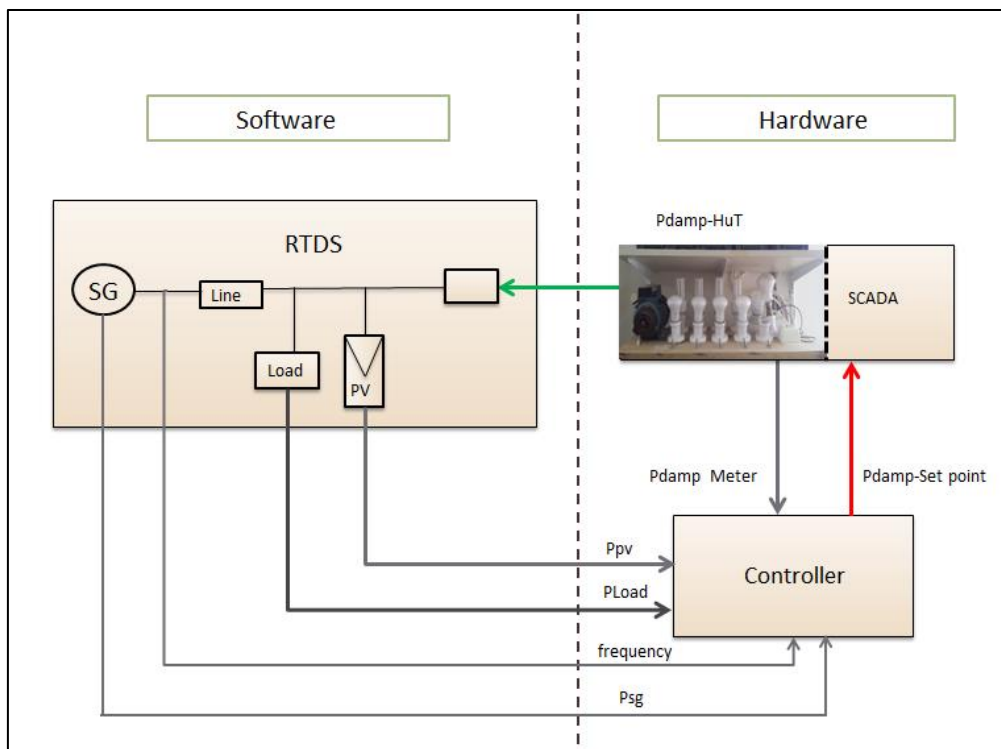
Το πιο σημαντικό κομμάτι για την πραγματοποίηση μιας PHIL προσομοίωσης είναι η μελέτη της ευστάθειας του συστήματος κλειστού βρόχου. Όπως αναφέραμε και παραπάνω η χρονική καθυστέρηση που εισάγεται από τον ενισχυτή (ο χρόνος που χρειάζεται για να ενισχύσει την τάση) από τα όργανα καθώς και από τον ψηφιακό προσομοιωτή πραγματικού χρόνου (RTDS), η εισαγωγή ανώτερων αρμονικών από την ενίσχυση και το περιορισμένο εύρος ζώνης του μπορούν να επηρεάσουν την ευστάθεια του συστήματος οδηγώντας ακόμα και ευσταθή συστήματα σε αστάθεια. Μια εξήγηση για αυτό το φαινόμενο δίνεται υπό την προϋπόθεση ότι η προσομοίωση γίνεται σε διακριτό χρόνο, όπως και γίνεται σε όλα τα πειράματα πραγματικού χρόνου.

Η μελέτη ευστάθειας που πραγματοποιήσαμε πριν την έναρξη των πειραμάτων περιελάμβανε τη συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή Spitzenberger and Spies καθώς και μια αντίσταση, η οποία είχε αρκετά μικρή τιμή (η οποία αντιστοιχούσε στη μέγιστη ισχύ που θα προσομοιωθεί στο πείραμα), ώστε να εξασφαλίσουμε ότι το σύστημα είναι ευσταθές ακόμη και για μια μεγάλη τιμή της ισχύος. Το block το οποίο περιλαμβάνει τον έλεγχο ευστάθειας στο RTDS είναι:



Σχήμα 4.14 Block ελέγχου ευστάθειας του συστήματος

Η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε φαίνεται αναλυτικά στην εικόνα που ακολουθεί:



Σχήμα 4.15 Διάταξη προσομοίωσης PHIL

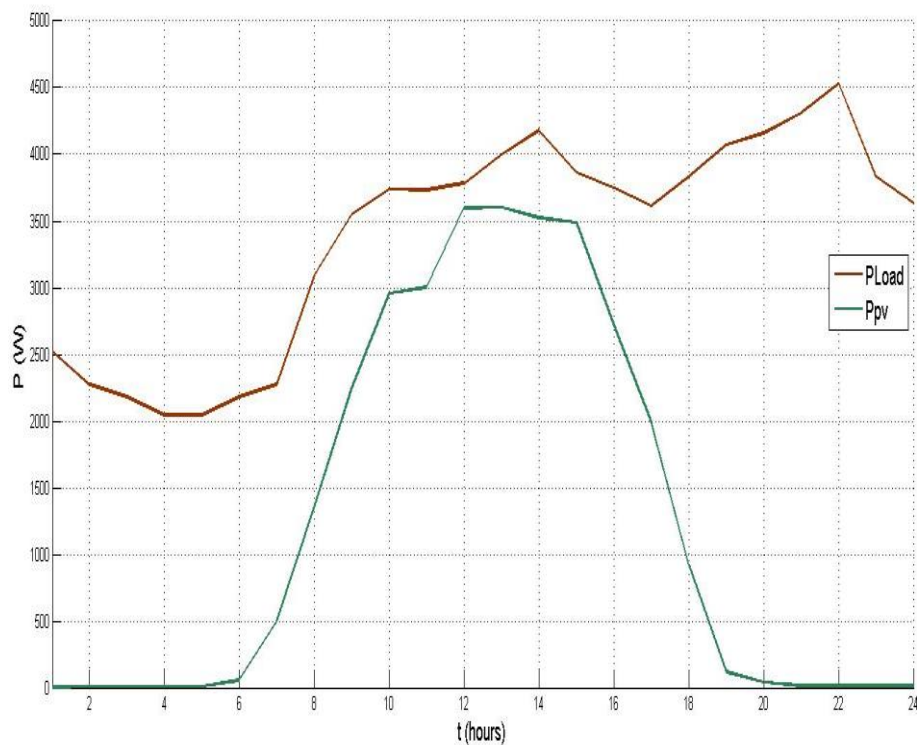
Εκτέλεση του πειράματος

Η διαστασιολόγηση του συστήματος έχει ως εξής:

