

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**



**Σχολή Μηχανικών**

**Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής**

Διπλωματική Εργασία

**Τίτλος**

**Στρατηγικές ελέγχου για τη σταθεροποίηση σύγχρονων  
μικροδικτύων σε λειτουργία νήσου (island mode) με τη χρήση  
ανανεώσιμων πηγών και στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας**

Κωνσταντίνος Νικολάου Μεταξάς

A.M. 252017014

Επιβλέπων Καθηγητής

Νικόλαος Λάσκαρης

Αθήνα, Ιούλιος 2023

**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**



**SCHOOL OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF INDUSTRIAL DESIGN AND PRODUCTION  
ENGINEERING**

Diploma Thesis

**Title**

**Control strategies for stabilizing modern microgrids in island mode  
using renewables and energy storage elements**

Konstantinos Nikolaos Metaxas

Registration Number: 252017014

Supervision:

Nikolaos Laskaris

Athens, July 2023

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του  
Εισηγητή**

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι  
Εξεταστική Επιτροπή:

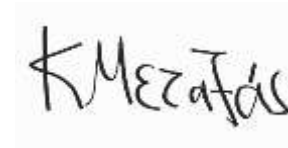
<b>No</b>	<b>Όνοματεπώνυμο και Ιδιότητα</b>	<b>Ψηφιακή Υπογραφή</b>
1	Νικόλαος Λάσκαρης Επίκουρος Καθηγητής	
2	Χρήστος Δρόσος Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό (ΕΔΙΠ)	
3	Ευάγγελος Παπακίτσος Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό (ΕΔΙΠ)	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μεταξάς Κωνσταντίνος με αριθμό μητρώου 252017014 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Date 21/7/23

Ο Δηλών



Μεταξάς Κωνσταντίνος

Περίληψη.....	7
Αναγνωρίσεις.....	9
<b>Κεφάλαιο 1: Μικροδίκτυα.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b> Εισαγωγή στα μικροδίκτυα.....	10
<b>1.2</b> Ιστορική αναδρομή.....	11
<b>1.3</b> Πλεονεκτήματα των μικροδικτύων.....	12
<b>1.4</b> Εξοπλισμός των μικροδικτύων.....	14
<b>1.5</b> Η ένταξη των ΑΠΕ στα μικροδίκτυα και οι προκλήσεις από την χρήση τους.....	27
<b>1.6</b> Βασικά είδη πρωτοκόλλων επικοινωνίας στα μικροδίκτυα.....	29
<b>Κεφάλαιο 2: Έλεγχος μικροδικτύων.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1</b> Εισαγωγή στον έλεγχο των μικροδικτύων.....	31
<b>2.2</b> Οι αρμοδιότητες και οι λειτουργίες του CC (Central Controller-Κεντρικός Ελεγκτής).....	31
<b>2.3</b> EMM (Energy Management Module -Εφαρμογή Διαχείρισης Ενέργειας) .....	32
<b>2.3.1</b> Έλεγχος τάσης.....	33
<b>2.3.2</b> Έλεγχος στροφών κινητήριας μηχανής.....	33
<b>2.3.3</b> Ρύθμιση της συχνότητας.....	33
<b>2.3.4</b> Έλεγχος του συντελεστή ισχύος.....	34
<b>2.4</b> PCM (Protection Coordination Module-Μονάδα Συντονισμού Προστασίας).....	34
<b>2.4.1</b> Προστασία κατά την διασυνδεδεμένη λειτουργία.....	35
<b>2.4.2</b> Προστασία κατά την αυτόνομη λειτουργία.....	37
<b>2.5</b> Μέθοδοι βελτιστοποίησης της ροής ισχύος.....	38
<b>2.6</b> Δομές ελέγχου (Control Structures).....	39

<b>Κεφάλαιο 3: Grid Forming Inverters (GFI).....</b>	<b>43</b>
<b>3.1</b> Εισαγωγή στους Grid Forming Inverters.....	43
<b>3.1.1</b> Τι είναι οι Grid Forming Inverters.....	44
<b>3.1.2</b> Ποιες οι λειτουργίες των GFI στα μικροδίκτυα.....	44
<b>3.2</b> Πλεονεκτήματα-Προκλήσεις.....	45
<b>3.3</b> Που τοποθετούνται οι GFI στα μικροδίκτυα.....	47
<b>Κεφάλαιο 4: Islanding (Νησιδοποίηση).....</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b> Εισαγωγή στο Islanding.....	50
<b>4.2</b> Τι είναι το Islanding.....	51
<b>4.3</b> Ιστορική αναδρομή.....	52
<b>4.4</b> Τα πλεονεκτήματα και οι προκλήσεις του Islanding.....	53
<b>4.5</b> Τα μειονεκτήματα του Islanding και οι τρόποι αντιμετώπισης τους.....	54
<b>4.6</b> Πως επιτυγχάνεται το Islanding.....	56
<b>4.7</b> Εκσυγχρονισμός δικτύων και Islanding.....	59
<b>4.7.1</b> Σκόπιμη απομόνωση.....	61
<b>4.7.2</b> Απρόοπτη απομόνωση.....	62
<b>4.7.3</b> Inverters.....	63
<b>4.7.4</b> Τάση και συχνότητα.....	64
<b>4.7.5</b> Υπερβολικά υψηλή τάση και χαμηλή συχνότητα.....	65
<b>4.7.6</b> Χαμηλή τάση και υψηλή συχνότητα.....	66
<b>Κεφάλαιο 5: Blackstart.....</b>	<b>69</b>
<b>Κεφάλαιο 6: Εξομοίωση μικροδικτύου στο Simulink.....</b>	<b>74</b>
<b>Συμπέρασμα.....</b>	<b>80</b>
<b>Κατάλογος αναφορών.....</b>	<b>82</b>

## Περίληψη

Τα σύγχρονα μικροδίκτυα (microgrids) δύνανται να λειτουργήσουν είτε συνδεδεμένα στο κυρίως δίκτυο ηλεκτροδότησης (grid-connected) είτε αυτονομημένα (island mode) καθώς και να διαχειρίζονται μεταβιβάσεις μεταξύ των δύο λειτουργιών. Η ακούσια μετάβαση σε λειτουργία νήσου παρουσιάζεται ως η πιο δύσκολη ως προς τη διαχείριση και εγκυμονεί κινδύνους όσον αφορά την προστασία, την ευστάθεια τάσης και συχνότητας καθώς και την ασφάλεια υλικού και προσωπικού. Κατά την διπλωματική εργασία θα διεξαχθεί μία ενδελεχής έρευνα συμβατικών αλλά και σύγχρονων τεχνικών ελέγχου σε μετατροπείς σχηματισμού δικτύου (grid-forming inverters) για τη διαχείριση της ασφαλούς μετάβασης του μικροδικτύου σε λειτουργία νήσου αλλά και την άμεση ευστάθεια λειτουργίας.

## **Abstract**

Modern microgrids can operate either grid-connected or in island mode and manage transfers between the two functions. Unintentional transition to island mode is presented as the most difficult to manage and poses risks in terms of protection, voltage and frequency stability and safety of equipment and personnel. During the thesis a thorough investigation of conventional and modern control techniques in grid-forming inverters will be carried out to manage the safe transition of the microgrid to Islanding mode and immediate operation stability.



## Αναγνωρίσεις

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον κύριο επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κύριο Νικόλαο Λάσκαρη για τη συνεχή υποστήριξη της διπλωματικής μου διατριβής και για την υπομονή καθώς και για τα κίνητρα που μου έδωσε. Με τις διαρκείς συζητήσεις, ο κύριος Νικόλαος Λάσκαρης με βοήθησε να καταλάβω ποια βήματα έπρεπε να ακολουθήσω για να ολοκληρώσω με επιτυχία τη διατριβή μου. Εκτός από τον κύριο επιβλέποντά μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κύριο Πέτρο Σαββίδη, Μεταδιδακτορικό Συνεργάτη, για την ουσιαστική καθοδήγηση τους η οποία με βοήθησε σε όλο το χρόνο της έρευνας και συγγραφής αυτής της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω του γονείς μου και τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια, στις εύκολες και δύσκολες στιγμές των σπουδών μου.

# Κεφάλαιο 1

## Μικροδίκτυα

### 1.1 Εισαγωγή στα μικροδίκτυα

Ως μικροδίκτυο ορίζεται το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από άλλα επιμέρους δίκτυα χαμηλής τάσης (ΧΤ). Ειδικότερα, στα συγκεκριμένα δίκτυα περιλαμβάνονται οι πηγές ενέργειας από τις οποίες τροφοδοτείται το δίκτυο, οι συσκευές αποθήκευσης και ελεγχόμενα φορτία. Οι πηγές ενέργειας των μικροδικτύων μπορεί να είναι είτε συμβατικές είτε μη συμβατικές. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται μικρόγεννήτριες, γεννήτριες πετρελαίου, φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, κύτταρα καυσίμου κτλ. Οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας των δικτύων αυτών που χρησιμοποιούνται είναι σφόνδυλοι και ηλεκτρικοί συσσωρευτές. Τα ελεγχόμενα φορτία (φόρτοι) είναι τα σημεία που διανέμεται η ηλεκτρική ενέργεια και καταναλώνεται.

