



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

**Ανάλυση και δοκιμή κεντρικού ελεγκτή μικροδικτύου σύμφωνα
με τα πρότυπα IEEE 2030.7-2017 και IEEE 2030.8-2018**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πάυλος Βουράκης

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2022



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

Ανάλυση και δοκιμή κεντρικού ελεγκτή μικροδικτύου σύμφωνα με τα πρότυπα IEEE 2030.7-2017 και IEEE 2030.8-2018

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πάυλος Βουράκης

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13^η Οκτωβρίου 2022 .

.....

Ν.Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γ.Κορρές

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Π.Γεωργιλάκης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

.....
Πάυλος Βουράκης

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

Copyright © Πάυλος Βουράκης, 2022

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

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η ανάλυση και δοκιμή του κεντρικού ελεγκτή μικροδικτύου στηριζόμενοι σε δύο πρότυπα της σειράς IEEE 2030, το IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers και το IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο μικροδίκτυο χαμηλής τάσης της CIGRE. Το μικροδίκτυο εξετάστηκε σε διασυνδεδεμένη λειτουργία, σε αυτόνομη λειτουργία αλλά και σε μεταβάσεις από την μία στην άλλη.

Αρχικά τονίστηκε το σύγχρονο πρόβλημα της υπερβολικής χρήσης ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάστηκε λύση στο ζήτημα η οποία εντοπίζεται στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή. Έτσι έγινε μια πρώτη εισαγωγή στην έννοια του μικροδικτύου, ένα ευφυές δίκτυο που στηρίζει την παραγωγή του στις ΑΠΕ και συνεργάζεται με το δίκτυο διανομής.

Στην συνέχεια ακολούθησε αναφορά στο μικροδίκτυο της διπλωματικής και έγινε ανάλυση του περιεχομένου των δύο προτύπων βάση των οποίων εξετάστηκε ο κεντρικός ελεγκτής του μικροδικτύου. Παρουσιάστηκαν έννοιες όπως το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου, η λειτουργία κατανομής και η λειτουργία μετάβασης, ενώ ακολούθησε ανάλυση του τρόπου αξιολόγησης του μικροδικτύου μέσω κατάστρωσης σεναρίων με διαφορετικές συνθήκες τα οποία θα προσομοιωθούν.

Μετάπειτα, έγινε εμβάθυνση στην ιεραρχία και στα επίπεδα ελέγχου σε ένα μικροδίκτυο, εστιάζοντας στον πρωτεύοντα και στον δευτερεύοντα έλεγχο. Πριν ξεκινήσει το εργαστηριακό μέρος της διπλωματικής προηγήθηκε μια σύντομη παρουσίαση της μεθόδου προσομοίωσης HIL και των υποκατηγοριών της PHIL και CHIL.

Τέλος, στο εργαστηριακό κομμάτι έγινε CHIL προσομοίωση με την βοήθεια του εξομοιωτή πραγματικού χρόνου RTDS και ενός προγράμματος για την διεπαφή χρήστη με τον κεντρικό ελεγκτή μικροδικτύου. Στο πρώτο σχεδιάστηκε το πρότυπο μικροδίκτυο χαμηλής τάσης της CIGRE και στο δεύτερο ο δευτερεύων έλεγχος καθώς και ο έλεγχος για την ομαλή μετάβαση του μικροδικτύου μεταξύ της διασυνδεδεμένης και της αυτόνομης λειτουργίας. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάστηκαν σε γραφικές παραστάσεις ενώ ακολούθησαν συμπεράσματα για την διαδικασία ελέγχου σε ένα μικροδίκτυο.

Λέξεις - φράσεις κλειδιά : Μικροδίκτυο, πρότυπα IEEE, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σύστημα ελέγχου μικροδικτύου, λειτουργία συνδεδεμένη στο δίκτυο, αυτόνομη λειτουργία, λειτουργία κατανομής, λειτουργία μετάβασης, σενάρια προσομοίωσης, πρωτεύοντα έλεγχος, δευτερεύοντα έλεγχος, Control Hardware in the Loop, εξομοιωτής πραγματικού χρόνου.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the analysis and testing of the microgrid central controller based on two standards of the IEEE 2030 series, the IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers and the IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers. For this purpose the Benchmark CIGRE low voltage microgrid was used. The microgrid was examined in grid-connected mode, in islanded mode and in transitions from one to the other.

At the beginning, the contemporary problem of the excessive use of fossil fuels for the production of electricity was highlighted. A solution to the issue was presented, which is found in the integration of renewable energy sources in production. This was a first introduction to the concept of the microgrid, an intelligent grid that bases its production on RES and cooperates with the distribution grid.

Then, it was made a reference to the microgrid of this thesis and an analysis of the content of the two standards based on which the microgrid central controller was examined. Meanings such as microgrid control system, dispatch mode and transition mode were presented, followed by an analysis of how to evaluate the microgrid by building scenarios with different initial conditions, to be simulated.

Later, the hierarchy and control levels in a microgrid were delved into, focusing on primary and secondary control. Before starting the laboratory part of the thesis, there was a presentation of the HIL simulation method and its subcategories PHIL and CHIL.

Finally, in the laboratory part, a CHIL simulation was performed using the real time digital simulator RTDS and a program for the user interface with the microgrid central controller. In the first, we designed CIGRE' s standard low voltage microgrid and in the second, the secondary control for the transition of the micorgrid between grid connected and islanded function. The results of the simulations were presented in graphs, while conclusions were drawn for the control process in the microgrid.

Key words : Microgrid, IEEE standards, Renewable energy sources, Microgrid Control System, grid connected mode, islanded mode, dispatch mode, transition mode, primary control, secondary control, Control Hardware in the Loop, real time simulator.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κύριο Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα πραγματικά ενδιαφέρον θέμα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους ερευνητές Άλκηστις Κοντού και Δημήτρη Λαγό για την συνεχή και πολύτιμη καθοδήγηση τους καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής.

Κλείνοντας με αυτήν την διπλωματική τον βασικό κύκλο σπουδών μου, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και σε όλους τους φίλους μου που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Η εργασία είναι αφιερωμένη στην μητέρα μου και τον πατέρα μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1	13
Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και εισαγωγή στην έννοια του Μικροδικτύου	13
1.1 Εισαγωγή	13
1.2 Σύγχρονα προβλήματα και πως οδηγούμαστε στην λύση του μικροδικτύου	13
1.3 Ορισμός και στοιχεία μικροδικτύου	14
1.4 Πλεονεκτήματα μικροδικτύου έναντι ‘παραδοσιακών’ δικτύων διανομής	16
1.5 Παραδείγματα μικροδικτύων	17
1.6 Παρουσίαση του μικροδικτύου της διπλωματικής	19
Κεφάλαιο 2	21
IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers, IEEE Std 2030.7 TM-2017	21
2.1 Εισαγωγή	21
2.2 Εισαγωγή στο Microgrid Control System (MGCS)	21
2.3 Εισαγωγή στο πρότυπο IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers και περιορισμοί	22
2.4 Δυνατότητες ελέγχου MGCS όπως παρουσιάζονται στο πρότυπο	23
2.5 Λειτουργίες κατανομής και μετάβασης	25
2.5.1 Εισαγωγή στις λειτουργίες και η αλληλεπίδραση μεταξύ τους	25
2.5.2 Λειτουργία κατανομής (Dispatch Function)	27
2.5.3 Λειτουργία μετάβασης (Transition Function)	28
Κεφάλαιο 3	31
IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers, IEEE Std 2030.8 TM-2018	31
3.1 Εισαγωγή	31
3.2 Εισαγωγή στο πρότυπο IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers	31
3.3 Ανάπτυξη σεναρίων και συνθήκες για κάθε λειτουργία	32
3.4 Αρχικές συνθήκες και γεγονότα πυροδότησης των σεναρίων για την λειτουργία κατανομής και την λειτουργία μετάβασης	34
3.5 Μετρήσεις και επιτρεπτά όρια τιμών	36

Κεφάλαιο 4	40
Πρωτεύων και δευτερεύων έλεγχος του μικροδικτύου	40
4.1 Εισαγωγή	40
4.2 Εισαγωγή στον έλεγχο του μικροδικτύου	40
4.3 Πρωτεύοντας έλεγχος μικροδικτύου	42
4.3.1 Εισαγωγή στον πρωτεύοντα έλεγχο και οι στόχοι του	42
4.3.2 Έλεγχοι ενεργού ισχύος–συχνότητας και αέργου ισχύος–τάσης	43
4.3.3 Έλεγχος στατισμού	44
4.4 Δευτερεύοντας έλεγχος	46
4.4.1 Εισαγωγή στον δευτερεύοντα έλεγχο	46
4.4.2 Κεντρικός δευτερεύοντας έλεγχος	47
4.5 Τριτεύοντας έλεγχος και τεχνικές ελέγχου που εφαρμόστηκαν στην εργασία	48
Κεφάλαιο 5	50
Μέθοδος προσομοίωσης : Hardware in the Loop	50
5.1 Εισαγωγή	50
5.2 Hardware in the Loop	50
5.2.1 Εισαγωγή στο Hardware in the Loop	50
5.2.2 Power Hardware in the Loop (PHIL)	52
5.2.3 Control Hardware in the Loop (CHIL)	53
5.3 Προκλήσεις που παρουσιάζονται σε προσομοιώσεις Hardware in the Loop (HIL)	54
Κεφάλαιο 6	57
Ψηφιακός προσομοιωτής και μοντελοποίηση του μικροδικτύου στο RSCAD	57
6.1 Εισαγωγή	57
6.2 Ψηφιακός εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS)	57
6.3 Εισαγωγή στο λογισμικό του RTDS	58
6.4 Παρουσίαση της δομής και των στοιχείων του μικροδικτύου της διπλωματικής στο RSCAD	60
6.4.1 Πρώτο κομμάτι του μικροδικτύου	60
6.4.2 Δεύτερο κομμάτι του μικροδικτύου	65

6.4.3 Τρίτο κομμάτι του μικροδικτύου	74
Κεφάλαιο 7	77
Επικοινωνία με τον MGCC και έλεγχος στο μικροδίκτυο μέσω ελεγκτών PI στο RTAC.....	77
7.1 Εισαγωγή.....	77
7.2 Εισαγωγή στον RTAC και παρουσίαση της επικοινωνίας του RSCAD με το σύστημα ελέγχου.....	77
7.3 Ελεγκτές PI.....	81
7.3.1 Εισαγωγή στους ελεγκτές PI και τα στοιχεία τους στο RTAC.....	81
7.3.2 Έλεγχος σε κατάσταση συνδεδεμένη στο δίκτυο (grid connected-steady state) και σε μετάβαση από συνδεδεμένη σε αυτόνομη λειτουργία (grid connected to islanded – transition)	84
7.3.3 Έλεγχος σε κατάσταση απομονωμένης λειτουργίας (islanded-steady state) και σε μετάβαση από απομονωμένη σε συνδεδεμένη στο δίκτυο λειτουργία (islanded to grid connected– transition)	89
Κεφάλαιο 8	96
Αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις των προσομοιώσεων.....	96
8.1 Εισαγωγή.....	96
8.2 Λειτουργία συνδεδεμένη στο δίκτυο (steady state – grid connected)	96
8.3 Μετάβαση από λειτουργία συνδεδεμένη στο δίκτυο σε αυτόνομη λειτουργία (transition – grid connected to islanded).....	99
8.3.1 Εισαγωγή στις προσομοιώσεις της μετάβασης σε αυτόνομη λειτουργία	99
8.3.2 Πειραματικά αποτελέσματα με ενεργοποιημένο τον έλεγχο	100
8.3.3 Πειραματικά αποτελέσματα χωρίς την βοήθεια ελέγχου	103
8.4 Αυτόνομη λειτουργία (steady state – islanded)	107
8.5 Μετάβαση από αυτόνομη λειτουργία σε λειτουργία συνδεδεμένη στο δίκτυο (transition – islanded to grid connected).....	109
8.5.1 Εισαγωγή στις προσομοιώσεις της μετάβασης σε λειτουργία συνδεδεμένη στο δίκτυο	109
8.5.2 Πειραματικά αποτελέσματα με ενεργοποιημένο τον έλεγχο	110
8.5.3 Πειραματικά αποτελέσματα χωρίς την βοήθεια ελέγχου	115
8.6 Συμπεράσματα-Προεκτάσεις.....	118

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	121
-------------------	-----

Κεφάλαιο 1

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και εισαγωγή στην έννοια του Μικροδικτύου

1.1 Εισαγωγή

Στο 1^ο κεφάλαιο της διπλωματικής γίνεται αρχικά εστίαση στο πρόβλημα της μεγάλης εξάρτησης που παρουσιάζεται από τα ορυκτά καύσιμα, ως κύριο μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάζεται λύση η οποία μπορεί να αναζητηθεί στην αύξηση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή.

Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στην έννοια του μικροδικτύου, ένα “έξυπνο” δίκτυο που στηρίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παραθέτονται τα βασικά στοιχεία του αλλά και τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει έναντι των “παραδοσιακών” δικτύων. Τέλος, αναφέρονται δύο παραδείγματα στα οποία υπήρχε επιτυχημένη δημιουργία και χρήση μικροδικτύου, ενώ παρουσιάζεται και το μικροδίκτυο που θα χρησιμοποιηθεί στην διπλωματική εργασία.

1.2 Σύγχρονα προβλήματα και πως οδηγούμαστε στην λύση του μικροδικτύου

Στις μέρες μας ερχόμαστε αντιμέτωποι με το μείζον ζήτημα που αφορά τον έως τώρα κυρίαρχο τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, την χρήση ορυκτών καυσίμων όπως είναι το πετρέλαιο, ο άνθρακας, ο λιγνίτης και το φυσικό αέριο. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι

η εκτεταμένη χρήση τους έχει σοβαρές συνέπειες στο περιβάλλον, φέρει ευθύνη για την κλιματική αλλαγή και οδηγεί σε σταδιακή εξάντληση τους. Συγκεκριμένα τα καύσιμα αυτά αξιοποιούνται ως επί το πλείστον σε μεγάλους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς στους οποίους γίνεται μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Ταυτόχρονα όμως, παράγονται και εκπέμπονται αέρια ιδιαίτερα βλαβερά για το περιβάλλον, που συμβάλουν ακόμα και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αν σε αυτό το θέμα έρθουν να προστεθούν οι ραγδαία αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες των σύγχρονων κοινωνιών, είναι απολύτως κατανοητό γιατί μεγάλες επιστημονικές έρευνες επικεντρώνονται στην αναζήτηση αξιόπιστων εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν σαφέστατα μια λύση. Παρά το ρίσκο που ελοχεύει με την αυξημένη χρήση τους, οι ΑΠΕ πλέον εισχωρούν αποφασιστικά στα σύγχρονα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο αναλυτικά πρόκειται για μορφές ενέργειας «καθαρές» ως προς το περιβάλλον καθώς κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν απελευθερώνονται ρυπογόνα αέρια.

Οι βασικές μορφές ΑΠΕ είναι:

- Ηλιακή ενέργεια: Κυριότερο παράδειγμα αξιοποίησης της αποτελούν τα φωτοβολταϊκά.
- Αιολική ενέργεια: Κυριότερο παράδειγμα αξιοποίησης της για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν οι ανεμογεννήτριες.
- Υδραυλική ενέργεια: Υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις, αρκετά διαδεδομένες στην Ελλάδα.
- Βιομάζα
- Γεωθερμική ενέργεια

Με βάση τα παραπάνω και για μια σειρά από λόγους που θα αναφερθούν μετέπειτα, μπορεί να εξηγηθεί σε μεγάλο βαθμό γιατί η ιδέα του μικροδικτύου, ενός δικτύου που στηρίζεται κατά κύριο λόγο στην παραγωγή ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών, κερδίζει συνεχώς έδαφος.

1.3 Ορισμός και στοιχεία μικροδικτύου

Το μικροδίκτυο είναι ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής, μονάδες αποθήκευσης και διασυνδεδεμένα φορτία. Το βασικό του χαρακτηριστικό που το καθιστά μοναδική περίπτωση είναι ότι μπορεί να

λειτουργεί τόσο συνδεδεμένο στο δίκτυο (grid-connected) όσο και σε απομονωμένη λειτουργία (islanded), δηλαδή ανεξάρτητα από το ευρύτερο δίκτυο. Έχει την δυνατότητα επίσης να εναλλάσσει τις δύο παραπάνω λειτουργίες, να συνδέεται ή να αποσυνδέεται από το δίκτυο ανάλογα με τις ανάγκες-απαιτήσεις.

Αναλυτικότερα παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία ενός μικροδικτύου:

- Διακοπτικό στοιχείο, συνήθως διακόπτης που βρίσκεται στο σημείο σύνδεσης του ευρύτερου δικτύου διανομής με το μικρόδίκτυο. Αυτό το σημείο ονομάζεται σημείο διασύνδεσης (point of interconnection – POI). Η κατάσταση του διακόπτη, δηλαδή αν είναι κλειστός ή ανοικτός καθορίζει αν το μικρόδίκτυο λειτουργεί συνδεδεμένο στο δίκτυο ή σε απομονωμένη λειτουργία αντίστοιχα.
- Στοιχεία του τοπικού συστήματος διανομής, όπως για παράδειγμα μετασχηματιστές, εξοπλισμός διανομής, πυκνωτές.
- Φορτία του μικροδικτύου, τα οποία διαχωρίζονται ανάλογα με την κρισιμότητα τους και τον τρόπο που ελέγχονται.
- Διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής (DERs)
 - Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :
 - A) Τις μονάδες που μπορούν να ελεγχθούν από το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου.
 - B) Τις μονάδες που δεν γίνεται να τις ελέγξουμε πλήρως μέσω του συστήματος ελέγχου του μικροδικτύου. Αναφερόμαστε κυρίως στις μονάδες που λειτουργούν με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες.

Το γεγονός ότι δεν γίνεται ουσιαστικά να ελεγχθούν σε μεγάλο βαθμό οι ΑΠΕ, καθώς στηρίζονται σε αέρα, ήλιο που δεν προσφέρουν σταθερή διαθεσιμότητα είναι ένα αρνητικό στοιχείο αφού μας περιορίζει σε προσεγγιστικές προβλέψεις.
- Μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, όπως είναι οι μπαταρίες. Συντονίζονται με την παραγωγή των DERs, συμβάλλουν στην σταθεροποίηση του μικροδικτύου, μειώνουν τις ηλεκτρικές παρεμβολές, αποτελούν αξιόπιστη εφεδρική πηγή ενέργειας ενώ επίσης διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στην απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου.
- Κεντρικός ελεγκτής του μικροδικτύου (Microgrid Central Controller– MGCC). Ο εγκέφαλος του μικροδικτύου, στον οποίο στηρίζεται σχεδόν αποκλειστικά η “έξυπνη” λειτουργία του. Καθορίζει, ανάλογα με τις ανάγκες-απαιτήσεις, την αλληλεπίδραση του μικροδικτύου με το ευρύτερο δίκτυο διανομής, πότε θα αποσυνδεθεί από αυτό και πότε θα πρέπει να ξανασυνδεθεί σε αυτό και ρυθμίζει την συχνότητα, την τάση αλλά και την παραγωγή των μονάδων. Στο σύστημα ελέγχου και στον πολύπλευρο ρόλο που

διαδραματίζει στην λειτουργία του μικροδικτύου θα γίνει εκτενέστερη αναφορά μετέπειτα.

1.4 Πλεονεκτήματα μικροδικτύου έναντι ‘παραδοσιακών’ δικτύων διανομής

Η ανθεκτικότητα ενός συστήματος αξιολογείται βάση της ικανότητάς του να επανέλθει σε σταθερό σημείο λειτουργίας έπειτα από ένα απρόσμενο συμβάν διακοπής. Η βελτίωση της ανθεκτικότητας των ‘παραδοσιακών’ δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έναντι των φυσικών καταστροφών και των απρόβλεπτων καιρικών συνθηκών είναι ένα θέμα που έχει απασχολήσει έντονα τα τελευταία χρόνια. Τα φαινόμενα αυτά δεν είχαν ανησυχήσει παλαιότερα καθώς χαρακτηρίζονταν ως χαμηλής πιθανότητας να συμβούν, ωστόσο τις τελευταίες δεκαετίες λόγω και της κλιματικής αλλαγής, δημιουργούν συχνά προβλήματα. Αξίζει να αναφερθεί ότι το 2017, 8 έντονα καιρικά γεγονότα που έπληξαν κυρίως τις ΗΠΑ οδήγησαν σε διακοπές και προβλήματα με την παροχή ρεύματος σε πάνω από 1 εκατομμύριο ανθρώπους. (1)

Συμπεραίνουμε ότι τα υπάρχοντα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να είναι αξιόπιστα υπό φυσιολογικές συνθήκες, αλλά στην περίπτωση απρόβλεπτων γεγονότων η ανθεκτικότητα τους τίθεται υπό αμφιβολία. Κάπου εδώ έρχεται η λύση του μικροδικτύου καθώς αυτό με την ικανότητα του να λειτουργεί αποσυνδεδεμένο από το υπόλοιπο δίκτυο προσφέρει ένα μεγάλο πλεονέκτημα σε περίπτωση κάποιων δυσμενών συνθηκών που θα δημιουργούσαν προβλήματα. Όπως περιγράφηκε και παραπάνω, σε μια τέτοια περίπτωση το διακοπτικό στοιχείο που χωρίζει το μικροδίκτυο από το κύριο δίκτυο θα ανοίξει και θα επιτρέψει στο μικροδίκτυο να λειτουργήσει ανεξάρτητα και ανεμπόδιστα από τυχόν απρόσμενα γεγονότα.

Εκτός της ανθεκτικότητας, το μικροδίκτυο φαντάζει ιδανική λύση και για κάποιους επιπλέον λόγους. Ένας από αυτούς είναι ανδιαμφισβήτητα η μείωση εκπομπών αερίων. Το γεγονός αυτό προκύπτει ως αποτέλεσμα του μείγματος παραγωγής που χρησιμοποιεί το μικροδίκτυο με τις διάφορες διεσπαρμένες πηγές παραγωγής που συμμετέχουν σε αυτό, συμπεριλαμβανομένου της μπαταρίας ή άλλης μονάδας αποθήκευσης ενέργειας και των υπόλοιπων μονάδων παραγωγής όπως φωτοβολταϊκά ή ανεμογεννήτριες, που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή, αιολική). Ουσιαστικά επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση παραγόμενης ισχύος από πηγές χαμηλότερων εκπομπών από τις συνηθισμένες.

Επιπλέον το μικροδίκτυο βοηθάει και ως προς την βελτιστοποίηση του κόστους ενέργειας αλλά και στην ενεργειακή ανεξαρτησία. Όσον αφορά το πρώτο, επιτυγχάνεται με την συνεργασία που υπάρχει μεταξύ των πηγών παραγωγής και των φορτίων. Ουσιαστικά λειτουργούν ως μια ενιαία οντότητα, αφού υπάρχει πλήρης προσαρμογή της παραγωγής των μονάδων ανάλογα με την κατανάλωση των φορτίων. Από την άλλη, η ενεργειακή ανεξαρτησία είναι φυσική απόρροια της μείωσης κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και της ταυτόχρονης ενσωμάτωσης περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα ορυκτά καύσιμα, λόγω της υπερβολικής χρήσης, μπορούν να ελαχιστοποιηθούν, σε αντίθεση με τις ΑΠΕ που είναι άφθονες στην φύση και σχεδόν πάντα διαθέσιμες.

1.5 Παραδείγματα μικροδικτύων

Παραπάνω επισημάναμε τόσο τα βασικά στοιχεία του μικροδικτύου όσο και τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που εμφανίζει. Σίγουρα πρόκειται για μια καινοτόμα ιδέα η οποία παρόλο που ακόμα δεν έχει δοκιμασθεί πολύ, θα απασχολήσει και θα υιοθετηθεί στο άμεσο μέλλον. Εδώ θα παρουσιασθούν συνοπτικά δύο παραδείγματα, εκ των οποίων ένα στη χώρα μας, που προτιμήθηκε η λογική ενός μικροδικτύου για να ικανοποιηθούν οι ενεργειακές ανάγκες της εκάστοτε περιοχής – κοινότητας.

Αρχικά, θα γίνει αναφορά στο ενεργειακό μοντέλο που υιοθετήθηκε στην Κύθνο. Το πρόγραμμα Κύθνου, που αφορούσε το νησί της Κύθνου και χρηματοδοτήθηκε από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα FP5 Microgrids αποσκοπούσε σε δοκιμή κεντρικής και αποκεντρωμένης λογικής ελέγχου για νησιδοποίηση (islanded), δηλαδή αποσυνδεδεμένη λειτουργία από το γενικό δίκτυο. Ειδικότερα μιλάμε για ένα αυτόνομο κοινοτικό δίκτυο που αποτελείται από τριφασικό δίκτυο χαμηλής τάσης, φωτοβολταϊκά σαν κύρια πηγή παραγωγής ενέργειας, σύστημα αποθήκευσης και εφεδρική γεννήτρια.

Διαθέτει εναέριες γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και καλώδιο επικοινωνίας για την ικανοποίηση των απαιτήσεων τηλεπικοινωνιών και ελέγχου. Η τροφοδότηση ενέργειας γίνεται σε 12 καλοκαιρινές κατοικίες με κυριότερα φορτία φωτισμό και άντληση νερού. Σε περίπτωση που απαιτείται περισσότερη ισχύς από τους κατοίκους από αυτή που μπορούν να δώσουν τα φωτοβολταϊκά τότε βοηθούν οι μετατροπείς συσσωρευτών των 3,6KW. (2)

Το δεύτερο παράδειγμα μικροδικτύου που θα παρουσιασθεί είναι στην Νήσο Eigg. Πρόκειται για ένα πολύ μικρό νησί (31km²) με 90 κατοίκους κοντά στην δυτική ακτή της Σκωτίας. Πριν το έργο που ολοκληρώθηκε το 2008, υπήρχε μεγάλη εξάρτηση του νησιού από τις μεμονωμένες γεννήτριες ντίζελ που είχε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το πρόγραμμα του μικροδικτύου που επιλέχθηκε εκεί πέτυχε την εκμετάλλευση ποικίλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο νησί έναντι της αποκλειστικής χρήσης των γεννητριών ντίζελ. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε υδροηλεκτρική ενέργεια 110kW, τέσσερις ανεμογεννήτριες 24kW και φωτοβολταικά 32kW. Το ευεργετικό αποτέλεσμα που είχε αυτό το έργο στους κατοίκους αυτού του νησιού εντοπίζεται στην διαθεσιμότητα της ηλεκτρικής ενέργειας (η οποία προέρχεται κατά 95% από τις ΑΠΕ) όλο το 24ωρο με φανερά μειωμένο κόστος. (2)

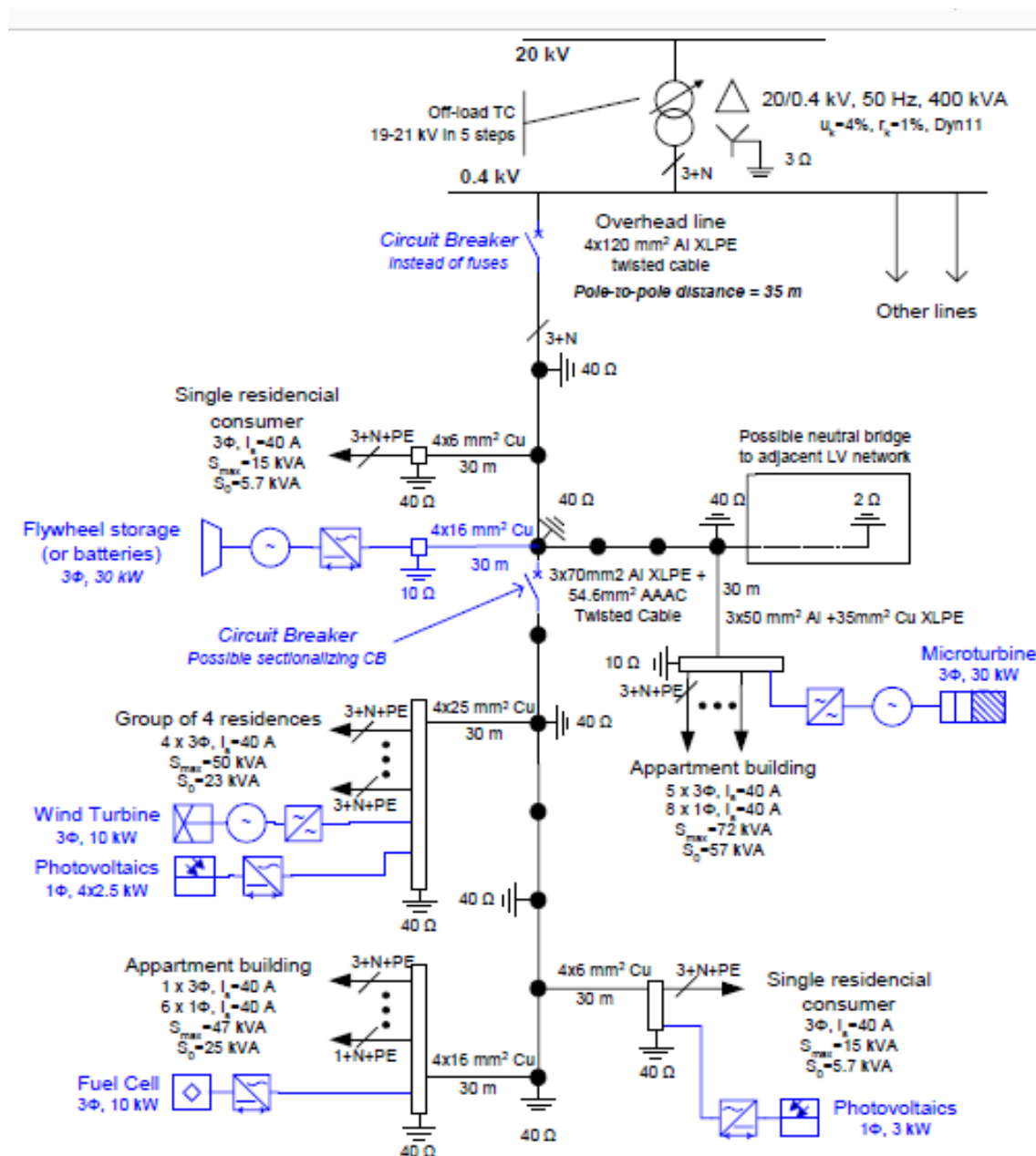


Εικόνα 1.1: Ανεμογεννήτριες στην νήσο Eigg (3)

Τα παραπάνω αποτελούν δύο επιτυχημένα παραδείγματα δημιουργίας και χρήσης μικροδικτύου, που δείχνουν τον δρόμο που πρέπει να ακολουθηθεί στο μέλλον και σε άλλες περιπτώσεις. Ειδικά σε πολλά νησιά με δύσκολη πρόσβαση που εξαρτώνται πλήρως από το γενικό δίκτυο είναι ανδιαμφισβήτητα σχεδόν επιτακτική ανάγκη να υιοθετηθεί ένα παρόμοιο ενεργειακό μοντέλο.

1.6 Παρουσίαση του μικροδικτύου της διπλωματικής

Το μικροδίκτυο που θα χρησιμοποιήσουμε εμείς στην παρούσα εργασία είναι το πρότυπο μικροδίκτυο χαμηλής τάσης της CIGRE και είναι το εξής :



Εικόνα 1.2 : Το μικροδίκτυο που θα χρησιμοποιηθεί στην διπλωματική (4)

Μερικά στοιχεία που πρέπει να επισημανθούν για το παραπάνω μικροδίκτυο είναι τα ακόλουθα :

- Τα φορτία μας αναλυτικά είναι :
 - 2 απλές μονοκατοικίες
 - 2 πολυκατοικίες
 - Γκρουπ 4 κατοικιών
- Οι μονάδες παραγωγής ή αποθήκευσης είναι :
 - Μικροτουρμπίνα
 - Φωτοβολταικά
 - Ανεμογεννήτρια
 - Κυψέλη καυσίμου
 - Μπαταρία
- Η συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα των πηγών ενέργειας είναι περίπου ίση με τα 2/3 της μέγιστης ζήτησης από τα φορτία (100kW).
- Οι κυψέλες καυσίμου (fuel cells) χρησιμοποιούν την χημική ενέργεια ενός καυσίμου (συνήθως υδρογόνο) και ένα οξειδωτικό στοιχείο (συνήθως οξυγόνο) και κάνουν την μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Ο πρώτος διακόπτης ευθύνεται για την σύνδεση του μικροδικτύου με το ευρύτερο δίκτυο. Ο δεύτερος διακόπτης (στην μέση) μπορεί προαιρετικά να χρησιμοποιηθεί αν επιθυμούμε να απομονώσουμε και να εξετάσουμε κάποιο κομμάτι του μικροδικτύου (στην εργασία δεν έγινε χρήση του).

Κεφάλαιο 2

IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers, IEEE Std 2030.7 TM- 2017

2.1 Εισαγωγή

Στο 2^ο κεφάλαιο της διπλωματικής εστιάζουμε στο ένα από τα δύο πρότυπα βάση των οποίων τεστάρουμε τον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου, το IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στις έννοιες του ελέγχου του μικροδικτύου και διατυπώνονται κάποια γενικά σχόλια που αφορούν το πρότυπο που θα χρησιμοποιήσουμε. Δίνεται μεγάλη βαρύτητα στο ελεγκτή του μικροδικτύου (Microgrid Central Controller – MGCC) και στις δύο βασικές λειτουργίες του, την λειτουργία κατανομής και την λειτουργία μετάβασης. Αναλύονται οι δύο λειτουργίες, τα χαρακτηριστικά τους και η αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

2.2 Εισαγωγή στο Microgrid Control System (MGCS)

Τα μικροδίκτυα χρειάζονται εκτεταμένο έλεγχο για να επιτύχουν τα οφέλη που παρουσιάστηκαν στον πρώτο κεφάλαιο, όπως είναι η ασφάλεια του συστήματος, η αξιοπιστία και η ανθεκτικότητά του, η βέλτιστη λειτουργία, οι μειωμένες εκπομπές ρύπων καθώς και η ομαλή μετάβαση από συνδεδεμένη με το δίκτυο κατάσταση λειτουργίας στην αποσυνδεδεμένη, χωρίς παραβίαση των προδιαγραφών και των απαιτήσεων του ρυθμιστή του συστήματος[3]. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται από το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου (Microgrid Control System – MGCS), τον “εγκέφαλο” του μικροδικτύου όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Το σύστημα ελέγχου περιέχει τις λειτουργίες του συστήματος διαχείρισης ενέργειας του μικροδικτύου (Microgrid energy management system – MEMS) οι οποίες καθορίζουν το μικροδίκτυο ως ένα σύστημα που μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα, να συνδεθεί και να αποσυνδεθεί από το ευρύτερο δίκτυο με σκοπό την ανταλλαγή ισχύος και την παροχή βοηθητικών – υποστηρικτικών υπηρεσιών σε αυτό. Το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου ευθύνεται, δηλαδή, για τον προγραμματισμό της λειτουργίας και της παραγωγής των διεσπαρμένων μονάδων, το άνοιγμα ή το κλείσιμο του διακόπτη που ενώνει το μικροδίκτυο με το δίκτυο διανομής, την ρύθμιση της συχνότητας και της τάσης καθώς και για την ρύθμιση ή μετατόπιση φορτίου (load shifting/curtailment).

Το MGCS αποτελείται από λογισμικό (software), εξοπλισμό (hardware) ή συνδυασμό των δύο και μπορεί να υλοποιηθεί – εφαρμοστεί με διάφορους τρόπους. Οι κυριότεροι είναι είτε με έναν κεντρικό ελεγκτή (centralized), είτε με διεσπαρμένους (distributed). Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται ένας κεντρικός ελεγκτής, το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου ουσιαστικά μπορούμε να το αναφέρουμε ως κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου (microgrid central controller – MGCC). (5)

2.3 Εισαγωγή στο πρότυπο IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers και περιορισμοί

Το IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers αποτελεί ένα από τα δύο πρότυπα βάση των οποίων θα εξετάσουμε τον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου μας. Το πρότυπο αναφέρεται σε τεχνικά θέματα και προκλήσεις που αφορούν την κατάλληλη λειτουργία του MGCC και ορίζει συγκεκριμένα κριτήρια και απαιτήσεις σχετικά με την απόδοση του ελεγκτή του μικροδικτύου, εστιάζοντας κυρίως στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο, δηλαδή στο POI. Ο σκοπός είναι τα κριτήρια που θα δοθούν από το πρότυπο να καλύπτουν όλα τα πιθανά μικροδίκτυα, ανεξαρτήτου τοπολογίας και διαμόρφωσης.

Το πρωτόκολλο δεν αναφέρεται καθόλου σε συγκεκριμένο τύπο εξοπλισμού ούτε σε λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί για το μικροδίκτυο. Οι περιορισμοί παρουσιάζονται παρακάτω αναλυτικά (5) :

- Δεν καθορίζεται η χωρητικότητα των φορτίων ή της παραγωγής του μικροδικτύου. Επίσης δεν αναφέρονται συγκεκριμένα επίπεδα τάσης στο POI ούτε στο εσωτερικό του μικροδικτύου.

- Δεν περιγράφονται τα συστήματα προστασίας που χρησιμοποιούνται τόσο συνολικά στο μικροδίκτυο όσο και σε κάθε στοιχείο του ξεχωριστά.
- Δεν γίνεται αναφορά στην σχεδίαση του μικροδικτύου.
- Δεν αναφέρεται η ανταλλαγή ισχύος στο ΡΟΙ μεταξύ του ευρύτερου δικτύου και του μικροδικτύου.
- Δεν αναφέρονται συστήματα επικοινωνίας.
- Γίνεται λόγος αποκλειστικά για μικροδίκτυα που έχουν ένα σημείο σύνδεσης με το ευρύτερο δίκτυο.

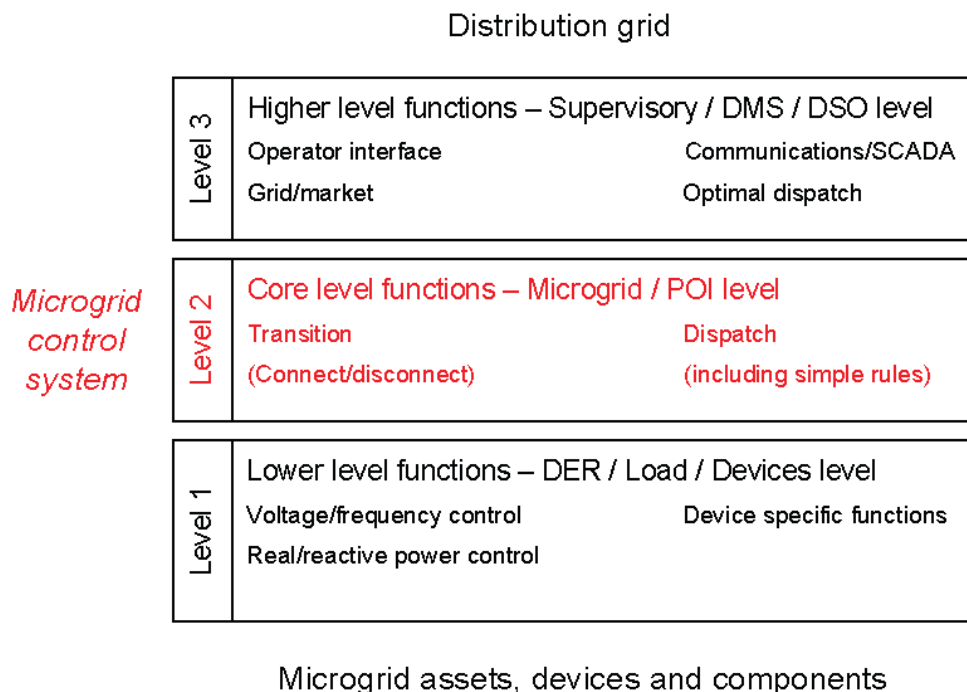
2.4 Δυνατότητες ελέγχου MGCS όπως παρουσιάζονται στο πρότυπο

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου περιλαμβάνει τις λειτουργίες ελέγχου που επιτρέπουν την ανεξάρτητη λειτουργία του μικροδικτύου από το δίκτυο διανομής αλλά και καθορίζουν την αλληλεπίδραση με αυτό. Πρέπει να διαθέτει έλεγχο πραγματικού χρόνου (real-time control) και λειτουργίες διαχείρισης ενέργειας, τα οποία θα λειτουργούν στις παρακάτω καταστάσεις του μικροδικτύου (5) :

- Όταν λειτουργεί συνδεδεμένο στο δίκτυο και όταν λειτουργεί απομονωμένα.
- Όταν υπάρχει μετάβαση από λειτουργία συνδεδεμένη στο δίκτυο σε απομονωμένη.
- Όταν υπάρχει μετάβαση από απομονωμένη σε συνδεδεμένη στο δίκτυο λειτουργία, δηλαδή επανασυγχρονισμός.
- Για την διαχείριση ενέργειας στο μικροδίκτυο, δηλαδή την βελτιστοποίηση της παραγωγής και της κατανάλωσης ενεργού και αέργου ισχύος.
- Για βοηθητικές υπηρεσίες (ancillary services) στο κύριο δίκτυο, δηλαδή στήριξη του δικτύου όταν το σύστημα είναι υπό πίεση (και όχι μόνο), με σκοπό την διατήρηση της ποιότητας ισχύος.

Για να γίνει η σύνδεση του μικροδικτύου στο ευρύτερο δίκτυο διανομής, θα πρέπει να εκπληρώνονται κάποιες τεχνικές και λειτουργικές απαιτήσεις καθώς και να παρουσιάζεται το μικροδίκτυο σαν μια ενιαία, αυτόνομη, ελεγχόμενη οντότητα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του

συστήματος ελέγχου, που ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις χρησιμοποιώντας λειτουργίες σε τρία επίπεδα, στο υψηλό (high level), στο βασικό-κύριο (core level) και στο χαμηλό (low level). Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι λειτουργίες κάθε επιπέδου :



Εικόνα 2.1: Τα επίπεδα ελέγχου του MGCS, όπως παρουσιάζονται στο πρότυπο (5)

Στο συγκεκριμένο πρότυπο γίνεται εστίαση στις βασικές λειτουργίες (core functions) του MGCS οι οποίες αποτελούν τις ελάχιστες απαραίτητες λειτουργίες που πρέπει να ικανοποιούνται για να πληρείται η περιγραφή του μικροδικτύου και των στόχων του, όπως παρουσιάζονται στην διπλωματική αλλά και στο πρωτόκολλο. Οι βασικές λειτουργίες ουσιαστικά επιβλέπουν – καλύπτουν και τις πρώτου-χαμηλού επιπέδου λειτουργίες και όπως θα φανεί μετέπειτα στην διπλωματική διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στον έλεγχο του μικροδικτύου.

Οι δύο βασικές λειτουργίες στις οποίες θα εστιάσουμε είναι:

- Λειτουργία κατανομής (dispatch function): Παρέχει συγκεκριμένα σημεία ρύθμισης-τιμές αναφοράς (setpoints) στα στοιχεία του μικροδικτύου με σκοπό την βέλτιστη λειτουργία του.
- Λειτουργία μετάβασης (transition function): Ελέγχει τις μεταβάσεις μεταξύ της συνδεδεμένης και της αποσυνδεδεμένης από το δίκτυο

κατάστασης και εξασφαλίζει ότι γίνεται σωστή κατανομή (dispatch) σε κάθε κατάσταση.

Στην συνέχεια θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά στις δύο παραπάνω λειτουργίες.

2.5 Λειτουργίες κατανομής και μετάβασης

2.5.1 Εισαγωγή στις λειτουργίες και η αλληλεπίδραση μεταξύ τους

Η λειτουργία κατανομής είναι υπεύθυνη για μια σειρά από ενέργειες που λαμβάνουν χώρα στο μικροδίκτυο και κρίνονται εξαιρετικά κρίσιμες για αυτό. Πιο συγκεκριμένα, παρέχει κατάλληλα σημεία ρύθμισης στα στοιχεία του μικροδικτύου, κατευθύνει την χρήση των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων και εξασφαλίζει την εύρυθμη λειτουργία του μικροδικτύου, τόσο στο εσωτερικό του όσο και στο σημείο σύνδεσης του με το δίκτυο. Ουσιαστικά, η λειτουργία κατανομής εκφράζεται μέσω μια σειράς εντολών κατανομής που στέλνονται στα στοιχεία του μικροδικτύου από τον MGCS, με κάποιες από αυτές να είναι κλείσιμο ή άνοιγμα διακόπτη, ρύθμιση επιπέδου παραγωγής, τροφοδότηση κρίσιμων φορτίων.