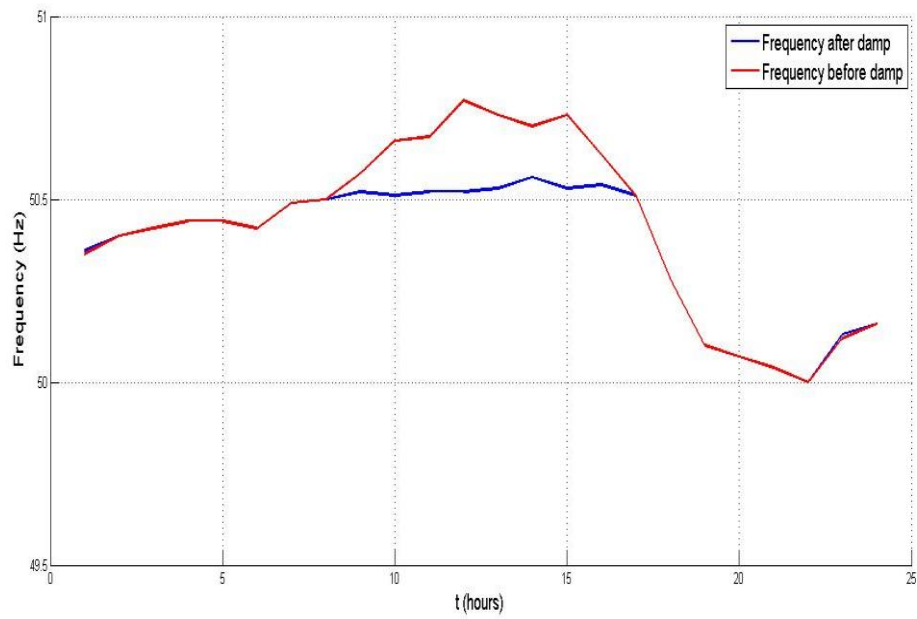
- Ισχύς σύγχρονης γεννήτριας : 5400 kW
- Μέγιστη ισχύς φωτοβολταϊκών : 3600 kW
- Αιχμή φορτίου : 4500 kW
- Τεχνικό ελάχιστο γεννήτριας : 30% της ονομαστικής τιμής

Η προσομοίωση αφορά τη συμπεριφορά ενός μη διασυνδεδεμένου δικτύου στη διάρκεια μιας ημέρας, με έντονη ηλιοφάνεια, ώστε να εμφανισθεί φαινόμενο που έχουμε περίσσεια ενέργειας, η οποία θα απορριφθεί στη συνέχεια στα κατάλληλα φορτία. Ο ελεγκτής μας, λοιπόν δέχεται πληροφορίες για το φορτίο τη δεδομένη στιγμή καθώς και για την ηλιοφάνεια και μέσω ενός αλγορίθμου υπολογίζει αν θα πρέπει ή όχι να προχωρήσει σε ενεργοποίηση set point μέσω SCADA, το οποίο θα συμβάλλει στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος. Στην περίπτωση που ενεργοποιηθεί το set point, διαβάζεται ξανά η τιμή του μέσω της βάσης δεδομένων του SCADA και στη συνέχεια διαβάζονται όλες οι τιμές των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν μέσω του Runtime του RTDS. Οι τιμές αυτές αποθηκεύονται από τον ελεγκτή. Επίσης, θεωρήσαμε ότι στα 50 Hz η γεννήτρια εξυπηρετεί το ονομαστικό φορτίο.

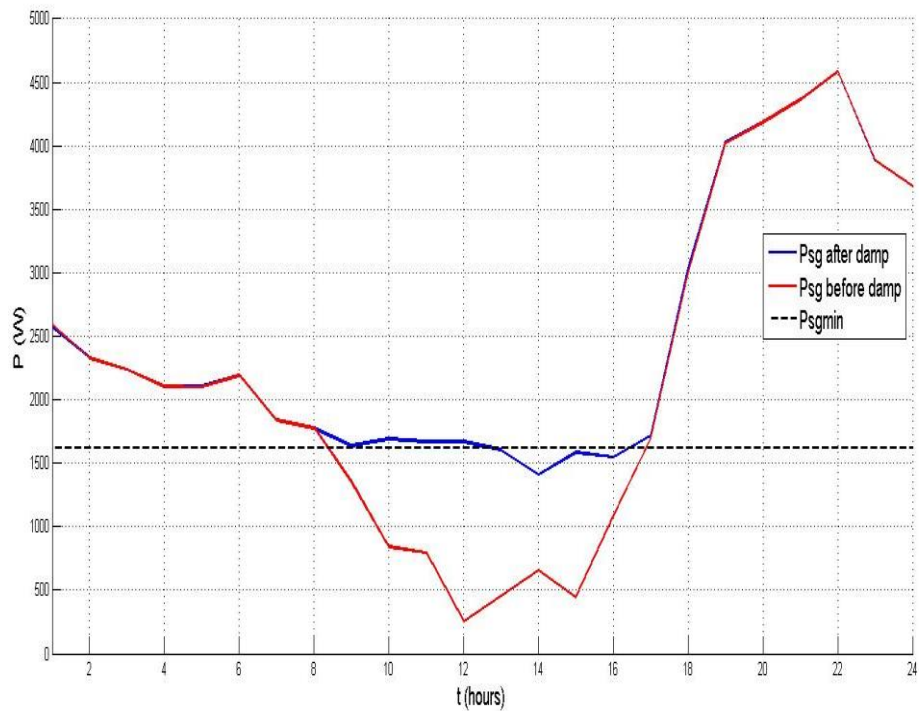
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν από το πείραμα.