Τα μικροδίκτυα λειτουργούν είτε συνδεδεμένα στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είτε αποκομμένα από αυτό σε λειτουργία νησιδοποίησης (Islanding) κατά την οποία χρησιμοποιούν άλλες εναλλακτικές πηγές ενέργειας.

Ο συγκεκριμένος τύπος δικτύων μπορεί να χρησιμοποιηθεί οπουδήποτε όμως εξυπηρετεί σε μεγάλο βαθμό απομακρυσμένες ή περιοχές που δεν διαθέτουν τις κατάλληλες υποδομές για να συνδεθούν σε ένα κεντρικό δημόσιο δίκτυο. Το γεγονός αυτό μπορεί να κάνει τις περιοχές αυτές ενεργειακά ανεξάρτητες και ικανές να ανταπεξέλθουν σε απρόοπτες καταστάσεις όπως βλάβες, ακραία καιρικά φαινόμενα ή κακόβουλες ενέργειες που θα παρεμποδίσουν την ομαλή λειτουργία τους.

Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι τα μικροδίκτυα λόγω του ελέγχου που μπορεί να ασκηθεί στα υποσυστήματά τους, δύνανται να αποφέρουν πολυάριθμα οφέλη ως προς την καλύτερη δυνατή διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας, την οικονομία, την αξιοπιστία και την βιωσιμότητα.

## 1.2 Ιστορική Αναδρομή

Από το 1954 η διαδικασία αναβάθμισης των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είχε τεθεί σε εφαρμογή εκμεταλλευόμενοι τον τότε διαθέσιμο εξοπλισμό με την υποθαλάσσια διασύνδεση συνεχούς ρεύματος του νησιού Gotland και με τη χρήση ειδικών μετατροπέων εναλλασσόμενου ρεύματος βασισμένους σε βαλβίδες υδραργύρου. Στη συνέχεια χρονολογικά ακολούθησε η διασύνδεση της Σαρδηνίας το 1967, η διασύνδεση του Ειρηνικού Ωκεανού το 1970 και η διασύνδεση Nelson River το 1973. Τα συγκεκριμένα μεγάλης κλίμακας έργα αποτελούν καινοτομία για την τότε εποχή και άνοιξαν το δρόμο για την επόμενη εξέλιξη των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας η οποία πραγματοποιήθηκε ουσιαστικά το 1972 με την αντικατάσταση των βαλβίδων υδραργύρου με βαλβίδες θυρίστορ με την ασύγχρονη διασύνδεση (Back to Back) μεταξύ Quebec και New Brunswick. Μετά το 1972 καθιερώθηκε η χρήση των μετατροπέων φυσικής μεταγωγής (line commutated) και οι βαλβίδες θυρίστορ. Παράλληλα σημαντική εξέλιξη παρατηρήθηκε και στον τομέα των διακοπτικών στοιχείων στερεάς κατάστασης ως προς την αύξηση των δυνατοτήτων χειρισμού μεγαλύτερης ισχύος, στον έλεγχο του χρόνου σβέσης τους και ως προς τον έλεγχο της τάσης. Η ευρεία χρήση τους οδήγησε τόσο στη μείωση του κόστους τους όσο και στην ανάπτυξη πλήθους ελεγκτών εξειδικευμένους στον έλεγχο ροής της αέργου και της πραγματικής ισχύος στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΜΗΕ). Με τον τρόπο αυτό βελτιώθηκε σε μεγάλο βαθμό η μεταφορική ικανότητα των ΣΜΗΕ και το 1986 η ενσωμάτωση των ελεγκτών αυτών αναπτύχθηκε ένα νέο είδος Συστημάτων Μεταφοράς, τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος (Flexible AC Transmission Systems (FACTS)). Συγκεκριμένα στα συστήματα αυτά γίνεται αξιοποίηση διακοπών ισχύος μεγάλης ταχύτητας στερεάς κατάστασης, σύγχρονων επεξεργαστών, εξελιγμένων μέσων αποστολής και λήψης σημάτων όπως οπτικές ίνες για υψηλές τάσεις καθώς και προηγμένες θεωρίες ελέγχου.

Από το 1980 και έπειτα παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη τεχνολογική εξέλιξη στον κλάδο της ηλεκτρονικής και συγκεκριμένα των ηλεκτρονικών ισχύος. Ο τομέας αυτός επέτρεψε την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα δίκτυα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεδομένου ότι έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν το ρεύμα από συνεχές σε εναλλασσόμενο, που είναι και ο τύπος που χρειάζεται το δίκτυο. Τα φωτοβολταϊκά

συστήματα όπως και τα κύτταρα καυσίμου παρέχουν συνεχές ρεύμα το οποίο πρέπει να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο και αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση inverter που απαρτίζεται από κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος. Επίσης τα συγκεκριμένα συστήματα χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες καθώς και στους μικρούς υδροστροβίλους για την βελτιστοποίηση της ενεργειακής τους απόδοσης σε μεταβλητές στροφές. Ακόμα ιδιαίτερη σημασία έχει να αναφερθεί το γεγονός του ότι τα ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται για την διατήρηση της συχνότητας εντός των επιθυμητών τιμών για την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Με την εισαγωγή των μετατροπέων ισχύος τα κλασικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία ήταν παθητικά και μίας κατεύθυνσης ισχύος μετατράπηκαν σε ενεργητικά και διπλής κατεύθυνσης ισχύος. Όλες αυτές οι τεχνολογικές εξελίξεις βελτίωσαν σημαντικά τις υπηρεσίες παραγωγής και διανομής του ρεύματος όπως και τον έλεγχο των συστημάτων αυτών. Τα δίκτυα πλέον είναι ενεργητικά γεγονός που ευνοεί την ενσωμάτωση συστημάτων τοπικής παραγωγής ενέργειας όπως οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας αλλά και διαχείρισής της, φαινόμενο που είναι γνωστό ως Κατανεμημένη ή Διεσπαρμένη Παραγωγή (Distributed or Dispersed Generation (DG)). Το 1991 η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος επεκτάθηκε και στα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και συνέλαβε στην βελτίωση της αξιοπιστίας και της ποιότητας της υπηρεσιών ισχύος. Λόγω των εξελίξεων αυτών εισήχθησαν οι όροι Ισχύς Καταναλωτών ή Ποιότητα Ισχύος βάσει των οποίων αξιολογείται η παροχή των υπηρεσιών ενέργειας από τις εταιρείες. Από το 2000 και στο εξής η χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας επέφερε σημαντικές αλλαγές στα συστήματα ελέγχου των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ηλεκτρονικών ελεγκτών και υπολογιστών οι οποίοι άρχισαν να αντικαθιστούν τους κλασικούς αυτοματισμούς με νέους προηγούμενους.

### **1.3 Πλεονεκτήματα των μικροδικτύων**

Τα μικροδίκτυα από την εγκατάστασή τους και την χρήση τους αποφέρουν πολυάριθμα οφέλη τα οποία καθιστούν αναγκαία την αξιοποίησή τους σε διάφορους τομείς όπως: η βιομηχανία, το αστικό ή το αγροτικό περιβάλλον, οι πανεπιστημιούπολεις, τα νησιά, οι στρατιωτικές εγκαταστάσεις και γενικότερα σε οργανισμούς/ιδρύματα κοινής ωφελείας.

Λόγω των συνεχόμενα αυξανόμενων απαιτήσεων σε ενέργεια καθώς και των ενεργειακών κρίσεων που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα κατά καιρούς προκύπτει η ανάγκη δημιουργίας ευέλικτων δικτύων τα οποία θα χειρίζονται την ηλεκτρική ενέργεια με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να αποδίδουν ικανοποιητικές λύσεις σε κάθε περίπτωση.

Ο κύριος άξονας γύρω από τον οποίον στρέφονται τα πλεονεκτήματα της χρήσης των μικροδικτύων αφορά ζητήματα που σχετίζονται με την εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων, τη βιωσιμότητα, την ανεξαρτησία καθώς και την καλύτερη δυνατή διαχείριση και διανομή του ηλεκτρικού ρεύματος. Σχετικά με τον τομέα της οικονομίας της ενέργειας και των πόρων, είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι χρησιμοποιείται εξειδικευμένο λογισμικό για την σωστή και αξιόπιστη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας με βάση την ζήτηση. Ειδικευμένοι αλγόριθμοι και μέθοδοι ελέγχου διασφαλίζουν την ποιότητα με την σταθερότητα της παροχής ενέργειας χωρίς διακυμάνσεις καθώς επίσης και την ποσότητα δεδομένου ότι προσφέρεται το ανάλογο ποσό ενέργειας σε κάθε φόρτο. Επιπροσθέτως με τον τρόπο αυτό επιβραδύνεται η φθορά του εξοπλισμού καθώς ασκείται συνεχής έλεγχος και υπάρχει άμεση πληροφόρηση για την κατάσταση του δικτύου. Κάτι το οποίο μπορεί να συμβάλλει στην έγκαιρη πρόληψη βλαβών και αστοχιών.