Το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου πρέπει να διεξάγει κατάλληλα την λειτουργία κατανομής, όντας σε αρμονία με τις λειτουργικές απαιτήσεις και διατηρώντας την ποιότητα ισχύος. Στην συνδεδεμένη με το δίκτυο λειτουργία, πρέπει να πληρεί τις απαιτήσεις που αφορούν την συνολική ενέργεια που καταναλώνεται/παράγεται αλλά και τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί είτε από τον διαχειριστή του συστήματος διανομής ενέργειας (πχ ποιότητα ισχύος, αρμονικές και βυθίσεις τάσης), είτε από τον διαχειριστή του μικροδικτύου. Αντίστοιχες απαιτήσεις πρέπει να πληρούνται και στην περίπτωση της απομονωμένης λειτουργίας.

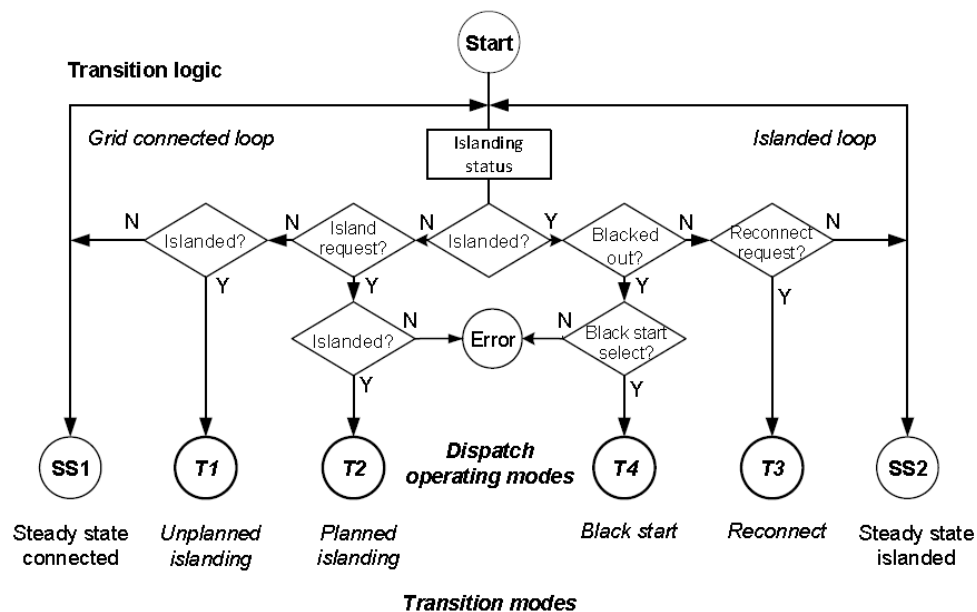
Πιο αναλυτικά η λειτουργία κατανομής παρέχει τις παρακάτω λειτουργίες:

- Εξισορρόπηση παραγωγής και φορτίου υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας του μικροδικτύου.
- Εκ νέου κατανομή των ελεγχόμενων πόρων, ως απάντηση σε απρόοπτα γεονότα που αφορούν την παραγωγή και την κατανάλωση στο εσωτερικό του μικροδικτύου ή σε τυχόν εξωτερικές εντολές.

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούμε στην λειτουργία μετάβασης. Είναι σημαντικό να εστιάσουμε στην σχέση-αλληλεπίδραση των λειτουργιών κατανομής και μετάβασης. Οι τέσσερις κατηγορίες μετάβασης του μικροδικτύου είναι :

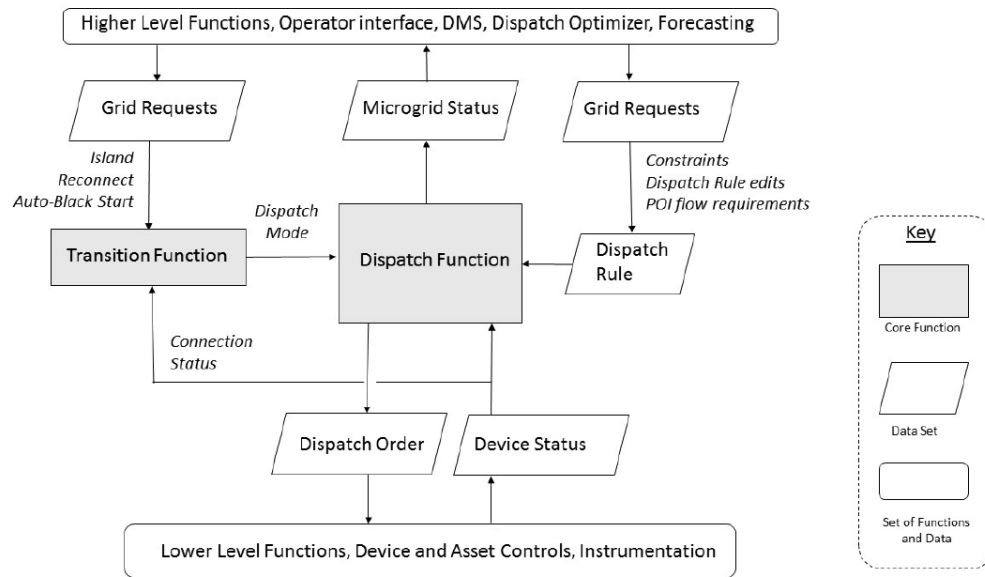
- 1) Απρόσμενη μετάβαση σε λειτουργία απομονωμένη από το δίκτυο (unplanned islanding)
- 2) Σχεδιασμένη μετάβαση σε λειτουργία απομονωμένη από το δίκτυο (planned islanding)
- 3) Επανασύνδεση στο δίκτυο
- 4) Black start

Ουσιαστικά η λειτουργία μετάβασης παρέχει την λογική για να γίνει εναλλαγή της λειτουργίας κατανομής από μια κατάσταση της σε μια άλλη. Οι καταστάσεις αυτές μπορεί να είναι μία από τις 4 μεταβατικές καταστάσεις που περιγράφηκαν παραπάνω ή μία από τις δύο σταθερές καταστάσεις του μικροδικτύου (steady state modes), την συνδεδεμένη στο δίκτυο και την απομονωμένη.



Εικόνα 2.2: Η λογική της μετάβασης και πως οδηγεί σε καταστάσεις κατανομής (dispatch) (5)

Στην εικόνα που προηγήθηκε αλλά κυρίως σε αυτή που θα ακολουθήσει φαίνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των λειτουργιών κατανομής και μετάβασης και πως η δεύτερη καλεί την πρώτη κατά την διάρκεια των μεταβάσεων. Η σχέση αυτή θα περιγραφεί με περισσότερες λεπτομέρειες μετέπειτα.



Εικόνα 2.3: Η αλληλεπίδραση μεταξύ λειτουργιών μετάβασης και κατανομής (5)

2.5.2 Λειτουργία κατανομής (Dispatch Function)

Η λειτουργία κατανομής λοιπόν, δημιουργεί και εκτελεί εντολές κατανομής, οι οποίες ουσιαστικά είναι ένα σύνολο εντολών στα κατάλληλα στοιχεία του μικροδικτύου, ανάλογα με τον κανόνα κατανομής (dispatch rule). Να σημειωθεί ότι η λειτουργία κατανομής διεξάγεται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (κάποια λεπτά) από ότι η λειτουργία μετάβασης (milliseconds).

Στις δύο σταθερές καταστάσεις του μικροδικτύου (steady states) η λειτουργία κατανομής πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (5) :

- 1) Λειτουργία συνδεδεμένη στο δίκτυο (grid-connected)
 - Έλεγχος στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (DERs)
 - Διαχείριση του φορτίου
 - Σωστή κατάσταση του διακόπτη (κλειστός)

- Ρύθμιση τάσης
- Ρύθμιση ανταλλαγής ενεργού και αέργου ισχύος στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο

2) Λειτουργία απομονωμένη από το δίκτυο (islanded)

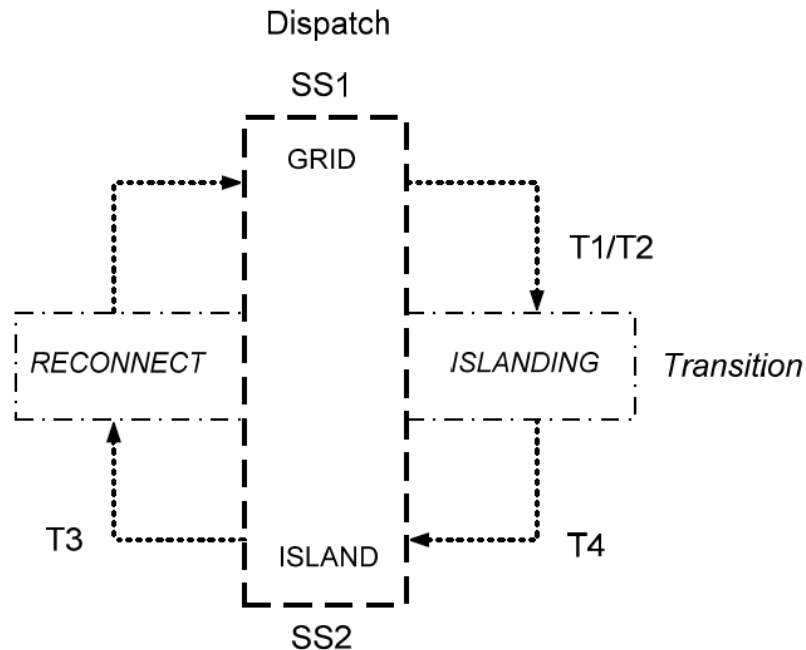
- Έλεγχος στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (DERs)
- Διαχείριση του φορτίου
- Ρύθμιση ενεργού και αέργου ισχύος στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο σε μηδενική τιμή
- Σωστή κατάσταση του διακόπτη (ανοικτός)
- Ρύθμιση τάσης
- Ρύθμιση συχνότητας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η λειτουργία κατανομής διεξάγεται εκ νέου, ως απάντηση σε απρόοπτα γεγονότα που αφορούν την παραγωγή και την κατανάλωση στο εσωτερικό του μικροδικτύου ή σε τυχόν εξωτερικές εντολές. Τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν οι μεταβάσεις. Ωστόσο τα χαρακτηριστικά των κατηγοριών των μεταβάσεων θα δωθούν αργότερα, όταν παρουσιασθεί η λειτουργία μετάβασης.

Επίσης σε επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθούν η διαδικασία της δοκιμής (testing) των λειτουργιών κατανομής και μετάβασης, ο τρόπος που καθορίζουμε σενάρια για τις δοκιμές μας αλλά και οι κατάλληλες μετρήσεις που πρέπει να παίρνουμε σε κάθε περίπτωση. Προς το παρόν, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια αρχική παρουσίαση των χαρακτηριστικών των δύο κύριων λειτουργιών.

2.5.3 Λειτουργία μετάβασης (Transition Function)

Η λειτουργία μετάβασης στο μικροδίκτυο μπορεί να πυροδοτηθεί με τρεις τρόπους. Είτε με εντολή για σχεδιασμένη μετάβαση από συνδεδεμένη στο δίκτυο κατάσταση σε απομονωμένη λειτουργία, είτε με εντολή για επανασύνδεση στο δίκτυο, είτε από μια συνθήκη στο σύστημα που θα προκαλέσει απρόσμενη μετάβαση σε απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, όταν ολοκληρωθεί η μετάβαση το μικροδίκτυο θα λειτουργεί σε μία από τις δύο σταθερές καταστάσεις. Η αλληλουχία μεταξύ των σταθερών καταστάσεων και των μεταβάσεων φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.4 : Αλληλουχία μεταξύ των σταθερών καταστάσεων και των μεταβάσεων (5)

Όπως και στις σταθερές καταστάσεις, έτσι και εδώ θα παρουσιασθούν τα χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας μετάβασης. Η παρουσίαση γίνεται με την μορφή βημάτων :

- 1) Σχεδιασμένη μετάβαση σε απομονωμένη λειτουργία
 - a. Εντολή για απομονωμένη λειτουργία, δηλαδή αποσύνδεση από το δίκτυο.
 - b. Εξισορρόπηση φορτίου και παραγωγής, η ενεργός και η άεργος ισχύς στο POI να πάει στο μηδέν.
 - c. Άνοιγμα διακόπτη στο POI.
 - d. Μετάβαση σε σταθερή κατάσταση απομονωμένης λειτουργίας του μικροδικτύου.
- 2) Απρόσμενη μετάβαση σε απομονωμένη λειτουργία
 - a. Ανίχνευση συνθηκών για απομονωμένη λειτουργία.
 - b. Διεξαγωγή κάποιων απαραίτητων διεργασιών όπως είναι η απόρριψη φορτίου (δηλαδή μείωση φορτίου έτσι ώστε να αποφευχθεί η ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης).
 - c. Άνοιγμα διακόπτη στο POI.

- d. Μετάβαση σε σταθερή κατάσταση απομονωμένης λειτουργίας του μικροδικτύου.

3) Επανασύνδεση στο δίκτυο

- a. Επανασυγχρονισμός, ρύθμιση τάσης, γωνίας φάσης και συχνότητας εντός των προδιαγραφόμενων ορίων.
- b. Κλείσιμο διακόπτη στο POI.
- c. Επανασύνδεση στο δίκτυο

4) Black start: Για κάθε μικροδίκτυο υπάρχουν ξεχωριστά βήματα για black start. Στο πρωτόκολλο δεν εξετάζεται σαν περίπτωση, οπότε ούτε και στην διπλωματική.

Παρόμοια με τη λειτουργία κατανομής, και στην λειτουργία μετάβασης στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια πρώτη παρουσίαση των χαρακτηριστικών της. Στο κεφάλαιο που θα ακολουθήσει θα γίνει εστίαση στην διαδικασία δοκιμής της.

Κεφάλαιο 3

IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers, IEEE Std 2030.8 TM-2018

3.1 Εισαγωγή

Στο 3^ο κεφάλαιο εστιάζουμε στο πρότυπο IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers. Εδώ γίνεται παρουσίαση των δοκιμών που θα γίνουν για τις δύο λειτουργίες του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου που αναφέρθηκαν στο 2^ο κεφάλαιο. Για να αξιολογήσουμε την απόδοση του ελεγκτή καταστρώνουμε σενάρια με αρχικές συνθήκες και γεγονός που πυροδοτεί τις λειτουργίες, τα οποία θα πρέπει να προσομοιώσουμε. Δίνονται συγκεκριμένα παραδείγματα για τα παραπάνω στοιχεία για κάθε μία κατηγορία δοκιμών. Τέλος αναφέρονται τα μεγέθη και οι παράμετροι που πρέπει να εξετάσουμε και να αξιολογήσουμε, οι μετρήσεις που πρέπει να ληφθούν καθώς και τα όρια μέσα στο οποία πρέπει να βρίσκονται.

3.2 Εισαγωγή στο πρότυπο IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers

Το IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers είναι το δεύτερο πρότυπο που θα χρησιμοποιήσουμε για να εξετάσουμε τον ελεγκτή του μικροδικτύου. Το συγκεκριμένο πρότυπο ταυτίζεται σε αρκετά σημεία με το IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers που εξετάστηκε στο παραπάνω κεφάλαιο.

Ειδικότερα και εδώ γίνεται λόγος για τις λειτουργίες του ελεγκτή που είναι κοινές για όλα τα μικροδίκτυα, αναπτύσσονται οι ίδιες κύριες λειτουργίες του MGCS (dispatch, transition) και γίνεται εστίαση, όπως και νωρίτερα, στο σημείο σύνδεσης του μικροδικτύου με το δίκτυο.

Επιπλέον ισχύουν οι ίδιοι περιορισμοί που δόθηκαν αναλυτικά παραπάνω. Ωστόσο, το πρότυπο αυτό ξεχωρίζει για το γεγονός ότι καθορίζει συγκεκριμένη διαδικασία που θα ακολουθήσουμε για να δοκιμάσουμε τις λειτουργίες του ελεγκτή, συγκεκριμένο τρόπο που θα σχεδιάζουμε τα σενάρια δοκιμών με αρχικές συνθήκες και μετρήσεις στα κατάλληλα σημεία του μικροδικτύου.

Εδώ λοιπόν, θα αναπτυχθεί η διαδικασία που θα μας επιτρέψει να δοκιμάσουμε την λειτουργία κατανομής (dispatch) και την λειτουργία μετάβασης (transition). Πρέπει να γίνουν δοκιμές τόσο σε κατάσταση με το μικροδίκτυο συνδεδεμένο στο δίκτυο όσο και σε απομονωμένη. Αφού καθοριστούν οι συνδυασμοί αρχικών συνθηκών και γεγονότος που θα πυροδοτήσει μια λειτουργία του ελεγκτή (initiating event) για κάθε μια κατηγορία δοκιμών ξεχωριστά, πρέπει να εκτελεσθούν οι δοκιμές και να αξιολογηθεί η απόδοση του. (6)

3.3 Ανάπτυξη σεναρίων και συνθήκες για κάθε λειτουργία

Αναλυτικά η διαδικασία δοκιμής του ελεγκτή πρέπει να ακολουθεί τα παρακάτω βήματα :

- Καθορισμός σεναρίων που θα τρέξουμε για να δοκιμάσουμε τις λειτουργίες κατανομής και μετάβασης υπό αντιπροσωπευτικές συνθήκες.
- Καθορισμός μετρήσεων που θα λάβουμε για την αξιολόγηση του MGCS, με γνώμονα και τις απαιτήσεις του δικτύου διανομής.
- Επιλογή του περιβάλλοντος δοκιμής που ποικίλει από πλήρως προσομοιωμένο περιβάλλον μέχρι εγκατεστημένο εξοπλισμό. Ένα κατάλληλο περιβάλλον προσομοίωσης είναι ένας προσομοιωτής σε πραγματικό χρόνο με hardware-in-the-loop προσέγγιση για την δοκιμή των στοιχείων του MGCS. Η προσέγγιση αυτή θα αναλυθεί λεπτομερώς αργότερα.

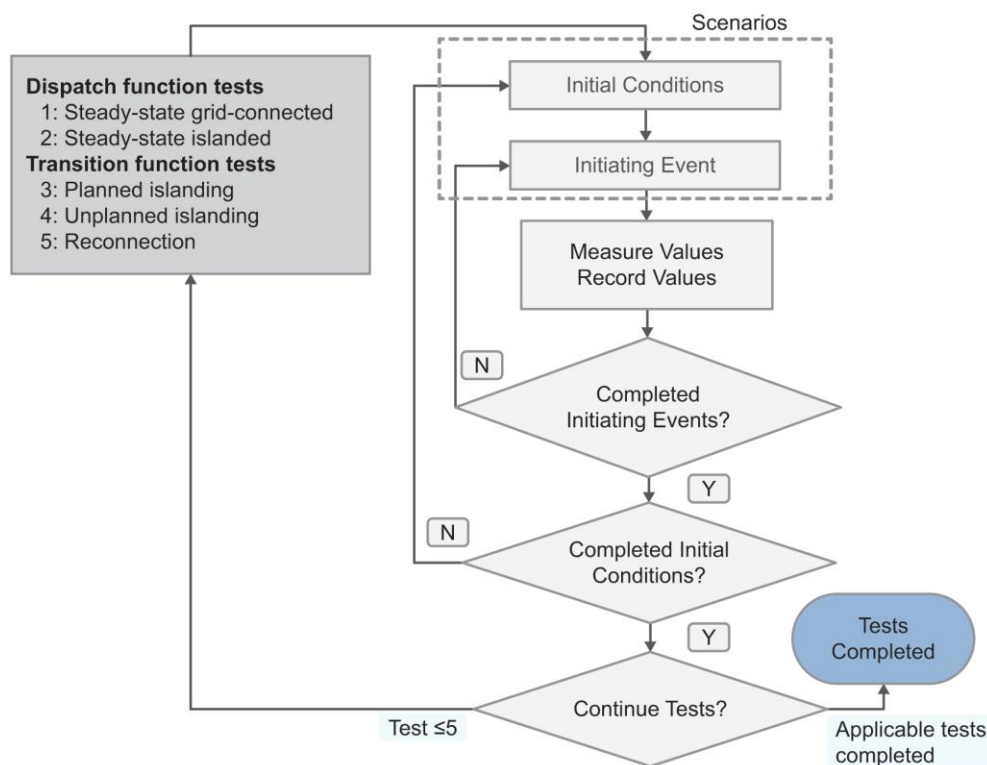
Κάθε κατηγορία δοκιμών αποτελείται από διάφορα σενάρια και κάθε δοκιμή αποτελεί την εκτέλεση ενός σεναρίου. Το σενάριο απαρτίζεται από έναν μοναδικό συνδυασμό αρχικών συνθηκών (initial conditions), όπως είναι η κατάσταση του διακόπτη, η ροή ισχύος στο μικροδίκτυο ή οι ρυθμίσεις του ελεγκτή και από ένα γεγονός που πυροδοτεί την λειτουργία του (initiating event) όπως είναι κάποιο σφάλμα ή άνοιγμα του διακόπτη. Σε κάθε δοκιμή λαμβάνονται αποτελέσματα που θα βοηθήσουν μετά στην αξιολόγηση μας. Αν κάποια δοκιμή αποτύχει θα πρέπει να γίνει η σωστή ανάλυση και να επαναληφθεί.

Οι δοκιμές κατηγοριοποιούνται ανάλογα την κατάσταση του μικροδικτύου, είτε δοκιμές σε σταθερή κατάσταση (συνδεδεμένη ή αποσυνδεδεμένη), είτε δοκιμές σε μετάβαση. Όσον

αφορά τις δοκιμές που γίνονται για την λειτουργία κατανομής, που ονομάζονται dispatch tests, καλό είναι τα σενάρια να περιέχουν ως αρχικές συνθήκες, τόσο κανονικές συνθήκες όσο και συνθήκες έκτακτης ανάγκης. Στις δοκιμές με το μικροδίκτυο συνδεδεμένο στο δίκτυο πρέπει ο διακόπτης στο POI να είναι αρχικά κλειστός, ενώ σε αυτές που το μικροδίκτυο λειτουργεί απομονωμένα πρέπει ο διακόπτης να είναι αρχικά ανοικτός.

Από την άλλη πλευρά, οι δοκιμές που γίνονται για την λειτουργία μετάβασης απαιτούν σενάρια με διαφορετικές αρχικές συνθήκες και αλλαγή της αρχικής κατάστασης του διακόπτη. Για τα σενάρια που αφορούν την σχεδιασμένη μετάβαση σε απομονωμένη λειτουργία στέλνεται σχετική εντολή στον ελεγκτή ο οποίος προσαρμόζει την ροή ισχύος στο POI κοντά στο μηδέν και στέλνει με την σειρά του εντολή για άνοιγμα του διακόπτη. Στην περίπτωση των σεναρίων της απρόσμενης μετάβασης σε απομονωμένη λειτουργία, εξετάζονται απρόοπτες καταστάσεις, όπως κάποιο σφάλμα που μπορεί να οδηγήσει σε υποχρεωτικό άνοιγμα του διακόπτη στο POI. Τέλος, αν μιλάμε για τα σενάρια της επανασύνδεσης του μικροδικτύου στο δίκτυο, στέλνεται σχετική εντολή στον ελεγκτή. Άλλος τρόπος είναι η αυτόματη επανασύνδεση όταν έχουν επιστρέψει οι ομαλές συνθήκες τάσης και συχνότητας στο δίκτυο. Πρέπει τότε ο κεντρικός ελεγκτής να διασφαλίσει τον σωστό συγχρονισμό (εξισορρόπηση τάσεων και συχνότητας πριν και μετά τον διακόπτη), πριν κλείσει ο διακόπτης. (6)

Η εικόνα που ακολουθεί απεικονίζει το διάγραμμα ροής για τον έλεγχο των βασικών λειτουργιών του ελεγκτή. Περιλαμβάνει όλες τις υποχρεωτικές δοκιμές που πρέπει να γίνουν σύμφωνα με το πρότυπο.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα ροής με όλες τις δοκιμές που πρέπει να γίνουν στον MGCC (6)

3.4 Αρχικές συνθήκες και γεγονότα πυροδότησης των σεναρίων για την λειτουργία κατανομής και την λειτουργία μετάβασης

Όσον αφορά την διαδικασία δοκιμής της λειτουργίας κατανομής θα πρέπει να δημιουργηθούν σενάρια για δύο καταστάσεις. Η μία είναι η σταθερή κατάσταση στην οποία το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο (steady-state grid-connected) και η άλλη είναι η σταθερή κατάσταση στην οποία το μικροδίκτυο λειτουργεί αποσυνδεδεμένο από το δίκτυο (steady-state islanded). Σε κάθε σενάριο μετράμε τάση, συχνότητα, ενεργό και άεργο ισχύ στο POI και αν χρειάζεται σε κάποια μονάδα παραγωγής ή φορτίο. Θα πρέπει τα μεγέθη να είναι εντός των ορίων που θα έχουν τεθεί.

Ωστόσο, εκτενέστερη αναφορά στις μετρήσεις και στα όρια θα γίνει μετέπειτα. Προς το παρόν δίνονται κάποια παραδείγματα αρχικών συνθηκών και γεγονότων πυροδότησης λειτουργίας για κάθε μία από τις δύο καταστάσεις.

a. Dispatch - steady state grid-connected scenarios

- Αρχικές συνθήκες : κλειστός διακόπτης στο POI, συγκεκριμένα ποσοστά παραγωγής των μονάδων και κατανάλωσης φορτίου.
- Γεγονός : Τριπάρισμα κάποιου DER, αλλαγή στη ροή ισχύος (setpoint change).

b. Dispatch - steady state islanded scenarios

- Αρχικές συνθήκες : ανοικτός διακόπτης στο POI, συγκεκριμένα ποσοστά παραγωγής των μονάδων και κατανάλωσης φορτίου.
- Γεγονός : Τριπάρισμα κάποιου DER, αλλαγή στη ροή ισχύος (setpoint change), μείωση παροχής ισχύος από κάποια μονάδα παραγωγής.

Από την άλλη πλευρά, για την δοκιμή της λειτουργίας μετάβασης καλό είναι να δημιουργηθούν σενάρια για τρεις καταστάσεις. Η πρώτη είναι η σχεδιασμένη μετάβαση του μικροδικτύου σε λειτουργία απομονωμένη, η δεύτερη είναι η απρόσμενη μετάβαση σε λειτουργία απομονωμένη και η τρίτη είναι η επανασύνδεση στο δίκτυο. Και εδώ μετράμε τάση, συχνότητα, ενεργό και άεργο ισχύ στα σημεία που αναφέρθηκαν πάνω, ενώ επίσης και το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η μετάβαση.

a. Transition – Planned islanding scenarios

- Αρχικές συνθήκες : κλειστός διακόπτης στο POI, συγκεκριμένα ποσοστά παραγωγής των μονάδων και κατανάλωσης φορτίου.
- Γεγονός : Λήψη εντολής για σχεδιασμένη μετάβαση σε απομονωμένη λειτουργία.

b. Transition – Unplanned islanding scenarios

- Αρχικές συνθήκες: κλειστός διακόπτης στο POI, συγκεκριμένα ποσοστά παραγωγής των μονάδων και κατανάλωσης φορτίου, αποκλίσεις των τιμών της συχνότητας και της τάσης από τις απαιτήσεις του συστήματος.
- Γεγονός: απρόσμενο άνοιγμα του διακόπτη στο POI λόγω σφάλματος.

c. Reconnection scenarios

- Αρχικές συνθήκες: ανοικτός διακόπτης στο POI, συγκεκριμένα ποσοστά παραγωγής των μονάδων και κατανάλωσης φορτίου.

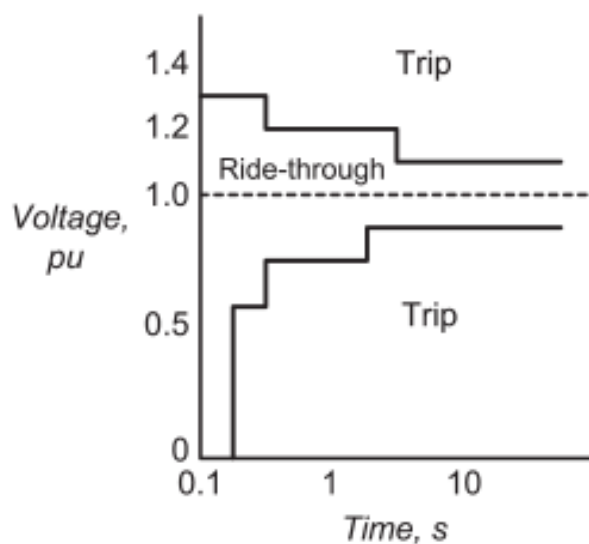
- Γεγονός : Λήψη σήματος για επανασύνδεση στο δίκτυο.

Τα παραπάνω αποτελούν ορισμένα από τα πιο συνηθισμένα παραδείγματα για αρχικές συνθήκες και για γεγονότα πυροδότησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα σενάρια δοκιμών του ελεγκτή. Αυτά χρησιμοποιήσαμε και στο εργαστήριο για τις δοκιμές μας, κάτι που θα παρουσιασθεί αργότερα στο εργαστηριακό κομμάτι της διπλωματικής.

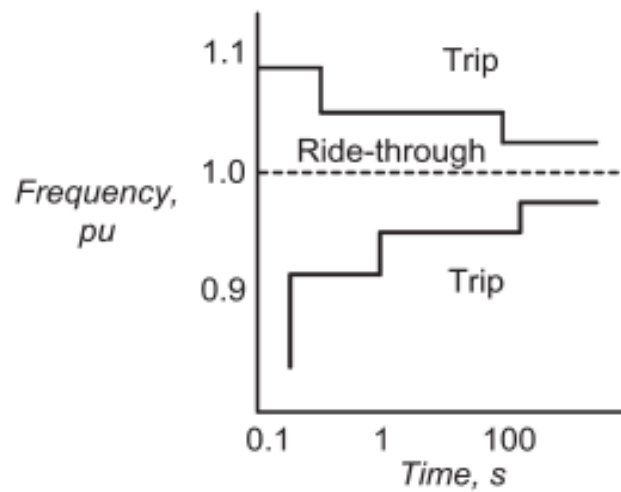
3.5 Μετρήσεις και επιτρεπτά όρια τιμών

Στις δοκιμές και στα σενάρια που περιγράφηκαν παραπάνω θα πρέπει να λάβουμε τιμές για τάση, ρεύμα και δευτερευόντως για συχνότητα, ενεργό και άεργο ισχύ ή άλλα μεγέθη που φανερώνουν την ποιότητα ισχύος (πχ κυματομορφές τάσης και ρεύματος). Το πρωτόκολλο αυτό επικεντρώνεται στις μετρήσεις της τάσης, της συχνότητας και της ισχύος (ενεργός και άεργος) στο σημείο σύνδεσης του μικροδικτύου με το δίκτυο, στο POI.

Το τυπικό εύρος τιμών, σύμφωνα με τις απαιτήσεις-όρια που υπάρχουν, για την τάση και την συχνότητα του μικροδικτύου στο POI σε κατάσταση συνδεδεμένη στο δίκτυο φαίνονται στα δύο παρακάτω σχήματα.



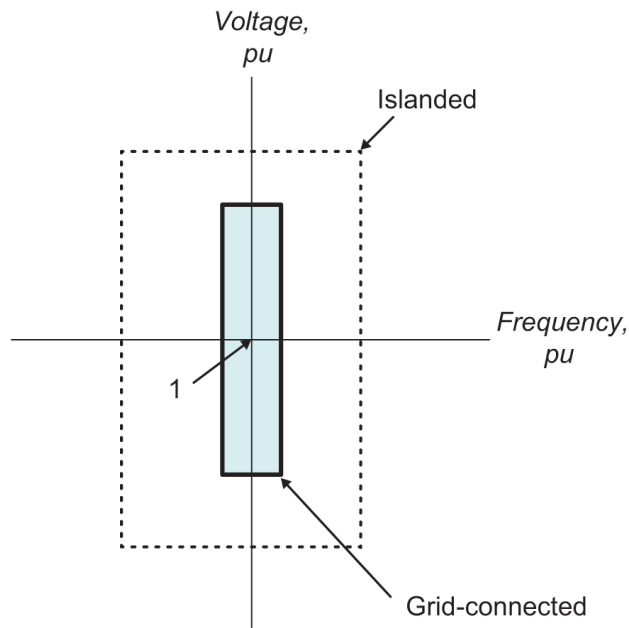
Εικόνα 3.2: Εύρος τιμών τάσης ανά μονάδα στο POI (grid-connected mode) (6)



Εικόνα 3.3: Εύρος τιμών συχνότητας ανά μονάδα στο POI (grid-connected mode) (6)

Η περιοχή που αναφέρεται ως ride-through είναι το επιτρεπτό διάστημα τιμών. Οποιαδήποτε τιμή εκτός του διαστήματος αυτού οδηγεί σε εντολή για αποσύνδεση του μικροδικτύου από το δίκτυο. Να σημειωθεί ότι η γραμμή ανάμεσα στο trip και στο ride-through μπορεί να αποτελέσει ένα dead band όπου οποιαδήποτε από τις δύο καταστάσεις είναι αποδεκτή. Τα επίπεδα τάσης και συχνότητας τίθενται από τις απαιτήσεις της σύνδεσης (interconnection requirements).

Όσον αφορά την κατάσταση στην οποία το μικροδίκτυο λειτουργεί αποσυνδεδεμένο από το δίκτυο, τα όρια για τα επίπεδα τάσης και συχνότητας είναι λιγότερο αυστηρά και είναι μοναδικά για κάθε μικροδίκτυο. Το γεγονός αυτό φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα :



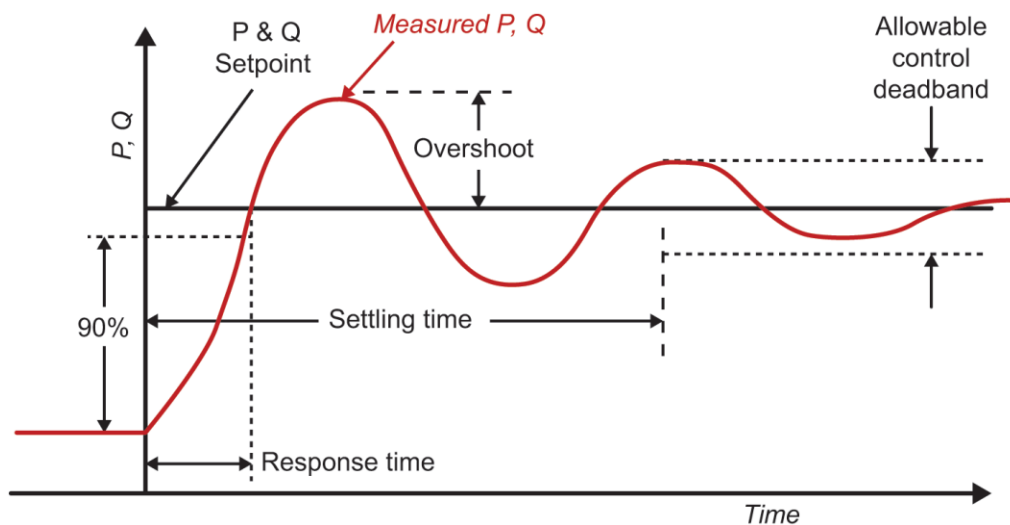
Εικόνα 3.4: Εύρος τιμών τάσης και συχνότητας ανά μονάδα στο POI (grid-connected, islanded)
(6)

Συγκεντρωτικά για κάθε κατάσταση ξεχωριστά και ανάλογα την λειτουργία του ελεγκτή παρουσιάζονται τα όρια στον παρακάτω πίνακα με παραπομπή στο κατάλληλο από τα τρία παραπάνω σχήματα (3.2, 3.3, 3.4). Επίσης σε ξεχωριστή στήλη δίνεται από που ορίζονται οι απαιτήσεις.

Πίνακας 3.1: Οι απαιτήσεις και η εικόνα που αντιστοιχεί για κάθε μία κατάσταση του μικροδικτύου (6)

Λειτουργία	Κατάσταση	Απαιτήσεις	Εικόνα που ορίζει τα όρια
SS dispatch	Islanded	Microgrid Owner (relaxed)	Σχήμα 3.4
SS dispatch	Grid-connected	POI interconnection agreement	Σχήμα 3.2, Σχήμα 3.3
Transition	Islanding	POI interconnection agreement and Microgrid Owner	Σχήμα 3.2, Σχήμα 3.3
Transition	Reconnection	POI interconnection agreement	Σχήμα 3.2, Σχήμα 3.3, Σχήμα 3.4

Τώρα σε ότι αφορά τις μετρήσεις για την ενεργό και την άεργο ισχύ, υπάρχουν κάποια μεγέθη που μπορούμε να αξιολογήσουμε και συνδεόνται κυρίως με την προσπάθεια του ελεγκτή να φέρει τα επίπεδα ισχύος κοντά στο setpoint που θα ορίζεται σε κάθε περίπτωση. Τα μεγέθη αυτά καθορίζονται από τις απαιτήσεις της σύνδεσης ή τις ιδιότητες του εξοπλισμού που χρησιμοποιούμε και απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3.5: Απεικόνιση ελέγχου για P,Q στο POI (6)

Κεφάλαιο 4

Πρωτεύων και δευτερεύων έλεγχος του μικροδικτύου

4.1 Εισαγωγή

Στα κεφάλαια 2 και 3, στο πλαίσιο της παρουσίασης του περιεχομένου των δύο προτύπων που αποτελούν την βάση της διπλωματικής, έγινε αναφορά στον έλεγχο του μικροδικτύου, στον Microgrid Central Controller και τονίστηκε η καθοριστική σημασία του ελέγχου για την εύρυθμη λειτουργία του μικροδικτύου. Έγινε εστίαση στις λειτουργίες κατανομής και μετάβασης, οι οποίες όπως φάνηκε στο σχήμα 2.1 ανήκουν στο δεύτερο και εξαιρετικά κρίσιμο στάδιο ελέγχου του μικροδικτύου.

Στο παρόν κεφάλαιο, το κεφάλαιο 4 θα αναφερθούμε λεπτομερώς στην συνολική διαδικασία που ακολουθούμε για τον έλεγχο του μικροδικτύου, δηλαδή στην ιεραρχία και στα επίπεδα του ελέγχου, ποιες προσεγγίσεις υπάρχουν στην κάθε μια βαθμίδα του, πώς επιτυγχάνονται και ποια τα πλεονεκτήματά τους. Αναλυτικά, στην αρχή θα εξετάσουμε τον πρωτεύοντα έλεγχο και θα εστιάσουμε στην λογική droop control. Στην συνέχεια θα προχωρήσουμε στην ανάλυση του δευτερεύοντα ελέγχου και θα επικεντρωθούμε στην τεχνική κεντρικού ελέγχου σε αυτό το στάδιο. Για κάθε τεχνική ή μέθοδο που επιλέγουμε να μιλήσουμε, θα γίνεται παρουσίαση των πλεονεκτημάτων της αλλά και κάποιων ανασταλτικών παραγόντων. Στο τέλος γίνεται μια τυπική αναφορά και στον τριτεύοντα έλεγχο.

4.2 Εισαγωγή στον έλεγχο του μικροδικτύου

Η μετάβαση από τα σημερινά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας στην λογική των μικροδικτύων δεν είναι εύκολη ούτε ομαλή. Υπάρχουν πολλές δυσκολίες που πρέπει να ξεπεραστούν έτσι ώστε τα μικροδίκτυα να υιοθετηθούν σε μεγάλο βαθμό και να μπορέσουμε

να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματά τους. Οι περισσότερες από αυτές τις δυσκολίες και τα ζητήματα που προκύπτουν, μπορούν να διευθετηθούν μέσω του ελέγχου του μικροδικτύου. Για αυτόν τον λόγο ο έλεγχος κρίνεται ζωτικής σημασίας και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της λογικής του μικροδικτύου. Οι έλεγχοι λοιπόν που γίνονται στις διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής του μικροδικτύου καταφέρνουν την ομαλή λειτουργία του μικροδικτύου και την αρμονική συνεργασία όλων των επιμέρους στοιχείων του.

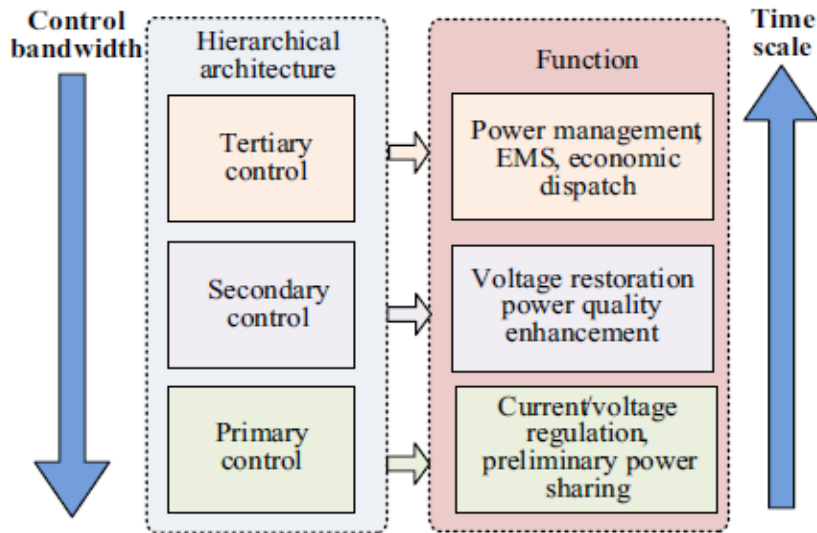
Αρχικά μέσω του κατάλληλου ελέγχου πετυχαίνουμε ισορροπία μεταξύ παραγόμενης και καταναλώμενης ισχύος, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό καθώς αποφεύγουμε πιθανά προβλήματα στην μεταβατική ευστάθεια του συστήματος. Αυτό το πετυχαίνουμε κυρίως μέσω του καταμερισμού της ισχύος των μονάδων παραγωγής. Επιπλέον, με τον έλεγχο φροντίζουμε την ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας στο μικροδίκτυο, εξαλείφοντας τις αποκλίσεις από την ονομαστική τιμή τους. Κάτι τέτοιο άλλωστε θα δημιουργούσε πρόβλημα στην ευστάθεια του συστήματος και στην ομαλή λειτουργία των στοιχείων του. Ουσιαστικά, αυτοί είναι οι κύριοι πυλώνες του ελέγχου στο μικροδίκτυο. Θα παρουσιασθούν αναλυτικά στην συνέχεια, μαζί με τις μεθόδους που χρησιμοποιούμε για τους πραγματοποιήσουμε.

Όσον αφορά τα είδη των ελεγκτών υπάρχουν τρία, ο ελεγκτής της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής (Distributed generation controller – DGC) ο οποίος συνδέεται σε κάθε μονάδα παραγωγής και σε κάθε αποθηκευτική μονάδα, ο κεντρικός ελεγκτής του μικροδικτύου (Microgrid Central controller - MGCC) και ο ελεγκτής φορτίου (Load controller – LC).

Το σημαντικότερο ρόλο διαδραματίζει ο κεντρικός ελεγκτής, στις λειτουργίες του οποίου αναφερθήκαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο κεντρικός έλεγχος του μικροδικτύου παρέχεται από τον διαχειριστή ενέργειας του μικροδικτύου, ο οποίος συγκεντρώνει πληροφορίες σχετικά με τις τοπικές ανάγκες, τις απαιτήσεις σε ποιότητα ισχύος, το κόστος παραγωγής και τις ανάγκες του δικτύου και στην συνέχεια ρυθμίζει την ποσότητα ισχύος που θα μεταφερθεί μεταξύ του ευρύτερου δικτύου και του μικροδικτύου. Κάποια συγκεκριμένα παραδείγματα λειτουργιών του κεντρικού ελεγκτή αποτελούν η παροχή τιμών ισχύος και τάσης των σημείων λειτουργίας σε κάθε μικροελεγκτή, η διατήρηση της ομαλής επικοινωνίας μεταξύ δικτύου και μικροδικτύου, η βελτίωση της απόδοσης των μονάδων και η διατήρηση της ποιότητας ισχύος εντός του μικροδικτύου. Ουσιαστικά ο κεντρικός ελεγκτής επιβλέπει το συνολικό σύστημα ελέγχου μέσω των ελεγκτών μικροπηγής και των ελεγκτών φορτίου. (7)

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστεί ως επί το πλείστον η ιεραρχία του ελέγχου, δηλαδή τα επίπεδα του. Ο έλεγχος σε ένα μικροδίκτυο αποτελείται από τρία επίπεδα, τον πρωτεύοντα, τον δευτερεύοντα και τον τριτεύοντα έλεγχο. Στην διπλωματική θα εστιάσουμε στους δύο πρώτους οι οποίοι είναι και οι πλέον καθοριστικοί.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η ιεραρχία του ελέγχου, παρομοίως με την εικόνα 2.1.



