



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

**Αξιοπιστία και Ασφάλεια Λειτουργίας των Δικτύων
Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Υψηλή Διείδυση
Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας χρησιμοποιώντας Ευφυές
Σύστημα Διαχείρισης Μικροδικτύων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημήτριος Ζ. Στημονιάρης

Αθήνα, Απρίλιος 2016



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημητρίου Στημονιάρη

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού του Α.Π.Θ.

**«Αξιοπιστία και Ασφάλεια Λειτουργίας των Δικτύων Διανομής
Ηλεκτρικής Ενέργειας με Υψηλή Διείδυση Ανανεώσιμων
Πηγών Ενέργειας χρησιμοποιώντας Ευφυές Σύστημα
Διαχείρισης Μικροδικτύων»**

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Ευάγγελος Διαλυνάς, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Κορρές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Παύλος Γεωργιλιάκης, Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή στις 22 Απριλίου 2016

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ευάγγελος Διαλυνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Παύλος Γεωργιλιάκης
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ιωάννης Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Τριανταφυλλίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αντώνιος Αλεξανδρίδης
Καθηγητής Πανεπιστημίου
Πατρών

Ιωάννης Γκόνος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2016

.....
Δημήτριος Ζ. Στημονιάρης

Υπ. Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Δημήτριος Ζ. Στημονιάρης, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

...στην Οικογένεια

Σχόλια – Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή άρχισε να εκπονείται το Δεκέμβριο του 2011 και ολοκληρώθηκε τον Απρίλιο του 2016, στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ευάγγελου Διαλυνά.

Η εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου ο Καθηγητής κ. Ευάγγελος Διαλυνάς, παρά τις βασικές δυσκολίες, ήταν για μένα, η αρχή μιας άκρως δημιουργικής περιόδου. Αμέριστη συμπαράσταση, ενθάρρυνση και εμπνευσμένη καθοδήγηση, σε όλη τη διάρκεια της διατριβής, μου έδωσε την μοναδική ευκαιρία να ασχοληθώ με τις πιο σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις και για αυτό τον ευχαριστώ και τον ευγνωμονώ.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τα μέλη της τριμελούς επιτροπής Καθηγητή κ. Γ. Κορρέ και Επίκουρο Καθηγητή κ. Π. Γεωργιλάκη, καθώς και τους Καθηγητές κ. Ιωάννη Σταθόπουλο, κ. Γ. Παπαβασιλόπουλο, κ. Α. Αλεξανδρίδη και Επίκουρο Καθηγητή κ. Ι. Γκόνο, για τις πραγματικά εποικοδομητικές παρατηρήσεις τους σε διάφορα επιστημονικά θέματα.

Βασικός μοχλός για την ολοκλήρωση της διατριβής ήταν μια ομάδα συνεργατών. Ο Στέλιος, ο Θοδωρής, ο Δημήτρης, η Φανή, ο Νίκος, η Βάγια, ο Μουσταφά, ο Αϊντογάν, ο Αλπαρσλάν έγιναν από συνεργάτες φίλοι.

Η οικογένεια που συνεχώς στήριζε η Αμαλία, ο Αδάμος, η Άννα και η γλυκιά Τατιάνα, που μεγάλωνε κι αυτή μαζί με την προσπάθεια.

Η διοίκηση του ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας στην Κοζάνη που δεν μου αρνήθηκε ούτε εξοπλισμό ούτε χρόνο.

Κυρίως όμως θέλω να σταθώ σε δύο πρόσωπα. Στον Δρ. Δημήτρη Τσιαμήτρο, πολύτιμο φίλο και συνεργάτη, του οποίου η βοήθεια ήταν ανεκτίμητη στην ολοκλήρωση της προσπάθειας και στον Καθηγητή κ. Ευάγγελο Διαλυνά, ο οποίος ρίσκαρε, στήριξε και συνέδραμε καθ' όλη τη διάρκεια της διατριβής.

Όλους αυτούς λοιπόν τους συνεργάτες, που στη συνέχεια έγιναν φίλοι, τώρα πια τους αισθάνομαι σαν τη μεγάλη μου οικογένεια.

Σε αυτή τη μεγάλη οικογένεια αφιερώνω αυτό το έργο ζωής.

Δημήτρης Στημονιάρης

Απρίλιος 2016

Περίληψη

Η αυξανόμενη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΠΕ) στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, αν και επιβεβλημένη, δημιουργεί προβλήματα στο δίκτυο, όπως:

- Σε πολλά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, παγκοσμίως, όταν οι ανεμογεννήτριες παράγουν ισχύ κοντά στις ονομαστικές τους τιμές, οι γραμμές του δικτύου φορτίζονται στα όριά τους. Ως συνέπεια, πολλές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο (που επίσης θεωρούνται ανανεώσιμες) σταματούν να διοχετεύουν ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο (λειτουργία εν κενώ), σπαταλώντας βιοαέριο. Ταυτόχρονα το συμβόλαιο που έχουν συνάψει με τον διαχειριστή του δικτύου υποχρεώνει την αποπληρωμή τους, χωρίς να έχουν παράσχει την προβλεπόμενη ποσότητα ενέργειας στο δίκτυο.
- Σε πολλά σημεία των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και στην Ελλάδα, οι περιορισμοί που τίθενται από το διαχειριστή του δικτύου διανομής σχετικά με τη σύνδεση μονάδων Διανεμημένης Παραγωγής (ΔΠ) στο δίκτυο, σε συνδυασμό με τη μείωση της ζήτησης, δυσχεραίνουν τη λειτουργία των υπαρχουσών μονάδων ΔΠ και δεν επιτρέπουν πλέον τη σύνδεση άλλων μονάδων ΑΠΕ. Τέτοιοι περιορισμοί είναι η ανύψωση τάσης στο μετασχηματιστή της μονάδας και η ισχύς βραχυκύκλωσης στον Υποσταθμό Υψηλής/Μέσης τάσης. Ο πρώτος περιορισμός παραβιάζεται ήδη, κυρίως τις νυχτερινές ώρες ή γενικά όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή, με αποτέλεσμα να αποσυνδέονται οι μονάδες ΔΠ από το δίκτυο από τον επιτηρητή τάσης των μονάδων. Ο δεύτερος περιορισμός έχει τεθεί σε εφαρμογή ήδη σε πολλούς υποσταθμούς με αποτέλεσμα την απόρριψη αδειοδοτήσεων πολλών μονάδων ΑΠΕ. Αυτό συμβαίνει αφού σήμερα τα συμβόλαια μεταξύ διαχειριστή δικτύου και μονάδας ΔΠ υποθέτουν ότι η μονάδα ΔΠ θα παρέχει τη μέγιστη ισχύ της όποτε αυτό είναι δυνατόν, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη ζήτηση ή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην ίδια γραμμή.

Όπως γίνεται φανερό, από τα δύο παραπάνω προβλήματα, όλες οι μονάδες ΔΠ πρέπει να ελέγχονται και να ρυθμίζουν την παραγωγή τους με βάση τη ζήτηση και την παραγωγή άλλων μονάδων ΔΠ. Αν δε ληφθεί υπόψη και η εξάρτηση πολλών εξ αυτών από τις καιρικές συνθήκες, φαίνεται επιβεβλημένη και η δυνατότητα κάποιων εξ αυτών να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια. Κατά συνέπεια, σημαντικό ρόλο στο μελλοντικό δίκτυο θα παίζει το μικροδίκτυο, που μπορεί να οριστεί ως ένα δίκτυο διανομής που περιλαμβάνει μονάδες ΔΠ, μονάδες αποθήκευσης και ελεγχόμενα φορτία και που ρυθμίζει την τάση, τη συχνότητα, την εσωτερική ροή ισχύος αυτόνομα. Μικροδίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ένα αυτόνομο οικιακό δίκτυο μέχρι το

δίκτυο μιας πόλης ή μιας περιφερειακής ενότητας. Άρα ένα κρίσιμο θέμα είναι η επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας, υποδομής και αλγορίθμου ελέγχου του μικροδικτύου και κατ' επέκταση του μελλοντικού δικτύου. Επειδή σε μεγάλη κλίμακα (πόλης ή νομού), η εφαρμογή νέων τεχνολογιών ελέγχου του δικτύου παρουσιάζει τεχνικές αλλά και νομικές δυσκολίες, η εφαρμογή νέων υποδομών και αλγορίθμων ελέγχου, η προσομοίωση και η πειραματική διερεύνηση αυτών σε διασυνδεδεμένα μικροδίκτυα μικρής κλίμακας είναι η πιο πρόσφορη και εφικτή λύση για τη μετάβαση από το σημερινό στο μελλοντικό έξυπνο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής, προτάθηκε μια τοπολογία ευφυούς δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, οι δομικές της μονάδες και ο αντίστοιχος αλγόριθμος ελέγχου, ενώ στόχος της είναι να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματά της έναντι άλλων.

Για το σκοπό αυτό, υλοποιήθηκαν δύο τοπολογίες μικρο-δικτύων με αυξημένη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Μέσων Αποθήκευσης Ενέργειας σε εργαστηριακό επίπεδο: της προτεινόμενης και μίας κλασσικής που εφαρμόζεται σε εμπορικά αυτόνομα δίκτυα. Οι μονάδες ΔΠ αναπαριστώνται από δύο Φ/Β συστήματα με 6 πλαίσια το καθένα και τους αντίστοιχους μετατροπείς (1,1kW έκαστος), και από μια μικρή ανεμογεννήτρια μέγιστης ισχύος 1kW. Ως μονάδες αποθήκευσης χρησιμοποιήθηκαν 24 μπαταρίες υγρού τύπου δημιουργώντας δύο παράλληλες συστοιχίες με συνολική χωρητικότητα 600Ah-C10, στα 24V. Έχουν συνδεθεί φορτία, όπως λάμπες πυρακτώσεως, λάμπες φθορισμού, ψυγείο και ένας κινητήρας 1kW, τα οποία έχουν συνολική κατανάλωση ίση με 2650 W. Η κλασσική τοπολογία ελέγχεται από έναν αυτόνομο μετατροπέα. Η προτεινόμενη τοπολογία ελέγχει το μικροδίκτυο με τη βοήθεια μετρητών ρεύματος (AC/DC), τάσης και ενεργοποιητών-ρελέ που είναι τοποθετημένοι σε κάθε πηγή, μονάδα αποθήκευσης και φορτίο. Οι μετρητές μεταφέρουν τις μετρήσεις ενσύρματα σε μία κάρτα ανάκτησης δεδομένων (DAQ NI-USB-6008) και από εκεί γίνεται η επεξεργασία τους σε μία εφαρμογή LabVIEW σε πραγματικό χρόνο. Η εφαρμογή LabVIEW φιλοξενεί τον επαναληπτικό αλγόριθμο ελέγχου σε MATLAB, ο οποίος ανά 200msec μέσω του LabVIEW και της κάρτας DAQ ενεργοποιεί ή όχι τα κατάλληλα ρελέ.

Στη συνέχεια της διατριβής, πραγματοποιούνται οι απαραίτητες τροποποιήσεις των υποδομών και του αναπτυχθέντος αλγορίθμου της προτεινόμενης τοπολογίας ώστε αυτή να καταστεί διαδραστική με υπάρχουσες τεχνολογίες αυτομάτου ελέγχου κτιρίων (KNX). Η εφαρμογή τους σε πειραματικό επίπεδο καταδεικνύει την αύξηση της αξιοπιστίας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να προσδώσει η ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογιών διαχείρισης της ζήτησης (demand-side management). Τα συμπεράσματα αυτής της έρευνας δημοσιεύτηκαν επίσης σε διεθνές περιοδικό. Το μέρος αυτό της διδακτορικής διατριβής ενισχύεται από το έργο με τίτλο «Έξυπνη Διαχείριση Ηλεκτρικής Ενέργειας και Τεχνολογίες Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων», της δράσης εθνικής εμβέλειας της ΓΓΕΤ «Διμερής E&T

Συνεργασία Ελλάδας-Τουρκίας 2013-2014, Διμερείς, Πολυμερείς και Περιφερειακές E&T Συνεργασίες».

Ακολουθώς, δοκιμάζεται ο έλεγχος του έξυπνου δικτύου με έναν αλγόριθμο που εφαρμόζει κατάλληλα μοντέλα πρόβλεψης όπως είναι οι ασαφείς γνωστικοί χάρτες (Fuzzy Cognitive Maps). Λαμβάνοντας υπόψη ότι αυτό το γνωστικό αντικείμενο παρουσιάζει πολλές δυσκολίες ειδικά μέχρι να φτάσει σε σημείο δοκιμής στο πειραματικό μικροδίκτυο, στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάζεται το πρώτο μέρος της έρευνας που αφορά στη σωστή πρόβλεψη της εξόδου των μονάδων ΔΠ με φωτοβολταϊκά συστήματα.

Τέλος, για να δοκιμαστεί η επεκτασιμότητα του προτεινόμενου μοντέλου ελέγχου μικροδικτύων αλλά και για να δημιουργηθεί το εργαλείο όπου θα δοκιμαστεί η λειτουργικότητα και αξιοπιστία λειτουργίας του αλγορίθμου ελέγχου με ασαφή γνωστικά δίκτυα, κρίθηκε απαραίτητη η προσομοίωση του πειραματικού μικροδικτύου. Έγινε η προσομοίωση όλων των τμημάτων του μικροδικτύου ξεχωριστά σε PSCAD, αφού τα υπάρχοντα μοντέλα δεν πλησίαζαν τα πειραματικά δεδομένα του εργαστηριακού μικροδικτύου. Έτσι, κατέστη δυνατό να εισαχθούν στην εφαρμογή προσομοίωσης οι αλγόριθμοι ελέγχου του μικροδικτύου. Αφού έγινε η επιβεβαίωση με τη βοήθεια πραγματικών πειραματικών δεδομένων ότι το μοντέλο προσομοίωσης λειτουργεί αποτελεσματικά, εφαρμόστηκε σε πραγματικά ασθενή δίκτυα διανομής, για να ελεγχθεί αν είναι επεκτάσιμο. Μετά τη διαπίστωση αυτή, ένα μοντέλο προσομοίωσης ευφυών δικτύων διανομής αναπτύχθηκε, το οποίο είναι επεκτάσιμο και μπορεί να μελετήσει όλες τις επιπτώσεις της διείσδυσης των ΑΠΕ, των ηλεκτρικών οχημάτων, κτλ στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και να προτείνει λύσεις στη διαχείριση και έλεγχο τους.

Η συνεισφορά και τα πρωτότυπα θέματα της διδακτορικής διατριβής είναι τα ακόλουθα: (α) Ανάπτυξη μίας νέας και πιο αποτελεσματικής μεθόδου προσδιορισμού του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών (State of Charge-SoC), με την εισαγωγή του νέου όρου pseudo-SoC. Με τη νέα μέθοδο, αποφεύγεται η λανθασμένη εκτίμηση του SoC από τις έως τώρα δημοσιευθείσες μεθόδους σε περιπτώσεις βαθιάς εκφόρτισης συστοιχιών και η επακόλουθη μη-αναγκαία απόρριψη φορτίων. (β) Ανάπτυξη μίας νέας μεθόδου ελέγχου της ενεργού ισχύος εξόδου Φ/Β συστημάτων, που συνίσταται στην τοποθέτηση ρελέ επιλεκτικά στις συστοιχίες τους και τον έλεγχο των ρελέ από τον αναπτυχθέντα επαναληπτικό αλγόριθμο ελέγχου σε περιβάλλον MATLAB. (γ) Ανάπτυξη μίας νέας τεχνικής ελέγχου αυτοματισμών εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια τύπου bus (KNX) από συστήματα ελέγχου μικροδικτύων τύπου SCADA (LabVIEW - MATLAB). (δ) Ανάπτυξη μίας νέας μεθόδου ελέγχου μικροδικτύων με τη χρήση ασαφών γνωστικών χαρτών που στοχεύει στην πρόβλεψη ζήτησης ενέργειας. (ε) Ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου προσομοίωσης ευφυών δικτύων διανομής, το οποίο είναι επεκτάσιμο και μπορεί να μελετήσει όλες τις επιπτώσεις της διείσδυσης των ΑΠΕ, των ηλεκτρικών οχημάτων, κτλ στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και να προτείνει λύσεις για τη διαχείριση και τον έλεγχο τους.

Με τις αναπτυχθείσες μεθόδους αναμένεται να βελτιωθεί η στάθμη αξιοπιστίας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και η δυνατότητά του μικροδικτύου να εξασφαλίζει στις μονάδες διανεμημένης παραγωγής και στην πλευρά της ζήτησης την παροχή επικουρικών υπηρεσιών.

Λέξεις Κλειδιά

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αξιοπιστία λειτουργίας, Έξυπνα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, Μικροδίκτυα, Μονάδες Διανεμημένης Παραγωγής.

Summary

The objective of the PhD thesis is the analysis of the infrastructure, the control algorithm and the benefits of a smart microgrid-based topology that can tackle the challenges of the transformation of the electricity grid to a smart grid.

At the **first** chapter (Introduction), the characteristics of the distributed energy resources (DER) are presented, as well as the factors that hinder the increased penetration of DERs in the distribution grid. Also, the features of the future “smart grid” are outlined, which are going to facilitate the increased penetration of DER into the grid. Finally, the structure of the theses is presented.

At the **second** chapter, the topology of a smart distribution grid is shown, together with its advantages.

At the **third** chapter the implementation of two topologies of smart microgrids in laboratory scale is presented. The microgrids contain battery bank for storage option and PV facilities as DERs. The PV units are two small PV plants with 6 panels each and one PV inverter (1,1kW each) and a small wind generator of 1kWp. The storage battery bank consists of 24 batteries arranged in 2 parallel strings of 12 batteries each, with total capacity of 600Ah. The maximum load consumption is 1650W and the various loads are fluorescent and incandescent lamps, one motor and a refrigerator. The first and commercially available topology is controlled by an island inverter. The second one is controlled by applying at each load, storage and DERs measurement points (current and voltage transformers), data acquisition cards, for acquiring the measurements and relays, for activation or deactivation of the loads, DERs, etc. The processing of the measurements and the control algorithm of the microgrid are executed in a LabVIEW application that runs real-time.

At the **fourth** chapter, the microgrid control algorithm is analyzed and the innovative parts are highlighted. More specifically, the pseudo-SoC concept is explained for the first time, as an improvement of the storage units control and a technique for controlling the active output power of the PV units.

At the **fifth** chapter, the experiment results by the two laboratory microgrids are compared for the same conditions. The increased power supply reliability of the loads is evident, due to the new control algorithm and topology.

At the **sixth** chapter, the necessary adjustments are presented in order for the control algorithm to interoperate with Building Automation Systems (BAS). The utilization of BAS for smart grid applications can give added value to the future smart grid.

The **seventh** chapter presents the first step of the difficult task of inserting forecast in the control of the microgrid using Fuzzy Cognitive Networks (FCN). More specifically, the design of the fuzzy cognitive network that can replace the control

algorithm of the fourth chapter is presented. Moreover, the operation of the first node of the FCN that represents the PV units output is simulated successfully, since the results match the actual measurements.

At the **eighth** chapter, the expandability of the proposed microgrid control model is tested by simulating the laboratory microgrid in PSCAD. The control algorithm of the fourth chapter is inserted into the PSCAD application, and the accuracy of the simulation model of the experimental microgrid is validated by using real data. Then, it is utilized in combination with an actual weak distribution microgrid and the results verified that the proposed microgrid control model can be used for the study of the consequences that DER and EVs have on the operation of the distribution grid.

Finally, at the **ninth** chapter, the conclusions and the innovations of the PhD theses are outlined, as well as the directions for future research.

Key Words

Renewable energy sources, reliability performance, Smart Electricity Grids, Microgrids, Distributed Generation Units.

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

| Σύντμηση | Επεξήγηση |
|----------------|--|
| ΑΠΕ | Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας |
| ΓΓΕΤ | Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας |
| ΔΠ | Διανεμημένη Παραγωγή |
| E&T | Έρευνα και Τεχνολογία |
| ΗΕ | Ηλεκτρική Ενέργεια |
| Μ/Σ | Μετασχηματιστής |
| ΜΤ | Μέση Τάση |
| ΥΗΣ | Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί |
| Φ/Β | ΦωτοΒολταϊκά |
| ΧΤ | Χαμηλή Τάση |
| CT | Current Transformer – Μετασχηματιστής Ρεύματος |
| DAQ NI6008 | Κάρτα ανάκτησης δεδομένων (Data Acquisition Card) |
| DSM | Demand Side Management |
| FCM | Ασαφείς Γνωστικοί Χάρτες – Fuzzy Cognitive Maps |
| FLA | Flooded Lead Acid |
| G-SCU | Generator SCU |
| I-SCU | Interconnection SCU |
| KNX | Διεθνής Ένωση KNX – Διεθνές Πρότυπο οικιακού και κτιριακού αυτοματισμού (www.knx.org) |
| KNX OPC Server | KNX OLE Programming Control Server |
| L-SCU | Load SCU |
| LV | Low Voltage |
| MG | Microgrid Generation |

| | |
|-------|--|
| MMS | Microgrids Management System |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking |
| MV | Medium Voltage |
| NC | Normally Closed |
| PC | Personal Computer – Προσωπικός Υπολογιστής |
| PMU | Phasor Measurement Unit |
| PV | Photovoltaics |
| RG | Remaining Grid |
| RMS | Root-Mean Square – Ενεργός τιμή |
| RS485 | Βιομηχανικό Πρωτόκολλο επικοινωνίας |
| SCU | Special Control Unit |
| SIM | Smart Integration Module (Κεντρική μονάδα Διαχείρισης) |
| SMA | Κατασκευάστρια εταιρεία Αντιστροφών |
| S-SCU | Storage SCU |
| VT | Voltage Transformer |
| Wp | Watt peak |

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ | 8 |
| 1.1. ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ..... | 8 |
| 1.1.1. Αναγκαιότητα σύνδεσης στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας | 8 |
| 1.1.2. Είδη μονάδων διανεμημένης παραγωγής και ειδικά χαρακτηριστικά τους | 9 |
| 1.2. ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ – ΡΟΛΟΣ ΥΠΑΡΧΟΝΤΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 14 |
| 1.3. ΞΕΥΠΝΟ ΔΙΚΤΥΟ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΩΣ ΛΥΣΗ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. | 17 |
| 1.4. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ | 20 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΕΥΦΥΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ | 22 |
| 2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 22 |
| 2.2. ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΞΕΥΠΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 23 |
| 2.2.1. Πρώτη τοπολογία | 23 |
| 2.2.2. Προτεινόμενη τοπολογία..... | 24 |
| 2.2.3. Σύγκριση τοπολογιών..... | 27 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ | 28 |
| 3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 28 |
| 3.2. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΩΤΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ..... | 28 |
| 3.3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ | 31 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ | 33 |
| 4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 33 |
| 4.2. ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ – ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ | 36 |
| 4.3. ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ – ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ | 36 |
| 4.3.1. Τεχνική προσδιορισμού επιπέδου φόρτισης μονάδων αποθήκευσης ενέργειας | 36 |
| 4.3.2. Τεχνική διαχείρισης διανεμημένης παραγωγής και φορτίων με βάση το επίπεδο φόρτισης των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας..... | 42 |
| 4.3.3. Έλεγχος Ενεργού Ισχύος εξόδου Φ/Β συστημάτων..... | 43 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..... | 46 |
| 5.1. ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ-ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ | 46 |

| | | |
|--------|---|----|
| 5.2. | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΡΩΤΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ | 47 |
| 5.2.1. | Μετρήσεις χωρίς προσθήκη μονάδας διανεμημένης παραγωγής στην DC πλευρά της πρώτης τοπολογίας..... | 47 |
| 5.2.2. | Μετρήσεις με προσθήκη μονάδας διανεμημένης παραγωγής στην DC πλευρά της πρώτης τοπολογίας..... | 51 |
| 5.3. | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ..... | 53 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΖΗΤΗΣΗΣ ΕΞΥΠΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΩΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΥΠΟΥ BUS..... 57

| | | |
|--------|--|----|
| 6.1. | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 57 |
| 6.2. | ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ SCADA ΚΑΙ KNX ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ. | 58 |
| 6.3. | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ KNX ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ | 61 |
| 6.4. | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ..... | 63 |
| 6.4.1. | Πρωτογενής έλεγχος dimmer (εκτός λογισμικού)..... | 66 |
| 6.4.2. | Πρωτογενής έλεγχος dimmer (μέσω λογισμικού)..... | 68 |
| 6.4.3. | Δευτερογενής έλεγχος dimmer (μέσω λογισμικού) | 70 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΞΥΠΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΕ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ..... 73

| | | |
|------|---|----|
| 7.1. | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 73 |
| 7.2. | ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ FCM ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ..... | 75 |
| 7.3. | ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΤΟΥ FCM ΤΩΝ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ | 78 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ 82

| | | |
|--------|---|----|
| 8.1. | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 82 |
| 8.2. | ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ..... | 84 |
| 8.2.1. | Μοντέλα φωτοβολταϊκών συστημάτων και ανεμογεννήτριας..... | 84 |
| 8.2.2. | Μοντέλο μπαταριών υγρού τύπου (Lead-acid Batteries-FLA) | 88 |
| 8.2.3. | Μοντέλο φορτίων και φορτίων ελεγχόμενων από KNX..... | 89 |
| 8.2.4. | Δημιουργία μοντέλου μικροδικτύου από επιμέρους μοντέλα και ενσωμάτωση του αλγορίθμου ελέγχου..... | 91 |
| 8.3. | ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ | 93 |

| | |
|--|---------------------|
| 8.3.1. Μελέτη πρακτικού συστήματος χωρίς KNX φορτία και σύγκριση με πραγματικά δεδομένα..... | 93 |
| 8.3.2. Μελέτη πρακτικού συστήματος με KNX φορτία..... | 100 |
| 8.3.3. Σύνδεση με μοντέλα προσομοίωσης κι επεκτασιμότητα | 102 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ..... | 111 |
| 9.1. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ | 111 |
| 9.2. ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ..... | 112 |
| 9.3. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ -ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ..... | 112 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 114 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ | 119 |
| I.1. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ..... | 120 |
| I.2. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ KNX)..... | 120 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ KNX | 124 |
| II.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 125 |
| II.2. ΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ | 128 |
| II.3. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ – ΣΥΣΚΕΥΕΣ KNX..... | 129 |
| II.4. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ETS | 130 |

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|--|----|
| <i>Σχήμα 1.1.</i> Μονάδα παραγωγής βιοαερίου και ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο ισχύος 500 kW [Πηγή: Chair of Bioprocess Engineering, TU-Berlin – BioConstruct GmbH] | 11 |
| <i>Σχήμα 1.2.</i> Παραγωγή ενέργειας σε μονάδα βιοαερίου [Πηγή: Chair of Bioprocess Engineering, TU-Berlin-juni Bio GmbH] | 12 |
| <i>Σχήμα 1.3.</i> Εσωτερικό κύριας δεξαμενής. Διακρίνονται η εύκαμπτη οροφή, ο αναδευτήρας και οι σωληνώσεις που μεταφέρουν θερμότητα στο μείγμα [Πηγή: Chair of Bioprocess Engineering, TU-Berlin-Thyssen Krupp Stainless AG] | 13 |
| <i>Σχήμα 2.1.</i> Πρώτη τοπολογία. | 24 |
| <i>Σχήμα 2.2.</i> Δεύτερη τοπολογία | 25 |
| <i>Σχήμα 2.3.</i> Προτεινόμενη τοπολογία έξυπνου δικτύου διανομής | 26 |
| <i>Σχήμα 3.1.</i> Εργαστηριακό μικροδίκτυο πρώτης τοπολογίας | 28 |
| <i>Σχήμα 3.2.</i> Sunny Island 3324 αντιστροφέας (κίτρινος), δύο αντιστροφείς διασύνδεσης (κόκκινοι) και φορτία: ψυγείο, κινητήρας και 12 λάμπες πυρακτώσεως..... | 30 |
| <i>Σχήμα 3.3.</i> Εφαρμογή προτεινόμενης τοπολογίας έξυπνου μικροδικτύου | 31 |
| <i>Σχήμα 3.4.</i> Εργαστηριακή εγκατάσταση προτεινόμενου μικροδικτύου: (a) δέκα SCU, (b) ρελέ, | 32 |
| <i>Σχήμα 4.1.</i> Εφαρμογή LabVIEW και ενσωματωμένος αλγόριθμος ελέγχου σε MATLAB script. | 33 |
| <i>Σχήμα 4.2.</i> Αλγόριθμος ελέγχου σε MATLAB. Αναπτύσσεται με λεπτομέρεια στο Παράρτημα I..... | 38 |
| <i>Σχήμα 4.3.</i> Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος – τάσης μπαταριών μολύβδου οξέος που αντιστοιχούν σε SoC ίσο με 60%, 40% και 25%. | 40 |
| <i>Σχήμα 4.4.</i> Συστοιχία μπαταριών μικροδικτύου. | 41 |
| <i>Σχήμα 4.5.</i> Έλεγχος ισχύος εξόδου Φ/B πάρκου..... | 44 |
| <i>Σχήμα 4.6.</i> Δύο φωτοβολταϊκές συστοιχίες μικροδικτύου..... | 45 |
| <i>Σχήμα 5.1.</i> Καμπύλες ισχύος 18 ^{ης} Μαΐου (3η μέρα 1 ^{ης} εβδομάδας του Πίνακα 5.1) | 48 |
| <i>Σχήμα 5.2.</i> Καμπύλες ισχύος 23 ^{ης} Μαΐου (1η μέρα 2 ^{ης} εβδομάδας του Πίνακα 5.1) | 49 |
| <i>Σχήμα 5.3.</i> Καμπύλες Ισχύος 02 ^{ας} Ιουνίου (4η μέρα 1ης εβδομάδας του Πίνακα 5.1). Η σύνδεση με το σθεναρό δίκτυο αποκαθίσταται τις περιόδους: 7.30 πμ-9.30 πμ, 10.30 πμ-11.30 πμ and 12.30 μμ – 1.30 μμ..... | 50 |
| <i>Σχήμα 5.4.</i> Καμπύλες Ισχύος 06 Ιουνίου ^{ης} (1η μέρα της 2ης εβδομάδας του Πίνακα I)..... | 51 |
| <i>Σχήμα 5.5.</i> Μεγέθυνση περιστασιακά απομονωμένης λειτουργίας της 10 ^{ης} Ιουνίου (5 ^η μέρα..... | 53 |
| <i>Σχήμα 5.6.</i> Συμπεριφορά του φορτίου στην πρώτη και στην προτεινόμενη τοπολογία - Απομονωμένη Λειτουργία: 9.30 – 10.30, 11.30 – 12.30, και 13.30 – επόμενο πρωί | 54 |
| <i>Σχήμα 5.7.</i> Προφίλ κατανάλωσης φορτίου και παραγωγή Φ/B για τις συγκρινόμενες τοπολογίες. Στις 11.30 αποκαθίσταται η σύνδεση με το δίκτυο..... | 55 |
| <i>Σχήμα 5.8.</i> Ρεύμα εκφόρτισης μπαταριών. | 56 |
| <i>Σχήμα 5.9.</i> Παραγωγή Φ/B συστημάτων και κατανάλωση πέντε φορτίων..... | 56 |
| <i>Σχήμα 6.1.</i> Η χρήση του KNX City® στο μελλοντικό ευφρές δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας..... | 58 |
| <i>Σχήμα 6.2.</i> Τοπολογία δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας – Το φορτίο 4 (λάμπες πυρακτώσεως) ελέγχεται από συσκευή KNX (KNX dimmer). | 59 |

| | |
|---|----|
| Σχήμα 6.3. Τοπολογία δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με την προσθήκη συσκευών KNX..... | 60 |
| Σχήμα 6.4. KNX dimmer | 62 |
| Σχήμα 6.5. Συνδεσμολογία του KNX εξοπλισμού στο προτεινόμενο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας | 63 |
| Σχήμα 6.6. Ροή ισχύος σε γραμμή δικτύων διανομής. | 64 |
| Σχήμα 6.7. Διαχείριση ζήτησης με εφαρμογή της αρχής του ρελέ: (α) Διακοπτική λειτουργία on/off, (β) γραμμικά ή βαθμωτά [13]. | 64 |
| Σχήμα 6.8. Φωτεινότητα λαμπτήρων: (α) Χωρίς dimming (β) Με dimming. | 65 |
| Σχήμα 6.9. Κατανάλωση Φορτίου N°4 κατά τη διάρκεια του dimming. | 65 |
| Σχήμα 6.10. Εκκίνηση κινητήρα (Φορτίο N°5) χωρίς την εφαρμογή της KNX τεχνολογίας στο φορτίο N°4..... | 67 |
| Σχήμα 6.11. Εκκίνηση κινητήρα (Φορτίο N°5) με την εφαρμογή της KNX τεχνολογίας στο φορτίο N°4..... | 67 |
| Σχήμα 6.12. Σύγκριση συμπεριφοράς της τάσης με και χωρίς dimming | 68 |
| Σχήμα 6.13. Εκκίνηση κινητήρα (Φορτίο N°5) χωρίς την εφαρμογή της KNX τεχνολογίας στο φορτίο N°4..... | 69 |
| Σχήμα 6.14. Εκκίνηση κινητήρα (Φορτίο N°5) με την εφαρμογή της KNX τεχνολογίας στο φορτίο N°4 μέσω της εφαρμογής LabVIEW..... | 69 |
| Σχήμα 6.15. Σύγκριση του προφίλ της τάσης του μικροδικτύου. | 70 |
| Σχήμα 6.16. Τάση μπαταριών πριν και μετά την ενεργοποίηση του KNX φορτίου..... | 71 |
| Σχήμα 6.17. Ρεύμα εκφόρτισης μπαταριών πριν και μετά την ενεργοποίηση του KNX φορτίου | 71 |
| Σχήμα 6.18. Τάση και Ρεύμα εκφόρτισης μπαταριών πριν και μετά την ενεργοποίηση του KNX φορτίου..... | 72 |
| Σχήμα 7.1. Ενσωμάτωση αλγόριθμου FCM στην εφαρμογή LabVIEW..... | 74 |
| Σχήμα 7.2. FCM που σχεδιάστηκε για το G-SCU των Φ/B συστημάτων του πειραματικού μικροδικτύου..... | 76 |
| Σχήμα 7.3. FCM που σχεδιάστηκε για το I-SCU του πειραματικού μικροδικτύου..... | 77 |
| Σχήμα 7.4. Μετεωρολογικά δεδομένα - Συνεχής γραμμή: ταχύτητα του ανέμου (m/min) Διακεκομμένη γραμμή: ηλιακή ακτινοβολία ($W/(10m^2)$)..... | 79 |
| Σχήμα 7.5. Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων της ίδιας ημέρας με τα Μετεωρολογικά Δεδομένα του Σχήματος 7.4..... | 79 |
| Σχήμα 7.6. Μετεωρολογικά δεδομένα - Συνεχής γραμμή: ταχύτητα του ανέμου (m/min) Διακεκομμένη γραμμή: ηλιακή ακτινοβολία ($W/(10m^2)$)..... | 80 |
| Σχήμα 7.7. Παραγόμενη ισχύς του FCM της ίδιας ημέρας με τα δεδομένα του Σχήματος 7.6. Συνεχής γραμμή: πραγματική ισχύς των Φ/B συστημάτων. Διακεκομμένη γραμμή: πρόβλεψη του FCM (Wat). | 81 |
| Σχήμα 8.1. Διαφορά μεταξύ πραγματικών δεδομένων και καμπύλης της εξίσωσης (8.1) | 85 |
| Σχήμα 8.2. Διαφορά μεταξύ πραγματικών δεδομένων και καμπύλης της εξίσωσης (8.2) | 86 |
| Σχήμα 8.3. Μοντέλα που αναπτύχθηκαν για: (α) μονάδες Φ/B συστημάτων του μικροδικτύου, (β) την ανεμογεννήτρια του μικροδικτύου..... | 87 |

| | |
|--|-----|
| <i>Σχήμα 8.4. Καμπύλη τάσης-χρόνου του μοντέλου συστοιχίας μπαταριών για ένα κύκλο εκφόρτισης-φόρτισης</i> | 89 |
| <i>Σχήμα 8.5. Μοντέλο φορτίων</i> | 90 |
| <i>Σχήμα 8.6. Μοντέλο φορτίων με KNX έλεγχο</i> | 90 |
| <i>Σχήμα 8.7. Προσομοίωση μικροδικτύου</i> | 92 |
| <i>Σχήμα 8.8. Ενσωμάτωση του αλγορίθμου ελέγχου στο PSCAD</i> | 94 |
| <i>Σχήμα 8.9. Προφίλ συνολικού φορτίου, μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου κατά την πραγματική λειτουργία</i> | 95 |
| <i>Σχήμα 8.10. Προφίλ του συνολικού φορτίου, μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου κατά την προσομοίωση</i> | 96 |
| <i>Σχήμα 8.11. Προφίλ παραγόμενης ισχύος από τα Φ/Β συστήματα την ημέρα των πειραμάτων</i> | 97 |
| <i>Σχήμα 8.12. Προφίλ παραγόμενης ισχύος ανεμογεννήτρια την ημέρα των πειραμάτων</i> | 97 |
| <i>Σχήμα 8.13. Προφίλ ισχύος μπαταριών κατά την προσομοίωση</i> | 98 |
| <i>Σχήμα 8.14. Ροή ισχύος μεταξύ μικροδικτύου και υπολοίπου δικτύου κατά την προσομοίωση</i> | 98 |
| <i>Σχήμα 8.15. Διακυμάνσεις ισχύος διανεμημένης παραγωγής, σθεναρού δικτύου και φορτίου κατά την προσομοίωση</i> | 99 |
| <i>Σχήμα 8.16. Διακυμάνσεις ισχύος των πηγών και του φορτίου κατά την προσομοίωση</i> | 101 |
| <i>Σχήμα 8.17. Γενικό μοντέλο προσομοίωσης με το επιμέρους μοντέλο KNX</i> | 102 |
| <i>Σχήμα 8.18. Ασθενές δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης [35]</i> | 104 |
| <i>Σχήμα 8.19. Μοντέλο ασθενούς δικτύου διανομής χαμηλής τάσης της σε PSCAD</i> | 105 |
| <i>Σχήμα 8.20. Συνολικό μοντέλο προσομοίωσης σε PSCAD</i> | 106 |
| <i>Σχήμα 8.21. Καταγραφή μεταβλητών για ένα σενάριο προσομοίωσης</i> | 108 |
| <i>Σχήμα 8.22. Αποτελέσματα προσομοίωσης: περίπτωση μακρινού σημείου σύνδεσης</i> | 108 |
| <i>Σχήμα 8.23. Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίπτωση του κοντινού σημείου σύνδεσης</i> | 109 |
| <i>Σχήμα 8.24. Αποτελέσματα προσομοίωσης: περίπτωση ενδιάμεσου σημείου σύνδεσης</i> | 109 |
| <i>Σχήμα I.1. Γενικό διάγραμμα ροής του αλγορίθμου</i> | 121 |
| <i>Σχήμα II.1. KNX – η Τεχνολογία</i> | 127 |
| <i>Σχήμα II.2. Διαλειτουργικότητα KNX (Πηγή: Εκπαιδευτικό υλικό από το KNX Basic Course)</i> | 127 |

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 5.1. Πρόγραμμα μεταβολής φορτίων | 46 |
| Πίνακας 5.2. Εφαρμοζόμενη πολιτική απόρριψης φορτίων 3 ^{ης} Ιουνίου | 52 |
| Πίνακας 7.1. Κόμβοι και φυσικές αντιπροσωπευτικές τιμές | 76 |
| Πίνακας 7.2. Πίνακας βαρών του FCM για το G-SCU | 77 |
| Πίνακας 8.1. Συμβάντα μικροδικτύου στην πραγματική λειτουργία | 96 |
| Πίνακας 8.2. Σύγκριση χρονισμού συμβάντων μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος..... | 99 |
| Πίνακας 8.3. Συμβάντα προσομοίωσης μικροδικτύου με KNX συστήματα..... | 101 |
| Πίνακας 8.4. Παράμετροι γραμμών διανομής του δικτύου του Σχήματος 8.18..... | 104 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ

1.1. Διανεμημένη Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.1.1. Αναγκαιότητα σύνδεσης στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Ο όρος διανεμημένη παραγωγή (ΔΠ) ηλεκτρικής ενέργειας (ΗΕ) ή στα Αγγλικά Distributed Generation (DG), αναφέρεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πολλές, μικρές και διεσπαρμένες γεωγραφικά μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι διαφορές τους από τις μεγάλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- 1) Η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς τους είναι πολύ μικρότερη από αυτή των μεγάλων μονάδων.
- 2) Η σύνδεση τους με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να γίνει στη μέση ή ακόμα και στη χαμηλή τάση-ΧΤ (20kV και 400V αντίστοιχα).
- 3) Η χωροθέτηση τους εξαρτάται συνήθως από την πρωτογενή μορφή ενέργειας που χρησιμοποιούν για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Για παράδειγμα, τα μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια χωροθετούνται συνήθως σε ορεινούς όγκους με μεγάλες υψομετρικές διαφορές υδατοπτώσεων ή κατά μήκος της κοίτης μεγάλων ποταμών.
- 4) Μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις και σε ορισμένες χρονικές περιόδους να σταματήσουν να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια ή να μετατραπούν σε καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές του πετρελαίου, η ανάγκη για βιώσιμη ανάπτυξη και προστασία του περιβάλλοντος κατέστησαν αναγκαία την αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι και η κυριότερη αιτία ύπαρξης της διανεμημένης παραγωγής ΗΕ. Και αυτό γιατί οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας εμφανίζουν κυρίως το τρίτο χαρακτηριστικό των μονάδων ΔΠ-ΗΕ που αναφέρθηκε παραπάνω: Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές, όπως η περίπτωση των ΥΗΣ ή των αιολικών πάρκων, τα οποία είναι δυνατόν να λειτουργήσουν αποδοτικά σε περιοχές με υψηλά αιολικά δυναμικά.

1.1.2. Είδη μονάδων διανεμημένης παραγωγής και ειδικά χαρακτηριστικά τους

Τα σημαντικότερα είδη μονάδων διανεμημένης παραγωγής ΗΕ είναι τα ακόλουθα:

- 1) Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής ή μεγαλύτερης ισχύος.
- 2) Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ)
- 3) Τα αιολικά πάρκα
- 4) Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα-βιοαέριο.

Τα τρία πρώτα είναι αρκετά διαδεδομένα στην Ελλάδα, ενώ το τέταρτο όχι. Για τα τρία πρώτα θα αναλυθούν μόνο εκείνα τα χαρακτηριστικά που διευκολύνουν ή δυσχεραίνουν τη διείσδυσή τους στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για το τέταρτο θα γίνει ελαφρώς μεγαλύτερη ανάλυση, γιατί δεν απαντάται συχνά στην Ελληνική επικράτεια.

- 1) Οι «φωτοβολταϊκές μονάδες ΔΠ» χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: (α) αυτές που είναι μόνο παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας και έχουν συνήθως ονομαστική ισχύ άνω των 20kWp και (β) εκείνες που είναι παραγωγοί και καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, εντοπίζονται στις στέγες των οικιακών καταναλωτών και έχουν ονομαστική ισχύ που δεν ξεπερνά τα 10kWp.

Μια ακόμα μεταξύ τους διαφορά είναι ότι τα πρώτα συνδέονται συνήθως στο δίκτυο Μέσης τάσης (MT-20kV στην Ελλάδα) μέσω μετασχηματιστή ανύψωσης XT/MT. Τα δεύτερα συνδέονται στο δίκτυο διανομής της χαμηλής τάσης (400V πολική ή 230V φασική τάση).

Για τη δεύτερη κατηγορία είναι προφανές ότι η τυχαιότητα στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας προς το δίκτυο εξαρτάται από δύο αστάθμητους παράγοντες: τις καιρικές συνθήκες και την οικιακή κατανάλωση σε κάθε χρονική στιγμή. Για την πρώτη κατηγορία η κυριότερη αιτία διακύμανσης της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς το δίκτυο είναι οι καιρικές συνθήκες.

Και στις δύο περιπτώσεις, η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι περιορισμένη, κυρίως λόγω του μεγάλου κόστους επένδυσης σε τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.

Τέλος πρέπει να τονιστεί η έλλειψη ευελιξίας-δυνατότητας ρύθμισης της ενεργής ισχύος εξόδου των φωτοβολταϊκών πάρκων ή της παραγωγής άεργης ισχύος, με τις σημερινές υποδομές και κανονισμούς. Αυτό συμβαίνει γιατί μέχρι σήμερα σκοπός των Φ/Β πάρκων ήταν η έγχυση της μέγιστης ενεργού ισχύος ή ενέργειας στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για να γίνει δυνατή η ρύθμιση της ενεργής ισχύος εξόδου ή η παραγωγή άεργου ισχύος,

πρέπει να γίνουν αλλαγές στους κανονισμούς και στα κυκλώματα των ηλεκτρονικών ισχύος των πάρκων.

- 2) Οι ΥΗΣ στην Ελλάδα χωρίζονται σε αυτούς που εντοπίζονται σε μεγάλα τεχνητά φράγματα και σε εκείνους που εντοπίζονται σε σημεία όπου μπορεί να εξασφαλιστεί μεγάλη υψομετρική διαφορά υδατόπτωσης (>70m). Η μεγαλύτερη διαφορά τους είναι ότι τα πρώτα αποτελούν συνήθως έργα εθνικής εμβέλειας και μεγάλης ισχύος (>100MW), ενώ τα δεύτερα είναι μικροί σταθμοί με ονομαστική ισχύ που δεν ξεπερνά τα 10MWp και είναι συνήθως ιδιωτικών συμφερόντων. Οι μονάδες που εμφανίζουν μεγάλο ενδιαφέρον είναι οι μικρές μονάδες με ισχύ μέχρι 10MW, καθώς έχουν συγκεκριμένη γεωγραφική διασπορά (ορεινοί όγκοι, άρα και αραιοκατοικημένες περιοχές) και παρουσιάζουν μεγάλη αύξηση. Αυτοί οι ΥΗΣ συνδέονται πάντα στο δίκτυο της ΜΤ (20kV).

Η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι και εδώ ανύπαρκτη, λόγω του μεγάλου κόστους επένδυσης σε τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.

Τέλος, οι μικροί ΥΗΣ έχουν δυνατότητες ρύθμισης της ισχύος εξόδου ή παραγωγής άεργης ισχύος, λόγω της σύγχρονων γεννητριών τους. Παρόλα αυτά, μέχρι σήμερα σκοπός και των ΥΗΣ είναι η έγχυση της μέγιστης ισχύος ή ενέργειας στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

- 3) Τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα κατασκευάζονται σε περιοχές όπου, το αιολικό δυναμικό είναι υψηλό, τόσο ώστε να συμφέρει τεχνοοικονομικά η εγκατάστασή τους. Το αιολικό δυναμικό για όλες τις περιοχές της Ελλάδας έχει ήδη χαρτογραφηθεί (<http://www.cres.gr/kape/datainfo/maps.htm>) και μπορεί να υποδείξει κατόπιν στατιστικής επεξεργασίας την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενός μελλοντικού αιολικού πάρκου.

Ως αποτέλεσμα, πολλά αιολικά πάρκα σήμερα έχουν κατασκευαστεί σε νησιά, που δεν είναι διασυνδεδεμένα με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της ηπειρωτικής Ελλάδας (π.χ. Σάμος), ενώ άλλα είναι εγκατεστημένα σε κορυφογραμμές. Κατά συνέπεια, η μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί δύσκολο και το κυριότερο κοστοβόρο εγχείρημα.

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες για αιολικά πάρκα έχουν ονομαστική ισχύ πάνω από 750 kWp. Κατά συνέπεια, τα αιολικά πάρκα έχουν ονομαστική ισχύ της τάξης των 10MWp και άνω και συνδέονται επίσης στο δίκτυο της ΜΤ.

Η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι και εδώ ανύπαρκτη, λόγω του μεγάλου κόστους επένδυσης σε τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.

Τέλος, τα αιολικά πάρκα έχουν δυνατότητες ρύθμισης της ισχύος εξόδου ή παραγωγής άεργης ισχύος, λόγω των ηλεκτρονικών ισχύος που τις ελέγχουν.

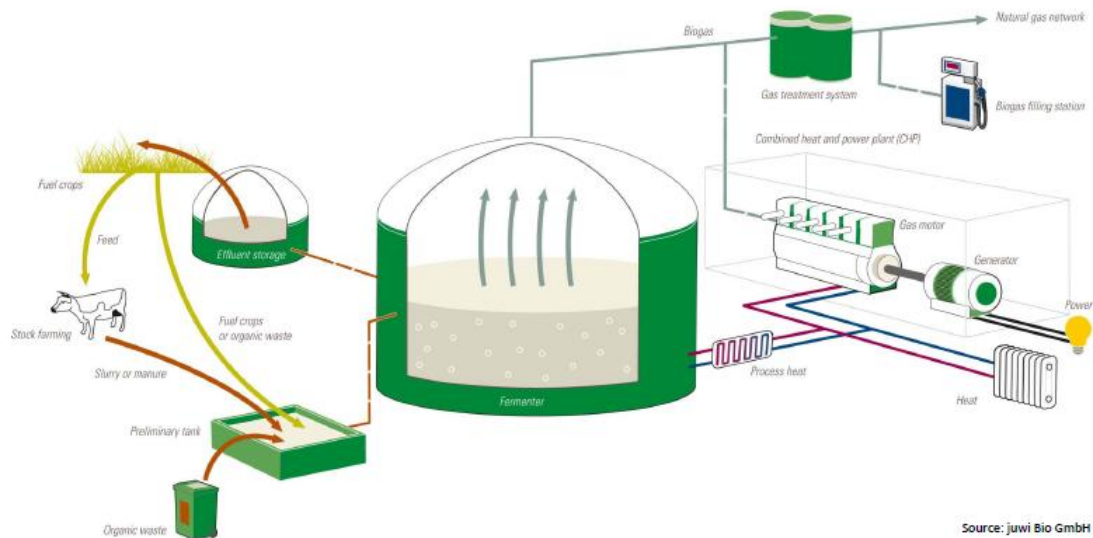
Παρόλα αυτά, μέχρι σήμερα σκοπός και των αιολικών πάρκων είναι η έγχυση της μέγιστης ισχύος ή ενέργειας στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι τα παραπάνω είδη ΔΠ-ΗΕ δεν έχουν καμία αλληλεπίδραση μεταξύ τους και σκοπό έχει η κάθε μία την παραγωγή της μέγιστης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας.

- 4) Όλες οι παραπάνω ΑΠΕ δεν είναι ανεξάρτητες των καιρικών συνθηκών, γεγονός που παρεμποδίζει την «βάσει ζήτησης» παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και απαιτεί να επενδύσει κανείς στην ικανότητα αποθήκευσής της. Μεταξύ των λίγων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες είναι ανεξάρτητες των καιρικών συνθηκών είναι αυτές που βασίζονται στη βιομάζα, εκ των οποίων το βιοαέριο κατέστη η πιο σημαντική (πηγή) στην Κεντρική Ευρώπη μέχρι σήμερα.



Σχήμα 1.1. Μονάδα παραγωγής βιοαερίου και ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο ισχύος 500 kW [Πηγή: Chair of Bioprocess Engineering, TU-Berlin – BioConstruct GmbH]



Σχήμα 1.2. Παραγωγή ενέργειας σε μονάδα βιοαερίου [Πηγή: Chair of Bioprocess Engineering, TU-Berlin-juwi Bio GmbH]

Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται παραστατικά η διαδικασία παραγωγής βιοαερίου και η χρήση του για την παραγωγή ενέργειας. Οργανικά οικιακά ή βιομηχανικά απόβλητα (π.χ. υπολείμματα επεξεργασίας τυριού ή οινοποιείων), μαζί με κοπριά ή λυματολάσπη βιολογικών καθαρισμών, υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών (π.χ. άχυρα) και ενεργειακά γεωργικά προϊόντα (π.χ. αγριαγκινάρα, σόργος) περνούν από ένα πρώτο στάδιο επεξεργασίας (preliminary tank) και κατόπιν εισάγονται στην κύρια δεξαμενή (fermenter). Εκεί δημιουργείται το βιοαέριο (υγρή και αέρια φάση) και εκεί αποθηκεύεται, καθώς η οροφή είναι εύκαμπτη. Στη συνέχεια διοχετεύεται σε μηχανή εσωτερικής καύσης, που περιστρέφει μία στροβιλογεννήτρια ή χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας (μέρος της οποίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή βιοαερίου) ή υπόκειται σε κατάλληλη επεξεργασία (gas treatment system) και χρησιμοποιείται στην αυτοκίνηση ή τοποθετείται σε μοτιλίες. Τέλος, το υπόλειμμα της κυρίως δεξαμενής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα.



Σχήμα 1.3. Εσωτερικό κύριας δεξαμενής. Διακρίνονται η εύκαμπτη οροφή, ο αναδευτήρας και οι σωληνώσεις που μεταφέρουν θερμότητα στο μείγμα [Πηγή: Chair of Bioprocess Engineering, TU-Berlin-Thyssen Krupp Stainless AG]

Ένα από τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας του βιοαερίου είναι ότι συνήθως χωροθετείται σε περιοχές πλησίον την πρώτης ύλης, δηλαδή σε αγροτικές, κτηνοτροφικές μονάδες ή σε σημεία βιολογικών καθαρισμών, γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχει κοντά το δίκτυο μέσης ή χαμηλής τάσης. Συνεπώς η σύνδεση στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα.

Επίσης, όπως είναι προφανές, οι μονάδες βιοαερίου δεν εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες, ενώ υπάρχει και δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή βιοαερίου στην κύρια δεξαμενή. Τέλος, είναι δυνατή η ευελιξία-δυνατότητα ρύθμισης της ενεργής και άεργης ισχύος εξόδου, λόγω της σύγχρονης γεννήτριας από την οποία συνοδεύεται. Παρόλα αυτά, μέχρι σήμερα σκοπός των μονάδων βιοαερίου είναι η έγχυση της μέγιστης ενεργού ισχύος ή ενέργειας στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και κατά συνέπεια η παραπάνω δυνατότητα δεν αξιοποιείται.

Κάποια αρνητικά σημεία των μονάδων βιοαερίου είναι ότι εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητα-τιμή της πρώτης ύλης, αφού μέσα σε ένα ημερολογιακό έτος, τα διαθέσιμα υλικά για την παραγωγή βιοαερίου ποικίλουν, άρα μπορεί να διαφοροποιείται και η τιμή στην οποία θα παρασχεθούν στη μονάδα. Συνεπώς, η πρώτη ύλη είναι μεταβλητής ποιότητας και εξαρτάται από εποχιακές επιδράσεις.