Στον τομέα της οικονομίας και της εξοικονόμησης πόρων επιτυγχάνεται μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας και καυσίμων, όπως υδρογονάνθρακες και γαιάνθρακες, λόγω του ότι τα μικροδίκτυα αντλούν μεγάλο ποσοστό ηλεκτρικού ρεύματος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επίσης λόγω της χρήσης μπαταριών για την αποθήκευση της ενέργειας εξασφαλίζεται η ύπαρξη μεγάλου ενεργειακού αποθέματος έτσι επιτυγχάνεται η ελάττωση της χρήσης συστημάτων που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα όπως γεννήτριες diesel. Κατά τον σχεδιασμό μικροδικτύων λαμβάνονται υπόψιν όλες οι πιθανές πηγές ενέργειας που μπορούν να αξιοποιηθούν για το μέγιστο δυνατό κέρδος. Η κάθε περιοχή χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη γεωμορφολογία, η οποία είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψιν από τους ειδικούς κατά την διαδικασία της μελέτης για την σχεδίαση και εγκατάσταση ενός μικροδικτύου με σκοπό την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευσή των περιβαλλοντικών συνθηκών για την άντληση ενέργειας. Ο συνδυασμός από τα οφέλη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της οικονομίας της ενέργειας και κατ' επέκτασιν των χρημάτων από την χρήση των

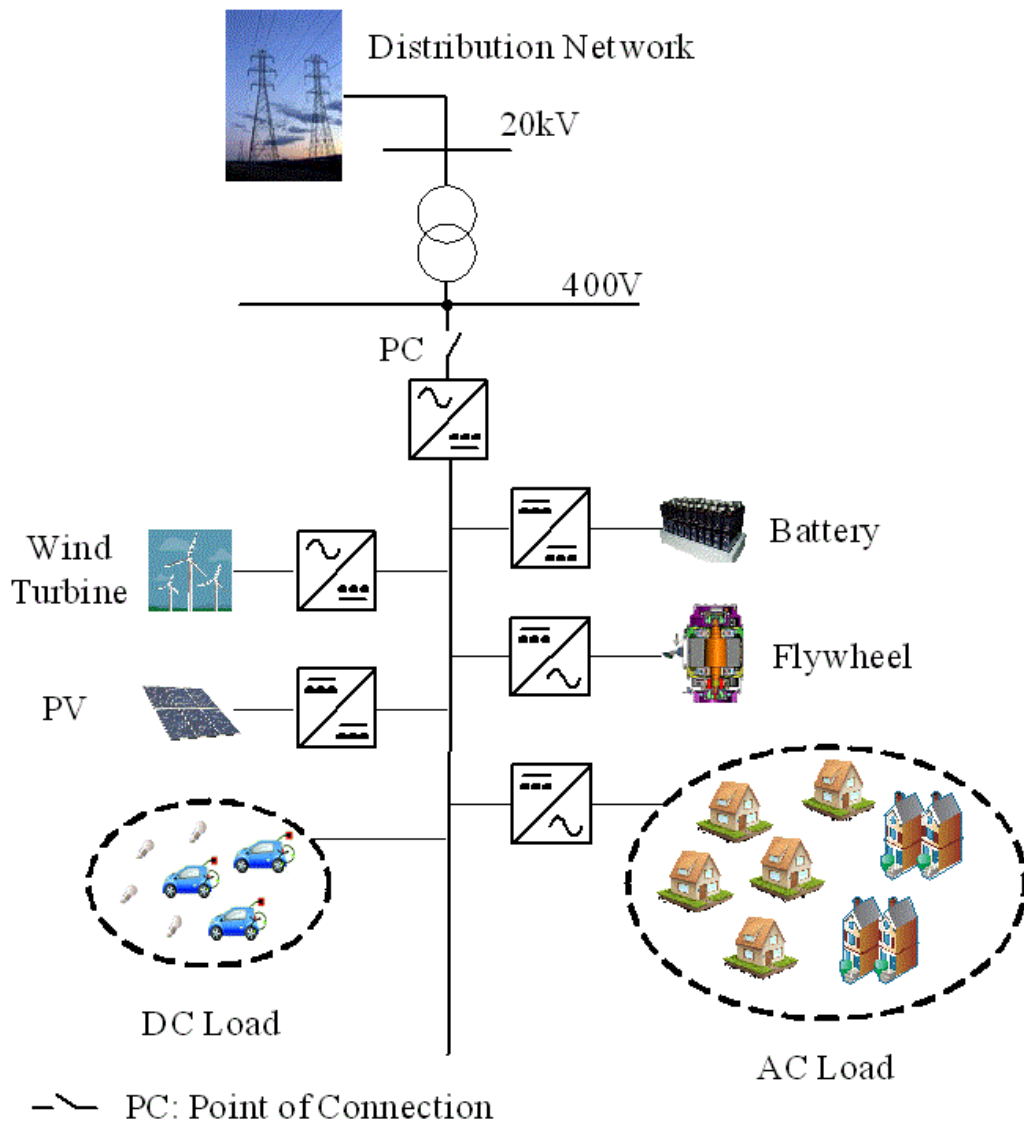
συγκεκριμένων τεχνολογιών διασφαλίζουν την βιωσιμότητα, γενικότερα το φαινόμενο που είναι γνωστό ως αειφόρος ανάπτυξη.

Η μη απόλυτη εξάρτηση από ένα κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και η αξιοποίηση ήπιων μορφών ενέργειας έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους του ρεύματος. Επίσης δεδομένου ότι η τεχνολογία των μικροδικτύων προσφέρει ευέλικτη και επιλεκτική διανομή της ενέργειας, ένα μεγάλο ποσοστό της εξοικονομείται και επιπρόσθετα ο εξοπλισμός δεν βρίσκεται σε μόνιμη βάση σε συνεχή λειτουργία, επομένως ελαττώνεται και η καταπόνησή του. Κάτι το οποίο διασφαλίζεται και από τον συνεχή έλεγχο που ασκείται σε αυτόν και λόγω του ότι προβλέπονται τυχόν σφάλματα και ειδοποιούνται εγκαίρως οι τεχνικοί σε περίπτωση βλάβης για την άμεση αποκατάστασή της.

## **1.4 Εξοπλισμός των μικροδικτύων**

Τα μικροδίκτυα εμπεριέχουν συγκεκριμένα στοιχεία εξοπλισμού τα οποία συμβάλλουν στην παραγωγή, μεταφορά, αποθήκευση και στην διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης στα μικροδίκτυα πέραν της αμφίδρομης ροής της ενέργειας εκτελείται και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των επιχειρήσεων παροχής ενέργειας και των καταναλωτών.

Η τεχνολογία και η εξέλιξη των μικροδικτύων βασίζεται στη χρήση καινοτομιών στον τομέα του αυτοματισμού, των επικοινωνιών και της συνδεσιμότητας, οι οποίες υπόσχονται βέλτιστη απόδοση στην παροχή υπηρεσιών ενέργειας. Η εισαγωγή της ψηφιακής τεχνολογίας αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό των μικροδικτύων το οποίο τα καθιστά ικανά να ανταπεξέλθουν σε πολυάριθμες και κρίσιμες καταστάσεις και να εξυψώσουν την ποιότητα των υπηρεσιών σε μεγάλο βαθμό. Επιπροσθέτως με την χρήση προηγμένων συστημάτων συλλογής δεδομένων και ελέγχου δίνεται η δυνατότητα παρακολούθησης των δικτύων σε πραγματικό χρόνο, γεγονός που συμβάλλει στην άμεση ανίχνευση αστοχιών αλλά και στην πρόβλεψη διαφόρων επερχόμενων. Συγκεκριμένα ως προς την πρόβλεψη είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε αυτό τον τομέα η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης παίζει καθοριστικό ρόλο. Η ίδια αποτελεί πλέον πραγματικότητα και στο εγγύς μέλλον βασικό στοιχείο για την αυτόματη διαχείριση του ηλεκτρικού ρεύματος σε όλο το εύρος των μικροδικτύων αλλά και για την πρόβλεψη δυσμενών καταστάσεων ειδοποιώντας άμεσα τους αρμόδιους.