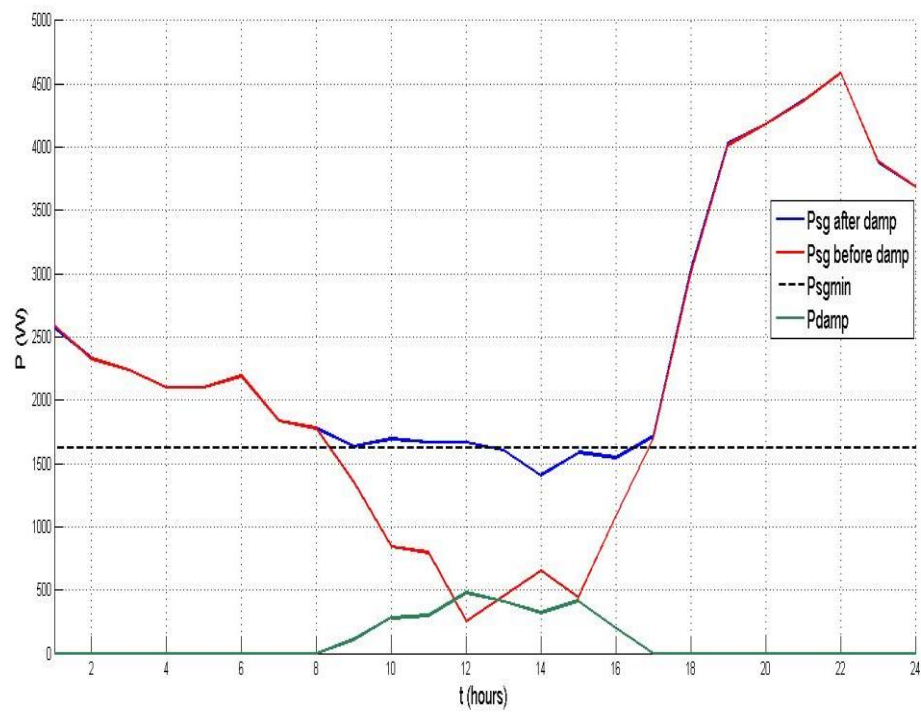
Σχήμα 4.16 Ενδεικτική καμπύλη φορτίου και φωτοβολταϊκού που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα



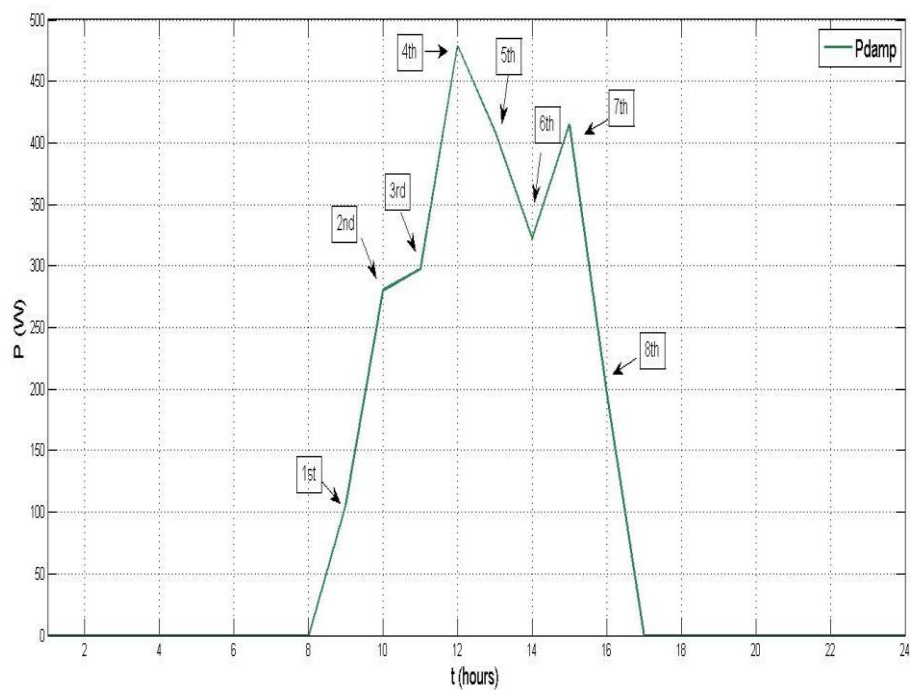
Σχήμα 4.17 Σύγκριση συχνοτήτων πριν και μετά τη χρήση του damp load



Σχήμα 4.18 Σύγκριση παραγωγής της σύγχρονης γεννήτριας πριν και μετά τη χρήση του damp load



Σχήμα 4.19 Σύγκριση παραγωγής της σύγχρονης γεννήτριας πριν και μετά το damp load, καθώς η ισχύς του damp load