1.2. Δυσκολίες αύξησης διείσδυσης μονάδων διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο – Ρόλος υπάρχοντος δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Είναι προφανές ότι οι τρεις πρώτοι τύποι μονάδων ΔΠ-ΗΕ (Φ/Β συστήματα, ΥΗΣ και Αιολικά πάρκα) έχουν ένα βασικό λόγο που δυσχεραίνει την αυξημένη διείσδυσή τους στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας: Δεν είναι ανεξάρτητες των καιρικών συνθηκών, γεγονός που παρεμποδίζει την «βάσει ζήτησης» παραγωγή ενέργειας και απαιτεί να επενδύσει κανείς στην ικανότητα αποθήκευσής της. Επίσης, δεν υπάρχει καμία συντονισμένη αλληλεπίδραση μεταξύ των τριών αυτών ειδών ΔΠ, ώστε να διευκολυνθεί η βάση ζήτησης παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ.

Από την άλλη, οι μονάδες βιομάζας και ειδικά βιοαερίου είναι ανεξάρτητες των καιρικών συνθηκών. Αυτές όμως αντιμετωπίζουν άλλου είδους δυσκολίες για την αύξηση της διείσδυσής τους στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως στη Δυτική Ευρώπη. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται με χρήση παραγωγής βιοαερίου υπόκειται σε κριτική, δεδομένου ότι η ανανεώσιμη πρώτη ύλη χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας και όχι για την προμήθεια στην τροφική αλυσίδα ή για την παραγωγή χημικών, τα οποία είναι μεγαλύτερης οικονομικής αξίας. Ως εκ τούτου, συνιστά ένα μείζον ζήτημα στη Δυτική Ευρώπη, το πώς η παραγωγή ενέργειας από μονάδες παραγωγής βιοαερίου μπορεί να γίνει ευέλικτη, έτσι ώστε διαφορετικοί τύποι πρώτης ύλης να μπορούν να χρησιμοποιηθούν (κυρίως απόβλητα), και η «βάσει ζήτησης» παραγωγή ενέργειας σε συνδυασμό με την αιολική και ηλιακή ενέργεια να καθίσταται δυνατή. Η αύξηση της ευελιξίας στη λειτουργία των μονάδων παραγωγής βιοαερίου είναι επίσης σημαντική όταν εξετάζεται η εξάπλωση αυτής της τεχνολογίας σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από φτωχή διαθεσιμότητα ορισμένων «ενεργειακών καλλιέργειών». Σε μια τέτοια περίπτωση, η ενσωμάτωση της ενεργειακής αξιοποίησης βιολογικών αποβλήτων γίνεται ακόμη πιο σημαντική, προκειμένου να μην διαταραχθεί η τοπική γεωργία. Συνεπώς, η πρώτη ύλη είναι μεταβλητής ποιότητας και εξαρτάται από εποχιακές επιδράσεις.

Από την άλλη, στην Ελλάδα, τα πράγματα για τη ενέργεια από βιομάζα είναι εντελώς διαφορετικά. Σύμφωνα με όσα γνωρίζουμε, στην Ελλάδα, έχει εγκατασταθεί μέχρι σήμερα πολύ μικρός αριθμός βιομηχανικών μονάδων παραγωγής βιοαερίου και δεν συνδέονται με οποιαδήποτε άλλη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ιδιαίτερα στις βόρειες περιοχές της Ελλάδας, μεγάλες ποσότητες βιογενών αποβλήτων από τη βιομηχανία φρούτων μένουν ανεκμετάλλευτες. Στην πλειοψηφία των νησιών, οι καλλιέργειες έχουν σταματήσει και ως εκ τούτου, καλλιεργήσιμες εκτάσεις δεν χρησιμοποιούνται πια. Εν τω μεταξύ, τα συλλεγόμενα βιολογικά απόβλητα (υγρά απόβλητα και απόβλητα τροφίμων από τα ξενοδοχεία κλπ.) σε νησιά που δεν είναι διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά με την ηπειρωτική χώρα επίσης δεν χρησιμοποιούνται με οποιοδήποτε τρόπο, ενώ η παραγωγή ενέργειας εκεί σχετίζεται με υψηλά κόστη, δεδομένου ότι

βασίζεται σε ντιζελογεννήτριες. Επομένως, ειδικά ρυθμιζόμενα τιμολόγια έχουν εκδοθεί υπέρ των κατοίκων των νησιών που διαφορετικά θα έπρεπε να πληρώνουν υψηλά ποσά για την ενεργειακή τους κατανάλωση. Αυτή η διαφορά στην τιμή θα πρέπει να αντισταθμιστεί από τους άλλους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας οδηγώντας σε αύξηση του δικού τους κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Η αντικατάσταση της παραγωγή ενέργειας που βασίζεται στο πετρέλαιο από ανανεώσιμες πηγές συμπεριλαμβανομένου του βιοαερίου στα νησιά και γενικά σε περιοχές όπου τα βιογενή απόβλητα δεν χρησιμοποιούνται, θα οδηγούσε συνεπώς σε μια συνολικά πιο αποδοτική ενεργειακή πολιτική στην Ελλάδα διασφαλίζοντας την ασφάλεια του εφοδιασμού και τη σταδιακή απομάκρυνση από μια οικονομία βασισμένη στον άνθρακα και το πετρέλαιο.

Όμως, υπάρχει ένας κοινός και πιο σύνθετος παράγοντας που εμποδίζει όλες τις παραπάνω μονάδες ΔΠ-ΗΕ να αποτελέσουν τον βασικό πυλώνα που θα στηρίζει την παραγωγή ΗΕ: Το ίδιο το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και για την ακρίβεια τεchnο-οικονομικά θέματα λειτουργίας του ίδιου του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα είναι ότι το υπάρχον δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε πριν από πολλά χρόνια με τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- A) Η παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας ανήκει σε μία δημόσια επιχείρηση ηλεκτρισμού (ΔΕΗ ή αντίστοιχη άλλων χωρών).
- B) Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι συγκεντρωμένη, δηλαδή παράγεται σε μεγάλες ποσότητες από μερικές μεγάλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (της τάξεως των μερικών GW), άρα από εκείνες τις περιοχές αναχωρούν γραμμές υψηλής τάσης με μεγάλη χωρητικότητα σε μεταφερόμενη ισχύ.
- Γ) Η ισχύς ρέει προς μία κατεύθυνση από τις μεγάλες μονάδες παραγωγής προς τους καταναλωτές. Κατά συνέπεια σε ορισμένες ορεινές ή παραμεθόριες και συνήθως αραιοκατοικημένες περιοχές, το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες των τοπικών καταναλωτών.
- Δ) Ο έλεγχος του δικτύου γίνεται από μερικά κεντρικά σημεία ελέγχου. Από τα σημεία αυτά παράγονται και εντολές για κάθε μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να αυξήσει ή να μειώσει την παρεχόμενη ενεργή ή άεργη ισχύ.

Στο ίδιο λοιπόν δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, που σχεδιάστηκε με τις παραπάνω προϋποθέσεις, πρέπει στις ημέρες μας η ηλεκτρική ισχύς να παραχθεί, να μεταφερθεί και να διανεμηθεί στους καταναλωτές, με την ίδια αξιοπιστία και ποιότητα, αλλά με τις παρακάτω εντελώς διαφορετικές προϋποθέσεις:

- A) Η πλειονότητα των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικά οι μονάδες ΑΠΕ δεν ανήκουν σε δημόσιο φορέα, αλλά σε ιδιωτικές επιχειρήσεις κερδοσκοπικού χαρακτήρα. Το ίδιο συμβαίνει και στη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι είναι απαραίτητη η μέτρηση της κατανάλωσης και παραγωγής ΗΕ σε πολλά σημεία του δικτύου και η σύναψη συμβολαίων μεταξύ των παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας και του φορέα που αναλαμβάνει τη μεταφορά της ΗΕ, όπως και μεταξύ του φορέα που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια και αυτών που τη διανέμουν. Τα συμβόλαια αυτά πρέπει να διέπονται από κάποιες αρχές, που αφορούν στην τιμή αγοράς-πώλησης της ΗΕ και στον τρόπο-διάρκεια λειτουργίας των μονάδων παραγωγής. Με πιο απλά λόγια, η παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας θα πραγματοποιείται στα πλαίσια της «Απελευθερωμένης Αγοράς Ενέργειας».
- B) Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι διανεμημένη, δηλαδή παράγεται σε μικρές ποσότητες από μικρές μονάδες (της τάξης των μερικών MW), κυρίως ΑΠΕ, που εντοπίζονται σε διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις από τις συγκεντρωμένες μεγάλες μονάδες παραγωγής. Επίσης, στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν υπάρχει η δυνατότητα για τις μονάδες αυτές να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί επιπλέον δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά πρέπει να συνδεθούν στο υπάρχον δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της περιοχής.
- Γ) Η ισχύς δεν ρέει πάντα προς μία κατεύθυνση στην ίδια γραμμή. Το σημαντικότερο είναι όμως ότι οι απομακρυσμένες περιοχές (ορεινές, παραμεθόριες) και συνήθως αραιοκατοικημένες έχουν πάρα πολύ υψηλό αιολικό, ηλιακό και υδάτινο δυναμικό, αλλά χαμηλή κατανάλωση.

Για να γίνει αντιληπτό τι προβλήματα προκύπτουν στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας από τη λειτουργία με τις νέες προϋποθέσεις παραθέτουμε δύο παραδείγματα:

- Σε πολλά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, παγκοσμίως, όταν οι ανεμογεννήτριες παράγουν ισχύ κοντά στις ονομαστικές τους τιμές, οι γραμμές του δικτύου φορτίζονται στα όριά τους. Ως συνέπεια, πολλές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο (που επίσης θεωρούνται ανανεώσιμες) σταματούν να διοχετεύουν ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο (λειτουργία εν κενό), σπαταλώντας βιοαέριο. Ταυτόχρονα το συμβόλαιο που έχουν συνάψει με τον διαχειριστή του δικτύου υποχρεώνει την αποπληρωμή τους, χωρίς να έχουν παράσχει την προβλεπόμενη ποσότητα ενέργειας στο δίκτυο.
- Σε πολλά σημεία των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και στην Ελλάδα, οι περιορισμοί που τίθενται από το διαχειριστή του δικτύου διανομής σχετικά με τη σύνδεση μονάδων Διανεμημένης Παραγωγής (ΔΠ)

στο δίκτυο, σε συνδυασμό με τη μείωση της ζήτησης, δυσχεραίνουν τη λειτουργία υπαρχόντων μονάδων ΔΠ και δεν επιτρέπουν πλέον τη σύνδεση άλλων μονάδων ΑΠΕ. Τέτοιοι περιορισμοί είναι η ανύψωση τάσης στο μετασχηματιστή της μονάδας και η ισχύς βραχυκύκλωσης στον Υποσταθμό Υψηλής/Μέσης τάσης (congestion). Ο πρώτος περιορισμός παραβιάζεται ήδη κυρίως τις νυχτερινές ώρες ή γενικά όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή, με αποτέλεσμα να αποσυνδέονται οι μονάδες ΔΠ από το δίκτυο από τον επιτηρητή τάσης των μονάδων. Ο δεύτερος περιορισμός έχει τεθεί σε εφαρμογή ήδη σε πολλούς υποσταθμούς με αποτέλεσμα την απόρριψη αδειοδοτήσεων πολλών μονάδων ΑΠΕ. Αυτό συμβαίνει αφού σήμερα τα συμβόλαια μεταξύ διαχειριστή δικτύου και μονάδας ΔΠ υποθέτουν ότι η μονάδα ΔΠ θα παρέχει τη μέγιστη ισχύ της όποτε αυτό είναι δυνατόν, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη ζήτηση ή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην ίδια γραμμή.

1.3. Έξυπνο δίκτυο και πιθανοί τρόποι υλοποίησής του ως λύση αύξησης της διείσδυσης μονάδων διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Όλοι οι παραπάνω λόγοι οδηγούν αναπόφευκτα σε μεταμόρφωση του υπάρχοντος δικτύου. Από ένα δίκτυο όπου η παραγωγή είναι συγκεντρωμένη, όπου η ισχύς ρέει προς μία κατεύθυνση και οι διαχειριστικές αρχές ελέγχουν το δίκτυο, σε ένα δίκτυο, όπου η παραγωγή ενέργειας είναι διανεμημένη, όπου η ισχύς ρέει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση και οι αρχές ή εταιρείες διαχείρισης δεν έχουν τον έλεγχο του δικτύου [1], [2]. Αυτός ο τύπος δικτύου φαίνεται απρόβλεπτος και για να μπορέσει να ελεγχθεί, είναι απαραίτητος ο τοπικός αυτόνομος έλεγχος του δικτύου από ευφυή συστήματα ελέγχου. Για αυτό, το μελλοντικό αυτό δίκτυο αποκαλείται έξυπνο ή ευφυές δίκτυο.

Ένας πρώτος τρόπος βελτίωσης της μειωμένης αξιοπιστίας και ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος από αυτή τη μεταμόρφωση του δικτύου είναι η ένταξη αποθηκευτικών μέσων κοντά στις μονάδες κατανεμημένης παραγωγής, που θα προσφέρουν άμεση κάλυψη της ζήτησης. Συνεπώς, ο καθορισμός του επιπέδου φόρτισης (State of Charge - SoC) των αποθηκευτικών μέσων σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητος για την αξιοπιστία του δικτύου [3], [4]. Ο έλεγχος του επιπέδου φόρτισης των μονάδων αποθήκευσης, εφόσον βρίσκονται κοντά σε μονάδες κατανεμημένης παραγωγής, δεν μπορεί να είναι κεντρικός, αλλά τοπικός.

Αυτό που μένει λοιπόν είναι ο διανεμημένος έλεγχος του δικτύου. Λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η ανάπτυξη μιας τοπολογίας δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

και της αντίστοιχης υποδομής ελέγχου που θα μπορεί να εφαρμοστεί από τα οικιακά δίκτυα μέχρι το δίκτυο διανομής. Όμως αυτή η υποδομή ελέγχου πρέπει να είναι συμβατή με υπάρχουσες τεχνολογίες ελέγχου της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Πρέπει επίσης να αλληλεπιδρά με το σύστημα ελέγχου του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, για να μπορέσει να εκμεταλλευτεί τα οφέλη των βοηθητικών υπηρεσιών του έξυπνου δικτύου. Για αυτό πρέπει να διεξαχθούν εκτεταμένες μετρήσεις και δοκιμές προσομοίωσης [5], [6]. Η τοπολογία αυτή πρέπει να είναι εφαρμόσιμη από το μικρότερο δίκτυο, όπως είναι το οικιακό δίκτυο μέχρι όλο το δίκτυο διανομής, το οποίο κατά συνέπεια πρέπει να χωριστεί - από την μεριά του ελέγχου - σε μικρότερα, διασυνδεδεμένα, παράλληλα υποδίκτυα.

Τα Μικροδίκτυα περιλαμβάνουν χαμηλής ή μέσης τάσης (LV-MV) συστήματα διανομής με μονάδες ΔΠ-ΗΕ, συστήματα αποθήκευσης και ελεγχόμενα φορτία ενώ προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες ελέγχου επί της λειτουργίας του δικτύου [7], [8], [9]. Τα συστήματα αυτά συνδέονται με το Μέσης Τάσης (MV) ή χαμηλής τάσης (LV) δίκτυο διανομής, αλλά μπορούν επίσης να λειτουργήσουν σε μια απομονωμένη λειτουργία κατά τη διάρκεια βλάβης. Από την άποψη του πελάτη, τα Μικροδίκτυα μπορούν να καλύπτουν τόσο θερμικές και ηλεκτρικές ανάγκες, ενώ θα μειώσουν επίσης τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, θα ενισχύσουν την αξιοπιστία, θα βελτιώσουν την ποιότητα της ισχύος υποστηρίζοντας την τάση, και ενδεχομένως να μειώσουν το κόστος του ενεργειακού εφοδιασμού.

Εδώ περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των μικροδικτύων. Τα κυριότερα δομικά χαρακτηριστικά ενός μικροδικτύου είναι:

- A) Η διανεμημένη παραγωγή, στην οποία εντάσσονται κυρίως οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας,
- B) Τα αποθηκευτικά μέσα,
- Γ) Τα ελεγχόμενα φορτία

ενώ τα κυριότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά είναι:

- A) Η λειτουργία νησιδοποίησης και
- B) Το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου.

Ο έλεγχος των φορτίων, δηλαδή η γνώση της πραγματικής κατανάλωσης των φορτίων κάθε χρονική στιγμή και η δυνατότητα απόρριψής τους με σκοπό την ευστάθεια ενός δικτύου αποτελεί αντικείμενο έρευνας για πάνω από μία δεκαετία στα πλαίσια της προσπάθειας διαχείρισης της ζήτησης (Demand Side Management - DSM) [10]. Ειδικότερα για ένα μικροδίκτυο, ο έλεγχος των φορτίων είναι ακόμη πιο σημαντικός, όταν το μικροδίκτυο βρίσκεται σε λειτουργία νησιδοποίησης και πρέπει να ελεγχθεί τοπικά η τάση και η συχνότητα του απομονωμένου συστήματος.

Η νησιδοποίηση είναι ένα σχέδιο στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για να απομονωθούν τμήματα του δικτύου με μια τοπική πηγή ενέργειας σε περίπτωση

διακοπής παροχής ενέργειας από το υπόλοιπο σθεναρό δίκτυο. Αυτή η πηγή ενέργειας μπορεί να είναι από ένα συμβατικό σταθμό παραγωγής ενέργειας μέχρι προηγμένες τεχνολογίες όπως οι κυψέλες καυσίμου ή οι μπαταρίες. Η δυνατότητα νησιδοποίησης είναι εξαιρετικά ευεργετική όταν χάνεται η παροχή ενέργειας από το υπόλοιπο δίκτυο, γεγονός που μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια σφάλματος στο ηλεκτρικό σύστημα. Αυτή η δυνατότητα βελτιώνει την αξιοπιστία και εξασφαλίζει ότι οι διακοπές για τους πελάτες περιορίζονται στο ελάχιστο. Αυτό το πλεονέκτημα είναι πολύ σημαντικό για δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά στις περιοχές με συχνές διακοπές ηλεκτροδότησης.

Πολυάριθμα οφέλη υπάρχουν από τη δυνατότητα «έξυπνης» νησιδοποίησης τμημάτων του δικτύου, όταν εμφανίζεται ένα σφάλμα, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που απαριθμούνται εδώ.

- Βελτιωμένοι δείκτες αξιοπιστίας [11]: Δείκτες αξιοπιστίας όπως ο δείκτης μέσης διάρκειας διακοπής πελατών και δείκτης μέσης διάρκειας διακοπής συστήματος είναι τυποποιημένα μέτρα αξιοπιστίας. Η νησιδοποίηση μπορεί σημαντικά να βελτιώσει αυτούς τους δείκτες, δεδομένου ότι λιγότεροι πελάτες θα είναι χωρίς ενέργεια και οι διακοπές θα είναι πιο σύντομες σε διάρκεια.
- Βελτιστοποίηση χρήσης των πόρων: Είναι δυνατός ο καθορισμός προτεραιοτήτων στη διαδικασία αποκατάστασης, επιτρέποντας λιγότεροι ανθρωπίνι και φυσικοί πόροι να επικεντρωθούν πρώτα σε μη νησιδοποιημένες περιοχές. Θα σωθούν άνθρωποι και οικονομικοί πόροι, δεδομένου ότι τα πληρώματα δεν θα χρειαστεί να αποσταλούν σε περιοχές κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών και να πληρώνονται υψηλότερα ποσοστά υπερωριών. Ανάλογα με τη φύση της διακοπής λειτουργίας, μπορούν να είναι σε θέση να χειριστούν την αποκατάσταση ως τμήμα των κανονικών καθημερινών προγραμμάτων τους.
- Αναβολή χρήσης κεφαλαίου: Η νησιδοποίηση μπορεί να παρέχει μια άμεση αποτύπωση για ένα προβληματικό δίκτυο και επιτρέπει την αναβολή χρήσης των παραδοσιακών λύσεων (κατασκευή σταθμών και / ή διεύρυνση, επέκταση δικτύου μεταφοράς, και αύξηση υποσταθμών διανομής) μέχρι το δίκτυο να μπορεί να επανασχεδιαστεί για να αντιμετωπίσει τα προβλήματα.

1.4. Αντικείμενο και Δομή Διατριβής

Ο σκοπός της Διδακτορικής Διατριβής είναι να αναλυθούν η υποδομή, ο αλγόριθμος ελέγχου και τα οφέλη μιας τοπολογία ευφυούς δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, που θα μπορεί να αντιμετωπίσει τις παραπάνω προκλήσεις του μετασχηματισμού του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο της διατριβής (Εισαγωγή) αναλύονται τα χαρακτηριστικά της διανεμημένης παραγωγής και εξηγούνται οι λόγοι που δυσχεραίνουν την περαιτέρω διεξόδυσή της στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του μελλοντικού «έξυπνου δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας» που θα μπορούσαν να διευκολύνουν την αυξημένη διεξόδυση των μονάδων διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο. Παρατίθεται δε και η δομή της διατριβής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο προτείνεται μια τοπολογία ευφυούς δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας διανομής και αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματά της έναντι άλλων.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση δύο τοπολογιών μικρο-δικτύων με αυξημένη διεξόδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Μέσων Αποθήκευσης Ενέργειας σε εργαστηριακό επίπεδο: της προτεινόμενης και μίας κλασσικής που εφαρμόζεται σε εμπορικά αυτόνομα δίκτυα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται ο αλγόριθμος ελέγχου της προτεινόμενης τοπολογίας και τονίζονται τα πρωτότυπα σημεία του.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων των δύο τοπολογιών. Αναδεικνύονται η αυξημένη αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας της προτεινόμενης τοπολογίας και αλγορίθμου, καθώς και η δυνατότητά της να εξασφαλίζει στις μονάδες διανεμημένης παραγωγής την παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται απαραίτητες τροποποιήσεις των υποδομών και του αλγορίθμου της προτεινόμενης μεθοδολογίας ώστε να καταστεί διαδραστική με υπάρχουσες τεχνολογίες αυτομάτου ελέγχου κτιρίων (KNX), η δε εφαρμογή τους σε πειραματικό επίπεδο καταδεικνύει την αύξηση της αξιοπιστίας στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να προσδώσει η ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογιών διαχείρισης της ζήτησης (demand-side management).

Στο έβδομο κεφάλαιο, δοκιμάζεται ο έλεγχος του έξυπνου δικτύου με έναν αλγόριθμο με μοντέλα πρόβλεψης, όπως τα ασαφή γνωστικά δίκτυα (Fuzzy Cognitive Networks).

Στο όγδοο κεφάλαιο υλοποιείται προσομοίωση του μικροδικτύου στο λογισμικό PS CAD και δοκιμάζεται σε πραγματικά δεδομένα καθώς επίσης εφαρμόζεται και σε μεγαλύτερα δίκτυα τα οποία επίσης υλοποιούνται εξ αρχής.

Τέλος, στο ένατο κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση της διδακτορικής διατριβής και αναλύονται τα θέματα πρωτοτυπίας της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΕΥΦΥΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

2.1. Εισαγωγή

Ένας πρώτος τρόπος βελτίωσης της μειωμένης αξιοπιστίας και ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος εξαιτίας της διείσδυσης των διανεμημένων παραγωγών στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ένταξη αποθηκευτικών μέσων κοντά στις μονάδες καταναμημένης παραγωγής, που θα προσφέρουν άμεση κάλυψη της ζήτησης. Συνεπώς, ο καθορισμός του επιπέδου φόρτισης (State of Charge - SoC) των αποθηκευτικών μέσων σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητος για την αξιοπιστία του δικτύου [3], [4]. Ο έλεγχος του επιπέδου φόρτισης των μονάδων αποθήκευσης, εφόσον βρίσκονται κοντά σε μονάδες καταναμημένης παραγωγής, δεν μπορεί να είναι κεντρικός, αλλά τοπικός.

Αυτό που μένει λοιπόν είναι ο διανεμημένος έλεγχος του δικτύου. Λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η ανάπτυξη μιας τοπολογίας δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και της αντίστοιχης υποδομής ελέγχου που θα μπορεί να εφαρμοστεί από τα οικιακά δίκτυα μέχρι το δίκτυο διανομής. Όμως αυτή η υποδομή ελέγχου πρέπει να είναι συμβατή με υπάρχουσες τεχνολογίες ελέγχου της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Πρέπει επίσης να αλληλεπιδρά με το σύστημα ελέγχου του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, για να μπορέσει να εκμεταλλευτεί τα οφέλη των βοηθητικών υπηρεσιών του έξυπνου δικτύου. Για αυτό πρέπει να διεξαχθούν εκτεταμένες μετρήσεις και δοκιμές προσομοίωσης. [5], [6]. Η τοπολογία αυτή πρέπει να είναι εφαρμόσιμη από το μικρότερο δίκτυο, όπως είναι το οικιακό δίκτυο μέχρι όλο το δίκτυο διανομής, το οποίο κατά συνέπεια πρέπει να χωριστεί - από την μεριά του ελέγχου - σε μικρότερα, διασυνδεδεμένα, παράλληλα υποδίκτυα. Κάθε υποδίκτυο περιλαμβάνει με τη σειρά του εμφωλευμένα, μικρότερα δίκτυα (μικροδίκτυα), κοκ. Κάθε υποδίκτυο, οποιουδήποτε επιπέδου, πρέπει να μπορεί να αποσυνδέεται από το υπόλοιπο δίκτυο και να λειτουργεί αυτόνομα ή νησιδοποιημένα (islanded mode of operation). Άρα πρέπει να είναι αυτοελεγχόμενο.

Από τα παραπάνω είναι προφανής η σημασία που έχει για τη λειτουργία του μικροδικτύου, άρα και ολόκληρου του δικτύου το σύστημα ελέγχου του (Microgrid Management System - MMS). Το σύστημα ελέγχου μπορεί να είναι ένας υπολογιστής όπου εκτελείται το αντίστοιχο λογισμικό ή ένας κεντρικός ελεγκτής που ελέγχει την ευστάθεια του δικτύου και τη ροή ενέργειας ή μπορεί να είναι σύνολο συσκευών με διανεμημένη νοημοσύνη που από κοινού ελέγχουν το μικροδίκτυο. Το σύστημα ελέγχου όμως δεν μπορεί να υλοποιηθεί, εάν δεν αποτελείται από δύο βασικές υποδομές: Το σύστημα μετρήσεων και από το σύστημα επικοινωνίας. Όταν

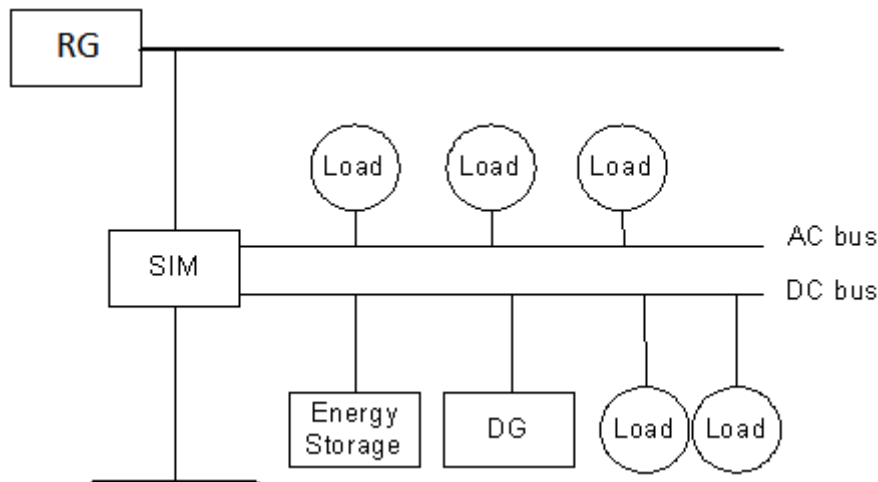
διατίθενται αυτές οι υποδομές σε ένα μικροδίκτυο, τότε το σύστημα ελέγχου καλείται να αναλάβει τις ακόλουθες λειτουργίες:

- 1) Ρύθμιση τάσης και συχνότητας κατά τη στάσιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, ειδικά όταν το μικροδίκτυο είναι νησιδοποιημένο. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο είναι η ελαφρώς παραλλαγμένη ειδικά για μικροδίκτυα μέθοδος droop-control [11]-[13]. Παρόλα αυτά για να αντιμετωπιστούν και άλλα ζητήματα όπως η κάλυψη της ζήτησης με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος, η μέθοδος αυτή ενισχύεται και με άλλες [11]-[13].
- 2) Γρήγορη αντιστάθμιση ενεργής και άεργου ισχύος με όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Είναι φανερό από τη βιβλιογραφία, ότι ένα μικροδίκτυο που ελέγχεται από έναν κεντρικό ελεγκτή πετυχαίνει παροχή των φορτίων, χωρίς όμως να αξιοποιεί τη διαθέσιμη ενέργεια του ήλιου [5], [6].
- 3) Εκτίμηση του επιπέδου φόρτισης (SoC) των αποθηκευτικών μέσων. Ουσιαστικά οι σχετικές μέθοδοι που θα αναφερθούν στο κεφάλαιο των μπαταριών υλοποιούνται εδώ.
- 4) Με βάση την εκτίμηση του SoC γίνεται εκτίμηση των δεικτών αξιοπιστίας του μικροδικτύου και καθορίζεται η πολιτική μερικής απόρριψης φορτίων. Σε αυτή την περίπτωση φυσικά τα φορτία πρέπει να χωριστούν σε περισσότερο και λιγότερο κρίσιμα, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της νησιδοποίησης.
- 5) Διαλειτουργικότητα με γειτονικά μικροδίκτυα και απόφαση νησιδοποιημένης ή όχι λειτουργίας.

2.2. Τοπολογίες Έξυπνων Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.2.1. Πρώτη τοπολογία

Πριν αναπτυχθούν οι υποδομές που αναφέρθηκαν παραπάνω για την υλοποίηση του έξυπνου δικτύου και την εφαρμογή του συστήματος ελέγχου μικροδικτύων, πρέπει να καθοριστεί μια τοπολογία ελέγχου μικροδικτύων που θα είναι επεκτάσιμη σε όλο το δίκτυο διανομής. Δύο είναι οι τοπολογίες που βασίζονται σε μικροδίκτυα. Η πρώτη τοπολογία του δικτύου διανομής φαίνεται στο Σχήμα 2.1 [1] και εφαρμόζεται για την υλοποίηση αυτόνομων δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 2.1. Πρώτη τοπολογία.

Η μονάδα SIM θα έχει τις ακόλουθες λειτουργίες:

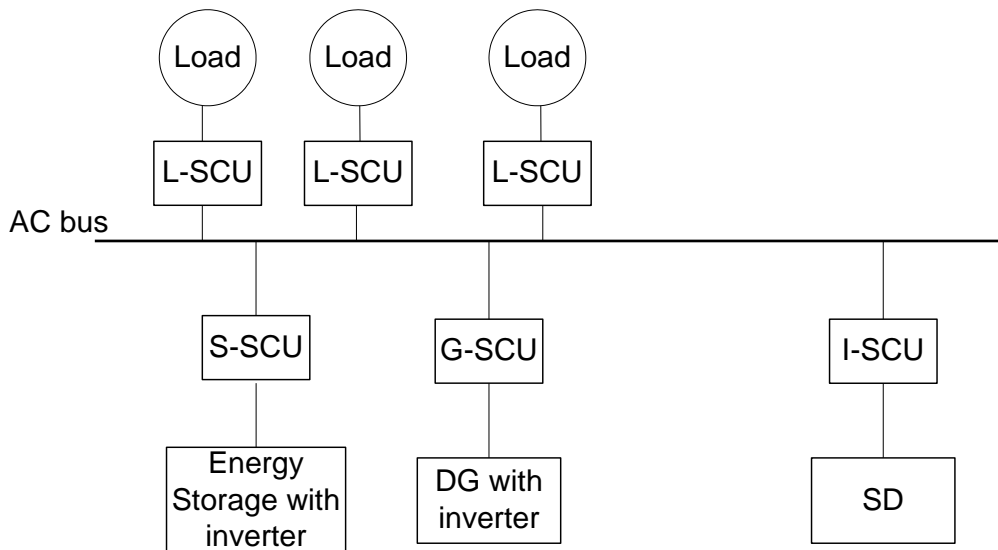
- Σύνδεση στο υπόλοιπο δίκτυο (RG)
- Σύνδεση στο ζυγό AC για φορτία AC
- Σύνδεση στο ζυγό DC για φορτία DC και σύνδεση στην ενεργειακή αποθήκη και διανεμημένη παραγωγή από ΑΠΕ
- Ρύθμιση τάσης
- Γρήγορη παροχή πραγματικής και άεργης ισχύος
- Δυνατότητα απόρριψης φορτίου

Σ' αυτό το σύστημα διανομής, ο αυτόνομος, έξυπνος έλεγχος θα διεξάγεται από όλες τις SIM του δικτύου. Σ' αυτή την περίπτωση, οι βασικές πληροφορίες που θα πρόκειται να ανταλλάσσονται μεταξύ δύο SIM θα είναι οι ανάγκες σε ενέργεια ή η διαθεσιμότητα του μικροδικτύου που βρίσκεται «πίσω» από την κάθε SIM. Η κάθε SIM θα αποφασίζει για το αν το μικροδίκτυο της θα λειτουργήσει αυτόνομα (Island-Mode) ή συνδεδεμένο με το δίκτυο (Grid Mode).

2.2.2. Προτεινόμενη τοπολογία

Η δεύτερη τοπολογία φαίνεται στο Σχήμα 2.2 [5], [6]. Δεν χρειάζεται DC ζυγός, αφού κάθε dc συσκευή συνοδεύεται από τον αντιστροφέα της. Οι Ειδικές Μονάδες Ελέγχου (Special Control Units - SCUs) κατηγοριοποιούνται σε SCU φορτίου (L-SCU), σε SCU αποθήκευσης (S-SCU), SCU γεννήτριας (G-SCU) και SCU διασύνδεσης (I-SCU), για να συνδεθεί το δίκτυο του ζυγού AC στο υπόλοιπο δίκτυο

(SD). Όλες οι SCU θα αποτελούνται από μία απλή υπομονάδα μέτρησης, μία υπομονάδα επικοινωνίας, μία υπομονάδα ενεργοποίησης και μία έξυπνη υπομονάδα η οποία χειρίζεται τη λήψη αποφάσεων της κάθε SCU και άρα καθορίζει και τον τύπο της (L-, S-, G- ή I-SCU). Η τελευταία αυτή υπομονάδα θα είναι ουσιαστικά ενσωματωμένη σε ένα λογισμικό που θα εκτελείται στον υπολογιστή ελέγχου του αντίστοιχου μικροδικτύου

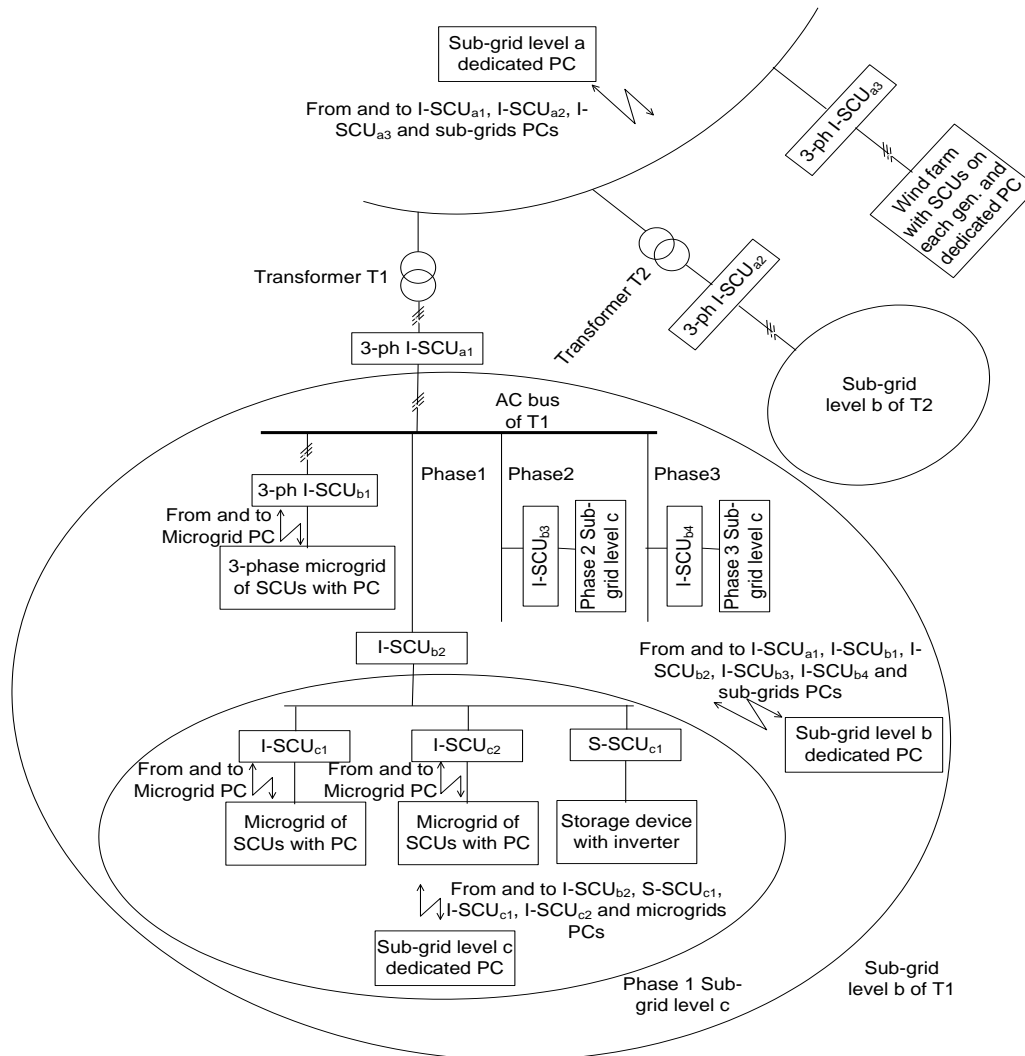


Σχήμα 2.2. Δεύτερη τοπολογία

Η επέκταση της προτεινόμενης τοπολογίας μικροδικτύου σε μεγαλύτερη κλίμακα είναι δυνατή εάν στο Σχ.2.2 συντρέχουν οι παρακάτω προϋποθέσεις: (α) η ασύρματη μετάδοση σήματος, (β) ο συγχρονισμός της τάσης του δικτύου με την τάση του μικροδικτύου κατά τη διάρκεια της μετάβασης από την islanded σε διασυνδεδεμένη λειτουργία (συγχροσκόπιο), (γ) η ένταξη των μετρήσεων των καιρικών συνθηκών στον αλγόριθμο ελέγχου, ώστε να περιλαμβάνει επιλογές πρόβλεψης με την ενσωμάτωση Ασαφών Γνωστικών Δικτύων (FCNs) [14], στον αλγόριθμο έλεγχου. Γι' αυτό, μια εμπορική έκδοση της υποδομής ελέγχου του μικροδικτύου θα ενσωματώσει τις μονάδες μέτρησης, την επικοινωνία και την ενεργοποίηση σε μία συσκευή (SCU), ως εξής: η μονάδα μέτρησης θα είναι υπεύθυνη για να συλλέξει τα απαιτούμενα στοιχεία για την ενέργεια (κατανάλωση ενέργειας, της ποιότητας της ενέργειας, τις καιρικές συνθήκες κλπ) και θα ενσωματώσει τη μονάδα επικοινωνίας και τη μονάδα ενεργοποίησης. Η μονάδα μέτρησης θα υλοποιηθεί με τη μορφή της μητρικής πλακέτας που θα είναι σε θέση να δεχθεί την ποικιλία των μονάδων επικοινωνίας. Η μονάδα μέτρησης θα έχει τη δυνατότητα να μετρά μονοφασική ή/και τριφασική τάση και τον ουδέτερο, την RMS τιμή της τάσης, την RMS τιμή του ρεύματος, συχνότητα, συντελεστή ισχύος, ενεργό ισχύ. Φαινόμενη και άεργη ισχύς μπορεί να υπολογιστεί σε μεταγενέστερο στάδιο. Η μονάδα επικοινωνίας θα εναλλάσσει δεδομένα και εντολές με τη μονάδα μέτρησης και θα είναι σε θέση να λαμβάνει δεδομένα από τους

Επιτηρητές Φάσεων (PMU) και τους αισθητήρες καιρικών συνθηκών. Η μονάδα επικοινωνίας θα είναι υπεύθυνη για τη διαβίβαση των δεδομένων που αποκτήθηκαν στο PC μέσω Wi-Fi ή GPRS πρωτόκολλα. Θα λαμβάνει επίσης εντολές ελέγχου από τον υπολογιστή και θα τα μεταφέρει στους ενεργοποιητές που θα είναι εγκατεστημένοι στη μονάδα μέτρησης. Οι ενεργοποιητές I-SCUs θα περιλαμβάνουν επίσης εργαλεία για τη συγχρονισμένη επανασύνδεση του μικροδικτύου στο υπόλοιπο δίκτυο, μετά τη νησιδοποιημένη λειτουργία του.

Ένα παράδειγμα μέρους του δικτύου διανομής σε περίπτωση εφαρμογής της δεύτερης τοπολογίας φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Το συγκεκριμένο μέρος του δικτύου μπορεί να οργανωθεί σε τρία επίπεδα. (a, b and c). Το επίπεδο-a περιλαμβάνει τρία υποδίκτυα: Αυτό του Μ/Σ T1, του Μ/Σ T2 και το αιολικό πάρκο. Οι I-SCUs αυτών των τριών υποδικτύων ελέγχονται από τον υπολογιστή του επιπέδου a. Αυτό το PC μπορεί να επικοινωνεί και με τους υπολογιστές κάθε υποδικτύου, ώστε να λαμβάνει στοιχεία κατάστασης των τριών μικροδικτύων και να στέλνει πιο εξελιγμένες εντολές. Σε χαμηλότερο επίπεδο η οργάνωση είναι παρόμοια.



Σχήμα 2.3..Προτεινόμενη τοπολογία έξυπνου δικτύου διανομής

2.2.3. Σύγκριση τοπολογιών

Θα ήταν χρήσιμο να συγκρίνουμε τα μειονεκτήματα των δύο προαναφερθεισών αρχιτεκτονικών. Η πρώτη αρχιτεκτονική έχει τρία βασικά μειονεκτήματα:

Μπορεί να είναι μια ακριβή λύση για τις εταιρείες διαχείρισης του δικτύου, μιας και θα πρέπει να κατασκευαστεί απαραίτητως ένα δίκτυο DC και να εγκατασταθούν σ' αυτό οι ακριβές SIM. Έτσι περιορίζεται η επεκτασιμότητα αυτής της τοπολογίας στο δίκτυο διανομής.

Στο υπάρχον δίκτυο τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ήδη συνδεδεμένα με το δίκτυο AC, μέσω των αντιστροφών διασύνδεσης, ενώ σε αυτή την αρχιτεκτονική προτείνεται η σύνδεση των Φ/Β κατευθείαν στο DC δίκτυο χωρίς τη χρήση αντιστροφών.

Είναι μια τοπολογία που ο έλεγχος είναι κεντρικός. Έτσι, για παράδειγμα, σε περίπτωση σφάλματος της SIM όλο το μικροδίκτυο τίθεται εκτός λειτουργίας. Επίσης, δεν μπορεί να εφαρμοστεί απόρριψη επιμέρους φορτίων και μακροπρόθεσμος ενεργειακός σχεδιασμός. Αυτό είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας αφού είναι γνωστό ότι η λειτουργία του δικτύου είναι στενά συνδεδεμένη με τη σταθερότητα και την αξιοπιστία των μικροδικτύων που το απαρτίζουν [10], [15].

Η δεύτερη αρχιτεκτονική μπορεί να έχει το ακόλουθο μειονέκτημα:

Μπορεί να είναι μια ακριβή λύση για τους πελάτες μιας και θα πρέπει να αγοράσουν έναν αντιστροφέα για κάθε συσκευή αποθήκευσης. Παρ' όλα αυτά, αυτό το επιπλέον κόστος μπορεί να εξισορροπηθεί από το χαμηλό κόστος αγοράς των SCU.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

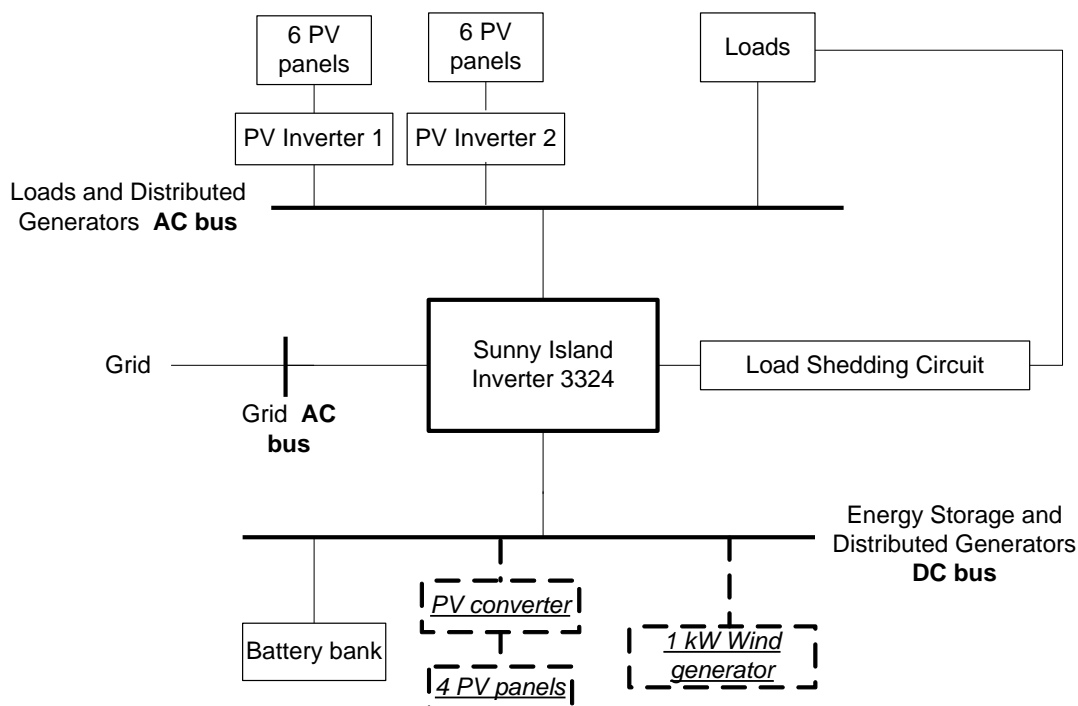
ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

3.1. Εισαγωγή

Η πρώτη τοπολογία είναι ευκολότερο να εγκατασταθεί σε μικρές κλίμακες απ' ό τι η δεύτερη, μιας και οι περισσότερες λειτουργίες της βασικής της υπομονάδας, της SIM, περιλαμβάνονται στη λειτουργία ενός εμπορικά διαθέσιμου αυτόνομου αντιστροφέα. Απ' την άλλη πλευρά όμως, καμία εμπορικά διαθέσιμη συσκευή δε μπορεί να παίζει το ρόλο μιας SCU σε μικρή κλίμακα. Συνεπώς, ο στόχος είναι να αναπτυχθούν SCU όχι μόνο για το έξυπνο δίκτυο διανομής, αλλά ακόμη και για εφαρμογές μικρής κλίμακας όπως αυτόνομα συστήματα με ΑΠΕ.

3.2. Υλοποίηση πρώτης τοπολογίας

Το μικροδίκτυο σύμφωνα με την πρώτη τοπολογία φαίνεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1. Εργαστηριακό μικροδίκτυο πρώτης τοπολογίας

Ο SMA Sunny Island 3324 αυτόνομος αντιστροφέας παίζει το ρόλο της SIM του Σχ. 2.1. Αυτή η μονάδα περιέχει ζυγό DC για τη διασύνδεση με την αποθήκη ενέργειας, όπως μπαταρίες ή Συστήματα Κυψελών Καύσιμου Υδρογόνου και για τη διασύνδεση με διανεμημένους παραγωγούς όπως τα συστήματα Φ/Β. Επίσης διαθέτει ζυγό AC για τη σύνδεση με φορτία AC και διανεμημένους παραγωγούς όπως ανεμογεννήτριες και συστήματα Φ/Β με τους αντιστροφείς τους. Ένας δεύτερος ζυγός AC παρέχει σύνδεση στο δίκτυο. Ο Sunny Island 3324 ρυθμίζει την τάση του μικροδικτύου, φροντίζει τη γρήγορη παροχή με ενεργή και άεργη ισχύ και παρέχει τη δυνατότητα απόρριψης όλου του φορτίου έτσι ώστε να αποφεύγεται η αποφόρτιση των μπαταριών.

Τα φορτία AC που χρησιμοποιήθηκαν είναι: ένα ψυγείο 90W, τέσσερις μικροί λαμπτήρες φθορισμού συνολικής ισχύος 144W, 12 λαμπτήρες πυρακτώσεως 1400W συνολικά και ένας ηλεκτρικός κινητήρας 1000W. Το μέγιστο φορτίο είναι 2634W. Δύο αντιστροφείς Sunny Boy χρησιμοποιούνται για να ενσωματώσουν στο σύστημα 12 Φ/Β πλαίσια συνολικής ισχύος 2050Wp. Η εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β επιλέγεται επίτηδες να είναι μικρότερη από το μέγιστο φορτίο μιας και αυτό θα είναι το σύνηθες στα περισσότερα δίκτυα διανομής στο μέλλον. Το σύστημα μπαταριών αποτελείται από 24 FLA μπαταρίες. Η ελάχιστη χωρητικότητα ανά 1000Wp εγκατεστημένης ισχύος ανανεώσιμων που είναι απαραίτητη για τα αυτόνομα συστήματα, είναι 100Ah [16]. Επειδή κάθε μπαταρία επιλέχτηκε με χωρητικότητα 300Ah και ονομαστική τάση 2Volt, τοποθετούνται σε δύο παράλληλες συνδεδεμένες σειρές. Κάθε μία περιέχει 12 μπαταρίες, προκειμένου να επιτευχθεί συνεχής τάση 24Volt, η οποία είναι η τάση του ζυγού συνεχούς ρεύματος του αντιστροφέα SMA. Επομένως η συνολική χωρητικότητα του συστήματος μπαταριών είναι 600Ah (300+300Ah).

Για τη συλλογή των μετρήσεων, οι δύο Φ/Β-αντιστροφείς και ο κεντρικός αντιστροφέας συνδέονται μέσω RS485 με το Sunny WebBox, το κέντρο επικοινωνίας του συστήματος. Τα δεδομένα καταγράφονται κάθε 5 λεπτά στον FTP Server του WebBox και μπορούμε να έχουμε πρόσβαση σε αυτά μέσω Ethernet από ένα PC. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται μία όψη του αυτόνομου συστήματος σύμφωνα με την πρώτη τοπολογία.

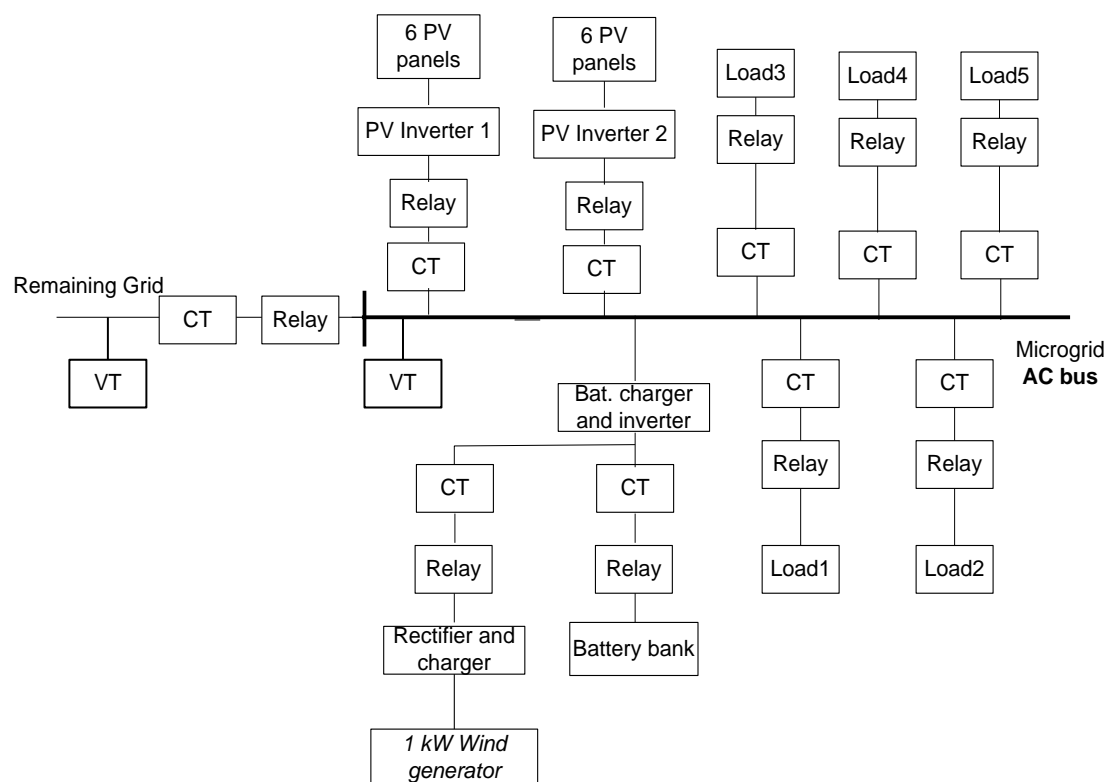


Σχήμα 3.2. Sunny Island 3324 αντιστροφέας (κίτρινος), δύο αντιστροφείς διασύνδεσης (κόκκινοι) και φορτία: ψυγείο, κινητήρας και 12 λάμπες πυρακτώσεως

Θα ήταν χρήσιμο να εξηγηθεί η διαδικασία που ακολουθείται για την απόρριψη φορτίου στο Σχ.3.1. Ο island-inverter (ο αυτόνομος μετατροπέας που υποστηρίζει την λειτουργία στη κατάσταση νησιδοποίησης) μπορεί να απορρίψει αυτόματα τα φορτία, όταν η τάση της μπαταρίας φτάσει σε πολύ χαμηλό επίπεδο [16]. Αυτό γίνεται μέσω του κυκλώματος απόρριψης φορτίου, το οποίο έχει εγκατασταθεί μεταξύ του μετατροπέα και των φορτίων και έχει μια κανονικά κλειστή επαφή (NC). Όταν η τάση της μπαταρίας και το ρεύμα έχουν μειωθεί στο 30% του επιπέδου φόρτισης και το σύστημα λειτουργεί σε ‘νησιδοποίηση’, το ρελέ ενεργοποιείται και όλα τα φορτία αποκόπτονται. Επιπλέον, δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος της ισχύος που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά. Ο ενιαίος DC ζυγός αυτής της τοπολογίας και η εφαρμοζόμενη τεχνική διαχείρισης της αποθηκευμένης ενέργειας, παρουσιάζουν σοβαρά μειονεκτήματα, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της νησιδοποίησης [5], [6]. Τα μειονεκτήματα αυτά είναι η διαδικασία απόρριψης φορτίων, η γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση μπαταριών, η λάθος εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης (SoC), των συσσωρευτών και η ανεπαρκής αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ακόμη και αν έχει συμβεί προσεκτικός υπολογισμός της διαθέσιμης παραγωγής, ζήτησης και αποθήκευσης ενέργειας. Η παραπάνω ανεπιθύμητη συμπεριφορά μπορεί να αποφευχθεί μόνο με τον κατάλληλο συντονισμό μεταξύ του ακριβούς καθορισμού του SoC και των στοχευμένων δράσεων ελέγχου.