*Σχήμα 1.1: Αναπαράσταση ενός τοπικού μικροδικτύου.*

Αναλυτικότερα τα βασικά στοιχεία από τα οποία συνθέτονται τα μικροδίκτυα είναι τα εξής:

<b>Στοιχεία βασικού εξοπλισμού</b>	<b>Λειτουργία</b>
Batteries (Μπαταρίες)	Μπαταρίες μολύβδου-οξέως για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας για οικιακή, εμπορική και βιομηχανική χρήση
Inverters (Αντιστροφείς)	Συσκευές βασισμένες σε μικροεπεξεργαστές για την μετατροπή της ισχύος συνεχούς ρεύματος σε ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος
PV panels (Φωτοβολταϊκά πάνελ)	Μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική και παρέχουν συνεχές ρεύμα
Generators (Γεννήτριες)	Μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια που παράγεται με τη χρήση καυσίμου σε ηλεκτρική
Smart meters (Εξυπνοι μετρητές)	Καταγράφουν δεδομένα σχετικά με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και τα μεταδίδουν στον πάροχο
Circuit Breakers (Διακόπτης κυκλώματος)	Είναι συσκευές τύπου ηλεκτρικής ασφάλειας σχεδιασμένες να αποκόπτουν τμήματα του δικτύου αυτόματα σε περίπτωση ανάγκης ή κατά βούληση



Wind Turbines (Ανεμογεννήτριες)	Μηχανή που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική
Motors (Ηλεκτροκινητήρες)	Μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική
Phasor Measurement Units (Μονάδες μέτρησης φάσης)	Αποτελούν μονάδες που μετρούν το ρεύμα και την τάση κατά πλάτος και φάση
Transformers (Μετασχηματιστές)	Ηλεκτρική μηχανή υπεύθυνη για την αυξομείωση της τάσης του ρεύματος
Environmental sensors (Αισθητήρες περιβάλλοντος)	Αισθητήρες ειδικευμένοι στην συλλογή δεδομένων σχετικών με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τα φαινόμενα που επικρατούν σε όλες τις περιοχές που εκτείνεται το μικροδίκτυο
Loads (Φόρτοι)	Αποτελούν τα μέρη του δικτύου όπου διανέμεται και καταναλώνεται η ηλεκτρική ισχύς
<b>Υποβοηθητικός εξοπλισμός</b>	
	<b>Λειτουργία</b>
Power meters (Μετρητές Ισχύος)	Λαμβάνουν δεδομένα για την ισχύ του ηλεκτρικού ρεύματος
Relays (Ρελαί)	Ηλεκτρικός διακόπτης που είτε ανοίγει είτε κλείνει ένα ηλεκτρικό

	κύκλωμα ελεγχόμενος από ένα άλλο ηλεκτρικό κύκλωμα
Power analysers (Αναλυτές Ισχύος)	Μετράει και αναλύει τη ροή της ισχύος σε ένα ηλεκτρικό σύστημα
Switches (Διακόπτες)	Ηλεκτρικό εξάρτημα που καθορίζει την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτό
Weather stations (Μετεωρολογικοί σταθμοί)	Σταθμός που παρέχει δεδομένα σχετικά με τις καιρικές συνθήκες βάσει μετρήσεων που λαμβάνει από αισθητήρες
Merging Units (Μονάδες συγχώνευσης)	-
Pyranometers (Πυρανόμετρα)	Αισθητήρας για μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας
Current and voltage transformers CT/VTs (Μετασχηματιστές ρεύματος και τάσης)	-
Auto-reclosers (αποζεύκτες)	Διακόπτης ο οποίος αποκόπτει με ασφάλεια ρεύματα μέχρι την τιμή του ονομαστικού ρεύματος
Sectionalizers (τμηματοποιητής)	Συσκευή που απομονώνει αυτόματα τμήματα εναέριου δικτύου που παρουσιάζουν μόνιμης βλάβης
Routers/Switches (Δρομολογητής)	Ο δρομολογητής συνδέει ταυτόχρονα διάφορα δίκτυα και

	λειτουργεί στο επίπεδο δικτύου/ Ο διακόπτης συνδέει ταυτόχρονα διάφορες συσκευές και λειτουργεί στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων
Remote/Local IOs	-
Remote/Local databases (Απομακρυσμένες/Τοπικές Βάσεις Δεδομένων)	Συστήματα λογισμικού που συλλέγουν και κατηγοριοποιούν δεδομένα
Platforms (e.g., OpenPDC)	-
Αισθητήρες	Συσκευές που μετατρέπουν οποιαδήποτε μορφή ενέργειας σε ηλεκτρικό σήμα

*Πίνακας 1.1: Βασικός εξοπλισμός μικροδικτύου.*

### • Μπαταρίες (συσσωρευτές)

Οι μπαταρίες ή συσσωρευτές αποτελούν πηγές συνεχούς ρεύματος και έχουν την δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με την οποία τροφοδοτούν τα συστήματα με ικανότητα επαναφόρτισης. Η λειτουργία των μπαταριών περιλαμβάνει δύο στάδια: την φόρτιση και την εκφόρτιση. Κατά την φόρτιση διοχετεύεται ηλεκτρικό ρεύμα στην μπαταρία το οποίο αλληλοεπιδρά με τα συστατικά της και η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται στην μπαταρία με την μορφή χημικής ενέργειας. Κατά την εκφόρτιση πραγματοποιείται το αντίστροφο φαινόμενο και η χημική ενέργεια μετασχηματίζεται σε ηλεκτρική. Συγκεκριμένα ο συσσωρευτής μετατρέπεται σε μια ηλεκτρική πηγή συνεχούς ρεύματος και τροφοδοτεί τα φορτία που θα συνδεθούν στους πόλους του. Οι διαδικασίες αυτές μπορούν να επαναληφθούν αρκετές φορές έως ότου ξεπεραστεί το όριο ζωής της μπαταρίας.

Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στα μικροδίκτυα είναι τύπου μολύβδου-οξέως όπου είναι γενικότερα και ο πιο

διαδεδομένος. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η παροχή ισχύος πρέπει να είναι συνεχόμενη. Συγκεκριμένα τέτοιου τύπου εφαρμογές είναι οικιακές, βιομηχανικές και εμπορικές. Η απόδοση των συγκεκριμένων μπαταριών είναι 75% για περισσότερο από 5000 κύκλους και σε βιομηχανικά και εμπορικά συστήματα έχουν την δυνατότητα τροφοδοσίας ισχύος για μέχρι 8 ώρες ενώ για οικιακά συστήματα η παροχή έχει συνήθως διάρκεια 2 ωρών.

- **Inverters**

Τα inverter τα οποία είναι γνωστά ως μετατροπείς ισχύος ή αντιστροφείς είναι ηλεκτρονικές συσκευές αποτελούμενες από κυκλώματα ισχύος εξειδικευμένα στην μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Επίσης διαμορφώνουν και την συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος κάτι το οποίο σχετίζεται και με τον τύπο του μετατροπέα ισχύος. Τα inverter εκτελούν την αντίθετη δουλειά από τους ανορθωτές οι οποίοι μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές και η τάση εισόδου τους όπως και η τάση και η συχνότητα της εξόδου τους ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο τους και την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται. Τα inverter αποτελούν πολύ βασικό στοιχείο των σύγχρονων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας όπως και των μικροδικτύων. Υπάρχουν εξιδανικευμένοι τύποι όπως τα grid-forming inverters τα οποία πέραν των βασικών λειτουργιών των βασικών μετατροπέων συμβάλουν και στον έλεγχο και στην ευστάθεια των μικροδικτύων.

- **Φωτοβολταϊκά πάνελ (PV panels)**

Για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική χρησιμοποιούνται οι φωτοβολταϊκές ή ηλιακές κυψέλες οι οποίες πραγματοποιούν την συγκεκριμένη μετατροπή ενέργειας βάσει ενός κβαντικού μηχανισμού που ονομάζεται φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Οι ηλιακές κυψέλες αποτελούν συνήθως επαφές p-n κατασκευασμένες από ημιαγωγά υλικά. Το πιο διαδεδομένο υλικό κατασκευής τους είναι το πυρίτιο.

Κατά την διαδικασία μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, η ενέργεια των φωτονίων από την φωτεινή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στην κυψέλη παράγει

ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών. Μέσω του ηλεκτρικού πεδίου της περιοχής κένωσης, δημιουργείται κίνηση των ηλεκτρονίων προς τον ημιαγωγό τύπου n και κίνηση των οπών προς τον ημιαγωγό τύπου p. Με αυτό τον τρόπο αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες της κυψέλης και πραγματοποιείται ροή ρεύματος στο συνδεδεμένο φορτίο.

Οι φωτοβολταϊκές μονάδες ή πλαίσια αποτελούνται από έναν ικανοποιητικό αριθμό κυψελών συνδεδεμένες σε σειρά για την λήψη της κατάλληλης τάσης και ισχύος. Οι μονάδες αυτές κατασκευάζονται σε τάσεις 12V, 24V και 48V και με ισχύ που κυμαίνεται από λίγα έως 400W. Σχετικά με τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά, φέρουν ειδικό περίβλημα για την προστασία των κυψελών από καιρικά φαινόμενα. Επίσης το υλικό και η σχεδίαση του περιβλήματος επηρεάζουν την θερμοκρασία στην οποία λειτουργούν οι κυψέλες. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό των μονάδων δεν θα πρέπει να υπερβαίνει κάποια όρια για την εξασφάλιση υψηλής απόδοσης και αυξημένης διάρκειας ζωής. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες με την σειρά τους συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλο τρόπο για τον σχηματισμό φωτοβολταϊκών διατάξεων με σκοπό την απολαβή της απαιτούμενης τάσης και ισχύος. Για μια εγκατάσταση φωτοβολταϊκής διάταξης απαιτείται επιφάνεια από 8 έως 12m<sup>2</sup> ανά kW παραγόμενης ισχύος.