Εικόνα 4.1: Η ιεραρχία του ελέγχου στο μικροδίκτυο (8)

4.3 Πρωτεύοντας έλεγχος μικροδικτύου

4.3.1 Εισαγωγή στον πρωτεύοντα έλεγχο και οι στόχοι του

Το πρώτο επίπεδο ελέγχου του μικροδικτύου είναι ο πρωτεύοντας έλεγχος. Ο έλεγχος αυτός ονομάζεται και τοπικός καθώς στηρίζεται σε τοπικές μετρήσεις και συνήθως δεν χρειάζεται την βοήθεια κάποιου συστήματος επικοινωνιών. Πρόκειται για έναν έλεγχο ιδιαίτερα σημαντικό και ταυτόχρονα γρήγορο, της τάξης των δευτερολέπτων. Οι στρατηγικές που μπορούμε να εφαρμόσουμε στο συγκεκριμένο επίπεδο ελέγχου είναι ο κεντρικός και ο αποκεντρωμένος έλεγχος. Στον πρώτο όλες οι αποφάσεις λαμβάνονται από τον κεντρικό ελεγκτή και εφαρμόζονται στον τοπικό έλεγχο, ενώ στον δεύτερο υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με τις αποφάσεις να παίρνονται από κοινού. Αργότερα στον δευτερεύοντα έλεγχο θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση στους δύο παραπάνω τρόπους ελέγχου με έμφαση στον κεντρικό.

Οι στόχοι του πρωτεύοντα ελέγχου συνοψίζονται παρακάτω :

- Διαμερισμός της ισχύος (ενεργού και αέργου) που παράγεται στο μικροδίκτυο, ανάλογα και την δυνατότητα παραγωγής της κάθε μονάδας.
- Όταν το μικροδίκτυο μεταβαίνει σε αυτόνομη λειτουργία, θα πρέπει οι τιμές της συχνότητας και της τάσης να διατηρούνται εντός συγκεκριμένων ορίων.
- Να προσφέρει την δυνατότητα να προστεθούν νέες μονάδες παραγωγής στο σύστημα δίχως να χρειάζεται εκ νέου ρύθμιση των ελεγκτών.
- Να δίνει την δυνατότητα σε κάθε τοπικό ελεγκτή να λειτουργεί χωρίς την βοήθεια του κεντρικού ελέγχου.

4.3.2 Έλεγχοι ενεργού ισχύος–συχνότητας και αέργου ισχύος–τάσης

Είναι γεγονός ότι για να πετυχαίνουμε σε ένα ηλεκτρικό σύστημα ευστάθεια θα πρέπει να φροντίζουμε η μηχανική ισχύς εισόδου που παράγεται να ισορροπεί διαρκώς με την μηχανική ισχύ των τροφοδοτούμενων φορτίων. Οποιαδήποτε ανισορροπία οδηγεί σε κάλυψη του χάσματος από την κινητική ενέργεια της γεννήτριας. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας, άρα και ταυτόχρονη μεταβολή της συχνότητας της (επομένως και της συχνότητας του συστήματος).

Συγκεκριμένα σε περίπτωση που η παραγόμενη ισχύς είναι περισσότερη από την καταναλισκόμενη τότε η συχνότητα αυξάνεται, ενώ στην αντίστροφη περίπτωση η συχνότητα μειώνεται. Κάτι τέτοιο είναι εντελώς ανεπιθύμητο καθώς η επίτευξη ευστάθειας στο σύστημα προϋποθέτει η συχνότητα ανεξαρτήτου κατάστασης να βρίσκεται πολύ κοντά στην ονομαστική της τιμή (+/- 0.1%).

Εδώ λοιπόν υπερτονίζεται η αξία του ελέγχου, καθώς ευθύνεται για την επαναφορά της συχνότητας του μικροδικτύου στην ονομαστική της τιμή. Ειδικότερα αν παρατηρηθεί μεταβολή της παραγωγής ή του φορτίου με αναπόφευκτο επακόλουθο την μεταβολή της συχνότητας όπως περιγράφηκε παραπάνω, ο πρωτεύοντας έλεγχος συχνότητας αναλαμβάνει να επαναφέρει αρχικά την συχνότητα κοντά στην ονομαστική της τιμή. Κάθε μονάδα παραγωγής αναλαμβάνει την παραγωγή που της αναλογεί για να ισορροπηθεί η παραγωγή με το φορτίο, όποτε επιτυγχάνεται ισορροπία στο σύστημα σε μια συχνότητα που, ωστόσο, διαφέρει λίγο από την ονομαστική. Εκεί έρχεται η ώρα του δευτερεύοντα ελέγχου να εξαλείψει αυτό το μόνιμο σφάλμα. Ωστόσο, αυτό το επίπεδο ελέγχου θα αναλυθεί μετέπειτα.

Από την άλλη πλευρά είναι εξίσου σημαντικός με τον έλεγχο της συχνότητας, ο έλεγχος της τάσης. Οποιαδήποτε συσκευή συνδεθεί σε ένα σύστημα λειτουργεί με μια συγκεκριμένη ονομαστική τάση και οποιαδήποτε απόκλιση από αυτήν έχει συνέπειες που θέλουμε να αποφύγουμε. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σχηματίζονται ως επί το πλείστον από επαγωγικές και χωρητικές αντιδράσεις που δημιουργούν επαγωγικό ή χωρητικό συντελεστή ισχύος. Για αυτόν τον λόγο η τάση κάθε ζυγού εμφανίζει άμεση εξάρτηση από τα επίπεδα αέργου ισχύος στον αντίστοιχο ζυγό. Όπως λοιπόν είχαμε παραπάνω την σχέση ενεργού ισχύος και συχνότητας, εδώ μιλάμε για σύνδεση αέργου ισχύος και τάσης. Συμπερασματικά, ο έλεγχος της τάσης κάθε ζυγού επιτυγχάνεται με παραγωγή ή απορρόφηση αέργου ισχύος σε επιλεγμένα σημεία του μικροδικτύου.

4.3.3 Έλεγχος στατισμού

Για τους παραπάνω απαραίτητους ελέγχους μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την τεχνική ελέγχου στατισμού (droop control) για την συχνότητα και την τάση όπου η ενεργός και η άεργος ισχύς προσαρμόζονται βάση γραμμικών χαρακτηριστικών. Οι εξισώσεις ελέγχου για αυτήν την ιδιαίτερα χρήσιμη τεχνική είναι οι εξής :

$$f = f_0 - k_p (P - P_0) \quad (1)$$

$$V = V_0 - k_q (Q - Q_0) \quad (2)$$

Αναλυτικά οι παράμετροι των δύο παραπάνω σχέσεων :

f : συχνότητα του συστήματος

f_0 : ονομαστική συχνότητα

k_p : συντελεστής στατισμού ή κλίση droop για την συχνότητα

P : ενεργός ισχύς κάθε μονάδας

P_0 : ονομαστική ενεργός ισχύς κάθε μονάδας

V : μετρούμενη τάση

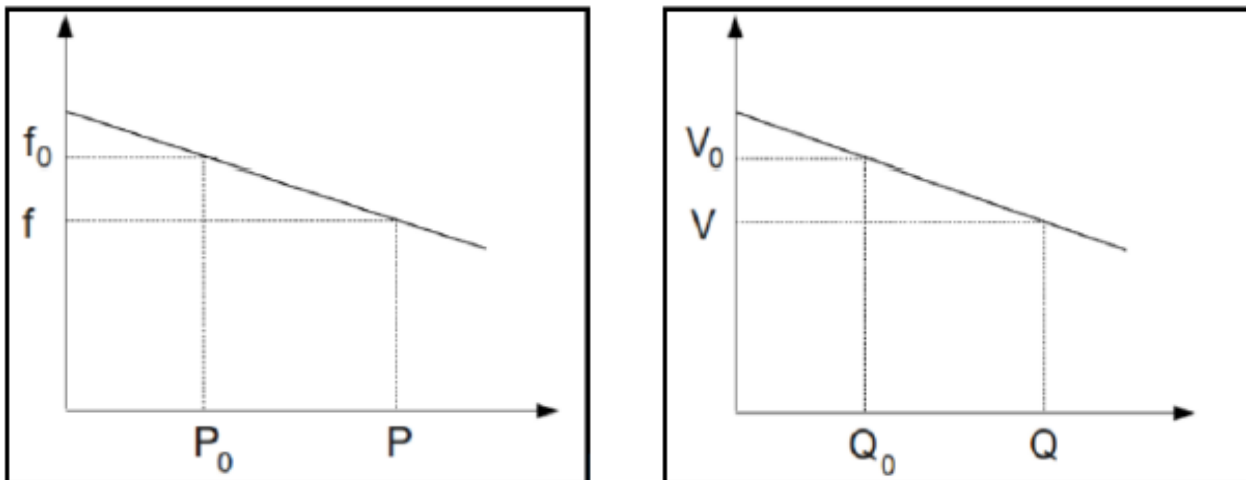
V_0 : ονομαστική τάση

Q : άεργος ισχύς κάθε μονάδας

Q_0 : ονομαστική άεργος ισχύς κάθε μονάδας

k_q : συντελεστής στατισμού ή κλίση droop για την τάση

Οι χαρακτηριστικές στατισμού, ως απεικόνιση των παραπάνω εξισώσεων είναι οι ακόλουθες :



Εικόνα 4.2: Χαρακτηριστικές στατισμού P-f και Q-V (7)

Ακολουθεί η επεξήγηση της μορφής των παραπάνω γραφικών. Θα εστιάσουμε στο χαρακτηριστική της συχνότητας, ωστόσο παρόμοια πράγματα ισχύουν και στην χαρακτηριστική της τάσης. Ειδικότερα παρατηρούμε ότι όταν η συχνότητα πέφτει από f_0 σε f , η ισχύς εξόδου της μονάδας παραγωγής αυξάνεται από P_0 σε P . Όταν βλέπουμε μείωση της συχνότητας, συμπεραίνουμε ότι έχει αυξηθεί το φορτίο και υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερο ποσό παραγόμενης ενεργού ισχύος. Αν μιλάμε για σύστημα με πολλές μονάδες παραγωγής με την ίδια χαρακτηριστική στατισμού, η πτώση στη συχνότητα αποκαθιστάται με ταυτόχρονη αύξηση των ισχύων εξόδου όλων των μονάδων. Η αύξηση των επιπέδων παραγωγής ενεργού ισχύος σε συνδυασμό με την μείωση της συχνότητας, θα οδηγήσει στην ισορροπία των μονάδων στην ισχύ και την συχνότητα κάποιου σημείου μόνιμης κατάστασης της χαρακτηριστικής στατισμού. Μπορούμε λοιπόν να συνοψίσουμε ότι η τεχνική ελέγχου στατισμού δίνει την ευκαιρία σε πολλαπλές μονάδες παραγωγής να μοιράζονται το φορτίο.

Σε αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου, ο πρωτεύοντας έλεγχος κατανέμει την ισχύ του φορτίου στις μονάδες παραγωγής. Στην λειτουργία λοιπόν στην οποία το μικροδίκτυο δεν

συνδέεται στο κύριο δίκτυο και λειτουργεί ανεξάρτητα, στις εξισώσεις (1) και (2) έχουμε P_0 και Q_0 ίσα με το μηδέν. Γίνεται διαμοιρασμός του φορτίου μεταξύ των μονάδων και η συχνότητα που έχουμε διαφέρει από την ονομαστική. Πρόκειται για την συχνότητα μόνιμης κατάστασης, την διαφορά της οποίας με την ονομαστική θα εξαλείψει ο δευτερεύοντας έλεγχος.

4.4 Δευτερεύοντας έλεγχος

4.4.1 Εισαγωγή στον δευτερεύοντα έλεγχο

Για τον δευτερεύοντα έλεγχο του μικροδικτύου έγινε αναφορά και στα κεφάλαια 2 και 3. Εκεί εστιάσαμε στις δύο κύριες λειτουργίες του (αναφέρθηκαν ως core functions) και τα χαρακτηριστικά της κάθε μιας. Πρόκειται για το δεύτερο επίπεδο ελέγχου του μικροδικτύου και αναμφισβήτητα το πιο σημαντικό. Η λειτουργία του είναι χρονικά στην κλίμακα των λεπτών. Κύριο μέλημα αυτής της βαθμίδας ελέγχου αποτελεί η εκμηδένιση των αποκλίσεων, που έχουν δημιουργηθεί στον πρωτεύοντα έλεγχο, στην συχνότητα και στην τάση του συστήματος σε σχέση με τις ονομαστικές τιμές τους.

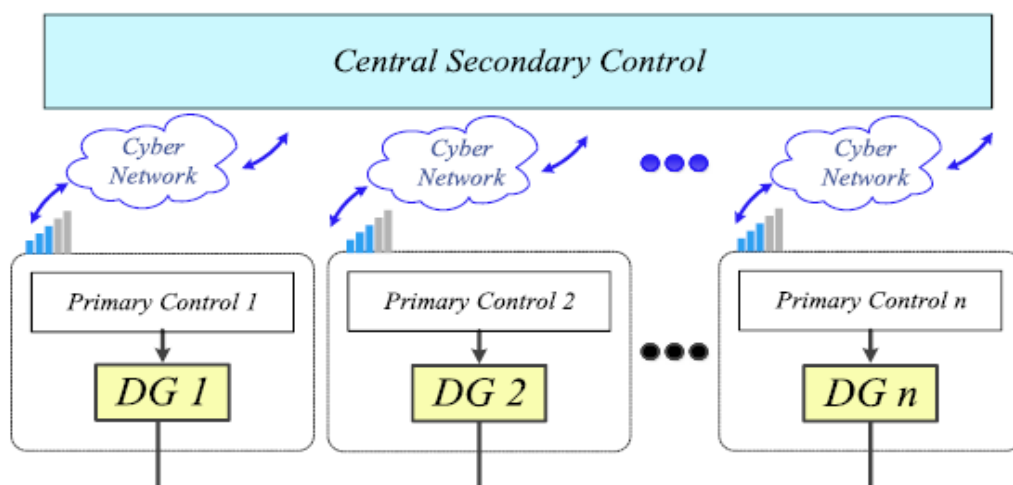
Ιδιαίτερα κρίσιμο ρόλο διαδραματίζει ο δευτερεύοντας έλεγχος στην αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου, καθώς εκτός της διατήρησης της συχνότητας και της τάσης στις ονομαστικές τους τιμές, επιβλέπει τα επίπεδα ζήτησης των φορτίων και διαθέσιμης παραγωγής. Τέλος είναι ευθύνη αυτού του ελέγχου να συγχρονίσει το μικροδίκτυο με το κύριο δίκτυο στην περίπτωση της μετάβασης από απομονωμένη λειτουργία σε διασυνδεδεμένη, δηλαδή επανασύνδεση.

Οι δύο κύριες στρατηγικές που μπορούν να υιοθετηθούν για το στάδιο του δευτερεύοντα ελέγχου είναι ο κεντρικός και ο αποκεντρωμένος έλεγχος. Στον πρώτο, όλες οι αποφάσεις που αφορούν το σύστημα λαμβάνονται από έναν κεντρικό ελεγκτή, ο οποίος τις επιβάλλει στον τοπικό έλεγχο, ενώ στον αποκεντρωμένο υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των μονάδων και οι αποφάσεις λαμβάνονται από κοινού. Στην παρούσα διπλωματική θα επικεντρωθούμε στην στρατηγική κεντρικού ελέγχου και αφού γίνει παρουσίαση της, θα επισημανθούν κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της.

4.4.2 Κεντρικός δευτερεύοντας έλεγχος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο κεντρικός έλεγχος του μικροδικτύου λαμβάνει χώρα στον κεντρικό ελεγκτή. Οι διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής ελέγχονται τοπικά από τον πρωτεύοντα και τον δευτερεύοντα έλεγχο. Μέσω ενός συστήματος επικοινωνίας στέλνονται στον ελεγκτή μια σειρά από μεταβλητές οι οποίες συγκρίνονται με τα σήματα αναφοράς και εξισορροπούνται με αυτά από τον δευτερεύοντα έλεγχο. Στην συνέχεια ο δευτερεύοντας έλεγχος στέλνει το σήμα εξόδου στον πρωτεύοντα έλεγχο κάθε μονάδας.

Η αρχιτεκτονική του κεντρικού δευτερεύοντα ελέγχου φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.3: Κεντρικός δευτερεύοντας έλεγχος (9)

Θα ακολουθήσουν αναλυτικές περιγραφές για τους ελέγχους της συχνότητας και της τάσης σε αυτό το στάδιο ελέγχου.

Ο δευτερεύοντας έλεγχος χρησιμοποιεί το σφάλμα της συχνότητας, όπως αυτό έχει προκύψει από τον πρωτεύοντα έλεγχο, και θέτει τις τιμές αναφοράς της ενεργού ισχύος. Η σχέση ενεργού ισχύος – συχνότητας και η αλληλεξάρτηση τους περιγράφηκαν και παραπάνω. Στην συνέχεια ο κεντρικός ελεγκτής στέλνει αυτές τις τιμές αναφοράς στις μονάδες παραγωγής, οι οποίες με την σειρά τους οφείλουν να ρυθμίσουν την παραγωγή τους με απώτερο σκοπό την εξάλειψη του σφάλματος της συχνότητας. Ο κεντρικός ελεγκτής του μικροδικτύου διορθώνει την συχνότητα μέσω ενός ελεγκτή PI, ο οποίος αποκαθιστά την τιμή της όταν το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από μια συγκεκριμένη τιμή (πχ 0,05).

Ουσιαστικά, η διαφορά της συχνότητας του μικροδικτύου και της συχνότητας αναφοράς πολλαπλασιάζεται με το κέρδος ελέγχου του ελεγκτή PI. Το αποτέλεσμα, δηλαδή τα

σφάλματα, προωθούνται σε όλες τις διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής του μικροδικτύου οι οποίες προσαρμόζουν την παραγωγή τους, ώστε να διορθωθεί τελικά η συχνότητα.

Παρόμοια λογική εφαρμόζεται και στον έλεγχο της τάσης. Σε περίπτωση που παρατηρείται απόκλιση της τάσης από κάποιο συγκεκριμένο όριο που έχει τεθεί, αναλαμβάνει ο ελεγκτής PI να ρυθμίσει το πλάτος της τάσης του μικροδικτύου. Αφού συγκρίνει την υπάρχουσα τάση με μια τιμή αναφοράς που έχει επιλεγεί και πολλαπλασιάζει την διαφορά με το κέρδος του, θα στείλει το σήμα ελέγχου στο επίπεδο του πρωτεύοντα ελέγχου κάθε μονάδας παραγωγής με σκοπό να διορθωθεί το σφάλμα.

Συνολικά, μπορούμε να συνοψίσουμε ότι ο κεντρικός δευτεροβάθμιος έλεγχος επιτρέπει βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο καθώς συλλέγει όλες τις μετρήσεις και τα δεδομένα σε ένα σημείο, τον κεντρικό ελεγκτή, την ίδια χρονική στιγμή. Εκεί λαμβάνονται όλες οι αποφάσεις και επικοινωνούνται στο κατώτερο επίπεδο ελέγχου. Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα του είναι το γεγονός ότι το σύστημα επικοινωνίας δεν είναι πολύ απασχολημένο αφού στέλνονται μηνύματα με μία κατεύθυνση κάθε φορά, δηλαδή είτε προς τον ελεγκτή είτε από τον ελεγκτή στις διεσπαρμένες μονάδες.

Από την άλλη, μια πιθανή αποτυχία του κεντρικού ελεγκτή μπορεί να αποβεί καταστροφική για όλο το δίκτυο καθώς το σφάλμα θα μεταδοθεί σε όλο το σύστημα με κίνδυνο την κατάρρευση του και την απότομη διακοπή της δράσης του δευτερεύοντα ελέγχου. Επιπρόσθετα, ένα ακόμα μειονέκτημα έγκειται στο γεγονός ότι ο κεντρικός ελεγκτής ως εγκέφαλος του ελέγχου συλλέγει υπερβολικά πολλά δεδομένα και μεγάλα σε όγκο με συνέπεια να απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς.

4.5 Τριτεύοντας έλεγχος και τεχνικές ελέγχου που εφαρμόστηκαν στην εργασία

Παρόλο που δεν εξετάζεται σε αυτή την διπλωματική, είναι καλό να αναφέρουμε ότι στο τελευταίο στάδιο του ελέγχου του μικροδικτύου, δηλαδή στον τριτεύοντα έλεγχο, η κατάσταση της αγοράς ενέργειας καθορίζει τον έλεγχο της ροής ισχύος, που γίνεται από τον κεντρικό ελεγκτή, μεταξύ του μικροδικτύου και του ευρύτερου δικτύου διανομής (προφανώς όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί συνδεδεμένο στο δίκτυο). Επίσης σε αυτό το στάδιο γίνεται βελτιστοποίηση της οικονομικής λειτουργίας του μικροδικτύου, μέσω αλγορίθμων που εξασφαλίζουν ότι όλες οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής λειτουργούν με το ίδιο οριακό κόστος.

Στην διπλωματική θα εφαρμοστεί η λογική droop control που παρουσιάστηκε παραπάνω για τον καταμερισμό των ισχύων μεταξύ των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής αλλά και θα υιοθετηθεί τεχνική κεντρικού δευτερεύοντα ελέγχου για την διόρθωση των σφαλμάτων συχνότητας – τάσης, την στήριξη του μικροδικτύου στην αποσυνδεδεμένη από το δίκτυο λειτουργία και τον επανασυγχρονισμό του στο δίκτυο όταν αυτό καθίσταται εφικτό.

Κεφάλαιο 5

Μέθοδος προσομοίωσης : Hardware in the Loop

5.1 Εισαγωγή

Στο 5^ο και τελευταίο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους της διπλωματικής εστιάζουμε στο περιβάλλον-μέθοδο που θα διεξάγουμε-προσομοιώσουμε τις δοκιμές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Γίνεται ανάλυση της τεχνικής Hardware in the Loop (HIL) και σύγκριση της με τις παραδοσιακές τεχνικές ελέγχου. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι δύο υποκατηγορίες της HIL, οι μέθοδοι Power Hardware in the Loop και Control Hardware in the Loop. Τέλος αναφέρονται κάποια ζητήματα-προκλήσεις που μπορούν να προκύψουν με τις τεχνικές αυτές.

5.2 Hardware in the Loop

5.2.1 Εισαγωγή στο Hardware in the Loop

Οι παραδοσιακές τεχνικές ελέγχου της λειτουργίας ενός εξοπλισμού-συστήματος στηρίζονται σε αρχικές off-line προσομοιώσεις κατά την διάρκεια του σχεδιασμού και μετέπειτα ακολουθεί on-line προσομοίωση αφού έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή. Όπως είναι εύκολα κατανοητό, αυτό το χάσμα ανάμεσα στις δύο αυτές διαφορετικού τύπου προσομοιώσεις μπορεί να δημιουργήσει πολλά προβλήματα.

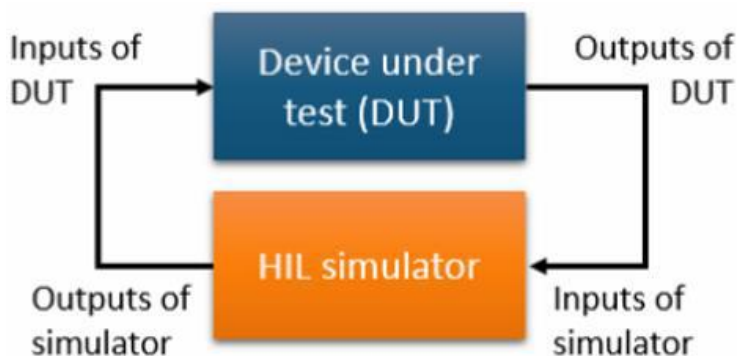
Συγκεκριμένα η μετάβαση από την off-line προσομοίωση στο πραγματικό σύστημα ενέχει κινδύνους λόγω της απότομης ενσωμάτωσης σε διαφορετικά πραγματικά μέρη ενός δικτύου. Εκτός αυτού, η off-line προσομοίωση μπορεί να γίνει εξαιρετικά χρονοβόρα για αρκετά σύνθετα συστήματα, όπως ηλεκτρονικά ισχύος με διακόπτες. Επιπλέον, αν θέλουμε να

τροποποιήσουμε ή να βελτιώσουμε κάτι στο υπάρχον σύστημα μας είναι δύσκολη η πρόσβαση ειδικά όταν το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία. Συμπερασματικά αυτή η μέθοδος ελέγχου που στηρίζεται σε αρχικές off-line προσωμοιώσεις κρίνεται προβληματική.

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν οι προσομοιώσεις πραγματικού χρόνου που εκτελούνται μέσω ψηφιακών προσομοιωτών πραγματικού χρόνου (RTDS – Real Time Digital Simulator) κερδίζουν συνεχώς έδαφος κυρίως στην προσομοίωση πολύπλοκων συστημάτων, όπως είναι τα ηλεκτρικά συστήματα. Έτσι μας επιτρέπεται να υιοθετούμε μια σταδιακή προσέγγιση στο σχεδιασμό ενός συστήματος, ενσωματώνοντας ξεχωριστά τα διαφορετικά στοιχεία του.

Η τεχνική λοιπόν, Hardware in the Loop (HIL) η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο παρόν κεφάλαιο, είναι μια προσομοίωση κατά την οποία έχουμε προσθήκη ενός στοιχείου (εξοπλισμού), όπως για παράδειγμα μια ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου σε ένα προσομοιούμενο σύστημα, προσδοκώντας έτσι να πλησιάσουμε τις πραγματικές συνθήκες. Η χρήση HIL προσομοίωσης παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων, όπως είναι η μείωση του κόστους σε σχέση με τα πραγματικά πειράματα, η ασφάλεια του εξοπλισμού καθώς αποφεύγεται ο κίνδυνος καταστροφής του εξαιτίας της απευθείας έκθεσης του σε πραγματικές συνθήκες, η εξοικονόμηση χρόνου χωρίς ταυτόχρονη μείωση των επαναλήψεων των πειραμάτων αλλά και η βελτίωση της αξιοπιστίας και της ποιότητας των αποτελεσμάτων. (10)

Το HIL σύστημα αποτελείται από 2 βασικά μέρη, το προσομοιούμενο σύστημα στον εξομοιωτή πραγματικού χρόνου (HIL simulator) και την συσκευή που εξετάζεται (Device under test – DUT). Η υπό εξέταση συσκευή βγάζει κάποια σήματα εξόδου, αναλογικά ή ψηφιακά, τα οποία τροφοδοτούνται ως είσοδος στον προσομοιωτή και αυτός με την σειρά του βγάζει εξόδους, αναλογικές ή ψηφιακές, οι οποίες δίνονται ως είσοδος στην συσκευή.



Εικόνα 5.1: Τοπολογία ενός συστήματος HIL (11)

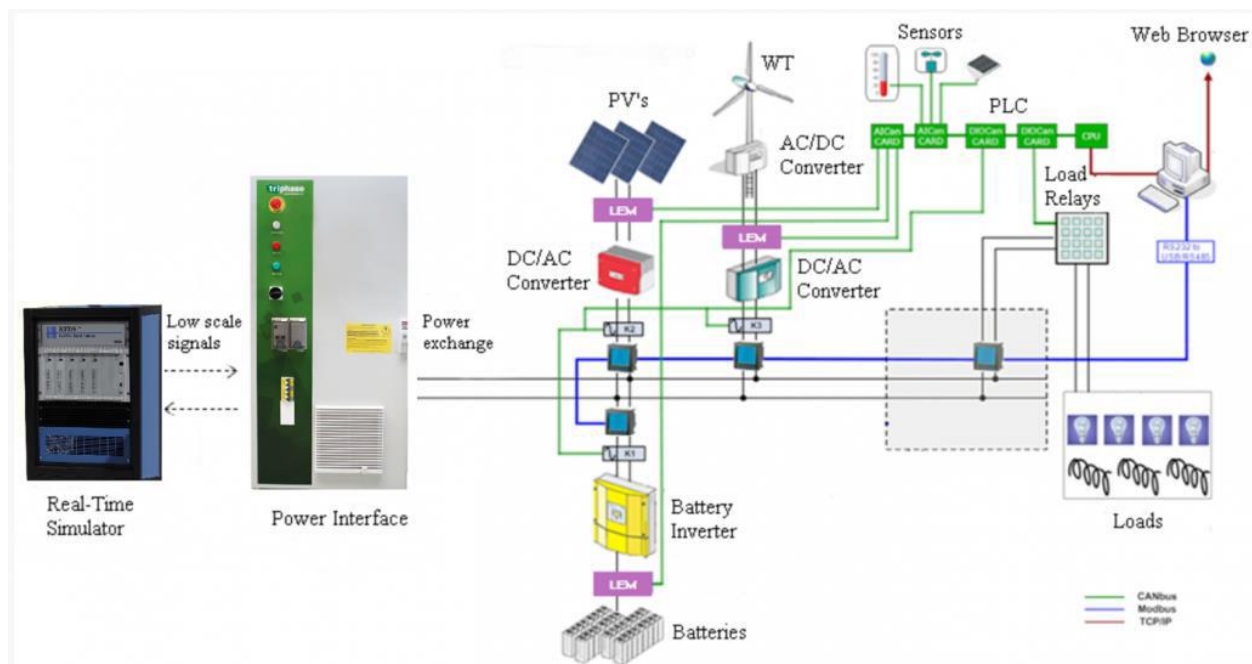
Η εφαρμογή του Hardware in the Loop χωρίζεται σε δύο κατηγορίες που θα αναπτυχθούν μετέπειτα, το Power Hardware in the Loop (PHIL) και το Control Hardware in the Loop (CHIL).

5.2.2 Power Hardware in the Loop (PHIL)

Μία από τις ειδικές περιπτώσεις του Hardware in the Loop είναι το Power Hardware in the Loop, μέθοδος που χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιτρέπει την σύνδεση πραγματικών συσκευών ισχύος ως DUT (Device Under Test) με προσομοιωμένα ηλεκτρικά δίκτυα. Χρησιμοποιείται ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου για την προσομοίωση του ηλεκτρικού δικτύου, ωστόσο στην περίπτωση αυτή κρίνεται απαραίτητη και μια συσκευή διασύνδεσης (interface) του προσομοιωτή και της συσκευής που εξετάζουμε.

Η συσκευή διασύνδεσης, η οποία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ρύθμιση της διακινούμενης ισχύος, δέχεται τα σήματα χαμηλής τάσης από την έξοδο του προσομοιωτή και αφού τα ενισχύσει τα παρέχει ως είσοδο στην εξεταζόμενη συσκευή. Το ρεύμα που ρέει προς την DUT μετριέται και επιστρέφει ως ανατροφόδοτηση πίσω στον ψηφιακό προσομοιωτή. Έτσι κλείνει ο βρόχος ανάδρασης του ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνουμε σχεδόν πραγματικές συνθήκες στην προσομοίωση μας και αξιοποιούμε τα πλεονεκτήματα τόσο της φυσικής προσομοίωσης όσο και αυτής που γίνεται αποκλειστικά σε λογισμικό. (12)

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται το σύστημα PHIL προσομοίωσης του εργαστηρίου συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας της σχολής ΗΜΜΥ.



Εικόνα 5.2: Περιβάλλον PHIL του εργαστηρίου ΣΗΕ (13)

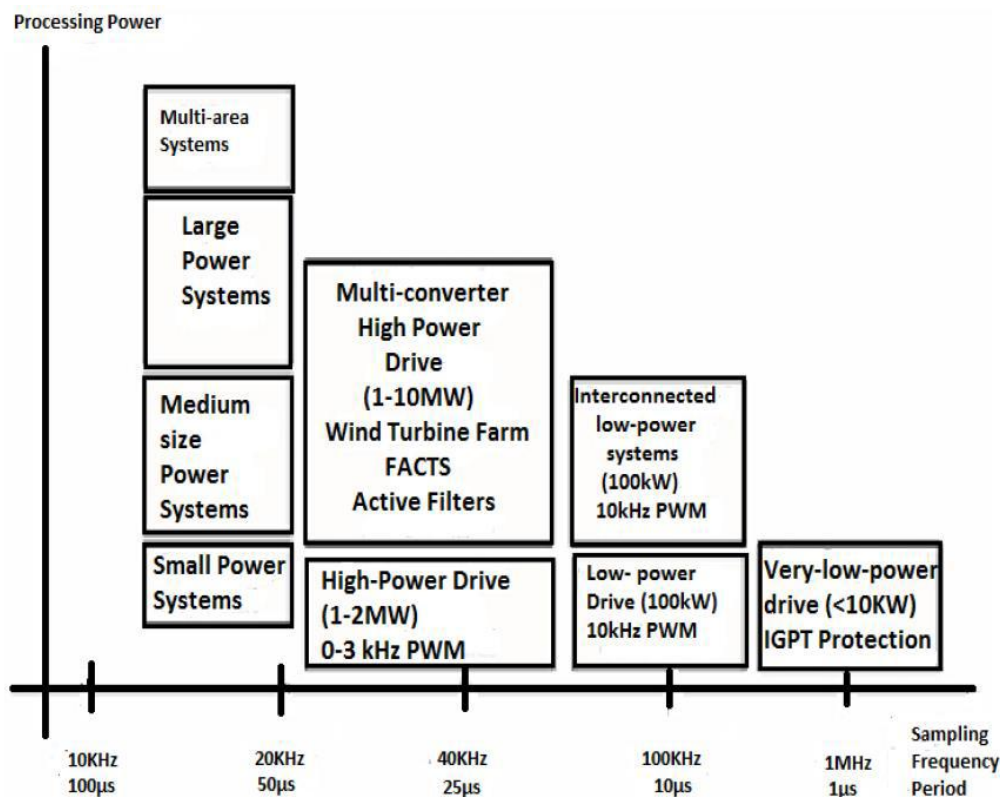
5.2.3 Control Hardware in the Loop (CHIL)

Η δεύτερη περίπτωση Hardware in the Loop είναι το Control Hardware in the Loop (CHIL), στην οποία ο υπό εξέταση εξοπλισμός είναι ένας ελεγκτής (controller). Σε αντίθεση με την προσομοίωση PHIL, εδώ δεν έχουμε συνδεδεμένες πραγματικές συσκευές διακίνησης ισχύος και υποβιβασμού/ανύψωσης τάσης των σημάτων. Στην περίπτωση του CHIL το προσομοιούμενο κύκλωμα και η DUT επικοινωνούν χρησιμοποιώντας σήματα σε χαμηλό επίπεδο τάσης. Μέσω αυτού του τρόπου προσομοίωσης, καταφέρνουμε ρεαλιστικές συνθήκες στον έλεγχο της λειτουργίας ενός πραγματικού ελεγκτή, όπως για παράδειγμα ύπαρξη θορύβου στα σήματα ή χρονικές καθυστερήσεις.

5.3 Προκλήσεις που παρουσιάζονται σε προσομοιώσεις Hardware in the Loop (HIL)

Μιλώντας για προσομοιώσεις που διεξάγονται σε πραγματικό χρόνο, δεν θα πρέπει να αγνοούμε ότι πρόκειται για ψηφιακές προσομοιώσεις, γεγονός που σημαίνει ότι το κύκλωμα μας στον προσομοιωτή επιλύεται σε διακριτά χρονικά βήματα. Μέσω της μεθόδου Hardware in the Loop μπορούμε με ένα ψηφιακό χρονικό βήμα (digital time-step) προσομοίωσης να επιτύχουμε σχετική ακρίβεια στο μοντέλο μας. Η πρόκληση εντοπίζεται κυρίως στην περίπτωση που πρέπει να προσομοιώσουμε συστήματα που απαιτούν πολύ μικρό χρονικό βήμα ώστε να επιτευχθεί ακρίβεια στην προσέγγιση μας.

Η εικόνα που ακολουθεί φανερώνει τις ανάγκες που έχουμε σε υπολογιστική ισχύ αλλά και σε ρυθμό δειγματοληψίας για μία προσομοίωση πραγματικού χρόνου, ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρικού συστήματος που προσομοιώνουμε.



Εικόνα 5.3: Ανάγκες σε υπολογιστική δύναμη και ρυθμό δειγματοληψίας για προσομοίωση πραγματικού χρόνου, ανάλογα με το ηλεκτρικό σύστημα που προσομοιώνουμε (12)

Είναι ευδιάκριτο από το παραπάνω σχήμα ότι ανάλογα το ηλεκτρικό σύστημα που μας ενδιαφέρει να προσομοιώσουμε, απαιτούνται συγκεκριμένη υπολογιστική ισχύς και ρυθμός δειγματοληψίας. Παρατηρούμε επίσης ότι όσο μεγαλύτερη συχνότητα έχουμε τόσο μεγαλύτερος ρυθμός δειγματοληψίας απαιτείται.

Παρά τα θέματα που μπορούν να προκύψουν, η πρόοδος που έχει γίνει σε υπολογιστικές ισχύς μας επιτρέπει να διεξάγουμε τέτοιες προσομοιώσεις με μεγάλες συχνότητες δειγματοληψίας. Η μέθοδος HIL και κατ'επέκταση οι δύο κατηγορίες της, PHIL και CHIL, μας παρέχουν ένα αξιόπιστο περιβάλλον προσομοίωσης με ρεαλιστικές συνθήκες και πολλά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών τεχνικών ελέγχου.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΜΕΡΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Μετά το θεωρητικό πρώτο κομμάτι της διπλωματικής όπου έγινε εκτενής ανάλυση για τα στοιχεία του μικροδικτύου και την διαδικασία ελέγχου του καθώς και παρουσίαση του περιεχομένου των δύο προτύπων IEEE, ακολουθεί το εργαστηριακό κομμάτι της διπλωματικής. Αρχικά θα παρουσιαστεί ο προσομοιωτής πραγματικού χρόνου RTDS με τον οποίο προσομοιώσαμε τις δοκιμές μας στο μικροδίκτυο μέσω του προγράμματος RSCAD. Θα αναλυθεί η μοντελοποίηση του μικροδικτύου μας στο πρόγραμμα αυτό και θα γίνει επεξήγηση κάποιων βασικών στοιχείων που επιλέξαμε. Μετέπειτα, θα αναφερθούμε στο άλλο πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε στο εργαστήριο, το AcSElerator RTAC στο οποίο σχεδιάσαμε και εφαρμόσαμε με ελεγκτές PI τον έλεγχο του μικροδικτύου μας. Τέλος θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων (μέσω γραφικών παραστάσεων) που προέκυψαν από τα πειράματά μας ξεχωριστά για κάθε κατάσταση του μικροδικτύου, με την εφαρμογή του ελέγχου, και θα συζητηθούν κάποιες παρατηρήσεις-συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση του μικροδικτύου και την αποτελεσματικότητα του ελέγχου του.

Κεφάλαιο 6

Ψηφιακός προσομοιωτής και μοντελοποίηση του μικροδικτύου στο RSCAD

6.1 Εισαγωγή

Στο 6^ο κεφάλαιο και πρώτο στο εργαστηριακό μέρος της διπλωματικής, θα γίνει παρουσίαση του εξομοιωτή πραγματικού χρόνου (RTDS), που χρησιμοποιήσαμε στο εργαστήριο για να προσομοιώσουμε την λειτουργία του μικροδικτύου και να εκτελέσουμε τα πειράματά μας. Θα εστιάσουμε στον τρόπο που σχεδιάσαμε το μικροδίκτυο μας στο RSCAD, δηλαδή στο ειδικό λογισμικό που παρέχεται για την διεπαφή με τον RTDS.

6.2 Ψηφιακός εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS)

Ο ψηφιακός εξομοιωτής πραγματικού χρόνου (RTDS) είναι μια συσκευή που μας επιτρέπει να προσομοιώσουμε συστήματα ισχύος σε πραγματικό χρόνο και με ρεαλιστικές συνθήκες. Χρησιμοποιείται για την εξομοίωση μεμονωμένων ηλεκτρικών μονάδων ή εξοπλισμού, όπως για παράδειγμα ένα φωτοβολταϊκό ή έναν αντιστροφέα άλλα καλύπτει άνετα και την περίπτωση της προσομοίωσης ενός ολόκληρου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή είναι και η περίπτωση μας στην διπλωματική, καθώς θα χρειαστεί να προσομοιώσουμε το μικροδίκτυο που δόθηκε στο κεφάλαιο 1, στην παράγραφο 1.6 (θα φανεί καλύτερα και στην συνέχεια μοντελοποιημένο στο πρόγραμμα).

Ο προσομοιωτής αυτός, ο οποίος χρησιμοποιείται τόσο από κατασκευαστές εξοπλισμού δικτύου όσο και από ερευνητικά κέντρα, μας βοηθάει να διερευνήσουμε τις επιπτώσεις διαταραχών και μεταβατικών φαινομένων στο σύστημα μας και να λάβουμε τα κατάλληλα μέτρα. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου προσομοιωτή είναι ότι

λειτουργεί σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Ειδικότερα, υπάρχει η δυνατότητα να εκτελούνται προσομοιώσεις σύνθετων δικτύων με χρονικό βήμα Δt της τάξης των 50μsec περίπου. Το βήμα (Δt) ουσιαστικά καθορίζεται ως ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών διακριτών στιγμών της προσομοίωσης. Η μεγάλη αυτή ταχύτητα του εξομοιωτή οφείλεται στην μεγάλη υπολογιστική ισχύ που διαθέτει και του επιτρέπει να λύνει τις εξισώσεις του συστήματος σε κάθε χρονικό βήμα. Μπορούμε έτσι να συμπεράνουμε ότι παρέχεται συνεχώς η κατάσταση του συστήματος, πετυχαίνοντας έτσι μια ιδιαίτερα ικανοποιητική προσέγγιση στις πραγματικές συνθήκες.

Εκτός από την εξοικονόμηση χρόνου και την επίτευξη πραγματικών συνθηκών με τον RTDS, μειώνεται σε μεγάλο βαθμό και το οικονομικό κόστος. Αυτό αρχικά οφείλεται στην ταχύτητα εκτέλεσης των πειραμάτων η οποία χαρακτηρίζει τον συγκεκριμένο προσομοιωτή. Επιπλέον, δεν χρησιμοποιούμε το φυσικό δίκτυο εξαλείφοντας έτσι τον πιθανό κίνδυνο φθοράς του εξοπλισμού μας.

Ο προσομοιωτής διαθέτει τα εξής (14) :

- GTNET: Κάρτα που συνδέεται με τον κύριο σταθμό του DNP μέσω θύρας Ethernet που διαθέτει. Θα ακολουθήσει αναλυτική περιγραφή για την κάρτα GTNET στην συνέχεια.
- GTAI (Gigabit Transceiver Analogue Input): Κάρτα αναλογικών εισόδων, για την τροφοδότηση του προσομοιωτή με αναλογικά σήματα.
- GTAO (Gigabit Transceiver Analogue Output): Κάρτα αναλογικών εξόδων, για την παροχή αναλογικών σημάτων σε συσκευές.
- GTDI (Gigabit Transceiver Digital Input): Κάρτα ψηφιακών εισόδων, για την τροφοδότηση του προσομοιωτή με ψηφιακά σήματα.

6.3 Εισαγωγή στο λογισμικό του RTDS

Το λογισμικό του RTDS αποτελείται από την γραφική διεπιφάνεια του χρήστη (Graphical User Interface – GUI) και τον μεταγλωτιστή (compiler). Η γραφική διεπιφάνεια είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία του χρήστη μέσω υπολογιστή με τον προσομοιωτή. Το γεγονός αυτό επιτυγχάνεται μέσω του προγράμματος RSCAD.