3.3. Υλοποίηση προτεινόμενης τοπολογίας

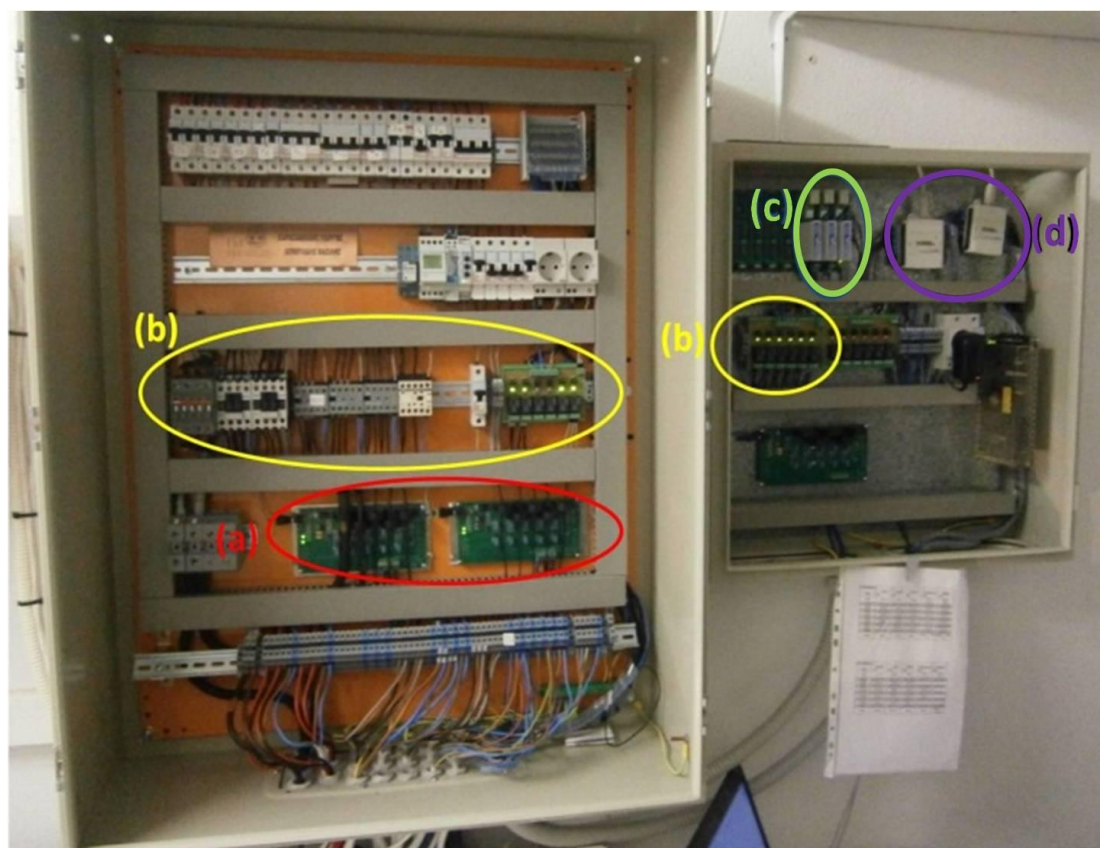
Το μικροδίκτυο όπως διαμορφώθηκε με τη νέα τοπολογία ελέγχου φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3. Εφαρμογή προτεινόμενης τοπολογίας έξυπνου μικροδικτύου

Το μικροδίκτυο αποτελείται από δύο φωτοβολταϊκούς μετατροπείς ισχύος 1,1kW με 6 διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια ο καθένας, από πέντε φορτία με μέγιστη κατανάλωση 2600W, από συστοιχία μπαταριών στα 24V με τον αντίστοιχο αντιστροφέα και χωρητικότητα 600Ah και από μία ανεμογεννήτρια ισχύος 1kWp με τον ανορθωτή-φορτιστή της. Για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση απαιτούνται δέκα συσκευές SCU: δύο για τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, πέντε για τα φορτία, μία για την αποθήκευση των μπαταριών, μία για την ανεμογεννήτρια και μία για τη διασύνδεση με το υπόλοιπο δίκτυο. Κάθε SCU περιέχει ένα μετασχηματιστή ρεύματος (CT), ένα μετασχηματιστή τάσης (VT), έναν ενεργοποιητή ρελέ και επικοινωνεί με το προσαρμοσμένο στο μικροδίκτυο PC μέσω καλωδίων και μια κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ: NI6008). Ωστόσο, λόγω του AC ζυγού, μόνο ένας μετασχηματιστής AC είναι απαραίτητος και μόνο ένας μετασχηματιστής DC τις μπαταρίες. Στον προσαρμοσμένο στο μικροδίκτυο ηλεκτρονικό υπολογιστή, μια εφαρμογή σε LabVIEW επεξεργάζεται τα δεδομένα εισόδου, τα ενσωματώνει στον αλγόριθμο ελέγχου ο οποίος είναι γραμμένος σε MATLAB και παίρνει τη σωστή

απόφαση σε κάθε κύκλο λειτουργίας. Στο Σχ. 3.4 φαίνεται ο εργαστηριακός εξοπλισμός, όπως έχει εγκατασταθεί στο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (ΤΕΙ) Δυτικής Μακεδονίας.



Σχήμα 3.4. Εργαστηριακή εγκατάσταση προτεινόμενου μικροδικτύου: (a) δέκα SCU, (b) ρελέ, (c) αισθητήρες τάσης AC-DC, (d) κάρτες DAQ.

Από τα παραπάνω σχήματα γίνεται φανερό ότι τα μειονεκτήματα που εντοπίζονται στην προηγούμενη τοπολογία δεν εμφανίζονται εδώ. Πιο συγκεκριμένα:

- Τα φορτία ελέγχονται από ξεχωριστούς ενεργοποιητές (ρελέ) και μετρητές, δίνοντας τη δυνατότητα αποτελεσματικότερης διαχείρισης της καταναλισκόμενης ενέργειας από τη πλευρά της ζήτησης. Με τον τρόπο αυτό είναι επίσης δυνατόν να γίνει διαχωρισμός των φορτίων σε περισσότερο και λιγότερο κρίσιμα.
- Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διαχωρίζονται και μπορούν να ελεγχθούν το καθένα ξεχωριστά.
- Η λάθος εκτίμηση της στάθμης φόρτισης των μπαταριών (SoC) αποφεύγεται, αφού τώρα η μπαταρίες και η ανεμογεννήτρια ελέγχονται ξεχωριστά και το κυριότερο γίνεται ξεχωριστή μέτρηση ρεύματος μπαταριών και ρεύματος ανεμογεννήτριας.

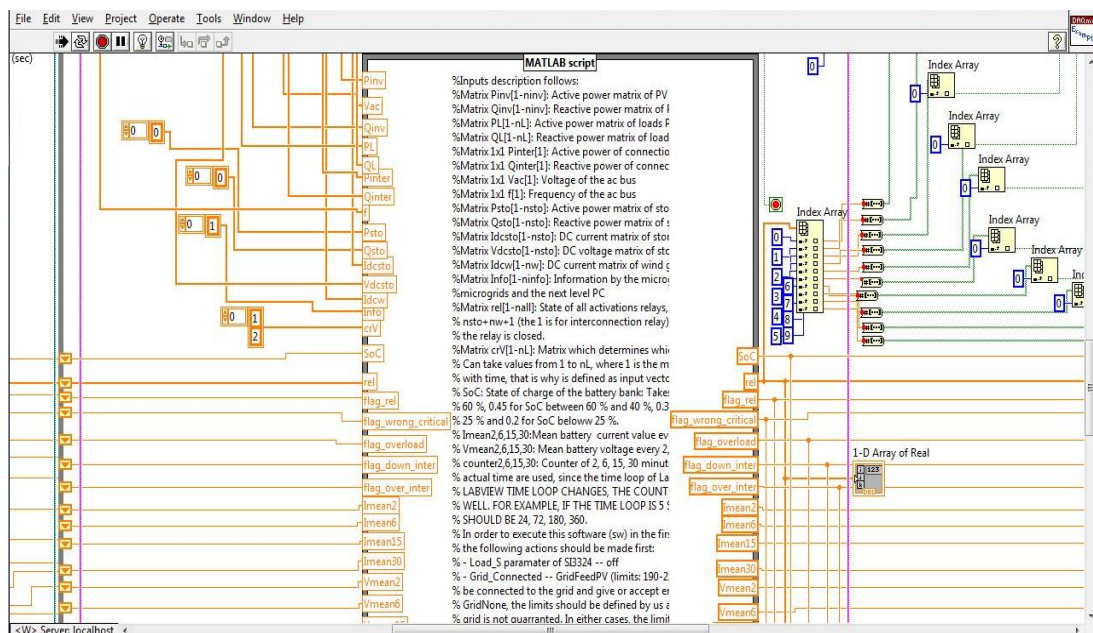
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

4.1. Εισαγωγή

Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον LabVIEW είναι υπεύθυνη για τα ακόλουθα:

- Δειγματοληψίες δεδομένων και μετατροπές τους σε τιμές RMS σε κάθε κύκλο λειτουργίας.
- Υπολογισμός των άλλων ηλεκτρικών παραμέτρων (ενεργού και άεργου ισχύος, συχνότητας, κλπ.).
- Ενσωμάτωση του αλγορίθμου ελέγχου ο οποίος είναι ανεπτυγμένος σε κώδικα MATLAB.
- Καταγραφή δεδομένων.
- Μετάδοση των εντολών που προέρχονται από τον αλγόριθμο ελέγχου στην ψηφιακή έξοδο της κάρτας DAQ.



Σχήμα 4.1. Εφαρμογή LabVIEW και ενσωματωμένος αλγόριθμος ελέγχου σε MATLAB script.

Οι είσοδοι του αλγορίθμου ελέγχου είναι οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο που ανανεώνονται σε κάθε κύκλο λειτουργίας της εφαρμογής LabVIEW και οι μεταβλητές εξόδου που ανατροφοδοτούν τον αλγόριθμο ελέγχου στο τέλος της περιόδου εκτέλεσής του. Μία από τις μεταβλητές εξόδου είναι τα δέκα σήματα που μεταδίδονται στην ψηφιακή έξοδο μιας κάρτας DAQ.

Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου MATLAB είναι μικρότερος από 10msecs. Ο αλγόριθμος αυτός εκτελείται σε κάθε κύκλο, με τη χρονική του διάρκεια να μην μπορεί να είναι μικρότερη από 100msecs, λόγω της διάρκειας της δειγματοληψίας δεδομένων και των υπολογισμών της εφαρμογής LabVIEW στην οποία είναι ενσωματωμένος ο αλγόριθμος ελέγχου. Οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο που είναι είσοδοι του αλγορίθμου είναι:

- 1) Ο πίνακας με τις AC ενεργές ισχύεις που παράγονται από τους Φ/Β μετατροπείς (P_{inv}) και αποτελείται από δύο τιμές που μετρούνται σε Watt.
- 2) Ο πίνακας με τις AC άεργες ισχύεις που παράγονται από τους Φ/Β μετατροπείς (Q_{inv}) και αποτελείται από δύο τιμές που μετρούνται σε VA_r.
- 3) Ο πίνακας με τις AC ενεργές ισχύεις που καταναλώνονται από τα φορτία (PL), που αποτελείται από πέντε τιμές.
- 4) Ο πίνακας με τις AC άεργες ισχύεις που καταναλώνονται από τα φορτία (QL), που αποτελείται από πέντε τιμές.
- 5) Η AC τάση του ζυγού του μικροδικτύου (V_{ac}).
- 6) Η AC ενεργός ισχύς που απορροφά ή τροφοδοτεί το υπόλοιπο σθεναρό δίκτυο στο σημείο διασύνδεσης του μικροδικτύου με το υπόλοιπο δίκτυο (P_{inter}).
- 7) Η άεργος ισχύς που απορροφά ή τροφοδοτεί το υπόλοιπο σθεναρό δίκτυο στο σημείο διασύνδεσης του μικροδικτύου με το υπόλοιπο δίκτυο (Q_{inter}).
- 8) Η συχνότητα του μικροδικτύου σε Hz (f).
- 9) Το συνεχές ρεύμα των μπαταριών (I_{desto}).
- 10) Η τάση DC των μπαταριών και της ανεμογεννήτριας (V_{desto}).
- 11) Το συνεχές ρεύμα της ανεμογεννήτριας (I_{dcw}).
- 12) Το διάνυσμα κρισιμότητας φορτίων (crV), που είναι το διάνυσμα καθορισμού του βαθμού σημαντικότητας των φορτίων. Αυτό μπορεί να ποικίλει με το χρόνο εντός του αλγορίθμου ή καθορίζεται από τον χρήστη, ενώ μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως 5, όπου 1 είναι το πλέον κρίσιμο και 5 είναι το λιγότερο κρίσιμο φορτίο. Αυτό το διάνυσμα χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο για να καθορίσει την πολιτική απόρριψης φορτίων του μικροδικτύου.

Αν θα πρέπει να προστεθούν περισσότερες επιλογές ελέγχου, όπως FCMs, ή αλγόριθμοι της οικονομικής βελτιστοποίησης ή αλληλεπίδραση με το χρήστη, μπορούν να προστεθούν περισσότερες είσοδοι, όπως ηλιοφάνεια, τιμές θερμοκρασίας ή οριακού κόστους [14].

Οι παρακάτω είσοδοι είναι έξοδοι του αλγορίθμου που ανατροφοδοτούν τον αλγόριθμο:

- 1) Η προηγούμενη κατάσταση φόρτισης των μπαταριών (SoC).
- 2) Η προηγούμενη κατάσταση των μονάδων ενεργοποίησης (rel), που αποτελείται από δέκα τιμές του πίνακα που παίρνει τιμές 0, για ένα ρελέ που θα είναι ανοικτό ή 1 για ένα ρελέ που είναι κλειστό. Αυτός ο πίνακας μεταφέρεται επίσης στην ψηφιακή έξοδο μιας κάρτας DAQ.
- 3) Μια ομάδα σημαιών που βοηθά στη διάγνωση βλαβών του συστήματος.
- 4) Μία ομάδα μεταβλητών αρίθμησης και μέσου όρου που χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο.

Ο αλγόριθμος ελέγχου αποτελείται από δύο κύρια μέρη:

- 1) Τη ρουτίνα ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας σε πραγματικό χρόνο, καθώς και τη ρουτίνα που αφορά στη διαλειτουργικότητα με το υπόλοιπο δίκτυο. Αυτό το μέρος του αλγορίθμου παρουσιάζεται ως μπλοκ διάγραμμα στην παράγραφο 4.2 και πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 4.2.
- 2) Τη ρουτίνα διαχείρισης των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας, η οποία αποτελείται από την υπορουτίνα εκτίμησης της στάθμης φόρτισης (SoC) των αποθηκευτικών μέσων (συστοιχίες μπαταριών) και την υπορουτίνα που χειρίζεται τις μονάδες διανεμημένης παραγωγής και πραγματοποιεί τη διαχείριση του φορτίου, ανάλογα με το επίπεδο SoC. Αυτό το μέρος του αλγορίθμου βρίσκεται μέσα στο τελευταίο μπλοκ του αλγορίθμου του Σχήματος 4.2 που περιγράφεται ως: «Energy Storage Management Routine» και παρουσιάζεται λεπτομερώς στην παράγραφο 4.3.

Πριν από αυτά τα δύο βασικά μέρη, διαγνωστικές ρουτίνες ελέγχουν την ορθή λειτουργία των ρελέ και ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν σημαίες (flags) για να υποδείξουν κάποιες περιπτώσεις σφάλματος στο μικροδίκτυο, όπως υπερτάσεις, υποτάσεις, κτλ.

Ολόκληρος ο αλγόριθμος ελέγχου αναπτύσσεται αναλυτικά ως Παράρτημα στο τέλος της Διδακτορικής Διατριβής.

4.2. Ρύθμιση τάσης και συχνότητας – Πρώτο μέρος λογισμικού

Όπως έχει παρατηρηθεί και πειραματικά, στα μικροδίκτυα με ωμικό χαρακτήρα γραμμών, δηλαδή λόγο R/X μεγαλύτερο του 2 και όπου συνυπάρχουν στρεφόμενες μηχανές με Φ/B συστήματα, υπάρχει συσχέτιση μεταξύ ενεργού ισχύος και τάσης. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη συσχέτιση $Q-V$, $P-f$, που ισχύει στα σημερινά δίκτυα [11], [13]. Αυτή η παρατήρηση, που φυσικά θα τύχει περαιτέρω διερεύνησης σε επόμενο κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής, έχει ενσωματωθεί στο παρακάτω μπλοκ διάγραμμα του Σχήματος 4.2. Τα κατώφλια τάσης (V -thresholds) και συχνότητας (f -thresholds) στο μπλοκ διάγραμμα είναι δυναμικά και μπορούν να προσδιοριστούν από το χρήστη, ανάλογα με τα κατώφλια τάσης που απαιτούνται για την ασφαλή λειτουργία των αντιστροφών των Φ/B συστοιχιών και των συστοιχιών των μπαταριών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το άνω όριο της τάσης έχει οριστεί μικρότερο από τα όρια των αντιστροφών των μπαταριών και των Φ/B συστοιχιών (250Volts), ενώ το κάτω όριο έχει οριστεί μεγαλύτερο από τα κάτω όρια των αντιστροφών (180Volts).

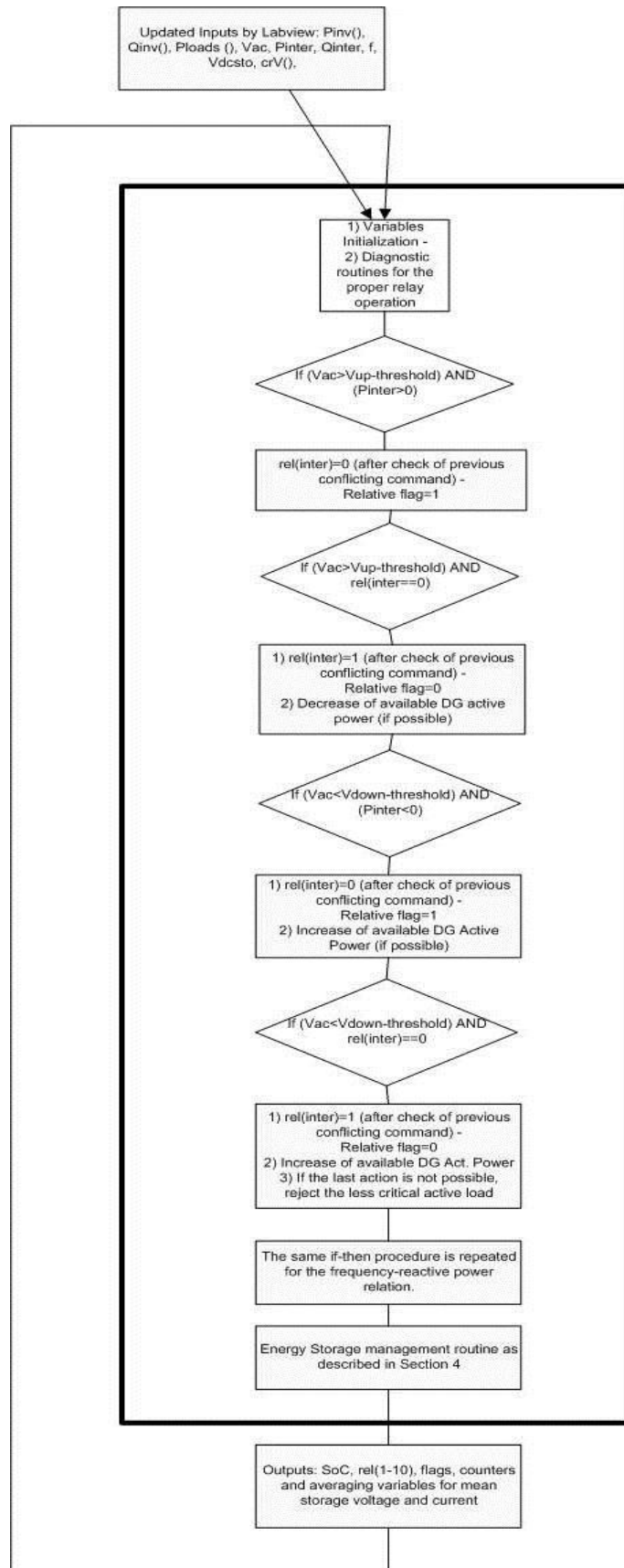
4.3. Μακροπρόθεσμη διαχείριση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας και διανεμημένης παραγωγής – Δεύτερο μέρος λογισμικού

4.3.1. Τεχνική προσδιορισμού επιπέδου φόρτισης μονάδων αποθήκευσης ενέργειας

Η επιτυχία μιας τεχνικής διαχείρισης αποθήκευσης ενέργειας σε εφαρμογές έξυπνων δικτύων διανομής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αξιοπιστία της μεθόδου εκτίμησης της στάθμης φόρτισης των μπαταριών (SoC). Η μέθοδος αυτή πρέπει να είναι ακριβής, αποδοτική, απλή και να είναι εμπορικά εκμεταλλεύσιμη ή με δύο λέξεις μέθοδος "plug and play". Οι μέθοδοι για την εκτίμηση της SoC μπαταριών είναι οι ακόλουθοι και παρά τα πλεονεκτήματά τους, μόνο η τελευταία πληροί τα παραπάνω κριτήρια:

- A) Η μέθοδος μέτρησης της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη [4]. Είναι ακριβής, αλλά δαπανηρή μέθοδος και τα χημικά στοιχεία του εξοπλισμού μέτρησης πρέπει να τοποθετούνται σε πολλές μπαταρίες της συστοιχίας.
- B) Η μέθοδος ανοικτού κυκλώματος, η οποία δεν μπορεί να εφαρμοστεί για μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο [4].

- Γ) Η μέθοδος Coup de Fouet απαιτεί την πλήρη φόρτιση των μπαταριών, κάτι που σχεδόν ποτέ δεν συμβαίνει σε πραγματικά συστήματα [17].
- Δ) Οι μέθοδοι με Νευρωνικά Δίκτυα. Απαιτούν εκτενή δεδομένα λειτουργίας από την συγκεκριμένη μπαταρία, πράγμα που σημαίνει ότι δεν είναι εμπορικά εκμεταλλεύσιμη [18], [19].
- Ε) Η μέθοδος φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης παρουσιάζει υψηλή ευαισθησία στην θερμοκρασία και είναι αρκετά περίπλοκη [20].
- ΣΤ) Η μέθοδος ισοζυγίου Ah. Είναι αρκετά ακριβής, αλλά δαπανηρή και απαιτεί τακτική επαναρρύθμιση [4].
- Ζ) Η μέθοδος με φίλτρο Kalman. Χρειάζεται μεγάλη υπολογιστική ικανότητα και τον καθορισμό των αρχικών παραμέτρων [4].
- Η) Το γραμμικό μοντέλο, το οποίο είναι απλό, αξιόπιστο και κατάλληλο για εφαρμογές των φωτοβολταϊκών μπαταριών [16], [4].



Σχήμα 4.2. Αλγόριθμος ελέγχου σε MATLAB. Αναπτύσσεται με λεπτομέρεια στο Παράρτημα Ι

Μια εφαρμογή του γραμμικού μοντέλου σε συστήματα αποθήκευσης μικροδικτύων βρίσκεται στην βιβλιογραφία [16]. Για τον προσδιορισμό της κατάστασης φόρτισης (SoC) μπαταριών, η τάση του DC ζυγού και το ρεύμα μετρώνται συνεχώς. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης των μπαταριών, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές SoC, έχουν αναπαραχθεί και οι κανονικοποιημένες μετρήσεις του DC-ζυγού συγκρίθηκαν με τις χαρακτηριστικές καμπύλες. Η νέα SoC προσδιορίζεται από τις καμπύλες, αφού έχουν ληφθεί υπόψη η σωστή χρονοκαθυστέρηση και η υστέρηση τάσης. Η νέα SoC οδηγεί στις ακόλουθες ενέργειες: (i) καμία ενέργεια δεν γίνεται, εάν η SoC βρίσκεται πάνω από την καμπύλη No1 SoC (40%), (ii) εμφανίζεται προειδοποιητικό σήμα, εάν η SoC βρίσκεται μεταξύ καμπύλης SoC No1 (40%) και της καμπύλης SoC No2 (30%) και (iii) γίνεται απόρριψη όλων των φορτίων, εάν η SoC βρίσκεται κάτω από την καμπύλη No3 (30%) [16]. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος είναι αναποτελεσματική, επειδή και άλλες DC-πηγές είναι συνδεδεμένες με το DC ζυγό και επιπλέον το προηγούμενο SoC και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κάθε πηγή και κατανάλωση του κάθε φορτίου αγνοούνται [5], [6].

Η προτεινόμενη βελτίωση απαιτεί τη μέτρηση μόνο της τάσης και του ρεύματος DC των μπαταριών, λαμβάνει υπόψη την προηγούμενη SoC, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τους διανεμημένους παραγωγούς και τους ενεργούς καταναλωτές και προχωρά σε πιο στοχευμένες ενέργειες ελέγχου. Είναι ένας συνδυασμός του γραμμικού μοντέλου και πειραματικών παρατηρήσεων κατά τη λειτουργία του συστήματος [16], [4].

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας της εφαρμογής LabVIEW, κάθε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και η κατανάλωση κάθε φορτίου μετρώνται χωριστά, μαζί με την τάση και το ρεύμα των μπαταριών. Η μέση τάση ανά κύτταρο μπαταρίας και το μέσο ρεύμα των μπαταριών ανά 100 Ah υπολογίζονται για περιόδους 2, 6, 15 και 30 λεπτών ανεξάρτητα ($V_{\text{mean-m}}$, $I_{\text{mean-m}}$, όπου $m = 2,6,15,30$).

Επίσης, αναπαριστώνται εντός του λογισμικού οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος που αντιστοιχούν σε SoC ίση με το 60%, 40% και 25%, όπως ορίζονται στις (1), (2) και (3), αντιστοίχως, όπου V είναι η τάση ανά κύτταρο της μπαταρίας και I είναι το ρεύμα μπαταρίας ανά 100 Ah. Οι καμπύλες αναπαριστώνται και στο Σχήμα 4.3, ενώ στο Σχήμα 4.4 φαίνονται οι μπαταρίες του μικροδικτύου.

SoC=60 %

$$V=2,03-0,005*I, \text{ for } I>1 \text{ A}$$

$$V=2,06-0,035*I, \text{ for } I<1 \text{ A} \quad (1)$$

SoC=40 %

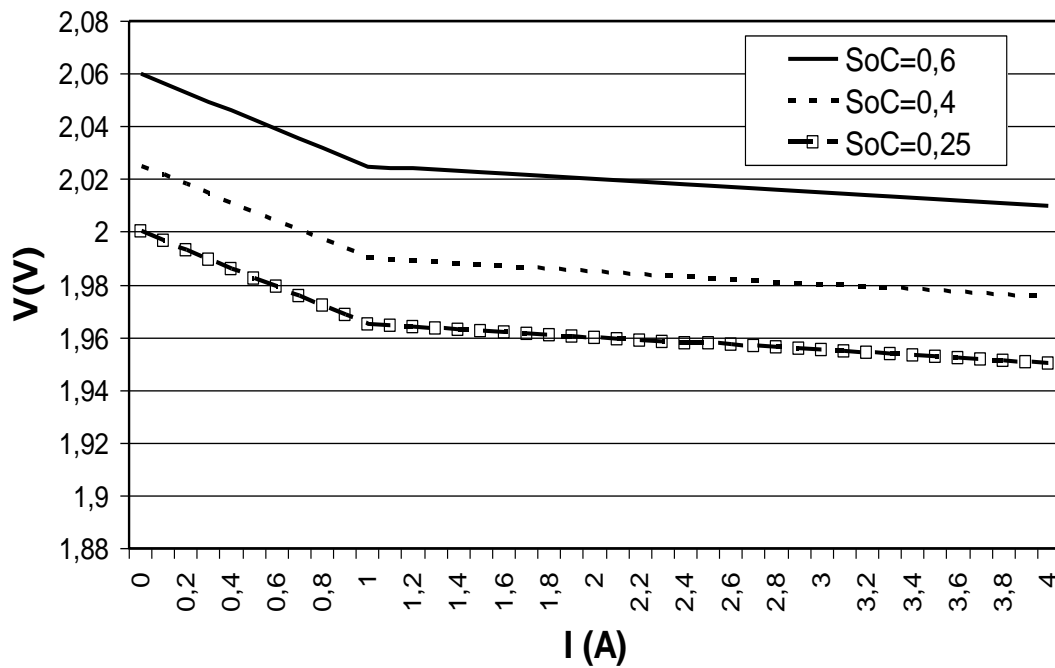
$$V=1,995-0,005*I, \text{ for } I>1\text{A}$$

$$V=2,025-0,035*I, \text{ for } I<1 \text{ A} \quad (2)$$

SoC=25 %

$$V=1,97-0,005*I, \text{ for } I>1 \text{ A}$$

$$V=2 -0,035*I, \text{ for } I<1 \text{ A} \quad (3)$$



Σχήμα 4.3. Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος – τάσης μπαταριών μολύβδου οξέος που αντιστοιχούν σε SoC ίσο με 60%, 40% και 25%.



Σχήμα 4.4. Συστοιχία μπαταριών μικροδικτύου.

Αυτές οι τιμές SoC επιλέγονται προκειμένου να εξασφαλιστεί η τροφοδοσία του πιο κρίσιμου φορτίου του μικροδικτύου για τουλάχιστον 12 ώρες σε 'νησιδοποιημένη' λειτουργία χρησιμοποιώντας μόνο μονάδες αποθήκευσης. Επιπλέον, οι πρώτες δοκιμές του μικροδικτύου έδειξαν ότι η εφαρμογή των εν λόγω ορίων επιτυγχάνει μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Οι μέσες κανονικοποιημένες τιμές ρεύματος και τάσης ($V_{\text{mean-m}}$, $I_{\text{mean-m}}$) συγκρίνονται με τις χαρακτηριστικές καμπύλες του Σχήματος 4.3. Μπορούν να εμπίπτουν σε τέσσερις "περιοχές SoC": Περιοχή No1 πάνω από την καμπύλη 60% στο Σχ. 4.3, περιοχή No2 μεταξύ των καμπυλών 60 και 40%, περιοχή No3 μεταξύ 40 και 25% και η περιοχή No4 κάτω από την καμπύλη 25% στο Σχ. 4.3. Στη συνέχεια, η πραγματική SoC (SoC_i) καθορίζεται, λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη SoC (SoC_{i-1}). Αυτή η παράμετρος λαμβάνεται υπόψη, δεδομένου ότι οι δοκιμές έδειξαν ότι η εναλλαγή on-off μεγάλων φορτίων μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλα ρεύματα εκφόρτισης ή φόρτισης, που με τη σειρά τους είναι παραπλανητικά για τη σωστή εκτίμηση της SoC από τη γραμμική μέθοδο. Η λάθος εκτίμηση SoC με τον παλιό αλγόριθμο ελέγχου του μικροδικτύου οδήγησε σε άσκοπες απορρίψεις φορτίων και κατά συνέπεια μειωμένη αξιοπιστία παροχής ενέργειας στους καταναλωτές [16], [4].

Έτσι, ο όρος "ψευδο-Κατάσταση Φόρτισης» (ψευδο-SoC) ορίζεται ως μία προσωρινή τιμή SoC που ανατίθεται στις μπαταρίες, όταν εμφανίζονται μεγάλα κανονικοποιημένα ρεύματα εκφόρτισης για πάνω από 2 λεπτά ($I_{\text{mean-2}} > 2$ A) και ταυτόχρονα το σημείο ($V_{\text{mean-2}}$, $I_{\text{mean-2}}$) υπερπηδά τουλάχιστον μία από τις παραπάνω περιοχές SoC του Σχήματος 4.3. Όταν δηλαδή η μέση τάση και το ρεύμα σε διάστημα 2 λεπτών φαίνεται να πέφτουν από την περιοχή SoC No1 στην περιοχή SoC No3 ή

No4 του Σχήματος 4.3, οι μπαταρίες φαίνεται να βρίσκονται σε επίπεδο φόρτισης ίσο με το ψευδο-SoC και το οποίο είναι πάντα η τιμή της χαμένης περιοχής SoC. Για παράδειγμα αν το σημείο ($V_{\text{mean-2}}$, $I_{\text{mean-2}}$) πέσει από την περιοχή No1 στην περιοχή No3, η τιμή SoC των μπαταριών είναι η τιμή της περιοχής No2.

Αυτή η ενέργεια γίνεται για να ανιχνευθεί αν η κατάσταση αυτή είναι μόνιμη, δηλαδή προήλθε από μειωμένη διαθεσιμότητα παραγωγών ενέργειας (πχ. παρατεταμένη συννεφιά) ή είναι αποτέλεσμα προσωρινού φαινομένου (πχ αποσυγχρονισμού ενός Φ/Β- αντιστροφέα λόγω διαταραχής τάσης) οπότε είναι δυνατόν το σύστημα να επανέλθει.

4.3.2. Τεχνική διαχείρισης διανεμημένης παραγωγής και φορτίων με βάση το επίπεδο φόρτισης των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας

Μετά τον προσδιορισμό του SoC, λαμβάνονται οι ακόλουθες δράσεις για τη διαχείριση της Διανεμημένης Παραγωγής και του φορτίου:

1. Εάν $I_{\text{mean-2}} > 2 \text{ A}$ και το σημείο ($V_{\text{mean-2}}$, $I_{\text{mean-2}}$) έχει υπερπηδήσει μία από τις παραπάνω περιοχές SoC του Σχ.4.3, δηλαδή $(\text{SoC}_{i-1} - \text{SoC}_i) > 20\%$, τότε $\text{SoC}_i = \text{SoC}_{i-1} - 10\%$ (ψευδο-SoC). Τότε, η παραγωγή ενεργού ισχύος από τη διαθέσιμη μονάδα ΑΠΕ (βιοαέριο ή Φ/Β) αυξάνεται σύμφωνα με το διαθέσιμο βήμα αύξησης της ισχύος της αντίστοιχης μονάδας και το επίπεδο SoC_i . Ένας τρόπος ελέγχου της ενεργού ισχύος εξόδου των Φ/Β πάρκων αναλύεται στο αμέσως παρακάτω υποκεφάλαιο 4.3.3. Στην περίπτωση που η αύξηση της παραγωγής ενέργειας από τους μονάδες DG του μικροδικτύου δεν είναι δυνατή, αρχίζει να εφαρμόζεται η πολιτική απόρριψης φορτίων: Ένα ή περισσότερα ενεργά φορτία του μικροδικτύου θα απορριφθούν, ξεκινώντας από το λιγότερο κρίσιμο φορτίο.
2. Σε οποιοδήποτε άλλο συνδυασμό ρεύματος εκφόρτισης και προηγούμενου SoC, η πραγματική τιμή SoC έχει ανατεθεί στη SoC_i και , η παραγωγή ενεργού ισχύος από τη διαθέσιμη μονάδα ΑΠΕ (βιοαέριο ή Φ/Β) αυξάνεται σύμφωνα με το διαθέσιμο βήμα αύξησης της ισχύος της αντίστοιχης μονάδας και το επίπεδο SoC_i . Στην περίπτωση που η αύξηση της παραγωγής ενέργειας από τους μονάδες DG του μικροδικτύου δεν είναι δυνατή, αρχίζει να εφαρμόζεται η πολιτική απόρριψης φορτίων: Ένα ή περισσότερα ενεργά φορτία του μικροδικτύου θα απορριφθούν, ξεκινώντας από το λιγότερο κρίσιμο φορτίο.

3. Εάν οι μπαταρίες φορτίζουν για τουλάχιστον 15 λεπτά, δηλαδή αν $I_{\text{mean-15}} < 0$ A, η πραγματική τιμή της SoC γίνεται SoC_i και εάν υπάρχουν φορτία που έχουν απορριφθεί προηγουμένως, ενεργοποιούνται σταδιακά κάθε 15 λεπτά, ξεκινώντας από το πιο κρίσιμο. Αυτό το τρίτο στάδιο προστέθηκε, επειδή οι αλγόριθμοι ελέγχου των μικροδικτύων ως σήμερα δεν υποστηρίζουν κανένα φορτίο, μέχρι η SoC της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας φθάσει το όριο του 30%. Δεδομένου ότι οι μπαταρίες των Φ/Β δεν επιτρέπεται να φορτίζουν με υψηλό ρεύμα, αυτό οδηγεί στην απώλεια της πλεονάζουσας ηλιακής ή αιολικής ενέργειας.

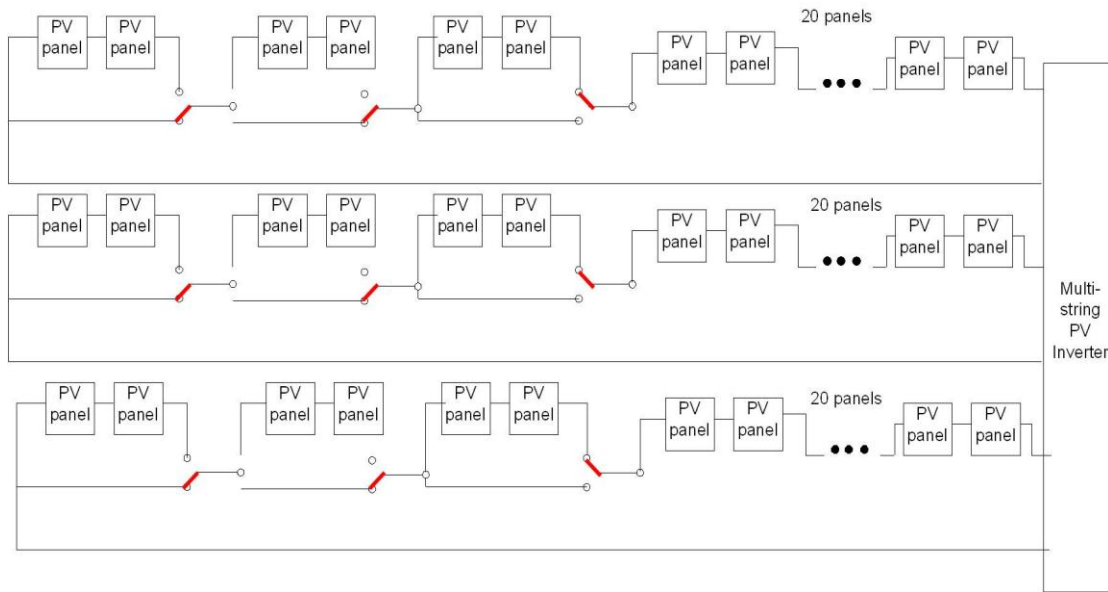
4.3.3. Έλεγχος Ενεργού Ισχύος εξόδου Φ/Β συστημάτων

Τα τελευταία χρόνια πολλοί ερευνητές εστιάζουν στον έλεγχο της ενεργού και άεργης ισχύος των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, ώστε να προσφέρουν τις βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο [21] – [28]. Οι περισσότερες από τις προσπάθειες αυτές αφορούν αλλαγές στο εσωτερικό των μετατροπέων που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα, καθιστώντας τες δαπανηρές λύσεις, ειδικά για τις υφιστάμενες εγκαταστάσεις. Οι υπόλοιπες προσπάθειες περιλαμβάνουν την προσθήκη κυκλωμάτων ελέγχου μεταξύ των φωτοβολταϊκών μετατροπέων και φωτοβολταϊκών συστοιχιών, διακινδυνεύοντας έτσι την αξιοπιστία των Φ/Β μονάδων, σε περίπτωση δυσλειτουργίας.

Η τεχνική ελέγχου της ενεργού ισχύος εξόδου των Φ/Β συστημάτων που προτείνεται εδώ πραγματοποιείται με την εφαρμογή ρελέ ενεργοποίησης στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Ο αριθμός των ρελέ εξαρτάται από την απαιτούμενη ΦΒ ισχύ που πρέπει να ελεγχθεί. Στο Σχ.4.5, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του εφαρμοζόμενου ελέγχου σε μία τυπική Φωτοβολταϊκή Εγκατάσταση. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η ισχύς Φ/Β εξόδου μπορεί να ποικίλει θεωρητικά μεταξύ 70% και 100% της εγκατεστημένης ΦΒ ισχύος, με βήμα 3,3%. Είναι προφανές ότι το βήμα της ισχύος εξόδου μπορεί να είναι διαφορετικό εάν τα ρελέ ενεργοποίησης είναι εγκατεστημένα σε ένα ή σε τρία πλαίσια. Η διακοπή των κυκλωμάτων των συστοιχιών, κατά την αλλαγή της κατάστασης των ρελέ δεν επηρεάζει τη συνεχή τροφοδοσία από τα Φ/Β λόγω των πυκνωτών στην DC-πλευρά των φωτοβολταϊκών μετατροπέων.

Σε αυτήν την τεχνική, το ακόλουθο μειονέκτημα μπορεί να παρατηρηθεί: Σε πρακτικές εφαρμογές, όπου η επιλογή MPPT είναι σε λειτουργία, το βήμα ισχύος εξόδου (3,3% στο Σχ.4.5) δεν μπορεί να προβλεφθεί επακριβώς. Ωστόσο, αυτό το μειονέκτημα μπορεί να ξεπεραστεί με την επαναληπτική φύση του αλγόριθμου ελέγχου, όπως θα καταδειχθεί στα αποτελέσματα.

Οι ηλεκτρονόμοι-ρελέ μπορεί να ενεργοποιηθούν ακολουθώντας διάφορες λογικές, ανάλογα με την επιθυμητή βοηθητική υπηρεσία που πρέπει να παρέχουν. Εδώ, οι ηλεκτρονόμοι στις Φ/Β συστοιχίες ελέγχονται από την εφαρμογή LabVIEW. Δηλαδή, τα ρελέ ενεργοποιούνται από τις ψηφιακές εξόδους των καρτών ανάκτησης δεδομένων (DAQ: NI-6008:USB). Κάθε φορά που ζητείται αύξηση της παραγόμενης ισχύος από τις μονάδες ΑΠΕ του μικροδικτύου, ένα ρελέ ενεργοποιείται.



Σχήμα 4.5. Έλεγχος ισχύος εξόδου Φ/Β πάρκου.

Η τεχνική ελέγχου των φωτοβολταϊκών εφαρμόζεται και στις δύο φωτοβολταϊκές συστοιχίες του Σχ.3.3, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 4.6. Δεδομένου ότι το κατώτερο όριο της τάσης λειτουργίας των φωτοβολταϊκών μετατροπέων είναι 150V και κάθε ένα από τα έξι πλαίσια των συστοιχιών έχει τάση ανοικτού κυκλώματος 37V, εγκαθίσταται ένας (1) ενεργοποιητής σε ένα από τα έξι πλαίσια κάθε συστοιχίας. Κάθε ρελέ της συστοιχίας ενεργοποιείται από την αντίστοιχη ψηφιακή έξοδο των καρτών DAQ.



Σχήμα 4.6. Δύο φωτοβολταϊκές συστοιχίες μικροδικτύου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1. Πρωτόκολλο-Διαδικασία μετρήσεων

Οι μετρήσεις που συλλέγονται χωρίζονται σε τρεις ομάδες:

- στις μετρήσεις όπου η σύνδεση στο υπόλοιπο δίκτυο είναι πάντοτε ενεργή (διασυνδεδεμένη λειτουργία)
- σ' αυτές όπου το μικροδίκτυο είναι αποσυνδεδεμένο από το υπόλοιπο δίκτυο περιστασιακά (περιστασιακά απομονωμένη λειτουργία).
- σ' αυτές όπου το μικροδίκτυο είναι αποσυνδεδεμένο από το υπόλοιπο δίκτυο (αυτόνομο δίκτυο).

Κάθε ομάδα μετρήσεων διαρκεί δύο εβδομάδες. Τα φορτία του μικροδικτύου αποτελούνται από: (α) ένα φορτίο βάσης το οποίο αποτελείται από το ψυγείο (90W), τους τέσσερις λαμπτήρες φθορισμού 144W και δύο λαμπτήρες πυρακτώσεως των 150W έκαστος (σύνολο 300W). Το φορτίο αυτό μένει διαρκώς ενεργοποιημένο από το χρήστη, για αυτό και χαρακτηρίστηκε ως φορτίο-βάσης. Η συνολική του ισχύς είναι 534W. (β) Τα υπόλοιπα φορτία (λαμπτήρες πυρακτώσεως και κινητήρας) ακολουθούν το πρόγραμμα μεταβολής του φορτίου που φαίνεται παρακάτω, και για τις τρεις ομάδες μετρήσεων. Στην περιστασιακά απομονωμένη λειτουργία κάθε ώρα, ξεκινώντας από τις 09:30, η σύνδεση στο δίκτυο ενεργοποιείται και απενεργοποιείται μέχρι τις 13:30. Μετά τις 13:30 η σύνδεση παραμένει ενεργή ή ανενεργή μέχρι το επόμενο πρωί.

Πίνακας 5.1. Πρόγραμμα μεταβολής φορτίων

| <u>1^η εβδομ.</u> | 1 ^η μέρα | 2 μέρα | 3 μέρα | 4 μέρα | 5 μέρα |
|-----------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| Ωρα | | | | | |
| 9.00 πμ | + 500 W | +600 W | + K _{IV} | + K _{IV} +200 W | + K _{IV} +600 W |
| 10.00 πμ | + 600 W | +K _{IV} | + 500 W | + 300 W | + 300 W |
| 11.00 πμ | + K _{IV} | +500 W | + 600 W | + 600 W | + 200 W |
| 12.00 μμ | - K _{IV} | - 500 W | - 600 W | - 600 W | - 200 W |
| 13.00 μμ | -600 W | - K _{IV} | - 500 W | - 300 W | - 300 W |
| 14.00 μμ | -500 W | - 600 W | - K _{IV} | - K _{IV} -200 W | - K _{IV} -600 W |
| | | | | | |

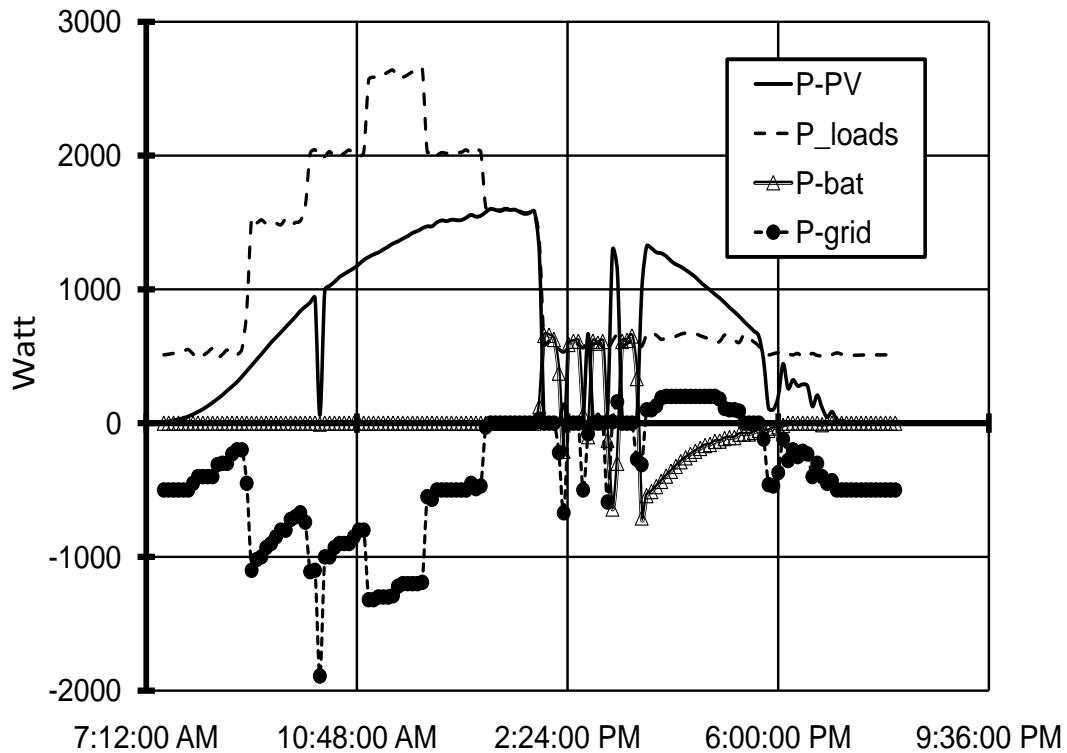
| 2^η εβδομ. | 1^η μέρα | 2 μέρα | 3 μέρα | 4 μέρα | 5 μέρα |
|-----------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------|
| Ωρα | | | | | |
| 9.00 πμ | + 500 W | + 600 W | + K _{IV} | K _{IV} +1100 W | + K _{IV} +1100 W |
| 10.00 πμ | + 600 W | + K _{IV} | + 500 W | - | - |
| 11.00 πμ | - 600 W | - K _{IV} | - 500 W | - 800 W | - |
| 12.00 μμ | + K _{IV} | + 500 W | + 600 W | -300 W | - |
| 13.00 μμ | - K _{IV} | - 500 W | - 600 W | - | - |
| 14.00 μμ | - 500 W | - 600 W | - K _{IV} | - K _{IV} | - K _{IV} -1100 W |

5.2. Αποτελέσματα μετρήσεων πρώτης τοπολογίας

Σ' αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να εξηγηθεί η διαδικασία κατά την οποία η επιλογή απόρριψης φορτίου του αυτόνομου αντιστροφέα ενεργοποιείται. Μέσα απ' αυτή την επιλογή, ο αντιστροφέας μπορεί αυτόματα να απενεργοποιήσει τα φορτία, όταν η τάση της μπαταρίας έχει «πέσει» πολύ [16]. Αυτό γίνεται από το ρελέ απόρριψης φορτίου (load shedding relay), το οποίο υπάρχει εγκατεστημένο μεταξύ του αντιστροφέα και των φορτίων. Το ρελέ έχει μια «κανονικά κλειστή» επαφή (NC). Όταν η τάση και η ένταση της μπαταρίας έχουν ελαττωθεί σε ένα επίπεδο 30% και το σύστημα λειτουργεί σε απομονωμένη κατάσταση (Island mode), το ρελέ ενεργοποιείται και τα φορτία αποσυνδέονται.

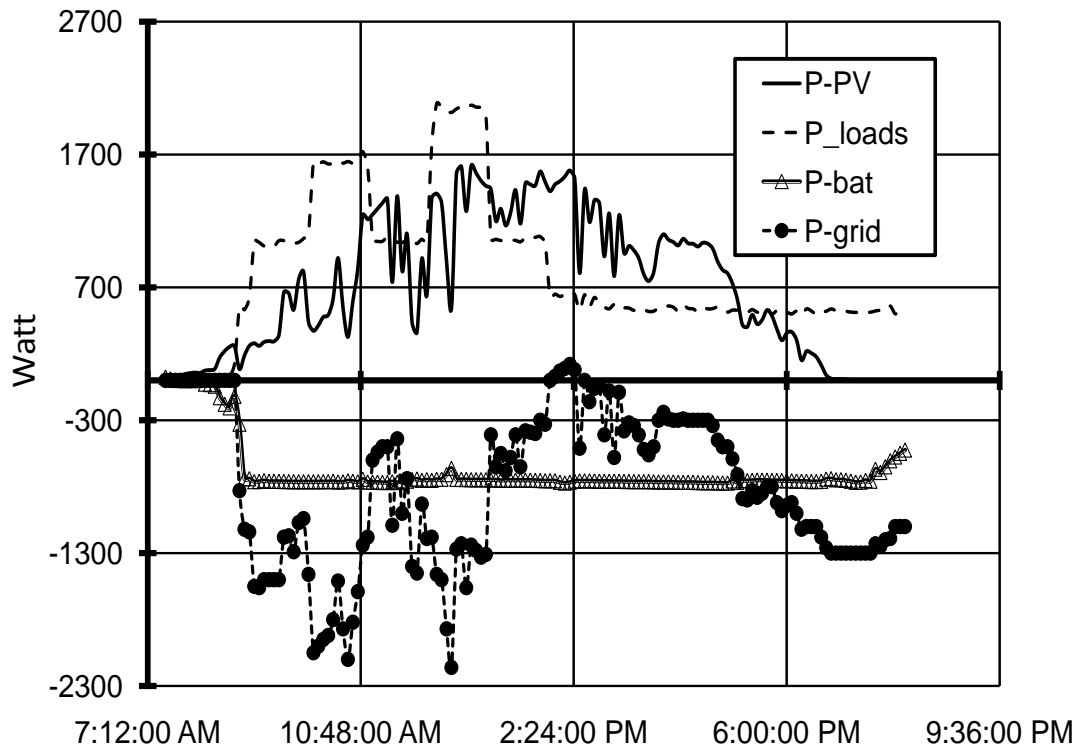
5.2.1. Μετρήσεις χωρίς προσθήκη μονάδας διανεμημένης παραγωγής στην DC πλευρά της πρώτης τοπολογίας

Στα Σχήματα 5.1, 5.2 παρατηρούνται τυπικές περιπτώσεις διασυνδεδεμένης λειτουργίας. Στο Σχήμα 5.1 παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της νύχτας, το φορτίο βάσης καλύπτεται από το δίκτυο, προκειμένου να διατηρήσει τις μπαταρίες φορτισμένες. Καθώς τα Φ/Β πλαίσια αρχίζουν να παράγουν ενέργεια, η παροχή του δικτύου μειώνεται σταδιακά. Μετά από τις 14.00 μμ., αφού έχει μείνει μόνο το φορτίο βάσης, η παραγωγή ηλιακής ενέργειας απορρίπτεται από την SIM του Σχήματος 3.1 και οι μπαταρίες συμμετέχουν στην παροχή του φορτίου για σύντομο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια φορτίζονται από τα Φ/Β.