## • Γεννήτριες

Οι ηλεκτρογεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Τα συγκεκριμένα μηχανήματα αποτελούνται από δυο βασικά μέρη, το ακίνητο μέρος που ονομάζεται στάτης το οποίο ουσιαστικά είναι οι πόλοι της μηχανής και σε αυτό υπάρχουν μαγνήτες (είτε μόνιμοι είτε ηλεκτρομαγνήτες) και το κινητό μέρος που λέγεται επαγωγίμο ή ρότορας και σε αυτό υπάρχουν πηνία. Με την περιστροφή του ροτορα εντός του στάτη, που δημιουργεί μαγνητικό πεδίο παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα στις άκρες των πηνίων. Επίσης για την περιστροφή του ρότορα χρησιμοποιείται ως κινητήρια μηχανή, είτε κινητήρας diesel είτε ατμοστρόβιλος είτε υδροστρόβιλος είτε η χρήση του ανέμου για τις ανεμογεννήτριες ανάλογα με την κατηγορία και την χρήση της γεννήτριας. Οι γεννήτριες μπορούν να παράξουν είτε εναλλασσόμενο είτε συνεχές ρεύμα. Αυτό που διαφοροποιεί τις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος από εκείνες του εναλλασσόμενου είναι η ύπαρξη συλλέκτη σε εκείνες του συνεχούς. Επίσης

χωρίζονται στις εξής κατηγορίες: γεννήτριες με αθροιστική συνθέτη διέγερση, γεννήτριες με διαφορική συνθέτη διέγερση, γεννήτριες ανεξάρτητης διέγερσης, γεννήτριες παράλληλης διέγερσης και γεννήτριες διέγερσης σειράς. Γενικότερα η ύπαρξη των γεννητριών συνεχούς ρεύματος είναι πιο σπάνια στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λόγω του ότι χρησιμοποιείται περισσότερο ο συνδυασμός γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος και ανορθωτή για την παραγωγή συνεχούς ρεύματος.

## • **Smart Meters**

Οι έξυπνοι μετρητές είναι ηλεκτρονικές συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την καταγραφή πληροφοριών που σχετίζονται με την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας, τα επίπεδα του ρεύματος και της τάσης καθώς και του συντελεστή ισχύος. Καταγράφουν τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τους κλασικούς μετρητές και έχουν την δυνατότητα παρακολούθησης και τιμολόγησης των πελατών. Επίσης υπάρχει αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ καταναλωτή και παρόχου η οποία μπορεί να γίνεται είτε ασύρματα είτε ενσύρματα. Χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα κυψελοειδών επικοινωνιών, WiFi, ασύρματα ad hoc δίκτυα μέσω WiFi, ασύρματα δίκτυα πλέγματος καθώς και άλλους πιο εξιδανικευμένους τύπους ασύρματων τηλεπικοινωνιών.

## • **Circuit breakers**

Ο διακόπτης κυκλώματος είναι μια ηλεκτρική διάταξη σχεδιασμένη για την προστασία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων από βλάβες που μπορούν να προκληθούν λόγω υπερέντασης ή βραχυκυκλώματος. Η λειτουργία τους είναι παρόμοια με αυτήν των ηλεκτρικών ασφαλειών καθώς διακόπτει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος για να προστατέψει τα συστήματα από τυχόν πυρκαγιές λόγω βραχυκυκλωμάτων. Όμως σε αντίθεση με τις κοινές ασφάλειες οι οποίες είναι μιας χρήσης επειδή καταστρέφονται και πρέπει να αντικατασταθούν, οι διακόπτες κυκλώματος επαναρυθμίζονται αυτόματα ή χειροκίνητα και παραμένουν ακέραιοι συνεχίζοντας την λειτουργία τους. Οι διακόπτες κυκλώματος που κατασκευάζονται έχουν μεγάλο εύρος μεγεθών και εφαρμογών ανάλογα με τις απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε διάταξης που καλούνται να προστατέψουν.

## • **Ανεμογεννήτριες (Wind Turbines)**

Για την μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική χρησιμοποιούνται ειδικά μηχανήματα γνωστά ως ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες αποτελούνται από δύο κύρια τμήματα, τον μετατροπέα της κινητικής ενέργειας που παράγεται από τον άνεμο σε μηχανική και από την γεννήτρια που μετατρέπει την συγκεκριμένη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική από την κίνηση του άξονά της. Το τμήμα που μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε μηχανική ονομάζεται δρομέας. Ο δρομέας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο γενικό βαθμό απόδοσης της ανεμογεννήτριας καθώς πρέπει να εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν περισσότερο το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό για να αποδίδει την μέγιστη δυνατή μηχανική ισχύ. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον αεροδυναμικό σχεδιασμό του δρομέα.

Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, ο οποίος είναι παράλληλος με την διεύθυνση του ανέμου και την επιφάνεια του εδάφους.
- Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, ο οποίος είναι κάθετος ως προς την επιφάνεια του εδάφους. Οι συγκεκριμένες ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε τρεις τύπους και διαφέρουν ως προς την κατασκευή του δρομέα.

Οι τύποι αυτοί είναι οι εξής:

1. Savonius-rotor
2. Darrieus-rotor
3. H-rotor

Παγκοσμίως ο πιο διαδεδομένος τύπος ανεμογεννητριών είναι εκείνες οριζοντίου άξονα και ο πληθυσμός τους ανέρχεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 95%. Ο συγκεκριμένος τύπος έχει το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και την μικρότερη διακύμανση ως προς την παραγόμενη ισχύ σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.

## • Ηλεκτροκινητήρες ( Motors)

Οι ηλεκτροκινητήρες είναι μηχανές που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Υπάρχουν αρκετές κατηγορίες ηλεκτροκινητήρων οι οποίοι διαχωρίζονται κατά κύριο λόγο ως προς τον τύπο του ρεύματος που χρησιμοποιούν για να λειτουργήσουν, είτε με εναλλασσόμενο ρεύμα είτε με συνεχές. Η λειτουργία τους πραγματοποιείται με την τροφοδοσία του τυλίγματος του οπλισμού του στάτη με ηλεκτρικό ρεύμα και αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του κινητήρα το οποίο επιδρά στον δρομέα και παράγει ροπή περιστροφής. Σχετικά με τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, υπάρχουν οι ασύγχρονοι κινητήρες ή αλλιώς επαγωγικοί κινητήρες οι οποίοι μπορεί να είναι είτε μονοφασικοί είτε τριφασικοί. Οι ασύγχρονοι κινητήρες λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης ισχύος τους, της απλότητας κατασκευής τους, του χαμηλού κόστους τους και της ελάχιστης συντήρησης τους αποτελούν την πιο διαδεδομένη μορφή κινητήρων στην βιομηχανία. Οι σύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα τους. Υπάρχουν δυο κατηγορίες που είναι οι εξής: κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα και κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα. Οι μονοφασικοί κινητήρες χωρίζονται σε ασύγχρονους μονοφασικούς κινητήρες και μονοφασικούς κινητήρες με συλλέκτη και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε εφαρμογές που δεν απαιτούν μεγάλη ηλεκτρική ισχύ. Συναντώνται συνήθως στον οικιακό τομέα, σε μικρές επιχειρήσεις, βιοτεχνίες, εμπορικά καταστήματα και γενικότερα σε μικρής κλίμακας διεργασίες. Για συγκεκριμένες εφαρμογές που απαιτούν την χρήση συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται κινητήρες συνεχούς ρεύματος οι οποίοι κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες: παράλληλης διέγερσης, διέγερσης σειράς, συνθέτης διέγερσης και με μόνιμους μαγνήτες. Οι κινητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε πολύ λιγότερες εφαρμογές σε σχέση με τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως σε εφαρμογές μεταβλητών ταχυτήτων με σημαντικές μεταβολές ροπής, διαδικασίες συγκολλήσεων



## • Μονάδες μέτρησης φάσης

Οι μονάδες μέτρησης φάσης αποτελούν προηγμένα συστήματα για την καταγραφή της ισχύος ως προς το μέτρο και την φάση της. Παρέχουν δεδομένα σχετικά με την κατάσταση του συστήματος ισχύος σε μια δεδομένη στιγμή λαμβάνοντας δείγματα 12 φορές ανά κύκλο τα οποία υποβάλλονται σε επεξεργασία από έναν αναδρομικό αλγόριθμο διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT). Μέσω αυτού παράγεται το μέτρο και η γωνία του κάθε σήματος εισόδου για το κάθε δείγμα που λαμβάνεται. Από την διαδικασία αυτή προκύπτουν φάσεις οι οποίες συνδυάζονται για την δημιουργία μιας ακολουθίας θετικών φάσεων για ένα σετ εισόδων τριών φάσεων. Τα μεγέθη της θετικής ακολουθίας χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του μέτρου και της φάσης της τάσης και του ρεύματος, της πραγματικής και της άεργου ισχύος, της συχνότητας και της συνθέτης αντίστασης.

## • Μετασχηματιστές

Οι μετασχηματιστές είναι ηλεκτρικές μηχανές που χρησιμοποιούνται ευρέως στα δίκτυα καθώς και στις τηλεπικοινωνίες. Συγκεκριμένα η χρήση τους στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας σχετίζεται με την ανύψωση ή την υποβίβαση της τάσης του ρεύματος. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι το γεγονός ότι δεν έχουν κινούμενα μέρη και για αυτό ονομάζονται στατοί μετασχηματιστές. Κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την κατασκευή και τη χρήση τους, καθώς υπάρχουν και οι ειδικοί μετασχηματιστές που εξειδικεύονται στην υποστήριξη συγκεκριμένων διεργασιών όπως οι ηλεκτροσυγκολλήσεις. Επίσης διακρίνονται ανάλογα με το δίκτυο για το οποίο προορίζονται, δηλαδή εάν είναι μονοφασικό ή τριφασικό, την ισχύ τους καθώς υπάρχουν οι ισχύος και οι μετασχηματιστές οργάνων μέτρησης, τον τρόπο ψύξης τους (ξηρού τύπου ή λαδιού) και τέλος ανάλογα με το εάν θα τοποθετηθούν σε υπαίθριο ή κλειστό χώρο.