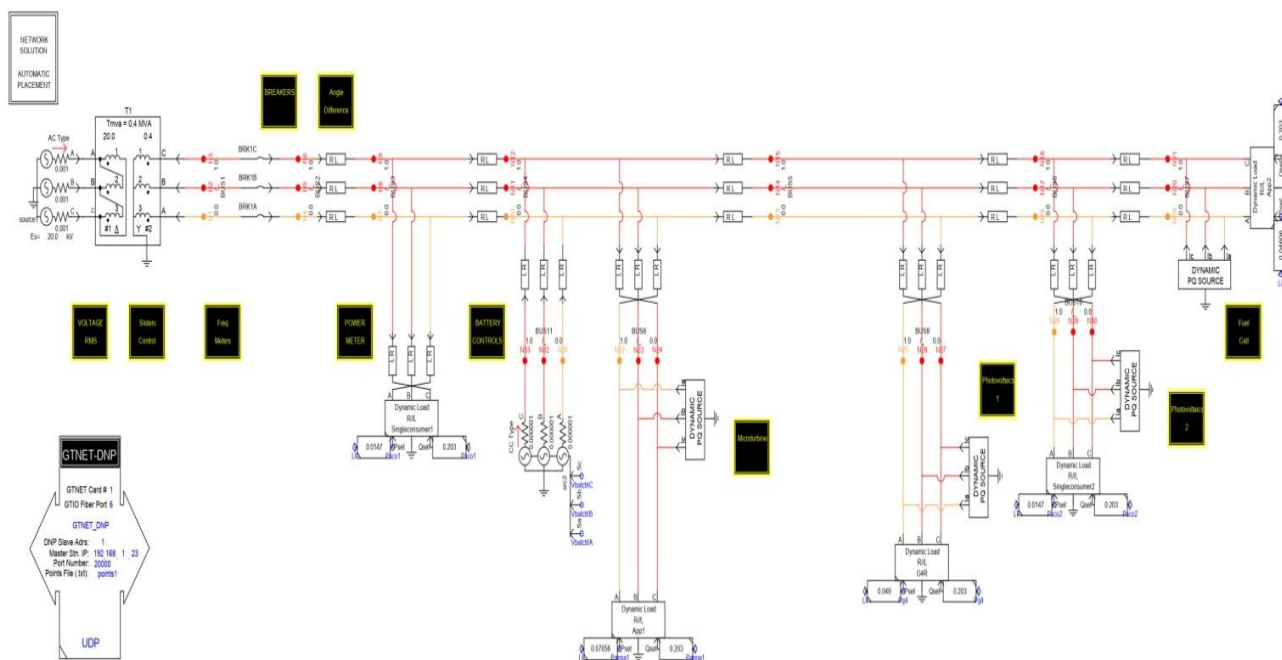
Ουσιαστικά στο πρόγραμμα RSCAD εστίασαμε και δουλέψαμε σε δύο πεδία, το Draft και το Run Time. Στο πρώτο, χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες του προγράμματος, μπορούμε

να σχεδιάσουμε – μοντελοποιήσουμε το δίκτυο που θα προσομοιώσουμε. Στο Run Time τρέχουμε τις προσομοιώσεις του δικτύου που δημιουργήσαμε στο Draft. Σε αυτό το πεδίο, εκτός του ότι λαμβάνουμε αποτελέσματα της προσομοίωσης (είτε τιμές με το Meter, είτε γραφικές με το Plot), μπορούμε να κάνουμε και διάφορους χειρισμούς, όπως αυξομείωση κάποιων παραμέτρων (μέσω των sliders), άνοιγμα/κλείσιμο διακόπτη κτλπ.

Από την άλλη ο compiler του RTDS, δέχεται ως είσοδο τα δεδομένα του ηλεκτρικού δικτύου που έχουμε φτιάξει στο Draft και αποδίδει ως έξοδο τον εκτελέσιμο κώδικα παράλληλης επεξεργασίας που απαιτείται για τους ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος.

Το μικροδίκτυο της διπλωματικής παρουσιάστηκε σε πρώτη φάση στο κεφάλαιο 1, στην μορφή που αυτό δίνεται στο paper Benchmark Low Voltage Microgrid. Το μικροδίκτυο αυτό θα χρησιμοποιηθεί σαν βάση, ωστόσο θα γίνουν κάποιες μικρές προσαρμογές όσον αφορά την μοντελοποίηση του στο RSCAD και τις προσομοιώσεις μας. Ότι προσαρμογή-αλλαγή έγινε θα παρουσιαστεί αναλυτικά στην συνέχεια.

Στην εικόνα 6.2 παρουσιάζεται συνολικά το μικροδίκτυο της διπλωματικής μοντελοποιημένο στο πρόγραμμα RSCAD.



Εικόνα 6.1: Μικροδίκτυο διπλωματικής μοντελοποιημένο στο RSCAD

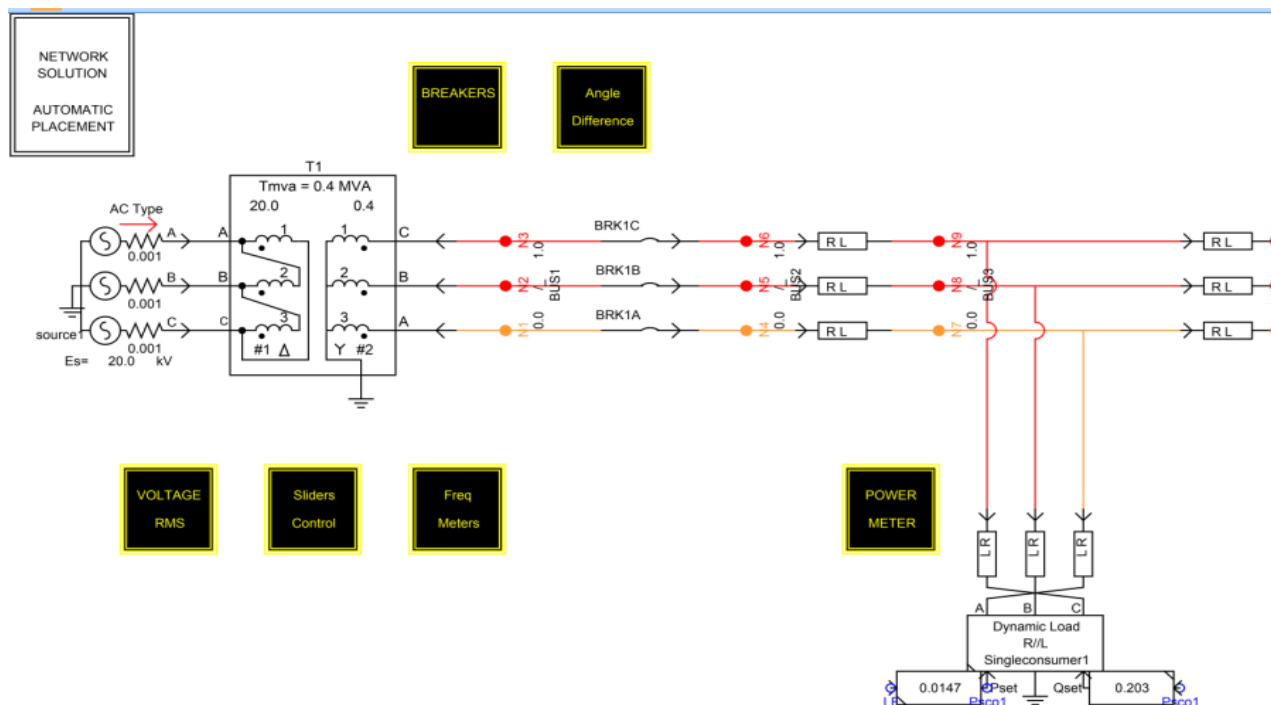
Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται συνολικά η διάταξη του μικροδικτύου μας. Θα επιχειρήσουμε να το παρουσιάσουμε σε κομμάτια, ώστε να φαίνεται με ακρίβεια και να εξηγήσουμε λεπτομερώς την κατασκευή του. Όσον αφορά την κάρτα GTNET που φαίνεται στην εικόνα 6.2 κάτω αριστερά, θα γίνει ανάλυση μετέπειτα για την χρήση της και την επικοινωνία που μας επιτρέπει με τον MGCS.

Τα μαύρα κουτιά (blocks) που φαίνονται στην εικόνα μπορεί να μην συνδέονται φαινομενικά σε κάποια σημείο του μικροδικτύου, ωστόσο είναι καθοριστικής σημασίας καθώς μέσα σε αυτά γίνονται πράξεις, μετατροπές, δρομολογήσεις σημάτων κτλπ. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα καθώς μπορεί το περιεχόμενο τους να καλύπτει παραπάνω από ένα στοιχείο του μικροδικτύου. Η λειτουργία και η χρησιμότητα κάθε block ξεχωριστά που δημιουργήσαμε θα περιγραφεί αναλυτικά.

6.4 Παρουσίαση της δομής και των στοιχείων του μικροδικτύου της διπλωματικής στο RSCAD

6.4.1 Πρώτο κομμάτι του μικροδικτύου

Αρχίζουμε την ανάλυση της μοντελοποίησης του μικροδικτύου μας χωρίζοντας το κατάλληλα σε κομμάτια. Αρχικά θα αναφερθούμε στην μοντελοποίηση που έγινε όσον αφορά το δίκτυο διανομής, τον μετασχηματιστή, τον διακόπτη και τους κόμβους του μικροδικτύου.



Εικόνα 6.2: 1^ο κομμάτι του μικροδικτύου

Η περιγραφή της δομής και των στοιχείων του μικροδικτύου θα γίνει από αριστερά προς τα δεξιά. Αρχικά βλέπουμε μια τριφασική πηγή τάσης με εσωτερική αντίσταση 0,001 Ω. Με αυτή την πηγή προσομοιώσαμε το δίκτυο μέσης τάσης ονομαστικής τιμής 20 kV, στο οποίο προφανώς η συχνότητα (50Hz) και η τάση δεν μεταβάλλονται όταν παρατηρείται μεταβολή στο ισοζύγιο ισχύος. Ακολουθεί ο μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης 20/0,4 kV (50Hz, 0,4MVA) με το πρωτεύον του σε συνδεσμολογία τριγώνου και το δευτερεύον του σε συνδεσμολογία αστέρα, όπως φαίνεται και στην εικόνα. Τα N1, N2, N3 είναι οι ονομασίες των κόμβων της A, της B και της Γ φάσης αντίστοιχα. Και τα τρία μαζί αποτελούν ένα Bus. Το γεγονός αυτό απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα, ενώ επίσης παρατίθενται και τα στοιχεία του Bus1 στο μικροδίκτυο μας. Σε όλα τα Bus που τοποθετήσαμε στο μικροδίκτυο ακολουθήσαμε την ίδια λογική. Να σημειωθεί εδώ ότι η A φάση απεικονίζεται τόσο στους κόμβους όσο και στις γραμμές με πορτοκαλί χρώμα.



Εικόνα 6.3: BUS1 με τους κόμβους για τις τρεις φάσεις

rtds_sharc_sld_BUSLABEL					
Parameters		LOAD FLOW DATA			
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
BName	BUS Name	BUS1			
NA	A Phase Node Name	N1			
NB	B Phase Node Name	N2			
NC	C Phase Node Name	N3			
VRate	Rated Line-Line Bus Voltage	0.4	kV		
COL	Bus Color (sld mode)	RED			
LW	Bus Line Width (sld mode)	3		0.0	10.0
COLA	A Phase Node Color	ORANGE			
COLB	B Phase Node Color	RED			
COLC	C Phase Node Color	RED			
linkNodes	Link to nodes defined by another bus	No		0	0

Update Cancel Cancel All

Εικόνα 6.4: Στοιχεία του BUS1

Στην συνέχεια θα αναφερθούμε στον διακόπτη ο οποίος θα μας αποσχολήσει έντονα και σε επόμενο κεφάλαιο, όπου θα αναλυθεί ο έλεγχος που εφαρμόσαμε στο μικροδίκτυο.

Όπως έχει αναφερθεί και στην θεωρία, πρόκειται για ένα πολύ καθοριστικό σημείο, αφού ο διακόπτης αυτός καθορίζει την κατάσταση του μικροδικτύου (συνδεδεμένο στο δίκτυο ή αυτόνομη λειτουργία). Επιλέχθηκε το μοντέλο τριφασικού διακόπτη που φαίνεται στην εικόνα 6.3. Δώσαμε μια μικρή τιμή στην αντίσταση του διακόπτη (προφανώς στην κατάσταση που είναι κλειστός), συγκεκριμένα 0,001Ω. Σε ένα ιδανικό μοντέλο η αντίσταση στον διακόπτη θα έπρεπε να είναι μηδενική, ωστόσο στο RSCAD απαιτείται να εισάγουμε μια μικρή τιμή (βοηθάει στον υπολογισμό, από το πρόγραμμα, του πίνακα αγωγιμότητας του δικτύου). Επίσης μια τιμή στην αντίσταση αυτή αντικατοπτρίζει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες, καθώς τα πραγματικά συστήματα δεν έχουν μηδενική αντίσταση στον διακόπτη όταν αυτός είναι κλειστός.

Τώρα ήρθε η ώρα να αναφερθούμε στο φορτίο γραμμής RL και πως αυτό υπολογίστηκε. Θα αναφερθούμε λεπτομερώς στον τρόπο υπολογισμού του πρώτου φορτίου RL που συναντάμε στο μικροδίκτυο μας το οποίο φαίνεται στην εικόνα 6.3. Η εξήγηση για αυτό καλύπτει όλα τα φορτία RL που υπάρχουν στο μικροδίκτυο μας (διαφορετικές τιμές αλλά ακριβώς ίδιος τρόπος υπολογισμού). Δίνεται ο πίνακας με τις αντιστάσεις για τα διαφορετικού τύπου καλώδια που χρησιμοποιούνται στο μικροδίκτυο (φαίνονται στην εικόνα 1.2 στο 1^ο κεφάλαιο).

	Line type	R_{ph} (Ω/km)	X_{ph} (Ω/km)	$R_{neutral}$ (Ω/km)	R_0 (Ω/km)	X_0 (Ω/km)
1	OL - Twisted cable 4x120 mm ² Al	0.284 ⁽¹⁾	0.083		1.136	0.417
2	OL - Twisted cable 3x70 mm ² Al + 54.6 mm ² AAAC	0.497 ⁽¹⁾	0.086	0.630	2.387	0.447
3	OL - Al conductors 4x50 mm ² equiv. Cu	0.397 ⁽¹⁾	0.279			
4	OL - Al conductors 4x35 mm ² equiv. Cu	0.574 ⁽¹⁾	0.294			
5	OL - Al conductors 4x16 mm ² equiv. Cu	1.218 ⁽¹⁾	0.318			
6	UL - 3x150 mm ² Al + 50 mm ² Cu	0.264 ⁽²⁾	0.071	0.387 ⁽²⁾		
7	SC - 4x6 mm ² Cu	3.690 ⁽³⁾	0.094		13.64	0.472
8	SC - 4x16 mm ² Cu	1.380 ⁽³⁾	0.082		5.52	0.418
9	SC - 4x25 mm ² Cu	0.871 ⁽³⁾	0.081		3.48	0.409
10	SC - 3x50 mm ² Al + 35 mm ² Cu	0.822 ⁽²⁾	0.077	0.524 ⁽²⁾	2.04	0.421
11	SC - 3x95 mm ² Al + 35 mm ² Cu	0.410 ⁽²⁾	0.071	0.524 ⁽²⁾		

Εικόνα 6.5: Αντιστάσεις για τα καλώδια του μικροδικτύου (4)

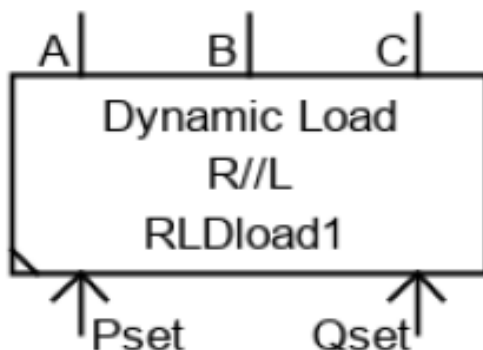
Αρχικά να σημειωθεί ότι έγινε μια παραδοχή για την απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κόμβων του μικροδικτύου όπως φαίνονται στο σχήμα 1.2 με έντονες μαύρες βούλες. Η απόσταση αυτή ορίστηκε 30 μέτρα. Ακριβώς ίδια τιμή δόθηκε και στην απόσταση μεταξύ ενός κόμβου (μαύρη βούλα) και του αμέσως επόμενου στοιχείου του μικροδικτύου (δηλαδή σε περίπτωση που πριν ή μετά από κάποιο κόμβο υπάρχει διακόπτης, φορτίο ή πηγή και όχι και άλλος κόμβος). Τα παραπάνω γίνονται πιο κατανοητά αν αναφερθούμε στην συλλογιστική-υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήσαμε για το πρώτο φορτίο γραμμής RL. Αναλυτικά τα βήματα :

- Απόσταση μεταξύ διακόπτη και πρώτου κόμβου $\rightarrow 30$ m.
Απόσταση μεταξύ του πρώτου κόμβου και του δεύτερου $\rightarrow 30$ m.
Μπορούμε να αθροίσουμε τις δύο αποστάσεις αφού χρησιμοποιούμε το ίδιο καλώδιο σε αυτό το διάστημα άρα ίδιες αντιστάσεις. Οπότε συνολικά 60 m.
- Για αυτό το διάστημα χρησιμοποιείται καλώδιο 4 x 120 mm² Al.
Άρα $R_{ph} = 0,284 \Omega/km$, $X_{ph} = 0,083 \Omega/km$.
- Οι παραπάνω τιμές είναι ανά χιλιόμετρο (1000 m) όποτε κάνουμε την μετατροπή για την περίπτωση μας που έχουμε 60 m.
Προκύπτει για αυτό το διάστημα $R_{ph} = 0,01704 \Omega$ και $X_{ph} = 0,00498 \Omega$.
- Αφού έχουμε φορτίο RL (δηλαδή $C = 0$) και $X_L = 2\pi fL$ προκύπτει $L_{ph} = 0,00001586$ H.

Καθώς συνεχίζουμε προς τα δεξιά στην εικόνα 6.3 που απεικονίζει το 1^ο κομμάτι του μικροδικτύου μας, συναντάμε το πρώτο φορτίο. Το φορτίο αυτό αντιστοιχεί στο πρώτο φορτίο που βλέπουμε και στην εικόνα 1.2, στο πρώτο Single Residencial Consumer. Για αυτό και στο μοντέλο μας ονομάστηκε Singleconsumer1. Θα ακολουθήσει παρουσίαση του μοντέλου που διαλέξαμε για να προσομοιώνουμε τα φορτία του μικροδικτύου στο RSCAD. Θα γίνει πλήρης

ανάλυση της διαδικασίας που ακολουθήσαμε για το πρώτο φορτίο, διαδικασία η οποία ταυτίζεται απόλυτα με αυτές για τα υπόλοιπα τέσσερα φορτία του μικροδικτύου. Οπότε μετά από το πρώτο φορτίο, όσα ακολουθήσουν θα αναφέρονται απλά ονομαστικά και θα γίνεται η αντιστοίχισή τους με το αντίστοιχο της εικόνας 1.2.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε για τα φορτία καθώς και οι παράμετροι για το πρώτο μας φορτίο (ίδιες και για τα υπόλοιπα) παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 6.6: Μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε για τα φορτία μας στο RSCAD

rtds_udc_DYLOAD					
MONITORED SIGNAL NAMES		LOAD SHEDDING SETTINGS			
PARAMETERS		P AND Q SETTINGS		CORE ASSIGNMENT	
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Name	Component Name	Singleconsumer1		0	0
type	Type of Load	RL		0	0
bal	Balanced Load	YES		0	0
btype	R & X in parallel ?	R//X		0	2
YD	Load connectoin type	Y		0	1
cc	P & Q Controlled by	CC		0	3
gnd	Include Neutral Connection Point?	No		0	1
Vmeas	Bus Voltage Measurement	Internal		0	1
Vbus	Rated Line to Line Bus Voltage	0.4	kV(RMS)	0.1	2000
Vmin	Minimum Bus Voltage(L-L)	0.5	p.u.	0.5	1.0
freq	Base Frequency	50	Hz	1	200
FreqDevMax	Maximum frequency deviation from rated value	4	Hz	0.0	
constF	Assume Constant Freq	Yes		0	1
FreqSrc	Internal Measurement or External Input	external		0	1
T	Time Constant for setting R, X values	1	sec	0.001	100.
Tm	Time Constant for measuring Vbus	1	sec	0.001	100.0

Εικόνα 6.7: Παράμετροι πρώτου φορτίου (Singleconsumer1)

Η παράμετρος που θα εστιάσουμε την προσοχή μας είναι αυτή με όνομα “cc”. Συγκεκριμένα αυτή η παράμετρος δείχνει από που θα ελέγχονται – ρυθμίζονται η ενεργός και η άεργος ισχύς του φορτίου. Επιλέγοντας το CC, όπως και έγινε στην περίπτωση μας, τα

setpoints για την ισχύ παρέχονται από τις εισόδους ελέγχου Pset, Qset που φαίνονται στην εικόνα 6.7.

Ειδικότερα, το Pset σε αυτό το φορτίο βλέπουμε πως προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό ενός κέρδους 0,0147 επί το Lf. Το Lf ρυθμίζεται μέσω slider και εκφράζει το ποσοστό κατανάλωσης ισχύος του φορτίου, το οποίο διαφέρει ανάλογα το σενάριο που εξετάζουμε. Για παράδειγμα σε σενάριο που θα έχουμε 30% φορτίο, θα δώσουμε στο Lf την τιμή 0,3. Παρόμοιο slider με αυτό χρησιμοποιείται και για το ποσοστό της παραγωγής των διεσπαρμένων μονάδων, ωστόσο αυτό θα εξεταστεί αργότερα.

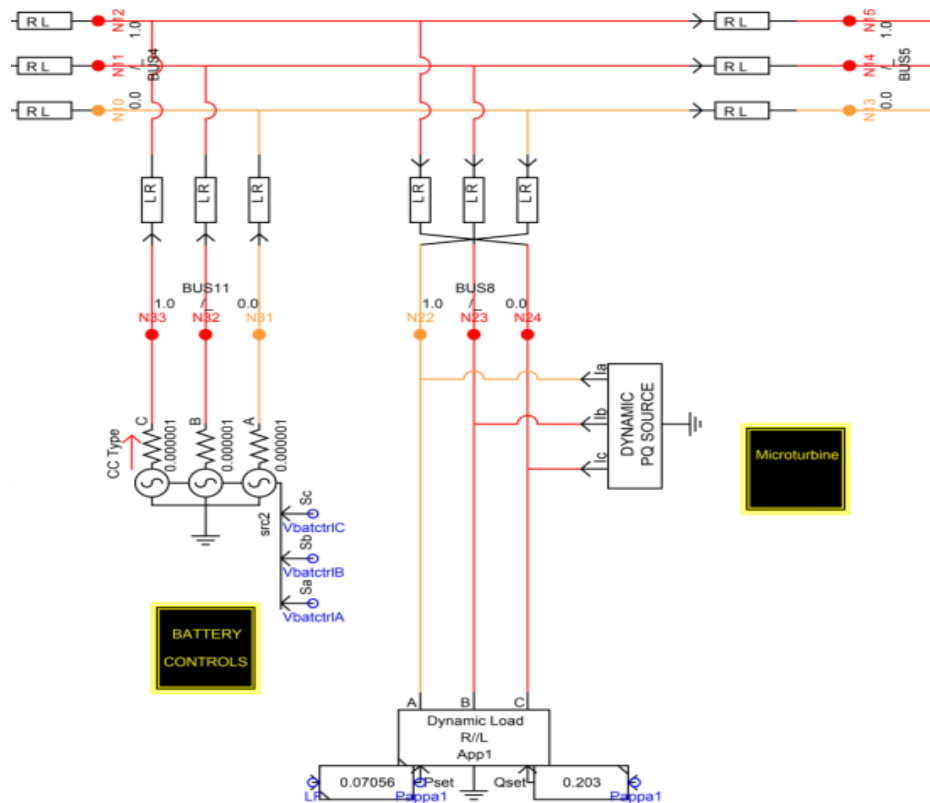
Τώρα όσον αφορά το κέρδος προκύπτει ως εξής. Η Smax (φαινόμενη ισχύς) του πρώτου φορτίου είναι 15KVA = 0,015MVA. Ο συντελεστής ισχύος των φορτίων, έχει οριστεί στο 0,98. Οπότε από τον τύπο $P/S = 0,98$ προκύπτει ότι $P_{max} = 0,0147 \text{ MWatt}$ (εκφράζονται σε Mega γιατί αυτό χρησιμοποιείται στο μοντέλο του φορτίου). Συμπερασματικά πολλαπλασιάζοντας το ποσοστό του φορτίου σε κάθε σενάριο με την ονομαστική τιμή της ενεργού ισχύος του, προκύπτει το Pset κάθε φορά. Όσον αφορά το Qset όπως φαίνεται πολλαπλασιάζουμε την τιμή που μπαίνει στο Pset με κέρδος 0,203. Αυτό το κέρδος το υπολογίζουμε ως εξής :

- $\cos(\phi) = 0,98$
- $\cos^{-1}(0,98) = \phi = 11,5 \text{ μοίρες}$
- $Q/P = \tan(\phi) \rightarrow Q = P \times \tan(\phi) \rightarrow Q = P \times 0,203$

Παρουσιάστηκε λοιπόν λεπτομερώς η μοντελοποίηση του πρώτου φορτίου. Η παραπάνω περιγραφή καλύπτει όλα τα φορτία του μικροδικτύου, με το μόνο μέγεθος που διαφοροποιείται να είναι το κέρδος που πολλαπλασιάζουμε το Lf σε κάθε περίπτωση, αφού κάθε φορτίο έχει διαφορετική τιμή ονομαστική ισχύος.

6.4.2 Δεύτερο κομμάτι του μικροδικτύου

Ακολουθεί εικόνα με το δεύτερο κομμάτι του μικροδικτύου, όπου θα κάνουμε μια αρχική αναφορά τόσο στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την μπαταρία όσο και στις μονάδες παραγωγής.



Εικόνα 6.8: 2^ο κομμάτι του μικροδικτύου

Για τα φορτία γραμμής RL δεν θα γίνει περαιτέρω αναφορά, καθώς εξηγήθηκε πλήρως η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήσαμε για το πρώτο φορτίο γραμμής. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για όλα τα φορτία γραμμής. Στο τέλος της περιγραφής του μοντελοποιημένου στο RSCAD μικροδικτύου, θα παρουσιαστούν οι τιμές R, L όλων των φορτίων γραμμής του κυκλώματος.

Ξεκινώντας την περιγραφή για το 2^ο κομμάτι του μικροδικτύου μας, εξετάζουμε το μοντέλο της μπαταρίας. Για την μπαταρία του μικροδικτύου επιλέχθηκε ίδιο μοντέλο στο RSCAD με αυτό που χρησιμοποιήσαμε για την τριφασική πηγή που αναφέραμε στο 1^ο κομμάτι του μικροδικτύου (μοντελοποίηση του δικτύου μέσης τάσης). Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι παράμετροι της μπαταρίας ενώ ακολουθεί και επεξήγηση.

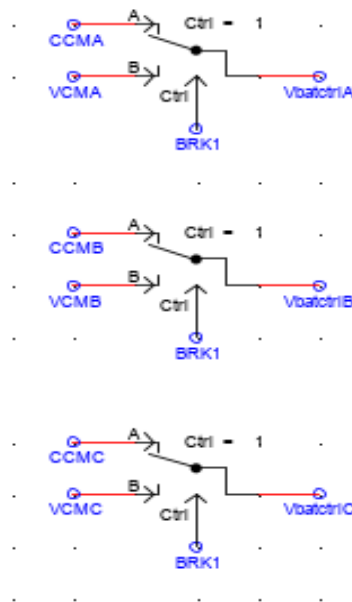
If_rtds_sharc_slid_SRC					
P & Q MONITORING		MONITORING		SIGNAL NAMES	
CONFIGURATION		CORE ASSIGNMENT		REMOTE FAULTS	
				POSITIVE SEQUENCE RRL	
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Name	Source Name	src2			
Type	Source Impedance Type:	R			
Tc	Voltage Input Time Constant	0	sec	0.0	
ZSeq	Zero Sequence Included	No			
Imp	Impedance Data Format:	RRL Values		0	1
DynmImp	Static or Dynamic Impedance:	Static		0	1
srcBrk	Enable Embedded Breakers?	No		0	1
WvType	Source Wave Type:	CC		0	4
Sctrl	Source Control:	RunTime		0	1
Spec	Specify AC Source Parameters	Behind Impedance		0	1

Εικόνα 6.9 : Παράμετροι μπαταρίας μικροδικτύου

Η αντίσταση R που φαίνεται σε σειρά με την πηγή είναι 0,000001 Ω. Στο πεδίο DynmImp επιλέχθηκε Static, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αντίσταση της πηγής παραμένει σταθερή για όλη την διάρκεια της προσομοίωσης ανεξαρτήτου συνθηκών. Επιπλέον στο πεδίο Source Wave Type επιλέξαμε CC. Με αυτήν την επιλογή μας επιτρέπεται να εισάγουμε σε κάθε φάση της πηγής μια τιμή τάσης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.9 με τα Vbatctrla, Vbatctrlb, Vbatctrlc.

Το γεγονός που παρουσιάζει όμως ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το πως προκύπτουν οι παραπάνω τιμές τάσης για την μπαταρία αλλά και γενικότερα ο έλεγχος που λαμβάνει χώρα σε αυτή. Η λογική που ακολουθήσαμε για τον έλεγχο της μπαταρίας και την ρύθμιση της συχνότητας της, της τάσης της αλλά και των τιμών ενεργού και αέργου ισχύος που χρειάζεται σε κάθε περίπτωση να προσφέρει στο μικροδίκτυο ή να απορροφά περικλείεται στο block με όνομα BATTERY CONTROLS και θα παρουσιασθεί τώρα αναλυτικά. Ωστόσο προς το παρόν κάποια σήματα που προέρχονται από τις εξόδους των ελεγκτών PI και εισάγονται στο μοντέλο μας στο RSCAD δεν γίνεται να αναλυθούν στο παρόν κεφάλαιο καθώς δεν έχει παρουσιαστεί ο τρόπος που προκύπτουν. Αυτό θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο, οπότε εδώ περιοριζόμαστε σε απλή αναφορά στην ιδιότητα τους.

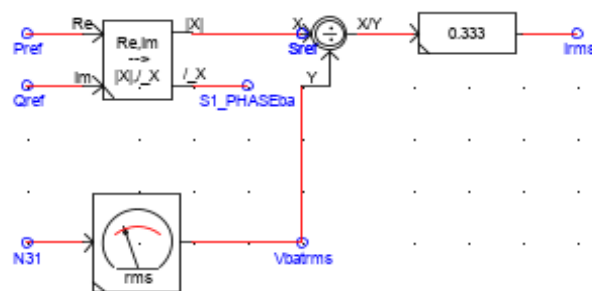
Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η προέλευση των μεταβλητών Vbatctrl που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 6.10: Ο τρόπος που υπολογίζονται τα σήματα Vbatctrl

Τα σήματα CCM αφορούν την κατάσταση όπου το μικροδίκτυο λειτουργεί συνδεδεμένο στο δίκτυο (grid connected) ενώ τα σήματα VCM παράγονται όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί απομονωμένα. Ο τρόπος που παράγονται τα σήματα αυτά θα εξηγηθεί αναλυτικά. Ο διακόπτης BRK1 είναι ο διακόπτης που αναφέρθηκε και νωρίτερα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την σύνδεση ή την αποσύνδεση του μικροδικτύου στο δίκτυο. Αν έχει την τιμή 1, ο διακόπτης είναι κλειστός και το μικροδίκτυο λειτουργεί συνδεδεμένο στο δίκτυο ενώ με την τιμή 0 ανοίγει και το μικροδίκτυο λειτουργεί αυτόνομα.

Αρχικά θα εστιάσουμε στον τρόπο που δημιουργείται το σήμα CCM. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο υπολογισμός της τιμής RMS του ρεύματος της μπαταρίας.

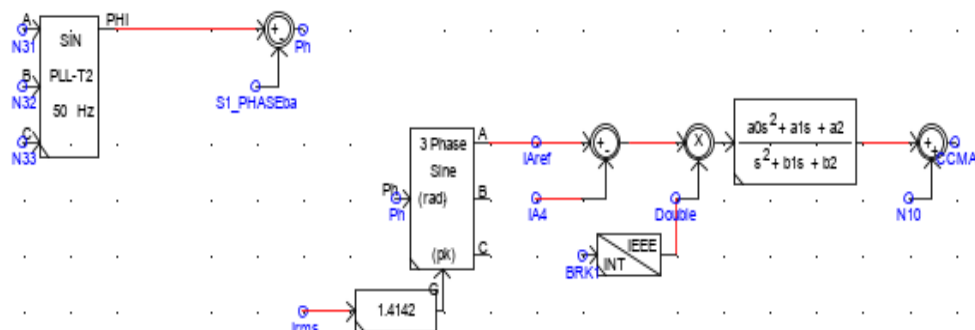


Εικόνα 6.11: Υπολογισμός ρεύματος μπαταρίας (RMS τιμή)

Οι τιμές Pref και Qref είναι τιμές που στέλνονται από τον ελεγκτή PI και θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο ο τρόπος που προκύπτουν. Όσον αφορά το block που εισάγονται οι

δύο αυτές τιμές και φαίνεται στην εικόνα 6.12, εκεί διαχωρίζεται το μέτρο με την φάση και υπολογίζεται η φαινόμενη ισχύς.

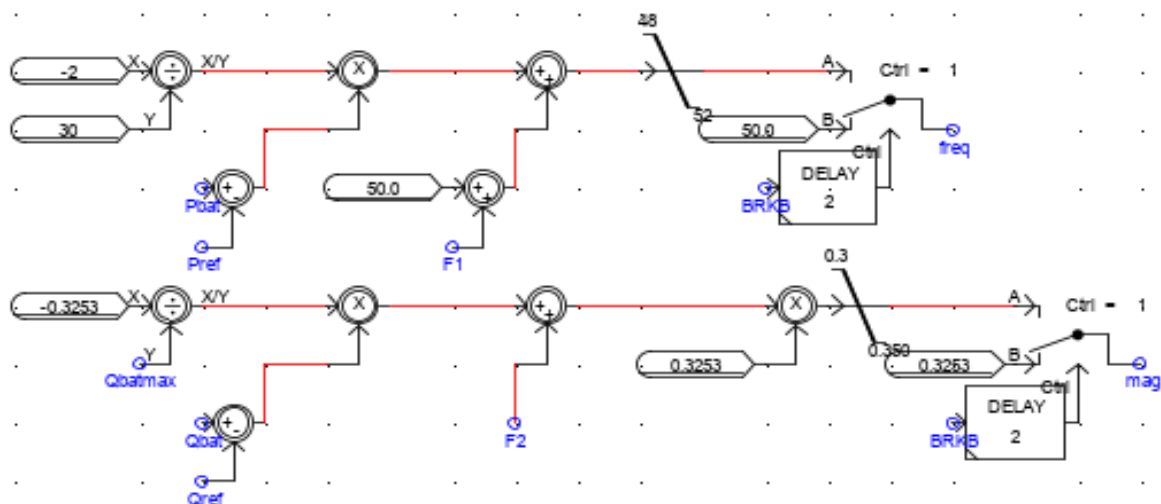
Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται η διαδικασία υπολογισμού του σήματος CCM για την μία φάση. Προφανώς παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις άλλες δύο φάσεις.



Εικόνα 6.12: Υπολογισμός του CCM για την πρώτη φάση

Οι κόμβοι N31, N32, N33 είναι οι κόμβοι στο μοντέλο μας στο RSCAD, ακριβώς πριν το μοντέλο της μπαταρίας. Εισάγονται σε ένα block Phase locked loop – PLL (50Hz, αρχική γωνία 0 μοίρες) και αφαιρώντας την φάση που υπολογίστηκε όπως φαίνεται στην εικόνα 6.12, προκύπτει το σήμα Ph. Πρόκειται για τιμή φάσης που σε συνδυασμό με το ρεύμα Irms παράγουν την τιμή αναφοράς Iref (εδώ IAref αφού μιλάμε για την A φάση). Στην συνέχεια αφαιρούμε από το IAref το ρεύμα IA4, το οποίο είναι το ρεύμα γραμμής για την φάση A. Ο πολλαπλασιασμός με την τιμή του BRK1 (έπειτα από την κατάλληλη επεξεργασία) γίνεται ακριβώς για το γεγονός που αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή μόνο για την τιμή 1 (κλειστός διακόπτης) έχει νόημα ο υπολογισμός του συγκεκριμένου σήματος (CCM).

Από την άλλη, για τα σήματα VCM ακολουθούμε διαφορετική διαδικασία. Αρχικά θα παρουσιάσουμε τον τρόπο που υπολογίζουμε τα σήματα freq (συχνότητα) και mag (τάση), δυο μεγέθη τα οποία επιχειρούμε να ελέγξουμε-ρυθμίσουμε με τους ελεγκτές PI όπως θα δούμε και στην συνέχεια.

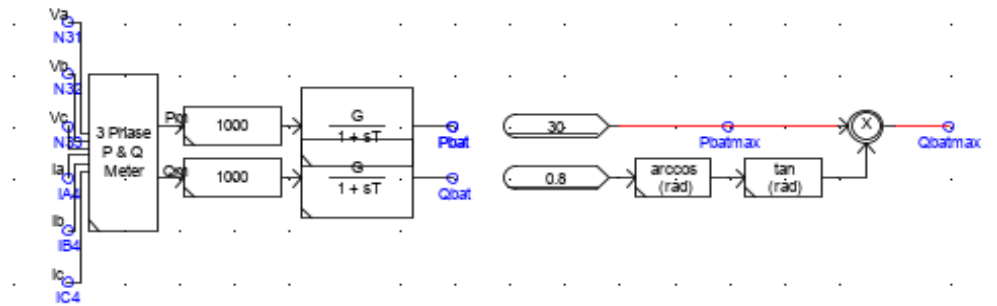


Εικόνα 6.13: Υπολογισμός συχνότητας και τάσης

Η λογική ελέγχου στατισμού, η οποία αναλύθηκε στο θεωρητικό κομμάτι της διπλωματικής υιοθετήθηκε εδώ στην ρύθμιση της συχνότητας και της τάσης. Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.14 στο πάνω κομμάτι έχουμε έλεγχο ενεργού ισχύος – συχνότητας (P-f). Μέσω δηλαδή του ελέγχου που γίνεται στην ενεργό ισχύ επιτυγχάνεται και παράλληλος έλεγχος της συχνότητας. Οι τιμές Pref και F1 έρχονται ως έξοδοι από τους ελεγκτές PI και μέσω αυτών κατορθώνουμε να ρυθμίσουμε την συχνότητα. Ο διακόπτης BRKB είναι υπεύθυνος για την ενεργοποίηση του ελέγχου droop.

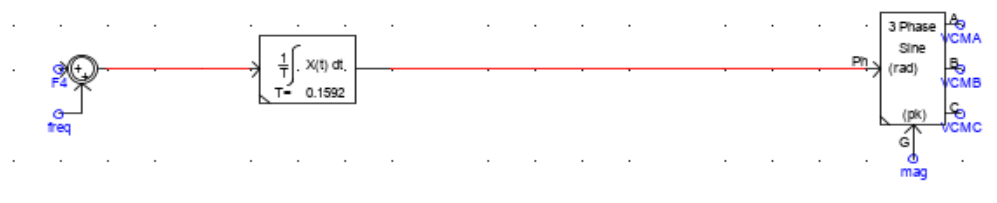
Όσον αφορά το κάτω κομμάτι της εικόνας 6.14, εκεί διεξάγεται ο έλεγχος στατισμού για την ρύθμιση της τάσης. Έχουμε όπως φαίνεται και στην εικόνα έλεγχο άεργου ισχύος – τάσης. Οι δύο τιμές που έρχονται ως έξοδοι από τους ελεγκτές PI και ευθύνονται για την ρύθμιση της τάσης είναι το Qref και το F2. Αυτές οι μεταβλητές όπως και οι αντίστοιχες παραπάνω, θα αναλυθούν στο 7^ο κεφάλαιο.

Τα 30kWatt έχουν οριστεί ως η μέγιστη ισχύς που μπορεί να προσφέρει ή να απορροφήσει η μπαταρία του μικροδικτύου. Τα Pbat, Qbat είναι οι μετρούμενες ισχύς της μπαταρίας, ενώ επίσης το Qbatmax είναι η μέγιστη άεργος ισχύς της μπαταρίας. Ο τρόπος που υπολογίζονται φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.14 : Υπολογισμός Pbat, Qbat και Qbatmax

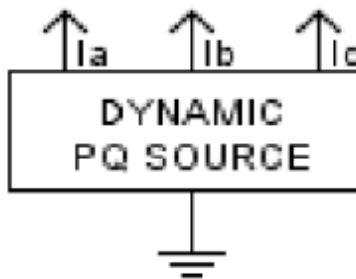
Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο τρόπος υπολογισμού των σημάτων VCM.



Εικόνα 6.15 : Υπολογισμός σημάτων VCM

Το σήμα F4, που προστίθεται στην συχνότητα, προκύπτει και αυτό από ελεγκτή PI που θα εξεταστεί στην συνέχεια. Στο ολοκλήρωμα που φαίνεται γίνεται η μετατροπή σε rad το οποία εισάγονται στον τριφασικό sine wave generator. Σαν κέρδος (gain) βάζουμε την τιμή της τάσης όπως αυτή υπολογίστηκε παραπάνω και προκύπτουν τα σήματα VCM για τις τρεις φάσεις.

Έπειτα από την εκτεταμένη αναφορά που κάναμε στο μπλοκ ελέγχου της μπαταρίας, το οποίο θα γίνει πιο σαφές στο επόμενο κεφάλαιο, συνεχίζουμε με την περιγραφή του μοντελοποιημένου μικροδικτύου μας παρουσιάζοντας το μοντέλο που επιλέχθηκε για τις πηγές διεσπαρμένης παραγωγής, τις ΑΠΕ. Όλες οι πηγές του μικροδικτύου μας μοντελοποιήθηκαν με τον ίδιο τρόπο, ανεξάρτητα με το αν πρόκειται για μικροτουρμπίνα, φωτοβολταϊκό ή κυψέλη καυσίμου. Ακολουθεί η εικόνα του μοντέλου για τις πηγές και οι παράμετροι για την πρώτη πηγή που εμφανίζεται στο μικροδίκτυο μας, την μικροτουρμπίνα όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.2.