Σχήμα 5.1. Καμπύλες ισχύος 18^{ης} Μαΐου (3η μέρα 1^{ης} εβδομάδας του Πίνακα 5.1)

Στη δεύτερη περίπτωση στο Σχήμα 5.2 φαίνεται ότι διαμορφώνονται πιο ομαλές καμπύλες. Όταν τα φορτία είναι αρκετά ψηλά, το υπόλοιπο δίκτυο και τα Φ/Β πλαίσια συνεργάζονται για να καλύψουν τις ανάγκες του φορτίου αλλά να φορτίσουν και τις μπαταρίες. Όταν το φορτίο ελαττωθεί, τα Φ/Β πλαίσια αναλαμβάνουν να κάνουν και τα δύο. Μετά τη δύση του ήλιου, το δίκτυο τροφοδοτεί τα φορτία και οι μπαταρίες σταματούν.



Σχήμα 5.2. Καμπύλες ισχύος 23^{ης} Μαΐου (1η μέρα 2^{ης} εβδομάδας του Πίνακα 5.1)

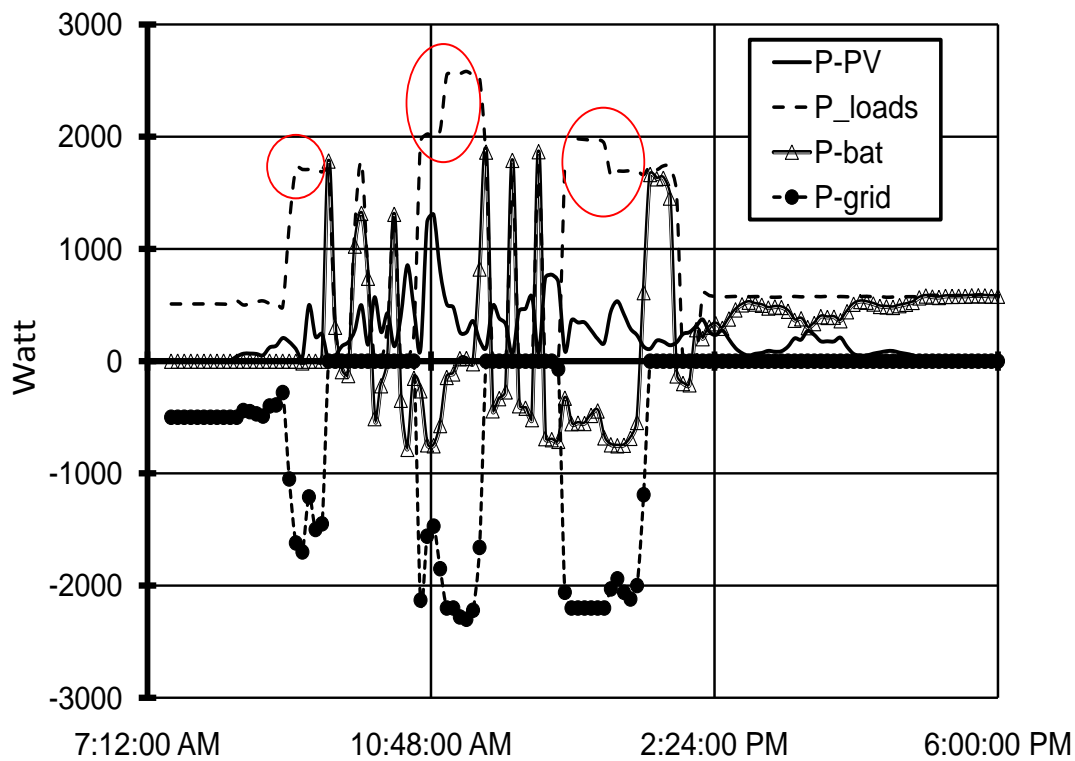
Στο Σχήμα 5.3 παρατηρείται ότι όταν το υπόλοιπο δίκτυο είναι συνδεδεμένο, τα φορτία τροφοδοτούνται κανονικά (κόκκινες περιοχές). Όταν το σύστημα λειτουργεί σε απομονωμένη κατάσταση (island mode) και τα φορτία είναι υψηλά, οι μπαταρίες και τα Φ/Β πλαίσια κρατάνε την τροφοδοσία των φορτίων για 5-10 λεπτά. Μετά, τα Φ/Β πλαίσια χρησιμοποιούνται μόνο για τη φόρτιση των μπαταριών και τα φορτία είναι off. Αφού φορτίσουν λίγο τις μπαταρίες, τα Φ/Β πλαίσια και οι μπαταρίες τροφοδοτούν όλα τα φορτία ξανά για 5-10 λεπτά (βλέπε περιόδους 09:00 – 10:30, 11:30 – 12:30 ή 13:30 – 14:30), μια λειτουργία που είναι πολύ επικίνδυνη και έντονη για το μικροδίκτυο και τα φορτία. Είναι επίσης πολύ επιβλαβής για τις μπαταρίες, οι οποίες φορτίζονται και εκφορτίζονται κάθε 10-20 λεπτά. Αυτή η συμπεριφορά δείχνει ότι μόνο βραχυπρόθεσμα σχέδια μπορούν να επιτευχθούν μ' αυτή την τοπολογία.

Η παραπάνω συμπεριφορά δεν μπορεί να αποδοθεί σε κακή διαστασιολόγηση του συστήματος, καθώς όπως προαναφέρθηκε, τηρούνται σε πολλαπλάσιο βαθμό οι προϋποθέσεις διαστασιολόγησης [16]. Επίσης, δεν μπορεί να αποδοθεί σε πρότερη μακρά περίοδο απομονωμένης λειτουργίας, καθώς, όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.3, οι μπαταρίες φορτίζονται όλη την προηγούμενη νύχτα. Για αυτό το λόγο δεν γίνεται εμφανές και το δεύτερο μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας, το οποίο μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί στο Σχήμα 5.4., όπου οι μπαταρίες έχουν μείνει αφόρτιστες όλο το προηγούμενο βράδυ. Στο Σχήμα 5.4, όταν αποκαθίσταται η σύνδεση με το σθεναρό δίκτυο στις 9.30 πμ, το δίκτυο αξιοποιείται μόνο για φόρτιση μπαταριών για περίπου 20 λεπτά. Μόνο όταν το SoC των μπαταριών ξεπεράσει το 30 %, επιτρέπεται να

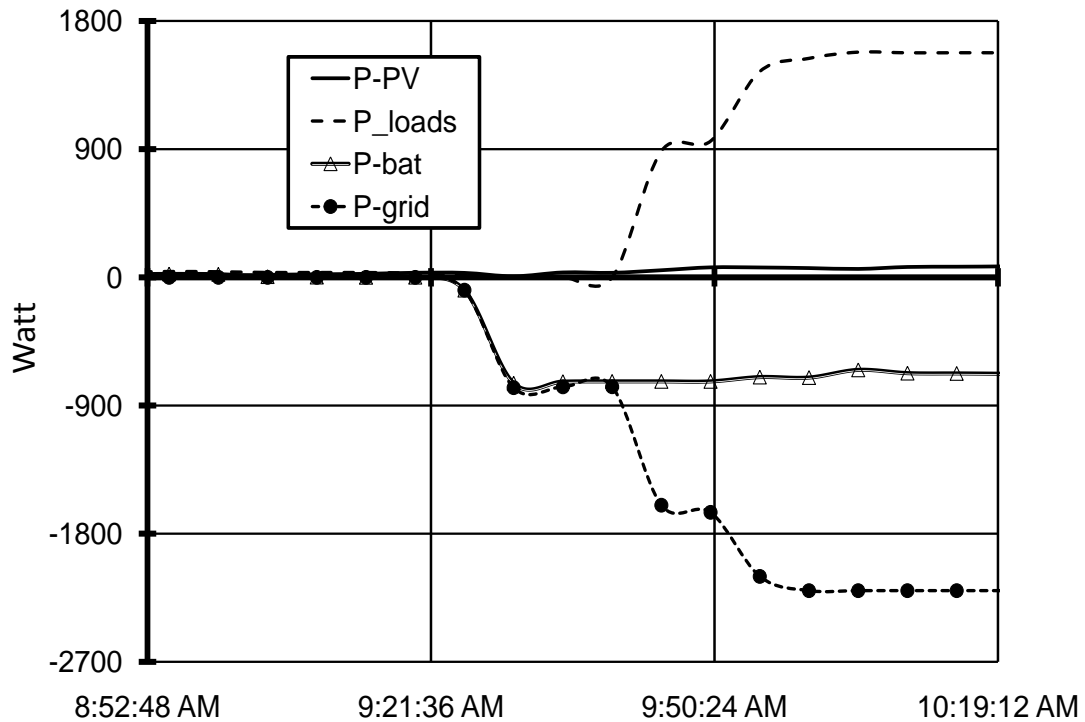
τροφοδοτηθούν τα φορτία από τη SIM. Δεδομένου ότι όλες οι μπαταρίες έχουν ένα μέγιστο ρεύμα φόρτισης, είναι αναμενόμενο να απαιτηθεί αρκετός χρόνος για να φτάσουν οι μπαταρίες το SoC του 30 %. Φυσικά, αυτή η συμπεριφορά είναι επιτρεπτή, όταν οι παραγωγοί του μικροδικτύου μπορούν να τροφοδοτήσουν μόνο τις μπαταρίες, όπως στην (1).

$$P_{source} \leq P_{bat} = V_{dc-nom} \times I_{max-charge} \quad (1)$$

Όμως, στην περίπτωση του Σχήματος 5.4, η πηγή φόρτισης των μπαταριών είναι το κυρίως δίκτυο, που μπορεί να τροφοδοτήσει τουλάχιστον το φορτίο βάσης, αφού μπορεί να καλύψει το μέγιστο ρεύμα φόρτισης των μπαταριών. Στη συγκεκριμένη τοπολογία όμως κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατόν, καθώς η ζήτηση ή καλύτερα τα ενεργά φορτία δεν είναι γνωστά και δεν είναι ελέγξιμα το καθένα ξεχωριστά.



Σχήμα 5.3. Καμπύλες Ισχύος 02^ας Ιουνίου (4η μέρα 1ης εβδομάδας του Πίνακα 5.1). Η σύνδεση με το σθεναρό δίκτυο αποκαθίσταται τις περιόδους: 7.30 πμ-9.30 πμ, 10.30 πμ-11.30 πμ and 12.30 μμ – 1.30 μμ.



Σχήμα 5.4. Καμπύλες Ισχύος 06^{ης} Ιουνίου (1η μέρα της 2ης εβδομάδας του Πίνακα Ι)

5.2.2. Μετρήσεις με προσθήκη μονάδας διανεμημένης παραγωγής στην DC πλευρά της πρώτης τοπολογίας

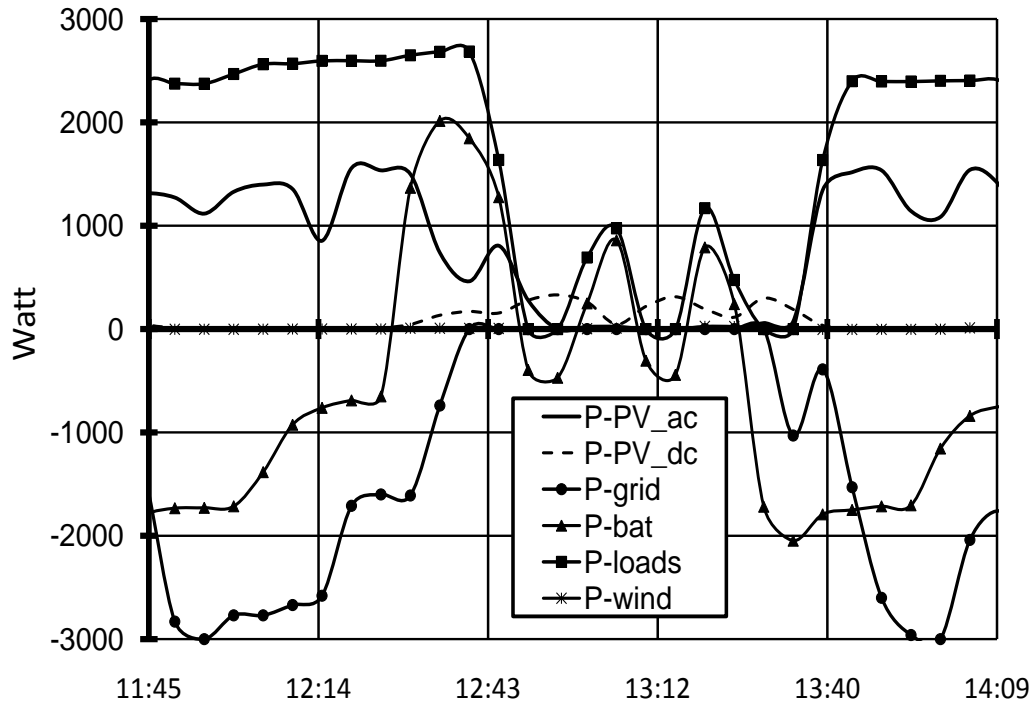
Μετά την ενσωμάτωση 1.680kWp (8 Φ/Β πλαίσια) επιπλέον ισχύος στην DC-πλευρά του μικροδικτύου του Σχήματος 3.1, η συμπεριφορά του δεν βελτιώθηκε. Τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν εμφανίζονται πάλι και επιπλέον προκύπτουν και άλλα. Στο Σχήμα 5.5, μια μεγέθυνση της περιστασιακά-απομονωμένης λειτουργίας εμφανίζεται. Κατά την προηγούμενη νύχτα το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το σθεναρό δίκτυο, γεγονός που σημαίνει ότι οι μπαταρίες είναι φορτισμένες. Παρόλα αυτά, οι επαναλαμβανόμενες διακοπές των φορτίων επέμειναν, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2.

Επιπλέον, δύο νέες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν. Η πρώτη αφορά στην ισχύ που παράγεται από τα Φ/Β της DC-πλευράς (P-PV_dc στο Σχήμα 5.5). Είναι προφανές ότι κατά τη σύνδεση με το υπόλοιπο δίκτυο (περίοδοι πριν τις 12.30 και μετά τις 13.30), τα DC-Φ/Β δεν παράγουν ισχύ. Από την άλλη, όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί σε απομονωμένη λειτουργία (μεταξύ 12.30 και 13.30) τα DC Φ/Β παράγουν ισχύ. Η δεύτερη παρατήρηση έχει να κάνει με τα Φ/Β στην AC-πλευρά (P-PV_ac στο Σχήμα 5.5, που φαίνεται να συμπεριφέρονται ακριβώς ανάποδα.

Και οι δύο συμπεριφορές αποδίδονται στην ύπαρξη ενός μόνο DC-ζυγού στο Σχήμα 3.1 και στη μέτρηση μόνο ενός ρεύματος και μία μόνο τάσης DC και κατά συνέπεια στη λανθασμένη εκτίμηση του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών (SoC). Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση, όταν οι μπαταρίες φορτίζονται από το σθεναρό δίκτυο, αυξάνεται η τάση του DC-ζυγού και ο ρυθμιστής φόρτισης των DC-Φ/Β δεν επιτρέπει την παροχή ισχύος από αυτά, αφού οι μπαταρίες φαίνονται φορτισμένες. Να σημειωθεί, ότι σε αυτή την περίπτωση, σε ένα «έξυπνο δίκτυο» έπρεπε να δοθεί προτεραιότητα στην ενέργεια που παρέχεται από τον ήλιο και όχι σε αυτή του δικτύου. Στη δεύτερη περίπτωση, η τάση του DC-ζυγού αυξάνεται, εξαιτίας της φόρτισης από τα DC-Φ/Β. Αυτό ξανά οδηγεί σε λάθος εκτίμηση του SoC των μπαταριών αυτή τη φορά από τη SIM, η οποία κατά συνέπεια απορρίπτει τα AC-Φ/Β και φυσικά μεγάλη ποσότητα ηλιακής ενέργειας.

Πίνακας 5.2. Εφαρμοζόμενη πολιτική απόρριψης φορτίων 3^{ης} Ιουνίου

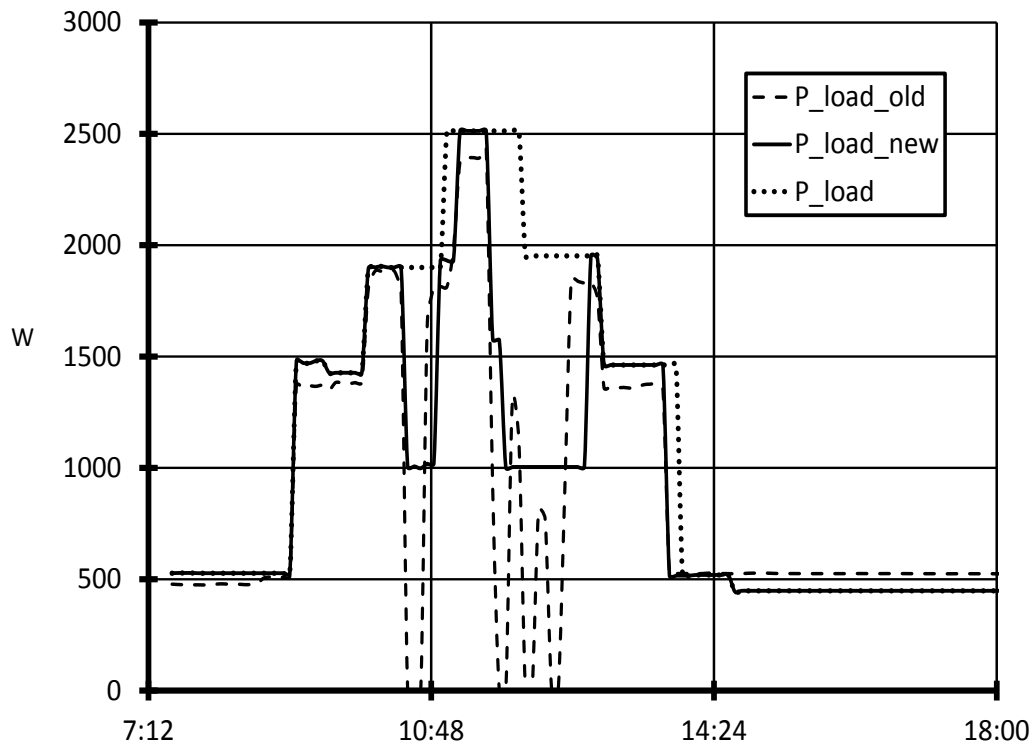
| Ωρα | Κατάσταση φορτίων |
|------------|--------------------------|
| 10.36 am | OFF |
| 10.51 am | ON |
| 11.27 am | OFF |
| 11.42 am | ON |
| 12.48 pm | OFF |
| 13.03 pm | ON |
| 13.08 pm | OFF |
| 13.23 pm | ON |
| 13.26 pm | OFF |
| 13.42 pm | ON |



Σχήμα 5.5. Μεγέθυνση περιστασιακά απομονωμένης λειτουργίας της 10^{ης} Ιουνίου (5^η μέρα 2^{ης} εβδομάδας του Πίνακα 5.1)

5.3. Αποτελέσματα μετρήσεων προτεινόμενης τοπολογίας – Σύγκριση μετρήσεων

Τα πειραματικά αποτελέσματα από το Μικροδίκτυο του Σχ.3.3 συγκρίνονται με αυτά της προηγούμενης παραγράφου [29]. Η βελτιωμένη τεχνική διαχείριση του μικροδικτύου εφαρμόστηκε με επιτυχία και οδήγησε σε αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος. Στο Σχ. 5.6 φαίνεται το προφίλ του φορτίου που ζητείται από τον χρήστη μαζί με το προφίλ του φορτίου που επιτρέπεται από τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Η σύνδεση με το υπόλοιπο δίκτυο διακόπτεται σκόπιμα κατά τις περιόδους 9.30 μέχρι 10.30, 11.30 μέχρι τις 12.30, 13.30 μέχρι το επόμενο πρωί. Στο Σχ.5.6, παρουσιάζεται επίσης το προφίλ του φορτίου που επιτρέπεται να τροφοδοτηθεί από την πρώτη τοπολογία. Εφαρμόζοντας τον νέο αλγόριθμο ελέγχου, το πιο κρίσιμο φορτίο μαζί με δύο λιγότερο κρίσιμα φορτία τροφοδοτούνται συνεχώς, ενώ η συνεχής εναλλαγή του φορτίου και η γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών, της πρώτης τοπολογίας έχουν επίσης εξαλειφθεί, ιδιαίτερα κατά την περίοδο μεταξύ 11.30 και 12.30.

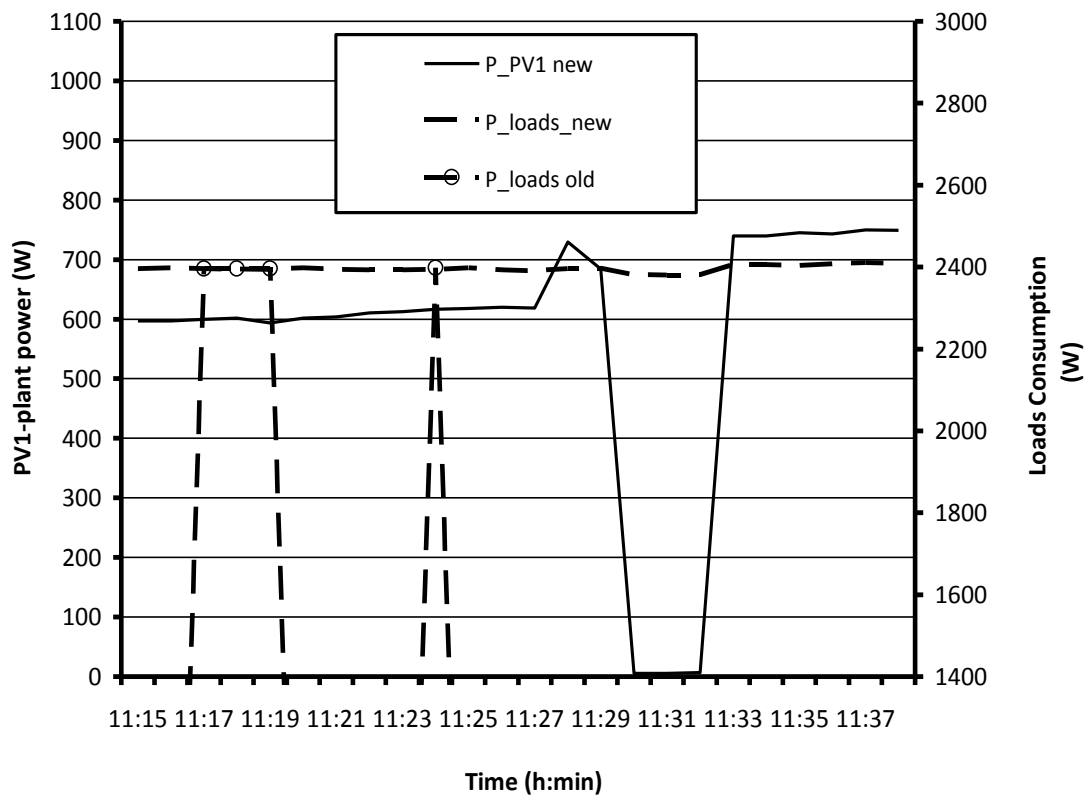


Σχήμα 5.6. Συμπεριφορά του φορτίου στην πρώτη και στην προτεινόμενη τοπολογία - Απομονωμένη λειτουργία: 9.30 – 10.30, 11.30 – 12.30, και 13.30 – επόμενο πρωί

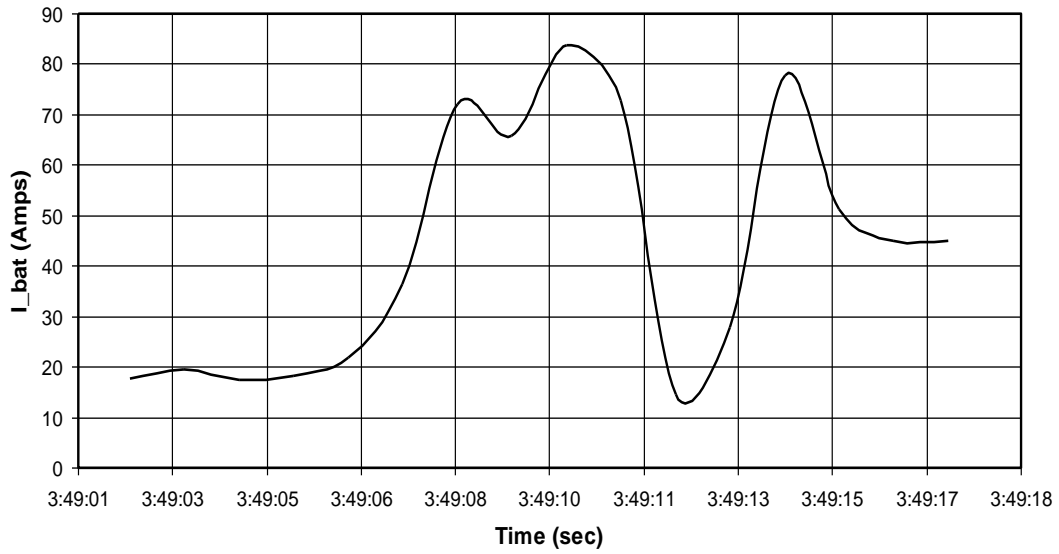
Στο Σχ. 5.7 παρουσιάζεται μία ακόμη περίπτωση περιστασιακά απομονωμένης λειτουργίας σε μεγέθυνση. Η σύνδεση με το υπόλοιπο δίκτυο έχει σκόπιμα διακοπεί τις περιόδους 10.30 - 11.30 και 12.30 - 13.30. Το προφίλ της κατανάλωσης του φορτίου και η έξοδος του Φ/Β αντιστροφέα Νο1 παρουσιάζονται σε σύγκριση με τα ίδια μεγέθη της πρώτης τοπολογίας. Κατά τη λειτουργία σύμφωνα με την πρώτη τοπολογία, τα φορτία τροφοδοτούνται για τρία λεπτά μεταξύ 11.15 και 11.30 (στις 11.17 για δύο λεπτά και στις 11.23 για ένα λεπτό), ενώ με τον προτεινόμενο αλγόριθμο ελέγχου τροφοδοτούνται όλα τα φορτία. Περίπου στις 11.27, το επίπεδο φόρτισης SoC των μπαταριών, σύμφωνα με τον νέο αλγόριθμο ελέγχου, μειώνεται. Παρόλα αυτά, ο νέος αλγόριθμος δίνει εντολή στον Φ/Β αντιστροφέα να αυξήσει την παραγωγή (όπως και γίνεται από 600 σε 700W), από το να απορρίπτει φορτία. Στις 11.30 πμ, η απότομη μείωση στη Φ/Β παραγωγή οφείλεται στη διαταραχή τάσης λόγω της επανασύνδεσης με το σθεναρό δίκτυο.

Το πρώτο μέρος του νέου αλγορίθμου ελέγχου ανταποκρίθηκε εξαιρετικά κατά τη διάρκεια πειραμάτων απομονωμένης λειτουργίας [29]: Πιο συγκεκριμένα, το μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης τέθηκε επίτηδες 70A. Το φορτίο Νο5 (ο κινητήρας του 1kW) ξεκίνησε τη λειτουργία του τη χρονική στιγμή $t_1=15h:49min:07sec$, αναγκάζοντας τις μπαταρίες να εκφορτιστούν με ρεύμα μεγαλύτερο των 70A. Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται το ρεύμα εκφόρτισης των μπαταριών (μέσες τιμές ανά δευτερόλεπτο). Το Σχήμα 5.9 δείχνει την παραγωγή ισχύος από τους δύο Φ/Β αντιστροφείς και την κατανάλωση των πέντε φορτίων.

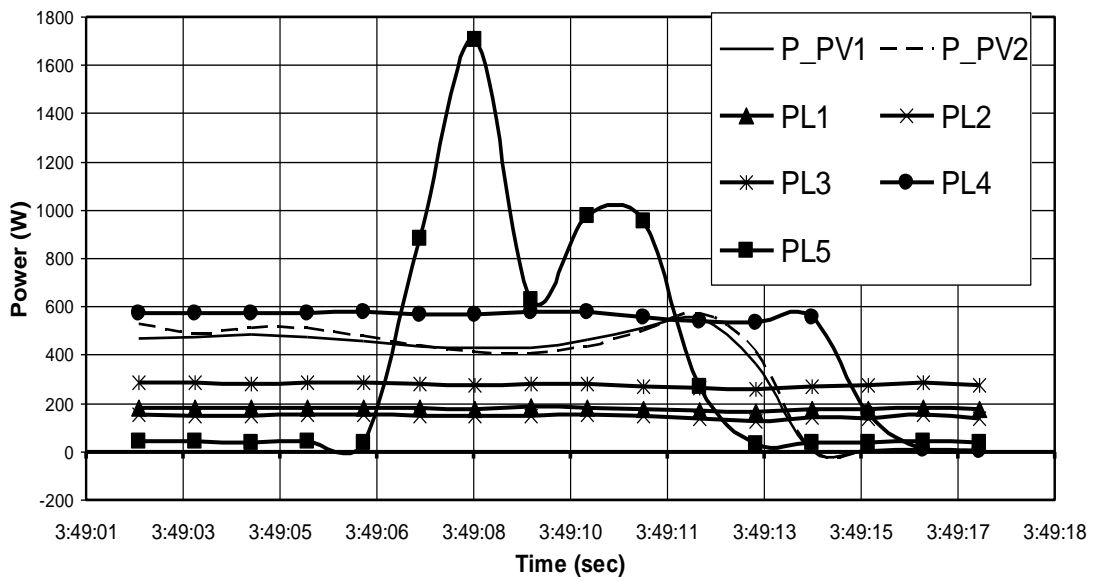
Τρία δευτερόλεπτα μετά τη χρονική στιγμή t_1 , δηλαδή τη χρονική στιγμή t_2 ($t_2=15h:49min:10sec$), η ισχύς του κινητήρα σταθεροποιείται στην ονομαστική του ισχύ των 1000 W. Κατά την εκκίνηση του κινητήρα, το ρελέ αύξησης της ισχύος του πρώτου Φ/Β αντιστροφέα ενεργοποιείται αμέσως (15h:49min:08sec), αφού το ρεύμα εκφόρτισης φτάνει τα 72Amps. Εξαιτίας του MPPT του αντιστροφέα, η ισχύς εξόδου του αντιστροφέα δεν αυξάνεται αρκετά. Τη χρονική στιγμή t_2 , μετά την εκκίνηση του κινητήρα, το ρεύμα εκφόρτισης εξακολουθεί να είναι πάνω από 70Amps (83.63 Amps), οδηγώντας στην ενεργοποίηση του ρελέ του δεύτερου Φ/Β πάρκου. Και πάλι η αύξηση της παραγόμενης ισχύος του μικροδικτύου δεν είναι αρκετή για να πέσει το ρεύμα εκφόρτισης κάτω από 70A, οδηγώντας στην απόρριψη του κινητήρα τη χρονική στιγμή $t_3=15h:49min:11sec$. Τη χρονική στιγμή $t_4=15h:49min:13sec$, η παραγόμενη ισχύς από τα Φ/Β μειώνεται λόγω καιρικών συνθηκών, οδηγώντας πάλι σε ρεύμα εκφόρτισης πάνω από 70Amps. Έτσι τη χρονική στιγμή 15h:49min:14 sec, το φορτίο 4 απενεργοποιείται.



Σχήμα 5.7. Προφίλ κατανάλωσης φορτίου και παραγωγή Φ/Β για τις συγκρινόμενες τοπολογίες. Στις 11.30 αποκαθίσταται η σύνδεση με το δίκτυο.



Σχήμα 5.8. Ρεύμα εκφόρτισης μπαταριών.



Σχήμα 5.9. Παραγωγή Φ/Β συστημάτων και κατανάλωση πέντε φορτίων.

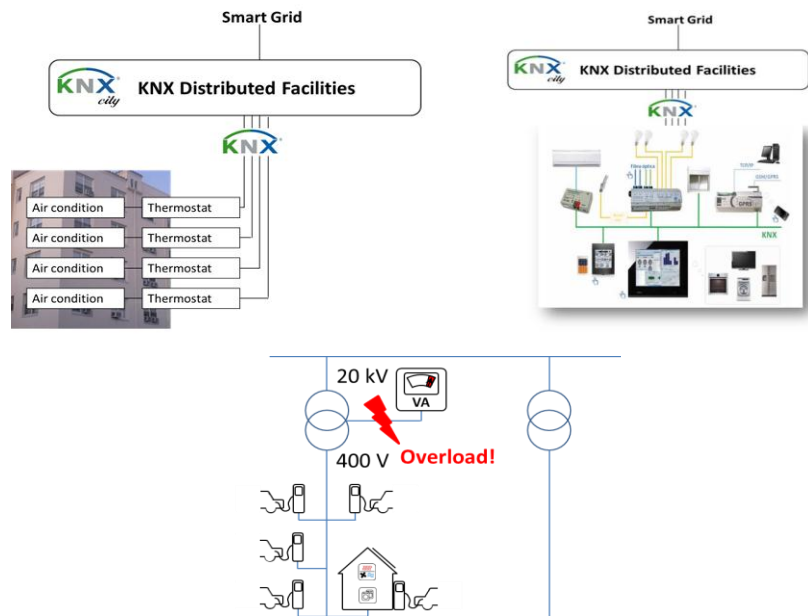
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΝΟΝΤΑΣ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΥΠΟΥ BUS ΣΤΑ ΕΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ

6.1. Εισαγωγή

Η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια είναι πλέον επιτακτική και μέρος της πολιτικής πολλών κρατών, αφού τα κτίρια καταναλώνουν περίπου το 40 % της ενέργειας και είναι οι μεγαλύτεροι παραγωγοί CO₂ παγκοσμίως. Συνεπώς η εφαρμογή αυτοματισμών εξοικονόμησης ενέργειας τύπου bus (π.χ. KNX) θα αυξάνεται συνεχώς στο εγγύς μέλλον [30] – [33]. Αυτές οι πιστοποιημένες συσκευές αυτοματισμού εγκαθίστανται συνήθως στους καταναλωτές ή και στους παραγωγούς του δικτύου διανομής και έχουν πολλές δυνατότητες ελέγχου της ηλεκτρικής κατανάλωσης, αφού είναι προγραμματιζόμενες. Η λειτουργία τους ελέγχεται με τη μετάδοση δεδομένων μέσω ενός κοινού ζεύγους καλωδίων ή ασύρματα.

Η διεθνής ένωση οικιακού και κτιριακού αυτοματισμού KNX International Association έχει προτείνει το διεθνές πρότυπο KNX City®, στο οποίο τονίζεται η χρησιμότητα των KNX συσκευών στο μελλοντικό έξυπνο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, θερμοστατικά ελεγχόμενα φορτία, όπως κλιματιστικά, ψυγεία ή εγκαταστάσεις φωτισμού ή ακόμα και σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ελέγχονται με τις αντίστοιχες KNX συσκευές, συμβάλλοντας στην ευστάθεια και ασφάλεια του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1.

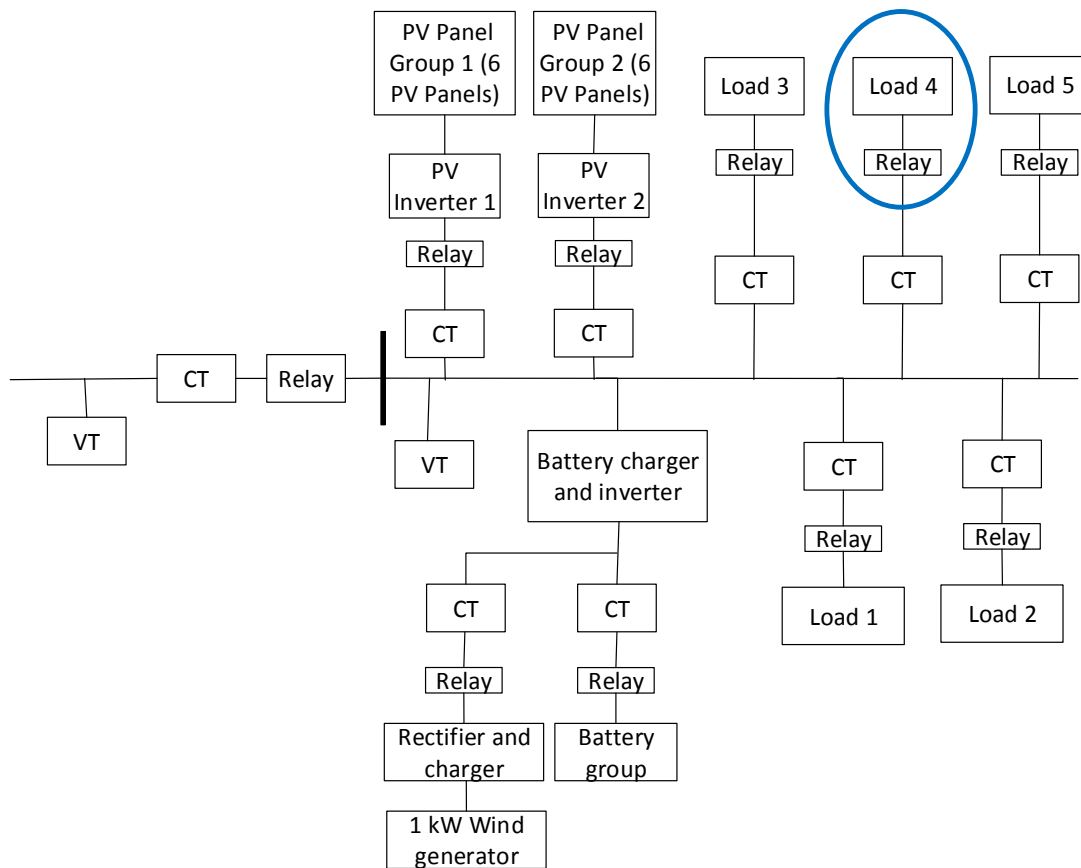


Σχήμα 6.1. Η χρήση του KNX City® στο μελλοντικό ευφύες δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μία απλή τεχνική ώστε το εργαστηριακό μικροδίκτυο των προηγούμενων κεφαλαίων να γίνει συμβατό με ένα KNX σύστημα. Στην αρχή αναλύονται οι υπάρχουσες τεχνικές διασύνδεσης μεταξύ KNX και SCADA συστημάτων. Κατόπιν, παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες της προτεινόμενης τεχνικής με την οποία ενσωματώνονται KNX συσκευές στο σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου. Τέλος παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και οι συγκρίσεις.

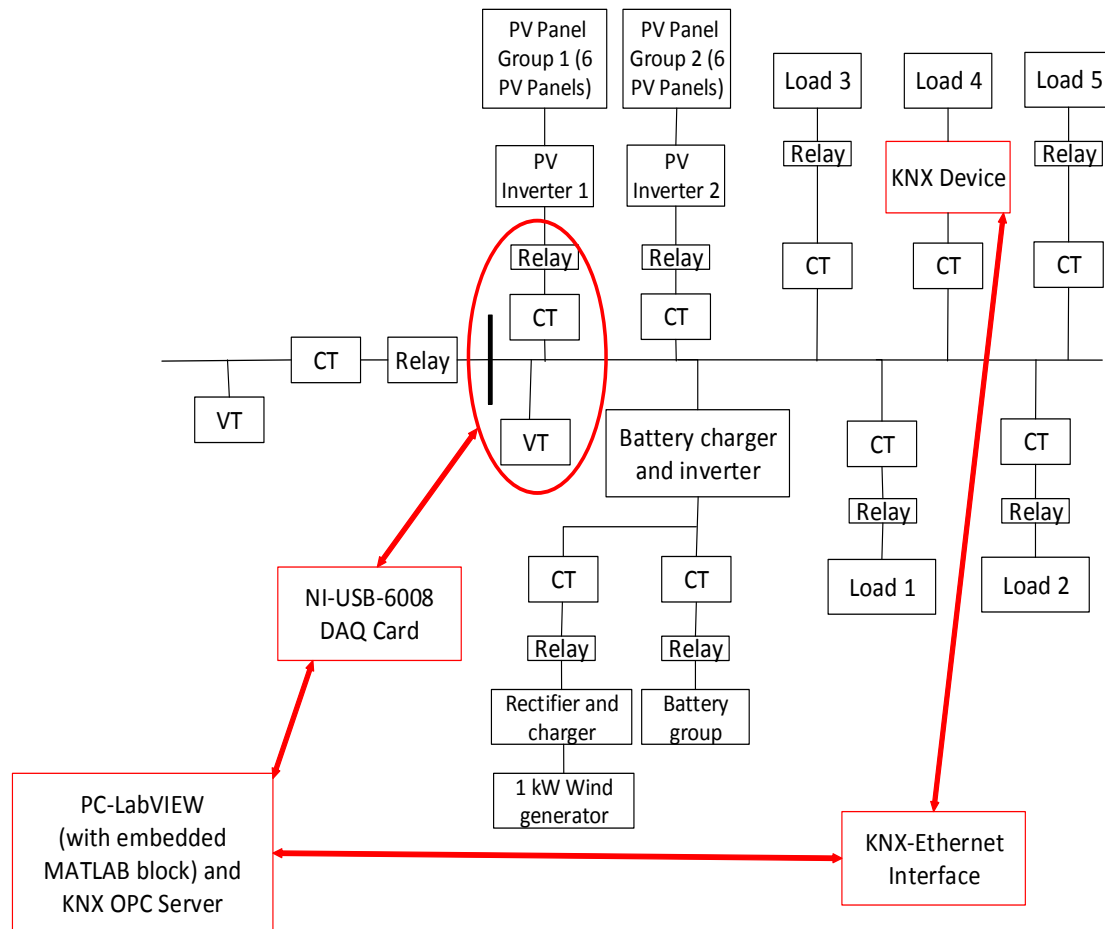
6.2. Υπάρχουσες τεχνικές διασύνδεσης SCADA και KNX συστημάτων.

Στο Σχήμα 6.2, παρουσιάζεται η τοπολογία του Σχήματος 3.3, όπου με κύκλο σημειώνεται το φορτίο που θα πάψει να ελέγχεται από τις μονάδες SCU και θα ελέγχεται πλέον από μία συσκευή KNX και συγκεκριμένα ένα KNX-dimmer. Το φορτίο αυτό αποτελείται από 6 (έξι) λάμπες πυρακτώσεως, αλλά θα μπορούσε να είναι ένα θερμοστατικά ελεγχόμενο φορτίο ή ένας φορτιστής ηλεκτρικού οχήματος.



Σχήμα 6.2. Τοπολογία δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας – Το φορτίο 4 (λάμπες πυρακτώσεως) ελέγχεται από συσκευή KNX (KNX dimmer).

Στην περίπτωση που κάποιο από τα φορτία χρειαστεί να ελεγχθεί με συσκευές KNX, το ρελέ του Σχήματος 6.2 δεν χρησιμοποιείται. Αντί αυτού, η αντίστοιχη συσκευή KNX (dimmer) παρεμβάλλεται μεταξύ του φορτίου και του AC-ζυγού του μικροδικτύου του Σχ. 6.2 και επικοινωνεί με τον υπολογιστή μέσω ενός Interface KNX-USB και συνεπώς με τον αλγόριθμο ελέγχου του μικροδικτύου και με την εφαρμογή LabVIEW μέσω ενός KNX OPC Server. Με τον τρόπο αυτό, ο αλγόριθμος ελέγχου που φιλοξενείται από την εφαρμογή LabVIEW μπορεί να ελέγξει το KNX φορτίο πολύ πιο αποτελεσματικά από ένα απλό ρελέ, που παρέχει δυνατότητες μόνο ON/OFF. Στο Σχήμα 6.3 φαίνονται οι αλλαγές που πρέπει να υποστεί το σύστημα του Σχήματος 6.2.



Σχήμα 6.3. Τοπολογία δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με την προσθήκη συσκευών KNX.

Πιο συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις για την προσαρμογή του KNX συστήματος στο μικροδίκτυο είναι:

1. KNX-Ethernet διεπαφή συνεχώς συνδεδεμένη,
2. KNX OPC server,
3. LabVIEW DSC
4. ETS (για τον αρχικό προγραμματισμό).
5. Αλλαγές στο LabVIEW και στον αλγόριθμο ελέγχου στο MATLAB. Αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν τα δυο βασικά βήματα του αλγόριθμου ελέγχου:
 1. Σε πραγματικό χρόνο επιτήρηση της τάσης και της συχνότητας και βήμα διόρθωσης.
 2. Η προτεινόμενη λογική διαχείρισης της αποθήκευσης ενέργειας, η οποία αποτελείται από τη ρουτίνα εκτίμησης του SoC και τις αντίστοιχες DGs και ενέργειες διαχείρισης φορτίου.

Η παραπάνω τεχνική, έχει τα ακόλουθα σοβαρά μειονεκτήματα, τα περισσότερα από τα οποία ανακαλύφθηκαν στην πορεία υλοποίησής τους:

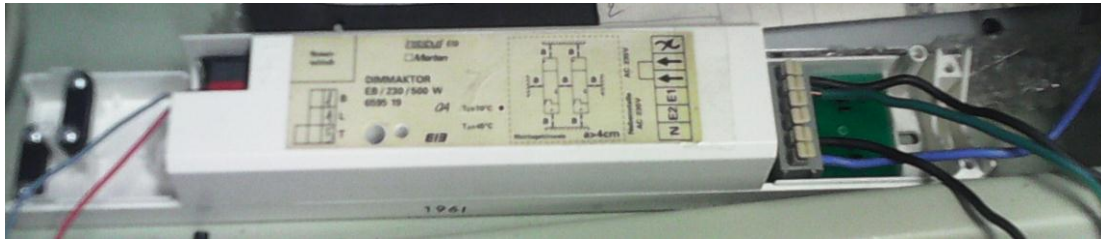
- A) Στον υπολογιστή όπου εκτελείται η εφαρμογή LabVIEW πρέπει να εκτελεστεί και το λογισμικό Matrikon KNX OPC server ή γενικά ένας οποιοσδήποτε KNX OPC server, ο οποίος έχει αρκετά υψηλό κόστος.
- B) Πρέπει να υπάρχει μονίμως εγκατεστημένη η διεπαφή KNX-Ethernet, που επίσης έχει υψηλό κόστος και έχει ως κύρια χρήση τον προγραμματισμό συσκευών KNX και συνεπώς την προσωρινή τοποθέτησή της.
- Γ) Η διαδικασία σύνδεσης των δύο λογισμικών είναι αρκετά δύσκολη, καθώς απαιτούνται πρόσθετα εργαλεία, όπως το DSC του LabVIEW, το οποίο επίσης κοστίζει, ενώ εμφανίστηκαν και αρκετά προβλήματα συμβατότητας, όπως το γεγονός ότι το λογισμικό ETS συνεχώς αναβαθμίζεται, χωρίς να ακολουθεί ο KNX OPC server. Επίσης, η εφαρμογή LabVIEW που ελέγχει το μικροδίκτυο είναι γραμμένη σε έκδοση LabVIEW 2009, ενώ το DSC και ο KNX OPC server δουλεύει με LabVIEW 2011, κτλ.
- Δ) Η καθυστέρηση που εισάγεται από τη διαδοχική εκτέλεση όλων αυτών των λογισμικών μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ευστάθεια του δικτύου. Παρόλα αυτά, η ανάλυση της επίδρασης της χρονοκαθυστέρησης στην ευστάθεια του δικτύου δεν μπορεί να μελετηθεί ακόμα σε βάθος. Μελετάται όμως σε περιβάλλον προσομοίωσης (PSCAD) [34].

Όλα αυτά τα προβλήματα, οδήγησαν να αναζητηθούν άλλες πιο απλές και φθηνές λύσεις. Αναζητήθηκαν λοιπόν άλλοι τρόποι σύνδεσης του λογισμικού ελέγχου του μικροδικτύου με την τεχνολογία KNX.

6.3. Περιγραφή προτεινόμενης τεχνικής ενσωμάτωσης KNX συσκευών στο σύστημα ελέγχου μικροδικτύου

Οι περισσότερες συσκευές KNX που κάνουν διαχείριση της ζήτησης σε καταναλωτές (πχ κινητήρες, λαμπτήρες), μοιάζουν με τη συσκευή dimmer που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 6.4. Οι συσκευές KNX έχουν τη δυνατότητα να ελέγχονται από διακόπτες KNX αλλά και από διακόπτες push button, των οποίων οι χειρισμοί μεταφράζονται σε δυαδικά σήματα KNX.

Στο Σχήμα 6.4, στα αριστερά φαίνονται τα καλώδια KNX που συνδέονται με το τροφοδοτικό KNX (30 V), ενώ δεξιά φαίνεται η συνδεσμολογία των ισχυρών ρευμάτων. Η πρώτη είσοδος συνδέεται με τους λαμπτήρες, η δεύτερη είσοδος με τη φάση του δικτύου, η τρίτη με το ρελέ, το οποίο με τη σειρά του συνδέεται επίσης με τη φάση τροφοδοσίας και η τελευταία είσοδος είναι ο κοινός ουδέτερος κόμβος του δικτύου και των λαμπτήρων.



Σχήμα 6.4. KNX dimmer

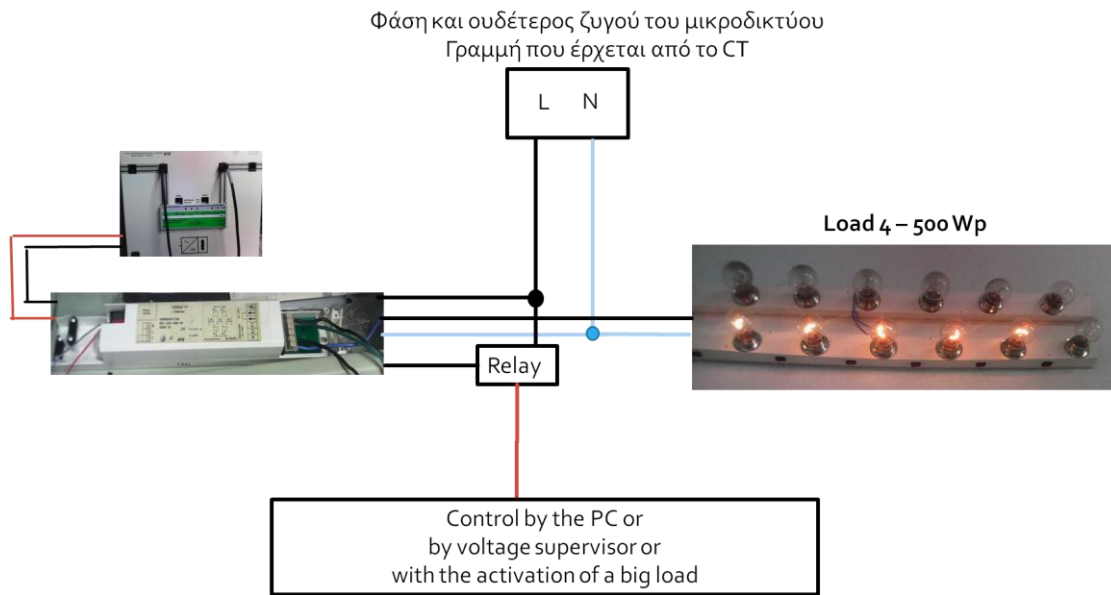
Στιγμιαίο πάτημα του διακόπτη push-button σημαίνει ένα παλμό στη συσκευή dimming, που το πρόγραμμα KNX της συσκευής μεταφράζει σε πλήρη τροφοδοσία των λαμπτήρων. Έτσι οι λαμπτήρες ανάβουν καταναλώνοντας πλήρη ισχύ.

Παρατεταμένη πίεση του διακόπτη, από την άλλη, σημαίνει ότι η συσκευή KNX δέχεται διαδοχικά σήματα του 1 bit. Τότε η συσκευή αρχίζει και μειώνει την τάση των λαμπτήρων μέχρι να σταματήσει η πίεση του button ή μέχρι την τελική τιμή που έχει οριστεί από το αρχικό πρόγραμμα, αν το button μείνει πατημένο. Αντίστοιχα μειώνεται και ο φωτισμός και η καταναλισκόμενη ισχύς.

Αν στη συνέχεια ξαναπιεστεί παρατεταμένα το button γίνεται αύξηση της φωτεινότητας, κοκ.

Η ιδέα λοιπόν είναι στις συσκευές dimming αλλά και στις συσκευές KNX για έλεγχο κινητήρων, αντί για button να γίνει ο έλεγχος από ένα ρελέ που οδηγείται από την εφαρμογή LabVIEW, όπως στο Σχήμα 6.5. Πιο συγκεκριμένα, το κομμάτι του Σχήματος 6.2 που βρίσκεται σε μπλε κύκλο αντικαθίσταται από τη διάταξη του Σχήματος 6.5.

Έτσι δεν θα χρειαστεί να γίνουν οι αλλαγές που προαναφέρθηκαν με την πρώτη μεθοδολογία, αλλά μόνο η αγορά του σχετικού KNX dimmer, η σχετική σύνδεση, που είναι πολύ απλή και μικρές αλλαγές στο λογισμικό MATLAB μέσα στο LabVIEW. Οι τελευταίες μάλιστα δεν επηρεάζονται από αλλά λογισμικά, είναι πάρα πολύ απλές και παρουσιάζονται στο Παράρτημα, ως αλλαγές στον προηγούμενο αλγόριθμο.



Σχήμα 6.5. Συνδεσμολογία του KNX εξοπλισμού στο προτεινόμενο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

6.4. Πειραματικά αποτελέσματα και συγκρίσεις.