Οι μετασχηματιστές αποτελούνται από έναν πυρήνα ο οποίος είναι το μαγνητικό κύκλωμα και δύο περιελίξεις πηνίων, το τύλιγμα υψηλής τάσης και το τύλιγμα χαμηλής τάσης. Το τύλιγμα που συνδέει την ηλεκτρική πηγή ονομάζεται πρωτεύον και το τύλιγμα που τροφοδοτεί το δίκτυο με την μετασχηματισμένη τάση δευτερεύον. Σε περίπτωση χρήσης μετασχηματιστή για υποβίβαση τάσης το πρωτεύον τύλιγμα

θα είναι αυτό της υψηλής τάσης και το δευτερεύον αυτό της χαμηλής. Τα συγκεκριμένα συστήματα βρίσκουν πολυάριθμες εφαρμογές και οι τεχνολογικές εξελίξεις επιτρέπουν την κατασκευή μεγάλων μετασχηματιστών με ιδιαίτερα υψηλό βαθμό απόδοσης (έως και 99% με απώλεια μόλις 1% λόγω κατά την μεταβίβαση ισχύος).

Στα μικροδίκτυα χρησιμοποιούνται παράλληλα μαζί με τους κλασσικούς μετασχηματιστές και οι έξυπνοι μετασχηματιστές που συνδυάζουν τις παραδοσιακές λειτουργίες διανομής ηλεκτρικής ισχύος με σύγχρονες δυνατότητες διασύνδεσης. Συγκεκριμένα για τα μικροδίκτυα η χρήση τους είναι πολύ σημαντική καθώς στα δίκτυα αυτά ενσωματώνεται μεγάλο εύρος τεχνολογιών και συστημάτων τα οποία είτε παράγουν είτε αποθηκεύουν είτε καταναλώνουν ηλεκτρική ισχύ. Η αρμονική και ελεγχόμενη αλληλεπίδραση των συστημάτων αποτελεί σημαντική πρόκληση και η τεχνολογία των έξυπνων μετασχηματιστών δίνει αρκετά ικανοποιητικές λύσεις. Η ενσωμάτωσή τους σε φωτοβολταϊκά συστήματα, σε συστήματα αποθήκευσης και συστήματα φόρτισης μπορεί να γίνει απευθείας λόγω της αμφίδρομης διασύνδεσης ισχύος, επίσης ευνοείται η τοπική διαχείριση και η νησιδοποίηση καθώς ενσωματώνουν εντολές και λειτουργίες ελέγχου. Τέλος οι μετασχηματιστές αυτοί χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση και αξιοπιστία, στοιχεία ιδιαίτερης σημασίας για την ικανοποίηση των αναγκών των καταναλωτών.

### • Περιβαλλοντικοί αισθητήρες

Οι περιβαλλοντικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την λήψη και την καταγραφή δεδομένων σχετικών με τις περιβαλλοντικές και καιρικές συνθήκες που επικρατούν στις περιοχές όπου είναι εγκατεστημένα τα μικροδίκτυα. Είναι απαραίτητοι για την παρακολούθηση της λειτουργίας και της κατάστασης του εξοπλισμού καθώς και της αλληλεπίδρασης τους με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Επίσης μέσω των δεδομένων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες αυτούς είναι δυνατή η πρόβλεψη του καιρού και των φυσικών φαινομένων για την έγκαιρη λήψη μέτρων για την προστασία των εγκαταστάσεων και των συστημάτων από ακραία καιρικά φαινόμενα. Χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο οι εξής αισθητήρες: αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης, υγρασίας, τάσης, ρεύματος, μαγνητικού πεδίου, βαρομετρικής πίεσης καθώς και καιρικών συνθηκών.

## • Φόρτοι (Loads)

Ένα τυπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτεί συνήθως οικιακές, αγροτικές, εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Η βασική διαφορά μεταξύ των συγκεκριμένων τύπων εγκαταστάσεων είναι ότι έχουν διαφορετικές απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ και για τον λόγο αυτό το δίκτυο θα πρέπει να εμπεριέχει υποσταθμούς οι οποίοι να αυξομειώνουν την τάση για να την προσαρμόζουν στις ανάγκες του κάθε καταναλωτή. Στην Ευρώπη οι οικιακές εγκαταστάσεις τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενο ρεύμα 230V και 50Hz. Η παροχή μπορεί να είναι είτε μονοφασική είτε τριφασική ανάλογα με την ηλεκτρική ισχύ που απαιτείται για τις διάφορες οικιακές διεργασίες. Οι αγροτικές και οι εμπορικές εγκαταστάσεις ενδέχεται να χρειάζονται περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια και για τον λόγο αυτό έχουν την ικανότητα εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και άλλων υποβοηθητικών συστημάτων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις έχουν πολύ μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ λόγω των πολυάριθμων μηχανημάτων που διαθέτουν και της μεγάλης τους έκτασης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται τριφασικό ρεύμα της τάξης των 380V και 50Hz και πάνω ανάλογα με την χώρα και τον τύπο της βιομηχανίας.

## **1.5 Η ένταξη των ΑΠΕ στα μικροδίκτυα και οι προκλήσεις από την χρήση τους.**

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή ήπιες μορφές ενέργειας είναι πηγές ενέργειας που μπορεί να εκμεταλλευτεί ο άνθρωπος και προέρχονται από φυσικές διαδικασίες όπως ο άνεμος, ο ήλιος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού, η θερμότητα του νερού και του αέρα καθώς και απόβλητα βιολογικών διεργασιών. Συγκεκριμένα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι αιολική, ηλιακή, γεωθερμική, υδροηλεκτρική, ωκεάνια, υδροθερμική, αεροθερμική καθώς και η ενεργεία που προέρχεται από την χρήση της βιομάζας. Οι συγκεκριμένες μορφές ενέργειας αξιοποιούν μη ορυκτές πηγές και για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση όπως γίνεται με τα ορυκτά καύσιμα τα οποία απαιτούν εξόρυξη ή άντληση και καύση για να μπορούν να αξιοποιηθούν. Τα συστήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εκμεταλλεύονται την ήδη υπάρχουσα ροή της φύσης λόγω φυσικών φαινομένων με αποτέλεσμα την

παροχή ισχύος για ήταν τροφοδοσία του δικτύου ή και μεμονωμένα φόρτους του δικτύου. Γενικότερα οι ΑΠΕ αποδίδουν ως ωφέλιμη ενέργεια είτε ηλεκτρικό ρεύμα είτε θερμότητα και σε μερικές περιπτώσεις όπως η γεωθερμία και τα δυο. Επίσης οι μορφές ενέργειας αυτές δεν αποδεσμεύουν απόβλητα επιβλαβή για το περιβάλλον όπως συμβαίνει με τις υπόλοιπες πηγές ενέργειας και για αυτό τον λόγο χαρακτηρίζονται ως «πράσινη ενέργεια».

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει συμβάλλει σημαντικά στην όλο και αυξανόμενη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδίως η σχεδίαση εξελιγμένων μετατροπέων ισχύος οι οποίοι καθιστούν πιο αξιόπιστη και αποδοτική την εκμετάλλευση των συγκεκριμένων πηγών ενέργειας. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στην υιοθέτηση νέων πολιτικών για την αξιοποίηση των ΑΠΕ τόσο από ευρωπαϊκά κράτη όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Πλέον αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των σύγχρονων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι το οποίο αφορά άμεσα και τα μικροδίκτυα. Συγκεκριμένα η χρήση συστημάτων που εκμεταλλεύονται οι ήπιες μορφές ενέργειας αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επίτευξη της ενεργειακής αυτονομίας των μικροδικτυων. Όμως από την χρήση των ΑΠΕ προκύπτουν αρκετές προκλήσεις σχετικά με την αξιοπιστία, την απόδοσή τους καθώς και την σταθερότητα ως προς την παροχή ισχύος. Σχετικά με την εκμετάλλευση των ΑΠΕ είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της γεωγραφικής τοποθεσίας στην οποία είναι εγκατεστημένα τα δίκτυα, καθώς και τα φυσικά φαινόμενα και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Σε μεγαλύτερο βαθμό αξιοποιείται η ηλιακή ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκών μονάδων καθώς και η αιολική ενέργεια μέσω ανεμογεννητριών, λόγω του ότι ο ήλιος και ο άνεμος είναι αξιοποιήσιμοι σε πολύ περισσότερες περιοχές και αποτελούν πιο μικρής κλίμακας έργα και το κόστος εγκατάστασης τους είναι συγκριτικά μικρότερο. Όμως λόγω του ότι οι ΑΠΕ έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης (της τάξεως του 30% ή και χαμηλότερο) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κύριες πηγές ενέργειας και προς το παρόν αποτελούν συμπληρωματικές πηγές. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι για να αποκομισθεί ένα ικανοποιητικό ποσό ισχύος από αυτές θα πρέπει να αξιοποιηθεί αρκετά μεγάλη επιφάνεια γης και επίσης αυτό έχει ως επακόλουθο το αρχικό κόστος της εγκατάστασης να είναι αρκετά υψηλό.