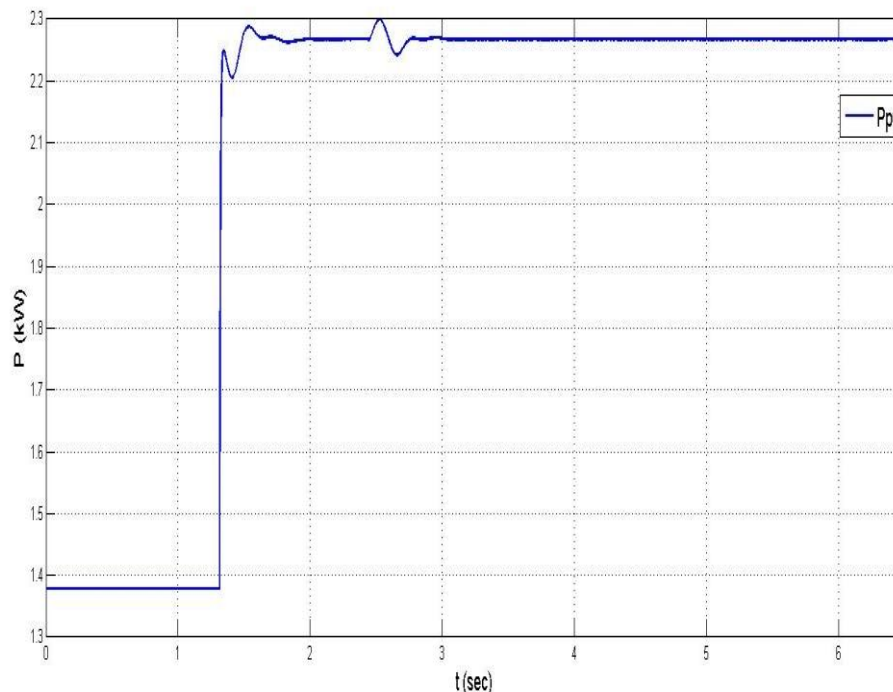


Σχήμα 4.20 Ισχύς του (hardware) απορριπτόμενου φορτίου

Παρατηρούμε ότι τα set points που στέλνουμε δεν είναι ίδια ακριβώς με τις τιμές που διαβάζουμε από το SCADA. Για παράδειγμα την 9^η ώρα της ημέρας το set point που στέλνουμε στα φορτία είναι 100 Watt, αλλά αυτό που διαβάζουμε είναι 80 Watt. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μία λάμπα των 20 Watt του εργαστηρίου ήταν ελαττωματική. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4.18, η παραγωγή της γεννήτριας πέφτει κάτω από το τεχνικό ελάχιστο παρότι εφαρμόσαμε damp load. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φορτία του εργαστηρίου που προσομοιώνουν το damp load είναι ακέραια πολλαπλάσια του 100. Παραδείγματος χάριν, όταν δοθεί set point στο SCADA να ενεργοποιήσει φορτίο 445 W, το SCADA θα ενεργοποιήσει τελικώς φορτίο 400 W, με αποτέλεσμα η γεννήτρια να πέσει κατά $3 \cdot 45 \text{ W} = 125 \text{ W}$ (τριφασική ισχύς) κάτω από το τεχνικό της ελάχιστο.

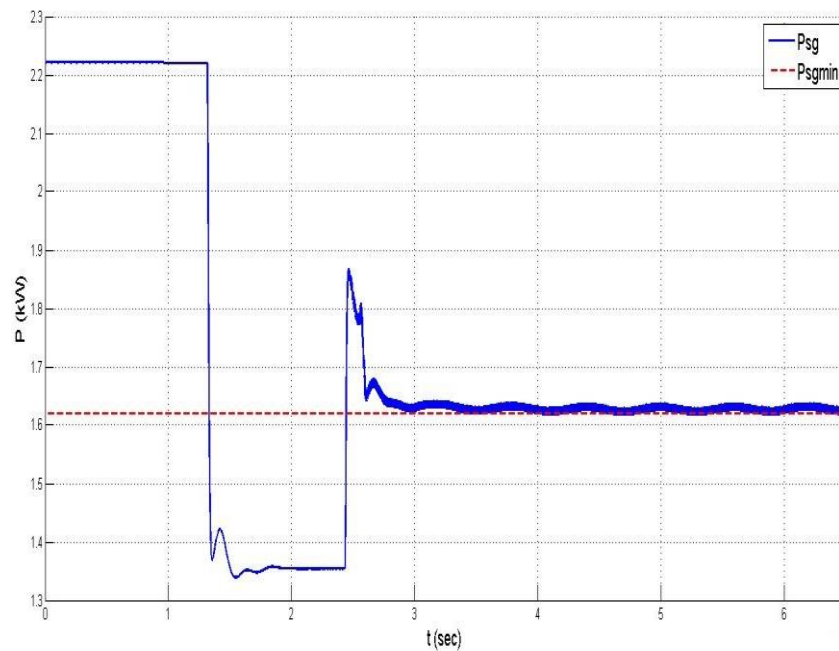
4.4.4 Προσομοίωση PHIL για βηματική αλλαγή της ισχύος του Φ/Β

Ύστερα θεωρήσαμε το σενάριο όπου η φωτοβολταϊκή παραγωγή αυξάνεται απότομα (π.χ λόγω ενός διερχόμενου σύννεφου). Όταν το σύννεφο φύγει, η παραγωγή του φωτοβολταϊκού θα αυξηθεί σχετικά απότομα, με αποτέλεσμα η παραγωγή της γεννήτριας να μειωθεί εξίσου απότομα και για το διάστημα που μεσολαβεί μέχρι να ενεργοποιηθούν τα απορριπτικά φορτία, να πέσει κάτω από το τεχνικό της ελάχιστο. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

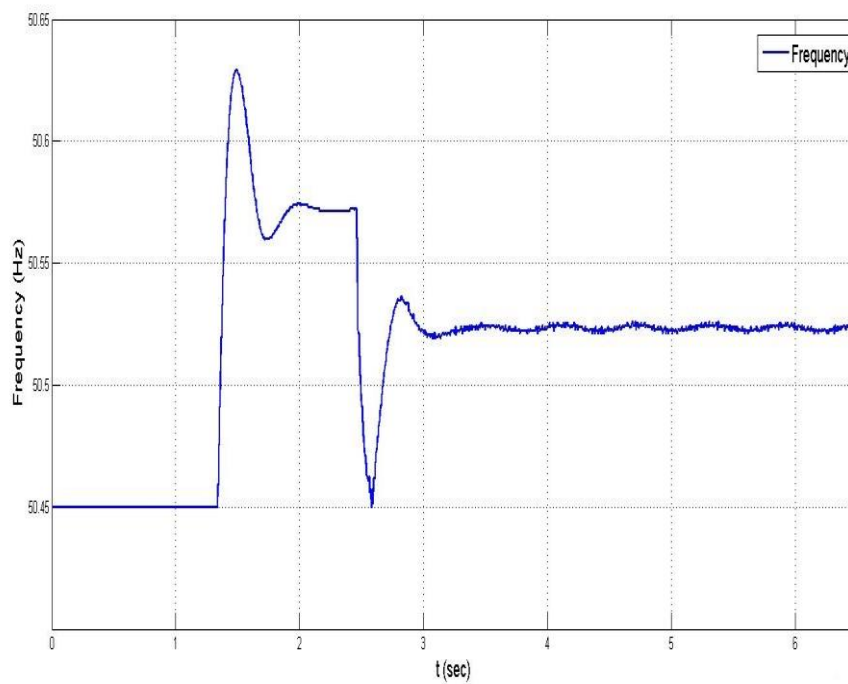


Σχήμα 4.21 Παραγωγή του φωτοβολταϊκού

Όσον αφορά την παραγωγή της γεννήτριας παρατηρούμε ότι μετά από το 1^ο δευτερόλεπτο που ενεργοποιείται το φωτοβολταϊκό πέφτει κάτω από το τεχνικό της ελάχιστο και παραμένει εκεί μέχρι να ενεργοποιηθεί το απορριπτόμενο φορτίο, διαδικασία που διαρκεί περίπου 1 δευτερόλεπτο. Ακολουθεί το διάγραμμα της γεννήτριας:

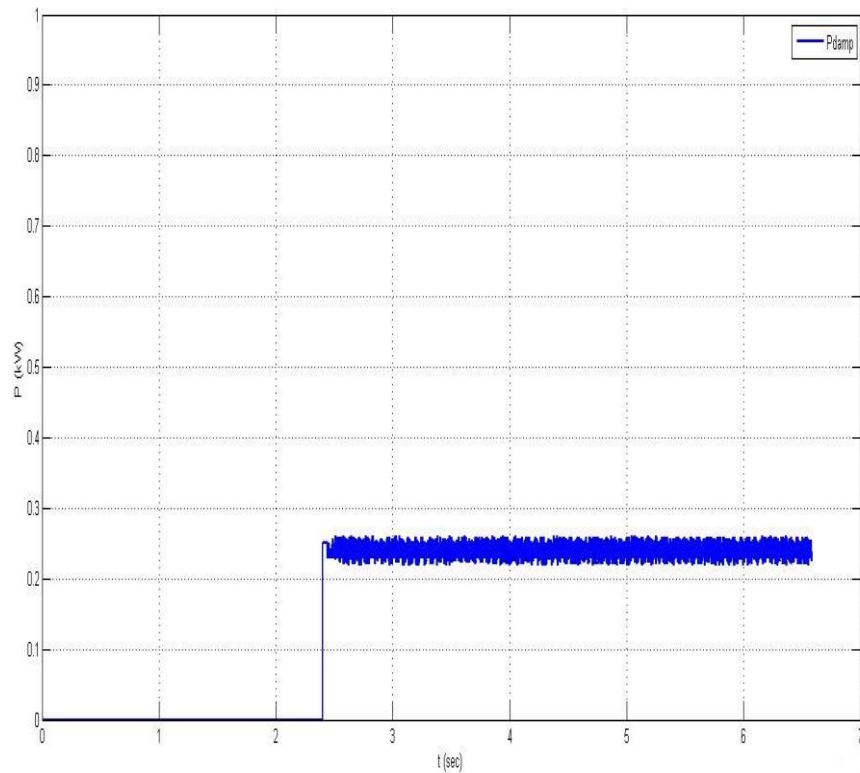


Σχήμα 4.22 Απόκριση της παραγωγής της σύγχρονης γεννήτριας για απότομη αύξηση της φωτοβολταϊκής παραγωγής



Σχήμα 4.23 Απόκριση συχνότητας για απότομη αύξηση της φωτοβολταϊκής παραγωγής

Ομοίως για τη συχνότητα παρατηρούμε ότι στο διάστημα που αυξάνεται η συχνότητα και τελικώς ισορροπεί στα 50.57 Hz, έχει γίνει η αύξηση στην ισχύ του φωτοβολταϊκού και επομένως έχει μειωθεί η ισχύς της γεννήτριας. Τελικώς, παρατηρούμε ότι με την ενεργοποίηση του απορριπτόμενου φορτίου, η συχνότητα μειώνεται και τελικώς ισορροπεί στην τιμή των 50,52 Hz.



Σχήμα 4.24 Ισχύς του απορριπτόμενου φορτίου (μετρούμενη στο RSCAD)

Παρατηρούμε ότι ο χρόνος απόκρισης του συστήματος είναι ικανοποιητικός και παρέχει στη γεννήτρια την απαιτούμενη προστασία, αφού η γεννήτρια πέφτει κάτω από το τεχνικό της ελάχιστο μόνο για ένα δευτερόλεπτο και στη συνέχεια επανέρχεται στα επιθυμητά επίπεδα. Από το μετρητικό της ισχύος του απορριπτόμενου φορτίου, φαίνεται ξανά ότι υπάρχει μια μικρή διαφορά στο set point που στέλνουμε και στην τιμή που διαβάζεται στη συνέχεια από το SCADA, που οφείλεται στο γεγονός που περιγράψαμε προηγουμένως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Συμπεράσματα και Προοπτικές

5.1 Κυριότερα συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική, αρχικά αναπτύχθηκαν με επιτυχία μοντέλα αυτόματων υβριδικών συστημάτων στο RTDS και μελετήθηκε η πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας για διάφορες μεταβολές στο φορτίο. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκε ο τρόπος διαμοιρασμού της ισχύος ενός φορτίου σε δύο σύγχρονες γεννήτριες που λειτουργούν παράλληλα, σύμφωνα με την καμπύλη στατισμού τους. Στη συνέχεια αναλύθηκε η καμπύλη στατισμού των φωτοβολταϊκών σε ένα σύστημα που περιελάμβανε σύγχρονη γεννήτρια και φωτοβολταϊκή διάταξη και διαπιστώθηκε μέσω θεωρητικών υπολογισμών αλλά και πειραματικών διατάξεων πώς αυτή βοηθάει στη ρύθμιση συχνότητας του δικτύου.

Στο 4^ο κεφάλαιο αναπτύχθηκε ελεγκτής (controller) ο οποίος πραγματοποιεί έλεγχο ενεργού ισχύος σε ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα, μέσω της περικοπής της φωτοβολταϊκής ισχύος ή μέσω της ενεργοποίησης ελεγχόμενων φορτίων. Η λειτουργία του ελεγκτή προσομοιώθηκε στο Matlab για χειμερινό αλλά και θερινό φορτίο με την αντίστοιχη φωτοβολταϊκή παραγωγή. Μετέπειτα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση Control Hardware in Loop με τον controller και το δίκτυο σύγχρονης γεννήτριας-φωτοβολταϊκό υλοποιημένο στο RTDS. Αφού διαπιστώθηκε η ομαλή λειτουργία του, διεξήχθη προσομοίωση Power Hardware in Loop με το απορριπτόμενο φορτίο να αποτελεί το κομμάτι του Hardware και να ενεργοποιείται μέσω της επικοινωνίας του controller με το SCADA. Η μελέτη συμπεριφοράς του δικτύου πραγματοποιήθηκε με επιτυχία και ελέγχθηκε και σε μεταβατικά φαινόμενα.