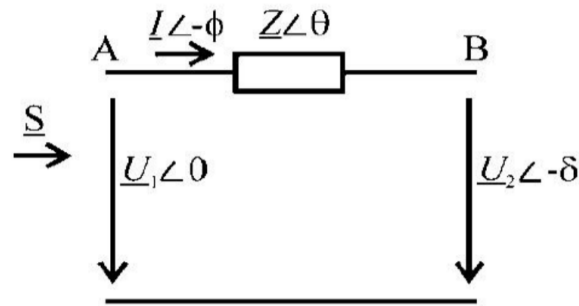
Η ροή της ενεργού ισχύος, P , που μεταφέρεται από μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, (Σχήμα 6.6), περιγράφεται από την εξίσωση (6.1), [13], [35], [36].

$$P = \frac{U_1}{R^2 + X^2} [R \times (U_1 - U_2 \times \cos\delta) - X \times U_2 \times \sin\delta] \quad (6.1)$$

όπου: P η ενεργός ισχύς, R η ωμική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, X η αντίδραση της γραμμής, U_1 η τάση στην αρχή της γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας U_2 η τάση στο τέλος της γραμμής και δ η διαφορά φάσης της τάσης U_1 στην αρχή της γραμμής μεταφοράς, με την τάση U_2 στο τέλος της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

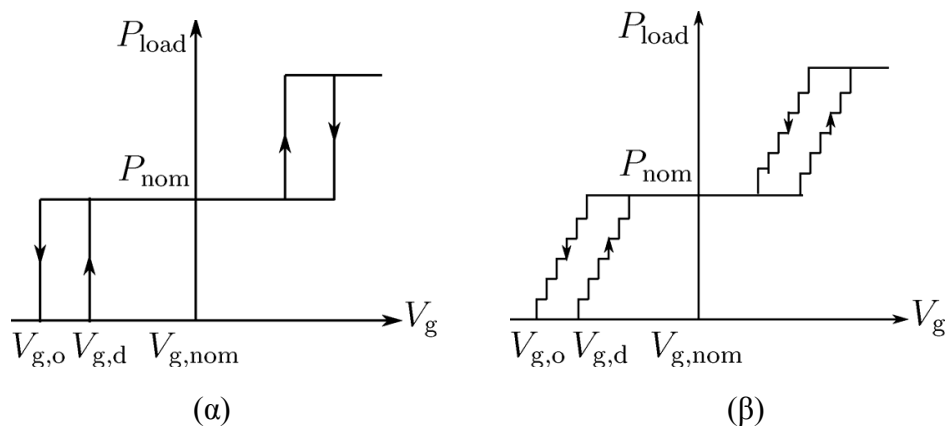
Αφού οι γραμμές των δικτύων χαμηλής τάσης και ειδικά τα εργαστηριακά μικροδίκτυα εμφανίζουν ωμική συμπεριφορά ($R \gg X$), οι παραπάνω εξίσωση απλοποιείται ως εξής:

$$P = \frac{U_1}{R} - \frac{U_1 \times U_2}{R} \quad (6.2)$$



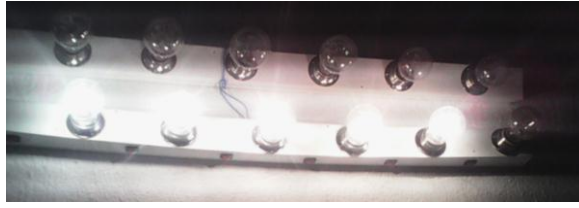
Σχήμα 6.6. Ροή ισχύος σε γραμμή δικτύων διανομής.

Από τη σχέση (6.2) φαίνεται ότι σε μικροδίκτυα χαμηλής τάσης οι τιμές της τάσης εξαρτώνται κυρίως από τις μεταβολές της ενεργούς ισχύος, όπως επίσης έχει παρατηρηθεί πειραματικά σε μικροδίκτυα με λόγο R/X μεγαλύτερο του 2 [13], [37]. Σε αυτή την περίπτωση και με βάση την εξίσωση (6.2), η τάση του μικροδικτύου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σήμα για έλεγχο της ζήτησης (demand-side management), χρησιμοποιώντας την “αρχή του ρελέ» του σχήματος 6.7 όπου το φορτίο μεταβάλλεται με βάση την τάση του δικτύου με γραμμικό ή βαθμωτό τρόπο [13]. Αυτή η αρχή εφαρμόζεται στην βιβλιογραφία, μόνο σε προσομοίωση και όχι στην πράξη, όπως επιχειρείται εδώ [13].

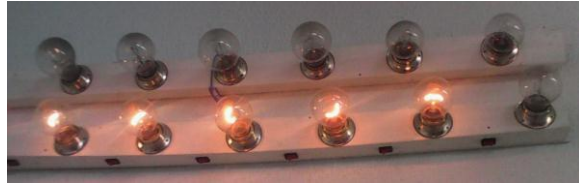


Σχήμα 6.7. Διαχείριση ζήτησης με εφαρμογή της αρχής του ρελέ: (α) Διακοπτική λειτουργία on/off, (β) γραμμικά ή βαθμωτά [13].

Στο Σχήμα 6.8 φαίνεται η φωτεινότητα των λαμπτήρων του φορτίου 4 σε πλήρη κατανάλωση (τάση 230V) και στην τελική κατάσταση του προγράμματος KNX που έχει φορτιστεί στη συσκευή dimmer.



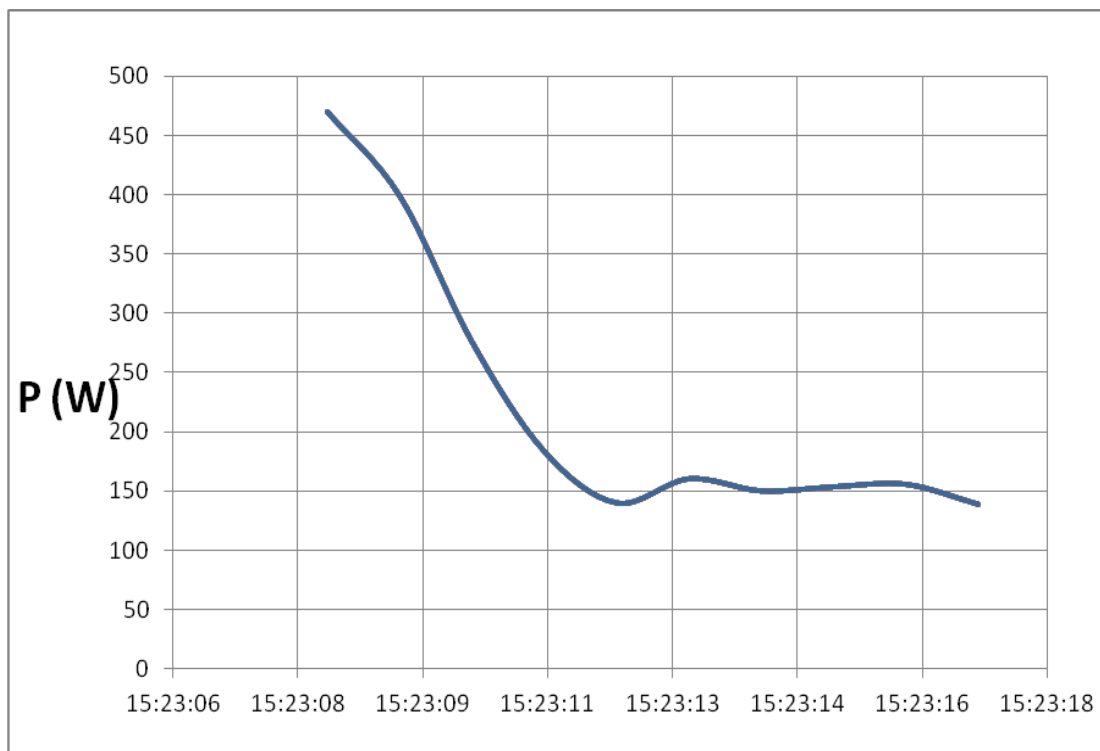
(α)



(β)

Σχήμα 6.8. Φωτεινότητα λαμπτήρων: (α) Χωρίς dimming (β) Με dimming.

Στο Σχήμα 6.9 φαίνεται η κατανάλωση ενεργού ισχύος κατά τη διάρκεια της ενεργοποίησης του ρελέ και συνεπώς του dimmer.



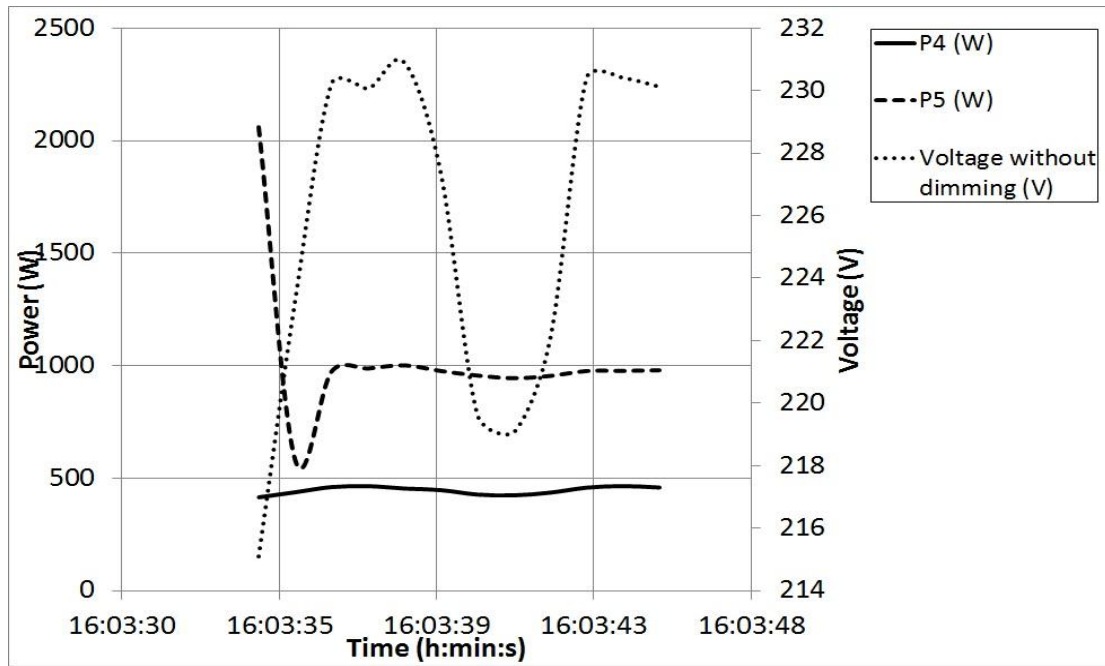
Σχήμα 6.9. Κατανάλωση Φορτίου Ν^ο4 κατά τη διάρκεια του dimming.

6.4.1. Πρωτογενής έλεγχος dimmer (εκτός λογισμικού)

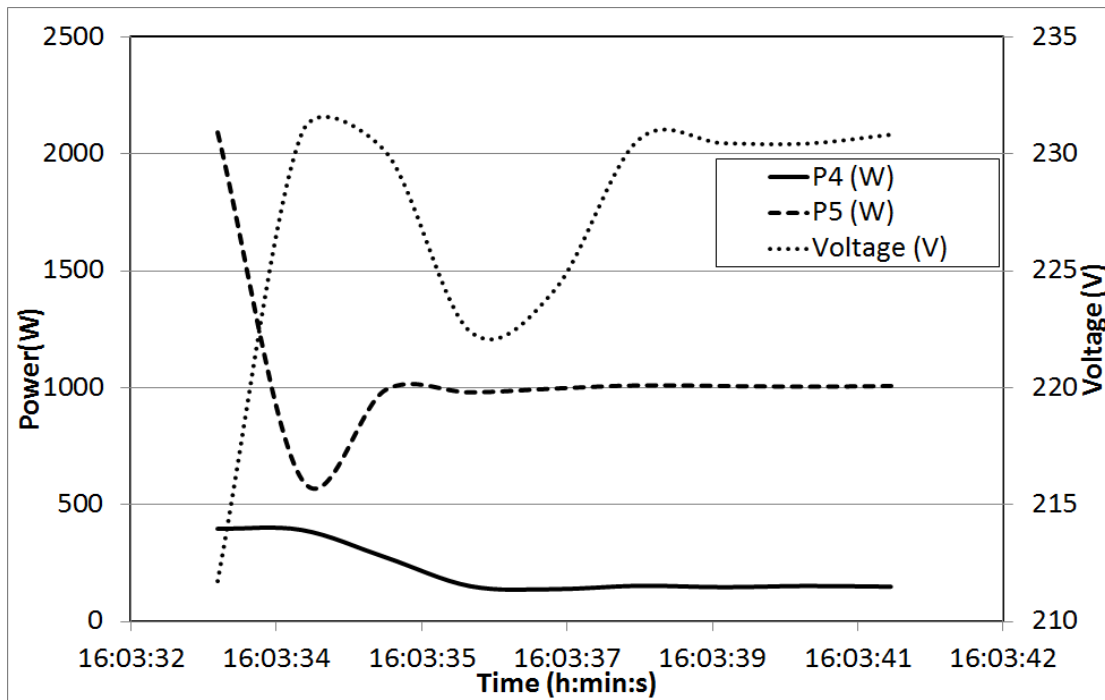
Μία μεθοδολογία για να συμβάλει η τεχνολογία KNX στη γρήγορη ρύθμιση της τάσης σε ένα μικροδίκτυο είναι η ενεργοποίηση του ρελέ και κατά συνέπεια του dimmer με την είσοδο ενός μεγάλου φορτίου. Σκοπός είναι η μείωση της αρνητικής επίδρασης της σύνδεσης μεγάλων φορτίων, που σε απομονωμένα ή ασθενή δίκτυα οδηγεί σε υψηλές πτώσεις τάσης. Αυτό θα συμβεί αν το ρελέ ελεγχθεί από έναν επιτηρητή τάσης, σύμφωνα με την αρχή του ρελέ [13], [38].

Στις παρακάτω καμπύλες φαίνεται η τάση του μικροδικτύου με και χωρίς την εφαρμογή των τεχνολογιών KNX. Τα σχήματα 6.10 και 6.11 δείχνουν την κατανάλωση του φορτίου N^ο4, την κατανάλωση του μεγάλου φορτίου (φορτίο N^ο5-κινητήρας) και το προφίλ της τάσης του μικροδικτύου, για τις περιπτώσεις χωρίς και με την εφαρμογή της KNX τεχνολογίας αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6.12 φαίνεται συγκριτικά η επίδραση της εφαρμογής της KNX τεχνολογίας στο προφίλ της τάσης του μικροδικτύου. Η καταγραφή των μετρήσεων ξεκινά μαζί με την ενεργοποίηση του dimmer, για διευκόλυνση της σύγκρισης.

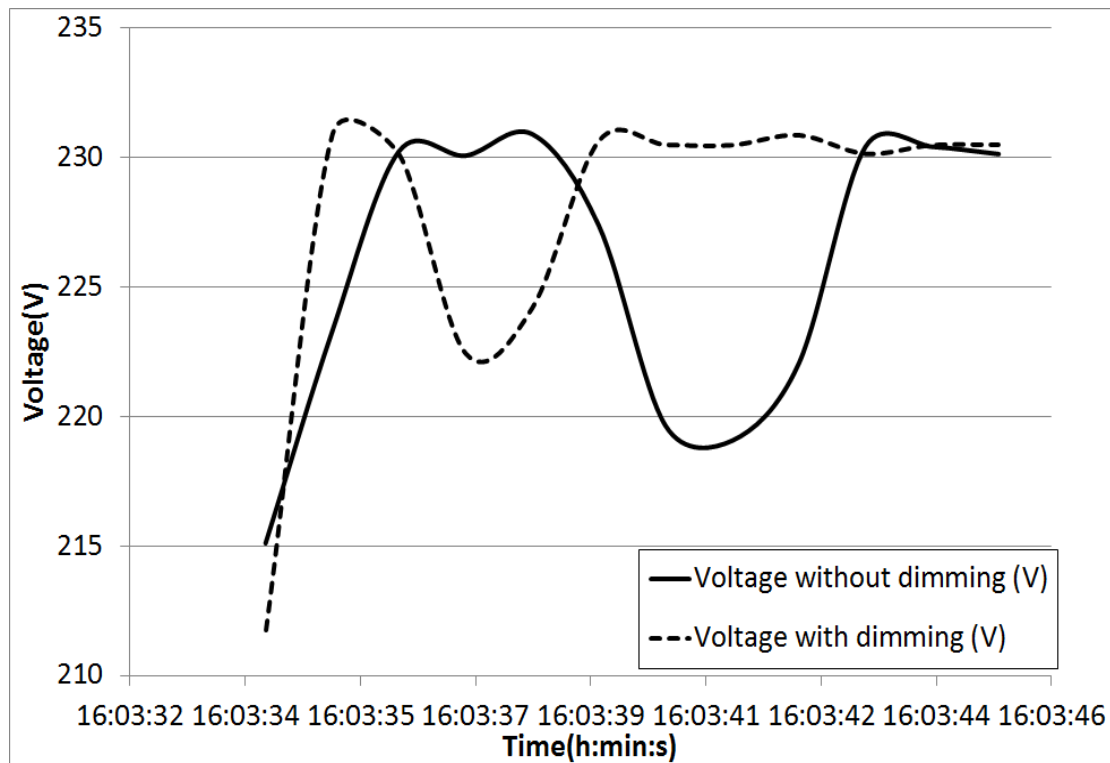
Από τη σύγκριση φαίνεται ότι οι τεχνολογίες αυτοματισμού κτιρίων βοηθούν την τάση να επανέλθει γρηγορότερα στα 230V, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τη διάρκεια της βύθισης της τάσης. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6.12 φαίνεται ότι η εφαρμογή του KNX dimmer οδήγησε σε επαναφορά της τάσης σε 3 δευτερόλεπτα, ενώ χωρίς αυτή η τάση επανέρχεται σε 5,8 δευτερόλεπτα. Η ίδια συμπεριφορά παρουσιάζεται στην περίπτωση όπου «η αρχή του ρελέ» εφαρμόζεται σε ένα μικροδίκτυο μικρής κλίμακας [13].



Σχήμα 6.10. Εκκίνηση κινητήρα (Φορτίο Ν°5) χωρίς την εφαρμογή της KNX τεχνολογίας στο φορτίο Ν°4



Σχήμα 6.11. Εκκίνηση κινητήρα (Φορτίο Ν°5) με την εφαρμογή της KNX τεχνολογίας στο φορτίο Ν°4

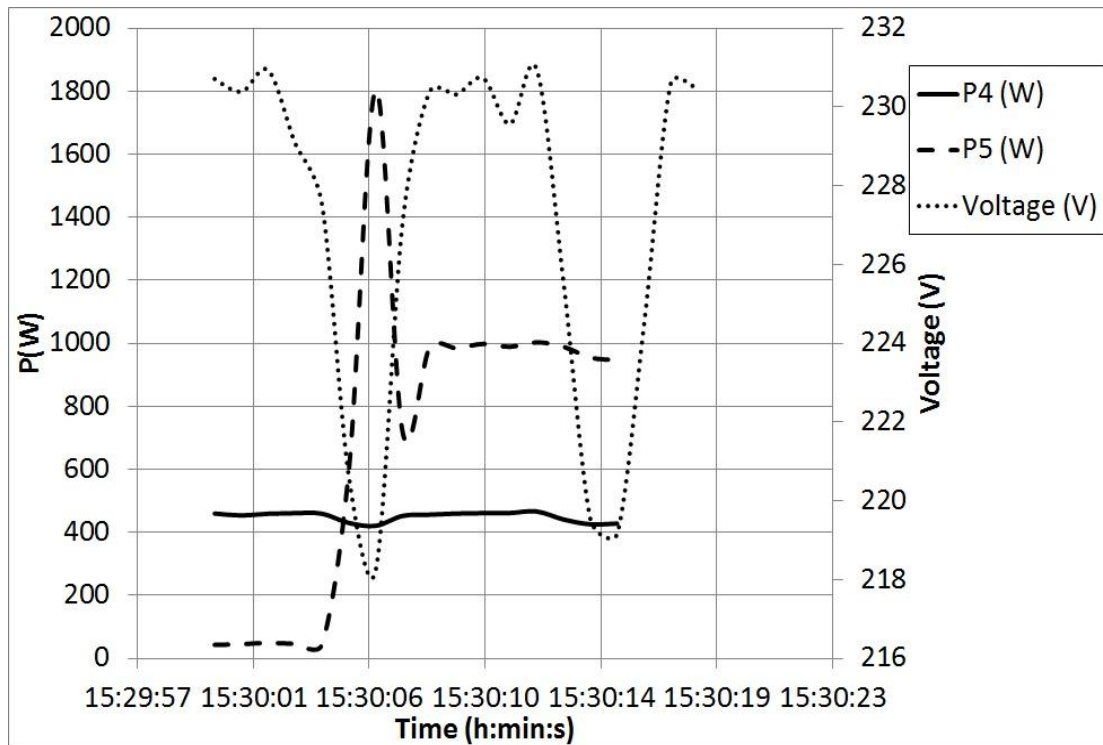


Σχήμα 6.12. Σύγκριση συμπεριφοράς της τάσης με και χωρίς dimming

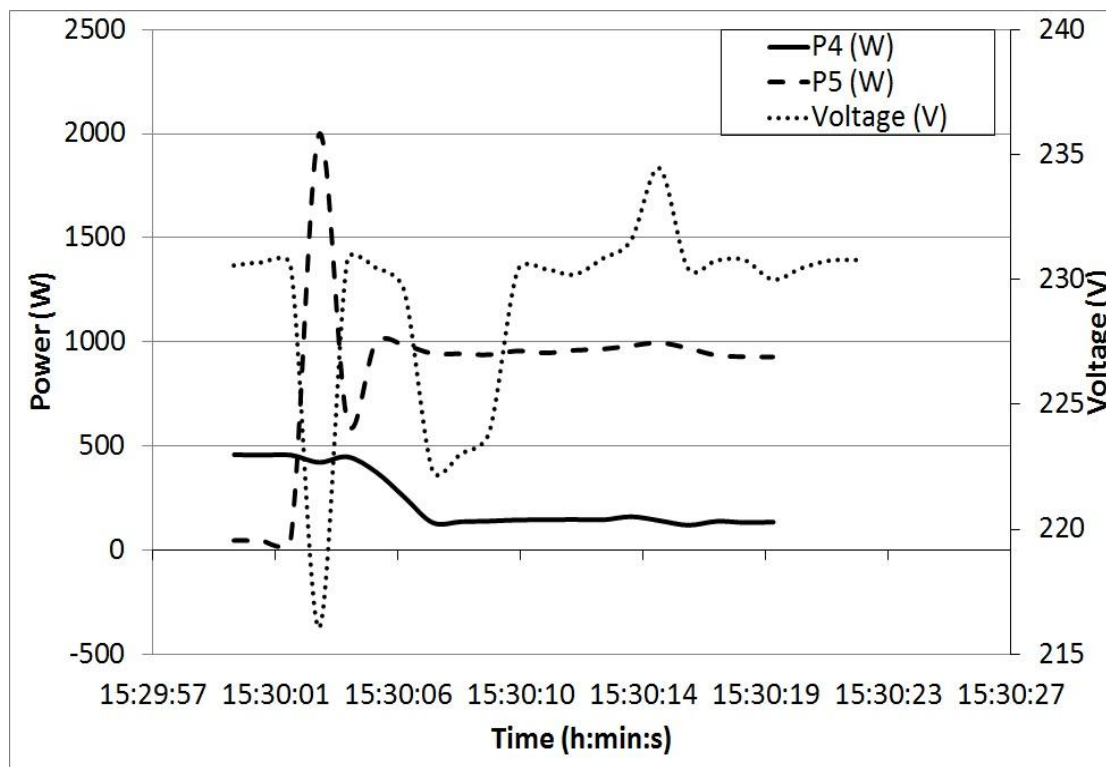
6.4.2. Πρωτογενής έλεγχος dimmer (μέσω λογισμικού)

Μία μεθοδολογία για να συμβάλει η τεχνολογία KNX στη γρήγορη ρύθμιση της τάσης σε ένα μικροδίκτυο, καθώς και στη μακροπρόθεσμη πολιτική διαχείρισης ενέργειας του μικροδικτύου είναι η ενεργοποίηση του ρελέ και κατά συνέπεια του dimmer από το λογισμικό LabVIEW [38]. Έτσι, μόλις το λογισμικό ανιχνεύσει πτώση τάσης μεγαλύτερη από κάποια όρια, στον επόμενο κύκλο εκτέλεσης (duty-cycle) ενεργοποιείται το ρελέ και η συσκευή dimming. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις παρακάτω καμπύλες.

Είναι πάλι προφανές ότι οι βυθίσεις τάσης διαρκούν λιγότερο και μετά την ενεργοποίηση του dimmer είναι πιο ρηχές. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6.15, η ενεργοποίηση του KNX φορτίου οδήγησε σε σχεδόν πλήρη επαναφορά της τάσης (με εξαίρεση μια μικρή άνοδο στα 234 Volt) σε 2 δευτερόλεπτα. Από την άλλη πλευρά, χωρίς τη χρήση της τεχνολογίας KNX, η τάση επανήλθε μετά από 4 δευτερόλεπτα, παρουσιάζοντας μία πρόσθετη βύθιση τάσης στα 217 Volt.



Σχήμα 6.13. Εκκίνηση κινητήρα (Φορτίο N^ο5) χωρίς την εφαρμογή της KNX τεχνολογίας στο φορτίο N^ο4



Σχήμα 6.14. Εκκίνηση κινητήρα (Φορτίο N^ο5) με την εφαρμογή της KNX τεχνολογίας στο φορτίο N^ο4 μέσω της εφαρμογής LabVIEW.

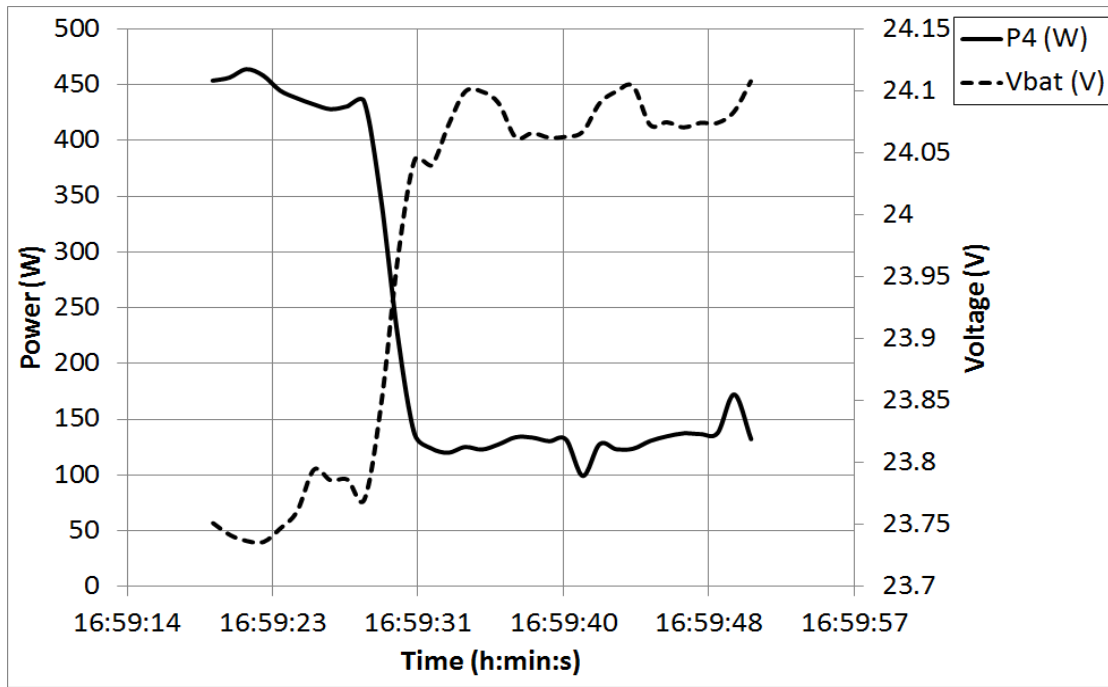


Σχήμα 6.15. Σύγκριση του προφίλ της τάσης του μικροδικτύου.

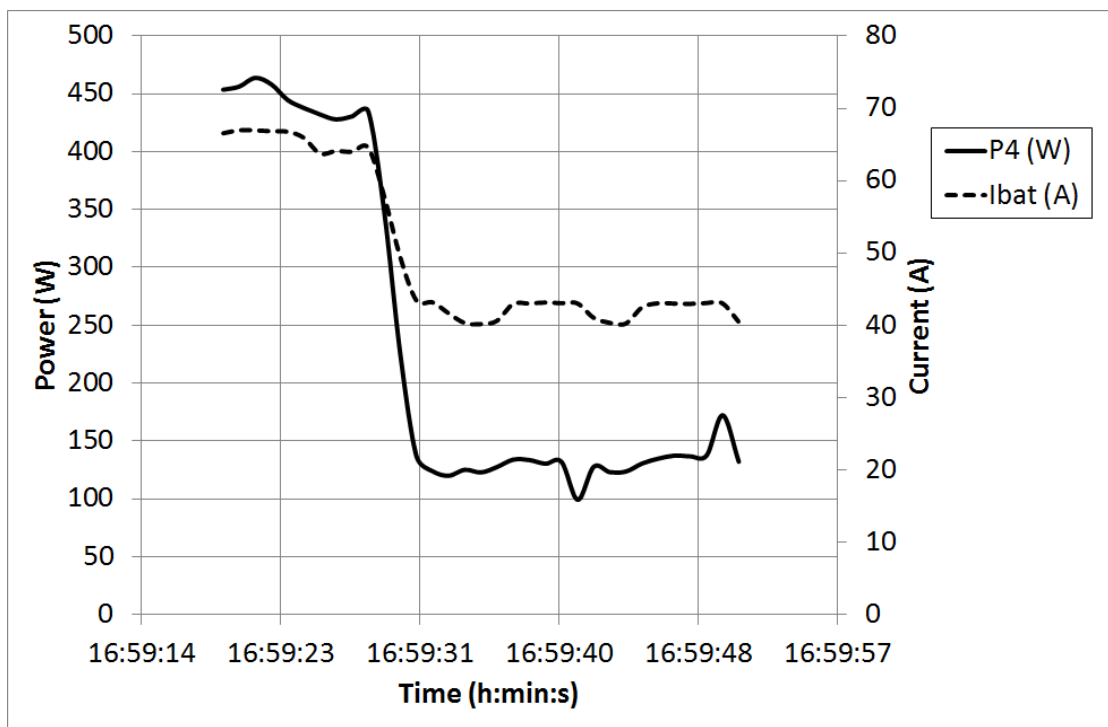
6.4.3. Δευτερογενής έλεγχος dimmer (μέσω λογισμικού)

Τέλος, οι συσκευές KNX μπορούν να αξιοποιηθούν για την αποτελεσματικότερη πολιτική διαχείρισης ενέργειας ενός απομονωμένου μικροδικτύου.

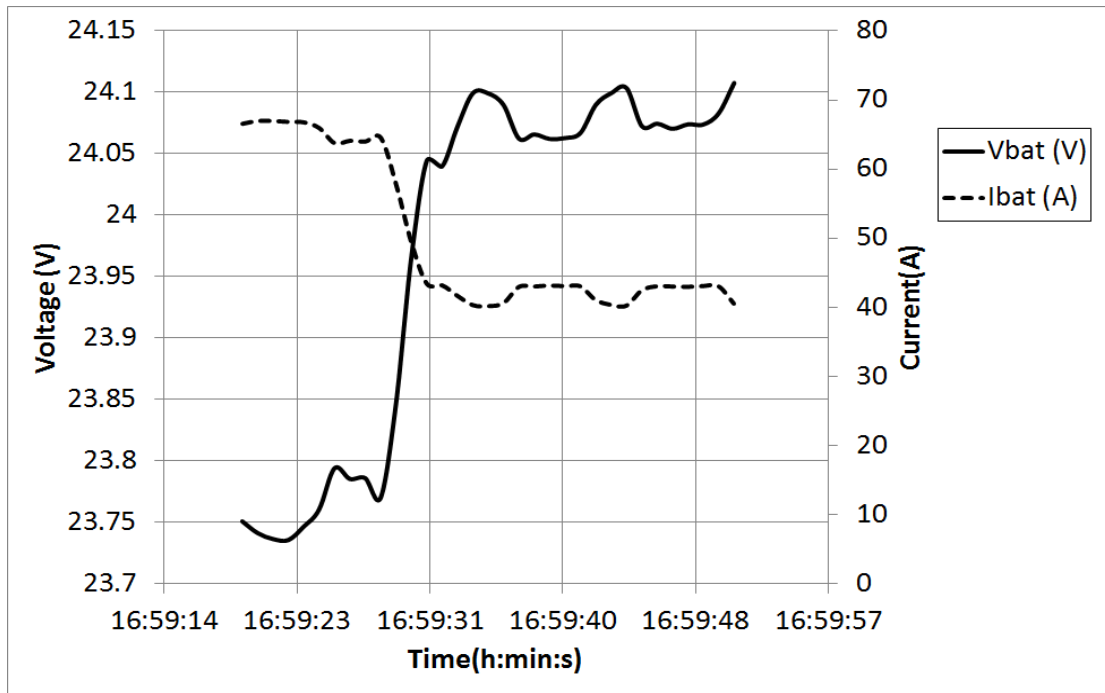
Έτσι, όταν το λογισμικό ελέγχου LabVIEW - MATLAB εκτιμήσει ότι το επίπεδο φόρτισης μπαταριών (State of Charge – SoC) μειωθεί, δεν απορρίπτει πλέον φορτία (ξεκινώντας από το λιγότερο κρίσιμο). Αντίθετα, ενεργοποιεί το ρελέ που ελέγχει το φορτίο KNX και μειώνεται η κατανάλωση του φορτίου 4, με συνέπεια να αλλάζουν οι τιμές της τάσης και του ρεύματος εκφόρτισης και να βελτιώνεται το επίπεδο φόρτισης μπαταριών του μικροδικτύου, όπως φαίνεται στα Σχήματα 6.16, 6.17 και 6.18.



Σχήμα 6.16. Τάση μπαταριών πριν και μετά την ενεργοποίηση του KNX φορτίου



Σχήμα 6.17. Ρεύμα εκφόρτισης μπαταριών πριν και μετά την ενεργοποίηση του KNX φορτίου



Σχήμα 6.18. Τάση και Ρεύμα εκφόρτισης μπαταριών πριν και μετά την ενεργοποίηση του KNX φορτίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΞΥΠΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

7.1. Εισαγωγή

Με δεδομένο ότι η παραγωγή των περισσότερων ΑΠΕ είναι στοχαστική από τη φύση τους (φωτοβολταϊκά, Ανεμογεννήτριες), η ενσωμάτωση της πρόβλεψης των τοπικών καιρικών συνθηκών και άλλων παραμέτρων, όπως η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, στον παραπάνω αλγόριθμο θα ήταν ιδιαίτερος χρήσιμη για τον έλεγχο του μικροδικτύου [39]. Σε άλλες περιπτώσεις όπου στοχαστικές παράμετροι επηρεάζουν άλλες εφαρμογές, όπως η μοντελοποίηση και λειτουργία των απελευθερωμένων αγορών ενέργειας, των δικτύων ασύρματων τηλεπικοινωνιών και φυσικά των έξυπνων δικτύων, έχει προταθεί η χρήση θεωρίας παιγνίων ή της ανάλυσης διαστημάτων (Interval Analysis) [40]-[43].

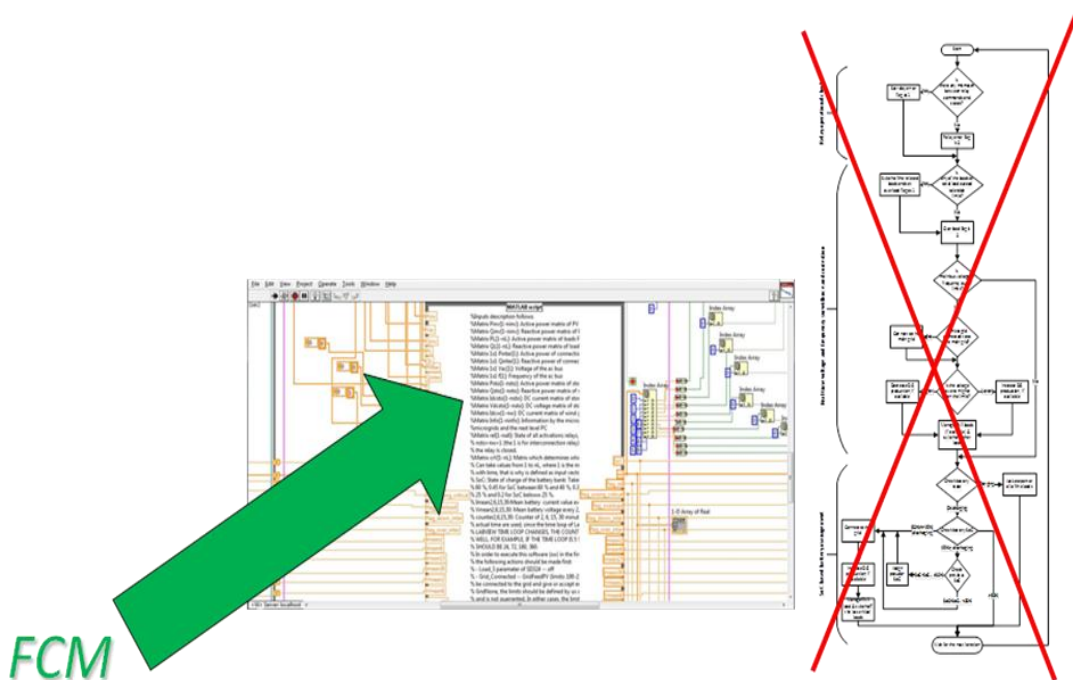
Εμπνευσμένη από την αριθμητική διαστημάτων (Interval Analysis), η προσέγγιση των Ασαφών Γνωστικών Χαρτών (Fuzzy Cognitive Maps-FCMs) είναι μια υβριδική μεθοδολογία μοντελοποίησης, που εκμεταλλεύεται χαρακτηριστικά από την ασαφή λογική (fuzzy logic) και από τη θεωρία των νευρωνικών δικτύων (Neural Networks). Η χρήση της υπάρχουσας γνώσης και εμπειρίας από τη λειτουργία πολύπλοκων συστημάτων είναι ο πυρήνας αυτής της μεθόδου μοντελοποίησης [44], [45]. Η γραφική αναπαράσταση ενός FCM είναι ένας κατευθυνόμενος γράφος με ανάδραση, αποτελούμενος από κόμβους (nodes) και διασυνδέσεις μεταξύ των κόμβων που συνοδεύονται από βάρη (weights). Οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν τους φυσικούς κόμβους που περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος και συνδέονται με κατευθυνόμενα βέλη-συνδέσεις με βάρη. Αυτές οι συνδέσεις αντιπροσωπεύουν την αιτιατή σχέση που υπάρχει μεταξύ των κόμβων. Με άλλα λόγια κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει ή πρέπει να αντιπροσωπεύει ένα φυσικό χαρακτηριστικό του συστήματος, όπως καταστάσεις, μεταβλητές, γεγονότα, ενέργειες, τιμές, τάσεις του συστήματος, το οποίο μοντελοποιείται ως ένα FCM [44]-[48].

Κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό A_j , που αναπαριστά την τιμή του και είναι αποτέλεσμα του μετασχηματισμού της αντίστοιχης πραγματικής μεταβλητής του συστήματος στο διάστημα $[0, 1]$. Το πιο σημαντικό στη μοντελοποίηση ενός συστήματος με FCM είναι ο σχεδιασμός του χάρτη, δηλαδή ο καθορισμός των κόμβων που περιγράφουν καλύτερα το σύστημα, η κατεύθυνση (ποιος επηρεάζει ποιον) και ο βαθμός (βάρος) της αιτιατής σχέσης μεταξύ τους. Για αυτό απαιτείται

συνεργασία κατά το σχεδιασμό του με ειδικούς που είναι γνώστες του συστήματος υπό μελέτη. Υπάρχουν τρία πιθανά είδη αιτιατών σχέσεων μεταξύ των κόμβων: Το βάρος μεταξύ του κόμβου C_i και του C_j που συμβολίζεται με W_{ij} , μπορεί να είναι θετικό ($W_{ij} > 0$) για θετική αιτιότητα ή μπορεί να είναι αρνητικό ($W_{ij} < 0$) για αρνητική αιτιότητα ή μπορεί να μην υπάρχει καμία σχέση μεταξύ των κόμβων C_i και C_j , οπότε το μεταξύ τους βάρος είναι $W_{ij} = 0$.

Ο σκοπός της χρήσης των FCMs σε αυτό το κεφάλαιο είναι:

(α) Ο έλεγχος της ενεργού ισχύος των Πηγών Διανεμημένης Παραγωγής, (β) Η ακριβής εκτίμηση του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών (SoC) σε νησιδοποιημένη λειτουργία του μικροδικτύου και η αντίστοιχη πολιτική διαχείρισης της ζήτησης (Demand-Side Management), να βασίζονται πλέον και στην πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών και της ζήτησης του φορτίου και να είναι όλα ενσωματωμένα σε ένα κοινό σχήμα ελέγχου που ρυθμίζει τη λειτουργία του μικροδικτύου εντός των επιτρεπτών ορίων της τάσης και της συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 7.1 φαίνεται ότι ο τελικός σκοπός είναι η αντικατάσταση του υπάρχοντος αλγορίθμου ελέγχου (που φαίνεται στο διάγραμμα ροής στα δεξιά και υπάρχει και στο παράρτημα) από έναν αλγόριθμο FCM.



Σχήμα 7.1. Ενσωμάτωση αλγορίθμου FCM στην εφαρμογή LabVIEW

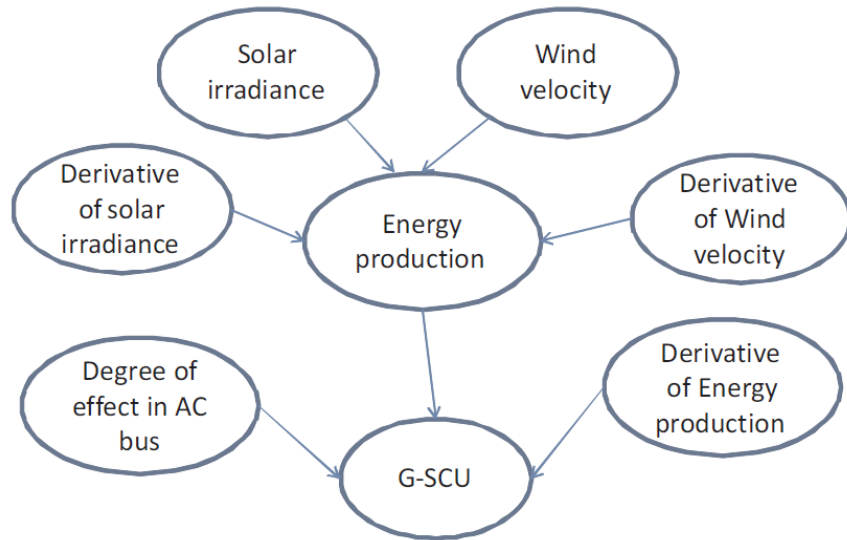
Η διαδικασία αυτή πρέπει να γίνει σταδιακά και θα ξεκινήσει με τη βήμα-βήμα προσομοίωση του μικροδικτύου με τον FCM αλγόριθμο, χρησιμοποιώντας πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα και δεδομένα από τη λειτουργία του μικροδικτύου μέχρι σήμερα.

7.2. Σχεδιασμός FCM για έλεγχο μικροδικτύου

Ένας FCM που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο του πειραματικού μικροδικτύου αποτελείται από SCUs που το καθένα ξεχωριστά είναι ένα FCM. Στο Σχήμα 7.2 φαίνεται ο FCM που σχεδιάστηκε για το G-SCU των φωτοβολταϊκών μονάδων του μικροδικτύου [49]. Οι κόμβοι που φαίνονται είναι αναλυτικά:

- Η ηλιακή ακτινοβολία (Solar Irradiance) αντιπροσωπεύεται από τον κόμβο στάσιμης κατάστασης C_1 .
- Η ταχύτητα του ανέμου (Wind Velocity) αντιπροσωπεύεται από τον κόμβο στάσιμης κατάστασης C_2 .
- Η παράγωγος της ηλιακής ακτινοβολίας (derivative of Solar Irradiance) αντιπροσωπεύεται από τον κόμβο στάσιμης κατάστασης C_3 .
- Η παράγωγος της ταχύτητας του ανέμου (derivative of Wind Velocity) αντιπροσωπεύεται από τον κόμβο στάσιμης κατάστασης C_4 .
- Η παραγόμενη ενέργεια από τη μονάδα φωτοβολταϊκών (Energy Production) από τον κόμβο C_5 .
- Ο βαθμός επίδρασης της παραγόμενης ισχύος της μονάδας φωτοβολταϊκών στον κεντρικό AC ζυγό του μικροδικτύου (Degree of effect in AC bus) αντιπροσωπεύεται από τον κόμβο C_6 .
- Η παράγωγος της παραγόμενης ενέργειας (derivative of Energy Production) είναι ο κόμβος C_7 .
- Ο κόμβος C_8 είναι το G-SCU.

Η περιγραφή του κάθε κόμβου και κάποιες αντιπροσωπευτικές τιμές που παίρνει παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1.



Σχήμα 7.2. FCM που σχεδιάστηκε για το G-SCU των Φ/Β συστημάτων του πειραματικού μικροδικτύου

Πίνακας 7.1. Κόμβοι και φυσικές αντιπροσωπευτικές τιμές

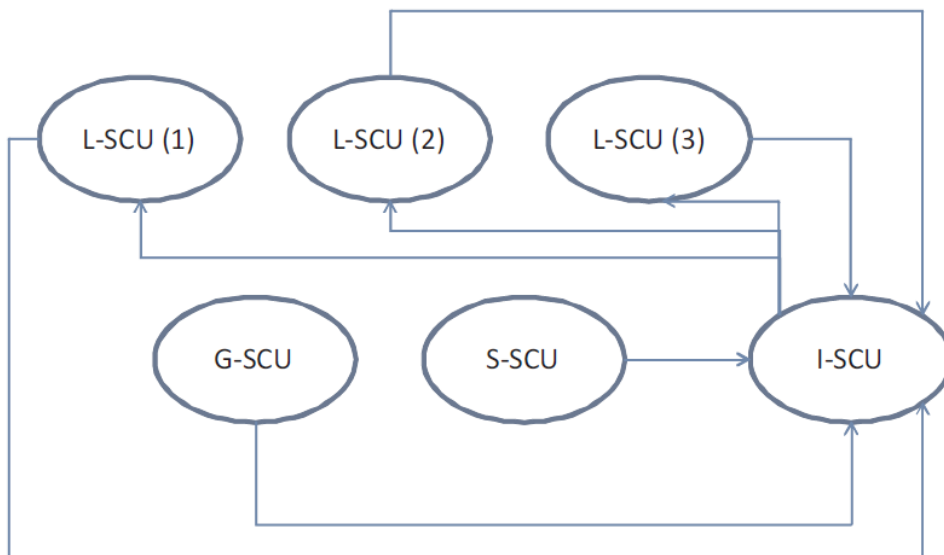
| Node | Description | Range of values |
|--------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| $C(1)$ | the Solar Irradiance | $[0W/m^2 \dots 1000W/m^2]$ |
| $C(2)$ | the Wind Velocity | $[0m/sec \dots 2m/sec]$ |
| $C(3)$ | the derivative of $C(1)$ | $[-10mW/m^2/sec \dots 10mW/m^2/sec]$ |
| $C(4)$ | the derivative of $C(2)$ | $[-0.1m/sec^2 \dots 0.1m/sec^2]$ |
| $C(5)$ | the Energy Production | $[0Wh \dots 360Wh]$ |
| $C(6)$ | the Degree of effect in AC bus | $[0 \dots 1]$ |
| $C(7)$ | the Derivative of Energy Production | $[-10W \dots 10W]$ |
| $C(8)$ | the G-SCU | $[0Wh \dots 360Wh]$ |

Ο κάθε κόμβος έχει ως είσοδο τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα $[0:1]$, εφόσον οι φυσικές τιμές εξόδου των άλλων κόμβων κανονικοποιούνται. Ο πίνακας βαρών του FCM του G-SCU του Σχήματος 7.2 φαίνεται στον Πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2. Πίνακας βαρών του FCM για το G-SCU

$$W_{gscu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ w_{51} & w_{52} & w_{53} & w_{54} & w_{55} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w_{85} & w_{86} & w_{87} & w_{88} \end{bmatrix}$$

Σε ένα άλλο παράδειγμα, ο FCM που σχεδιάστηκε για το I-SCU του πειραματικού μικροδικτύου φαίνεται στο Σχήμα 7.3., όπου οι κόμβοι περιγράφονται παρακάτω:



Σχήμα 7.3. FCM που σχεδιάστηκε για το I-SCU του πειραματικού μικροδικτύου

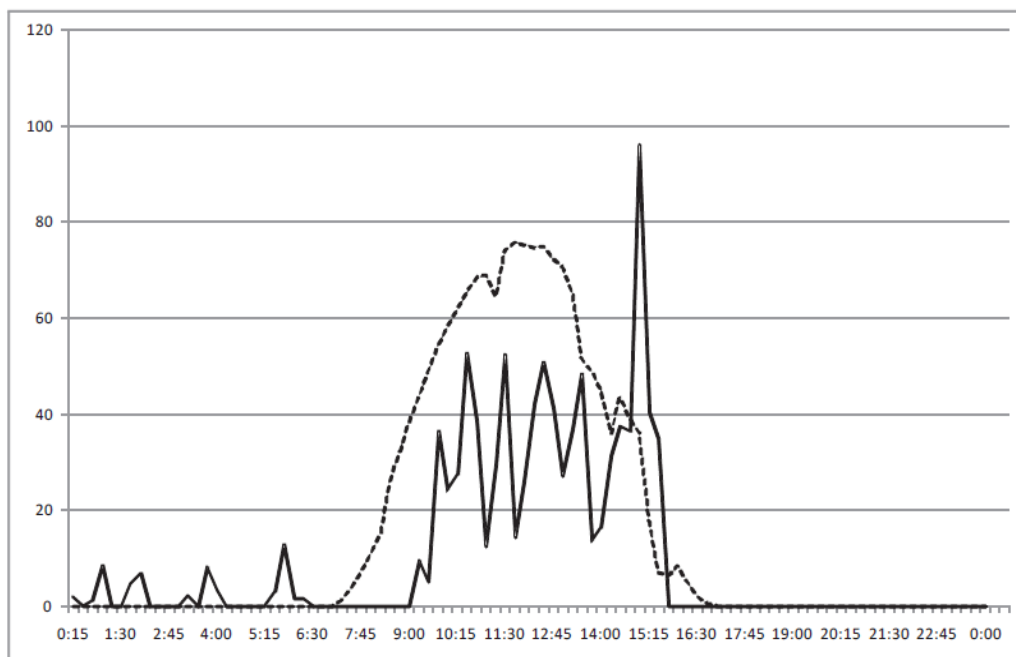
- Η έξοδος του φορτίου Νο1 (L-SCU1) είναι ο κόμβος C_1 .
- Η έξοδος του φορτίου Νο2 (L-SCU2) είναι ο κόμβος C_2 .
- Η έξοδος του φορτίου Νο3 (L-SCU3) είναι ο κόμβος C_3 .
- Η έξοδος του φορτίου Νο4 (L-SCU4) είναι ο κόμβος C_4 . (δεν φαίνεται στο σχήμα)

- Η έξοδος του φορτίου No5 (L-SCU5) είναι ο κόμβος C₅. (δεν φαίνεται στο σχήμα)
- Το G-SCU είναι ο κόμβος C₆.
- Το S-SCU είναι ο κόμβος C₇.
- Το I-SCU είναι ο κόμβος C₈.

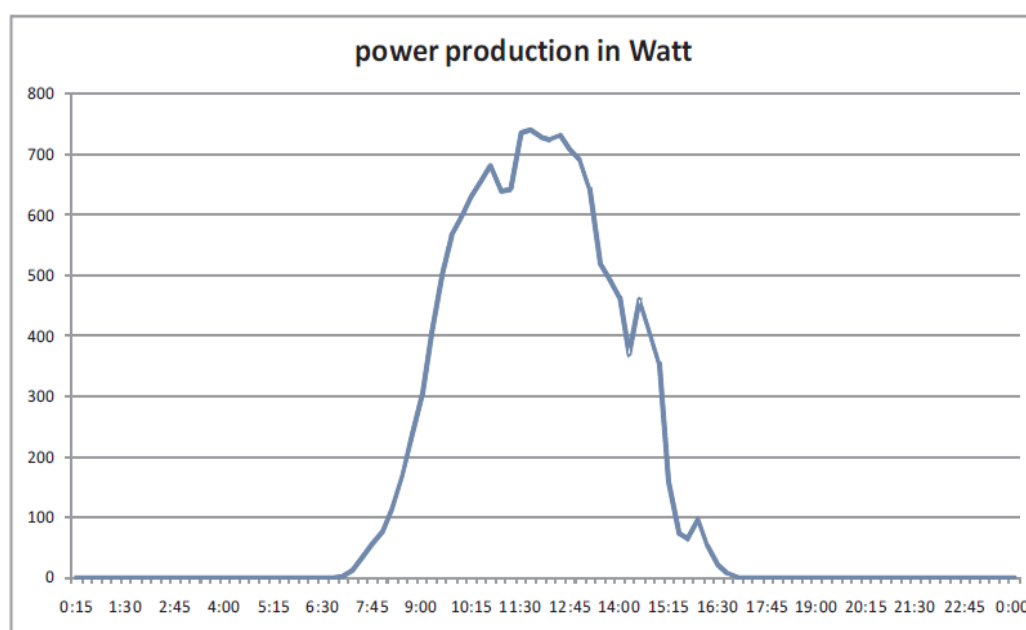
Από τα παραπάνω γίνεται προφανές ότι η διαδικασία αντικατάστασης του αρχικού αλγορίθμου από τον αλγόριθμο FCM δεν είναι απλή και απαιτεί: (α) σωστό σχεδιασμό κάθε ενός από τα 10 SCU του πειραματικού μικροδικτύου, (β) εκπαίδευση και προσομοίωση του καθενός από τα 10 FCM χρησιμοποιώντας πραγματικά πειραματικά δεδομένα. (γ) ενσωμάτωση του συνολικού αλγορίθμου στην εφαρμογή LabVIEW. Στην παρακάτω παράγραφο περιγράφεται μόνο η εκπαίδευση και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίπτωση του G-SCU της μονάδας των φωτοβολταϊκών.

7.3. Εκπαίδευση του FCM των Φ/Β συστημάτων και αποτελέσματα προσομοίωσης

Ο FCM του G-SCU της φωτοβολταϊκής μονάδας παραγωγής του μικροδικτύου χρησιμοποιείται για να προβλέψει την παραγόμενη ισχύ των φωτοβολταϊκών και να παράγει την κατάλληλη ισχύ στο σημείο κοινής σύζευξης με τον ζυγό του μικροδικτύου (Point of Common Coupling-PCC). Η εκπαίδευση σε πραγματικό χρόνο (on-line) του FCM αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα: Πρώτα τα μετεωρολογικά δεδομένα εισάγονται στον FCM, όπως επίσης και η ισχύς που έχει παραχθεί από τα φωτοβολταϊκά μέχρι τότε. Στη συνέχεια, ο FCM υπολογίζει την προβλεπόμενη παραγόμενη ισχύ των φωτοβολταϊκών για τα επόμενα 15 λεπτά [49]. Στο Σχήμα 7.4 φαίνεται ένα ημερήσιο δείγμα πραγματικών μετεωρολογικών δεδομένων από τους αισθητήρες του μικροδικτύου που εισάγονται στον FCM και στο Σχήμα 7.5 η παραγόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών την ίδια μέρα, όπως μετρήθηκε πάλι από τους αισθητήρες του μικροδικτύου.