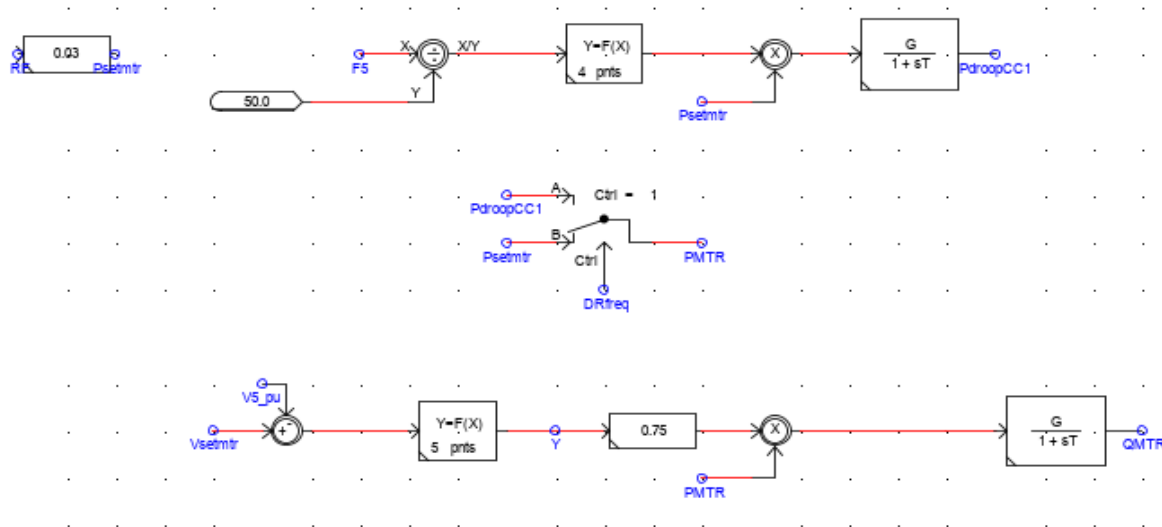


Εικόνα 6.16: Μοντέλο για τις μονάδες παραγωγής του μικροδικτύου

_rtds_PQInject.def					
CURRENT CONTROL PARAMETERS		SIGNAL NAMES		LOADFLOW RESULTS	
CONFIGURATION		CORE ASSIGNMENT		PLL PARAMETERS	
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
ccType	Control type	P/Q control		0	3
ccSigs	Control set points in Runtime or CC?	CC		0	1
ccBlk	Turn on/off injections in Runtime or CC?	CC		0	1
Srated	Rated MVA (Base for per unit current control)	0.03	MVA	0.0	1e6
Pinit	Initial real power reference	0.03	MW	-1e6	1e6
Pfinit	Initial power factor reference	1.0		1e-6	1.0
Qinit	Initial reactive power reference	0.0	MVAr	-1e6	1e6
Vinit	Initial RMS voltage reference	230	kV	0.0	1e6
Pfrefcc	Name for power factor setpoint	PFset		0	0
Prefcc	Name for real power setpoint	PMTR	MW	0	0
Qrefcc	Name for reactive power setpoint	QMTR	MVAr	0	0
Vrefcc	Name for rms voltage setpoint	Vset	kV	0	0
Blkcc	Name for block input (Integer 0 or 1)	Blk		0	0
RLim	Rate limit for reference signals (+/-)	0.01	per sec	0.0	1e6
Tpq	Time constant for loop filters	1e-3	secs		
Kpcc	Proportional gain	0.05			
Kicc	Integral gain	2			
Max	Maximum limit	2.0	p.u		
Min	Minimum limit	-2.0	p.u		

Εικόνα 6.17: Παράμετροι της πρώτης πηγής του μικροδικτύου μας

Ουσιαστικά, επιλέξαμε τον τύπο ελέγχου που θα εφαρμόσουμε στην παραγωγή των πηγών και αυτός είναι ελέγχοντας-ρυθμίζοντας την παραγωγή τους σε ενεργό και άεργο ισχύ. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.18 δόθηκε η ονομαστική τιμή 0,03 MVA στην πηγή, που αντιστοιχεί και στην ονομαστική τιμή της φαινόμενης ισχύος της πηγής στην εικόνα 1.2. Στην παρακάτω εικόνα δίνεται το περιεχόμενο του block με το όνομα Microturbine, το οποίο αποτυπώνει πλήρως την διαδικασία ρύθμισης της παραγωγής την μονάδας σε ενεργό και άεργο ισχύ. Παρόμοια blocks υπάρχουν για όλες τις μονάδες παραγωγής του μικροδικτύου.



Εικόνα 6.18 : Ρύθμιση παραγωγής P,Q της μικροτουρμπίνας του μικροδικτύου (droop control)

Αρχικά να επισημανθεί ότι μέσω του διακόπτη (DRfreq) επιλέγαμε αν θα ενεργοποιήσουμε την λογική droop control στην παραγωγή των ΑΠΕ ή θα εισάγουμε εμείς απευθείας μια τιμή για την ενεργό ισχύ. Το δεύτερο επιτυγχάνεται με την λογική που απεικονίζεται πάνω αριστερά στην εικόνα 6.19. Συγκεκριμένα, πολλαπλασιάζουμε την ονομαστική τιμή ισχύος της μονάδας (εδώ 0,03 MWatt) με το ποσοστό παραγωγής που έχει το κάθε σενάριο που τρέχουμε (το RF είναι slider που ρυθμίζεται κάθε φορά ανάλογα το ποσοστό παραγωγής του σεναρίου).

Ωστόσο αυτό που έχει μεγάλο ενδιαφέρον εδώ είναι ο τρόπος που ρυθμίζεται η παραγωγή όταν λειτουργεί η λογική droop control (παρουσιάστηκε αναλυτικά στο κομμάτι της θεωρίας). Αρχικά θα γίνει επεξήγηση για την τεχνική ελέγχου στατισμού για τον έλεγχο ενεργού ισχύος - συχνότητας. Η τιμή F5 που εισάγεται είναι η τιμή της συχνότητας πριν τον breaker που διαχωρίζει το μικροδίκτυο με το δίκτυο διανομής, δηλαδή η συχνότητα του δικτύου. Αυτή η τιμή γίνεται ανά μονάδα διαιρώντας με την τιμή βάσης, 50 Hz. Με την συνάρτηση $Y = F(x)$, με Y την συχνότητα του μικροδικτύου και x την παραγόμενη ενεργό ισχύ από την μονάδα, ουσιαστικά εισάγουμε την P-f χαρακτηριστική καμπύλη στατισμού που παρουσιάστηκε στο θεωρητικό κομμάτι της διπλωματικής. Έτσι προκύπτει η ενεργός ισχύς την μονάδας παραγωγής, PdloopCC1.

Όσον αφορά τον έλεγχο στατισμού για τον έλεγχο αέργου ισχύος – τάσης εισάγουμε την διαφορά του Vsetmtr που έρχεται ως έξοδο από ελεγκτή PI (θα επισημανθεί και μετέπειτα ότι τα Vset για όλες τις μονάδες παραγωγής έχουν οριστεί 1 ανά μονάδα) με την τιμή της τάσης ανά μονάδα όπως αυτή έχει μετρηθεί στην μονάδα παραγωγής. Και πάλι η συνάρτηση Y

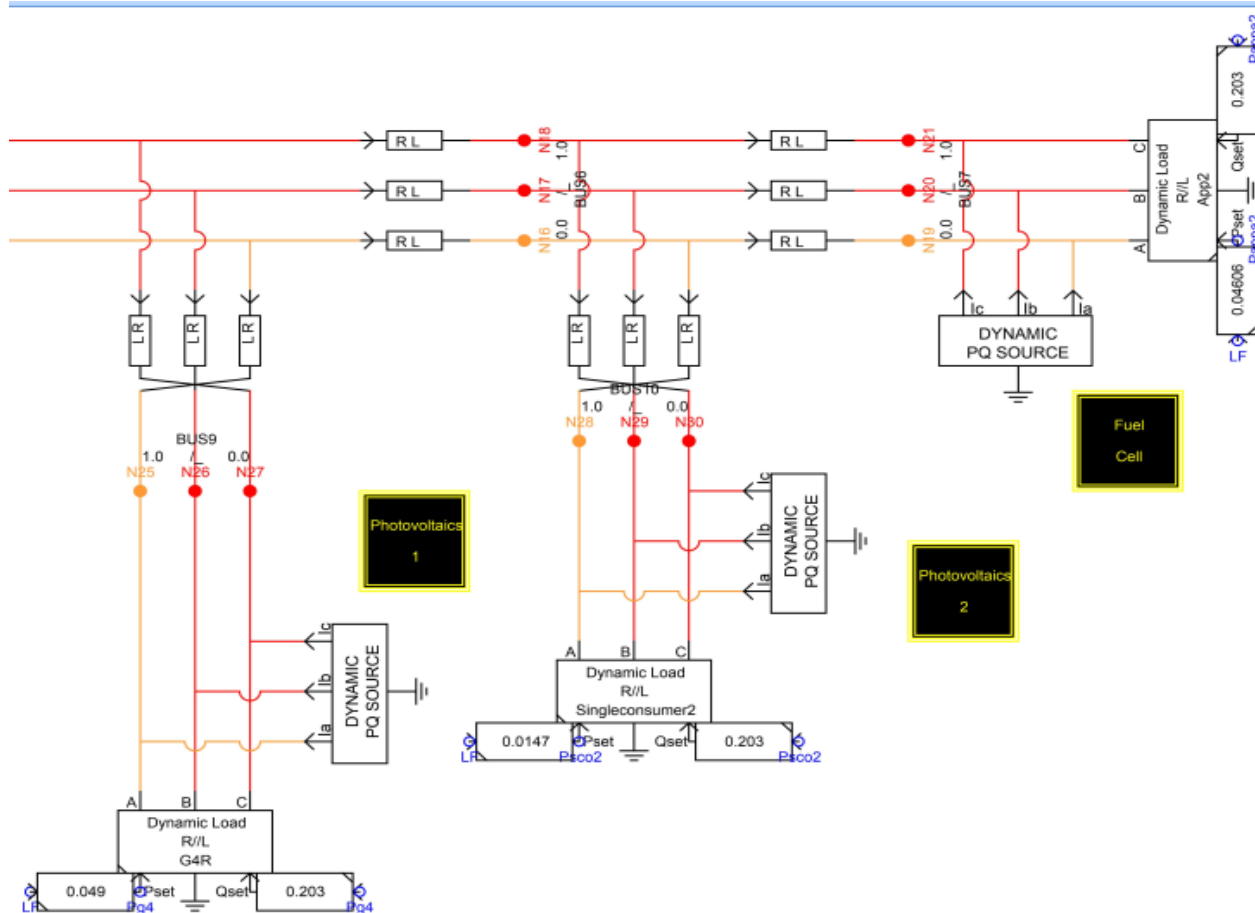
= $F(x)$, με Y την τάση στην μονάδα παραγωγής και x την παραγόμενη άεργο ισχύ από την μονάδα, εφαρμόζει την Q-V χαρακτηριστική καμπύλη στατισμού.

Η παραπάνω διαδικασία έχει εφαρμοστεί για όλες τις μονάδες παραγωγής του συστήματος μας. Να σημειωθεί ότι ο συντελεστής ισχύος των μονάδων παραγωγής έχει οριστεί 0,8. Η τεχνική ελέγχου στατισμού παρουσιάστηκε παραπάνω για την μικροτουρμπίνα του μικροδικτύου και δεν θα αναφερθεί ξανά για τις υπόλοιπες μονάδες παραγωγής.

Τέλος, προτού παρουσιαστεί το 3^ο κομμάτι του μικροδικτύου, στην εικόνα 6.9 που απεικονίζει το 2^ο κομμάτι να επισημανθεί ότι το φορτίο που ακολουθεί την μονάδα παραγωγής (μικροτουρμπίνα) αντιστοιχεί στο πρώτο Apartment building της εικόνας 1.2 (εδώ ονομάστηκε App1).

6.4.3 Τρίτο κομμάτι του μικροδικτύου

Ακολουθεί το 3^ο και τελευταίο κομμάτι του μικροδικτύου όπου θα γίνει απλή αναφορά στις μονάδες παραγωγής και στα φορτία που περιέχει καθώς έχουν αναλυθεί πλήρως όλες οι διαδικασίες που ακολουθήσαμε σε κάθε περίπτωση.



Εικόνα 6.19: 3^ο κομμάτι του μικροδικτύου

Ξεκινώντας από αριστερά προς τα δεξιά συναντάμε αρχικά την δεύτερη μονάδα παραγωγής. Η συγκεκριμένη ουσιαστικά αποτελεί σύμπτυξη δύο μονάδων όπως αυτές φαίνονται στην εικόνα 1.2. Πρόκειται για την wind turbine και τα πρώτα φωτοβολταϊκά. Η ισχύς τους έχει αθροισθεί. Το φορτίο που εξυπηρετούν αυτές οι πηγές είναι το Group of 4 residences όπως αυτό φαίνεται στην εικόνα 1.2. Στο μοντέλο μας το ονομάσαμε G4R.

Στην συνέχεια, ακολουθεί η 3^η πηγή παραγωγής και συγκεκριμένα πρόκειται για φωτοβολταϊκά που καλύπτουν πρωτίστως τις ανάγκες του φορτίου Single residencial consumer (το δεύτερο στο μικροδίκτυο) όπως ονομάζεται στην εικόνα 1.2 ή Sngleconsumer2 όπως φαίνεται στο RSCAD. Τέλος, στα δεξιά φαίνεται η κυψέλη καυσίμου (Fuel Cell) καθώς το τελευταίο φορτίο του μικροδικτύου, το δεύτερο κατά σειρά apartment building το οποίο ονομάσαμε εδώ App2.

Σε αυτό το σημείο έχει σχεδόν ολοκληρωθεί η περιγραφή του μοντελοποιημένου στο RSCAD μικροδικτύου της διπλωματικής. Αναλύθηκαν λεπτομερώς τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τα φορτία, τις μονάδες παραγωγής και όλα τα υπόλοιπα στοιχεία.

Επίσης περιγράφηκε η λογική ελέγχου της μπαταρίας και η τεχνική ελέγχου στατισμού που υιοθετήθηκε στις μονάδες παραγωγής. Όλες οι επιλογές μας έγιναν σύμφωνα με την εικόνα 1.2 που απεικονίζει το μικροδίκτυο και έχει παρουσιαστεί στο 1^ο κεφάλαιο της διπλωματικής. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει μεγαλύτερη εστίαση στον έλεγχο του μικροδικτύου και συγκεκριμένα στις λογικές για τον έλεγχο του διακόπτη που χωρίζει το μικροδίκτυο από το δίκτυο διανομής, τον έλεγχο της συχνότητας και της τάσης καθώς και στα σήματα που βγαίνουν ως έξοδοι από τους ελεγκτές PI και ευθύνονται για την ρύθμιση των επιπέδων ισχύος της μπαταρίας.

Ακολουθεί πίνακας με τις τιμές R,L για όλα τα φορτία γραμμής που υπάρχουν στο μικροδίκτυο, αριθμημένα ανάλογα με την σειρά που εμφανίζονται από τα αριστερά προς τα δεξιά στο μοντέλο στο RSCAD. Οι τιμές εξαρτώνται, όπως περιγράφηκε και παραπάνω από το καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε περίπτωση και το μήκος που καλύπτει.

Πίνακας 6.1 : Φορτία γραμμής μοντελοποιημένου μικροδικτύου

Αριθμός φορτίου γραμμής	R(Ω)	L(H)
1 ^ο	0,01704	0,00001586
2 ^ο	0,1107	0,000008981
3 ^ο	0,00852	0,00000793
4 ^ο	0,0414	0,00000783
5 ^ο	0,06939	0,000032
6 ^ο	0,01704	0,00001586
7 ^ο	0,02613	0,00000774
8 ^ο	0,02556	0,0000238
9 ^ο	0,1107	0,000008981
10 ^ο	0,04992	0,00001576

Κεφάλαιο 7

Επικοινωνία με τον MGCC και έλεγχος στο μικροδίκτυο μέσω ελεγκτών PI στο RTAC

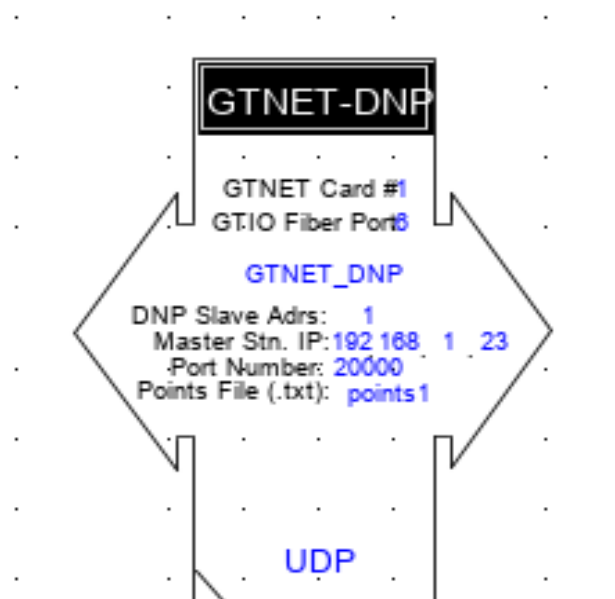
7.1 Εισαγωγή

Στο 7^ο κεφάλαιο θα γίνει εκτενής παρουσίαση στην διαδικασία ελέγχου του μικροδικτύου που παρουσιάστηκε μοντελοποιημένο στο RSCAD στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε για την διεπαφή με τον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου είναι το SEL AcSELerator RTAC. Οι έλεγχοι γίνανε με την βοήθεια ελεγκτών PI οι οποίοι θα αναλυθούν πλήρως, όπως επίσης θα παρουσιασθεί και ο τρόπος επικοινωνίας του RSCAD με το MGCS. Για κάθε διαφορετική κατάσταση του μικροδικτύου, είτε σταθερή κατάσταση είτε μετάβαση, θα αναλυθεί η λειτουργία του εκάστοτε PI και γενικότερα όλη η λογική ελέγχου.

7.2 Εισαγωγή στον RTAC και παρουσίαση της επικοινωνίας του RSCAD με το σύστημα ελέγχου

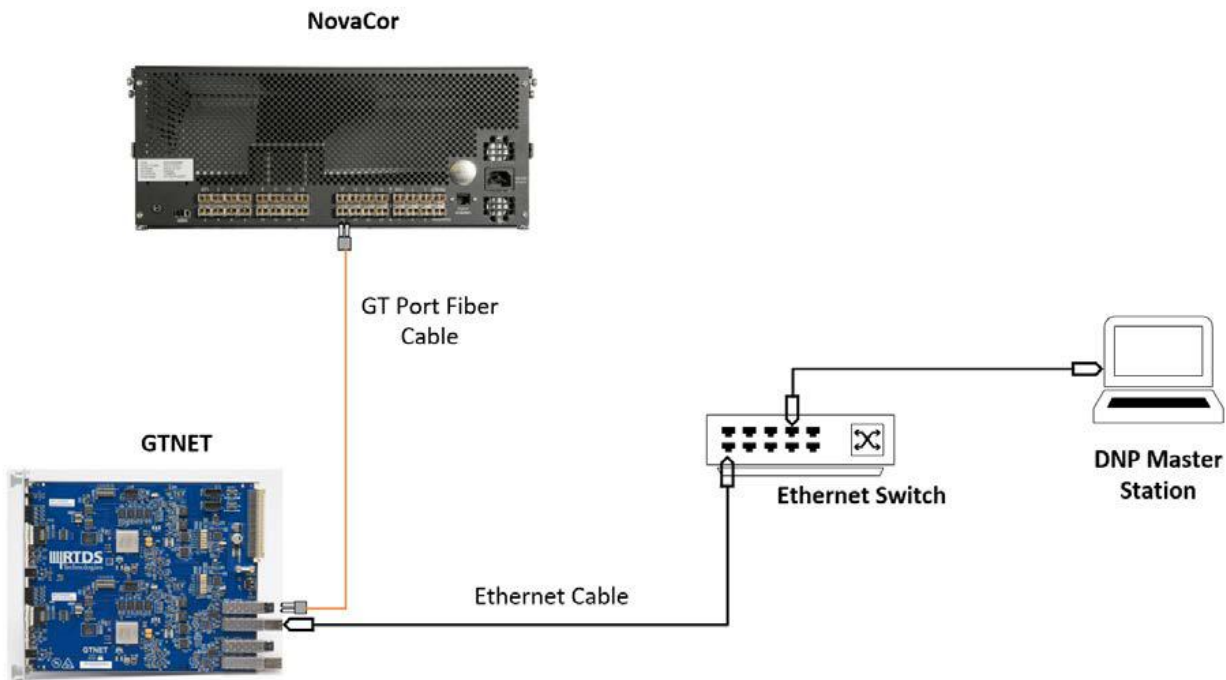
Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε για την διεπαφή με τον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου είναι το SEL AcSELerator RTAC. Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα εύχρηστο και γρήγορο εργαλείο για την υλοποίηση ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Μας δόθηκε η δυνατότητα, με την βοήθεια του IEC 61131-3, να δημιουργήσουμε ξεχωριστά blocks για κάθε έλεγχο στο μικροδίκτυο. Από τους τρεις τύπους block που είχαμε στην διάθεση μας, επιλέχτηκε το program (τα άλλα δύο function και function block). (15)

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζεται στην επικοινωνία μεταξύ του RTDS και του εξωτερικού εξοπλισμού (MGCC). Η επικοινωνία αυτή, η οποία είναι καθοριστικής σημασίας για τον έλεγχο του μικροδικτύου, επιτυγχάνεται μέσω LAN/WAN χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο επικοινωνίας DNP (Distributed Network Protocol). Πρόκειται για ένα ανεξάρτητο πρωτόκολλο που ενσωματώνει πολλά στρώματα εντοπισμού σφαλμάτων και διόρθωσης και επιτρέπει την επιβεβαίωση των εντολών ελέγχου. Χρησιμοποιείται πολύ συχνά από επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας ως ο μηχανισμός επικοινωνίας μεταξύ κέντρου ελέγχου και υποσταθμών. Για την χρήση της DNP επικοινωνίας με το RTDS θα πρέπει ο χρήστης να διαθέτει κάρτα GTNET.



Εικόνα 7.1: Στοιχείο GTNET-DNP που χρησιμοποιήσαμε στο RSCAD

Μια τυπική διάταξη για την τρόπο επικοινωνίας με DNP στο RTDS παρατίθεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 7.2: Τυπική διάταξη GTNET-DNP

Η GTNET συνδέεται με μια κάρτα PB5/GPC χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο οπτικών ινών που είναι συνδεδεμένο μεταξύ των θυρών GT οι οποίες βρίσκονται στο πίσω μέρος των PB5/GPC και GTNET. Τα δεδομένα που υπολογίζονται ή που προκύπτουν από την προσομοίωση του RTDS αποστέλλονται μεταξύ των PB5/GPC και GTNET μέσω της σύνδεσης οπτικών ινών GT Port. Η GTNET συνδέεται με τον κύριο σταθμό του DNP μέσω της θύρας Ethernet που διαθέτει.

Ο master (κύριος) σταθμός DNP εκκινεί όλη την επικοινωνία στέλνοντας μηνύματα-αιτήματα στους slave σταθμούς για ενημερωμένες τιμές δεδομένων ή για αλλαγή της τιμής μια παραμέτρου. Όσον αφορά τα σήματα που στέλνονται, αντί για είσοδο – έξοδο εδώ χρησιμοποιούμε τους όρους status και control. Τα πρώτα αναφέρονται σε σήματα που στέλνονται από τον slave σταθμό στον master, ενώ τα δεύτερα σε σήματα που ακολουθούν την αντίστροφη πορεία. Συγκεκριμένα για την προσομοίωση στο RTDS τα control σήματα χρησιμοποιούνται ως είσοδος σε ένα στοιχείο του RSCAD ενώ τα status σήματα αποτελούν έξοδο ενός στοιχείου του RSCAD. Η κάρτα GTNET, και κατ' επέκταση η επικοινωνία DNP, διαχειρίζεται δυαδικά (binary) και αναλογικά (analogue) σήματα (status και control). Επομένως χρησιμοποιήσαμε τεσσάρων ειδών σήματα:

- 1) Binary Status ή αλλιώς Binary Inputs (BI), δηλαδή δυαδικά σήματα που αποτελούν έξοδο ενός στοιχείου του RSCAD και είσοδο στον controller (δηλαδή στο πρόγραμμα RTAC).
- 2) Binary Control ή αλλιώς Binary Outputs (BO), δηλαδή δυαδικά σήματα που αποτελούν έξοδο του controller και είσοδο στο RSCAD.
- 3) Analogue Status ή αλλιώς Analogue Inputs (AI), δηλαδή αναλογικά σήματα που αποτελούν έξοδο ενός στοιχείου του RSCAD και είσοδο στον controller.
- 4) Analogue Control ή αλλιώς Analogue Outputs (AO), δηλαδή αναλογικά σήματα που αποτελούν έξοδο του controller και είσοδο στο RSCAD.

Σε ένα αρχείο txt έγινε η αντιστοίχιση μεταξύ των σημάτων που έχουν εκχωρηθεί στο RSCAD σε σημεία δεδομένων DNP. Για κάθε αντιστοίχιση χρειάζεται μια μόνο γραμμή που να κατευθύνει το σήμα του RSCAD σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση DNP.

Παρακάτω παρουσιάζεται το αρχείο txt με την κατάλληλη αντιστοίχιση, που χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική. Αργότερα θα εξηγηθεί αναλυτικά και ξεχωριστά για κάθε μεταβλητή του αρχείου η χρησιμότητα της και ο ρόλος της.

```
AI: 0 V1_pu 0.01
AI: 1 V2_pu 0.01
AI: 2 F3 0.001
AI: 3 A 0.001
AI: 4 B 0.001
AI: 5 AngleDiff 0.001
AI: 6 C 0.001
AI: 7 D 0.001
AI: 8 E 0.001
AI: 9 F5 0.001
AI: 10 Prefbatt 0.001
AI: 11 G 0.001
AI: 12 POUTB 0.001
AI: 13 Qrefbatt 0.001
AI: 14 QOUTB 0.001
BI: 0 Breaker BRK10 0
BO: 5 Breaker2 BRK2 0 1
AO: 1 Pref 0.003
AO: 6 Qref 0.003
AO: 11 F1 0
AO: 16 F2 0
AO: 21 F4 0
AO: 61 Vsetmtr 1
AO: 26 Vsetphv1 1
AO: 31 Vsetphv2 1
AO: 36 VsetFC 1|
```

Εικόνα 7.3: Αρχείο txt της διπλωματικής

Όσον αφορά την μορφή της εντολής, το πρώτο νούμερο δείχνει την διεύθυνση DNP και ακολουθείται από το όνομα της μεταβλητής στο RSCAD. Στην συνέχεια, στα σήματα status (inputs) δίνεται ένα deadband. Αν η νέα τιμή της μεταβλητής διαφέρει από την προηγούμενη σε αυτό το ποσοστό ή μεγαλύτερο γίνεται ενημέρωση της τιμής της μεταβλητής στο RSCAD. Στα σήματα control (outputs), η τιμή που ακολουθεί το όνομα της μεταβλητής είναι η αρχική τιμή της μεταβλητής.

7.3 Ελεγκτές PI

7.3.1 Εισαγωγή στους ελεγκτές PI και τα στοιχεία τους στο RTAC

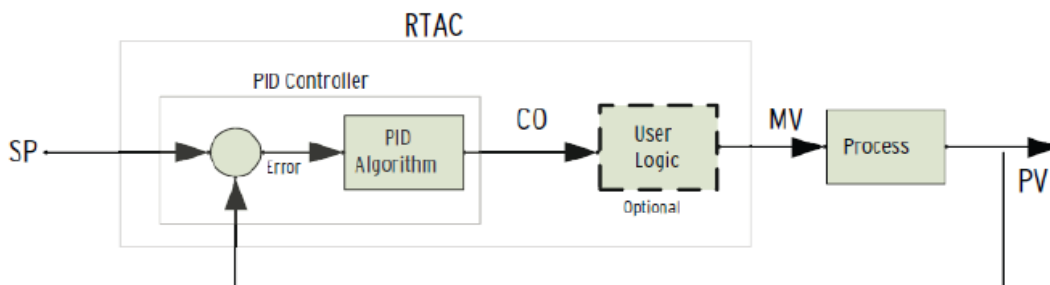
Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, για την διεξαγωγή του ελέγχου στο RTAC χρησιμοποιήθηκαν ελεγκτές PI. Η λογική των ελεγκτών PI επικεντρώνεται στην σύγκριση της τιμής της μεταβλητής που παρέχεται στην είσοδο του ελεγκτή με μια επιθυμητή τιμή για την μεταβλητή (setpoint). Υπολογίζει το σφάλμα-διαφορά των δύο τιμών, θέτοντας ως στόχο να φέρει την τιμή της μεταβλητής εισόδου όσο πιο κοντά γίνεται στο setpoint.

Οι δύο λογικές ελέγχου που εφαρμόζει ο PI είναι :

- a. Proportional action: Ο έλεγχος αυτός εστιάζει στο πόσο μακριά είναι η μεταβλητή εισόδου από την επιθυμητή τιμή
- b. Integral action: Ο έλεγχος αυτός εστιάζει στο χρονικό διάστημα που παρατηρήθηκε η διαφορά μεταξύ της μεταβλητής εισόδου και της επιθυμητής τιμής.

Η πρώτη λογική ελέγχου του PI (proportional) αφήνει πάντα την μεταβλητή εισόδου του ελεγκτή ελαφρώς μακριά από το setpoint. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πρέπει να υπάρχει πάντα κάποιο σφάλμα μεταξύ των δύο τιμών σε αυτό το στάδιο ελέγχου, ώστε να διατηρηθεί μια μη μηδενική τιμή εξόδου του ελεγκτή. Κατά συνέπεια το σφάλμα σταθερής κατάστασης δεν είναι ποτέ μηδέν. Το δεύτερο στάδιο ελέγχου (integral) έρχεται να εξαλείψει αυτό το σφάλμα ενσωματώνοντας όλα τα προηγούμενα σφάλματα με την πάροδο του χρόνου, έτσι ώστε η έξοδος του ελεγκτή να συνεχίσει να αυξάνεται όσο υπάρχει οποιοδήποτε σφάλμα.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το διάγραμμα ενός ελέγχου PID. Εμείς έχουμε εστιάσει στον έλεγχο PI, αγνοώντας το τρίτο στάδιο ελέγχου του PID (Derivative action, εστιάζει στο πόσο γρήγορα αλλάζει το σφάλμα), ωστόσο στο παρακάτω διάγραμμα αλλά και στους τύπους που θα ακολουθήσουν λαμβάνεται υπόψιν.

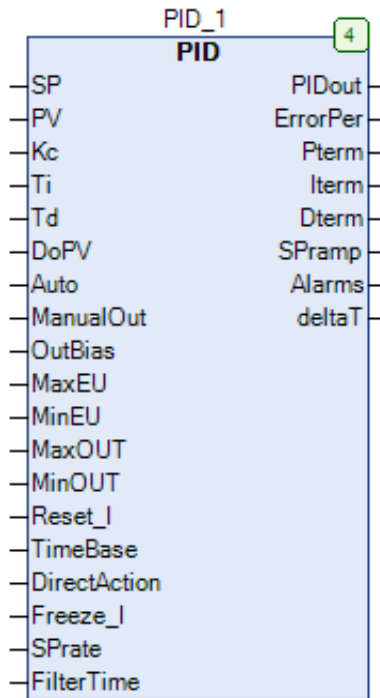


Εικόνα 7.4: Διάγραμμα ενός PID ελέγχου (16)

Όπως θα εξηγηθεί και παρακάτω το SP είναι το setpoint και το PV είναι η μεταβλητή που θέλουμε να φέρουμε κοντά στο setpoint. Το CO (Controller output) είναι η έξοδος του ελεγκτή και λαμβάνοντας υπόψιν και τις τρεις δράσεις του PID υπολογίζεται ως εξής:

$$CO = K_c \left[E + \frac{1}{T_i} \int E \, dt + T_d \frac{d(E)}{dt} \right]$$
, όπου E το σφάλμα, K_c το κέρδος του ελεγκτή και T_i , T_d οι χρόνοι για integral και derivative action του PID αντίστοιχα

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται ο PID στο πρόγραμμα RTAC, ενώ στην συνέχεια ακολουθεί επεξήγηση κάποιων σημαντικών μεταβλητών του. Παρόλο που πρόκειται για ελεγκτή PID, θέτοντας 0 στην μεταβλητή του T_d απενεργοποιούμε το τρίτο στάδιο ελέγχου του PID.



Εικόνα 7.5: Ελεγκτής PID στο πρόγραμμα RTAC

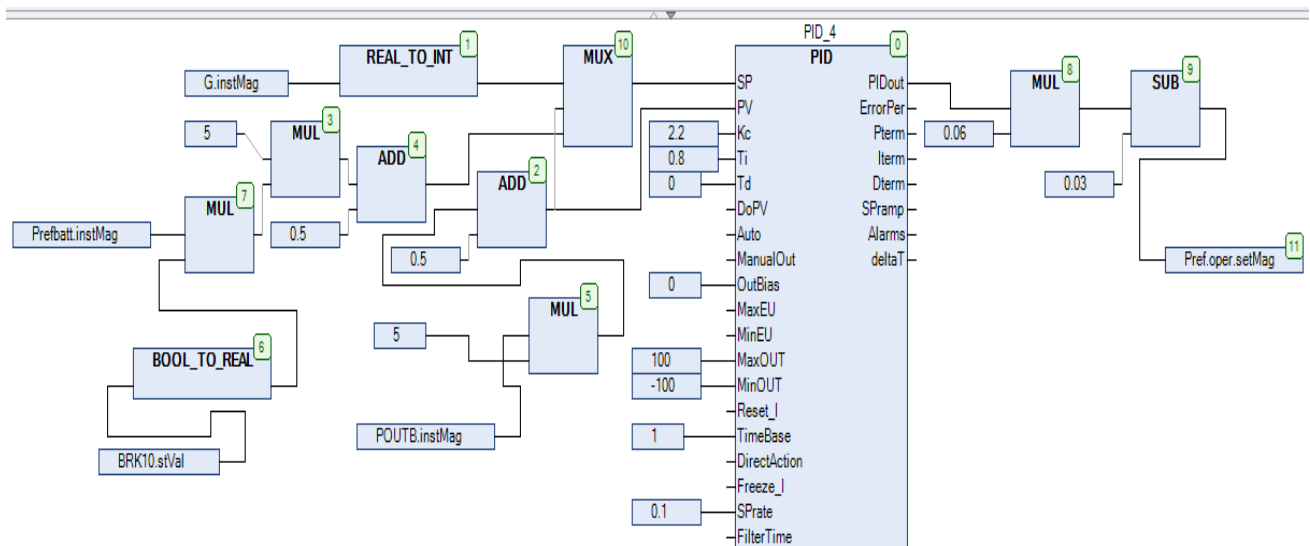
Αναλυτικά (16) :

- SP: Η επιθυμητή τιμή που αναφέρθηκε και παραπάνω ή αλλιώς το setpoint
- PV: Η μεταβλητή (σήμα) του RSCAD την οποία στοιχεύουμε να φέρουμε κοντά στο setpoint μέσω του PI
- Kc: Το κέρδος του ελεγκτή
- Ti: Integral time (χρόνος σε seconds που αφορά το δεύτερο στάδιο ελέγχου του PI)
- OutBias: Τιμή (σε ποσοστό) που προστίθεται στην έξοδο του PI
- MaxOUT: Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η έξοδος του PI (σε ποσοστό)
- MinOUT: Η ελάχιστη τιμή που μπορεί να λάβει η έξοδος του PI (σε ποσοστό)
- TimeBase: Ο ρυθμός διεξαγωγής της λογικής ελέγχου του PI
- PIDout: Έξοδος του ελεγκτή
- Error_p: Η τιμή του σφάλματος (σε ποσοστό)

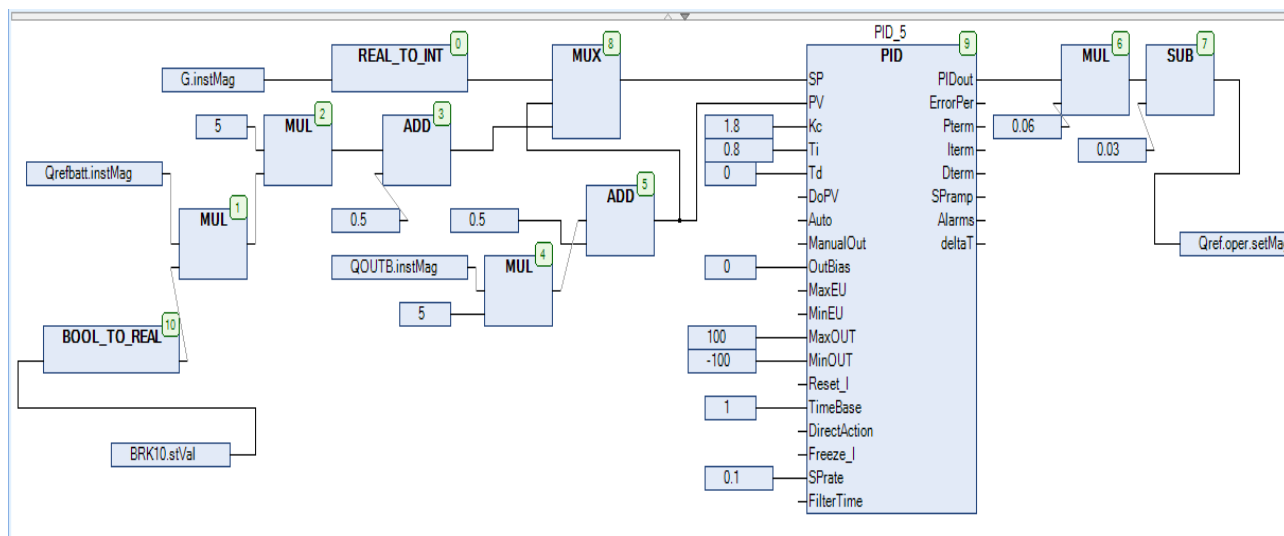
7.3.2 Έλεγχος σε κατάσταση συνδεδεμένη στο δίκτυο (grid connected-steady state) και σε μετάβαση από συνδεδεμένη σε αυτόνομη λειτουργία (grid connected to islanded – transition)

Κάθε κατηγορία έλεγχου θα εξεταστεί ξεχωριστά, παρουσιάζοντας την λογική του εκάστοτε ελεγκτή PI, το σήμα που λαμβάνει στην είσοδο και αυτό που δίνεται στην έξοδο. Παράλληλα με τις εικόνες από το RTAC, όπου χρειάζεται θα γίνεται αναφορά και στα σήματα που έρχονται από το RSCAD και εισάγονται στους PI ή το αντίστροφο, για να γίνει πλήρως κατανοητή η ολοκληρωμένη πλέον λογική έλεγχου που εφαρμόστηκε στο μικροδίκτυο της διπλωματικής.

Αρχικά θα αναφερθούμε στον έλεγχο που γίνεται για την κατάσταση στην οποία το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο στο γενικό δίκτυο και λειτουργεί σε σταθερή κατάσταση (steady state) αλλά και στην διαδικασία μετάβασης από συνδεδεμένη σε αυτόνομη λειτουργία. Στις επόμενες εικόνες θα παρουσιαστούν οι ελεγκτές PI οι οποίοι συμμετέχουν στον έλεγχο στις παραπάνω καταστάσεις.



Εικόνα 7.6: Ελεγκτής PI για ρύθμιση ενεργού ισχύος (Pref)



Εικόνα 7.7: Ελεγκτής PI για ρύθμιση αέργου ισχύος (Qref)

Οι έξοδοι των δύο παραπάνω ελεγκτών PI δηλαδή οι μεταβλητές Pref και Qref ευθύνονται για την ρύθμιση της ενεργού και της αέργου ισχύος που προσφέρει ή καταναλώνει η μπαταρία του μικροδικτύου, για την ρύθμιση του ρεύματος της, της τάσης και της συχνότητας. Το σημείο που εισάγονται αυτές οι δύο μεταβλητές στο RSCAD παρουσιάστηκε στο 6^ο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα στην εικόνα 6.12 φαίνεται ο ρόλος τους στον υπολογισμό του ρεύματος της μπαταρίας (το οποίο μετέπειτα χρησιμοποιείται και για το σήμα CCM), ενώ επιπλέον στην εικόνα 6.14 διαδραματίζουν ρόλο (μαζί με άλλα δύο σήματα που θα εξεταστούν μετέπειτα) στην ρύθμιση της συχνότητας και της τάσης στον έλεγχο στατισμού.

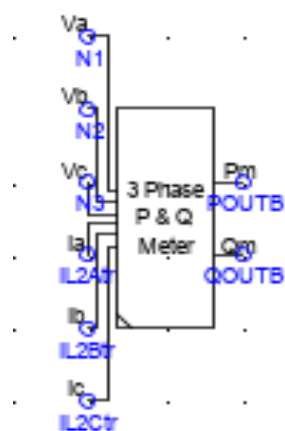
Ο πολλαπλασιασμός και η αφαίρεση που γίνονται στις εξόδους των δύο παραπάνω PI πριν προκύψουν οι μεταβλητές Pref και Qref γίνεται για τον εξής λόγο. Η έξοδος του ελεγκτή PI λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 όποτε πολλαπλασιάζοντας με 0,06 και αφαιρώντας μετά το 0,03 αναπροσαρμόζουμε τις τιμές εξόδου στο διάστημα -0,03 με +0,03. Όπως έχει αναφερθεί ήδη το μέγιστο όριο ενεργού ισχύος που μπορεί να προφέρει ή να απορροφήσει η μπαταρία είναι 30kWatt ή 0,03MWatt (αντίστοιχη λογική ισχύει και για την άεργο ισχύ). Οι τιμές που στέλνουμε στο RSCAD ως Pref είναι σε MWatt, οπότε έτσι εξηγείται η αναπροσαρμογή του διαστήματος τιμών εξόδου του PI.

Αφού περιγράφηκε η κατεύθυνση-χρήση του σήματος εξόδου των ελεγκτών PI, θα ακολουθήσει εστίαση στις μεταβλητές που εισάγουμε στον ελεγκτή έτσι ώστε να διεξάγει τον απαραίτητο έλεγχο και να δώσει ως εξόδους τα κατάλληλα Pref και Qref. Θα αναλύσουμε τις μεταβλητές για τον ελεγκτή PI που παράγει το Pref, ωστόσο ισχύουν ακριβώς τα ίδια και για τον δεύτερο ελεγκτή (Qref). Θα σταθούμε ιδιαίτερα στις δύο πρώτες μεταβλητές εισόδου του

PI, δηλαδή το setpoint (SP) και την πραγματική τιμή της μεταβλητής που θέλουμε να ελέγξουμε (PV). Όσον αφορά τις υπόλοιπες μεταβλητές εισόδου του PI, δεν θα γίνεται ξεχωριστή αναφορά για κάθε περίπτωση ελεγκτή που θα εξετάσουμε καθώς όλες αυτές οι μεταβλητές ορίστηκαν βάση δοκιμών και των αποτελεσμάτων που λαμβάναμε.

Εστιάζοντας λοιπόν στον ελεγκτή που δίνει ως έξοδο το Pref, θα αναλυθεί η λογική που ακολουθήσαμε για το setpoint η οποία ως ένα βαθμό είναι ίδια για όλους τους PI που χρησιμοποιήσαμε. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.6 η μεταβλητή SP ορίζεται από έναν πολυπλέκτη MUX ο οποίος ανάλογα την τιμή της μεταβλητής G στέλνει μια από τις δύο εισόδους του. Συγκεκριμένα, το σήμα G ρυθμίζεται μέσω ενός slider στο RSCAD και μπορεί να πάρει είτε την τιμή 0 είτε την τιμή 1, αναλόγως κάθε φορά το σήμα που θέλουμε να εισάγουμε στο SP. Στην περίπτωση που έχει την τιμή 0, όπου είναι και η αρχική του κατάσταση, το σήμα που εισάγεται σαν SP είναι ουσιαστικά το ίδιο σήμα που εισάγουμε και ως PV. Έτσι δεν υπάρχει κάποια διαφορά ανάμεσα στα δύο σήματα όποτε ουσιαστικά ο έλεγχος δεν λειτουργεί. Δίνοντας στο G την τιμή 1, αλλάζει η είσοδος στο SP και δημιουργείται διαφορά ανάμεσα σε αυτήν την τιμή και στην τιμή PV, όποτε ο έλεγχος ξεκινά και αρχίζει να φέρνει την τιμή PV κοντά στην SP.

Όσον αφορά στο σήμα που δίνει ο MUX στην περίπτωση που το slider είναι 0 ταυτίζεται όπως τονίστηκε προηγουμένως με το PV του ελεγκτή, δηλαδή την πραγματική τιμή της μεταβλητής που θέλουμε να ελέγξουμε. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.6, το σήμα αυτό που προέρχεται από το RSCAD είναι το POUTB, το οποίο έπειτα μετασχηματίζεται. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται πως προκύπτει αυτό το σήμα στο RSCAD.



Εικόνα 7.8: Υπολογισμός των POUTB, QOUTB στο RSCAD

Πρόκειται για ένα μετρητικό ισχύος στο οποίο εισάγουμε τις τάσεις πριν τον διακόπτη στο μικροδίκτυο μας και τα ρεύματα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή και υπολογίζουμε

ενεργό και άεργο ισχύ. Όποτε ουσιαστικά υπολογίζουμε την ισχύ πριν τον διακόπτη στο μικροδίκτυο μας (άρα του δικτύου).

Η τιμή που δίνει ο MUX στο SP όταν ενεργοποιείται ο έλεγχος (δηλαδή όταν στο G έχει δοθεί η τιμή 1) προέρχεται όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.6 από την τροποποίηση του σήματος Prefbatt που δίνεται από το RSCAD. Η συγκεκριμένη μεταβλητή ρυθμίζεται μέσω ενός slider το οποίο παίρνει τιμές από $-0,01\text{MWatt}$ έως $+0,01\text{MWatt}$. Πρόκειται για την τιμή αναφοράς για την προσφορά ή απορρόφηση ενεργού ισχύος της μπαταρίας. Έχει οριστεί σε αυτό το διάστημα καθώς σε όλα τα σενάρια που θα τρέξουμε η μπαταρία δεν θα ξεπερνά αυτά τα επίπεδα ενεργού ισχύος (είτε σε σενάριο που προσφέρει, είτε σε σενάριο που απορροφά ισχύ).