Η διεξαγωγή του πειράματος ήταν σύνθετη διαδικασία καθότι μια προσομοίωση PHIL πρέπει πρώτα να εξετασθεί ως προς το κομμάτι της ευστάθειας. Κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του ελέγχου ευστάθειας του πειράματος, παρατηρήσαμε ότι ο λόγος που οδηγούμασταν κάποιες φορές σε ασταθή λειτουργία είναι η υψηλή τιμή της ισχύος των απορριπτικών φορτίων, η οποία ουσιαστικά αντιστοιχεί σε μικρή αντίσταση στο κομμάτι του Hardware. Όταν η αντίσταση αυτή είναι μικρότερη από την συνολική αντίσταση του Software μέρους της διάταξης, το δίκτυο οδηγείται εύκολα σε αστάθεια. Ο λόγος που συνέβαινε αυτό είναι επειδή η σύγχρονη γεννήτρια που προσομοιώσαμε είναι μικρής ισχύος άρα και η συνολική της αντίσταση είναι σχετικά μεγάλη. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα, θα ήταν να συνδέσουμε στο κομμάτι hardware επιπλέον αντιστάσεις, μέθοδος όμως η οποία κάνει πιο σύνθετη την προσομοίωσή μας.

Παρά τα παραπάνω προβλήματα, δημιουργήθηκε ένα ευσταθές σύστημα στο οποίο προσομοιώναμε στο hardware κομμάτι μόνο το damp load και η λειτουργία του συστήματος μελετήθηκε για 24 επαναλήψεις και για απότομη μεταβολή της φωτοβολταϊκής ισχύος.

5.2 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Η παρούσα διπλωματική εργασία, θα μπορούσε να συνεχισθεί με την δημιουργία ενός δικτύου όπου εκτός από τη λειτουργία του ελεγκτή που παρουσιάσαμε, ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας να λειτουργεί με βάση μια καμπύλη στατισμού, επιτυγχάνοντας ακόμη καλύτερη ρύθμιση της συχνότητας.

Επιπλέον βελτιώσεις θα μπορούσαν να γίνουν στα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στο RSCAD. Πιο συγκεκριμένα τα μοντέλα που περιέχουν φωτοβολταϊκή διάταξη θα μπορούσαν να υλοποιηθούν με μεγαλύτερη ανάλυση, και όχι σαν μοντέλα εξαρτημένων πηγών ρεύματος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας Matlab για πείραμα PHIL

% Το κυρίως πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος PHIL

```
% Establish connection with RTDS
clear all ;
Host ='127.0.0.1' ;
Port = 8085 ;

JTCTOBJ = jtcp ('REQUEST', Host, Port) ;

% Load Demand per day, in percentage of Load_Peak Value

P_Lpu = [ 0.550 ; 0.50 ; 0.48 ; 0.45 ; 0.45 ; 0.48 ; 0.5 ; 0.68
; 0.78 ; 0.82 ; 0.82 ; 0.83 ; 0.88 ; 0.9 ; 0.85 ; 0.81 ; 0.8 ;
0.85 ; 0.9 ; 0.915 ; 0.95 ; 1 ; 0.840 ; 0.8 ] ;

% Power produced from PV Arrays per day, in percentage of PV_Peak
Value;

P_Phot = [1 0 ; 2 0 ; 3 0 ; 4 0 ; 5 0 ; 6 0.0131 ; 7 0.138 ; 8 0.381 ;
9 0.628 ; 10 0.8212 ; 11 0.95 ; 12 0.999 ; 13 1 ; 14 1 ; 15 0.967 ; 16
0.762 ; 17 0.55 ; 18 0.246 ; 19 0.029 ; 20 0.0071 ; 21 0 ; 22 0 ;
23 0 ; 24 0 ] ;

%Initialization of variables

P_LOADpeak = 1500 ;
P_LOAD = 1500*P_Lpu ;
P_DGnom= 1800 ;
P_DGmin = 0.3*P_DGnom ;
P_pvmppt = 1200*P_Phot(:,2) ;
P_damp = zeros(24,1);
Final_load = zeros(24,1) ;
Final_damp = zeros(24,1) ;
setpoint1 = zeros(24,1);
counter = 0;

pause(3) ;

% Te meter from RTDS

TE = ReadMeter('TE',JTCTOBJ) ;
pause(0.5);
TE = ReadMeter('TE',JTCTOBJ) ;
pause(0.5);

%Sending to slider P_M1 in Runtime the value of TE

msg2 = sprintf('SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : P_M1" =
%f;', TE);
jtcp('writes',JTCTOBJ,msg2) ;

pause (3) ;

%Changing the Generator's switch from Lock to Free
```

```

msg2 = sprintf('SetSwitch "Subsystem #1 : Machines: M1 : LockFree" =
%f;',1) ;
jtcp('writes',JTCPOBJ,msg2) ;

pause(1) ;

for deik = 1:1:24

%SENDING PLOAD and PV_MMPT VALUE TO RTDS

msg2 = sprintf(' SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : Pmppt" =
%f; SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : Rres" =
%f;',3*P_pvmppt(deik-1)/1000,(230^2)/P_LOAD(deik)) ;

jtcp('writes',JTCPOBJ,msg2) ;

pause(0.5) ;

%READING Ppv FROM RTDS

P_pvrtds(deik) = 1000*ReadMeter('Ppv',JTCPOBJ) ;
pause(1) ;
P_pvrtds(deik) = 1000*ReadMeter('Ppv',JTCPOBJ) ;

pause(1) ;

%SENDING LOAD VALUE TO SCADA and then READING IT

Setpoint = P_LOAD(deik) ;
LoadMatrix_Labview ;
Final_load(deik) = cell2mat(value)-240 ;

pause(1);

%Diesel energy becomes equal to PMAC from RTDS

P_DG_nodamp(deik)=1000*ReadMeter('Pgen',JTCPOBJ) ;
pause(1);
P_DG_nodamp(deik)=1000*ReadMeter('Pgen',JTCPOBJ) ;
    pause(1);

%Frequency Meter

freq_nodamp(deik)= ReadMeter('Frequency',JTCPOBJ) ;
pause(1) ;
freq_nodamp(deik)= ReadMeter('Frequency',JTCPOBJ) ;
pause(1) ;

%LOAD Meter

P_loadrtds(deik) = 1000*ReadMeter('Pload',JTCPOBJ) ;
pause(1) ;
P_loadrtds(deik) = 1000*ReadMeter('Pload',JTCPOBJ) ;
pause(1) ;

%SENDING and PV_MMPT VALUE TO RTDS

msg2 = sprintf(' SetSlider "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : Pmppt"
%f;',3*P_pvmppt(deik)/1000) ;
jtcp('writes',JTCPOBJ,msg2) ;