## 1.6 Βασικά είδη πρωτοκόλλων επικοινωνίας στα μικροδικτύων

Στα μικροδίκτυα όλα τα κύρια στοιχεία τα οποία τα αποτελούν είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους τόσο με ενσύρματα όσο και με ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Η διασύνδεση αυτή είναι υψηλής σημασίας για τα μικροδίκτυα καθώς εκτός της ανταλλαγής ενεργείας στα δίκτυα πραγματοποιείται και ανταλλαγή δεδομένων σχετικών με την κατάσταση και τη λειτουργία τους. Το γεγονός αυτό είναι αποτέλεσμα της εισαγωγής της ψηφιακής τεχνολογίας η οποία οδηγεί στην ανάπτυξη ενός Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) επιτρέποντας την αδιάλειπτη επικοινωνία και σύζευξη μεταξύ των συστημάτων του μικροδικτύου. Τα δεδομένα που μεταδίδονται ασύρματα μπορεί να περιλαμβάνουν πληροφορίες για την κατάσταση του μικροδικτύου, όπως πληροφορίες αισθητήρων, κατάσταση συσκευών, δεδομένα ελέγχου και άλλα στοιχεία που αφορούν τη λειτουργία και την απόδοση του μικροδικτύου. Η ασύρματη μετάδοση των πληροφοριών στα μικροδίκτυα επιτρέπει την ανάπτυξη και εφαρμογή του αυτοματισμού, τον καλύτερο έλεγχο και τη διαχείριση των μικροδικτύων με ευελιξία και αξιοπιστία. Ορισμένα από τα κύρια είδη πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

- **IEC 61850:** Το πρωτόκολλο επικοινωνίας IEC 61850 αποτελεί ένα απαραίτητο εργαλείο στα μικροδίκτυα, επιτρέποντας τον αποτελεσματικό έλεγχο και διαχείριση των ηλεκτρικών συστημάτων. Αυτό το πρωτόκολλο δίνει τη δυνατότητα ανταλλαγής πραγματικού χρόνου δεδομένων μεταξύ των διάφορων συσκευών ενός μικροδικτύου, παρέχοντας ένα ασφαλές και αξιόπιστο περιβάλλον για την αμοιβαία επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων ελέγχου και διαχείρισης. Αυτό το επιτυγχάνει μειώνοντας τον χρόνο απόκρισης, ενισχύοντας την αξιοπιστία και βελτιστοποιώντας την απόδοση του συστήματος, κάνοντας τη διαχείριση των ενεργειακών δικτύων σε μικρή κλίμακα πιο αποτελεσματική.
- **DNP3:** Το πρωτόκολλο επικοινωνίας DNP3 (Distributed Network Protocol 3) αποτελεί ένα αναπόσπαστο εργαλείο στα μικροδίκτυα, επιτρέποντας την αξιόπιστη και αποτελεσματική διαχείριση των δικτύων ενέργειας. Το DNP3 παρέχει ένα εύρος δυνατοτήτων επικοινωνίας πραγματικού χρόνου για τη μεταφορά δεδομένων ανάμεσα στις συσκευές ελέγχου, όπως αισθητήρες και

μετρητές, και το κεντρικό σύστημα διαχείρισης. Αυτό επιτρέπει τη συγκέντρωση, ανάλυση και έλεγχο των δεδομένων ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την αξιοπιστία και απόδοση του συστήματος. Με την υποστήριξη αξιόπιστης μεταφοράς δεδομένων και προηγμένων λειτουργιών ασφαλείας, το DNP3 αποτελεί ιδανική επιλογή για την αυτοματοποίηση και αποτελεσματική διαχείριση των μικροδικτύων.

- **Modbus:** Το Modbus είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο επικοινωνίας στα μικροδίκτυα, το οποίο επιτρέπει την αποτελεσματική ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των διαφόρων συσκευών. Αυτό το πρωτόκολλο παρέχει έναν απλό και ευέλικτο τρόπο για την μεταφορά πληροφοριών όπως μετρήσεις, καταστάσεις και εντολές, επιτρέποντας τον έλεγχο και την παρακολούθηση του μικροδικτύου. Η απλότητα και η ευελιξία του Modbus το καθιστούν ιδανικό για την αποτελεσματική λειτουργία των μικροδικτύων, βοηθώντας στην επίτευξη αυτοματισμού και αποτελεσματικής διαχείρισης των συστημάτων.
- **TCP/IP:** Το πρωτόκολλο επικοινωνίας TCP/IP αποτελεί ζωτικό εργαλείο για την απρόσκοπτη λειτουργία των μικροδικτύων, παρέχοντας ένα κοινό πλαίσιο για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των συσκευών. Μέσω του TCP (Transmission Control Protocol), διασφαλίζεται η αξιόπιστη και ασφαλής παράδοση των πακέτων δεδομένων, ενώ το IP (Internet Protocol) χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση των πακέτων μεταξύ των συσκευών στο δίκτυο. Το TCP/IP διευκολύνει την αμφίδρομη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την αξιόπιστη διαχείριση και έλεγχο των μικροδικτύων. Με τη συμβολή του TCP/IP, επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των συστημάτων, διευκολύνοντας την αποτελεσματική λειτουργία και διαχείριση των μικροδικτύων.

## Κεφάλαιο 2

### Έλεγχος

#### 2.1 Έλεγχος των μικροδικτύων

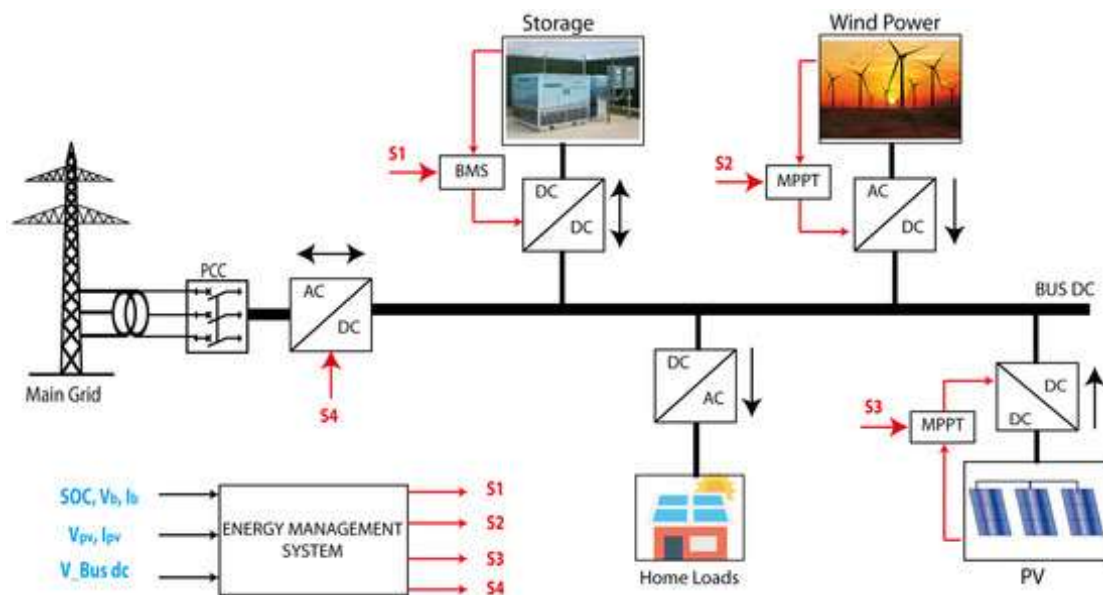
Στα μικροδίκτυα είναι αναγκαία η επιβολή εκτεταμένου ελέγχου για την διασφάλιση της ομαλούς και αποδοτικής λειτουργίας τους χωρίς να παραβιάζονται οι προδιαγραφές όπως και οι απαιτήσεις που έχουν τεθεί από τον ρυθμιστή του συστήματος. Συγκεκριμένα η εφαρμογή ενός τέτοιου ελέγχου στοχεύει στην επίτευξη της ασφαλούς και βέλτιστης λειτουργίας των συστημάτων, μείωση των εκπομπών ρύπων και γενικότερα των παραγόντων που χαρακτηρίζονται ως επιζήμιοι για το περιβάλλον και στην ομαλή μετάβαση από την συνδεδεμένη λειτουργία στην αποσυνδεδεμένη. Ο έλεγχος αυτός επιτυγχάνεται με την ύπαρξη δύο ειδών ελεγκτών: του κεντρικού ελεγκτή (Central Controller (CC)) και των εξειδικευμένων ελεγκτών που αφορούν τους μικροπαραγωγούς και τις συσκευές αποθήκευσης της ενέργειας (Microsource Controller (MC)).