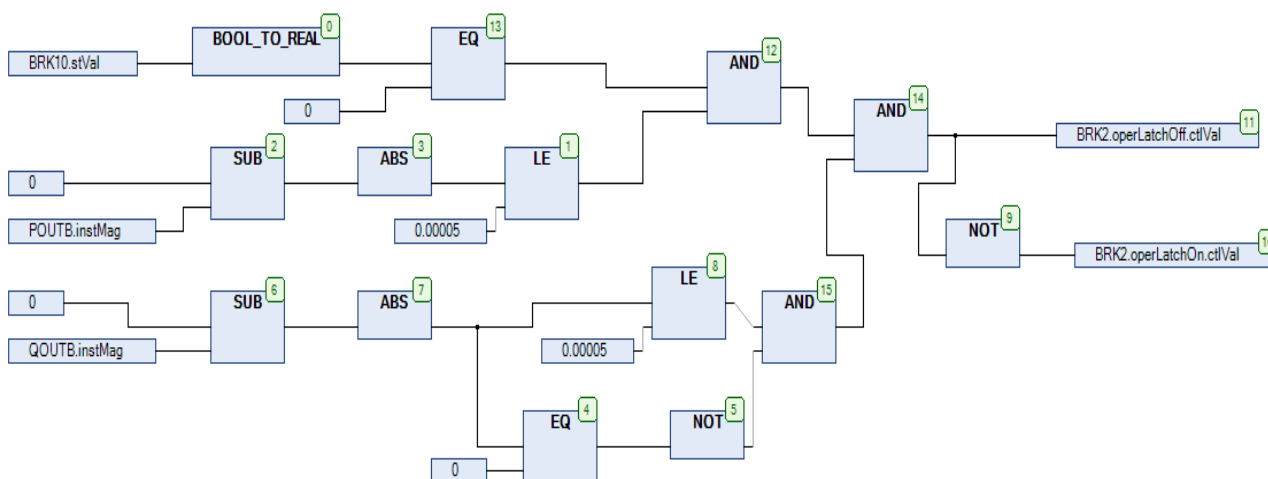
Η μεταβλητή Prefbatt πολλαπλασιάζεται αρχικά με την τιμή ενός Breaker, του BRK10. Πρόκειται για μια τιμή (0 ή 1) που στέλνουμε εμείς στο RTAC και εξαρτάται από την κατάσταση που βρίσκεται ή θα βρίσκεται το μικροδίκτυο. Προς το παρόν, παραμένουμε στην περίπτωση που το μικροδίκτυο λειτουργεί σταθερά σε κατάσταση συνδεδεμένη με το ευρύτερο δίκτυο, οπότε και η τιμή του Breaker παραμένει σταθερά 1 (ουσιαστικά δηλαδή είναι σαν να μην υπάρχει στην συγκεκριμένη περίπτωση). Θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στη τιμή του BRK10 και πως αυτή αλλάζει σε 0 όταν το μικροδίκτυο ετοιμάζεται να μεταβεί από κατάσταση συνδεδεμένη στο δίκτυο σε αυτόνομη.

Τέλος να επισημανθεί ο λόγος που τόσο η μεταβλητή Prefbatt όσο και η POUTB πολλαπλασιάζονται με 5 και μετά προσθέτουμε 0,5. Η λογική είναι παρόμοια με αυτή που εφαρμόσαμε για το διάστημα τιμών εξόδου του PI που το μετατρέψαμε από διάστημα τιμών 0 έως 1 σε διάστημα τιμών $-0,03$ έως $0,03$ για τον λόγο που εξηγήθηκε νωρίτερα. Παρόμοια δουλέψαμε, λοιπόν, και για τις μεταβλητές εισόδου τις οποίες έπρεπε να φέρουμε σε αντίστοιχο διάστημα και συγκεκριμένα σε διάστημα τιμών 0 έως 1.

Έχοντας περιγράψει πλήρως την διαδικασία ελέγχου στην κατάσταση που το μικροδίκτυο λειτουργεί συνδεδεμένο στο δίκτυο, θα ακολουθήσει ανάλυση της διαδικασίας μετάβασης από συνδεδεμένη λειτουργία σε αυτόνομη και τι αλλάζει στους παραπάνω ελεγκτές PI. Αρχικά να επισημανθεί ότι για να γίνει η μετάβαση πρέπει να φέρουμε τα POUTB, QOUTB κοντά στο 0 καθώς επιθυμούμε μηδενική ροή ισχύος μεταξύ του δικτύου και του μικροδικτύου. Όταν επιτευχθεί αυτό, τότε είναι έτοιμο το μικροδίκτυο να μεταβεί σε ανεξάρτητη λειτουργία. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται παρακάτω αναλυτικά.

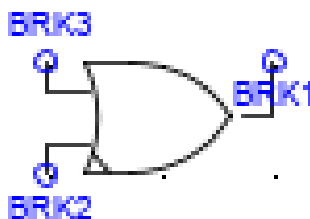
Όπως τονίστηκε και νωρίτερα, ο ρόλος του BRK10 εντοπίζεται στην μετάβαση του μικροδικτύου σε αυτόνομη λειτουργία. Σε αντίθεση με πριν όπου στέλναμε τιμή 1 για το BRK10, τώρα που επιθυμούμε να γίνει η μετάβαση του μικροδικτύου, στέλνουμε τιμή 0 για το BRK10. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.6 (πάλι γίνεται αναφορά μόνο στον ελεγκτή για το

Pref, όμως ισχύουν ακριβώς τα ίδια και για αυτόν με το Qref), αυτομάτως το 0 αυτό μηδενίζει και το σήμα που έρχεται στον MUX όποτε ουσιαστικά η τιμή αναφοράς της ισχύος είναι 0, καθώς αυτή είναι η τιμή που αποσκοπούμε να αποκτήσει και η POUTB (PV). Ο ελεγκτής PI μπαίνει σε λειτουργία και κατορθώνει να φέρει το POUTB κοντά στην μηδενική τιμή. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η λογική στο RTAC που οδηγεί εν τέλει τον διακόπτη του μικροδικτύου να ανοίξει όταν υπάρχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις για την μετάβαση.



Εικόνα 7.9: Λογική που οδηγεί στο άνοιγμα του διακόπτη και στην μετάβαση σε αυτόνομη λειτουργία

Ειδικότερα όπως φαίνεται στην εικόνα 7.9 θα πρέπει να ικανοποιούνται τρεις προϋποθέσεις για να ανοίξει ο διακόπτης BRK2 και να μεταβεί το μικροδίκτυο από συνδεδεμένη στο δίκτυο λειτουργία σε αυτόνομη. Αρχικά όπως περιγράφηκε και παραπάνω θα πρέπει η τιμή του BRK10 να είναι 0. Ταυτόχρονα θα πρέπει οι τιμές ενεργού και αέργου ισχύος, POUTB και QOUTB να έχουν φτάσει πολύ κοντά στο 0 (έχουμε βάλει όριο απόκλισης από το 0 το 0,00005). Τότε το μικροδίκτυο είναι έτοιμο να μεταβεί σε αυτόνομη λειτουργία. Ο διακόπτης BRK2 που οδηγεί στην μετάβαση φαίνεται που εισάγεται στο RSCAD στην παρακάτω εικόνα.



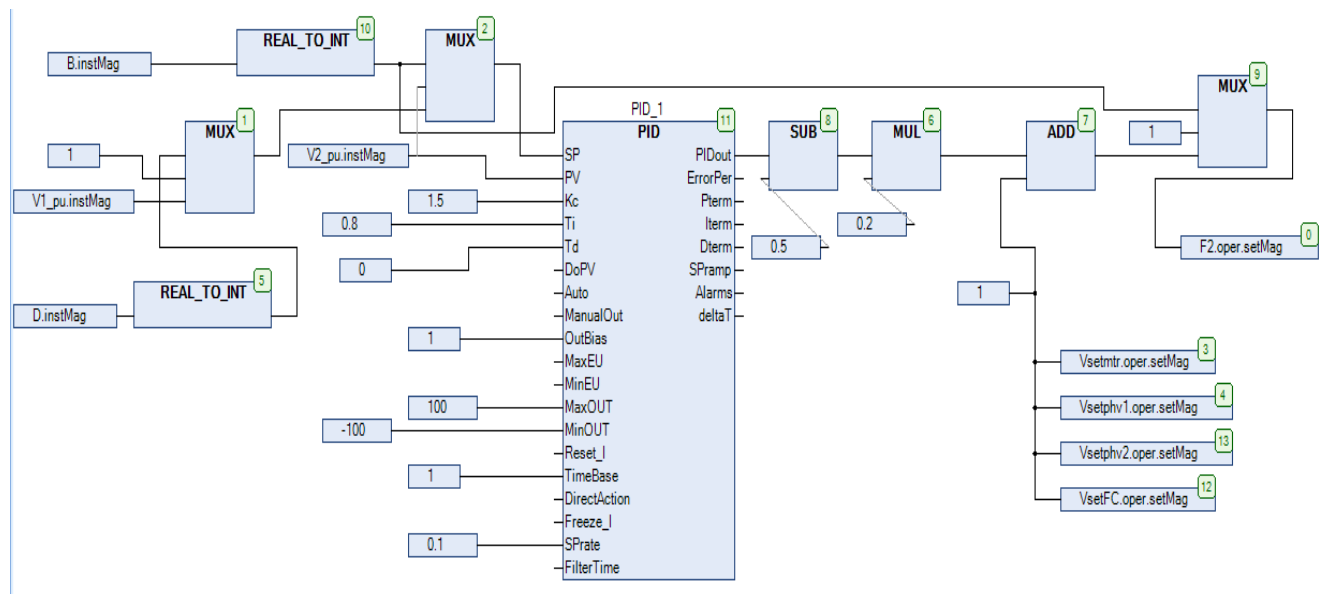
Εικόνα 7.10: Ο ρόλος του BRK2 στο RSCAD

Η εικόνα 7.10 απεικονίζει την λογική που δημιουργήσαμε στο RSCAD και είναι υπεύθυνη για την κατάσταση του διακόπτη BRK1, ο οποίος όπως έχει τονισθεί και νωρίτερα στην διπλωματική ρυθμίζει την κατάσταση στην οποία λειτουργεί το μικροδίκτυο. Υπενθυμίζουμε ότι αν ο BRK1 έχει την τιμή 1 το μικροδίκτυο λειτουργεί συνδεδεμένο στο δίκτυο, ενώ αν έχει την τιμή 0 λειτουργεί ανεξάρτητα. Τον BRK3 που φαίνεται στην εικόνα τον ρυθμίζουμε χειροκίνητα εμείς και τοποθετήθηκε προς διευκόλυνση σε κάποιες δοκιμές που έγιναν. Ουσιαστικά δεν παίζει κάποιο ουσιαστικό ρόλο στην διαδικασία ελέγχου του διακόπτη BRK1 και ας θεωρηθεί ότι έχει μονίμως την τιμή 0 (άρα δεν επηρεάζει την έξοδο της OR). Ο BRK2 είναι αυτός που ρυθμίζει την κατάσταση του BRK1 και άρα και την λειτουργία του μικροδικτύου. Έτσι ενώ πριν είχε την τιμή 1 οπότε και ο BRK1 είχε την τιμή 1 άρα το μικροδίκτυο λειτουργούσε συνδεδεμένο στο δίκτυο, όταν ικανοποιηθούν οι προϋποθέσεις της εικόνας 7.9 λαμβάνει την τιμή 0 άρα και ο BRK1 γίνεται 0. Επομένως έτσι επιτυγχάνεται η μετάβαση του μικροδικτύου σε ανεξάρτητη λειτουργία.

7.3.3 Έλεγχος σε κατάσταση απομονωμένης λειτουργίας (islanded-steady state) και σε μετάβαση από απομονωμένη σε συνδεδεμένη στο δίκτυο λειτουργία (islanded to grid connected– transition)

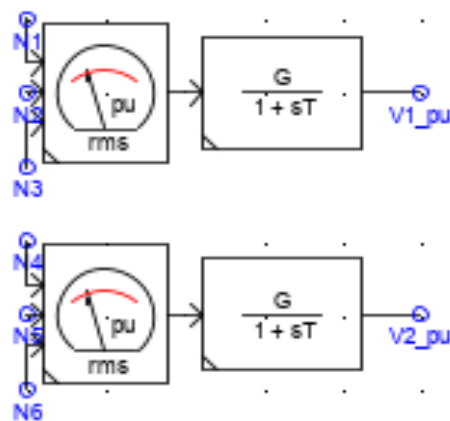
Όπως είδαμε παραπάνω το μικροδίκτυο όταν υπάρχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις και παράλληλα υπάρχει ανάγκη, μεταβαίνει με τον τρόπο που σχεδιάσαμε στο RTAC σε αυτόνομη λειτουργία. Ωστόσο ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση στην οποία το μικροδίκτυο επιστρέφει από την αυτόνομη στην συνδεδεμένη στο δίκτυο λειτουργία. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει, παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση μετάβασης, να ικανοποιούνται κάποιες προϋποθέσεις που αφορούν τις τιμές τάσης, συχνότητας και φάσης πριν και μετά τον διακόπτη BRK1 που καθορίζει την λειτουργία του μικροδικτύου. Αυτές τις προϋποθέσεις κατορθώνουμε να τις ελέγξουμε με τους PI που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια.

Στους προηγούμενους PI (εικόνες 7.6 και 7.7) αναλύθηκε πλήρως η λογική που ακολουθήσαμε τόσο με τους πολυπλέκτες MUX όσο και με τον τρόπο που ρύθμιζαμε το διάστημα τιμών των μεταβλητών του. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει στους ελεγκτές PI που θα ακολουθήσουν να γίνει πιο σύντομη και περιεκτική περιγραφή, καθώς στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό σε ότι περιγράφηκε νωρίτερα. Αρχικά ακολουθεί εικόνα με τον ελεγκτή PI που είναι υπεύθυνος για την ρύθμιση του μέτρου της τάσης μετά τον διακόπτη.



Εικόνα 7.11: Ελεγκτής PI για την ρύθμιση του μέτρου της τάσης μετά τον διακόπτη

Στον παραπάνω ελεγκτή PI ρυθμίζουμε την ανά μονάδα τιμή της τάσης ακριβώς μετά τον διακόπτη του μικροδικτύου. Ουσιαστικά στοχεύουμε στο να φέρουμε την τάση V2_pu πολύ κοντά στην τιμή V1_pu. Στην παρακάτω εικόνα γίνεται κατανοητό για ποιες τάσεις μιλάμε.



Εικόνα 7.12: Υπολογισμός τιμών τάσης ανά μονάδα πριν και μετά τον διακόπτη του μικροδικτύου

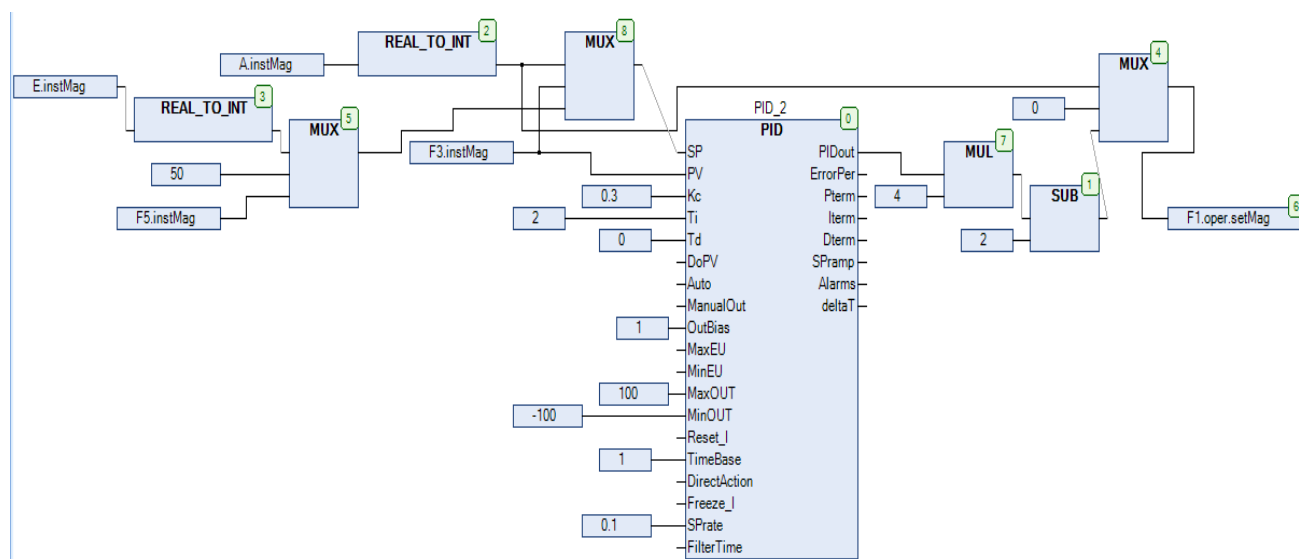
Οι κόμβοι N1, N2, N3 βρίσκονται ακριβώς πριν τον διακόπτη και οι κόμβοι N4, N5, N6 βρίσκονται ακριβώς μετά (φαίνεται η θέση τους στην εικόνα 6.3 με το 1^ο κομμάτι του μικροδικτύου). Σκοπός μας λοιπόν είναι να έρθουν όσο πιο κοντά γίνεται οι δύο παραπάνω τιμές τάσης ανά μονάδα καθώς για να επιτευχθεί επανασύνδεση του μικροδικτύου στο δίκτυο επιβάλλεται οι τιμές του μέτρου τάσης πριν και μετά τον διακόπτη να είναι ίδιες (ισορροπούν

σε τιμή κοντά στο 1 ανά μονάδα). Για αυτόν τον λόγο με την ενεργοποίηση του ελέγχου το setpoint που δίνεται στον ελεγκτή PI είναι το V1_ru και η τιμή που δίνεται ως process variable (PV) είναι η V2_ru.

Όσον αφορά την έξοδο του ελεγκτή PI επικεντρωνόμαστε στο σήμα εξόδου F2. Το συγκεκριμένο σήμα έχει παρουσιασθεί στο 6^ο κεφάλαιο και είναι ευδιάκριτο στην εικόνα 6.14 σε ποιο σημείο εισάγεται στο RSCAD. Μιλάμε προφανώς για το block του RSCAD με όνομα BATTERY CONTROLS και συγκεκριμένα συμμετέχει στον έλεγχο-υπολογισμό του σήματος με όνομα mag. Το mag όπως φαίνεται στην εικόνα 6.16 διαδραματίζει ρόλο στον υπολογισμό του σήματος VCM, δηλαδή της τάσης της μπαταρίας σε περίπτωση κατάστασης islanded στο μικροδίκτυο. Όποτε μέσω του σήματος F2 διεξάγουμε τον έλεγχο για την τιμή της τάσης της μπαταρίας και κατορθώνουμε να φέρουμε σε ισορροπία τις τιμές της τάσης πριν και μετά τον διακόπτη.

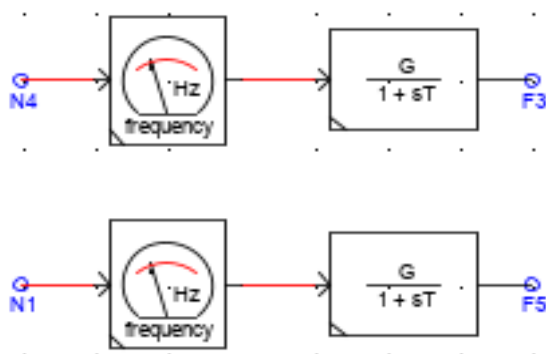
Όσον αφορά τις υπόλοιπες εξόδους του ελεγκτή PI της εικόνας 7.11, πρόκειται για τις τιμές Vset των μονάδων παραγωγής όπως αυτές έχουν παρουσιαστεί στο 6^ο κεφάλαιο και απεικονίζονται στην εικόνα 6.19. Οι συγκεκριμένες τιμές διαδραματίζουν ρόλο κυρίως στον υπολογισμό της αέργου ισχύος των μονάδων παραγωγής. Αφού εκτελέστηκαν κάποιες δοκιμές, ορίσαμε την τιμή των Vset σταθερά 1 ανά μονάδα. Οπότε ουσιαστικά δεν επηρεάζονται από την λειτουργία του PI παρότι φαίνονται ως εξόδοι του.

Αφού ολοκληρώσαμε την περιγραφή για την λειτουργία του PI που ευθύνεται για τον έλεγχο της τάσης, προχωράμε στον αντίστοιχο PI που εκτελεί τον έλεγχο της συχνότητας στο μικροδίκτυο. Ο συγκεκριμένος ελεγκτής PI απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 7.13: Ελεγκτής PI για την ρύθμιση της συχνότητας στο μικροδίκτυο

Παρόμοια με τον προηγούμενο ελεγκτή PI όπου φέρναμε την τάση μετά τον διακόπτη στην τιμή της τάσης πριν τον διακόπτη, αντίστοιχα και εδώ φέρνουμε την τιμή της συχνότητας μετά τον διακόπτη σε ισοδυναμία με την τιμή της πριν από αυτόν. Η ισορροπία στις συχνότητες αυτές είναι αναγκαία για την επανασύνδεση του μικροδικτύου στο δίκτυο. Η τιμή που επιτυγχάνεται η ισορροπία είναι η τιμή συχνότητας του δικτύου, δηλαδή 50 Hz. Καθώς ενεργοποιείται ο έλεγχος η τιμή που δίνεται στον ελεγκτή της εικόνας 7.13 ως τιμή αναφοράς (SP) είναι η F5, ενώ η τιμή που θέλουμε να ρυθμίσουμε είναι η F3 (PV). Στην παρακάτω εικόνα είναι φανερό για ποιες μεταβλητές γίνεται λόγος.



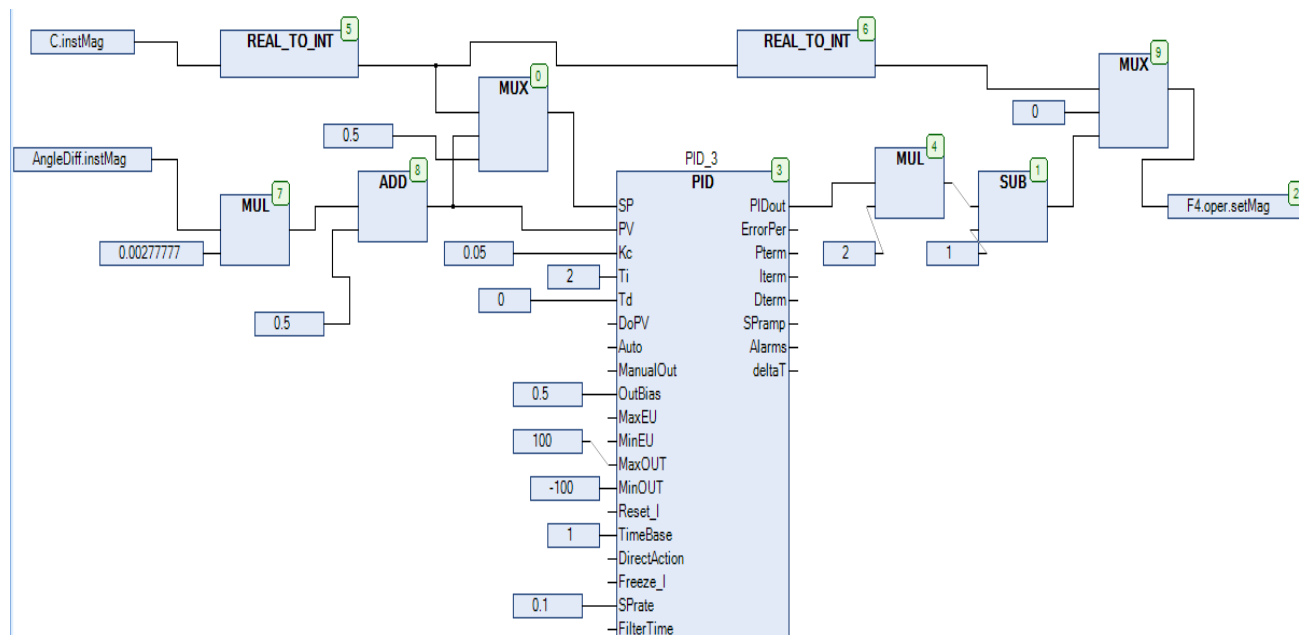
Εικόνα 7.14: Μέτρηση συχνοτήτων πριν και μετά τον διακόπτη στο RSCAD

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.14 η τιμή F5 που δίνεται ως setpoint στον PI είναι η συχνότητα αριστερά του διακόπτη του μικροδικτύου (δηλαδή από την πλευρά του δικτύου), ενώ η τιμή F3 που δίνεται ως PV είναι η συχνότητα δεξιά του διακόπτη, την οποία προσπαθούμε να ρυθμίσουμε.

Το σήμα που λαμβάνουμε ως έξοδο του ελεγκτή PI είναι το F1. Το σημείο που εισάγεται αυτή η μεταβλητή στο RSCAD φαίνεται στην εικόνα 6.14. Μέσω αυτού του σήματος που έρχεται από τον ελεγκτή PI κατορθώνουμε να ελέγξουμε-ρυθμίσουμε την τιμή της μεταβλητής freq (όπως φαίνεται και αυτή στην εικόνα 6.14) η οποία με την σειρά της συμμετέχει στον υπολογισμό του σήματος VCM της μπαταρίας (εικόνα 6.16). Με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε να ελέγξουμε την τιμή της συχνότητας του μικροδικτύου και να την φέρουμε στην τιμή των 50Hz, δηλαδή σε ισορροπία με την συχνότητα του δικτύου.

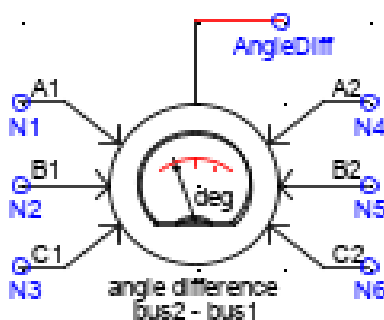
Τέλος θα αναφερθούμε στον τελευταίο ελεγκτή PI που χρησιμοποιήσαμε για τον έλεγχο στο μικροδίκτυο. Ο έλεγχος αυτός διεξάγεται για την ρύθμιση της διαφοράς φάσης πριν και μετά τον διακόπτη του μικροδικτύου. Έπειτα και από την συγκεκριμένη ρύθμιση η οποία θα έχει ακολουθήσει την ρύθμιση του μέτρου της τάσης και της συχνότητας, το μικροδίκτυο θα είναι έτοιμο να επανασυνδεθεί στο δίκτυο δηλαδή να μεταβεί από αυτόνομη

λειτουργία σε λειτουργία συνδεδεμένη στο δίκτυο. Στην συνέχεια ακολουθεί η εικόνα του ελεγκτή PI που ρυθμίζει την διαφορά φάσης.



Εικόνα 7.15: Ελεγκτής PI για την ρύθμιση της διαφοράς φάσης στο μικροδίκτυο

Η μεταβλητή που επιχειρούμε να ρυθμίσουμε στον παραπάνω ελεγκτή και την οποία εισάγουμε σαν PV είναι η AngleDiff όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.15. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο τρόπος υπολογισμού της μεταβλητής αυτής στο RSCAD.



Εικόνα 7.16: Υπολογισμός της διαφοράς γωνίας στο RSCAD

Όπως φαίνεται στο RSCAD με το παραπάνω μετρητικό υπολογίζουμε την διαφορά γωνίας, αφαιρώντας από την γωνία του bus2 (μετά τον διακόπτη) την γωνία του bus1 (πριν τον διακόπτη). Το αποτέλεσμα προκύπτει σε μοίρες. Ο λόγος που στο RTAC πολλαπλασιάζουμε το σήμα AngleDiff με 0,00277777 και στην συνέχεια προσθέτουμε 0,5 είναι ο εξής. Όπως περιγράφηκε και στις προηγούμενες περιπτώσεις κάνουμε μετασχηματισμό του διαστήματος

τιμών που λαμβάνει η μεταβλητή εισόδου του ελεγκτή και συγκεκριμένα μετασχηματίζουμε το διάστημα $[-180,+180]$ σε $[0,+1]$ για να ταυτίζεται με το διάστημα τιμών εξόδου του PI. Την διαφορά γωνίας που έρχεται από το RSCAD προσπαθούμε μέσω του ελεγκτή να την φτάσουμε σε τιμές κοντά στο 0 (έχει οριστεί 0,5 setpoint καθώς με το 0 παρουσιάστηκε πρόβλημα στον έλεγχο, οπότε ορίστηκε μια κοντινή θετική τιμή).

Το σήμα εξόδου του ελεγκτή PI είναι η μεταβλητή F4, η οποία όπως και οι F1,F2, συμμετέχει στον υπολογισμό του σήματος VCM της μπαταρίας (φαίνεται στην εικόνα 6.16). Ο τρόπος που συμμετέχει έχει παρουσιαστεί στο 6^ο κεφάλαιο.

Έχοντας ολοκληρώσει την περιγραφή των ελεγκτών PI που συμμετέχουν στον έλεγχο και στην προετοιμασία για μετάβαση από αυτόνομη λειτουργία σε συνδεδεμένη στο δίκτυο, μπορούμε να συνοψίσουμε την πορεία συλλογισμού μας για την συγκεκριμένη διαδικασία με τον τύπο που ακολουθεί. Συγκεκριμένα πρόκειται για τύπο υπολογισμού τάσης, που δίνεται ως Vgrid συμβολίζοντας την τάση από την πλευρά του διακόπτη που έρχεται σε επαφή με το ευρύτερο δίκτυο διανομής και ως Vmicro συμβολίζοντας την αντίστοιχη τάση από την πλευρά του διακόπτη που έρχεται σε επαφή με το υπόλοιπο μικροδίκτυο.

$$V_{grid} = V_1 \sin(2\pi F_1 t + \phi_1)$$

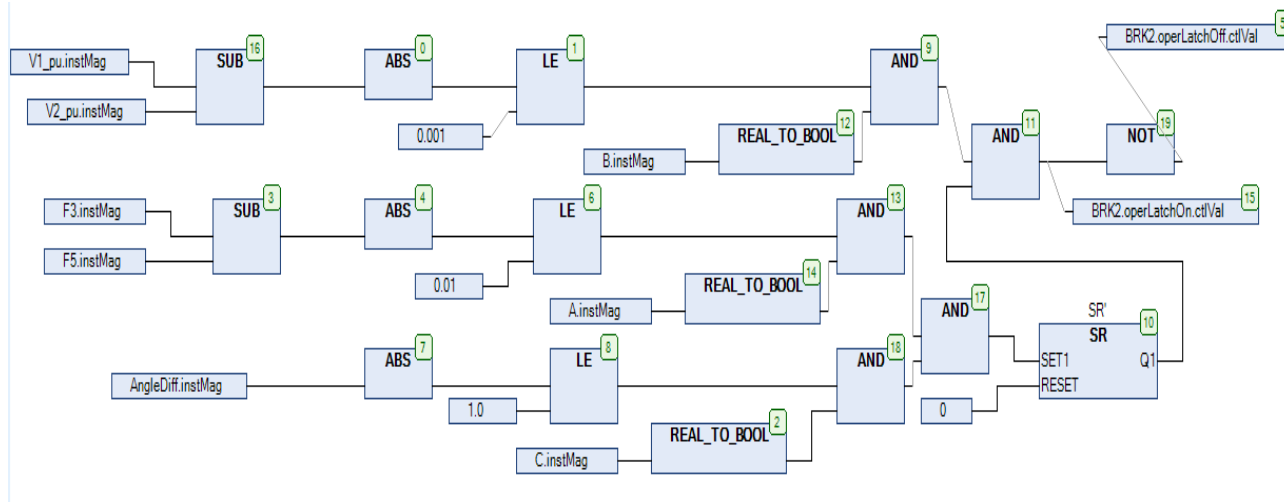
$$V_{micro} = V_2 \sin(2\pi F_2 t + \phi_2)$$

Προφανώς όπως τονίσαμε και νωρίτερα για να μπορεί να γίνει επανασύνδεση του μικροδικτύου στο δίκτυο θα πρέπει το Vgrid να ισούται με το Vmicro, ειδικότερα :

- $V_1 = V_2$
- $F_1 = F_2$
- $\phi_1 = \phi_2$

Οι τρεις παραπάνω ισοδυναμίες επιτυγχάνονται με τους ελεγκτές PI ακριβώς όπως αναλύθηκε νωρίτερα. Να επισημανθεί ότι η πρώτη ισοδυναμία αφορά τα μέτρα των τάσεων (ελεγκτής εικόνας 7.11), η δεύτερη αφορά τις συχνότητες (ελεγκτής εικόνας 7.13) και η τρίτη αφορά τις φάσεις (ελεγκτής εικόνας 7.15).

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η λογική που φτιάξαμε στο RTAC με στόχο το κλείσιμο του διακόπτη του μικροδικτύου, δηλαδή την επανασύνδεση στο δίκτυο, όταν πληρούνται οι κατάλληλες προϋποθέσεις.



Εικόνα 7.17: Λογική που οδηγεί στο κλείσιμο του διακόπτη και στην επανασύνδεση του μικροδικτύου

Ουσιαστικά ορίζουμε κάποιες ελάχιστες επιτρεπτές διαφορές στα δύο μεγέθη που συγκρίνονται κάθε φορά. Συγκεκριμένα για τις συχνότητες ορίζεται η διαφορά 0,01Hz, για τις τάσεις 0,001 ανά μονάδα και για την διαφορά φάσης 1 μοίρα. Όταν λοιπόν έχουν ρυθμιστεί όλα τα μεγέθη (δηλαδή να είναι η διαφορά με την τιμή αναφοράς ίση ή μικρότερη της τιμής που έχει οριστεί) τότε στέλνεται εντολή για κλείσιμο του διακόπτη του μικροδικτύου και επανασύνδεση στο δίκτυο. Αυτό γίνεται μέσω του BRK2 με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που περιγράφηκε αναλυτικά νωρίτερα στην μετάβαση από συνδεδεμένη λειτουργία σε αυτόνομη (εδώ στέλνουμε αρχική τιμή για τον BRK2 την τιμή 0 ενώ πριν την τιμή 1).

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο 7 μπορούμε να συνοψίσουμε ότι εδώ παρουσιάστηκε πλήρως η λειτουργία των ελεγκτών PI και πως διεξάγαμε τον έλεγχο με την βοήθεια του προγράμματος RTAC. Σε συνδυασμό με το κεφάλαιο 6, έχει αναλυθεί ενδελεχώς το μοντελοποιημένο μικροδίκτυο της διπλωματικής, οι λειτουργίες του αλλά και η διαδικασία-τεχνική ελέγχου του, η οποία προφανώς στηρίζεται στο θεωρητικό κομμάτι που προηγήθηκε. Στο τελευταίο κεφάλαιο θα δοθούν τα πειραματικά μας αποτελέσματα ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να προκύψουν ολοκληρωμένα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 8

Αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις των προσομοιώσεων

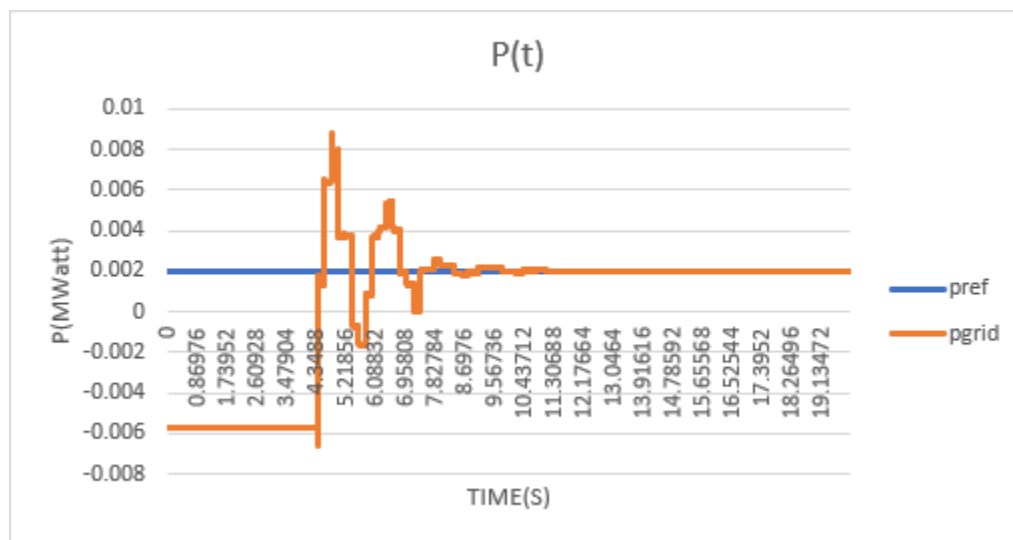
8.1 Εισαγωγή

Στο 8^ο και τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής θα ακολουθήσει παρουσίαση και ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων με την μορφή γραφικών παραστάσεων όπως αυτές σχηματίστηκαν στο excel. Συγκεκριμένα για όλες τις πιθανές καταστάσεις του μικροδίκτυου (grid connected, islanded, grid connected to islanded, islanded to grid connected) θα παρουσιαστούν γραφικές παραστάσεις με τα μεγέθη στα οποία επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας και στοχεύουμε να ελέγξουμε στο μικροδίκτυο. Θα γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων με την συμμετοχή του ελέγχου όπως τον σχεδιάσαμε και αποτελεσμάτων χωρίς τον έλεγχο έτσι ώστε να τονιστούν τα πλεονεκτήματα και ο σπουδαίος ρόλος του ελέγχου σε ένα μικροδίκτυο.

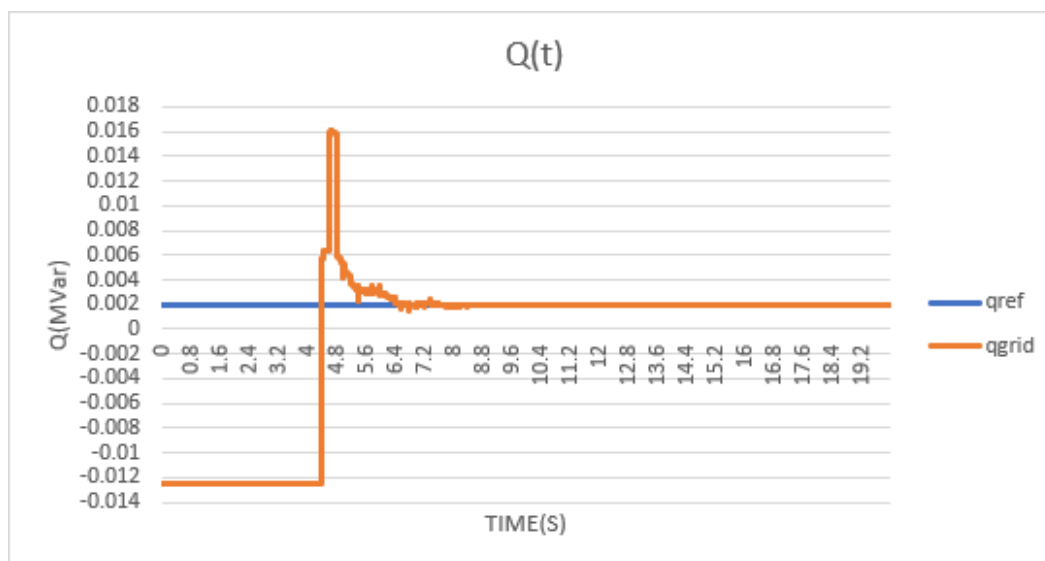
8.2 Λειτουργία συνδεδεμένη στο δίκτυο (steady state – grid connected)

Αρχικά θα εξετάσουμε την περίπτωση στην οποία το μικροδίκτυο λειτουργεί σταθερά συνδεδεμένο στο δίκτυο. Οι ελεγκτές PI που απεικονίζονται στις εικόνες 7.6 και 7.7 ρυθμίζουν όπως αναφέρθηκε στην παρουσίαση τους, την ροή ενεργού και αέργου ισχύος από το δίκτυο προς το μικροδίκτυο. Ο στόχος μας είναι να μπορέσουμε να ρυθμίσουμε αυτήν την ροή, δίνοντας μια τιμή αναφοράς ξεχωριστά για ενεργό και άεργο με σκοπό να προσπαθήσουμε να φέρουμε τις τιμές POUTB και QOUTB (εικόνες 7.6,7.7) κοντά σε αυτά τα setpoints.

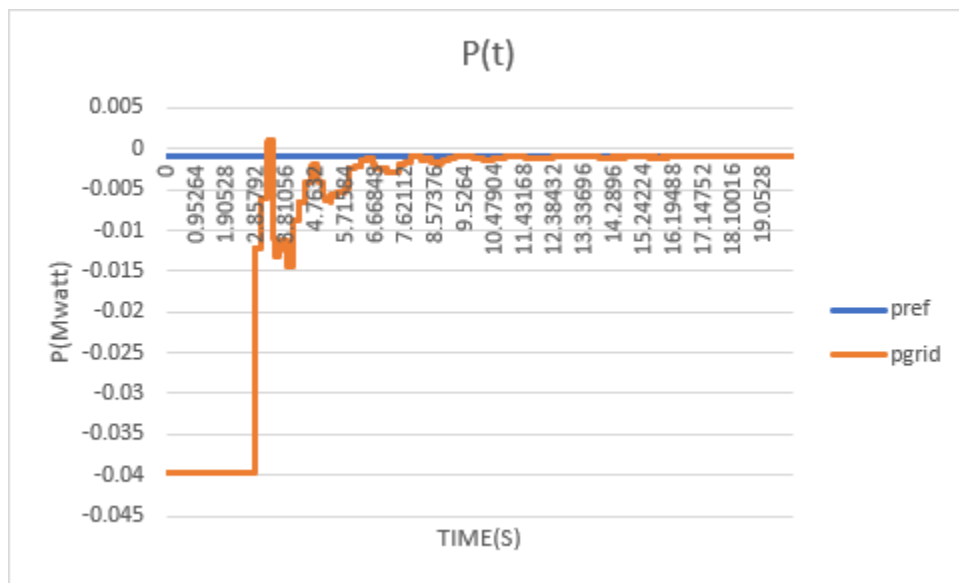
Τα σενάρια που εξετάσαμε εδώ είναι δύο. Και στα δύο το ποσοστό παραγωγής των μονάδων είναι 100% (δηλαδή ονομαστικές τιμές) και του φορτίου 50% των ονομαστικών τιμών του. Ωστόσο στο πρώτο σενάριο δόθηκε θετική τιμή αναφοράς για τις ισχύς (+0,002MWatt) ενώ στο δεύτερο δόθηκε αρνητική τιμή (-0,001MWatt). Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις με τα πειραματικά αποτελέσματα τόσο για την ενεργό όσο και για την άεργο ισχύ.



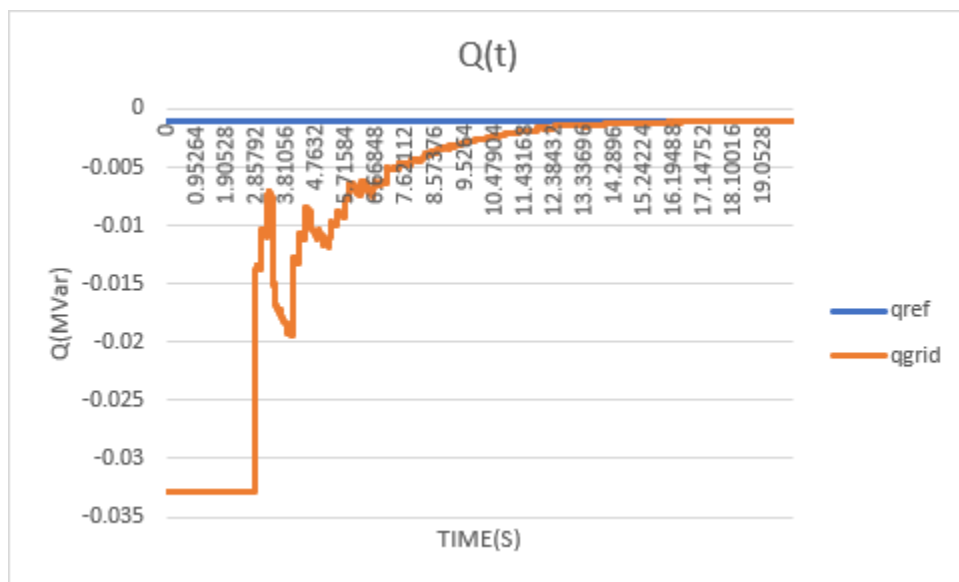
Εικόνα 8.1 : Ενεργός ισχύς με θετικό setpoint



Εικόνα 8.2 : Άεργος ισχύς με θετικό setpoint



Εικόνα 8.3 : Ενεργός ισχύς με αρνητικό setpoint



Εικόνα 8.4 : Άεργος ισχύς με αρνητικό setpoint

Όπως φαίνεται με το μπλε χρώμα είναι η τιμή αναφοράς (Prefbatt, Qrefbatt) και με το πορτοκαλί είναι η τιμή που ρυθμίζουμε (POUTB, QOUTB). Στις παραστάσεις φαίνεται αρχικά μια απότομη μεταβολή της τιμής της ρυθμιζόμενης μεταβλητής, γεγονός που υποδηλώνει την ενεργοποίηση του ελέγχου. Στην συνέχεια γίνεται η σταδιακή προσέγγιση της τιμής αναφοράς, την οποία κατορθώνει να φτάσει στο χρονικό σημείο που φαίνεται στις γραφικές παραστάσεις.