```

```

pause(6) ;

% CALCULATION OF P_DAMP

if (P_loadrtds(deik) - 3*P_DGmin)<= P_pvrtds(deik)
    P_damp(deik) = P_pvrtds(deik)+ P_DGmin -P_loadrtds(deik);
    % SENDING LOAD VALUE WITH DAMPING LOAD TO SCADA
    Setpoint = P_damp(deik) ;
    LoadMatrix_Labview ;
    Final_damp(deik) = cell2mat(value)-240 ;
else

    P_damp(deik)=0 ;

end

%Connects with the database of SCADA

mySQLdatabaseconnection;
Final_damp(deik)=cell2mat(value) ;

%READING FREQUENCY Pgen AFTER DAMPING

P_DG_damp(deik)=1000*ReadMeter('Pgen',JTCPOBJ) ;
pause(1) ;
P_DG_damp(deik)=1000*ReadMeter('Pgen',JTCPOBJ) ;
pause(1) ;

%Frequency Meter

freq_damp(deik)= ReadMeter('Frequency',JTCPOBJ) ;
pause(1) ;
freq_damp(deik)= ReadMeter('Frequency',JTCPOBJ) ;
pause(1) ;

%LOAD Meter

P_loadrtds_damp(deik) = 1000*ReadMeter('Pload',JTCPOBJ) ;
pause(1);
P_loadrtds_damp(deik )= 1000*ReadMeter('Pload',JTCPOBJ) ;
pause(1);

end

%Plotting variables

hold on
    plot(Final_load,'b') ;
    plot(Final_damp,'r') ;
hold off
hold on
    plot(freq_damp,'b') ;
    plot(freq_nodamp,'r') ;
hold off
hold on
    plot(P_DG_damp,'b') ;
    plot(P_DG_nodamp,'r') ;
hold off

% Sending to SCADA the value -1 to deactivate all the loads

```



```

% Our Initial Matrix that contains all phases Loads
% clear loads_selection;
cell_2= {300 300 300 1000 1000 1000 1000 1000
        'L' 'L' 'L' 'R' 'R' 'R' 'R' 'R'
        300 300 300 1000 1000 1000 1000 1000
        'L' 'L' 'L' 'R' 'R' 'R' 'R' 'R'
        300 300 300 1000 1000 1000 1000 1000
        'L' 'L' 'L' 'R' 'R' 'R' 'R' 'R'
        100 200 0 400 300 0 0 0
        'R' 'R' 'R' 'R' 'L' 'RL' 'RL' 'R'};
% Create a 4x8 Matrix that has zeros for L or RL Loads

a=mod(setpoint,100) ;
if a<50
    setpoint = setpoint-a ;
else
    setpoint=setpoint+100-a ;
end

% Initialization of the Setpoint
k=1 ;
for a=1:2:8
    for j=1:8
        if cell_2{a+1,j}=='R' ;
            matrix(k,j)=cell_2{a,j} ;
        else
            matrix(k,j)=0 ;
        end
    end
    k=k+1 ;
end

% Creates a 1x9 matrix that contains all phase A loads
z=1 ;
for a=1:3:4
    for j=1:8
        if matrix(a,j)~=0
            loadsA(1,z)=matrix(a,j) ;
            z=z+1 ;
        end
    end
end

% Sort the previous matrix in ascending order
loadsA=sort(loadsA) ;

% Calling the loads_selection matlab file to calculate the minimum
number
% of loads needed to achieve the setpoint
loads_selection ;

% Creation Of matrix with Zeros below every load
Zero= zeros([1 8]) ;
loads_zeros = [matrix(1,:) ; Zero ; matrix(2,:) ; Zero; matrix(3,:)
; Zero; matrix(4,:);Zero] ;

% Below its load that we will use, we set the number to "1", as a
pointer
d6 = size(final_loads) ;
for a = 1:d6(2)
    for v = 1:6:8
        for c = 1:8

```

```

            if (loads_zeros(v,c) == final_loads(1,a)) &&
(load_ zeros(v+1,c)==0) ;
                loads_zeros(v+1,c) = 1 ;
                break
            end
        end
    end
end
% disp (loads_zeros) ;

% Making 8bit binary number from the 2nd and the 8th row of the
matrix
    binary_1=(loads_zeros(2,:)) ;
    binary_4=(loads_zeros(8,:)) ;

% Creates the final number to be sent to PLC, one decimal number for
every phase
    dec1 = bi2de(binary_1) ;
    dec2 = 0 ;
    dec3 = 0 ;
    dec4 = bi2de(binary_4) ;

    final_decimal = [dec1    dec2    dec3 dec4] ;
% disp(final_decimal) ;
    clearvars loads_zeros final_loads loadsA ;

    final_dec = [ dec1 0 0 dec4 0 0 0 0] ;
% final_string = mat2str(final_dec) ;
    s1 = num2str(dec1) ;
    s4 = num2str(dec4) ;

    final_string = sprintf(' %d \t %d \t %d \t %d \t %d \t %d \t %d \t
%d',dec1,0,0,dec4,0,0,0,0) ;

command=['C:\Python27\python.exe
C:\Users\nikolas\Desktop\Ptuxiaki\Matlab\Agent2.py',final_string] ;
system(command) ;

```

Κώδικας Matlab για βέλτιστη επιλογή διαθέσιμων φορτίων από το SCADA

% Το υποπρόγραμμα αυτό δέχεται σαν είσοδο έναν πίνακα-σειρά (loadsA) με τα διαθέσιμα φορτία του SCADA και ένα set point και επιστρέφει τον βέλτιστο συνδυασμό φορτίων που ικανοποιούν το set point.

```

loadsB=loadsA ;
matrix_sums=zeros ; %Initialization of Matrix that contains sums

if setpoint < loadsA(1)
    final_loads = 0 ;
    break
end
if (mod(setpoint,100))~= 0
    setpoint=setpoint - mod(setpoint,100) ;
end

target=setpoint ;
while target ~= 0
    target=setpoint ;
    loadsA =loadsB ;