Σχήμα 7.4. Μετεωρολογικά δεδομένα - Συνεχής γραμμή: ταχύτητα του ανέμου (m/min) Διακεκομμένη γραμμή: ηλιακή ακτινοβολία (W/(10m²)

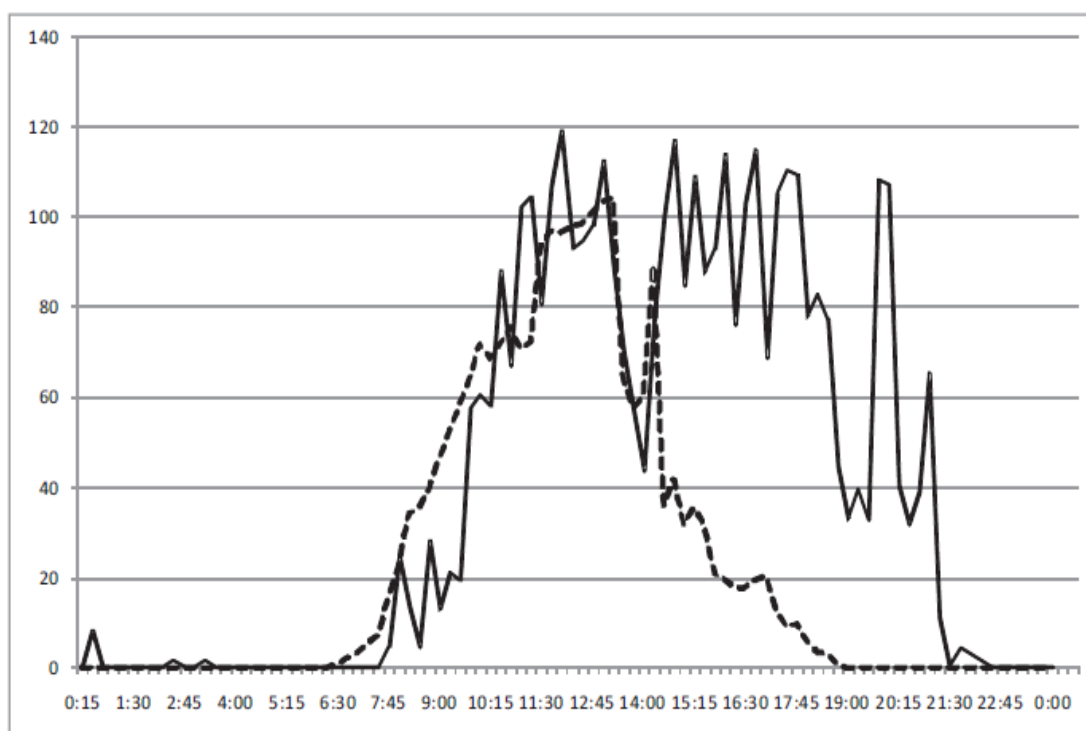


Σχήμα 7.5. Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων της ίδιας ημέρας με τα Μετεωρολογικά Δεδομένα του Σχήματος 7.4

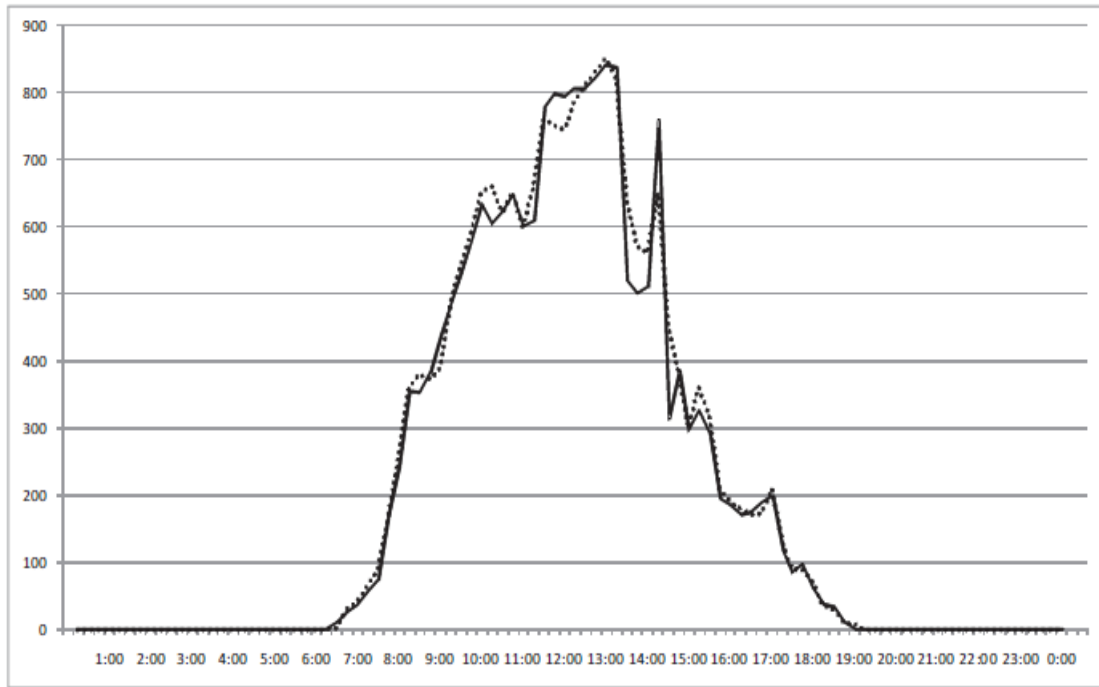
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του FCM για την ημέρα με τα μετεωρολογικά δεδομένα (ταχύτητα ανέμου και ηλιακή ακτινοβολία) του Σχήματος 7.6 φαίνονται στο Σχήμα 7.7. Σε αυτή φαίνεται η προβλεπόμενη από τον FCM ισχύς εξόδου των

φωτοβολταϊκών και ταυτόχρονα η ισχύς εξόδου που παράγεται στην πραγματικότητα. Είναι προφανές ότι υπάρχει πολύ μεγάλη συμφωνία μεταξύ των δύο καμπυλών.

Άρα, ένα τέτοιο Σχήμα από 10 FCM που θα προβλέπουν και θα ελέγχουν ταυτόχρονα τις Ειδικές Μονάδες Ελέγχου του μικροδικτύου θα μπορεί πιο αποτελεσματικά να επιτύχει την αξιόπιστη ροή ενέργειας διατηρώντας τις τιμές της τάσης και της συχνότητας στα επιθυμητά όρια. Το επόμενο βήμα φυσικά, εκτός από την ανάπτυξη των υπολοίπων FCM για τα SCU του μικροδικτύου, είναι η προσομοίωση του συνολικού Σχήματος με χρήση πραγματικών δεδομένων, όπως έγινε εδώ και ακολούθως η ενσωμάτωση του τελικού αλγορίθμου στην εφαρμογή LabVIEW, κάτι που δεν θα είναι δύσκολο, καθώς ο υπάρχων αλγόριθμος FCM είναι γραμμένος ήδη σε γλώσσα MATLAB.



Σχήμα 7.6. Μετεωρολογικά δεδομένα - Συνεχής γραμμή: ταχύτητα του ανέμου (m/min) Διακεκομμένη γραμμή: ηλιακή ακτινοβολία (W/(10m²)



Σχήμα 7.7. Παραγόμενη ισχύς του FCM της ίδιας ημέρας με τα δεδομένα του Σχήματος 7.6. Συνεχής γραμμή: πραγματική ισχύς των Φ/Β συστημάτων. Διακεκομμένη γραμμή: πρόβλεψη του FCM (Watt).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

8.1. Εισαγωγή

Πειραματικά μικροδίκτυα όπως αυτό που αναπτύσσεται σε αυτή τη διδακτορική διατριβή έχουν χρησιμοποιηθεί για να δοκιμαστεί πώς συσκευές ελέγχου μπορούν να ρυθμίσουν την τάση και τη συχνότητα, διατηρώντας το ισοζύγιο παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος σε νησιδοποιημένα ή διασυνδεδεμένα δίκτυα [50], [51]. Σε προηγμένα μικροδίκτυα, όπως αυτό της διατριβής, είναι δυνατή και η εκτίμηση της απόδοσης των αλγορίθμων διαχείρισης ενέργειας [52], [53]. Εκτός από τα πειραματικά συστήματα, υπάρχουν αρκετές μελέτες προσομοίωσης λειτουργίας και διαχείρισης μικροδικτύων [54], [55]. Οι παράμετροι και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των κατασκευαστών τμημάτων μικροδικτύων (Inverter, φωτοβολταϊκά, κτλ) έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη άλλων μοντέλων [56]. Συστήματα πολλαπλών πρακτόρων (Multi-agent systems) επίσης έχουν προτιμηθεί για προσομοίωση μικροδικτύων [57]. Ένα σημαντικό ζήτημα στην προσομοίωση είναι και η δυναμική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών αντιστροφών (inverter) [58]. Στην βιβλιογραφία, παρουσιάζεται μέσω προσομοίωσης πώς είναι δυνατόν να γίνει αντιστάθμιση ενεργού ισχύος ρυθμίζοντας και την τάση του κυρίως ζυγού ενός μικροδικτύου με τη διαχείριση ενεργειακής αποθήκευσης [59]. Άλλοι ερευνητές δημιούργησαν μια βιβλιοθήκη με μοντέλα και διάφορα σενάρια και τη χρησιμοποιούν ως εργαλείο αναλύσεων [60]. Όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία, ο έλεγχος φορτίων που βασίζεται στον καθορισμό βαθμού κρισιμότητας από το διαχειριστή του δικτύου αποτελεί πολύτιμο εργαλείο για την ευστάθεια του δικτύου [61].

Μεταξύ όλων αυτών των προσεγγίσεων, τα πειραματικά συστήματα εμφανίζουν πολλούς περιορισμούς, όπως οι δυνατότητες-χωρητικότητα των συσκευών τους (συνήθως σε Watt), τα περιορισμένα σημεία σύνδεσης πρόσθετων μονάδων διανεμημένης παραγωγής ή δικτύων και εξάρτηση από τη διαθεσιμότητα των τοπικών ΑΠΕ (πχ στις περιοχές εγκατάστασης πειραματικών μικροδικτύων δεν υπάρχει συνήθως υψηλό αιολικό δυναμικό). Από την άλλη, οι ως τώρα μέθοδοι προσομοίωσης που προαναφέρθηκαν, επικεντρώνονται σε μερικά μόνο μέρη-συσκευές του μικροδικτύου, αμελώντας έτσι τα μοντέλα προσομοίωσης των υπολοίπων δομικών στοιχείων των μικροδικτύων. Έτσι, το συνολικό μοντέλο του μικροδικτύου βασίζεται κυρίως σε έτοιμες και περιοριστικές βιβλιοθήκες, απέχει

πολύ από την πραγματικότητα και δεν έχει πολλές δυνατότητες ευελιξίας και εφαρμογής διαφορετικών σεναρίων.

Μία εναλλακτική προσέγγιση που συνδυάζει τα μοντέλα προσομοίωσης και τα πειραματικά συστήματα είναι τα μοντέλα προσομοίωσης-εικονικά μικροδίκτυα που αναπτύσσονται με βάση τα πειραματικά δεδομένα των πιλοτικών εγκαταστάσεων. Ένα τέτοιο σύστημα έχει τα εξής πλεονεκτήματα: (α) Διάφορα σενάρια μπορούν να δοκιμαστούν πάνω του, (β) μπορεί να συνδεθεί σε διάφορα σημεία του δικτύου διανομής, (γ) είναι εύκολα επεκτάσιμο. Οι ψηφιακοί προσομοιωτές πραγματικού χρόνου ή οι τεχνικές Hardware In the Loop (HIL) κάνουν τα σενάρια που μελετώνται πιο ρεαλιστικά και αυξάνουν την ευελιξία των πειραματικών μικροδικτύων [62]. Είναι επίσης δυνατόν σε αυτά να δοκιμαστούν νέοι αλγόριθμοι διαχείρισης ενέργειας, όπως αυτής της διατριβής ή συστήματα multi-agent [63]. «Η σύγχρονη προσομοίωση» (Co-simulation) όλου του μικροδικτύου, δηλαδή του συστήματος ροής ισχύος και του συστήματος μετάδοσης πληροφορίας, επιτρέπει στους ερευνητές να επωφεληθούν από διαφορετικά εργαλεία ανάλυσης και να αναπτύξουν πλατφόρμες που επιτρέπουν τη ρεαλιστική και εις βάθος ανάλυση των συστημάτων ισχύος [64]. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση όμως, τα πιο πολλά μοντέλα-εικονικά μικροδίκτυα αυτού του είδους που έχουν αναπτυχθεί ως σήμερα επικεντρώνονται κυρίως στο δίκτυο επικοινωνίας του ευφυούς δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και σε ζητήματα προστασίας. Υπάρχει συνεπώς ανάγκη για δημιουργία μιας πλατφόρμας προσομοίωσης από πραγματικά δεδομένα που να συμπεριλαμβάνει αξιόπιστα μοντέλα για όλες τις συσκευές ενός μικροδικτύου.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης του πειραματικού μικροδικτύου της διατριβής, μαζί με επιβεβαίωση της εγκυρότητάς του, αφού γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του με τα πραγματικά δεδομένα. Για την ανάπτυξη του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν, για το μοντέλο κάθε μίας συσκευής ξεχωριστά, τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Ο αλγόριθμος ελέγχου αυτής της διατριβής ενσωματώθηκε στο λογισμικό του μοντέλου προσομοίωσης (PSCAD). Στη συνέχεια 5 ώρες από νέα πειραματικά δεδομένα εφαρμόστηκαν στο τελικό μοντέλο-εικονικό εργαστήριο και τα αποτελέσματα έδειξαν πολύ μεγάλη ομοιότητα με την πραγματική απόκριση του μικροδικτύου, τόσο όσο αφορά στη ροή ισχύος στον κύριο ζυγό, όσο και στη διαχείριση των μπαταριών και στη διαχείριση της ζήτησης. Επιπλέον, το σύστημα του φορτίου 4 με το KNX dimmer προσομοιώθηκε και εισήχθη στο υπόλοιπο εικονικό – μικροδίκτυο και προέκυψαν παρόμοια αποτελέσματα. Τέλος, για να διαφανεί η επεκτασιμότητα του μοντέλου που αναπτύχθηκε, εφαρμόστηκε σε συνεργασία με ένα άλλο μοντέλο προσομοίωσης από τη βιβλιογραφία. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει ένα ασθενές δίκτυο διανομής, στο οποίο συνδέθηκε σε διάφορα σημεία του και το προσομοιωμένο εργαστηριακό μικροδίκτυο και εκτελέστηκαν διάφορα σενάρια. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το αναπτυγμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη μεγάλων δικτύων διανομής και για την ανάδειξη των προβλημάτων που εμφανίζονται σε περίπτωση διείσδυσης ΑΠΕ σε αυτά, ενώ και ο

προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να προσαρμοστεί και να ελεγχθεί αν μπορεί να λύσει τα προβλήματα αυτά.

8.2. Μοντελοποίηση μικροδικτύου και ενσωμάτωση αλγορίθμου ελέγχου

Κάθε τμήμα του μικροδικτύου εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά, από την πλευρά της μοντελοποίησης στη στάσιμη κατάσταση. Για αυτό, αρχικά αναπτύχθηκαν τα μοντέλα στάσιμης κατάστασης της κάθε συσκευής του μικροδικτύου. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος ελέγχου και διαχείρισης ενέργειας ενσωματώθηκε στο συνολικό μοντέλο.

8.2.1. Μοντέλα φωτοβολταϊκών συστημάτων και ανεμογεννήτριας

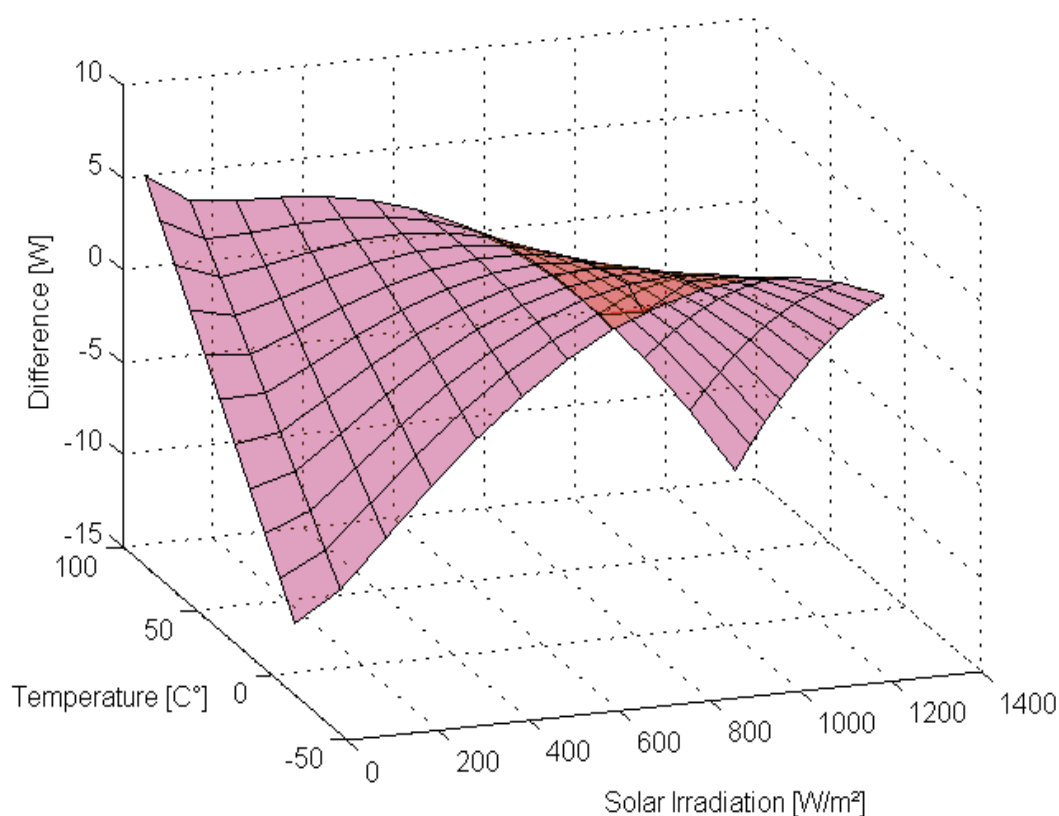
Αφού η ανάλυση αφορά στη μακροπρόθεσμη λειτουργία του συστήματος, αναλυτικά μοντέλα έπρεπε να κατασκευαστούν για τις δύο μονάδες φωτοβολταϊκών και για την ανεμογεννήτρια. Και οι τρεις αυτές μονάδες παραγωγής συνδέονται στον κύριο ζυγό μέσω αντιστροφέα πηγής ρεύματος (Current-source inverters – CSI). Η συμπεριφορά τους μοιάζει με μια πηγή ρεύματος που εγχέει στον κύριο ζυγό ρεύματα σχετιζόμενα με την τάση σε στάσιμη κατάσταση λειτουργίας [65]. Μαθηματικές σχέσεις μεταξύ των ρευμάτων στην DC και στην AC πλευρά των αντιστροφέων έχουν αναπτυχθεί και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν [66]. Επιπλέον, δύο ανεξάρτητες, στοχαστικές παράμετροι, η ηλιακή ακτινοβολία (I_r) και η θερμοκρασία περιβάλλοντος (T) λήφθηκαν υπόψη ως ανεξάρτητες παράμετροι εισόδου για τη μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών.

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω, αρχικά, τα διαθέσιμα από τη βιβλιοθήκη του PSCAD μοντέλα φωτοβολταϊκών πλαισίων, MPPT και Inverter χρησιμοποιήθηκαν [67], [68]. Όμως, η χρήση αυτών των μοντέλων, μαζί με τα υπόλοιπα έτοιμα μοντέλα για τις υπόλοιπες συσκευές του μικροδικτύου (μπαταρίες, αντιστροφείς μπαταριών, κτλ) αύξησε κατακόρυφα το απαιτούμενο χρόνο προσομοίωσης, γεγονός που αποτελούσε μεγάλο εμπόδιο, ειδικά για μακροπρόθεσμες προσομοιώσεις. Αντί αυτού, προτιμήθηκε ένα απλούστερο μοντέλο, που βασίζεται στην πολυωνυμική προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων, όπως έχει γίνει και σε παρόμοιες μελέτες [64], [65]. Δημιουργήθηκε ένα σετ δεδομένων με την ισχύ εξόδου (Watt) μιας φωτοβολταϊκής μονάδας παραγωγής (μετά τον inverter και τον MPPT) και των αντίστοιχων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που προκάλεσαν αυτή την ισχύ εξόδου. Με

την πολυωνυμική προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων, αυτό το σετ δεδομένων χρησιμοποιήθηκε για να παραχθεί μια εξίσωση πρώτης τάξης, η εξίσωση (8.1), που αναπαριστά τη σχέση μεταξύ των παραμέτρων εισόδου και της ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού.

Η διαφορά μεταξύ των πραγματικών δεδομένων και της καμπύλης της εξίσωσης (8.1) φαίνεται στο Σχήμα 8.1. Ο συντελεστής προσδιορισμού r^2 είναι 0,9968, πολύ κοντά στη μονάδα, γεγονός που σημαίνει ότι η προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων στην εξίσωση 8.1 είναι πάρα πολύ καλή.

$$P_{pv} = 8.542173377 - 0.17198877T + 0.170425778I_T \quad (8.1)$$



Σχήμα 8.1. Διαφορά μεταξύ πραγματικών δεδομένων και καμπύλης της εξίσωσης (8.1)

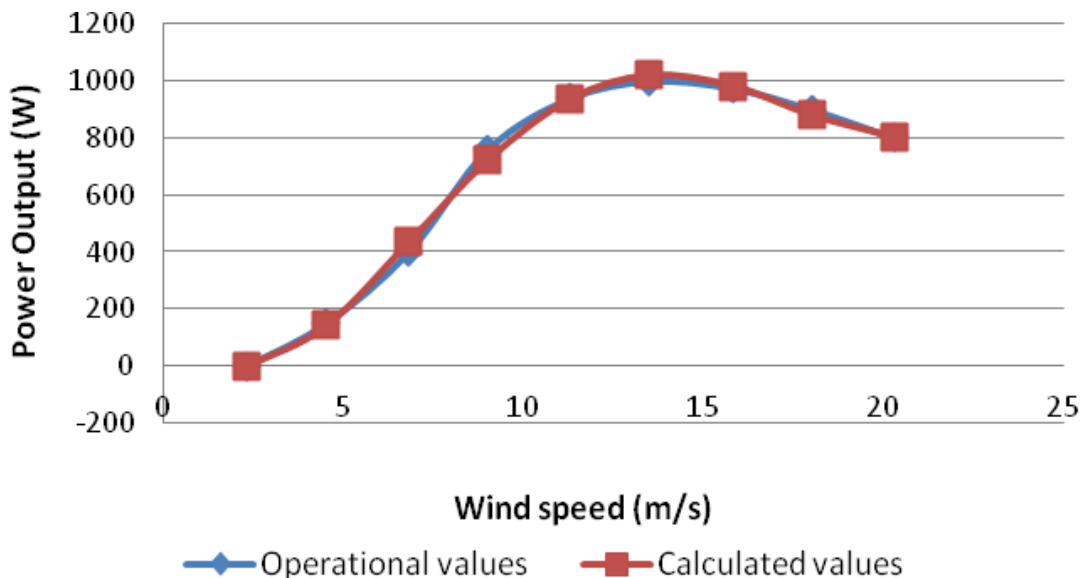
Η κάθε μονάδα παραγωγής από φωτοβολταϊκά μοντελοποιήθηκε στο PSCAD ως ένα «κουτί-block» που περιέχει αναλογικούς και λογικούς τελεστές. Το λογικό κομμάτι αποτελείται από τους λογικούς τελεστές και χρησιμοποιείται για να δεχτεί τα δεδομένα εισόδου (ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία) από ένα εξωτερικό αρχείο και να υπολογίσει την ισχύ εξόδου των φωτοβολταϊκών, λαμβάνοντας υπόψη την MPPT λειτουργία. Το λογικό κομμάτι καθορίζει την τιμή του εγχεόμενου ρεύματος

στο ζυγό με βάση την τάση και τη συχνότητα που διαβάζονται από τον AC ζυγό του μικροδικτύου. Το αναλογικό κομμάτι του αντιστροφέα είναι μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται εξωτερικά από το λογικό κομμάτι. Για σκοπούς παρακολούθησης και ελέγχου, προστίθενται στο κύριο block του μοντέλου μία αναλογική είσοδος (B_pn) (για να λαμβάνει εντολές παρέμβασης, όπως ρελέ) και μια αναλογική έξοδος (P_pn) (γι παρακολούθηση της ισχύος εξόδου).

Το PSCAD περιλαμβάνει ένα έτοιμο μοντέλο για ανεμογεννήτριες στη βιβλιοθήκη του. Όμως το μοντέλο αυτό μιμείται μεγάλες ανεμογεννήτριες με ελεγκτές ταχύτητας και δεν είναι κατάλληλο για να προσομοιώσει μικρής κλίμακας, μονοφασικές ανεμογεννήτριες, όπως αυτή του εργαστηριακού μικροδικτύου. Για αυτό αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο, με τον ίδιο τρόπο που ακολουθήθηκε για τη μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών. Ένα τέταρτης τάξης πολυώνυμο προσαρμόστηκε με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων στα πραγματικά διαθέσιμα από το μικροδίκτυο δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου (v_w) και της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας (P_w) [34], [69].

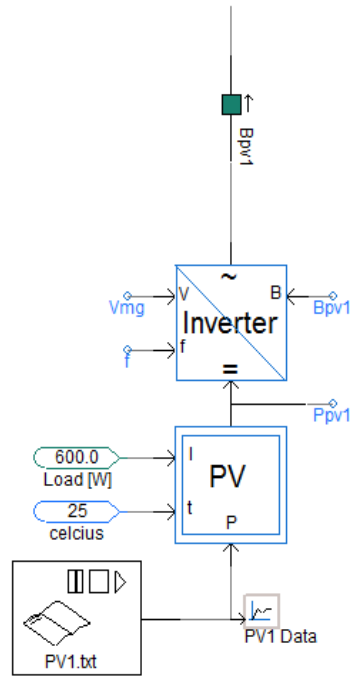
$$P_w = 0.0768v_w^4 - 3.7371v_w^3 + 55.024v_w^2 + 189.02v_w + 186.76 \quad (8.2)$$

Η διαφορά μεταξύ των πραγματικών δεδομένων και της καμπύλης της εξίσωσης (8.2) φαίνεται στο Σχήμα 8.2. Ο συντελεστής προσδιορισμού r^2 είναι 0,9969, πολύ κοντά στη μονάδα, γεγονός που σημαίνει ότι η προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων στην εξίσωση 8.2 είναι πάρα πολύ καλή.

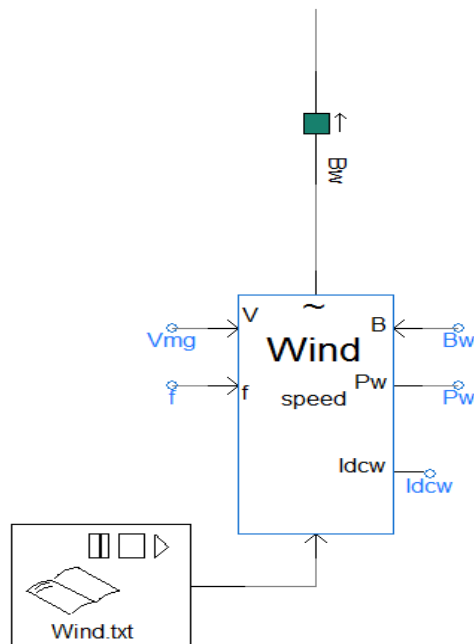


Σχήμα 8.2. Διαφορά μεταξύ πραγματικών δεδομένων και καμπύλης της εξίσωσης (8.2)

Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας αναπαριστάται από ένα σύμβολο-block που διαβάζει την ταχύτητα του ανέμου από ένα αρχείο και την τάση του ζυγού, τη συχνότητα και την κατάσταση των δέκα (10) ρελέ του μικροδικτύου. Έχει τρεις εξόδους: τη σύνδεση με τον κύριο ζυγό, την ενεργή ισχύ της εξόδου (AC) και το DC ρεύμα εξόδου, πριν τον ανορθωτή της ανεμογεννήτριας. Τα αναπτυσσόμενα μοντέλα όπως φαίνονται στο PSCAD είναι στο Σχήμα 8.3.



(α)



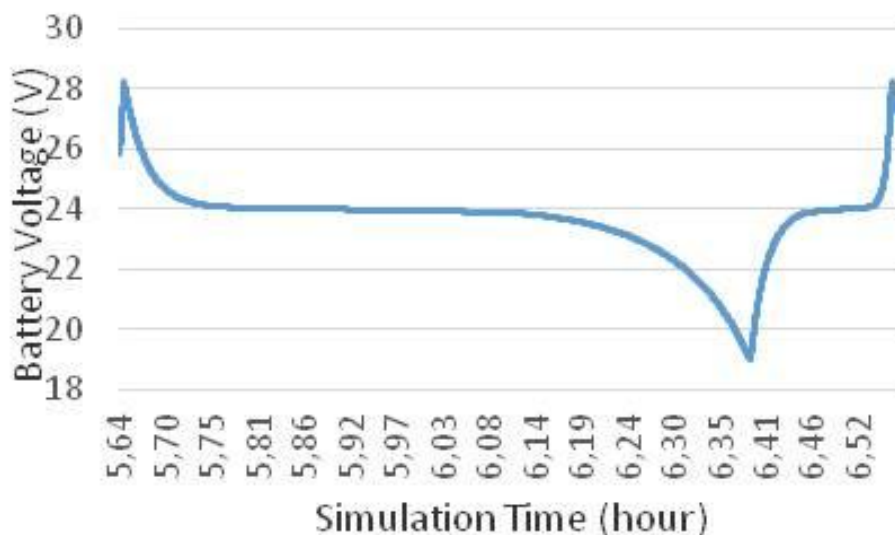
(β)

Σχήμα 8.3. Μοντέλα που αναπτύχθηκαν για: (α) μονάδες Φ/Β συστημάτων του μικροδικτύου, (β) την ανεμογεννήτρια του μικροδικτύου

8.2.2. Μοντέλο μπαταριών υγρού τύπου (Lead-acid Batteries-FLA)

Στο μικροδίκτυο χρησιμοποιούνται 24 μπαταρίες υγρού τύπου – FLA χωρητικότητας 600 Ah – C10. Αφού το PSCAD δεν διαθέτει τέτοιο μοντέλο στη βιβλιοθήκη του, αναπτύχθηκε ένα νέο. Δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικά κομμάτια-blocks, ένα για τη φάση της φόρτισης και ένα για τη φάση της εκφόρτισης. Στη φάση της εκφόρτισης κατά τη νησιδοποιημένη λειτουργία, οι μπαταρίες δουλεύουν ως μια τοπική μονάδα διανεμημένης παραγωγής, που γεμίζει το κενό μεταξύ παραγωγής-ζήτησης στο ισοζύγιο ισχύος. Ο μετατροπέας – inverter της μπαταρίας σε αυτή τη φάση είναι σε λειτουργία ελέγχου τάσης (voltage-control), για αυτό και αναπαριστάται από μία πηγή τάσης. Η ισχύς που πρέπει να διοχετευτεί στο σύστημα προκύπτει από τη διαφορά της τοπικής παραγωγής από την τοπική ζήτηση του μικροδικτύου. Επιπλέον, στο μοντέλο λαμβάνεται υπόψη η μη-γραμμικότητα της χαρακτηριστικής καμπύλης τάσης-ρεύματος των μπαταριών. Στη φάση της φόρτισης, η μπαταρία συμπεριφέρεται ως ένα σταθερό φορτίο. Η τάση της μπαταρίας τότε είναι πάλι μη-γραμμική συνάρτηση του χρόνου, αλλά έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά από τη φάση της εκφόρτισης.

Οι δύο ξεχωριστές καταστάσεις του μοντέλου ενσωματώνονται σε ένα κύριο block μαζί με τη δυνατότητα μετάβασης μεταξύ των δύο καταστάσεων. Σε διασυνδεδεμένη με το υπόλοιπο δίκτυο λειτουργία, η συστοιχία μπαταριών οδηγείται σε λειτουργία φόρτισης και περιμένει σε αδράνεια, αφού έχει φορτιστεί. Σε νησιδοποιημένη λειτουργία: (α) σε περίπτωση που οι τοπικές πηγές διανεμημένης παραγωγής παράγουν περισσότερη ισχύ από αυτή των φορτίων, οι μπαταρίες επιστρέφουν σε λειτουργία φόρτισης. Αν η παραγωγή δεν επαρκεί για να τροφοδοτήσει όλα τα φορτία, οι μπαταρίες αρχίζουν να εκφορτίζονται. Αυτή η συμπεριφορά προσομοιώνεται συνδέοντας τα δύο μοντέλα φόρτισης και εκφόρτισης με μια λογική μονάδα της μπαταρίας που αποφασίζει την κατάσταση λειτουργίας, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες. Η καμπύλη τάσης-χρόνου του μοντέλου της συστοιχίας των μπαταριών για ένα κύκλο εκφόρτισης-φόρτισης φαίνεται στο Σχήμα 8.4. Και σε αυτή την περίπτωση, κατά τη σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα, ο συντελεστής προσδιορισμού r^2 είναι πολύ κοντά στη μονάδα, 0.9982.

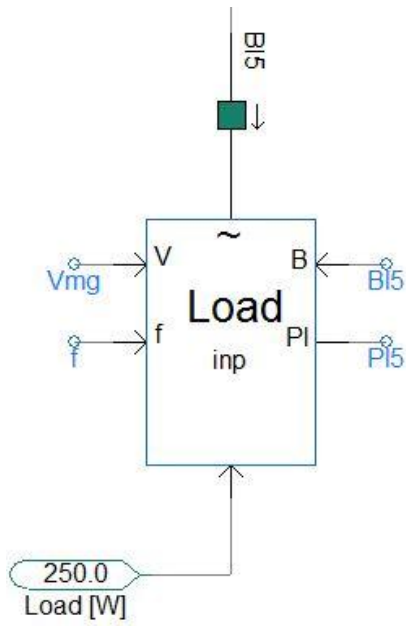


Σχήμα 8.4. Καμπύλη τάσης-χρόνου του μοντέλου συστοιχίας μπαταριών για ένα κύκλο εκφόρτισης-φόρτισης

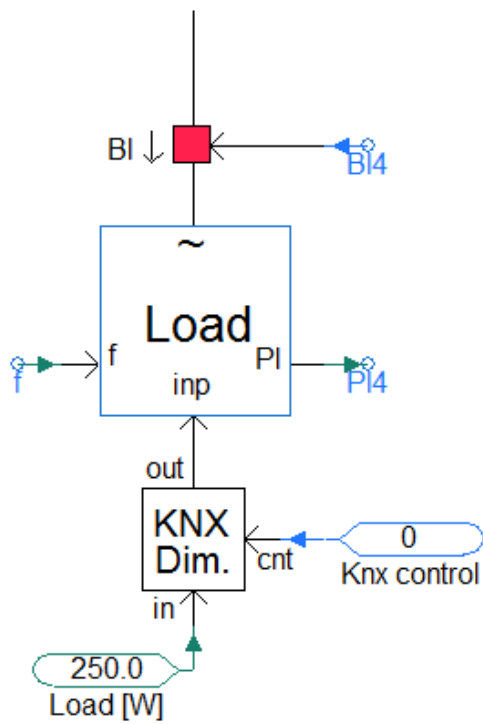
8.2.3. Μοντέλο φορτίων και φορτίων ελεγχόμενων από KNX

Τα φορτία του μικροδικτύου μοντελοποιήθηκαν ως μια βελτιωμένη έκδοση του μοντέλου σταθερού φορτίου της βιβλιοθήκης του PSCAD. Το μοντέλο της βιβλιοθήκης καταναλώνει σταθερή ισχύ, για τις προκαθορισμένες τιμές τάσης και συχνότητας που εμφανίζονται στα άκρα του. Αυτό το μοντέλο τροποποιήθηκε ώστε η ισχύς των φορτίων να διαβάζεται από ένα εξωτερικό αρχείο, οπότε οι διακυμάνσεις της τάσης και της συχνότητας αντικατοπτρίζονται στο φορτίο σε πραγματικό χρόνο. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, αναλογικοί κόμβοι προστέθηκαν, για τη διακοπή ή έναρξη λειτουργίας από τα ρελέ και για την καταγραφή της ισχύος (Σχήμα 8.5).

Για την περίπτωση του φορτίου 4, που στο Κεφάλαιο 6 ελέγχεται από το KNX dimmer, μοντελοποιήθηκε επιπλέον το KNX dimmer, ως ένα πρόσθετο κομμάτι-block, που συνδέεται στον κόμβο ισχύος του μοντέλου φορτίου του Σχήματος 8.5. Έτσι, η ισχύς του φορτίου αυξάνεται, άρα και η φωτεινότητα, όταν λαμβάνεται ο αριθμός +1 στην είσοδο ελέγχου του dimmer, ενώ μειώνεται, όταν ληφθεί ο αριθμός -1 στην είσοδο ελέγχου του dimmer. Η εμφάνιση του αριθμού 0 στην είσοδο ελέγχου του dimmer δεν οδηγεί σε καμία ενέργεια. Στο Σχήμα 8.6 φαίνεται το αντίστοιχο block του PSCAD.



Σχήμα 8.5. Μοντέλο φορτίων.



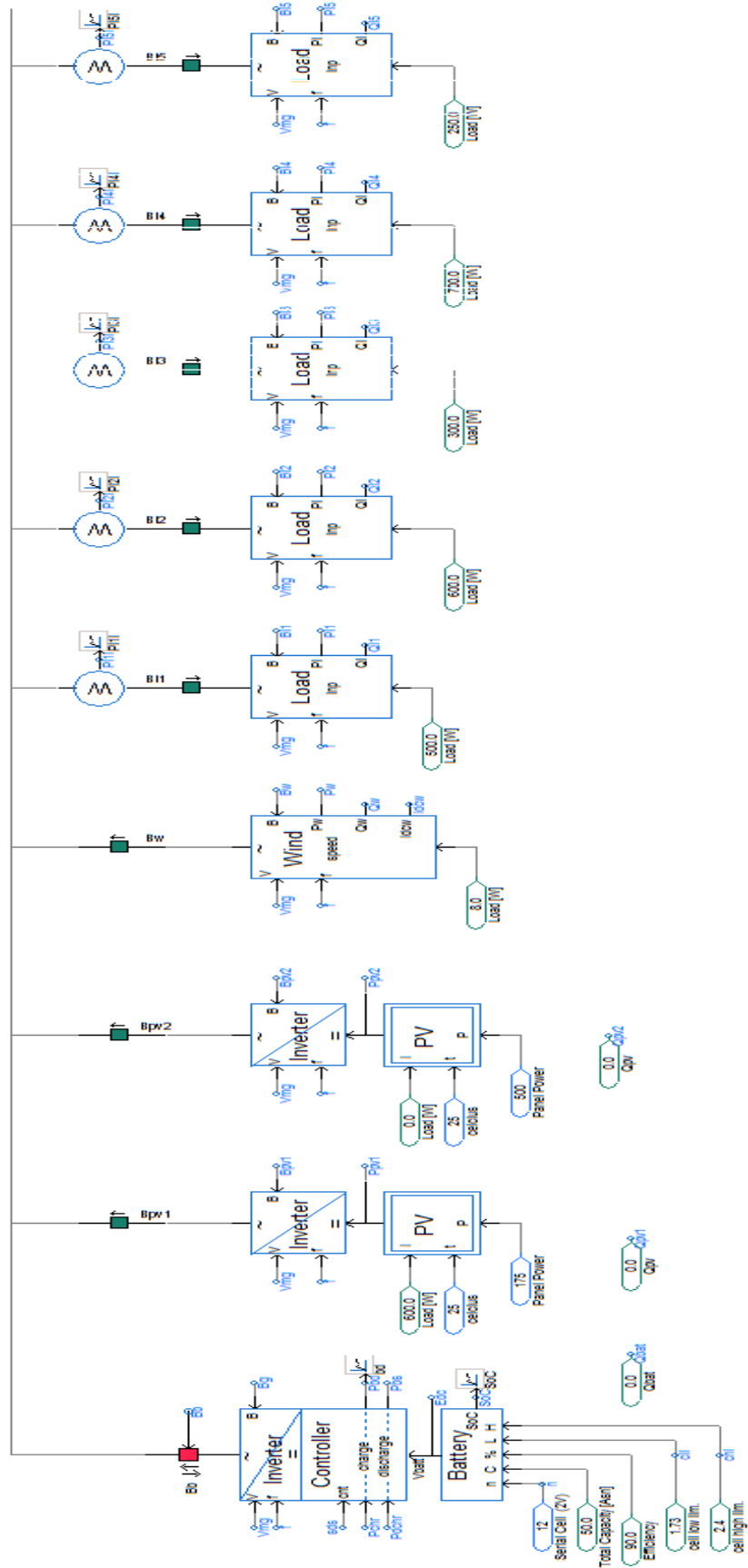
Σχήμα 8.6. Μοντέλο φορτίων με KNX έλεγχο.

8.2.4. Δημιουργία μοντέλου μικροδικτύου από επιμέρους μοντέλα και ενσωμάτωση του αλγορίθμου ελέγχου

Τα ανεπτυγμένα μοντέλα συνδέονται σε έναν κοινό ζυγό AC, που αντιπροσωπεύει τον AC ζυγό του πραγματικού μικροδικτύου, όπως στο Σχήμα 8.7. Τα πέντε φορτία συνδέθηκαν ξεχωριστά το κάθε ένα.

Ο αλγόριθμος ελέγχου του μικροδικτύου, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 4 και στο παράρτημα, ενσωματώθηκε στο μοντέλο του Σχήματος 8.7. Διαβάζει το ρεύμα του κάθε κλάδου του προσομοιωμένου μικροδικτύου του Σχήματος 8.7, την κατάσταση των ρελέ και παρακολουθεί σε κάθε δευτερόλεπτο την τάση του κυρίως ζυγού και την τάση του υπολοίπου δικτύου, όπως το κάνει και στην πραγματικότητα. Στο τέλος κάθε κύκλου λειτουργίας του αλγορίθμου, προβαίνει στις αντίστοιχες ενέργειες ελέγχου, δίνοντας τιμές στα αντίστοιχα ρελέ του προσομοιωμένου μικροδικτύου. Ο αλγόριθμος, όπως και στην πραγματικότητα, κάνει και τον υπολογισμό για την εκτίμηση του SoC των μπαταριών και τον υπολογισμό της μέσης τιμής ανά λεπτό της τάσης και του ρεύματος της μπαταρίας [29]. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών, όπως και στην πραγματικότητα, μεταφέρονται στον αλγόριθμο για το επόμενο βήμα εκτέλεσης. Συνεπώς, σε κάθε βήμα εκτέλεσης, μια ομάδα πινάκων εξόδου του αλγορίθμου, που είναι γραμμένος σε MATLAB, μεταφέρεται από το PSCAD στην είσοδο του αλγορίθμου για το επόμενο βήμα εκτέλεσης. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος MATLAB δέχεται από το PSCAD ως εισόδους 61 τιμές (οργανωμένες σε ομάδες πινάκων) και βγάζει ως εξόδους προς το PSCAD 30 τιμές (πάλι οργανωμένες σε ομάδες πινάκων).

Για να ενισχυθεί η αξιοπιστία της προσομοίωσης και η ευκολότερη διάγνωση σφαλμάτων, 229 επιπλέον παράμετροι δημιουργήθηκαν και εξάγονται μαζί με τις 30 εξόδους προς το PSCAD, στο τέλος του κάθε κύκλου εκτέλεσης. Αυτές οι επιπλέον παράμετροι παρακολούθησης δείχνουν το είδος της απόφασης που παίρνει κάθε φορά ο αλγόριθμος. Αυτές οι παράμετροι βοηθούν το χρήστη να καταλάβει την κατάσταση ροής ισχύος στο μικροδίκτυο κάθε χρονική στιγμή, ενώ τον προειδοποιεί και για έκτακτες καταστάσεις, όπως υπερφόρτιση, πτώση τάσης, κτλ. Ο τρόπος ενσωμάτωσης του αλγορίθμου ελέγχου του MATLAB στο PSCAD φαίνεται στο Σχήμα 8.8.

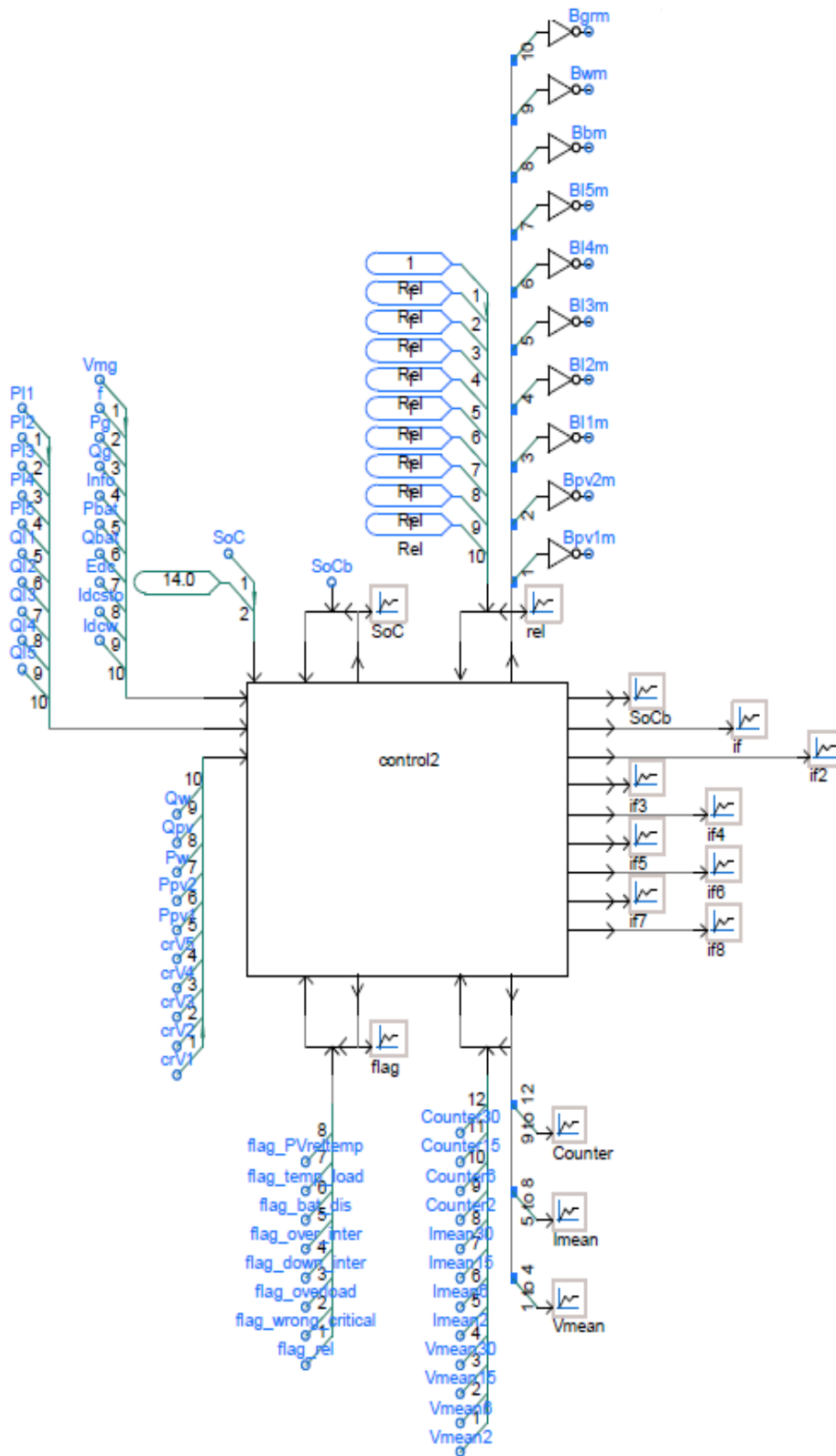


Σχήμα 8.7. Προσομοίωση μικροδίκτυου

8.3. Μελέτες πρακτικών συστημάτων και σύγκριση με πραγματικά δεδομένα

8.3.1. Μελέτη πρακτικού συστήματος χωρίς KNX φορτία και σύγκριση με πραγματικά δεδομένα

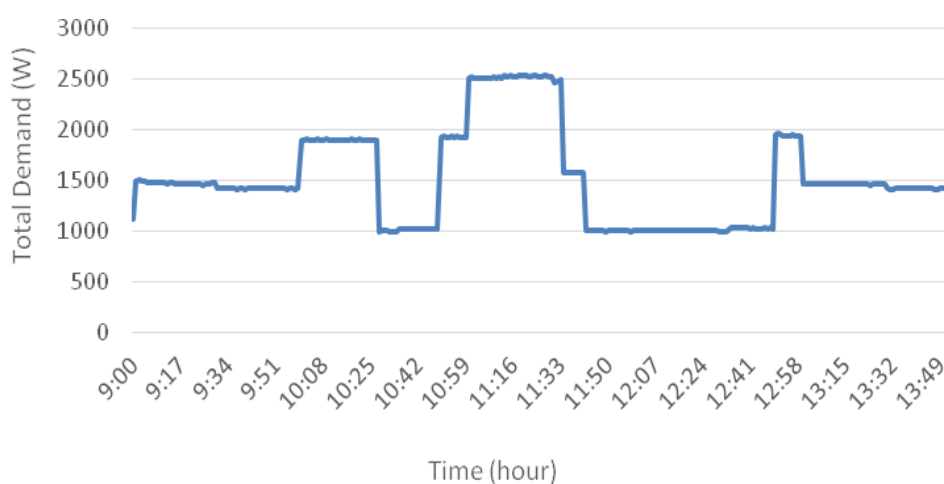
Η απόδοση του εικονικού μικροδικτύου δοκιμάστηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα από τη λειτουργία του πραγματικού μικροδικτύου. Σκοπός ήταν να φανεί αν η απόκριση-αποφάσεις του αλγορίθμου ελέγχου κατά την προσομοίωση συμπίπτουν με τις αποφάσεις που ελήφθησαν κατά την πραγματική λειτουργία. Τα δεδομένα αφορούσαν σε λειτουργία 5 ωρών από τις 9.00 πμ το πρωί μέχρι τις 2.00 μμ το μεσημέρι και περιλαμβάνουν διάφορα μοτίβα στο προφίλ του συνολικού φορτίου και σενάρια σύνδεσης και αποσύνδεσης του μικροδικτύου από το υπόλοιπο δίκτυο.



Σχήμα 8.8. Ενσωμάτωση του αλγορίθμου ελέγχου στο PSCAD.

Πιο συγκεκριμένα από τις 9.00 πμ και έπειτα, κάθε ώρα, το προφίλ του συνολικού φορτίου αλλάζει, αφού ένας ή περισσότεροι καταναλωτές εκκινούν ή σταματούν. Επίσης, μισή ώρα αργότερα από τις εναλλαγές των φορτίων, η σύνδεση του

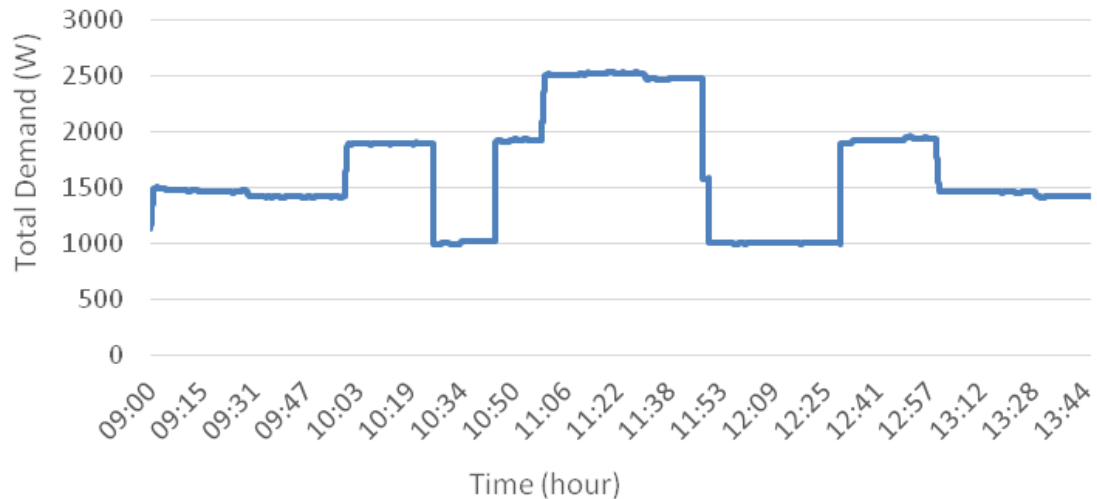
μικροδικτύου με το υπόλοιπο δίκτυο διακόπτεται και επανέρχεται διαδοχικά σε ωριαία βάση, οδηγώντας το μικροδίκτυο σε ωριαία λειτουργία νησιδοποίησης αρχικά και διασύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο στη συνέχεια. Αυτές οι εναλλαγές φορτίου και σύνδεσης με το δίκτυο επιφέρουν αλλαγές στην κατεύθυνση ροής ισχύος και ενεργοποιούν το σύστημα διαχείρισης ενέργειας των μπαταριών. Ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών (SoC level), ο αλγόριθμος εφαρμόζει τις αντίστοιχες ενέργειες, αυξάνοντας ή μειώνοντας την ισχύ των μονάδων διανεμημένης παραγωγής ή ανοίγοντας και κλείνοντας φορτία, ανάλογα με το βαθμό κρισιμότητάς τους. Το προφίλ του συνολικού φορτίου για αυτές τις 5 ώρες φαίνεται στο Σχήμα 8.9, όπως προέκυψε μετά τις ενέργειες του αλγορίθμου κατά την πραγματική λειτουργία.



Σχήμα 8.9. Προφίλ συνολικού φορτίου, μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου κατά την πραγματική λειτουργία

Τα συμβάντα του μικροδικτύου, η κατάσταση της μπαταρίας, το συνολικό φορτίο, η διαμόρφωση του φορτίου και οι λειτουργίες νησιδοποίησης και διασύνδεσης φαίνονται στον Πίνακα 8.1, για την πραγματική λειτουργία.

Κάθε λεπτό καταγράφονται από το μοντέλο προσομοίωσης δεδομένα για την αξιολόγηση της απόδοσης του εικονικού εργαστηρίου. Το προφίλ του συνολικού φορτίου, μετά και από τις ενέργειες του αλγορίθμου κατά τη λειτουργία προσομοίωσης φαίνεται στο Σχήμα 8.10.