8.3 Μετάβαση από λειτουργία συνδεδεμένη στο δίκτυο σε αυτόνομη λειτουργία (transition – grid connected to islanded)

8.3.1 Εισαγωγή στις προσομοιώσεις της μετάβασης σε αυτόνομη λειτουργία

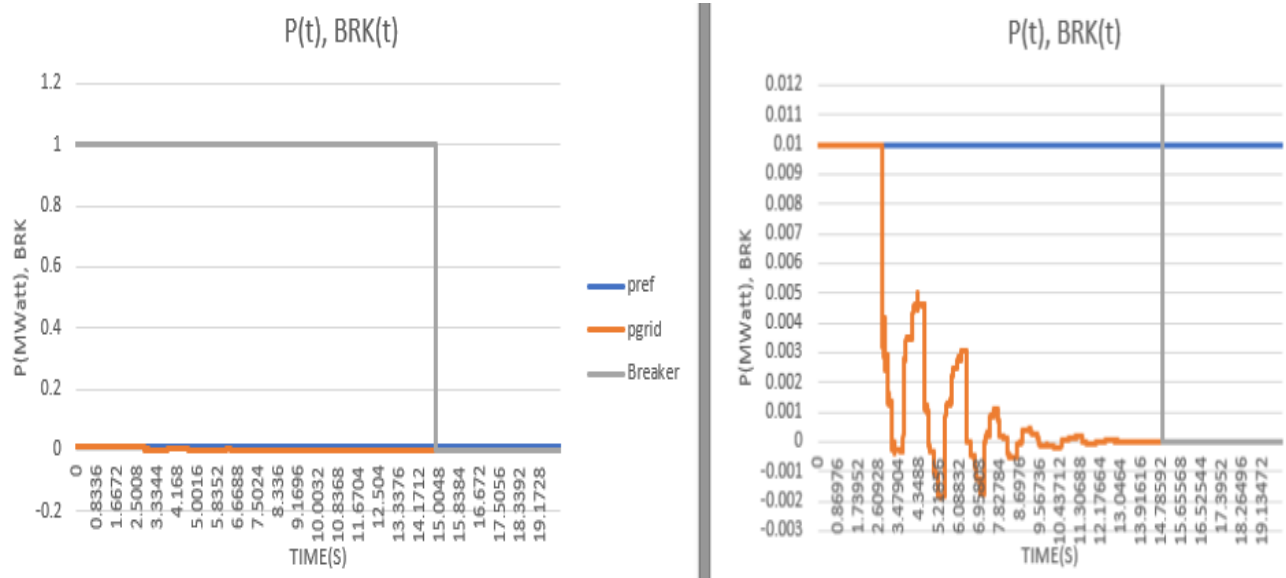
Στηριζόμενοι στους ίδιους ελεγκτές PI (εικόνες 7.6, 7.7) θα παρατηρήσουμε τα πειραματικά αποτελέσματα για την μετάβαση από συνδεδεμένη στο δίκτυο λειτουργία σε αυτόνομη. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, όταν ετοιμάζεται η συγκεκριμένη μετάβαση στους ελεγκτές έρχεται σαν τιμή αναφοράς για τις ισχύς η τιμή 0. Αυτό συμβαίνει καθώς στην απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου δεν υπάρχει ροή ισχύος από το ευρύτερο δίκτυο. Όποτε εδώ στοχεύουμε στο να φέρουμε τις τιμές POUTB, QOUTB στο μηδέν.

Εδώ εξετάστηκαν σενάρια με διαφορετικά ποσοστά παραγωγής και φορτίου, ενώ επίσης έγιναν και δοκιμές χωρίς να είναι ενεργοποιημένος ο έλεγχος έτσι ώστε να μπορούμε να κάνουμε συγκρίσεις και να μεταβούμε σε χρήσιμα συμπεράσματα. Εστιάσαμε στις γραφικές που αφορούσαν την ρύθμιση της ενεργού και της αέργου ισχύος αλλά και τα ρεύματα στον διακόπτη του μικροδικτύου την στιγμή της μετάβασης.

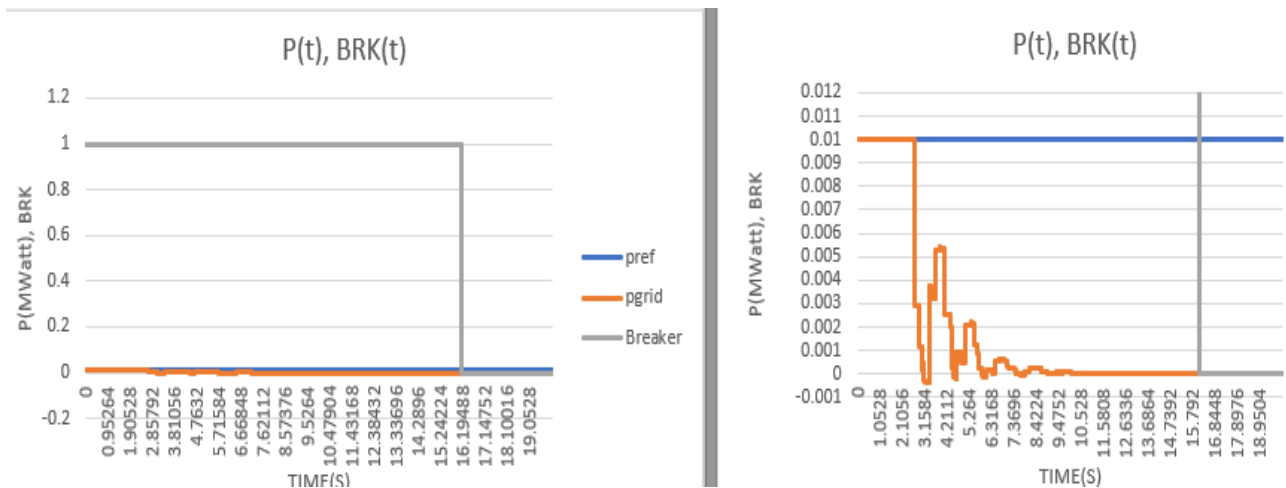
Τα πειραματικά αποτελέσματα που θα ακολουθήσουν αφορούν σενάριο με 30% φορτίο και 55% παραγωγή και σενάριο με 40% φορτίο και 100% παραγωγή. Θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις, ενώ για κάθε μέγεθος που θα εξετάζεται θα δωθούν διαφορετικές μορφές γραφικών στο excel με σκοπό να γίνει πλήρως κατανοητή η διαδικασία.

8.3.2 Πειραματικά αποτελέσματα με ενεργοποιημένο τον έλεγχο

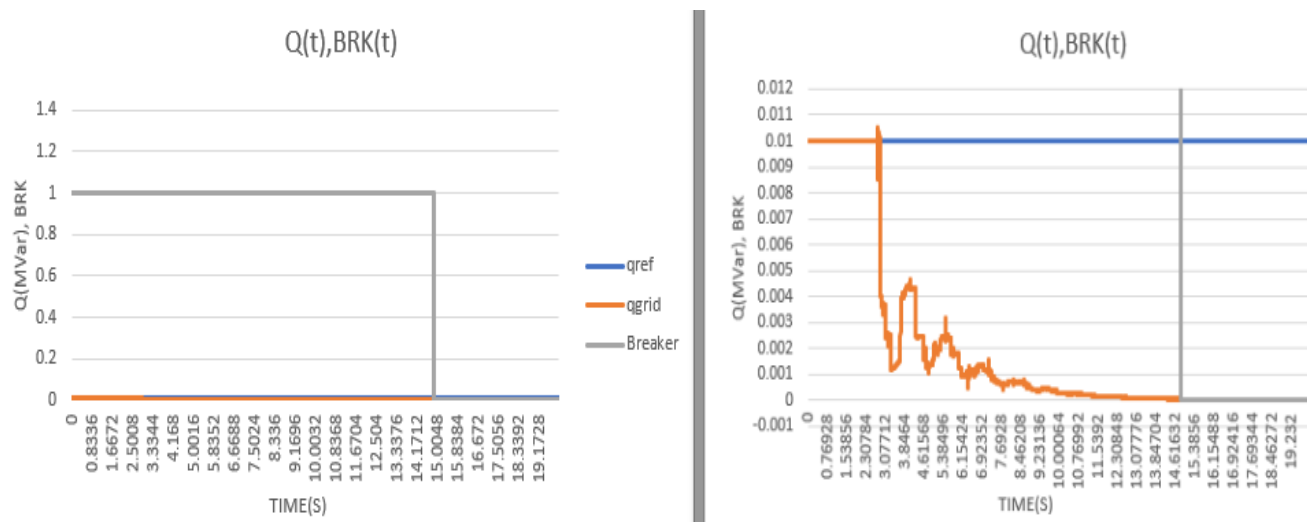
Αρχικά παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις με την συμμετοχή του ελέγχου στην ρύθμιση.



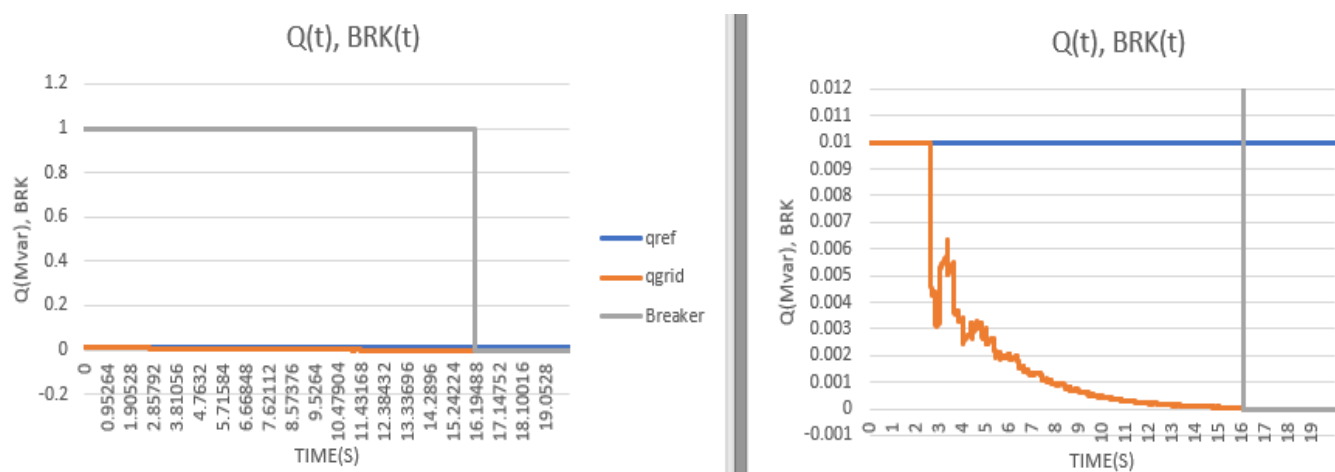
Εικόνα 8.5 : Ρύθμιση ενεργού ισχύος με έλεγχο και άνοιγμα διακόπτη (30%φ -55%π)



Εικόνα 8.6 : Ρύθμιση ενεργού ισχύος με έλεγχο και άνοιγμα διακόπτη (40%φ -100%π)



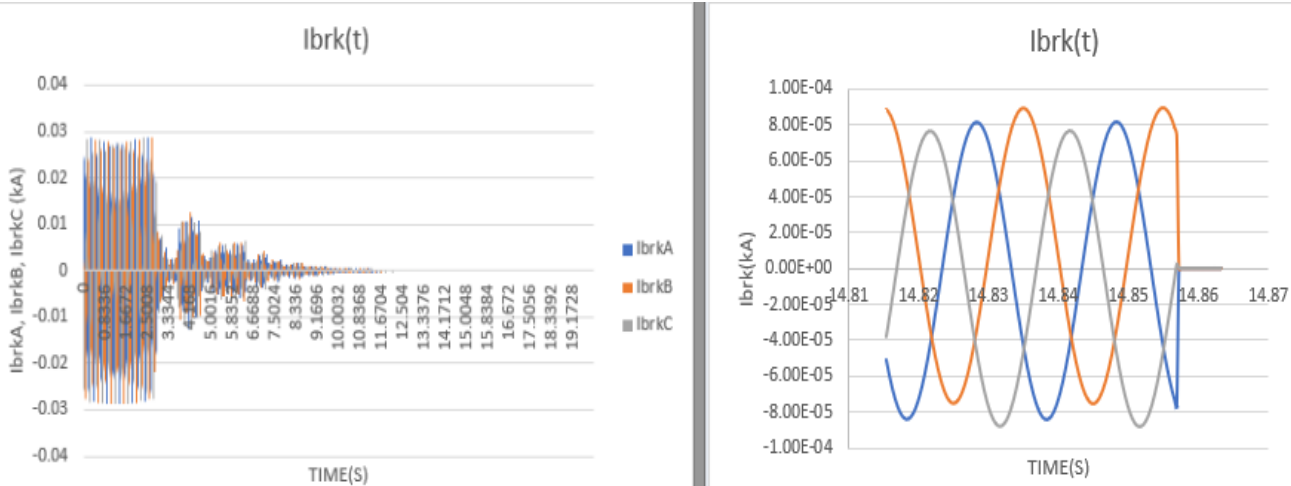
Εικόνα 8.7 : Ρύθμιση αέργου ισχύος με έλεγχο και άνοιγμα διακόπτη (30%φ -55%π)



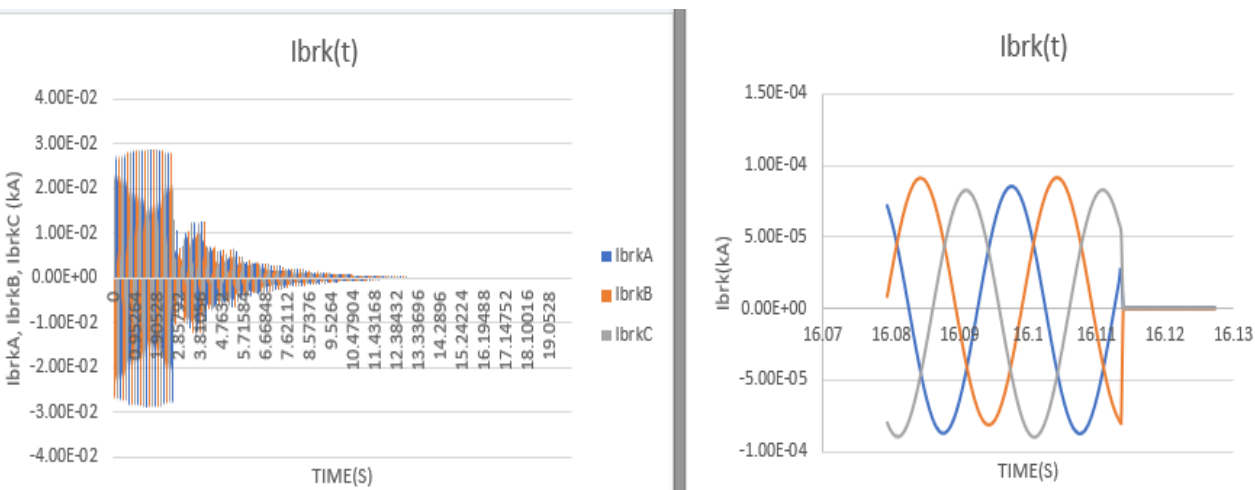
Εικόνα 8.8 : Ρύθμιση αέργου ισχύος με έλεγχο και άνοιγμα διακόπτη (40%φ -100%π)

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται το πως η ενεργός και η άεργος ισχύς στο ΡΟΙ (σημείο σύνδεσης δικτύου με μικροδίκτυο) πλησιάζουν το μηδέν και καταλήγουν τελικά σε αυτό. Τότε ανοίγει ο διακόπτης (γκρι χρώμα), δηλαδή από 1 παίρνει την τιμή 0 και το μικροδίκτυο έχει μεταβεί πλέον σε απομονωμένη λειτουργία. Στο αριστερό μέρος των εικόνων υπάρχει γραφική που εστιάζει στην χρονική στιγμή του ανοίγματος του διακόπτη, ενώ στο δεξιό μέρος εστιάζουμε στον σταδιακό μηδενισμό των P_{OUTB} , Q_{OUTB} .

Όσον αφορά τα ρεύματα του διακόπτη, ακολουθούν εικόνες έτσι ώστε να γίνει πλήρως αντιληπτή η κατάσταση τους κατά την μετάβαση.



Εικόνα 8.9 : Οι τρεις φάσεις του ρεύματος στον διακόπτη με έλεγχο (30%φ -55%π)



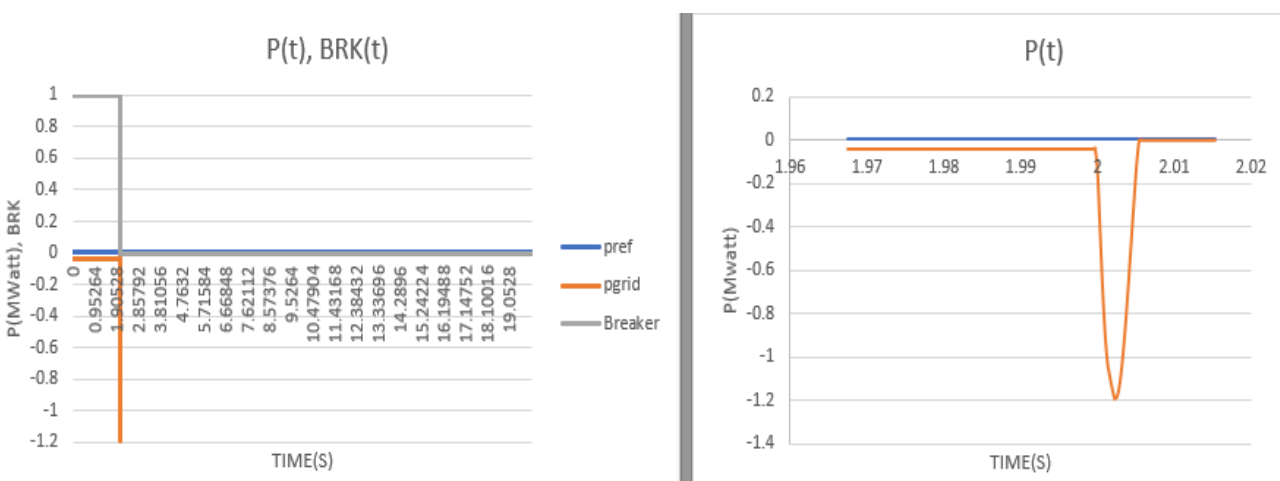
Εικόνα 8.10 : Οι τρεις φάσεις του ρεύματος στον διακόπτη με έλεγχο(40%φ -100%π)

Στις εικόνες 8.9, 8.10 απεικονίζονται οι τρεις φάσεις του ρεύματος του διακόπτη στο μικροδίκτυο. Όπως φαίνεται καθώς πλησιάζουμε στο άνοιγμα του διακόπτη και καθώς οι ισχύς πλησιάζουν στην μηδενική τιμή, το ρεύμα του διακόπτη προσεγγίζει και αυτό με την σειρά του το 0. Προφανώς όταν ανοίξει ο διακόπτης το ρεύμα αυτό έχει μηδενική τιμή. Στο δεξιό κομμάτι των εικόνων φαίνεται ότι το ρεύμα λίγο πριν ανοίξει ο διακόπτης λαμβάνει τιμές μικρότερες ή ίσες του 9×10^{-5} KA. Είναι φανερό το σημείο όπου ανοίγει ο διακόπτης καθώς όπως φαίνεται η γκρι γραμμή (γ φάση) όπως και οι άλλες (απλά υπερκαλύπτονται χρωματικά) σταθεροποιείται στο 0. Πρόκειται φυσικά για το ίδιο χρονικό σημείο που παρατηρείται το άνοιγμα του

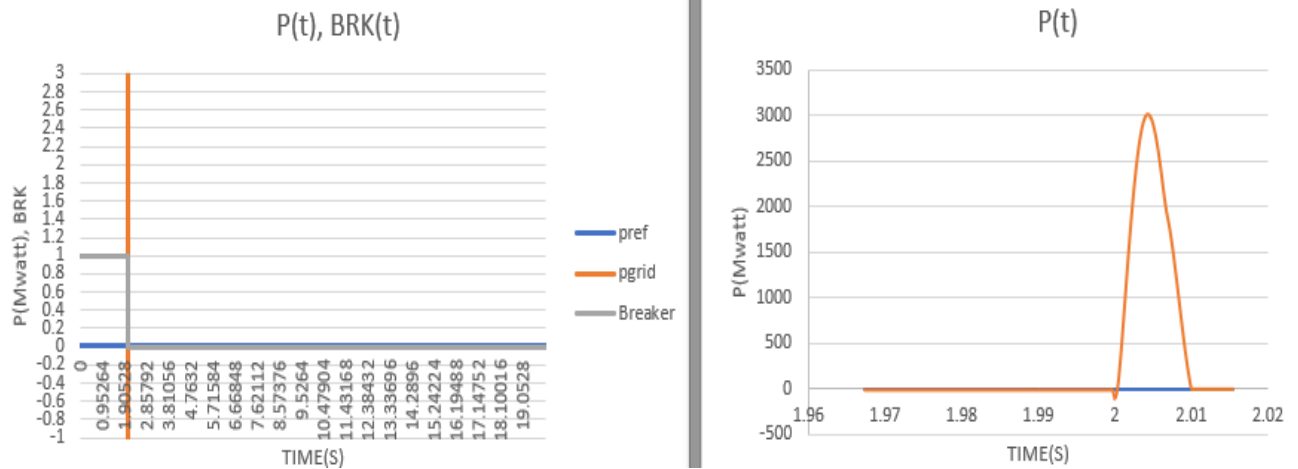
διακόπτη στις εικόνες 8.5-8.8 (διαφορετικό χρονικό σημείο ανάλογα αν είμαστε στην περίπτωση 30%φ-55%π ή 40%φ-100%π γιατί πρόκειται για ξεχωριστές προσομοιώσεις).

8.3.3 Πειραματικά αποτελέσματα χωρίς την βοήθεια ελέγχου

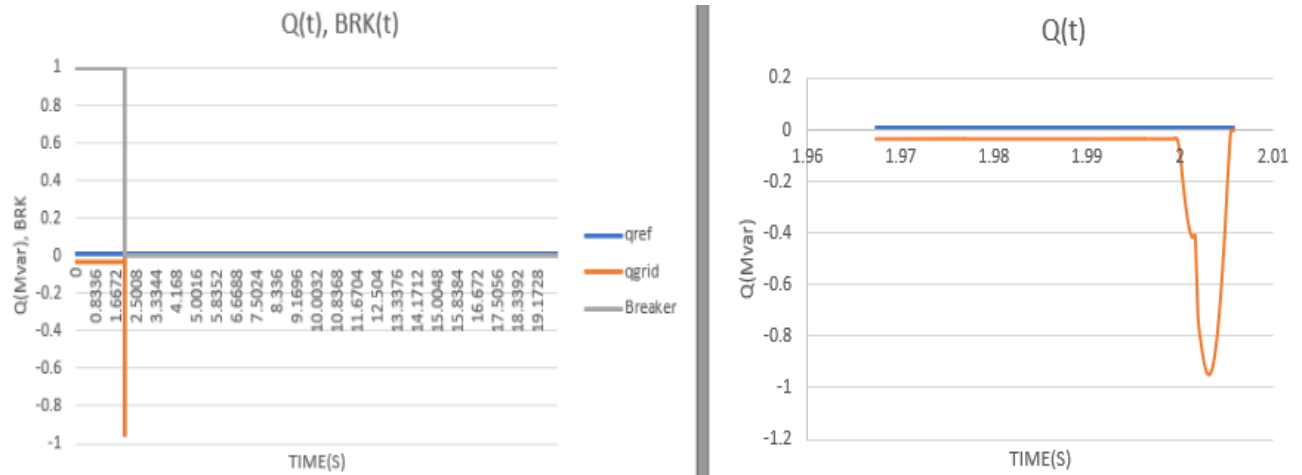
Αφού ολοκληρώθηκε η παρουσίαση των γραφικών παραστάσεων για την περίπτωση που είναι ενεργοποιημένος ο έλεγχος και βοηθάει στην ομαλή προσέγγιση της τιμής αναφοράς από την ρυθμιζόμενη μεταβλητή, θα παραθέσουμε γραφικές παραστάσεις, αντίστοιχες με τις παραπάνω, για τα ίδια μεγέθη αλλά με μια μεγάλη διαφοροποίηση. Εδώ δεν θα βάλουμε σε λειτουργία τον έλεγχο και τους ελεγκτές PI και θα ανοίξουμε χειροκίνητα μια χρονική στιγμή τον διακόπτη του μικροδικτύου. Ουσιαστικά η μετάβαση δεν θα ακολουθήσει τον έλεγχο – ρύθμιση των κατάλληλων μεταβλητών από τους ελεγκτές. Ακολουθούν οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις και για τις δύο ξεχωριστές περιπτώσεις με τα διαφορετικά ποσοστά παραγωγής-φορτίου.



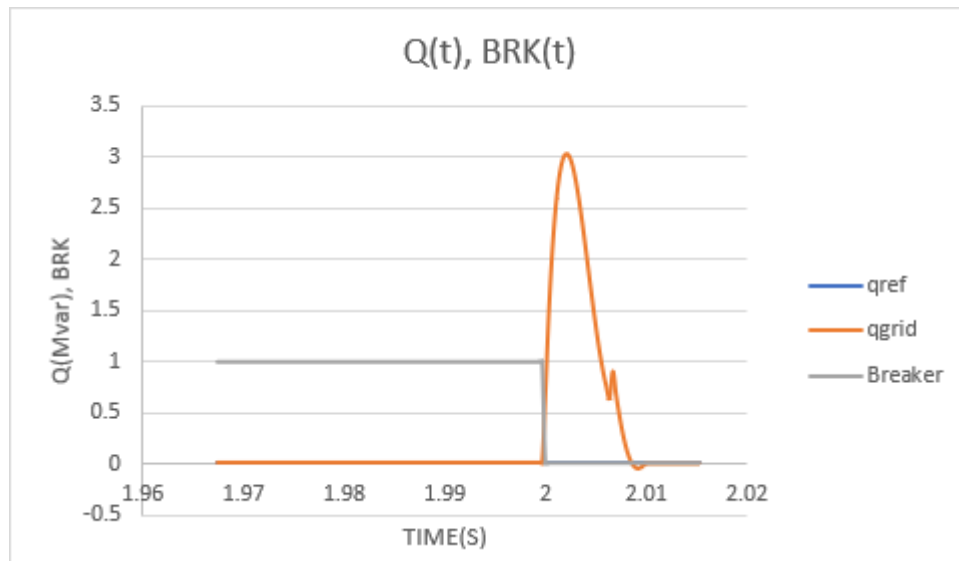
Εικόνα 8.11 : Ενεργός ισχύς χωρίς έλεγχο και άνοιγμα διακόπτη (30%φ -55%π)



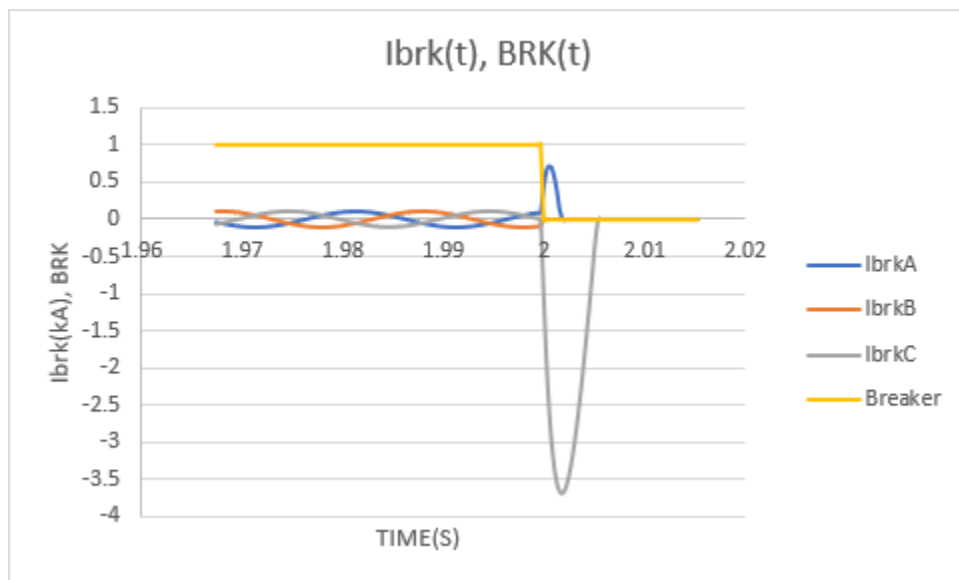
Εικόνα 8.12 : Ενεργός ισχύς χωρίς έλεγχο και άνοιγμα διακόπτη (40%φ -100%π)



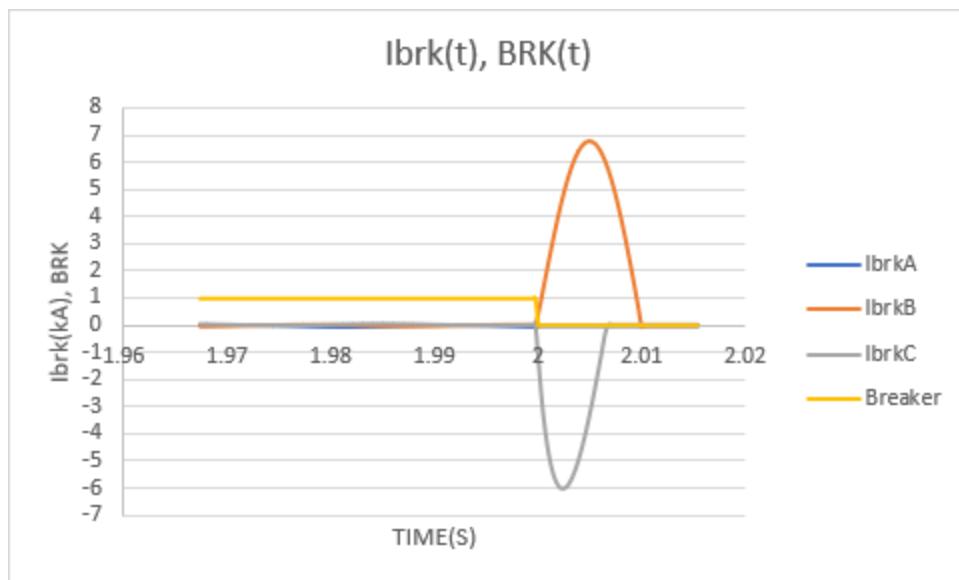
Εικόνα 8.13 : Άεργος ισχύς χωρίς έλεγχο και άνοιγμα διακόπτη (30%φ -55%π)



Εικόνα 8.14 : Άεργος ισχύς χωρίς έλεγχο και άνοιγμα διακόπτη (40%φ -100%π)



Εικόνα 8.15 : Οι τρεις φάσεις του ρεύματος στον διακόπτη χωρίς έλεγχο και άνοιγμα διακόπτη (30%φ -55%π)



Εικόνα 8.16 : Οι τρεις φάσεις του ρεύματος στον διακόπτη χωρίς έλεγχο και άνοιγμα διακόπτη (40%φ -100%π)

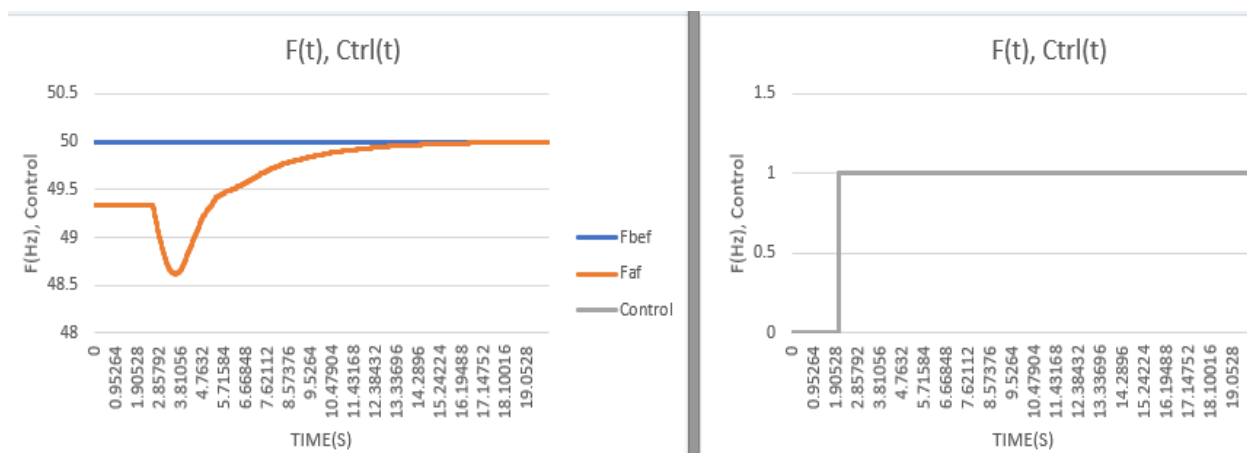
Με μια απλή ματιά στις γραφικές παραστάσεις που δεν υπάρχει συμμετοχή ελέγχου και το άνοιγμα του διακόπτη έγινε χειροκίνητα είναι ευδιάκριτη η μεγάλη διαφορά που υπάρχει σε σχέση με τις αντίστοιχες γραφικές που ήταν ενεργοποιημένος ο έλεγχος και ο διακόπτης άνοιξε αυτόματα. Με ενεργοποιημένο τον έλεγχο είχαμε σταδιακή προσέγγιση της μεταβλητής που έπρεπε να ρυθμίζουμε στην τιμή αναφοράς και μετέπειτα αφού είχαν ρυθμιστεί όλοι οι παράγοντες και υπήρχαν οι κατάλληλες προϋποθέσεις γίνονταν αυτόματο άνοιγμα του διακόπτη. Με αυτόν τον τρόπο δεν δημιουργήθηκαν μεγάλες αρμονικές και απότομες μεταβάσεις καθώς οι παράγοντες είχαν ρυθμιστεί μέσω των ελεγκτών PI πριν το άνοιγμα του διακόπτη.

Ωστόσο στην περίπτωση που ανοίξαμε χειροκίνητα τον διακόπτη χωρίς να έχει προηγηθεί ο κατάλληλος έλεγχος, παρατηρούμε πολύ μεγάλες αρμονικές που μπορούν να αποβούν καταστροφικές για την αρμονική λειτουργία του μικροδικτύου. Αρχικά όσον αφορά τις ισχύς βλέπουμε στις εικόνες 8.11-8.14 τις απότομες και μεγάλες αρμονικές που δημιουργούνται μετά το άνοιγμα του διακόπτη. Στην περίπτωση 30% φορτίο και 55% παραγωγή οι αρμονικές φτάνουν τα 1,2MWatt και 1MVar, ενώ στην περίπτωση 40% φορτίο και 100% παραγωγή τις βλέπουμε να φτάνουν σε πολύ υψηλότερα επίπεδα. Επιπλέον στα ρεύματα που μετράμε στον διακόπτη, σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση που είχαμε έλεγχο όπου πριν το άνοιγμα του διακόπτη είχαμε μέγιστο ρεύμα 9×10^{-5} KA, εδώ έχουμε 3,6KA και 6KA αντίστοιχα. Σίγουρα πρόκειται για μεγάλες τιμές ρεύματος στον διακόπτη οι οποίες είναι ικανές να δημιουργήσουν πρόβλημα στο μικροδίκτυο όσον αφορά προστασίες κτλπ.

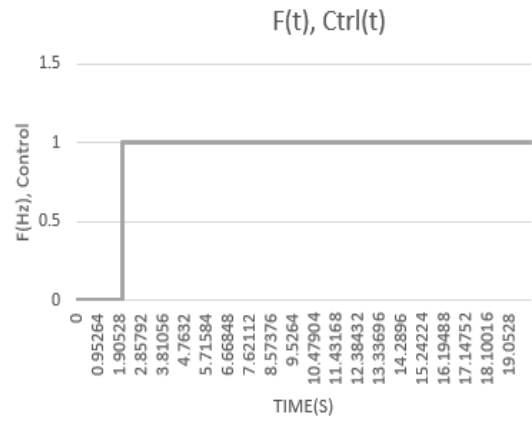
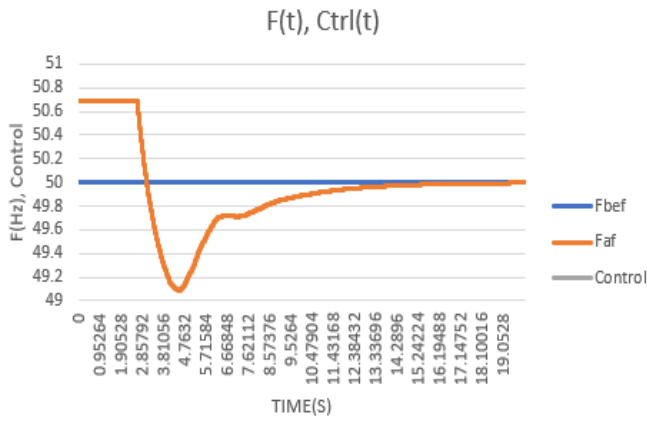
8.4 Αυτόνομη λειτουργία (steady state – islanded)

Όσον αφορά την αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου, θα επικεντρωθούμε στους ελεγκτές PI των εικόνων 7.11 και 7.13. Στην εικόνα 7.11 παρατίθεται ο ελεγκτής που ρυθμίζει το μέτρο της τάσης του μικροδικτύου (δεξιά του διακόπτη) δηλαδή το $V2_{pu}$ με σκοπό να ισορροπήσει με την τάση του δικτύου (αριστερά του διακόπτη) δηλαδή το $V1_{pu}$ και ειδικότερα 1 ανά μονάδα. Από την άλλη στην εικόνα 7.13 παρατίθεται ο ελεγκτής που ρυθμίζει την συχνότητα του μικροδικτύου ($F3$) έτσι ώστε να ισορροπήσει με την συχνότητα του δικτύου ($F5$) δηλαδή τα 50Hz.

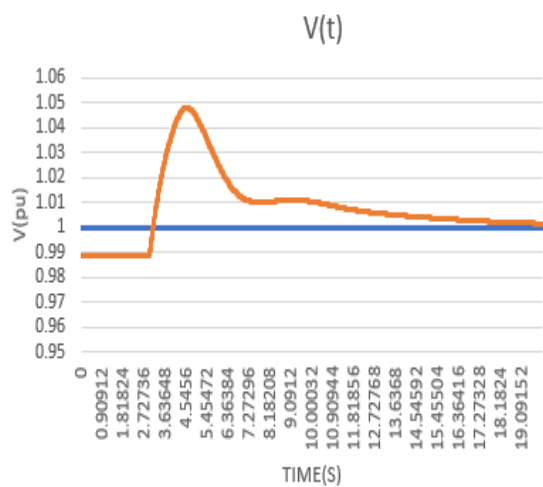
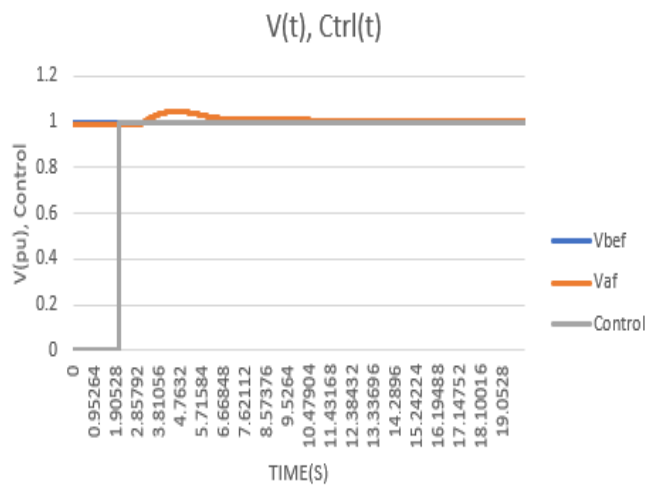
Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις φαίνονται τα πειραματικά μας αποτελέσματα και συγκεκριμένα ο τρόπος που φτάνει η τάση και η συχνότητα του μικροδικτύου τις τιμές αναφοράς. Επίσης παράλληλα φαίνεται και το σήμα με όνομα $Ctrl$ που συμβολίζει την ενεργοποίηση του ελέγχου. Όταν δηλαδή μεταβαίνει από 0 σε 1 σημαίνει ότι ενεργοποιήθηκε ο έλεγχος και ξεκίνησε η ρύθμιση των μεταβλητών. Να επισημανθεί ότι και εδώ εξετάσαμε σενάριο με 30% φορτίο και 55% παραγωγή αλλά και σενάριο με την μέγιστη παραγωγή και αυξημένο ποσοστό φορτίου δηλαδή 40% φορτίο και 100% παραγωγή.



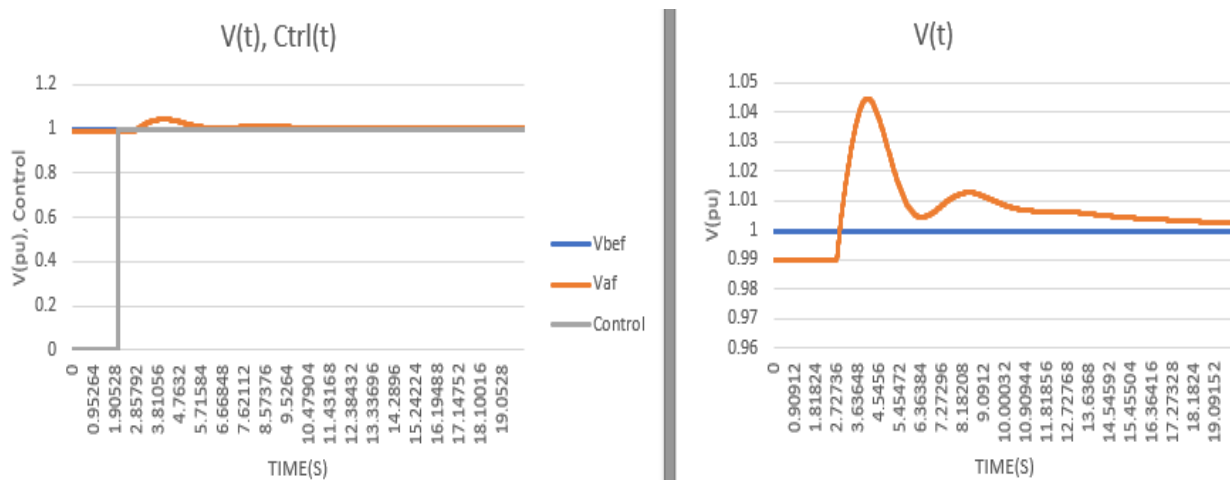
Εικόνα 8.17: Ενεργοποίηση ελέγχου και ρύθμιση συχνότητας (30%φ-55%π)



Εικόνα 8.18 : Ενεργοποίηση ελέγχου και ρύθμιση συχνότητας (40%φ-100%π)



Εικόνα 8.19 : Ενεργοποίηση ελέγχου και ρύθμιση τάσης (30%φ-55%π)



Εικόνα 8.20 : Ενεργοποίηση ελέγχου και ρύθμιση τάσης (40%φ-100%π)

Τα σήματα τάσης και συχνότητας που ακολουθούνται από bef (μπλε χρώμα) είναι τα σήματα πριν τον διακόπτη του μικροδικτύου, δηλαδή τα σήματα του δικτύου. Από την άλλη τα αντίστοιχα που ακολουθούνται από af (πορτοκαλί χρώμα) είναι τα σήματα μετά τον διακόπτη δηλαδή πρόκειται για τα σήματα του μικροδικτύου που επιχειρούμε να ρυθμίσουμε. Όπως βλέπουμε στις παραπάνω γραφικές όταν ενεργοποιηθεί ο έλεγχος, τόσο η τάση όσο και η συχνότητα έχουν μια μεγάλη αρμονική και μετά προσεγγίζουν σταδιακά την τιμή αναφοράς. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ενεργοποίηση του ελέγχου και στην λειτουργία των ελεγκτών PI και δεν θα πρέπει να μας προβληματίσει.