```

```

for k=length(loadsA):-1:1
    j=1 ;
    g=k ;
    while (g~=0)
        if loadsA(g)<=target
            target=target-loadsA(g) ;
            matrix_sums(k,j)=loadsA(g) ;
            loadsA(g)=0 ;
            j=j+1;
        end
        g=g-1 ;
    end
    % target=setpoint;
end
if target ~=0
    setpoint=setpoint-target ;
    matrix_sums=zeros ;
end
end

[d1,d2]= size(matrix_sums) ;
g=d1 ;

while g~=0
    sum=0 ;
    for q = 1 : d2
        sum = sum+matrix_sums(g,q) ;
    end
    if sum ~= setpoint;
        matrix_sums(g,:) = [] ;
        g = g + 1 ;
    end
    g = g - 1 ;
end

[d3,d4]= size(matrix_sums) ;
for u=1 : d3
    nofzeros(u)=0 ;
    for p=1 : d4
        if matrix_sums(u,p)== 0 ;
            nofzeros(u)=nofzeros(u) +1 ;
        end
    end
end
max=nofzeros(1) ;
j=1;
for g=2 : d3
    if nofzeros(g)>max
        max=nofzeros(g) ;
        j=g ;
    end
end
for q=1 : d4
    if matrix_sums(j,q)~=0 ;
        final_loads(q)=matrix_sums(j,q) ;
    end
end
end

```

Αρχείο Python για επικοινωνία με SCADA

% Αποστολή στο SCADA το set point που περιέχει την τιμή του φορτίου που θέλουμε να ενεργοποιήσουμε

```
import os
import random
import sys

from socket import *
host = "192.168.1.105"
#host="127.0.0.1"
port = 13002
buf = 1024
addr = (host, port)
data1=sys.argv[1]
data2=sys.argv[4]

#UDPSock1 = socket(AF_INET, SOCK_DGRAM)
UDPSock = socket(AF_INET, SOCK_DGRAM)
#UDPSock1.bind(addr1)
UDPSock.connect(addr)
data=data1+'\t0\t0\t'+data2+'\t0\t0\t0\t0'
#data=1
data=str(data)
print "Set-point =" ,data
UDPSock.send(data)

UDPSock.close()
os._exit(0)
```


ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”, Υπουργείο Περιβαλλοντικής Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής
- [2] Κ. Δέρβος, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Ε.Μ.Π Πανεπιστημιακές Εκδόσεις, Αθήνα 2013
- [3] L. A. C. Lopes, Farid Katiraei, Konrad Mauch, Michel Vandenberg, Luis Arribas, “PV Hybrid Mini-Grids: Applicable Control Methods for Various Situations”, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme
- [4] Manoj Datta, Tomonobu Senjyu, Atsushi Yona, Toshihisa Funabashi, Chul-Hwan Kim, “A Coordinated Control Method for Leveling PV Output Power Fluctuations of PV–Diesel Hybrid Systems Connected to Isolated Power Utility”, IEEE Transactions on Energy Conversion 2009
- [5] Ευριπίδη Φωτόπουλου, “Έλεγχος Μεταβατικής Ευστάθειας Συστήματος Ισχύος”, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πάτρας 2009
- [6] Β. Παπαδιάς, Κ. Βουρνάς, “Παραγωγή Ηλεκτρικής ενέργειας και έλεγχος συχνότητας και τάσεως”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2011
- [7] Ι.Α. Τεγόπουλος, “Ηλεκτρικές Μηχανές”, Τόμος Β, Εκδόσεις , Αθήνα 1991
- [8] Σ. Παπαθανασίου, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”, Σημειώσεις Παραδόσεων, Ε.Μ.Π. Αθήνα 2008
- [9] Marco Bortolini , Mauro Gamberi, Alessandro Graziani , Francesco Pilati, “Economic and environmental bi-objective design of an off-grid photovoltaic–battery–diesel generator hybrid energy system”, Energy Conversion and Management, 2015
- [10] Ammar Mohammed Ameen, Jagadeesh Pasupuleti, Tamer Khatib, “Simplified performance models of photovoltaic/diesel generator/battery system considering typical control strategies”, Energy Conversion and Management 2015
- [11] Woodbank Communications Ltd, “State of Charge (SOC) Determination”, 2007
- [12] Godfrey Gladson Moshi, Cristian Bovo, Alberto Berizzi , “Optimal Operational Planning for PV-Wind-Diesel-Battery Microgrid”, Dipartimento di Energia Politecnico di Milano, Italy 2015
- [13] Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε, Εγχειρίδιο Κατανομής, Έκδοση 2.0, Σεπτέμβριος 2010

- [14] M. AshariV. Nayar, “An Optimum Dispatch Strategy Using Set Points For A Photovoltaic (pv)–Diesel–Battery Hybrid Power System”, Centre for Renewable Energy Systems Technology Australia (Cresta), Curtin University of Technology, Australia
- [15] Stella Maria Pfeifer, “What Is a Photovoltaic Diesel Hybrid System?”, Hybrid Energy System, SMA,2013
- [16] Gabin Koucoi, Daniel Yamegueu, Quoc-Tuan Tran, Yézouma Couliblay, Hervé Buttin, “Energy Management Strategies for Hybrid PV/Diesel Energy”, International Journal of Energy and Power Engineering, France 2016
- [17] Jim Iverson, “How to size a genset: Proper generator set sizing requires analysis of parameters and loads”, Power Generation, 2007
- [18] “Industrial Hybrid Energy Systems-Fuel Saver”, SMA
- [19] “Solar Fuel Saver for Hybrid Systems”, JUWI
- [20] Jingshuang Shen, Chuanwen Jiang, Bosong Li, “Controllable Load Management Approaches in Smart Grids”, Energies 2015
- [21] “BOSL Controllers – Standard 1”, Siemens PTI – Software Solutions 2008
- [22] X. Γκιλφέσης, “Μελέτη επίδρασης φωτοβολταϊκών σε δίκτυα X.T. ”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π. Νοέμβριος 2010
- [23] Slow turning 5kW Diesel Generator, Datasheet, Hampden 2014
- [24] Δημήτριος Μπαράκος, “Μελέτη Ευστάθειας και Ακρίβειας της τεχνικής Power-Hardware-In-the-Loop για δοκιμές διεσπαρμένης παραγωγής”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π 2014
- [25] Boyer, Stuart A “SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition” Instrument Society of America, Research Triangle, NC. 1993
- [26] Α.Μάρκου, “Μελέτη και υλοποίηση συστήματος ελέγχου, παρακολούθησης και καταγραφής εργαστηριακού μικροδικτύου”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π 2015