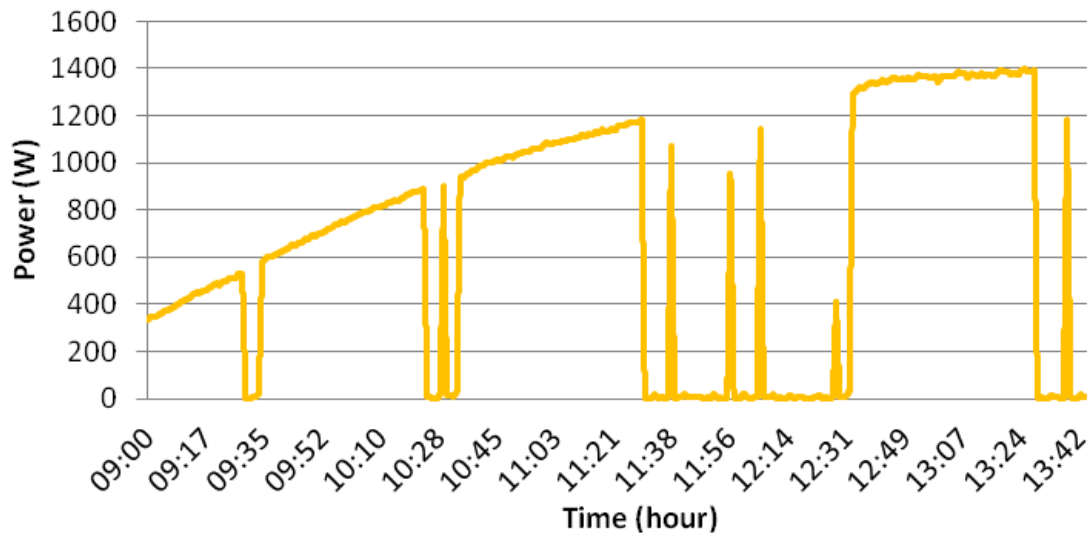


Σχήμα 8.10. Προφίλ του συνολικού φορτίου, μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου κατά την προσομοίωση

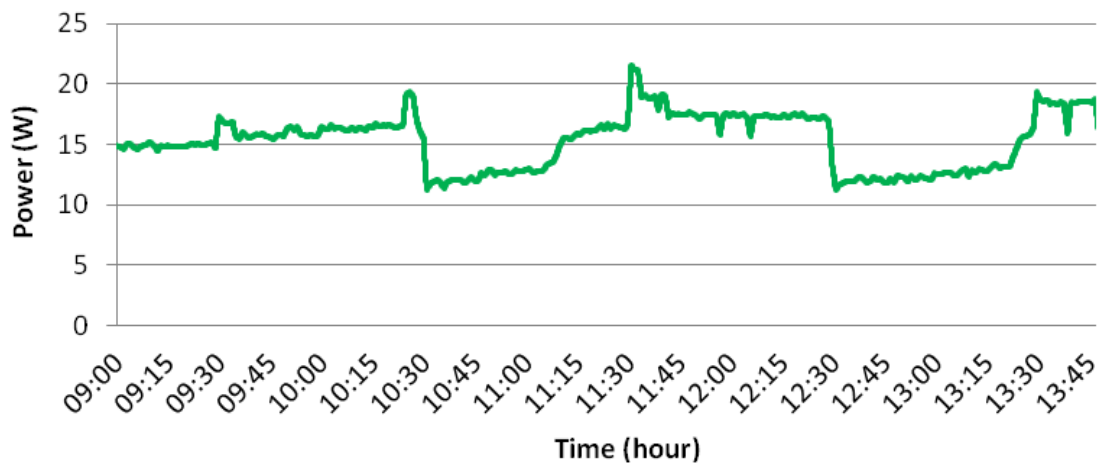
Πίνακας 8.1. Συμβάντα μικροδικτύου στην πραγματική λειτουργία

| Χρόνος (ώρες) | Τύπος | Λεπτομέρειες | Ενεργά φορτία (Nr) | Ισχύς (W) | Διακόπτη δικτύου | Κατάσταση μπαταρίας |
|---------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|-----------|------------------|---------------------|
| 09.00 | Αλλαγή φορτίου | Φορτίο 5 συνδέεται | 1,5 | 1400 | On | Φορτίζεται |
| 09.30 | Σύνδεση δικτύου | Άνοιξε το διακόπτη δικτύου | 1,5 | 1400 | Off | Εκφόρτιση |
| 10.00 | Αλλαγή φορτίου | Φορτία 2, 3 - on | 1,2,3,5 | 1900 | Off | Εκφόρτιση |
| 10.28 | Ενέργεια αλγορίθμου ESM | Κλείσε φορτίο 5 | 1,2,3 | 1000 | Off | Εκφόρτιση |
| 10.31 | Σύνδεση δικτύου | Κλείσε διακόπτη δικτύου | 1,2,3 | 1000 | On | Φορτίζεται |
| 10.50 | EMS ενέργεια | Άνοιξε το διακόπτη 5 | 1,2,3,5 | 1900 | On | Φορτίζεται |
| 11.00 | Αλλαγή φορτίου | Πρόσθεσε το φορτίο 4 | 1,2,3,4,5 | 2500 | On | Φορτίζεται |
| 11.30 | Grid connection | Άνοιξε το διακόπτη δικτύου | 1,2,3,4,5 | 2500 | Off | Εκφόρτιση |
| 11.34 | EMS ενέργεια | Κλείσε φορτίο 5 | 1,2,3,4,5 | 1600 | Off | Εκφόρτιση |
| 11.42 | EMS ενέργεια | Κλείσε το φορτίο 4 | 1,2,3 | 1000 | Off | Εκφόρτιση |
| 12.00 | Αλλαγή φορτίου | Άνοιξε το φορτίο 4 | 1,2,3 | 1000 | Off | Εκφόρτιση |
| 12.30 | Σύνδεση δικτύου | Κλείσε διακόπτη δικτύου | 1,2,3 | 1000 | On | Φορτίζεται |
| 12.50 | EMS ενέργεια | Άνοιξε φορτίο Nr 5 | 1,2,3,5 | 1900 | On | Φορτίζεται |
| 13.00 | Αλλαγή φορτίου | Τα φορτία 2, 3 ανοίγουν | 1,5 | 1400 | On | Φορτίζεται |
| 13.30 | Σύνδεση δικτύου | Άνοιξε διακόπτη δικτύου | 1,5 | 1400 | Off | Εκφόρτιση |
| 14.00 | Αλλαγή φορτίου | Το φορτίο Nr 5 σταματάει. | 1 | 500 | Off | Εκφόρτιση |

Ο καιρός ήταν μερικώς συννεφιασμένος κατά τη λήψη των πειραματικών δεδομένων, ενώ η ταχύτητα του ανέμου ήταν αρκετά χαμηλή (Σχήματα 8.11 και 8.12)

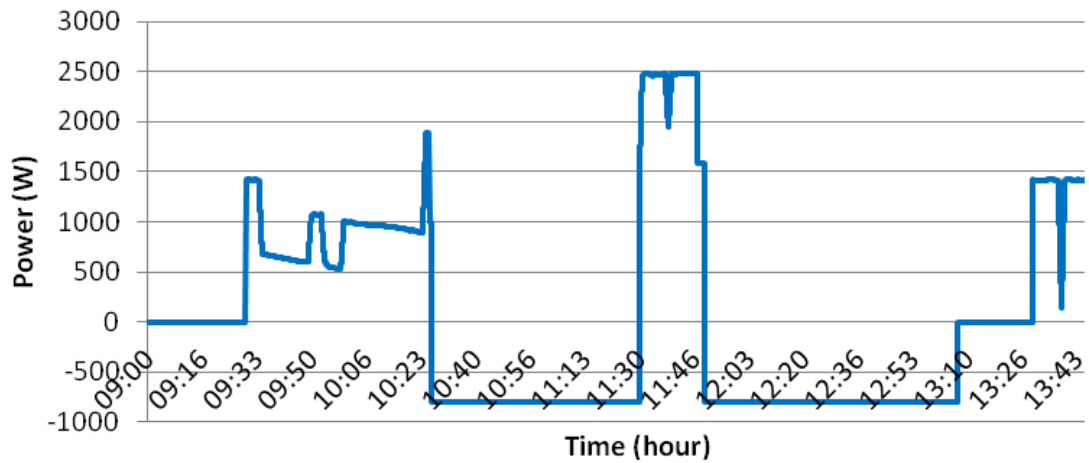


Σχήμα 8.11. Προφίλ παραγόμενης ισχύος από τα Φ/Β συστήματα την ημέρα των πειραμάτων



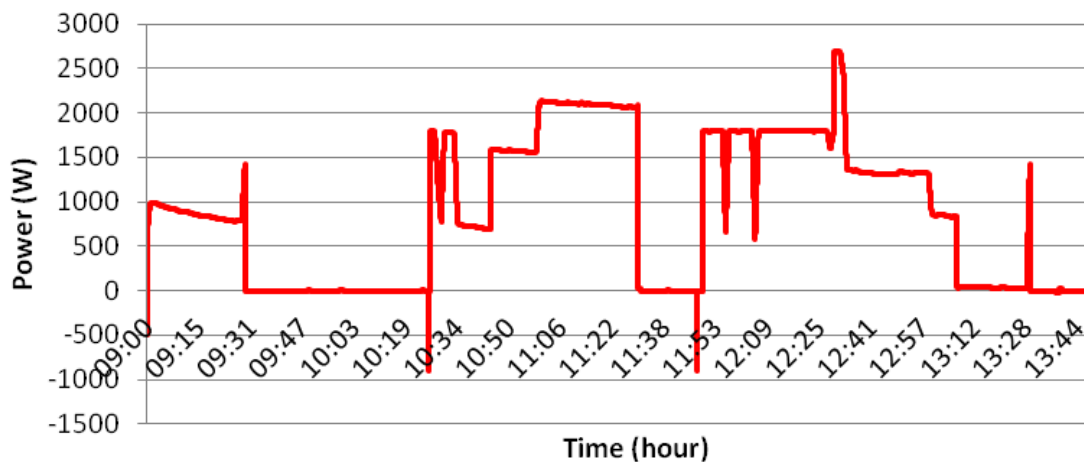
Σχήμα 8.12. Προφίλ παραγόμενης ισχύος ανεμογεννήτρια την ημέρα των πειραμάτων

Η συστοιχία μπαταριών παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά κατά την νησιδοποιημένη λειτουργία και διαφορετική κατά τη λειτουργία της διασύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο (Σχήμα 8.13). Στο Σχήμα 8.13, θετική ισχύς μπαταριών σημαίνει ότι εκφορτίζονται. Αρνητική ισχύς μπαταριών σημαίνει ότι φορτίζονται. Κατά τη νησιδοποιημένη λειτουργία, η συστοιχία γεμίζει το κενό ισχύος μεταξύ της ζήτησης και της τοπικής διανεμημένης παραγωγής. Όταν το μικροδίκτυο αποκαθιστά τη σύνδεσή του με το υπόλοιπο δίκτυο, η συστοιχία φορτίζεται με σταθερό ρεύμα και στη συνέχεια παραμένει αδρανής μέχρι την επόμενη νησιδοποιημένη λειτουργία.



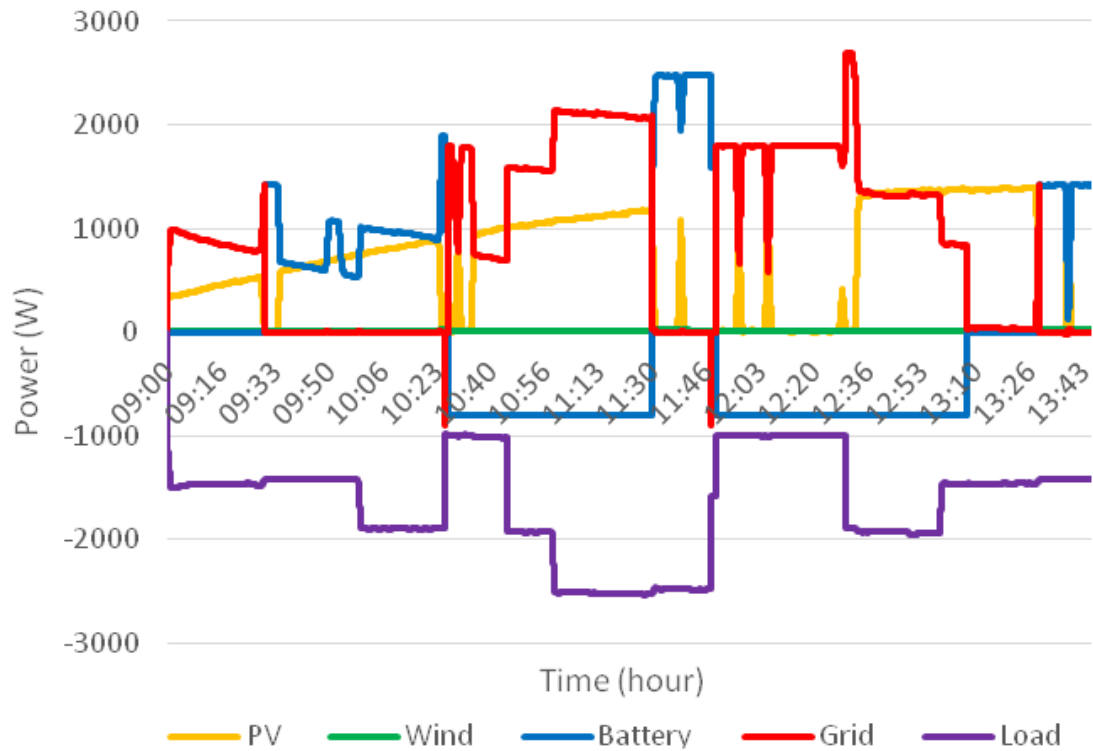
Σχήμα 8.13. Προφίλ ισχύος μπαταριών κατά την προσομοίωση.

Η ροή ισχύος μεταξύ του μικροδικτύου κι του υπολοίπου δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 8.14.



Σχήμα 8.14. Ροή ισχύος μεταξύ μικροδικτύου και υπολοίπου δικτύου κατά την προσομοίωση

Κατά την προσομοίωση, όλες οι τιμές ισχύος της τοπικής διανεμημένης παραγωγής, των μπαταριών, του υπολοίπου δικτύου και των φορτίων φαίνονται στο Σχήμα 8.15.



Σχήμα 8.15. Διακυμάνσεις ισχύος διανεμημένης παραγωγής, σθεναρού δικτύου και φορτίου κατά την προσομοίωση

Η ροή ισχύος σε όλους τους κλάδους του μικροδικτύου και οι αποφάσεις του αλγορίθμου κατά την προσομοίωση και κατά την πραγματική λειτουργία είναι σχεδόν οι ίδιες. Οι σημαντικότερες διαφορές αφορούν στο χρονισμό λήψης των αποφάσεων. Σύγκριση του χρονισμού λήψης των αποφάσεων του αλγορίθμου μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος φαίνεται στον Πίνακα 8.2.

Πίνακας 8.2. Σύγκριση χρονισμού συμβάντων μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος

| Τύπος | Details | Πείραμα (ώρα.λεπτά) | Προσομοίωση (ώρα.λεπτά) |
|--------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| Απόφαση αλγορίθμου | Απενεργοποίησε φορτίο 5 | 10.28 | 10.28 |
| Απόφαση αλγορίθμου | Ενεργοποίησε φορτίο 5 | 10.50 | 10.45 |
| Απόφαση αλγορίθμου | Απενεργοποίησε φορτίο 5 | 11.34 | 11.53 |
| Απόφαση αλγορίθμου | Ενεργοποίησε φορτίο 4 | 11.42 | 11.55 |
| Απόφαση αλγορίθμου | Απενεργοποίησε φορτίο 5 | 12.50 | 12.35 |

Οι διαφορές οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι κατά τη μοντελοποίηση των μπαταριών δεν λήφθηκε υπόψη η γήρανση των μπαταριών και η κατάσταση των μπαταριών (κατάσταση υγρών μπαταρίας) την ημέρα των πειραμάτων. Ως μελλοντική έρευνα πρέπει το μοντέλο των μπαταριών να βασιστεί στα πραγματικά δεδομένα των μπαταριών από το μικροδίκτυο, οπότε οι διαφορές που φαίνονται παραπάνω θα εξαλειφθούν.

8.3.2. Μελέτη πρακτικού συστήματος με KNX φορτία

Για να προσομοιωθεί η λειτουργία του μικροδικτύου με τη χρήση KNX συστημάτων, το φορτίο 4 του Σχήματος 8.7 αντικαταστάθηκε με το φορτίο 4 του Σχήματος 8.6 με τον KNX dimmer. Για να μελετηθεί η ροή ισχύος του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε ένα σενάριο με τέσσερα διαδοχικά συμβάντα, όπως φαίνεται στον πίνακα 8.3 Η ροή ισχύος στον κύριο ζυγό, η συμπεριφορά των μπαταριών και οι αποφάσεις του αλγορίθμου παρακολουθούνται για κάθε συμβάν. Το σθεναρό δίκτυο που συνδέεται στο σημείο κοινή σύζευξης με το μικροδίκτυο (PCC) αναπαριστάνεται με μία πηγή τάσης που δέχεται τιμές τάσης και συχνότητας ως τιμές αναφοράς. Τέσσερις (4) ώρες λειτουργίας προσομοιώθηκαν. Στο Σχήμα 8.16 φαίνεται η συμπεριφορά του συστήματος.

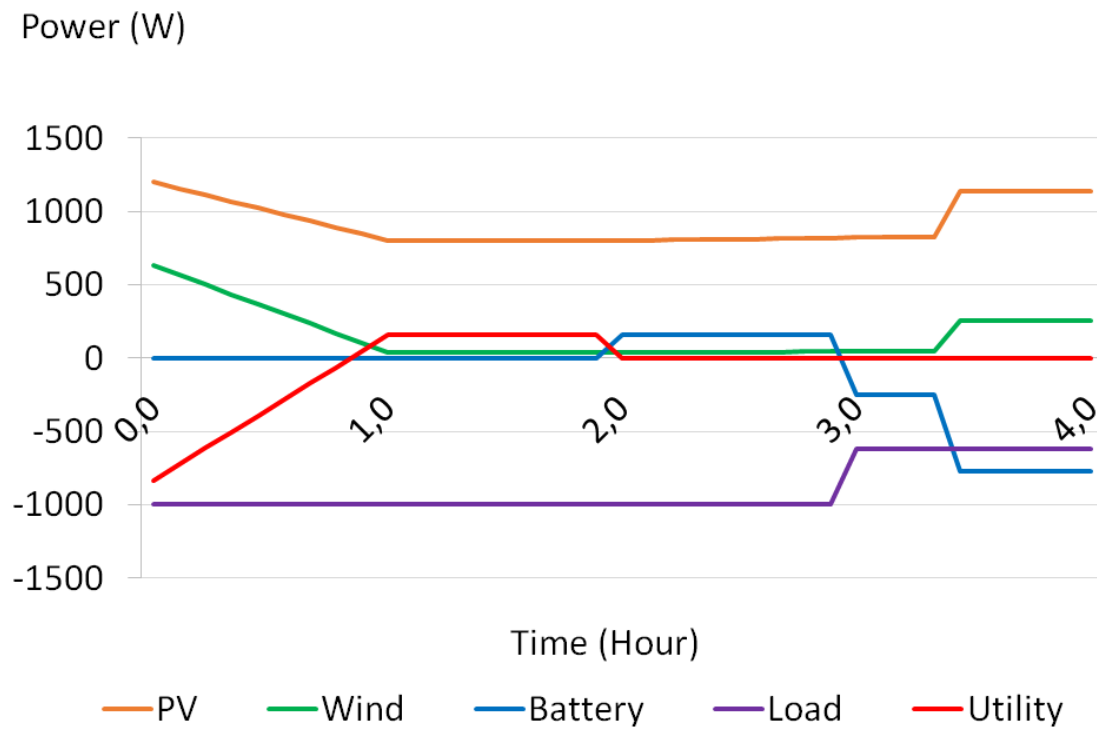
Αρχικά, κατά τη διασυνδεδεμένη λειτουργία, οι φορτισμένες μπαταρίες δεν χρησιμοποιούνται και η ισχύς των τοπικών διανεμημένων παραγωγών (ΔΠ) παρέχεται στο υπόλοιπο δίκτυο. Αυτή η ροή ισχύος από το μικροδίκτυο προς το υπόλοιπο δίκτυο αντιστρέφεται στη συνέχεια, αφού οι τοπικές μονάδες ΔΠ μειώνουν την παραγωγή τους λόγω καιρικών συνθηκών. Στο τέλος της δεύτερης ώρας προσομοίωσης, αποσυνδέεται το μικροδίκτυο από το υπόλοιπο δίκτυο (νησιδοποιημένη λειτουργία) και οι μπαταρίες αρχίζουν να γεμίζουν το κενό ισχύος μεταξύ ζήτησης και μονάδων ΔΠ.

Στο τέλος της τρίτης ώρας, το SoC των μπαταριών μειώνεται και αναγκάζει τον αλγόριθμο να μειώσει πρώτα την ισχύ του φορτίου 4, ενεργοποιώντας τον KNX dimmer. Αφού τώρα το φορτίο απορροφά λιγότερη ισχύ από τις μονάδες ΔΠ, οι μπαταρίες αρχίζουν να φορτίζονται. Η ισχύς των μονάδων ΔΠ αυξάνεται μετά από 3,5 ώρες προσομοίωσης και αυξάνεται η ισχύς φόρτισης των μπαταριών. Στην περίπτωση που οι μπαταρίες φορτιστούν πλήρως και υπάρχει πλεόνασμα παραγόμενης ισχύος από τους τοπικούς παραγωγούς, ο αλγόριθμος ενεργοποιεί πάλι το KNX φορτίο και προσπαθεί να επανασυνδεθεί με το υπόλοιπο δίκτυο. Αν δεν είναι δυνατή η σύνδεση με το σθεναρό δίκτυο, ο αλγόριθμος μειώνει την τοπική παραγωγή

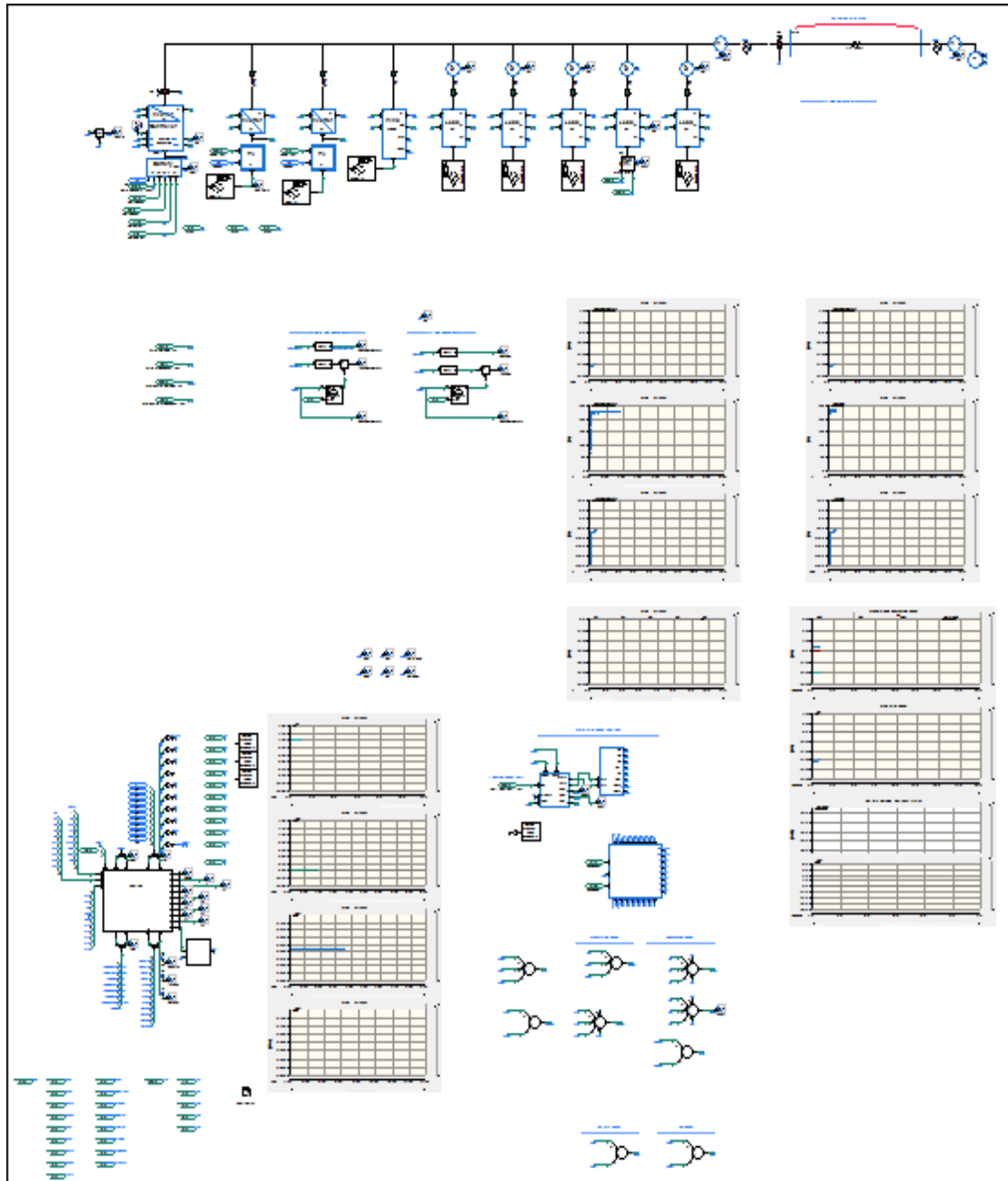
από ΑΠΕ. Στο Σχήμα 8.17 φαίνεται μια συνολική εικόνα του μοντέλου προσομοίωσης με το επιμέρους μοντέλο KNX.

Πίνακας 8.3. Συμβάντα προσομοίωσης μικροδικτύου με KNX συστήματα

| No | Είδος λειτουργίας | Ισοζύγιο ισχύος μικροδικτύου |
|----|---------------------------|---|
| 1 | Διασυνδεδεμένη λειτουργία | Ισχύς τοπικής παραγωγής > του τοπικού φορτίου |
| 2 | Διασυνδεδεμένη λειτουργία | Ισχύς τοπικής παραγωγής < του τοπικού φορτίου |
| 3 | Νησιδοποιημένη λειτουργία | Ισχύς τοπικής παραγωγής < του τοπικού φορτίου |
| 4 | Νησιδοποιημένη λειτουργία | Ισχύς τοπικής παραγωγής > του τοπικού φορτίου |



Σχήμα 8.16. Διακυμάνσεις ισχύος των πηγών και του φορτίου κατά την προσομοίωση.



Σχήμα 8.17. Γενικό μοντέλο προσομοίωσης με το επιμέρους μοντέλο KNX

8.3.3. Σύνδεση με μοντέλα προσομοίωσης κι επεκτασιμότητα

Για να φανεί η δυνατότητα επεκτασιμότητας του νέου μοντέλου και του αλγορίθμου πρέπει να ελεγχθεί η δυνατότητα σύνδεσης και διαλειτουργικότητας με άλλα υπάρχοντα μοντέλα δικτύων διανομής. Για αυτό, αναζητήθηκαν γνωστά μοντέλα δικτύων διανομής και σε πρώτη φάση ελέγχθηκε αν είναι δυνατή η σύνδεση και διαλειτουργικότητα με τα μοντέλα αυτά, καθώς και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων

από την κοινή τους προσομοίωση. Σε επόμενη φάση, θα ελεγχθεί η δυνατότητα χρήσης του νέου αλγορίθμου για τον έλεγχο των δικτύων διανομής της βιβλιογραφίας.

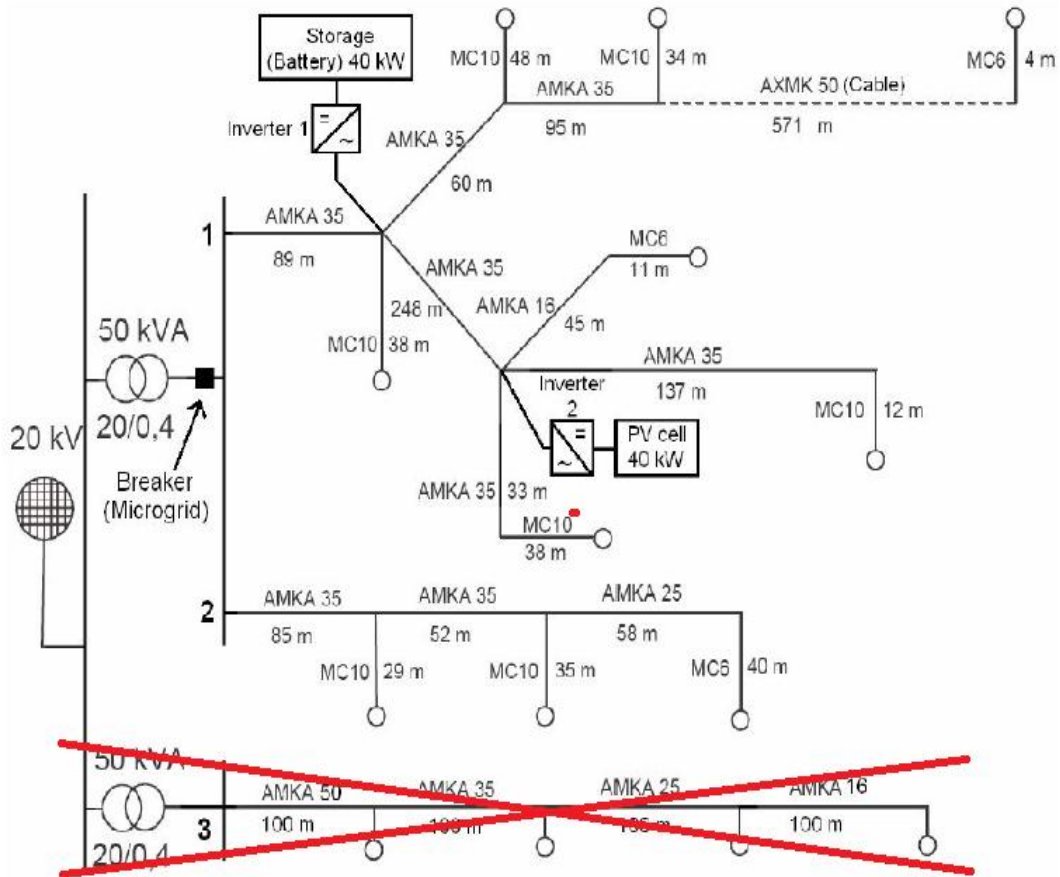
Τα πιο γνωστά μοντέλα δοκιμαστικών δικτύων διανομής είναι αυτά της IEEE: (α) το δοκιμαστικό δίκτυο 4 ζυγών της IEEE, (β) το δίκτυο των 13 ζυγών (IEEE 13 bus), (γ) το δοκιμαστικό δίκτυο 34 ζυγών (IEEE 34 bus). Μοντέλα και για τα τρία δίκτυα σε PSCAD υπάρχουν. Παρόλα αυτά και για τα τρία αυτά δίκτυα ανέκυψαν τα ακόλουθα προβλήματα:

(α) Το δίκτυο 4- bus έχει μόνο ένα σημείο διασύνδεσης με άλλα δίκτυα και συνεπώς δεν είναι κατάλληλο για να αναλυθούν πολλά σενάρια και να ερευνηθεί η επίδραση των σεναρίων σε γειτονικούς ζυγούς.

(β) Και τα τρία δίκτυα είναι δίκτυα Μέσης Τάσης πολλαπλάσιας εγκατεστημένης ισχύος από το μικροδίκτυο της διατριβής και κατά συνέπεια η αλληλεπίδραση μεταξύ τους δεν θα είναι αισθητή.

(γ) Τα υπομοντέλα ρύθμισης τάσης και γραμμών των τριών δικτύων της IEEE δεν βασίζονται σε έτοιμες βιβλιοθήκες του PSCAD. Έτσι, δεν λειτουργούν, όταν αντιγραφούν τα αρχεία τους σε φάκελο άλλου έργου του PSCAD. Κάτι το οποίο ισχύει και με το μοντέλο του μικροδικτύου της διατριβής.

Συνεπώς, η σύνδεση και διαλειτουργικότητα του νέου μοντέλου με τα μοντέλα δικτύων της IEEE δεν είναι δυνατή και ως εναλλακτική λύση ακολουθήθηκε η αναζήτηση και σύνδεση με ένα ασθενές δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης με πολλούς ζυγούς [35]. Πρόκειται για το δίκτυο του Σχήματος 8.18, που είναι ένα τυπικό επαρχιακό δίκτυο χαμηλής τάσης της Φινλανδίας. Οι μπαταρίες και τα φωτοβολταϊκά προστέθηκαν εκ των υστέρων, για να διαφανεί η αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ. Ο ζυγός Νο. 3 δεν χρησιμοποιήθηκε. Πρόκειται για τριφασικό δίκτυο χαμηλής πολιτικής τάσης 0.4 kV και μετασχηματιστή τροφοδοσίας ονομαστικής ισχύος 50 kVA. Όπως φαίνεται περιλαμβάνει τόσο κοντές όσο και μακριές γραμμές διανομής. Στον πίνακα 8.4 φαίνονται οι παράμετροι των γραμμών. Από τον πίνακα αυτό φαίνεται ο ωμικός χαρακτήρας του δικτύου, στο οποίο συνεπώς ισχύουν οι αρχές των κεφαλαίων 4 και 6 και στις οποίες βασίστηκε ο αλγόριθμος της διατριβής.

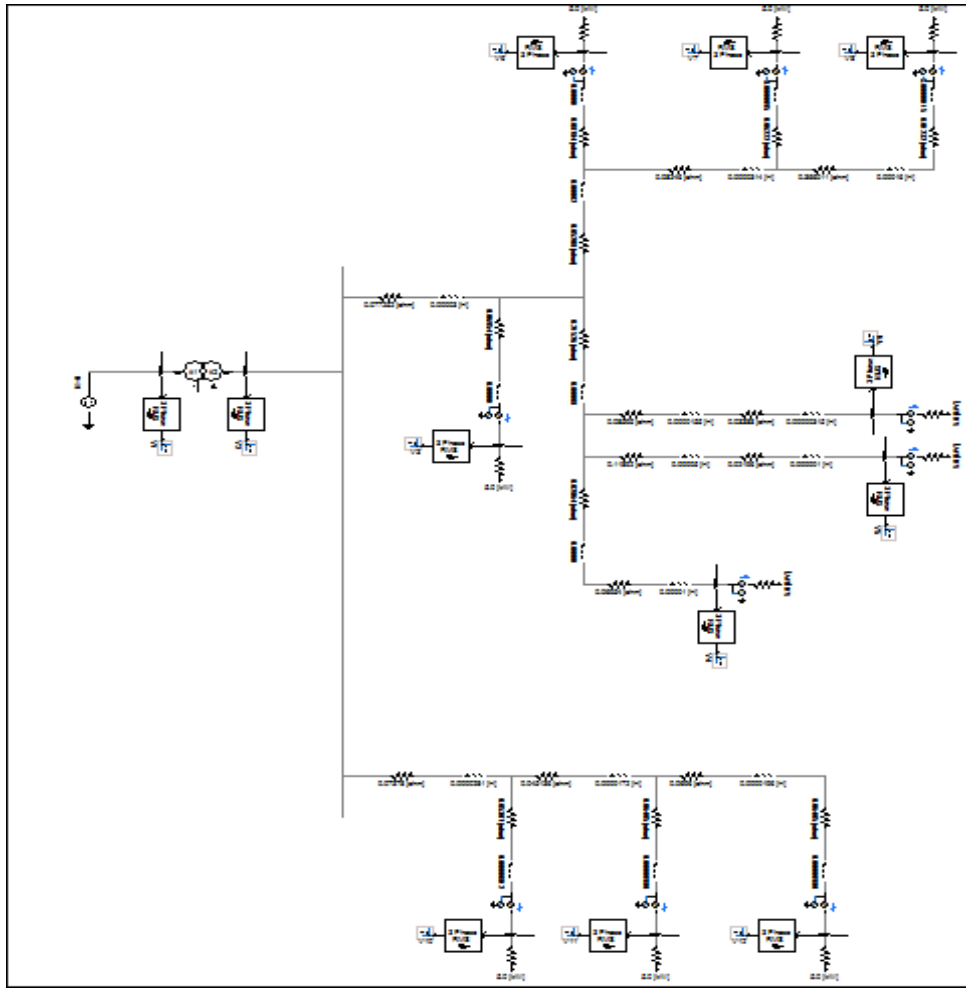


Σχήμα 8.18. Ασθενές δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης [35]

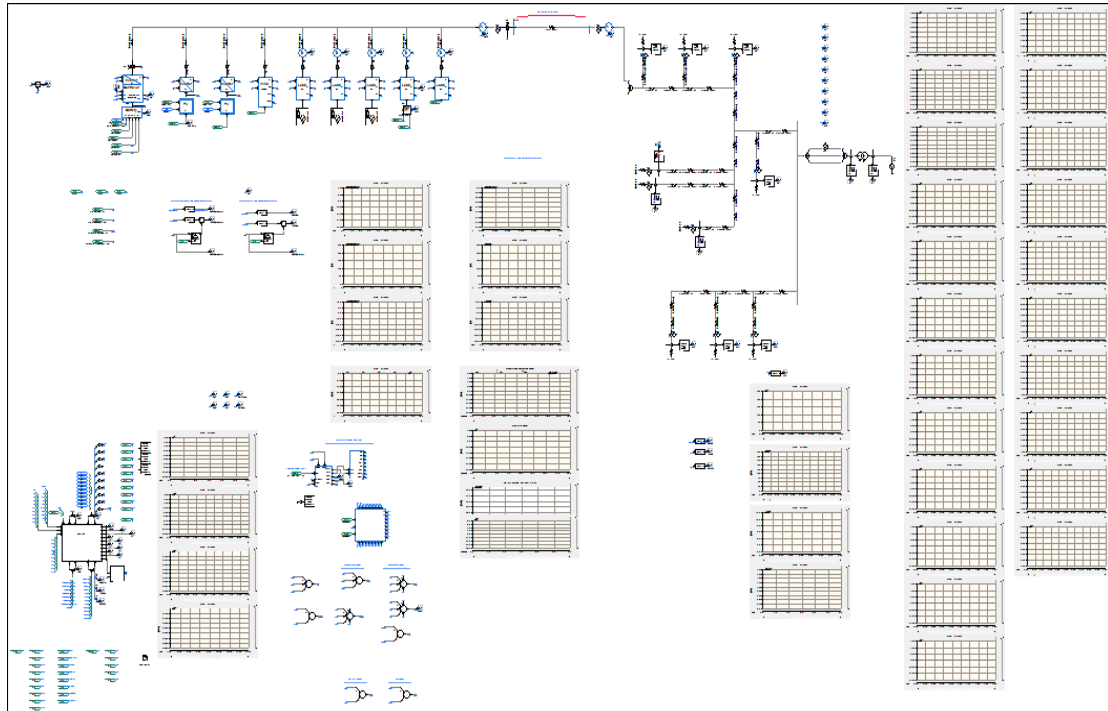
Πίνακας 8.4. Παράμετροι γραμμών διανομής του δικτύου του Σχήματος 8.18

| | R (Ω/km) | X (Ω/km) | R/X |
|--------------|----------|----------|-------|
| AMKA 3x50+70 | 0.641 | 0.101 | 6.35 |
| AMKA 3x35+50 | 0.868 | 0.104 | 8.35 |
| AMKA 3x25+35 | 1.2 | 0.106 | 11.32 |
| AMKA 3x16+25 | 1.91 | 0.108 | 17.69 |
| AXMK 4x50S | 0.641 | 0.088 | 7.28 |
| MCMK 3x10+10 | 1.83 | 0.088 | 20.80 |
| MCMK 3x6+6 | 3.08 | 0.09 | 34.22 |

Το δίκτυο του Σχήματος 8.18 μοντελοποιήθηκε από την αρχή με τον ίδιο τρόπο που μοντελοποιήθηκε το πειραματικό μικροδίκτυο, δηλαδή χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα. Στο Σχήμα 8.19 φαίνεται το αποτέλεσμα. Στη συνέχεια συνδέθηκε με το μοντέλο του πειραματικού μικροδικτύου της διατριβής σε διάφορα σημεία κοινής σύζευξης (PCC). Το συνολικό μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 8.20.



Σχήμα 8.19. Μοντέλο ασθενούς δικτύου διανομής χαμηλής τάσης της σε PSCAD



Σχήμα 8.20. Συνολικό μοντέλο προσομοίωσης σε PSCAD

Διάφορα προβλήματα ανέκυψαν κατά τη μοντελοποίηση, όπως το γεγονός ότι οι συσκευές μετρήσεις του PSCAD δεν έχουν μεγάλη ακρίβεια όταν στη γραμμή όπου συνδέονται εμφανίζεται αντίστροφη ροή ισχύος. Αντιμετωπίστηκαν με μοντελοποίηση της κάθε φάσης ξεχωριστά και της χρήσης ειδικών μοντέλων μετρητικών συσκευών που αναπτύχθηκαν μόνο για τις συγκεκριμένες προσομοιώσεις. Οι πρώτες δοκιμές έδειξαν ότι τα δύο μοντέλα συνεργάζονται άψογα και ότι το μέγεθος της ισχύος του μικροδικτύου επηρεάζει σημαντικά τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς.

Για να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα από τις προσομοιώσεις, επιλέχθηκαν να μελετηθούν τα ακόλουθα ακραία σενάρια:

- 1) Ισοζύγιο ισχύος μικροδικτύου (4 περιπτώσεις)
 - (α) Μέγιστη παραγωγή από ΑΠΕ, ελάχιστο φορτίο (max. supply)
 - (β) Ελάχιστη παραγωγή- μέγιστο φορτίο (max. demand)
 - (γ) Μέγιστη παραγωγή – μέγιστο φορτίο (low power exchange)
 - (δ) Ελάχιστη παραγωγή – ελάχιστο φορτίο (low power exchange)

2) Φορτίου ασθενούς δικτύου (2 περιπτώσεις)

- (α) Μέγιστο φορτίο σε κάθε ζυγό
- (β) Ελάχιστο φορτίο σε κάθε ζυγό

3) Σημεία σύνδεσης (3 περιπτώσεις)

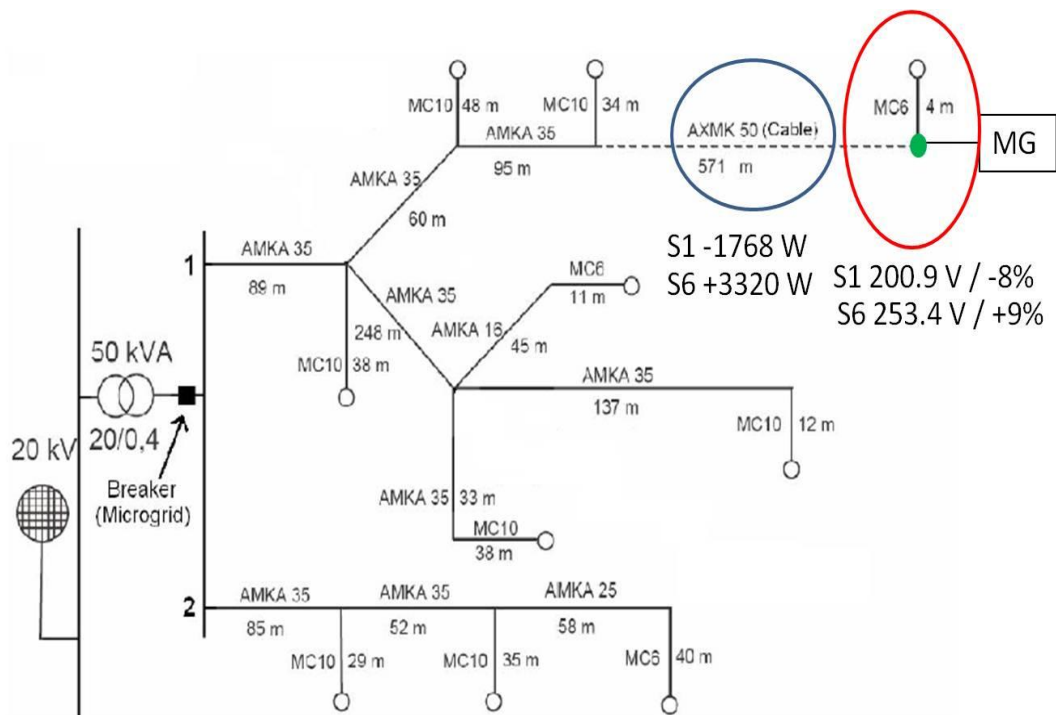
- (α) Στο μακρύτερο σημείο από τον υποσταθμό-μετασχηματιστή
- (β) Στο κοντινότερο σημείο στον υποσταθμό-μετασχηματιστή
- (γ) Σε ένα ενδιάμεσο σημείο σύνδεσης

Συνολικά πρόκειται για: $4 \times 2 \times 3 = 24$ σενάρια. Κάθε σενάριο περιλαμβάνει εναλλαγές μεταξύ νησιδοποιημένης και διασυνδεδεμένης λειτουργίας. Κατά την ανάλυση του κάθε σεναρίου, παρακολουθούνται και καταγράφονται οι ακόλουθες παράμετροι: τάσεις 11 ζυγών, ροή ισχύος στους κύριους κλάδους (8 τον αριθμό), ροή ισχύος μεταξύ μικροδικτύου και ασθενούς δικτύου, συνολική ροή ισχύος από τον υποσταθμό. Επειδή πρόκειται για δύο καταστάσεις λειτουργίας (διασυνδεδεμένη και νησιδοποιημένη), καταγράφονται συνολικά 42 μεταβλητές για κάθε σενάριο. Ενδεικτικά φαίνεται η καταγραφή των μεταβλητών για ένα σενάριο στο Σχήμα 8.21.

Κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα σεναρίων φαίνονται στις Εικόνες 8.22-8.24, για μακρινό, κοντινό και ενδιάμεσο σημείο σύνδεσης του μικροδικτύου στο ασθενές δίκτυο αντίστοιχα. Το μοντέλο του πειραματικού μικροδικτύου αναφέρεται με τη συντομογραφία MG. Πάνω στις εικόνες παρουσιάζονται οι φασικές τάσεις στον κοντινότερο ζυγό και στο μακρινότερο ζυγό από τον υποσταθμό (No 1 και No 6).

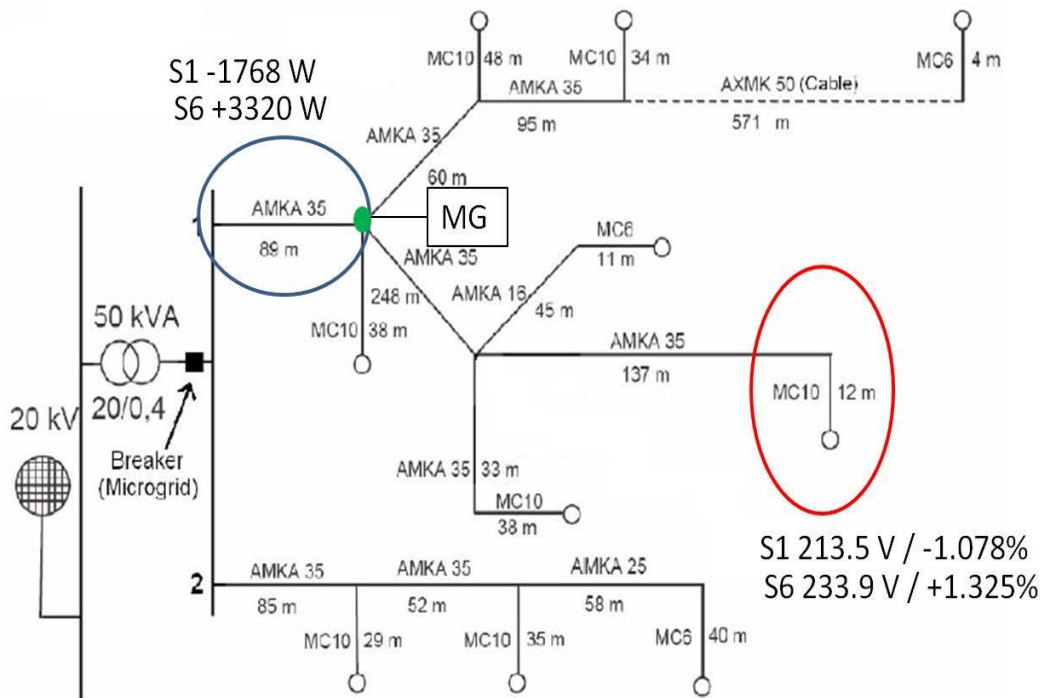
| Scenarios No | | | |
|----------------------------------|---------------------------|----------------|----------------------|
| | 1 | | |
| Content | | | |
| Point of connection | Distribution Network Load | Microgrid Load | Microgrid Generation |
| Far | High | High | Low |
| Power Flow (W) | Grid-Connected Mode | Islanded Mode | Change (%) |
| Total Power Flow at the Network | -10689 | -8813 | -17,55075311 |
| Microgrid-Network power Exchange | -1875 | 0 | |
| Bus Voltages (V) | Grid-Connected Mode | Islanded Mode | Change (%) |
| Microgrid Bus (11) | 201,0 | 216,7 | 7,810945274 |
| Residential Load Bus 1 | 227,6 | 227,6 | 0 |
| Residential Load Bus 2 | 226,4 | 226,4 | 0 |
| Residential Load Bus 3 | 225,6 | 225,6 | 0 |
| Residential Load Bus 4 | 221,8 | 223,8 | 0,901713255 |
| Residential Load Bus 5 | 214,1 | 216,1 | 0,934142924 |
| Residential Load Bus 6 | 213,6 | 215,6 | 0,936329588 |
| Residential Load Bus 7 | 213,9 | 215,8 | 0,888265545 |
| Residential Load Bus 8 | 218,3 | 221,8 | 1,603298213 |
| Residential Load Bus 9 | 214,5 | 220,2 | 2,657342657 |
| Residential Load Bus 10 | 200,9 | 216,5 | 7,765057242 |

Σχήμα 8.21. Καταγραφή μεταβλητών για ένα σενάριο προσομοίωσης.



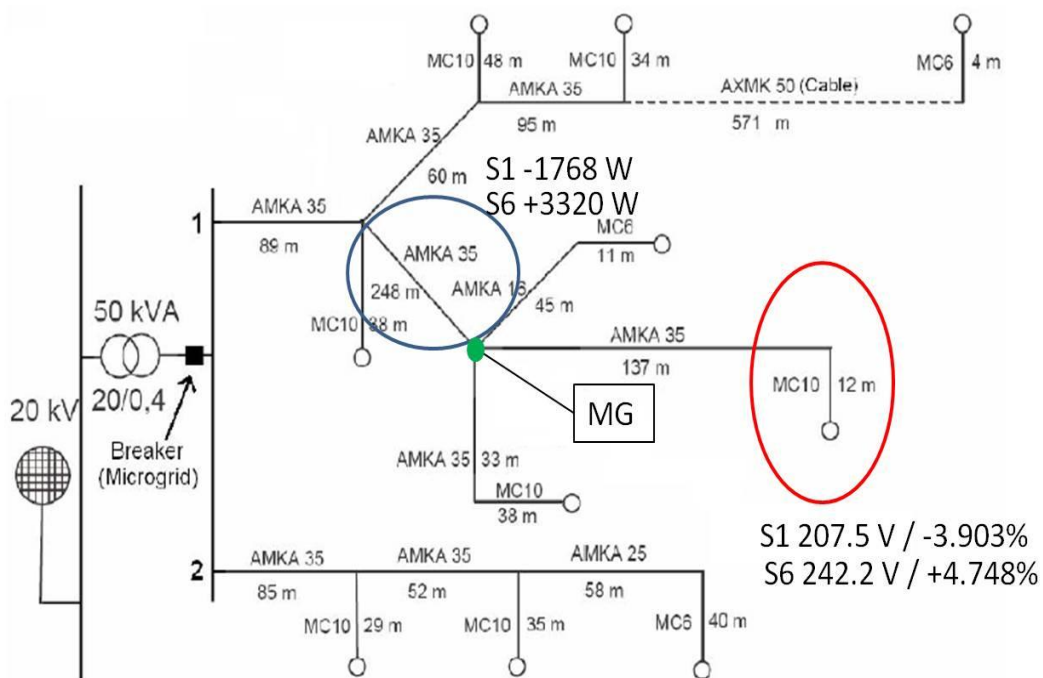
12

Σχήμα 8.22. Αποτελέσματα προσομοίωσης: περίπτωση μακρινού σημείου σύνδεσης



13

Σχήμα 8.23. Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίπτωση του κοντινού σημείου σύνδεσης



14

Σχήμα 8.24. Αποτελέσματα προσομοίωσης: περίπτωση ενδιάμεσου σημείου σύνδεσης

Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται φανερό ότι σύνδεση του μικροδικτύου σε μακρινό σημείο από τον υποσταθμό (υψηλή σύνθετη αντίσταση και R/X λόγος μεταξύ τους) επηρεάζει την τάση των ζυγών περισσότερο (η τάση στο ζυγό Νο 6 έφτασε τα 250V και στο ζυγό Νο 1 έπεσε στα 200V).

Οι πιο επικίνδυνες καταστάσεις για ένα δίκτυο διανομής με μικροδίκτυα είναι:

(α) Χαμηλή ζήτηση στο δίκτυο και υψηλή παραγωγή από το μικροδίκτυο ή τις διανεμημένες ΑΠΕ γενικότερα (δημιουργούνται υπερτάσεις).

(β) Υψηλή ζήτηση στο δίκτυο και υψηλή ζήτηση στο μικροδίκτυο (υψηλή πτώση τάση και μεγάλες απώλειες γραμμών).

Το μικροδίκτυο σε κοντινό σημείο σύνδεσης έχει μικρότερη επίδραση. Κατά τη φάση του σχεδιασμού μικροδικτύων, αν είναι δυνατόν, μικροδίκτυα πρέπει να συγκροτούνται κοντά στους υποσταθμούς (λιγότερες απώλειες, λιγότερη πτώση τάσης, λιγότερες παραβιάσεις ορίων τάσης).