8.5 Μετάβαση από αυτόνομη λειτουργία σε λειτουργία συνδεδεμένη στο δίκτυο (transition – islanded to grid connected)

8.5.1 Εισαγωγή στις προσομοιώσεις της μετάβασης σε λειτουργία συνδεδεμένη στο δίκτυο

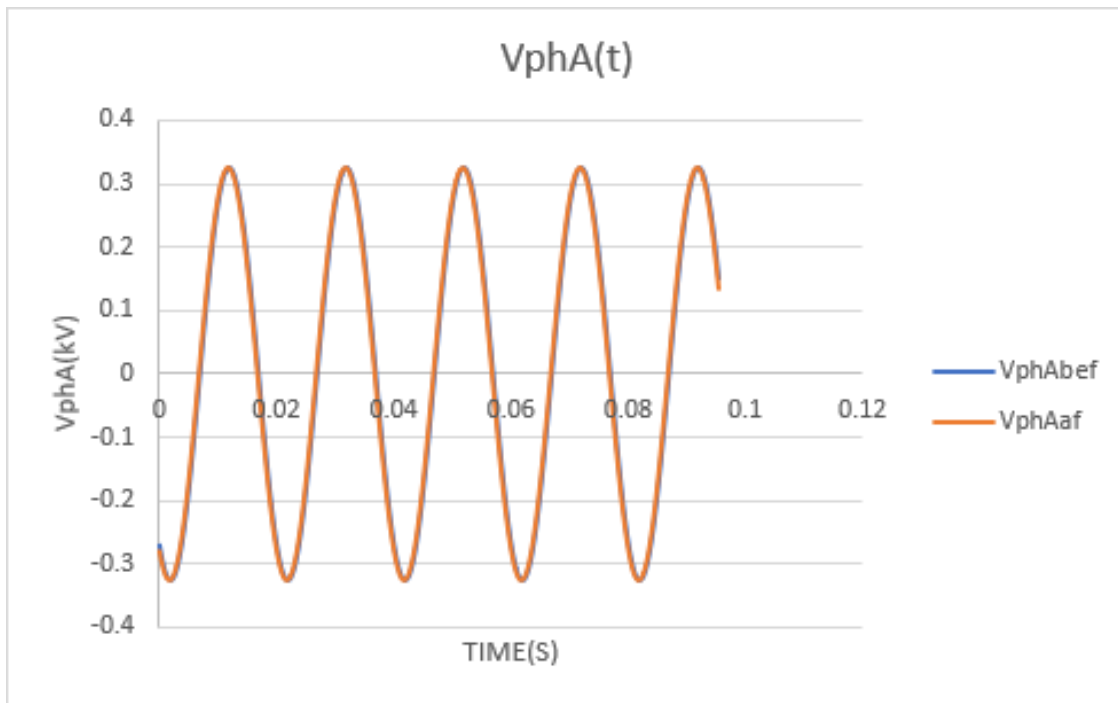
Τέλος θα εξετάσουμε τα πειραματικά μας αποτελέσματα στην περίπτωση που το μικροδίκτυο μεταβαίνει από αυτόνομη λειτουργία σε λειτουργία συνδεδεμένη στο δίκτυο, δηλαδή στην περίπτωση της επανασύνδεσης. Όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο θα πρέπει μέσω της δράσης των ελεγκτών PI να ικανοποιηθούν κάποιες προϋποθέσεις έτσι

ώστε να μπορεί το μικροδίκτυο να επανασυνδεθεί ομαλά στο δίκτυο. Συγκεκριμένα εκτός από την ισορροπία στο μέτρο της τάσης και της συχνότητας, τα οποία παρουσιάστηκαν εν μέρη και στην ενότητα 8.4, θα πρέπει να υπάρχει και μηδενική διαφορά φάσης (όλα αυτά για τα μεγέθη πριν και μετά τον διακόπτη). Οι ελεγκτές που είναι υπεύθυνοι για αυτές τις ρυθμίσεις απεικονίζονται στις εικόνες 7.11, 7.13, 7.15.

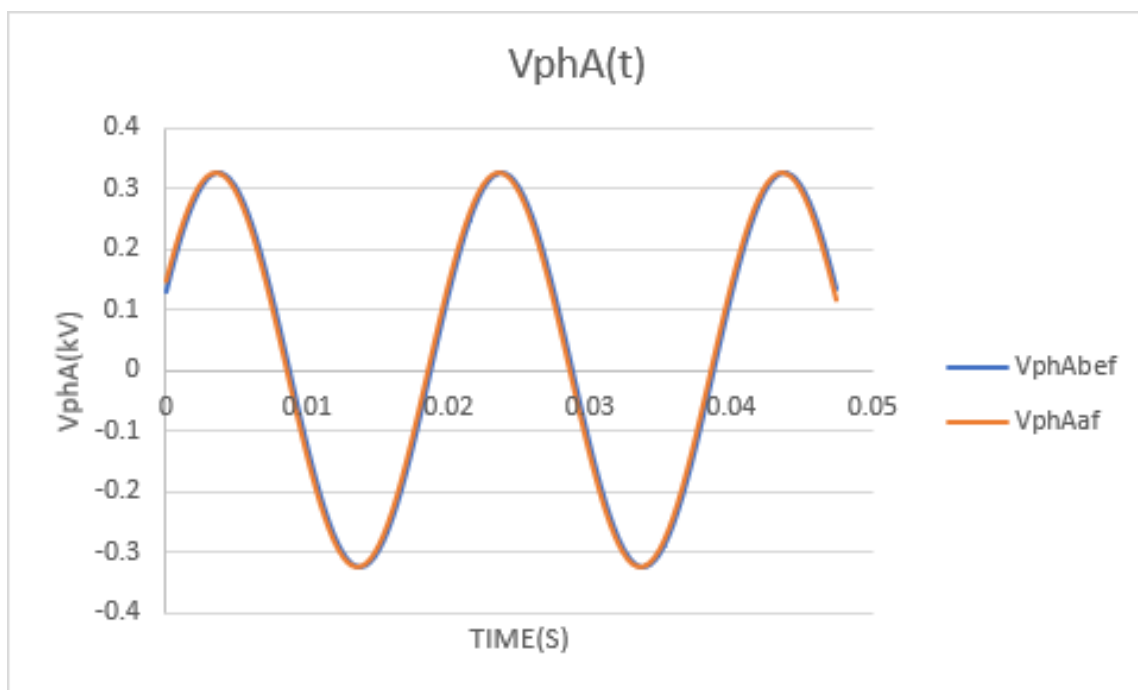
Οι γραφικές παραστάσεις που θα παρουσιαστούν θα στηρίζονται σε σενάρια με δύο ποσοστά όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις, σε σενάριο 30% φορτίο–55% παραγωγή και σε σενάριο 40% φορτίο–100% παραγωγή. Θα ακολουθήσουν γραφικές παράστασεις που θα παρουσιάζουν την συμφωνία των φάσεων έπειτα από τον έλεγχο, γραφικές παραστάσεις που θα απεικονίζουν την ρύθμιση του μέτρου της τάσης και της συχνότητας σε συνδυασμό με το κλείσιμο του διακόπτη αλλά και γραφικές παραστάσεις με τα ρεύματα στον διακόπτη κατά την διάρκεια της μετάβασης. Όπως έγινε και στην πρώτη μετάβαση που εξετάστηκε, έτσι και εδώ θα παραθέσουμε γραφικές παραστάσεις με τα πειραματικά μας αποτελέσματα και στην περίπτωση που ο έλεγχος δεν είχε ενεργοποιηθεί και κλείναμε χειροκίνητα τον διακόπτη. Έτσι θα μπορέσει να γίνει σύγκριση μεταξύ των περιπτώσεων και να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα που θα καταδεικνύουν την σημασία του ελέγχου στο μικροδίκτυο.

8.5.2 Πειραματικά αποτελέσματα με ενεργοποιημένο τον έλεγχο

Αρχικά παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στις οποίες συμμετείχε ο έλεγχος.

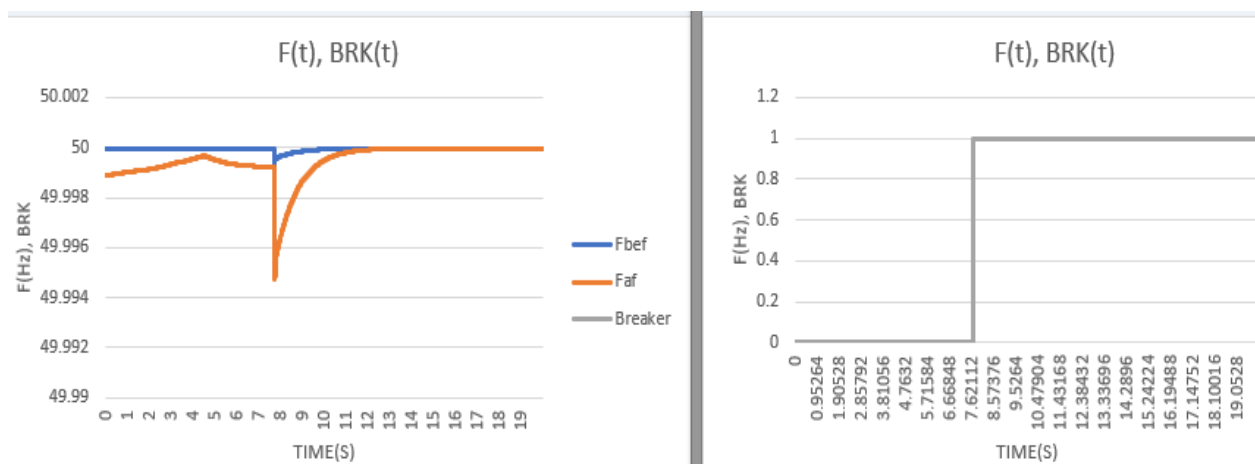


Εικόνα 8.21 : Α φάση τάσεων πριν και μετά τον διακόπτη με έλεγχο (30%φ – 55%π)

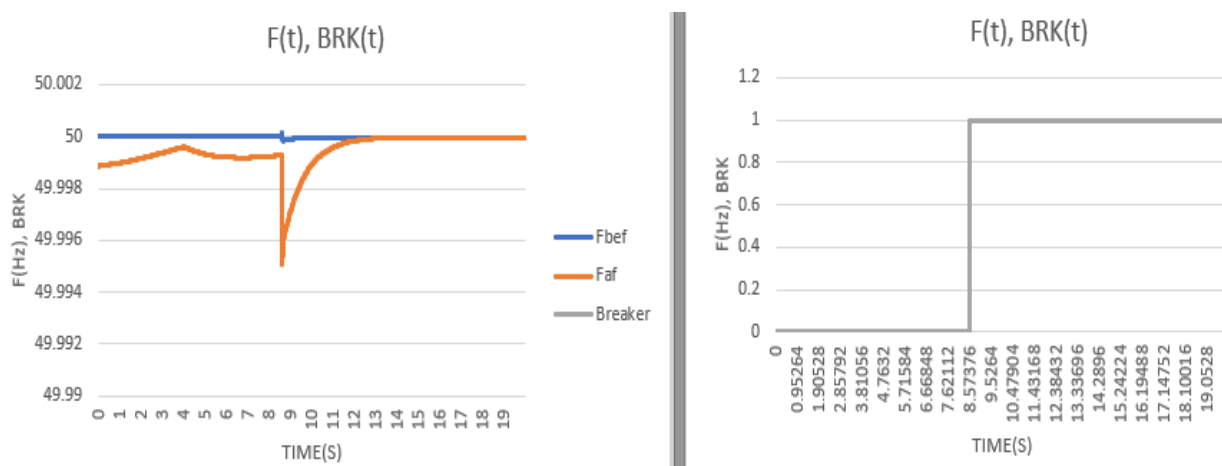


Εικόνα 8.22 : Α φάση τάσεων πριν και μετά τον διακόπτη με έλεγχο (40%φ – 100%π)

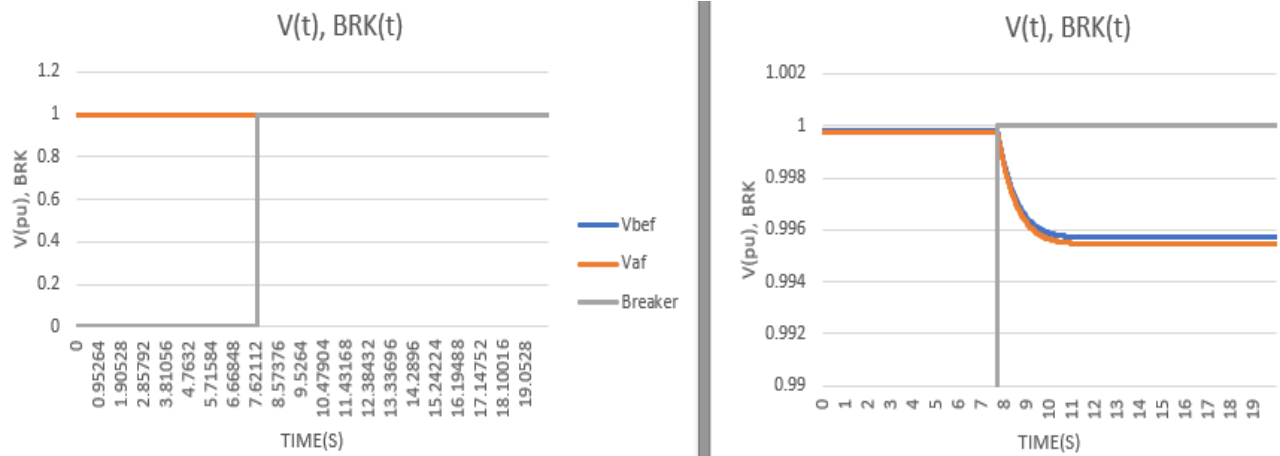
Όπως φαίνεται υπάρχει απόλυτη αρμονία της Α φάσης των τάσεων πριν και μετά τον διακόπτη, έπειτα από την διεξαγωγή του ελέγχου. Προφανώς το ίδιο ισχύει και για τις άλλες δύο φάσεις. Οι δύο γραφικές σχεδόν ταυτίζονται όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στις εικόνες 8.21 και 8.22. Με μπλε χρώμα η γραφική της Α φάσης της τάσης πριν τον διακόπτη, ενώ με πορτοκαλί η αντίστοιχη της τάσης μετά τον διακόπτη.



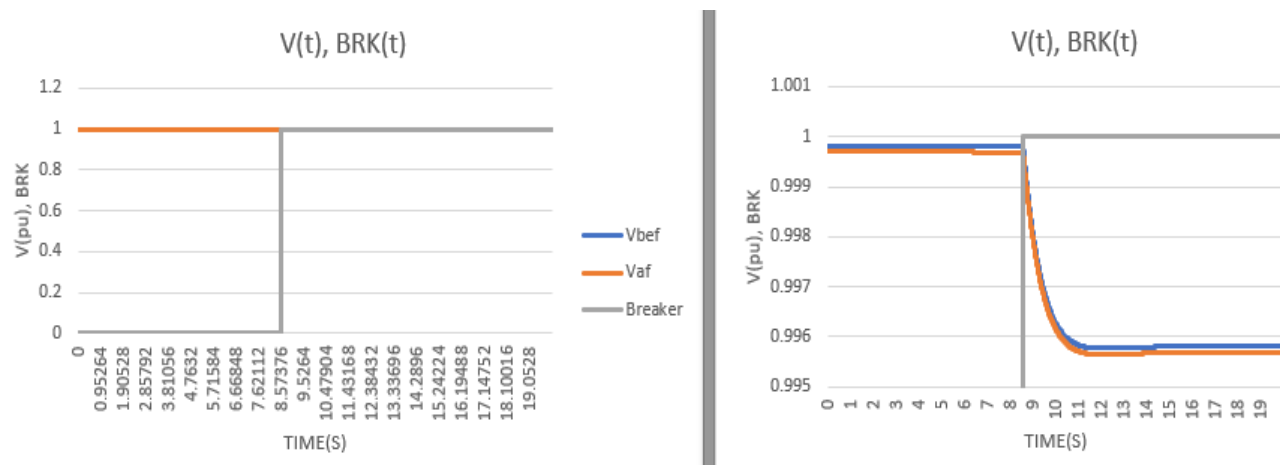
Εικόνα 8.23 : Ρύθμιση συχνότητας με έλεγχο και κλείσιμο διακόπτη (30%φ-55%π)



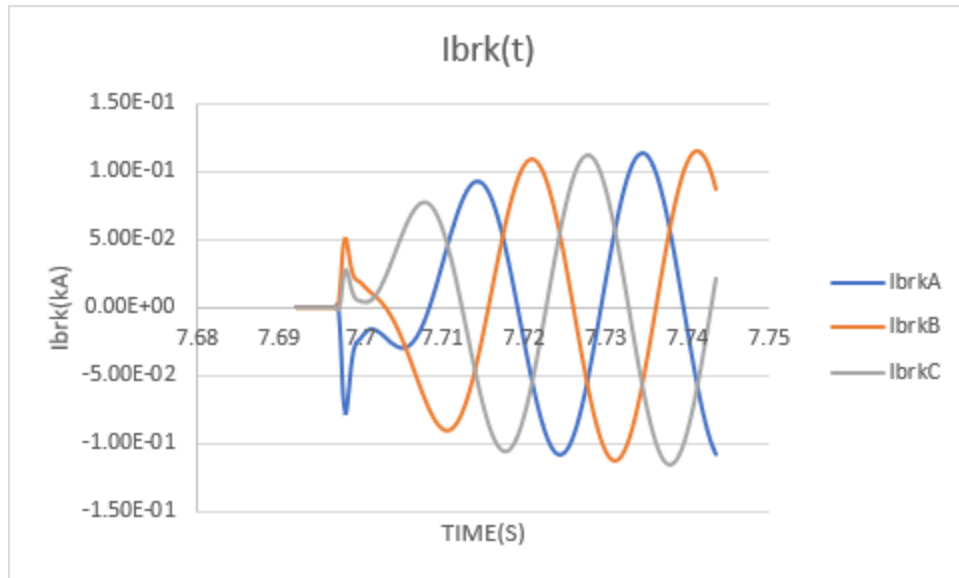
Εικόνα 8.24 : Ρύθμιση συχνότητας με έλεγχο και κλείσιμο διακόπτη (40%φ-100%π)



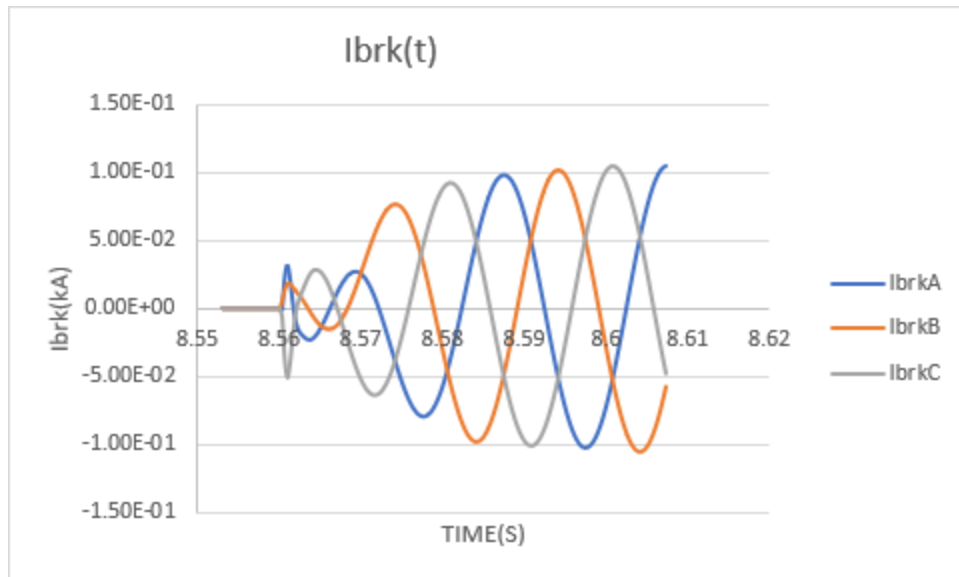
Εικόνα 8.25: Ρύθμιση τάσης με έλεγχο και κλείσιμο διακόπτη (30%φ-55%π)



Εικόνα 8.26: Ρύθμιση τάσης με έλεγχο και κλείσιμο διακόπτη (40%φ-100%π)



Εικόνα 8.27 : Οι τρεις φάσεις του ρεύματος στον διακόπτη με έλεγχο και κλείσιμο διακόπτη (30%φ -55%π)



Εικόνα 8.28 : Οι τρεις φάσεις του ρεύματος στον διακόπτη με έλεγχο και κλείσιμο διακόπτη (40%φ -100%π)

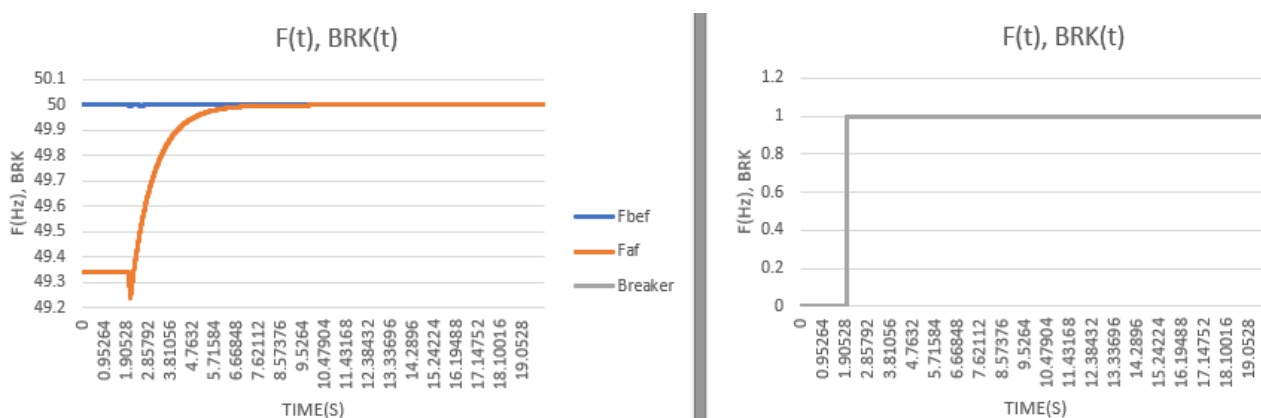
Αρχικά όσον αφορά τα μέτρα των τάσεων και τις συχνότητες έχουν τοποθετηθεί σε κοινό άξονα με την κατάσταση του διακόπτη του μικροδικτύου έτσι ώστε να γίνει πλήρως κατανοητή η πορεία τους. Όπως φαίνεται με το κλείσιμο του διακόπτη, δηλαδή όταν ο

διακόπτης παίρνει την τιμή 1, τα μέτρα των τάσεων και οι συχνότητες ισορροπούν με τις τιμές αναφοράς τους από το δίκτυο καθώς πλέον το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο οπότε υπάρχουν κοινές τιμές για τα παραπάνω μεγέθη.

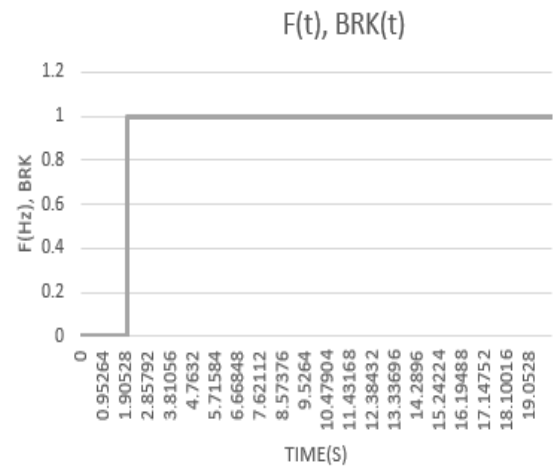
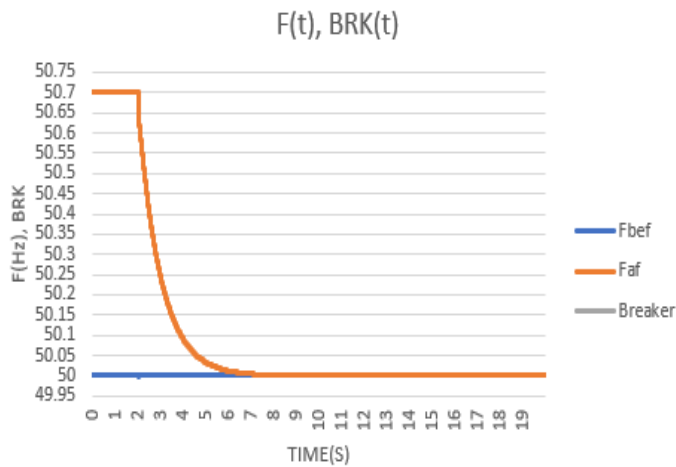
Από την άλλη όσον αφορά το ρεύμα στον διακόπτη βλέπουμε ότι ενώ αρχικά είναι μηδενικό καθώς δεν υπάρχει ροή ρεύματος στο ΡΟΙ όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί απομονωμένα, την στιγμή που κλείνει ο διακόπτης (δεν φαίνεται στις γραφικές αλλά είναι η ίδια χρονική στιγμή που φαίνεται στις γραφικές των τάσεων και των συχνοτήτων) αποκτά τιμή αφού πλέον αρχίζει η αλληλεπίδραση του μικροδικτύου με το δίκτυο.

8.5.3 Πειραματικά αποτελέσματα χωρίς την βοήθεια ελέγχου

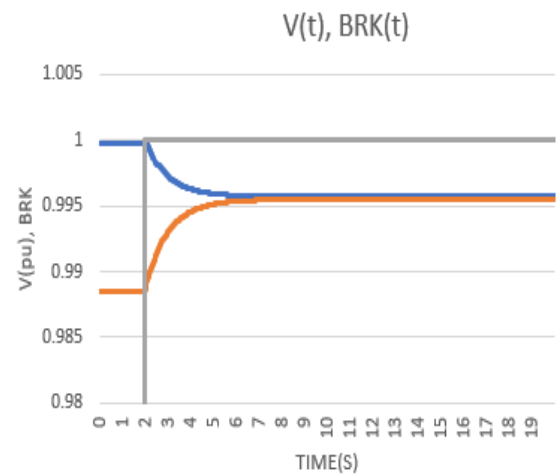
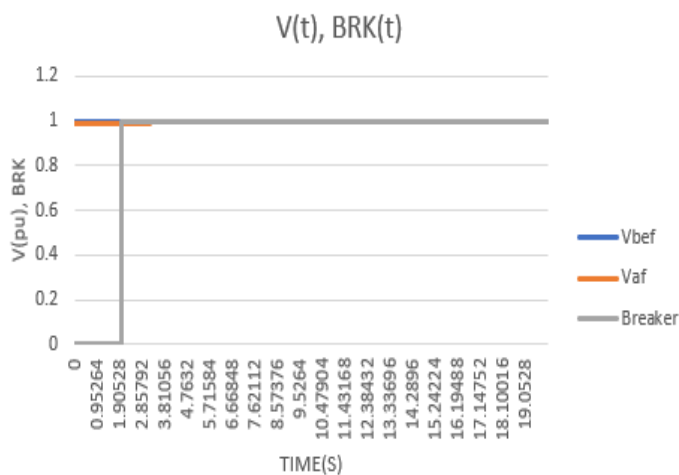
Τώρα θα εξετάσουμε τις γραφικές παραστάσεις για τις τάσεις, τις συχνότητες αλλά και τα ρεύματα στον διακόπτη χωρίς να έχουμε χρησιμοποιήσει την βοήθεια του ελέγχου και των ελεγκτών PI για την επανασύνδεση του μικροδικτύου. Η μετάβαση θα πραγματοποιηθεί αφού κλείσουμε κάποια χρονική στιγμή χειροκίνητα τον διακόπτη.



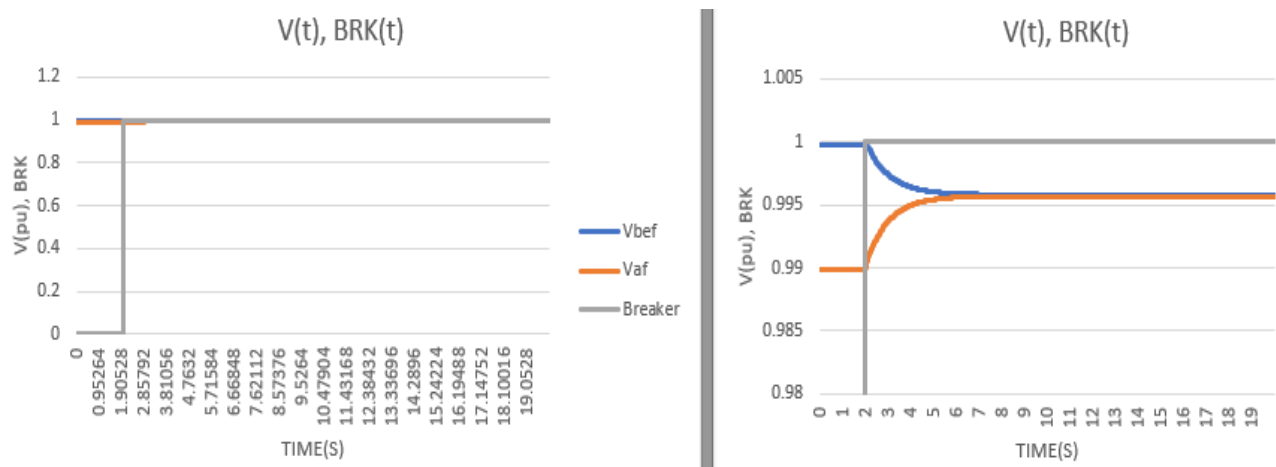
Εικόνα 8.29 : Συχνότητα χωρίς έλεγχο και κλείσιμο διακόπτη (30%-55%π)



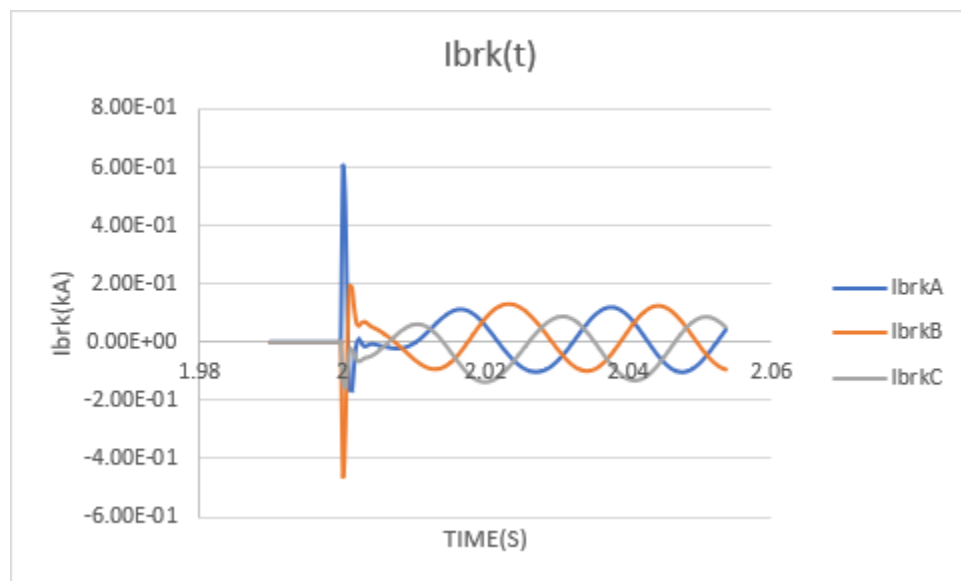
Εικόνα 8.30 : Συχνότητα χωρίς έλεγχο και κλείσιμο διακόπτη (40%φ-100%π)



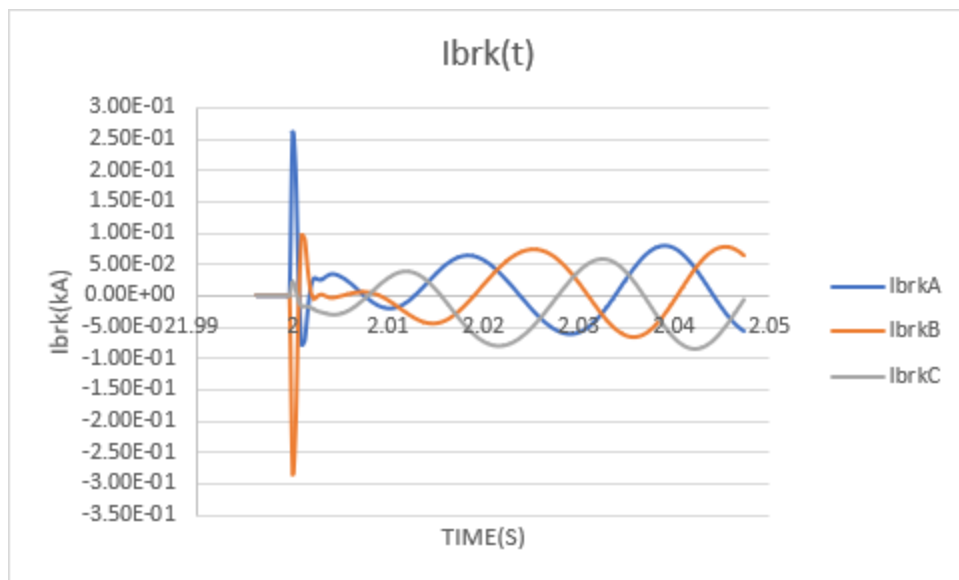
Εικόνα 8.31 : Τάση χωρίς έλεγχο και κλείσιμο διακόπτη (30%φ-55%π)



Εικόνα 8.32 : Τάση χωρίς έλεγχο και κλείσιμο διακόπτη (40%φ-100%π)



Εικόνα 8.33 : Οι τρεις φάσεις του ρεύματος στον διακόπτη χωρίς έλεγχο και κλείσιμο διακόπτη (30%φ -55%π)



Εικόνα 8.34 : Οι τρεις φάσεις του ρεύματος στον διακόπτη χωρίς έλεγχο και κλείσιμο διακόπτη (40%φ -100%π)

Όσον αφορά τις γραφικές παραστάσεις των τάσεων και των συχνοτήτων μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι χωρίς τον έλεγχο αναπόφευκτα παρατηρείται μια σημαντική απότομη μεταβολή της τιμής δεξιά του διακόπτη (είτε τάση είτε συχνότητα) έτσι ώστε να έρθει στην τιμή του δικτύου. Αυτό το γεγονός προφανώς μπορούμε να το αποφύγουμε μέσω του ελέγχου όπου προετοιμάζονται οι συνθήκες κατάλληλα και μετά κλείνει αυτόματα ο διακόπτης και γλυτώνουμε έτσι απότομες μεταβολές.

Από την άλλη όσον αφορά τα ρεύματα στον διακόπτη, πρέπει να τονίσουμε ότι χωρίς τον έλεγχο παρατηρούμε αρκετά υψηλότερες τιμές ρεύματος καθώς κλείνουμε τον διακόπτη γεγονός που μπορεί να αποβεί βλαβερό για το μικροδίκτυο. Συγκεκριμένα σε σύγκριση με την περίπτωση που έχει προηγηθεί έλεγχος, παρατηρούμε στο ένα σενάριο τριπλάσιο και στο άλλο σχεδόν εξαπλάσιο ρεύμα (αναφερόμαστε στις αρχικές τιμές που λαμβάνει το ρεύμα καθώς κλείνει ο διακόπτης).

8.6 Συμπεράσματα-Προεκτάσεις

Κλείνοντας, θα σταθούμε στην σημασία του ελέγχου στο μικροδίκτυο και θα υπερτονίσουμε τις διαφορές που παρατηρήθηκαν σε σχέση με τα πειραματικά μας αποτελέσματα που δεν είχαμε ενεργοποιημένο τον έλεγχο και εκτελούσαμε μετάβαση χειροκίνητα.

Αρχικά, όπως επισημάνθηκε και στο θεωρητικό μέρος της διπλωματικής ο έλεγχος στο μικροδίκτυο διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην ρύθμιση της ροής ισχύος μεταξύ του δικτύου και του μικροδικτύου με την ταυτόχρονη ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας. Έτσι παρέχεται ισχύς υψηλής ποιότητας στο μικροδίκτυο καθώς οι οποιαδήποτε αποκλίσεις τάσης και συχνότητας από τις ονομαστικές τιμές εξαλείφονται. Επιπλέον μέσω του ελέγχου επιτυγχάνεται σωστή κατανομή ενεργούς και αέργου ισχύος μεταξύ των μονάδων παραγωγής όποτε και ισοκατανομή στην κάλυψη των φορτίων. Έτσι διατηρείται η ισορροπία και η ομαλή λειτουργία του μικροδικτύου.

Επιπλέον τα πειραματικά μας αποτελέσματα, η μετέπειτα επεξεργασία τους σε γραφικές παραστάσεις μας και η σύγκριση μεταξύ των περιπτώσεων μετάβασης που λειτουργούσε ο έλεγχος και αυτών που ήταν απενεργοποιημένος μας οδήγησαν και σε κάποιες ακόμα διαπιστώσεις. Όπως είδαμε στις περιπτώσεις των μεταβάσεων που λειτουργούσε ο έλεγχος, όλα τα φυσικά μεγέθη του μικροδικτύου (τάση, συχνότητα, ροή ισχύος από το δίκτυο, φάση) ρυθμιζόντουσαν κατάλληλα προτού γίνει το άνοιγμα ή το κλείσιμο του διακόπτη με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ομαλή σύνδεση και αποσύνδεση του μικροδικτύου από το δίκτυο χωρίς να κλονίζεται η ευστάθεια του συστήματος και διατηρώντας τα επίπεδα της εισαγόμενης ισχύος από το μικροδίκτυο εντός των συμφωνηθέντων τιμών. Αντίθετα, στις περιπτώσεις που είχαμε απενεργοποιημένο τον έλεγχο και προχωρούσαμε σε μετάβαση ανοίγοντας ή κλείνοντας χειροκίνητα τον διακόπτη του μικροδικτύου λαμβάναμε αποτελέσματα που ενέχουν κινδύνους για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Στις περιπτώσεις αυτές το απότομο άνοιγμα ή κλείσιμο του διακόπτη είχε ως επακόλουθο την εμφάνιση υψηλών τιμών ρευμάτων και ισχύος στο σημείο σύνδεσης (POI) που μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα σε ευαίσθητες συσκευές του μικροδικτύου, να οδηγήσουν σε σπατάληση ενέργειας, σε κακή ποιότητα ισχύος αλλά και γενικότερα να απειλήσουν την ευστάθεια και την εύρυθμη λειτουργία του μικροδικτύου.

Όσον αφορά πιθανές μελλοντικές προεκτάσεις του θέματος, αναμφισβήτητα μια από αυτές αποτελεί η δοκιμή του ελεγκτή στο πραγματικό μικροδίκτυο του εργαστηρίου. Συγκεκριμένα το εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Μετσόβιου Πολυτεχνείου διαθέτει μικροδίκτυο που αποτελείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια, μικρή ανεμογεννήτρια, μπαταρίες, ελεγχόμενα φορτία και ελεγχόμενη διασύνδεση με το τοπικό δίκτυο χαμηλής τάσης. Θα μπορούσε να αποτελέσει λοιπόν μελλοντικό θέμα η δοκιμή του κεντρικού ελεγκτή στο υπάρχον μικροδίκτυο, πετυχαίνοντας έτσι απολύτως ρεαλιστικές συνθήκες.

Επιπλέον ακόμα μια επέκταση της διπλωματικής θα μπορούσε να είναι η επίτευξη αυτοματοποιημένης δοκιμής του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την δημιουργία ενός script στο RSCAD που θα εκτελεί όλες τις

απαραίτητες δοκιμές σε όλες τις πιθανές καταστάσεις του μικροδικτύου με αυτοματοποιημένο τρόπο. Επιπρόσθετα μελλοντικός στόχος είναι η υλοποίηση πιο πολύπλοκων σχημάτων ελέγχου και η προσομοίωση πολυπλοκότερων συστημάτων με απαίτηση για πολύ μικρό χρονικό βήμα ή ρυθμό δειγματοληψίας και παράλληλα υψηλότερη υπολογιστική δύναμη.

Τέλος είναι επιθυμητό να μελετηθεί βέλτιστος τρόπος, που θα βασίζεται σε κριτήρια οικονομικής λειτουργίας, για την ταχύτερη μετάβαση του μικροδικτύου είτε σε αυτόνομη λειτουργία είτε σε επανασύνδεση. Επίσης είναι ιδιαίτερα σημαντική η ανάπτυξη περισσότερων προτύπων με θέματα την ομαλή λειτουργία, την ασφάλεια αλλά και την συμμετοχή των μικροδικτύων στις αγορές, γεγονός που θα οδηγήσει στην προώθηση και εξέλιξη τους.

Συμπερασματικά, ο εκτεταμένος έλεγχος στο μικροδίκτυο είναι απαραίτητος για την ομαλή λειτουργία του και για την εκμετάλλευση όλων των πλεονεκτημάτων του. Η εξέλιξη και η βελτίωση στις μεθόδους ελέγχου αποτελεί το κλειδί για την μελλοντική εξάπλωση της ιδέας του μικροδικτύου ως κυρίαρχο ενεργειακό σύστημα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Hussain, Akhtar & Bui, Van-Hai & Kim, Hak-Man. (2019). Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience. *Applied Energy*. 240. 56-72. 10.1016/j.apenergy.2019.02.055.
2. Χαραλαμπίδης, Ντίνος. (2019). Βασικές αρχές μικροδικτύων και η συμβολή τους στην αποτελεσματική διαχείριση των τοπικών ενεργειακών πόρων. University of Cyprus.
3. Eigg goes green. [Online]. (2010). https://ec.europa.eu/regional_policy/en/projects/united-kingdom/eigg-goes-green.
4. Papathanassiou, Stavros & Hatziargyriou, Nikos & Strunz, K.. (2005). A Benchmark Low Voltage Microgrid Network. CIGRE Symposium.
5. "IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers," in *IEEE Std 2030.7-2017*, vol., no., pp.1-43, 23 April 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8340204.
6. "IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers," in *IEEE Std 2030.8-2018*, vol., no., pp.1-42, 24 Aug. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8444947.
7. Λιναρδοπούλου, Ανδριάννα. (2019). Δευτερεύοντας έλεγχος στατισμού μικροδικτύου. Διπλωματική Εργασία. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών. Πανεπιστήμιο Πατρών.
8. F. Gao, R. Kang, J. Cao and T. Yang, "Primary and secondary control in DC microgrids: a review," in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 227-242, March 2019, doi: 10.1007/s40565-018-0466-5.
9. Y. Khayat *et al.*, "On the Secondary Control Architectures of AC Microgrids: An Overview," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 6, pp. 6482-6500, June 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2951694.
10. Bélanger, Jean & Venne, P. & Paquin, Jean-Nicolas. (2010). The what, where, and why of real-time simulation. *Planet RT*. 37-49.

11. Wineman Technology Blog. [Online] <https://www.genuen.com/blog/what-is-hardware-in-the-loop-hil-testing>.
12. Abourida, Simon & Dufour, Christian & Bélanger, Jean. (2022). Real-Time and Hardware-In-The-Loop Simulation of Electric Drives and Power Electronics: Process, problems and solutions.
13. Kotsampopoulos, Panos & Kleftakis, Vasilis & Messinis, Georgios & Hatziaargyriou, Nikos. (2012). Design, Development and Operation of a PHIL Environment for Distributed Energy Resources. 10.1109/IECON.2012.6389005.
14. RTDS Hardware Manual. (2009).
15. ACSELERATOR RTAC, Instruction Manual.
16. ACSELERATOR RTAC, Programming Reference. (2018).