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, μικροδίκτυα που βρίσκονται σε μακρινά σημεία σύνδεσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βελτίωση του προφίλ της τάσης κατά μήκος των γραμμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

9.1. Ανακεφαλαίωση Διατριβής

Στο πρώτο κεφάλαιο της διατριβής (Εισαγωγή) αναλύονται τα χαρακτηριστικά της διανεμημένης παραγωγής και εξηγούνται οι λόγοι που δυσχεραίνουν την περαιτέρω διείσδυσή της στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του μελλοντικού «έξυπνου δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας» που θα μπορούσαν να διευκολύνουν την αυξημένη διείσδυση των μονάδων διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο. Παρατίθεται δε και η δομή της διατριβής. Στο δεύτερο κεφάλαιο προτείνεται μια τοπολογία ευφυούς δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας διανομής και αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματά της έναντι άλλων. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση δύο τοπολογιών μικρο-δικτύων με αυξημένη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Μέσων Αποθήκευσης Ενέργειας σε εργαστηριακό επίπεδο: της προτεινόμενης και μίας κλασσικής που εφαρμόζεται σε εμπορικά αυτόνομα δίκτυα. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται ο αλγόριθμος ελέγχου της προτεινόμενης τοπολογίας και τονίζονται τα πρωτότυπα σημεία του. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων των δύο τοπολογιών. Αναδεικνύονται η αυξημένη αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας της προτεινόμενης τοπολογίας και αλγόριθμου, καθώς και η δυνατότητά της να εξασφαλίζει στις μονάδες διανεμημένης παραγωγής την παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται απαραίτητες τροποποιήσεις των υποδομών και του αλγόριθμου της προτεινόμενης μεθοδολογίας ώστε να καταστεί διαδραστική με υπάρχουσες τεχνολογίες αυτομάτου ελέγχου κτιρίων (KNX), η δε εφαρμογή τους σε πειραματικό επίπεδο καταδεικνύει την αύξηση της αξιοπιστίας στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να προσδώσει η ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογιών διαχείρισης της ζήτησης (demand-side management). Στο έβδομο κεφάλαιο, δοκιμάζεται ο έλεγχος του έξυπνου δικτύου με έναν αλγόριθμο με μοντέλα πρόβλεψης, όπως οι ασαφείς γνωστικοί χάρτες (Fuzzy Cognitive Maps). Στο όγδοο κεφάλαιο, βασισμένο στο εργαστηριακό μικροδίκτυο, αναπτύσσεται ένα μοντέλο προσομοίωσης ευφυών δικτύων διανομής, το οποίο είναι επεκτάσιμο και μπορεί να μελετήσει όλες τις επιπτώσεις της διείσδυσης των ΑΠΕ, των ηλεκτρικών οχημάτων, κτλ στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και να προτείνει λύσεις στη διαχείριση και έλεγχο του δικτύου. Τέλος στο ένατο κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση της διδακτορικής διατριβής και αναλύονται τα θέματα πρωτοτυπίας της.

9.2. Θέματα Πρωτοτυπίας Διατριβής

Η συνεισφορά της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής εντοπίζεται στην ανάπτυξη του νέου επαναληπτικού αλγορίθμου ελέγχου και της αντίστοιχης τοπολογίας. Πιο συγκεκριμένα, εισάγεται η έννοια του ψευδο-SOC, για την ορθότερη διαχείριση των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Προτείνεται μια τεχνική ελέγχου της ενεργού ισχύος εξόδου των Φ/Β συστημάτων, ενώ αναπτύχθηκε μία νέα τεχνική διαχείρισης της ζήτησης βασισμένη στο πρωτόκολλο KNX. Στη συνέχεια προτείνεται να αναλάβει τον έλεγχο του μικροδικτύου ένας αλγόριθμος με δυνατότητα πρόβλεψης, βασισμένος σε ασαφείς γνωστικούς χάρτες. Τέλος, παρουσιάζεται η προσπάθεια μοντελοποίησης του μικροδικτύου σε PSCAD με τη χρήση πραγματικών δεδομένων, η επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του και ένα παράδειγμα επεκτασιμότητας και εφαρμογής του σε μεγαλύτερα δίκτυα.

9.3. Μελλοντικές Προοπτικές -Διατριβής

Είναι ήδη υπό κατασκευή ένα δεύτερο μικροδίκτυο-σταθμός φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, που περιλαμβάνει 24 μπαταρίες, δύο κυψέλες καυσίμου υδρογόνου ισχύος 1,2kW εκάστη, Φ/Β συστήματα, ηλεκτρικό αυτοκίνητο, δύο ηλεκτρολύτες για παραγωγή υδρογόνου ισχύος 500W εκάστος. Στο νέο μικροδίκτυο εγκαθίστανται οι νέες υποδομές ελέγχου και ο νέος αλγόριθμος ελέγχου, με τις κατάλληλες προσαρμογές. Το νέο μικροδίκτυο θα είναι συνδεδεμένο ηλεκτρικά με το ζυγό του πρώτου μικροδικτύου. Το κάθε μικροδίκτυο ελέγχεται από το δικό του υπολογιστή και την αντίστοιχη εφαρμογή LabVIEW - MATLAB, ενώ και τα δύο μαζί συνιστούν ένα μεγαλύτερο μικροδίκτυο, που και αυτό με τη σειρά του ελέγχεται από το δικό του υπολογιστή με την αντίστοιχη εφαρμογή LabVIEW - MATLAB. Συνεπώς, η έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής μπορεί να συνεχιστεί, επεκτείνοντας τον αλγόριθμο ελέγχου στο δεύτερο μικροδίκτυο και στον αλγόριθμο που ρυθμίζει τη διαλειτουργικότητα των δύο μικροδικτύων που θα είναι συνδεδεμένα ηλεκτρικά μεταξύ τους.

Σχετικά με τους αλγορίθμους ελέγχου, εκτός από την ανάπτυξη των υπολοίπων FCM για τα SCU του μικροδικτύου, μελλοντικός στόχος είναι η προσομοίωση του συνολικού σχήματος FCM με χρήση πραγματικών δεδομένων και του μοντέλου προσομοίωσης που αναπτύχθηκε και ακολούθως η ενσωμάτωση του τελικού αλγορίθμου FCM στην εφαρμογή LabVIEW.

Τέλος, όσο αφορά στο μοντέλο προσομοίωσης, συγκεκριμένες μετρήσεις των μπαταριών απαιτούνται για την ακριβέστερη μοντελοποίηση των μπαταριών. Επίσης,

το μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε σε PSCAD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δοκιμαστεί η λειτουργία του δεύτερου εργαστηριακού μικροδικτύου που είναι υπό κατασκευή. Σε επόμενη φάση θα ελεγχθεί η δυνατότητα χρήσης του νέου αλγορίθμου για τον έλεγχο των δικτύων διανομής της βιβλιογραφίας καθώς και για να ενσωματωθεί και να δοκιμαστεί αλγόριθμος οικονομικής βελτιστοποίησης της παροχής ενέργειας στο μικροδίκτυο και κατ' επέκταση σε μεγαλύτερης έκτασης μικροδίκτυα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] E. Santacana, G. Rackliffe, L. Tang, X. Feng, "Getting Smart-With a Clearer Vision of the Intelligent Grid, Control Emerges from Chaos," IEEE Power & Energy Magazine, vol. 8, Nr. 2, pp. 41-48, 2010.
- [2] J. Fan, S. Borlase, "The evolution of distribution," IEEE Power & Energy Magazine, vol. 7, Nr. 2, pp. 63 - 68, 2009.
- [3] Marwam M. Mahmoud, On the storage batteries used in solar electric powersystems and development of an algorithm for determining their ampere-hour capacity, Electric Power Systems Research, vol. 71, pp. 85-89, 2004 (available online at www.sciencedirect.com).
- [4] Sabine Piller, Marion Perrin, Andreas Jossen, Methods for state-of-charge determination and their applications, Journal of Power Sources, vol. 96, pp 113-120,2001 (available online at www.elsevier.com).
- [5] **D. Stimoniaris**, D. Tsiamitros, T. Kottas, N. Asimopoulos, E. Dialynas, "Smart Grid Simulation Using Small-Scale Pilot Installations-Experimental Investigation of a Centrally-Controlled Microgrid," **IEEE PowerTech'11 Conference**, Trondheim, Norway, 2011, available at <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [6] **D. Stimoniaris**, D. Tsiamitros, N. Poulakis, T. Kottas, V. Kikis, E. Dialynas, "Investigation of Smart Grid Topologies Using Pilot Installations-Experimental Results," 2011 IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference (**IEEE-ISGT-2011**), Manchester, UK, 2011. available at <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [7] Σορτικός Α., «Αναπτύσσοντας τα έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα», Πτυχιακή εργασία, ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, τμ. Ηλεκτρολογίας, 2011.
- [8] H. Laaksonen, K. Kauhaniemi, S. Voima, "Microgrid Voltage Level Management and Role as Part of Smart Grid Voltage Control," IEEE PowerTech'11 Conference, Trondheim, Norway, 2011, available at <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [9] D. Coll-Mayor, A. Notholt, A. Engler, E. Garcia-Moreno, "Using Minigrids for stabilizing the Main Grid," presented at the CIGRE Conference, Paris, France, 2006.
- [10] G. K. Papagiannis, Papadopoulos T. A., C. D. Dovas, D. A. Tsiamitros, P. S. Dokopoulos, "A PLC-Based Energy Consumption Management System. PowerLine Performance Analysis: Field Tests and Simulation Results", IEEE PowerTech'05 (St. Petersburg, Russia), 2005.
- [11] De Brabandere K., Vanthournout K., Driesen J., Deconinck G., Belmans R., "Control of Microgrids", IEEE PES General Meeting 2007, Tampa, FL, pp: 1-7, 2007.
- [12] Majumder Ritwik, Shahnia Farhad, Ghosh Arindam, Ledwich Gerard F., Wishart Michael, Zare Firuz, "Operation and control of a microgrid containing inertial and non-inertial micro sources." IEEE TENCON 2009, November 23-26, 2009, Singapore.

- [13] Vandoorn T.L., Renders B., Degroote L., Meersman B., Vandeveld L., "Active Load Control in Islanded Microgrids Based on the Grid Voltage", IEEE Transactions on Smart Grids, vol. 2, Iss. 1, pp: 139-151, 2011.
- [14] Y. Boutalis, T. Kottas, M. Christodoulou, "Adaptive Estimation of Fuzzy Cognitive Maps With Proven Stability and Parameter Convergence", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Volume: 17, Issue 4, Page(s): 874-889, 2009.
- [15] E. Dialynas, L. Daoutis. Modeling and evaluation of microgrids reliability and operational performance and its impact on service quality. European Transactions on Electric Power [Online]. DOI: 10.1002/ETEP.401, pp. 1-15. 2010. Available: <http://www.interscience.wiley.com>.
- [16] Sunny Island Installation Guide, version 4.0, [Online]. Available: <http://www.sma.de>.
- [17] Ph.E. Pascoe, A.H. Anbuky, "Estimation of VRLA Battery Capacity Using the Analysis of Coup de Fouet Region", INTELEC, 1999.
- [18] Ch. Ehret, S. Piller, W.Schroer, A.Jossen, "State-of-charge determination for lead-acid batteries in PV-applications", in: Proceedings of the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, 2000.
- [19] D.Kray, D.U. Sauer, "Neuro-Methoden zur Prognose und Fehler-erkennung durch Analyse vor Daten aus Monitoring-Systemen ", Internationales Sonnenforum, Koln, 1998.
- [20] H.-P.Hones, "Elektrochemische Energiespeicher in photovoltaischen Anlagen", Dissertation, Universitat Stuttgart, 1994
- [21] F. Delfino, G. B. Denegri, M. Invernizzi, R, Procopio, "An Integrated Active and Reactive Power Control Scheme for Grid-Connected Photovoltaic Production Systems," IEEE PES2008, pp. 1463-1468, 2008.
- [22] C. Clastres, T. T. Ha Pham, F. Wurtz, S. Bacha, "Ancillary Services and Optimal Household Energy Management with Photovoltaic Production," Energy, vol. 35, pp. 55 - 64, 2010.
- [23] H. Yu, J. Pan, A. Xiang, "A Multi Function Grid-Connected PV System with Reactive Power Compensation for the Grid," Solar Energy, vol. 79, pp. 101-106, 2005.
- [24] K. Palanisami, D. P. Kothari, M. K. Mishra, S. Meikandashivam, I. J. Raglend, "Effective utilization of unified power quality conditioner for interconnecting PV modules with grid using power angle control method," EPSR, vol. 48, pp. 131-138, 2013.
- [25] G. Tsengenes, G. Adamidis, "A Multi-Function Grid Connected PV System with Three-Level NPC Inverter and Voltage Oriented Control," Solar Energy, vol. 85, pp. 2595-2610, 2011.
- [26] J. A. Martinez, J. Elroy-Garcia, S. Arnaltes, "Direct Power Control of Grid-Connected PV Systems with Three-Level NPC Inverters," Solar Energy, vol. 84, pp. 1175-1186, 2010.

- [27] A. Samadi, M. Ghandhari, L. Soeder, "Reactive Power Dynamic Assessment of a PV System in a Distribution Grid," *Energy Procedia*, vol. 20, pp. 98-107, 2012.
- [28] A. Cagnano, F. Torelli, F. Alfonzetti, E De Tuglie, "Can PV-plants Provide a Reactive Power Ancillary Service? A Treat Offered by an on-line Controller," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 1047-1052, 2011.
- [29] **D. Stimoniaris**, D. Tsiamitros, E. Dialynas, "Improved Energy Storage Management and PV-Active Power Control Infrastructure and Strategies for Microgrids," **IEEE Trans on Power Systems**, vol. 31, iss. 1, pp. 813-820, 2016.
- [30] N. Langhammer, R. Kays, "Performance Evaluation of Wireless Home Automation Networks in Indoor Scenarios," *IEEE Transactions on Smart Grids*, vol. 3, Iss 4, pp. 2252-2261, 2012.
- [31] M. Aliberti, "Green networking in home and building automation systems through power state switching," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 57, Iss 2, pp. 445-452, 2011.
- [32] D. Tsiamitros, **D. Stimoniaris**, N. Poulakis, M. A. Zehir, A. Batman, M. Bagriyanik, A. Ozdemir and E. Dialynas, "Advanced Energy Storage and Demand-Side Management in Smart Grids using Buildings Energy Efficiency Technologies", *IEEE Innovative Smart Grid Technologies 2014 Conference (IEEE-ISGT2014)*, Istanbul, Turkey, 12-15 October 2014.
- [33] T. Kollatou, D. Tsiamitros, **D. Stimoniaris**, V. Kikis, M. A. Zehir, A. Batman, M. Bagriyanik, A. Ozdemir and E. Dialynas, "Advanced Demand-Side Management in Microgrids using KNX Technologies", **2014 KNX Scientific Conference**, Wiesbaden, Germany, 30-31 October 2014.
- [34] M. A. Zehir, A. Batman, M. A. Sonmez, A. Font, D. Tsiamitros, **D. Stimoniaris**, T. Kollatou, M. Bagriyanik, A. Ozdemir, E. Dialynas, "Development of a Field Data-based Virtual Test Bed for Microgrid Integration of Building Automation Technologies", **ELECO 2015 Conference**, Bursa, Turkey.
- [35] H. Laaksonen, P. Saari and R. Komulainen, "Voltage and frequency control of inverter based weak LV network microgrid", *International Conference of Future Power Systems*, pp. 1-6, 18 November 2005, Amsterdam, the Netherlands.
- [36] K. D. Brabandere, A. Woyte, R. Belmans and J. Nijs, "Prevention of inverter voltage tripping in high density PV grids", in *Proc. 19th Photovoltaic solar energy conference*, 7-11 June 2004, Paris, France.
- [37] B. Blazic, I. Papic, "Voltage profile support in distribution networks – influence of the network R/X ratio", *Power Electronics and Motion Control Conference 13th (EPEPMC)*, available at IEEEXplore, 30.09.2008.
- [38] **D. Stimoniaris**, T. Kollatou, D. Tsiamitros, M. A. Zehir, A. Batman, M. Bagriyanik, A. Ozdemir, E. Dialynas, "Demand-Side Management by Integrating Bus Communication Technologies into Smart Grids", **Electric Power Systems Research**, vol.136, pp.251-261, 2016.

- [39] M. A. Zehir, A. Batman and M. Bagriyanik, “An event-driven energy management system for planned control of thermostatic loads”, IEEE PowerTech 2013 Conference, 16-20 June 2013, Grenoble, France.
- [40] Walid Saad, Zhu Han, Mérouane Debbah, Are Hjørungnes, Tamer Basar, “Coalitional Game Theory for Communication Networks”, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 26, Iss. 5, pp. 77-97, 2009.
- [41] Walid Saad, Zhu Han, Vincent Poor and Tamer Basar, “Game-Theoretic Methods for the Smart Grid: An Overview of Microgrid Systems, Demand-Side Management, and Smart Grid Communications”, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 29, Iss. 5, pp. 86-105, 2012.
- [42] P. Kontogiorgos, E. Sarri, M. N. Vrahatis, G. P. Papavassilopoulos, “An Energy Market Stackelberg Game Solved with Particle Swarm Optimization”, NumAN2014 Conference, 2-5 September 2014, Chania, Greece
- [43] P. Kontogiorgos, M. N. Vrahatis, G. P. Papavassilopoulos, “Interval Analysis to address Uncertainty in Multicriteria Energy Market Clearance”, MedPower2014 Conference, 2-5 November 2014, Athens, Greece.
- [44] J. Jang, C. Sun, ”“Neuro-Fuzzy Modelling and Control””, Proceedings of the IEEE, vol. 83, no. 3, pp. 378-401, 1995.
- [45] B. Kosko, ”“Fuzzy Cognitive Maps””, International Journal of Man-Machine Studies, pp. 65-75, January 1986.
- [46] T. Kottas, et al., ”A new method for reaching equilibrium points in Fuzzy Cognitive Maps””, Proceedings of 2nd International IEEE Conference of Intelligent Systems, pp. 53-60, 2004.
- [47] B. Kosko, ”Fuzzy Engineering””, Prentice-Hall NU, 1997.
- [48] T. Kottas, Y. Boutalis and M. Christodoulou, ”Bi-linear Adaptive Estimation of Fuzzy Cognitive Networks”, Applied Soft Computing, vol. 12, no. 12, pp. 3736 - 3756, Dec. 2012.
- [49] T. Kottas, **D. Stimoniaris**, D. Tsiamitros, V. Kikis, Y. Boutalis, E. Dialynas, “New Operation Scheme and Control of Smart Grids using Fuzzy Cognitive Networks”, **IEEE PowerTech 2015** Conference, 29 June -2 July 2015, Eindhoven, the Netherlands.
- [50] R. H. Lasseter, J. H. Eto, B. Schenkman, J. Stevens, H. Vollkommer, D. Klapp, E. Linton, H. Hurtado, J. Roy, “CERTS Microgrid Laboratory Test Bed”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, iss 1, pp. 325-332, 2011.
- [51] F. Adinolfi, G. M. Burt, P. Crolla, F. D’Agostino, M. Saviozzi, F. Silvestro, “Distributed Energy Resources Management in a Low-Voltage Test Facility”, IEEE Transactions on Industrial Electronics vol. 62, iss. 4, pp. 2593-2603, 2014.
- [52] V. Salehi, A. Mohamed, A. Mazloomzadeh, O. A. Mohammed, “Laboratory-Based Smart Power System, Part II: Control, Monitoring and Protection”, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, iss. 3, pp. 1405-1417, 2012.

- [53] J. Byun, I. Hong, S. Park, "Intelligent Cloud Home Energy Management System Using Household Appliance Priority Based Scheduling Based on Prediction of Renewable Energy Capability", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 58, iss. 4, pp. 1194-1201, 2012.
- [54] L. Nastac, C. Lute, J. Brendlinger, S. Kenner, C. Boriack, T. Abdallah, «Microgrid Model Development and Validation Testing», *North American Power Symposium*, pp.1-7, 2009.
- [55] S. S. Shi, Z. X. Lu, Y. Min, Y. Qao, "Modeling and Simulation of the Microgrid Prototype in China", *Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, pp. 1-6, 2009.
- [56] J. B. Almada, R. P. S. Leão, F. F. D. Montenegro, S. S. V. Miranda, R. F. Sampaio, "Modeling and Simulation of a Microgrid with Multiple Energy Resources", *IEEE EUROCON*, pp. 1150-1157, 2013.
- [57] E. Kremers, J. G. Durana, O. Barambones, "Multi-agent modeling for the simulation of a simple smart microgrid", *Energy Conversion and Management*, Vol. 75, pp. 643-650, 2013.
- [58] N. Pogaku, M. Prodanovic, T. C. Green, "Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, iss. 2, pp. 613-625, 2007.
- [59] R. Pawelek, I. Wasiak, P. Gburczyk, R. Mienski, "Study on Operation of Energy Storage in Electrical Power Microgrid- Modeling and Simulation", *International Conference on Harmonics and Quality*, pp. 1-5, 2010.
- [60] A. Brissette, A. Hoke, D. Maksimovic, A. Pratt, "A Microgrid Modeling and Simulation Platform for System Evaluation on a Range of Time Scales", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 968-976, 2011.
- [61] P. Basak, A. K. Saha, S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, "Microgrid: Control techniques and modeling", *Universities Power Engineering Conference*, pp. 1-5, 2009.
- [62] A. Monti, F. Ponci, A. Benigni, "Real Time Simulation and Hardware in the Loop as enablers for Sustainable Energy Solutions", *International Conference on Clean Electrical Power*, pp. 21-27, 2011.
- [63] A. Saleem, N. Honeth, Y. Wu, L. Nordstrom, "Integrated multi-agent testbed for decentralized control of active distribution networks", *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-5, 2013.
- [64] H. Lin, S. S. Veda, S. S. Shukla, L. Mili, J. Thorp, "GECO: Global Event-Driven Co-Simulation Framework for Interconnected Power System and Communication Network", *IEEE Transactions on Smart Grids*, vol. 3, iss. 3, pp. 1444-1456, 2012.
- [65] S. H. Ko, S. R. Lee, H. Dehbonei, C. V. Nayar, "Application of Voltage-and Current-Controlled Voltage Source Inverters for Distributed Generation Systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, iss.3, pp. 782-792, 2006.

- [66] S. S. Shi, Z. X. Lu, Y. Min, "Verification of the equivalent model of the inverter in microgrid", IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, pp. 691-695, 2010.
- [67] S. A. Rahman, R. K. Varma, "PSCAD/EMTDC model of a 3-phase grid connected photovoltaic solar system", North American Power Symposium (NAPS), pp. 1-7, 2011.
- [68] E. Muljadi, M. Singh, V. Gevorgian, "PSCAD Modules Representing PV Generator". [Online]. Available from: <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58189.pdf> (accessed 02.10.2015).
- [69] Wholesale Solar, Whisper 200 Technical Specifications. [Online]. Available from: http://pdf.wholesalesolar.com/wind%20pdf%20folder/Whisper_100_200_Spec_Sheet.pdf?_ga=1.104866688.2000768894.1443774439 (accessed 02.10.2015).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ

I.1. Συνοπτική περιγραφή - Διάγραμμα ροής αλγορίθμου

Το γενικότερο διάγραμμα ροής του αλγορίθμου φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 11.1.

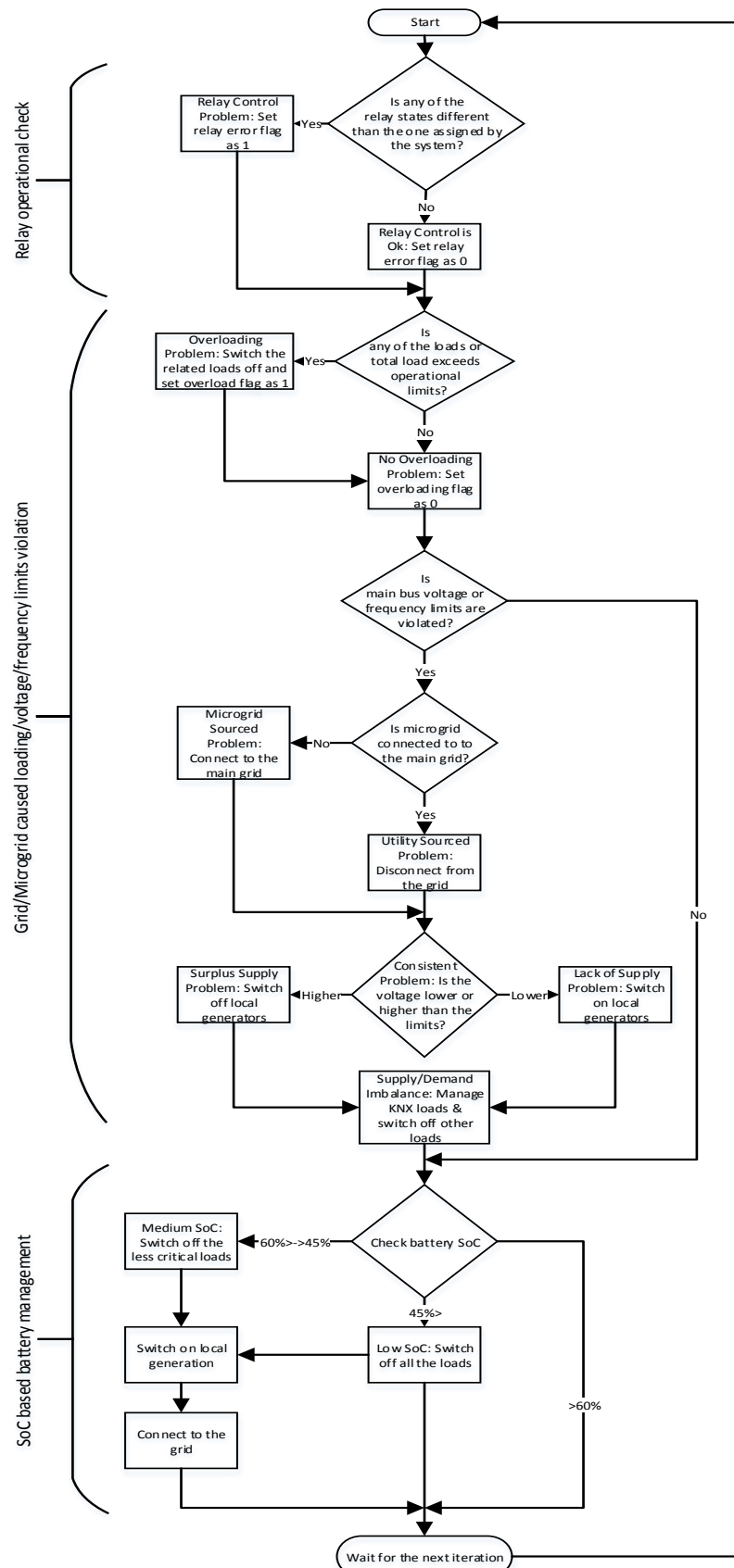
I.2. Αναλυτική Περιγραφή Αλγορίθμου (με και χωρίς KNX)

Το πρώτο κομμάτι του αλγορίθμου είναι η αρχικοποίηση των μεταβλητών (σημαίες, κτλ), κυρίως των άνω και κάτω ορίων της τάσης και της συχνότητας του μικροδικτύου. Για αυτό το σκοπό πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα όρια λειτουργίας των Inverter. Έτσι εδώ έχουν οριστεί για την τάση το άνω όριο ίσο με 245 Volt και το κάτω όριο 215 V.

Ο αλγόριθμος ελέγχου χωρίζεται σε δύο βήματα:

i. Το τμήμα της ρύθμισης τάσης και συχνότητας σε πραγματικό χρόνο. Αυτό το κομμάτι του αλγορίθμου ξεκινάει με την απενεργοποίηση του ρελέ του φορτίου που ελέγχεται από το KNX και χωρίζεται σε οκτώ υπορουτίνες:

1. Αν πλεόνασμα ισχύος από το υπόλοιπο δίκτυο οδηγεί σε αύξηση της τάσης του κεντρικού ζυγού του μικροδικτύου, δίνεται εντολή να ανοίξει το ρελέ της διασύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο και να οδηγηθεί το μικροδίκτυο σε νησιδοποιημένη λειτουργία. Η σχετική σημαία (flag) ενεργοποιείται. Άρα το ρελέ της διασύνδεσης τίθεται στη θέση off (0).
2. Αν πλεόνασμα ισχύος από τις τοπικές ΑΠΕ οδηγεί σε αύξηση της τάσης του κεντρικού ζυγού του μικροδικτύου, δίνεται εντολή να αποκατασταθεί η διασύνδεση με το υπόλοιπο δίκτυο ενεργοποιώντας το ρελέ διασύνδεσης (1), ώστε να δοθεί το πλεόνασμα ισχύος στο δίκτυο. Αν το ρελέ διασύνδεσης είναι ήδη στη θέση 1 (άρα δεν μπορεί να αποκατασταθεί η σύνδεση) η πρώτη διαθέσιμη μονάδα ΑΠΕ μειώνει ισχύ, αν είναι δυνατόν.
3. Αν έλλειμμα ισχύος από το υπόλοιπο δίκτυο οδηγεί σε πτώση της τάσης του κεντρικού ζυγού του μικροδικτύου, η πρώτη διαθέσιμη μονάδα ΔΠ αυξάνει την παραγόμενη ισχύ της (αν είναι δυνατόν). Αν δεν είναι δυνατόν, παράγεται εντολή για νησιδοποιημένη λειτουργία, ενεργοποιείται η σχετική σημαία και το σχετικό ρελέ (διασύνδεσης) γίνεται μηδέν.



Σχήμα 1.1. Γενικό διάγραμμα ροής του αλγορίθμου

4. Αν πλεόνασμα ισχύος από το υπόλοιπο δίκτυο οδηγεί σε αύξηση της τάσης του κεντρικού ζυγού του μικροδικτύου, δίνεται εντολή να ανοίξει το ρελέ της διασύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο και να οδηγηθεί το μικροδίκτυο σε νησιδοποιημένη λειτουργία. Η σχετική σημαία (flag) ενεργοποιείται. Άρα το ρελέ της διασύνδεσης τίθεται στη θέση off (0).
5. Αν πλεόνασμα ισχύος από τις τοπικές ΑΠΕ οδηγεί σε αύξηση της τάσης του κεντρικού ζυγού του μικροδικτύου, δίνεται εντολή να αποκατασταθεί η διασύνδεση με το υπόλοιπο δίκτυο ενεργοποιώντας το ρελέ διασύνδεσης (1), ώστε να δοθεί το πλεόνασμα ισχύος στο δίκτυο. Αν το ρελέ διασύνδεσης είναι ήδη στη θέση 1 (άρα δεν μπορεί να αποκατασταθεί η σύνδεση) η πρώτη διαθέσιμη μονάδα ΑΠΕ μειώνει ισχύ, αν είναι δυνατόν.
6. Αν έλλειμμα ισχύος από το υπόλοιπο δίκτυο οδηγεί σε πτώση της τάσης του κεντρικού ζυγού του μικροδικτύου, η πρώτη διαθέσιμη μονάδα ΔΠ αυξάνει την παραγόμενη ισχύ της (αν είναι δυνατόν). Αν δεν είναι δυνατόν, παράγεται εντολή για νησιδοποιημένη λειτουργία, ενεργοποιείται η σχετική σημαία και το σχετικό ρελέ (διασύνδεσης) γίνεται μηδέν.
7. Αν το ρεύμα εκφόρτισης της μπαταρίας είναι μεγαλύτερο από μια προκαθορισμένη τιμή, η σχετική σημαία ενεργοποιείται. Η πρώτη διαθέσιμη μονάδα ΔΠ αυξάνει την παραγόμενη ισχύ. Αν αυτό δεν είναι δυνατόν, τα ρελέ από τα φορτία που δεν είναι ενεργοποιημένα από το χρήστη, απενεργοποιούνται από το σύστημα (τα ρελέ τους γίνονται μηδέν). Επιπλέον, αν το φορτίο KNX δεν μπορεί να μειωθεί άλλο, το λιγότερο κρίσιμο φορτίο επιλέγεται να απορριφθεί. Αν όμως, το φορτίο KNX δεν φτάσει στην ελάχιστη κατανάλωση, (περίπου 150 W), το KNX dimmer ξαναενεργοποιείται και μειώνεται η κατανάλωσή του.
8. Αν η παραγόμενη ισχύς από τις μονάδες ΑΠΕ είναι μικρότερη από τη ζήτηση, και η τάση μειώνεται, το ρελέ διασύνδεσης ενεργοποιείται, ώστε το σθεναρό δίκτυο να παρέχει στο μικροδίκτυο το υπόλοιπο της ισχύος που χρειάζεται. Αν το ρελέ διασύνδεσης είναι ήδη στη θέση 1 (άρα δεν μπορεί να αποκατασταθεί η σύνδεση) η πρώτη διαθέσιμη μονάδα ΔΠ αυξάνει την παρεχόμενη ισχύ της. Αν καμία μονάδα ΔΠ δεν είναι διαθέσιμη και το KNX φορτίο έχει ήδη μειώσει την ισχύ του στο κατώτατο σημείο, βαθμιαία τα φορτία, ανάλογα με την κρισιμότητά τους, απορρίπτονται, εφόσον η υπορουτίνα αυτή συνεχίσει να επαναλαμβάνεται. Η σχετική σημαία ενεργοποιείται. Αν όμως, το φορτίο KNX δεν φτάσει στην ελάχιστη κατανάλωση, (περίπου 150 W), το KNX dimmer ξαναενεργοποιείται και μειώνεται η κατανάλωσή του.
9. Αν πλεόνασμα άεργης ισχύος από το υπόλοιπο δίκτυο οδηγεί σε αύξηση της συχνότητας του κεντρικού ζυγού του μικροδικτύου, δίνεται εντολή να ανοίξει το ρελέ της διασύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο και να οδηγηθεί το

μικροδίκτυο σε νησιδοποιημένη λειτουργία. Η σχετική σημαία (flag) ενεργοποιείται. Άρα το ρελέ της διασύνδεσης τίθεται στη θέση off (0).

10. Αν έλλειμμα άεργης ισχύος από το υπόλοιπο δίκτυο οδηγεί σε μείωση της συχνότητας του κεντρικού ζυγού του μικροδικτύου, δίνεται εντολή να ανοίξει το ρελέ της διασύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο και να οδηγηθεί το μικροδίκτυο σε νησιδοποιημένη λειτουργία. Η σχετική σημαία (flag) ενεργοποιείται. Άρα το ρελέ της διασύνδεσης τίθεται στη θέση off (0).
11. Αν η παραγόμενη άεργη ισχύς από τις μονάδες ΑΠΕ είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ζήτηση, και η συχνότητα μειώνεται, το ρελέ διασύνδεσης ενεργοποιείται, ώστε το σθεναρό δίκτυο να παρέχει στο μικροδίκτυο το υπόλοιπο της ισχύος που χρειάζεται. Αν το ρελέ διασύνδεσης είναι ήδη στη θέση 1 (άρα δεν μπορεί να αποκατασταθεί η σύνδεση), βαθμιαία τα φορτία, ανάλογα με την κρισιμότητά τους, απορρίπτονται, εφόσον η υπορουτίνα αυτή συνεχίσει να επαναλαμβάνεται. Η σχετική σημαία ενεργοποιείται

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, ελέγχεται κάθε σύγκρουση με εντολές που παρήχθησαν νωρίτερα στην τρέχουσα εκτέλεση του αλγορίθμου, ελέγχοντας τις σημαίες. Για παράδειγμα, στην υπορουτίνα Νο 8, προτού ενεργοποιηθεί το ρελέ διασύνδεσης, ελέγχεται αν υπάρχει σημαία που απενεργοποίησε το ρελέ αυτό.

ii. Το κομμάτι του αλγορίθμου που κάνει τη διαχείριση ενέργειας αποτελείται από την υπορουτίνα που κάνει εκτίμηση του SoC της μπαταρίας και από την υπορουτίνα που καθορίζει τις ενέργειες διαχείρισης ζήτησης και παρεχόμενων επικουρικών υπηρεσιών από τις μονάδες ΔΠ:

Η υπορουτίνα εκτίμησης του SoC των μπαταριών αναλύεται στην παράγραφο 4.3.1 της διατριβής και δεν επηρεάζεται από την περίπτωση που KNX συστήματα ελέγχονται από τον αλγόριθμο. Μετά την εκτίμηση του SOC, οι ενέργειες της παραγράφου 4.3.2 της διατριβής εκτελούνται, προσαρμοσμένες ως εξής για να ελέγχονται και KNX συστήματα, όπως το σύστημα του κεφαλαίου 6 της διατριβής:

1. Εάν $I_{\text{mean-2}} > 2 \text{ A}$ και το σημείο ($V_{\text{mean-2}}, I_{\text{mean-2}}$) έχει υπερπηδήσει μία από τις παραπάνω περιοχές SoC του Σχ.4.3, δηλαδή $(\text{SoC}_{i-1} - \text{SoC}_i) > 20\%$, τότε $\text{SoC}_i = \text{SoC}_{i-1} - 10\%$ (ψευδο-SoC). Τότε, η παραγωγή ενεργού ισχύος από τη διαθέσιμη μονάδα ΑΠΕ (βιοαέριο ή Φ/Β) αυξάνεται σύμφωνα με το διαθέσιμο βήμα αύξησης της ισχύος της αντίστοιχης μονάδας και το επίπεδο SoC_i , όπως στην παράγραφο 4.3.3 της διατριβής. Στην περίπτωση που η αύξηση της παραγωγής ενέργειας από τους μονάδες DG του μικροδικτύου δεν είναι δυνατή και το KNX φορτίο έχει ήδη μειώσει την ισχύ του στο κατώτατο σημείο, βαθμιαία τα φορτία, ανάλογα με την κρισιμότητά τους, απορρίπτονται, εφόσον η υπορουτίνα αυτή συνεχίσει να επαναλαμβάνεται. Η σχετική σημαία ενεργοποιείται. Αν όμως, το φορτίο KNX δεν φτάσει στην ελάχιστη κατανάλωση, (περίπου 150 W), το KNX dimmer ξαναενεργοποιείται και μειώνεται η κατανάλωσή του.

2. Σε οποιοδήποτε άλλο συνδυασμό ρεύματος εκφόρτισης και προηγούμενου SoC, η πραγματική τιμή SoC έχει ανατεθεί στη SoC_i και , η παραγωγή ενεργού ισχύος από τη διαθέσιμη μονάδα ΑΠΕ (βιοαέριο ή Φ/Β) αυξάνεται σύμφωνα με το διαθέσιμο βήμα αύξησης της ισχύος της αντίστοιχης μονάδας και το επίπεδο SoC_i . Στην περίπτωση που η αύξηση της παραγωγής ενέργειας από τους μονάδες DG του μικροδικτύου δεν είναι δυνατή και το KNX φορτίο έχει ήδη μειώσει την ισχύ του στο κατώτατο σημείο, βαθμιαία τα φορτία, ανάλογα με την κρίσιμότητά τους, απορρίπτονται, εφόσον η υπορουτίνα αυτή συνεχίσει να επαναλαμβάνεται. Η σχετική σημαία ενεργοποιείται Αν όμως, το φορτίο KNX δεν φτάσει στην ελάχιστη κατανάλωση, (περίπου 150 W), το KNX dimmer ξαναενεργοποιείται και μειώνεται η κατανάλωσή του.
3. Εάν οι μπαταρίες φορτίζουν για τουλάχιστον 15 λεπτά, δηλαδή αν $I_{mean-15} < 0$ A, η πραγματική τιμή της SoC γίνεται SoC_i και εάν υπάρχουν φορτία που έχουν απορριφθεί προηγουμένως, ενεργοποιούνται σταδιακά κάθε 15 λεπτά, ξεκινώντας από το πιο κρίσιμο. Αυτό το τρίτο στάδιο προστέθηκε, επειδή οι αλγόριθμοι ελέγχου των μικροδικτύων ως σήμερα δεν υποστηρίζουν κανένα φορτίο, μέχρι η SoC της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας φθάσει το όριο του 30%. Δεδομένου ότι οι μπαταρίες των Φ/Β δεν επιτρέπεται να φορτίζουν με υψηλό ρεύμα, αυτό οδηγεί στην απώλεια της πλεονάζουσας ηλιακής ή αιολικής ενέργειας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ KNX

ΙΙ.1. Εισαγωγή

Το KNX είναι σύστημα προτυποποίησης, συσκευών και λογισμικού το οποίο βρίσκεται σε πλήρη ευθυγράμμιση με τα πρότυπα της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τους οργανισμούς παγκόσμιας προτυποποίησης με βασικό στόχο τον οικιακό αυτοματισμό.

Το KNX έχει αναφορές παγκοσμίως και βρίσκει εφαρμογή σε πλήθος κτιριακών εγκαταστάσεων τόσο στην Ευρώπη και την Ασία, όσο και στη Βόρειο και Νότιο Αμερική. Το KNX έχει γίνει αποδεκτό ως Διεθνές πρότυπο (International Standard – ISO/IEC 14543-3), ως Ευρωπαϊκό πρότυπο (CENELEC EN 50090 and CEN EN 13321-1) και ως Κινέζικο Πρότυπο (GB/T 20965). Τα προϊόντα KNX από διαφορετικούς κατασκευαστές μπορούν να συνδυαστούν σε εφαρμογές και μελέτες καθώς το trademark του KNX εγγυάται ότι λειτουργούν και συνεργάζονται απόλυτα. Ακόμη, το KNX είναι το μοναδικό ανοιχτό παγκόσμιο πρότυπο σχετικά με τον αυτόματο έλεγχο τόσο σε οικιακές όσο και σε βιομηχανικές/εμπορικές κτιριακές εγκαταστάσεις.

Η ανάγκη να μεταφερθούν δεδομένα ελέγχου σε όλα τα τμήματα ενός συστήματος διαχείρισης μιας κτιριακής εγκατάστασης, καλύπτεται από ένα σύστημα που φέρνει σε επικοινωνία όλες τις απομονωμένες συσκευές κάνοντας εφικτή την απρόσκοπτη επικοινωνία όλων των εξαρτημάτων σε μια κοινώς αποδεκτή γλώσσα, κι αυτό είναι η λογική πίσω από το KNX bus. Το πρότυπο βασίζεται σε προγενέστερα συστήματα όπως το EIB, EHS, και BatiBUS. Οι συσκευές ανταλλάσσουν πληροφορίες μέσω του συστήματος επικοινωνίας (BUS) με το οποίο όλες είναι συνδεδεμένες (μέσω twisted pair καλωδίων, ή ραδιοσυχνοτήτων, ή power line communications ή ακόμα και IP/Ethernet). Οι συσκευές του KNX bus μπορεί να είναι αισθητήρες που

χρειάζονται για τον έλεγχο ενός συστήματος κτιριακής διαχείρισης, όπως: θέρμανση, εξαερισμός, σκίαση, φωτισμός, ήχος, απεικόνιση, ασφάλεια.

Οι παραπάνω είναι οι βασικές λειτουργίες που υποστηρίζει ένα σύστημα KNX.

Το σύστημα KNX προσφέρει, εκτός από ισχυρά χαρακτηριστικά απόδοσης και μικρούς χρόνους επικοινωνίας, μια ενισχυμένη εργαλειοθήκη από υπηρεσίες και μηχανισμούς διαχείρισης δικτύου.

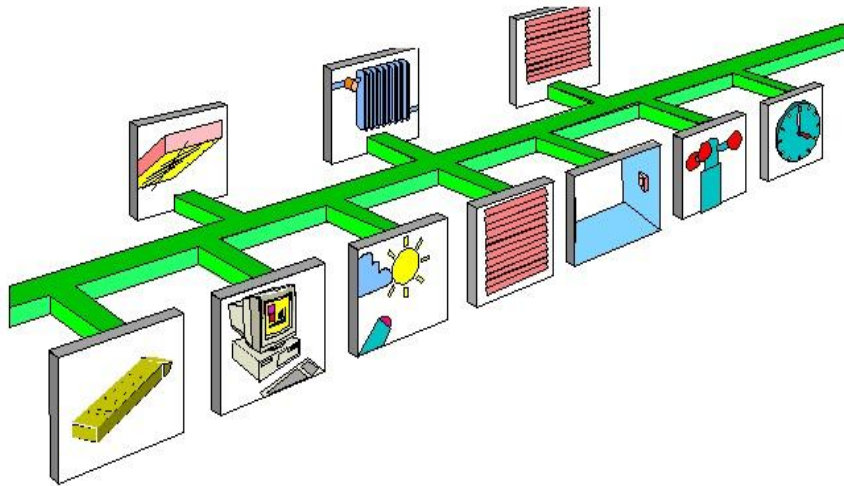
Μέσα στο Δίκτυο Συσκευών KNX, όλες οι συσκευές λειτουργούν για να αποτελέσουν διανεμημένες εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Ακόμα και στο επίπεδο συσκευής με συσκευή, και όχι κεντρικής διαχείρισης, η στενή αλληλεπίδραση είναι εφικτή, όποτε υπάρξει ανάγκη ή όποτε αυτό αποτελεί πλεονέκτημα για τη διαχείριση του κτιριακού συστήματος.

Ο προγραμματισμός των συσκευών και η παραμετροποίηση τους μπορεί να υλοποιηθεί μέσω ενός PC και του κοινού για όλους τους κατασκευαστές λογισμικό ETS, (S-Mode) ή με συσκευές που μπορούν από μόνες τους να ρυθμιστούν με απλούς χειρισμούς, (E-mode), χωρίς την ανάγκη ενός PC.

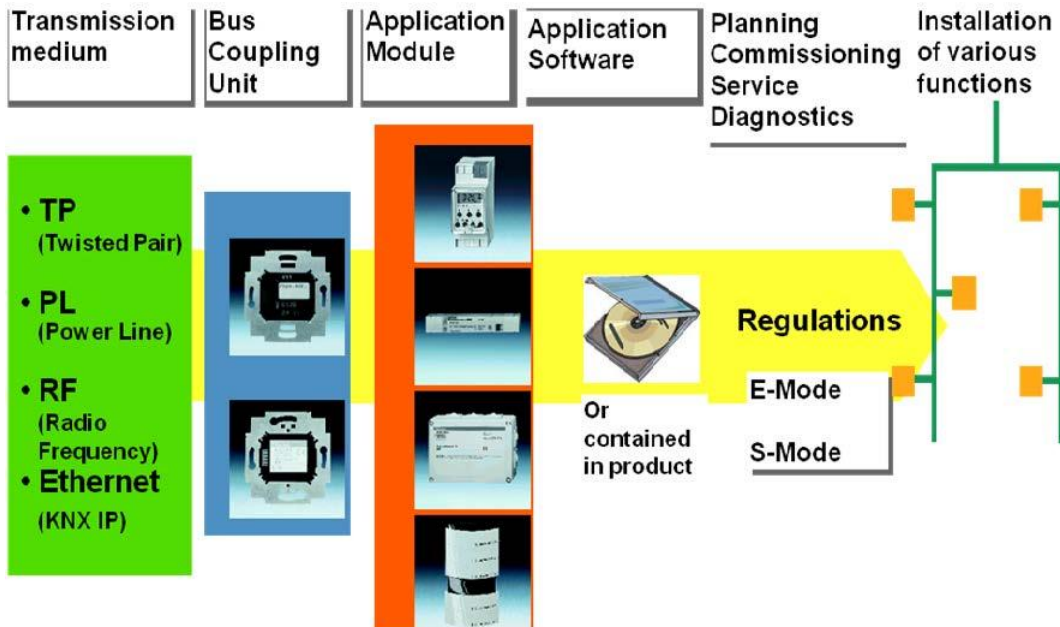
Τα φυσικά μέσα επικοινωνίας είναι: Τα διαθέσιμα καλώδια συνεστραμμένου ζεύγους (twisted-pair), οι γραμμές ισχύος (powerline communication) και η μπάντα ραδιοσυχνοτήτων (868 MHz).

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, το KNX Device Network έχει μεγάλα περιθώρια ευελιξίας στην εφαρμογή του, για να παρουσιάσει μια βέλτιστη λύση για κάθε εγκατάσταση. Επιπροσθέτως, έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει μέσα σε ένα περιβάλλον υπηρεσιών δικτύου όπως τα ευρυζωνικά δίκτυα που καθορίζονται από πρωτόκολλα IP (Internet Protocol), με σκοπό να έχουμε περισσότερα οφέλη ενός έξυπνου σπιτιού, γραφείου ή επαγγελματικού περιβάλλοντος.

Η γενική μορφή ενός συστήματος KNX παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα II.1: KNX – η Τεχνολογία



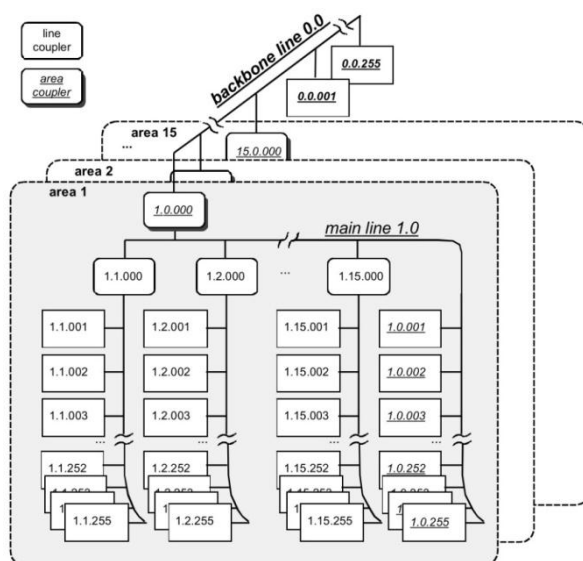
Σχήμα II.2: Διαλειτουργικότητα KNX (Πηγή: Εκπαιδευτικό υλικό από το KNX Basic Course)

II.2. Λογική και Τοπολογία KNX

Το KNX μπορεί να υλοποιήσει ένα πλήρως διανεμημένο δίκτυο, που μπορεί να φιλοξενήσει μέχρι 65536 συσκευές σε ένα 16-bit προσωπικό πεδίο διευθυνσιοδότησης. Επιτρέπει μέχρι 256 συσκευές σε κάθε γραμμή. Όπως είναι φανερό στο παρακάτω σχήμα, οι γραμμές (*lines*) σχηματίζουν ομάδες σε μία *κυρίως γραμμή* (*main line*) και εν συνεχεία σε μία *περιοχή* (*area*). Ένας ολόκληρος τομέας (*domain*) δημιουργείται από 15 περιοχές μαζί με μία *γραμμή – ραχοκοκκαλιάς* (*backbone line*).

Σε αυτό το σημείο μπορεί να σημειωθεί ότι το KNXnet/IP μπορεί ανάλογα με την επιλογή του σχεδιαστή να δημιουργήσει επίσης ένα ολοκληρωμένο δίκτυο από KNX υποδίκτυα μέσω IP (Internet Protocol).

Συνολικά $(255 \cdot 16) \cdot 15 + 255 = 61455$ τερματικές συσκευές θα μπορούσαν να ενωθούν σε ένα KNX δίκτυο. Οι περιορισμοί στην εγκατάσταση μπορεί να εξαρτώνται από παράγοντες εφαρμογής και περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι κανονισμοί εγκατάστασης και οι οδηγίες των αντίστοιχων προϊόντων πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν για μια τέτοια εγκατάσταση.



Εικόνα 1: Κόμβοι για ένα δίκτυο KNX

II.3. Εγκατάσταση – Συσκευές KNX

Τα εξαρτήματα που μπορεί να διαθέτει μια εγκατάσταση EIB/KNX είναι τα παρακάτω :

- Το καλώδιο μεταφοράς δεδομένων (τηλεφωνικού τύπου)
- Τροφοδοτικά
- Πηνία
- Bus-προσαρμογείς
- Προσαρμογέας γραμμής – περιοχής (line- area)
- Συσκευές επικοινωνίας
 - Σειριακή Θύρα (RS 232)
 - Σειριακή θύρα για χωνευτή τοποθέτηση
 - Θύρα USB για χωνευτή τοποθέτηση
- Αισθητήρες
 - Αισθητήρες φωτεινότητας χώρου
 - Αισθητήρας φωτεινότητας εξωτερικού χώρου.
 - Θερμοστάτες χώρου
 - Αισθητήρας διαρροής νερού
 - Ανιχνευτές κίνησης
 - Ανιχνευτής παρουσίας κ.α.
- Συσκευές εισόδου
 - Δυαδικές εισοδοί για παρακολούθηση τάσης
 - Δυαδική είσοδος για παρακολούθηση επαφών αναγγελίας
 - Είσοδος για συμβατικά μπουτόν
- Συσκευές εξόδου
 - Έξοδος για ρύθμιση φωτισμού
 - Dimmer ισχύος altenburger
 - Έξοδοι για έλεγχο ηλεκτρικών ρολλών και τεντών
- Συσκευές ενδείξεων και χειρισμού
 - Οθόνες LCD ενδείξεων και χειρισμού
 - Ταμπλό με μπουτόν και LEDs

- Οθόνη αφής
- **Συσκευές τηλεχειρισμού**
 - Πομποί τηλεχειρισμού IR
 - Δέκτης IR
- **Ελεγκτές**
 - Μονάδα σεναρίων
 - Μονάδες λογικής
 - Μονάδα χρονικού προγραμματισμού
 - Μονάδα ελέγχου φωτεινότητας κ.α.
- *Παρελκόμενα – Μποτόν*
- *Σύνθετες συσκευές*
 - Τηλεχειρισμός μέσω τηλεφωνικής γραμμής
 - Σύνθετη αναλογική και δυαδική είσοδος και έξοδος
 - Νέες σύνθετες συσκευές για εντοιχισμένη εγκατάσταση

II.4. Λογισμικό ETS

Το ETS είναι ένα λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται για να αυτοματοποιήσουμε τις τεχνικές λειτουργίες και διαδικασίες σε σπίτια και σε διάφορα κτίρια με πολλές και διαφορετικές χρήσεις. Το ETS μαζί με τον αυτοματισμό που θέλουμε να εφαρμοστεί σε κάθε κτίριο προσφέρει οικονομικές και ευέλικτες λύσεις. Το ETS δηλαδή χρησιμοποιείται για την μελέτη και τον σχεδιασμό ενός έργου που περιέχει ένα σύστημα KNX. Τα αρχικά του σημαίνουν Engineering Tool Software. Το ETS βοηθάει το χρήστη, γιατί είναι γραφικό περιβάλλον με εικόνες και δεν απαιτεί ιδιαίτερα δύσκολη και σύνθετη σκέψη για την εφαρμογή του κάθε αυτοματισμού.

Κατά καιρούς η KNX διαθέτει στην αγορά νέες εκδόσεις του ETS (έκδοση 5 σήμερα) οι οποίες έχουν περισσότερες και καινούριες δυνατότητες σε σύγκριση με τις παλιότερες εκδόσεις. Το ETS 5 είναι διαθέσιμο από την KNX στην αγορά από το 2014 ενώ η πρώτη έκδοση του ETS δημιουργήθηκε το 1993.

Γενικά για να σχεδιαστεί ένα έργο στο ETS πρέπει να ακολουθηθούν κάποια συγκεκριμένα βήματα, τα οποία είναι ανεξάρτητα από την έκδοση, γιατί ακολουθούν μια γενική φιλοσοφία και διευκολύνουν τον χρήστη να σχεδιάσει και να υλοποιήσει οποιαδήποτε μελέτη επιθυμεί. Συνοπτικά αναφέρονται τα εξής βήματα με τη σειρά :

- Επιθυμητές Ρυθμίσεις στο ETS
- Εισαγωγή της βάσης δεδομένων ETS
- Δημιουργία του Project με τις απαραίτητες ρυθμίσεις που επιθυμεί ο χρήστης
- Δομή του έργου και ο τρόπος με τον οποίο αυτή καθορίζεται
- Εισαγωγή των προϊόντων KNX στο έργο
- Έπεται η ρύθμιση των προϊόντων ώστε να γίνει η υλοποίηση του έργου
- Αντιστοιχίζονται τα προϊόντα KNX στη δομή του έργου
- Έπεται ο έλεγχος του έργου
- Τέλος η αποθήκευση του έργου..