#### 2.2 Οι αρμοδιότητες και οι λειτουργίες του CC (Central Controller-Κεντρικός Ελεγκτής)

Ο κεντρικός ελεγκτής (CC) είναι υπεύθυνος για την εξασφάλιση των ποιοτήτων ισχύος του μικροδικτύου μέσω ελέγχων που ασκεί σε συγκεκριμένα σημεία αναφοράς των ελεγκτών ισχύος-συχνότητας (P-f Control) και της άεργου ισχύος-τάσης (Q-V Control). Ακόμα μεριμνά και για τον συντονισμό της προστασίας των συστημάτων. Επιπροσθέτως στις αρμοδιότητες του περιλαμβάνονται ο προγραμματισμός οικονομικής λειτουργίας των μικροπαραγωγών όπως και η διατήρηση της εισαγόμενης ισχύος από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με προδιαγεγραμμένα κόστη. Επίσης ο CC έχει υπό τον έλεγχο του την διατήρηση της ονομαστικής συχνότητας και τάσης του μικροδικτύου. Σε γενικές γραμμές η λειτουργία του εκλεκτή είναι αυτόματη αλλά σε ειδικές περιστάσεις ο έλεγχος μπορεί να αναληφθεί από χειριστή εάν αυτό απαιτηθεί.

## 2.3 Εφαρμογή Διαχείρισης Ενέργειας (EMM-Energy Management Module)

Η Εφαρμογή Διαχείρισης της Ενέργειας (EMM) έχει ως αρμοδιότητα την διαχείριση την ηλεκτρικής ενέργειας στο μικροδίκτυο εξασφαλίζοντας την μέγιστη απόδοση και οικονομία. Ο έλεγχος που διεξάγεται αφορά συγκεκριμένα μέρη του μικροδικτύου τα οποία αποτελούν σημεία αναφοράς και ανατροφοδοτούν συνεχώς τον CC με δεδομένα για την κατάσταση του. Οι μορφές ελέγχου αυξάνονται ανάλογα με την πολυπλοκότητα και τις ανάγκες του μικροδικτύου. Σε περιπτώσεις αρκετά σύνθετων δικτύων ο σχεδιασμός γίνεται πιο απαιτητικός.



Σχήμα 2.1: Βασική εφαρμογή ελέγχου για τη διαχείριση της ενέργειας των μικροδικτύων (EMM).



### **2.3.1 Έλεγχος τάσης**

Ένα από τα χαρακτηριστικά της EMM είναι ο έλεγχος του συντελεστή ισχύος και της τάσης των μικροπαραγωγών. Στις περιπτώσεις που η τάση λαμβάνει τιμές εκτός των επιθυμητών ορίων, η επαναφορά της επιτυγχάνεται με μεταβολή του μέτρου και της γωνίας φάσης της. Οι έλεγχοι για τον εντοπισμό τέτοιου είδους ανωμαλιών στο δίκτυο διενεργούνται τοπικά από τους MCs οι οποίοι επενεργούν βάσει των υποδείξεων της EMM για την ρύθμιση της τάσης σε συγκεκριμένα σημεία αναφοράς που τίθενται από εκείνη.

### **2.3.2 Έλεγχος στροφών κινητήριας μηχανής**

Σε πε.ριπτώσεις ύπαρξης μηχανημάτων με κινούμενα μέρη για την παραγωγή ενέργειας από τους μικροπαραγωγούς ασκείται έλεγχος στην ταχύτητα περιστροφής των μηχανών, οι οποίες μπορεί να είναι είτε μικροστρόβιλοι είτε ανεμογεννήτριες. Συγκεκριμένα η ταχύτητα περιστροφής τους εξαρτάται από τον ρυθμό εισαγωγής του καυσίμου εφόσον η ταχύτητα είναι σταθερή και από αυτήν θα εξαρτηθεί το μέγεθος του παραγόμενου ηλεκτρικού φορτίου. Η τιμή του φορτίου θα πρέπει να είναι ανάλογη της ονομαστικής ισχύος του μικροδικτύου για την επαναφορά των επιθυμητών συνθηκών. Όμως η μεταβολή στην ταχύτητα εισαγωγής του καυσίμου έχει άμεσο αντίκτυπο στην απόδοση της μηχανής και για τον λόγο αυτό κάθε ενέργεια θα πρέπει να είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές για την καλύτερη και οικονομικότερη δυνατή λειτουργία.

### **2.3.3 Ρύθμιση της συχνότητας**

Στα κλασσικά συστήματα ηλεκτρικής ισχύος η ρύθμιση της συχνότητας της τάσης που παράγεται βασίζεται στην ταχύτητα περιστροφής των σύγχρονων γεννητριών. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα τα μικροδίκτυα έχουν την δυνατότητα παραγωγής ισχύος σε οποιαδήποτε επιθυμητή συχνότητα χάρις στην χρήση μετατροπέων που διαθέτουν οι μικροπαραγωγοί και ελέγχονται από τους MCs τους. Για την ρύθμιση της συχνότητας θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν η κατάσταση στην οποία βρίσκεται το μικροδίκτυο, δηλαδή εάν είναι σε διασυνδεδεμένη λειτουργία ή σε αυτόνομη. Στην διασυνδεδεμένη λειτουργία δεν ασκείται P-f έλεγχος από τον MC

της κάθε μικροπαραγωγής διότι οποιαδήποτε τυχόν μεταβολή στην συχνότητα αποκαθίσταται από το κεντρικό δίκτυο. Κατά την αυτόνομη λειτουργία οι MC ενεργούν για την διατήρηση της συχνότητας σε επιθυμητές τιμές όταν παρατηρείται μεταβολή του φορτίου. Η λειτουργία της EMM στην αποσυνδεδεμένη κατάσταση του μικροδικτύου εστιάζει στην διαρκή παρακολούθηση της συχνότητάς του και εάν εντοπίσει πτώση η οποία δεν αποκατασταθεί εντός των χρονικών ορίων που έχουν οριστεί από τους σχεδιαστές, τότε αποσυνδέει φορτία για την εξομάλυνση της ισχύος και τη διατήρηση της ευστάθειας.

### **2.3.4 Έλεγχος του συντελεστή ισχύος**

Ο συντελεστής ισχύος παίζει καθοριστικό ρόλο στην λειτουργία των μικροπαραγωγών, όμως στις περισσότερες περιπτώσεις εκείνοι δεν διαθέτουν ενσωματωμένο έλεγχο του συντελεστή αυτού. Για αυτόν τον λόγο οι MCs διαθέτουν σύστημα ελέγχου του συντελεστή ισχύος με σκοπό τη ρύθμιση των εισερχομένων φορτίων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι επιτυγχάνεται έλεγχος του συντελεστή ισχύος από τους ίδιους τους μικροπαραγωγούς με την προσαρμογή διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος που επεμβαίνουν στην φασική γωνία του ρεύματος για την εξομάλυνση διακυμάνσεων. Στις περιπτώσεις αυτές ο MC εκτελεί αυτόνομα τον έλεγχο του συντελεστή ισχύος του μικροπαραγωγού και το μόνο που λαμβάνει από την EMM είναι η τάση αναφοράς

## **2.4 Μονάδα Συντονισμού Προστασίας (PCM-Protection Coordination Module)**

Η μονάδα συντονισμού προστασίας (PCM) παρακολουθεί την συνολική προστασία του μικροδικτύου με βασικό χαρακτηριστικό να μπορεί να διακρίνει τις απαιτήσεις μεταξύ των δυο τρόπων λειτουργίας και να αντιμετωπίζει ορθώς τις έκτακτες ανάγκες. Τα μικροδίκτυα περιλαμβάνονται από παραγωγές και φορτία έτσι η προστασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι σε ένα ακτινικό σύστημα η ροή

ισχύος χωρίζεται σε δύο κατευθύνσεις για τις συσκευές προστασίας. Το μικροδίκτυο κατά την αποσυνδεδεμένη λειτουργία του μετατρέπεται σε ενεργό από παθητικό δίκτυο που λαμβάνει και διανέμει ρεύμα από τους μικροπαραγωγούς με σκοπό την ηλεκτροδότηση των κρίσιμων φόρτων. Επίσης κατά την μετάβαση στην αυτόνομη λειτουργία αλλάζει σημαντικά η αντοχή του μικροδικτύου σε βραχυκύκλωμα. Το γεγονός αυτό επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τους συμβατικούς ηλεκτρονόμους υπερέντασης οι οποίοι λειτουργούν σύμφωνα με τις τιμές του ρεύματος βραχυκυκλώματος.

### **2.4.1 Προστασία κατά την διασυνδεδεμένη λειτουργία**

Οι πιθανές καταστάσεις οι οποίες μπορεί να εντοπίσει και να δράσει η PCM κατά την διασυνδεδεμένη λειτουργία είναι πέντε:

- **Κανονική κατάσταση**

Κατά την κανονική κατάσταση λειτουργίας το μικροδίκτυο βασίζει την ηλεκτροδότηση του στο βασικό δίκτυο με τον κύριο διακόπτη που τα συνδέει να είναι κλειστός. Τον έλεγχο του συγκεκριμένου διακόπτη αναλαμβάνει η PCC. Στον ζυγό του μικροδικτύου βρίσκονται συνδεδεμένοι οι τροφοδότες οι οποίοι το ηλεκτροδοτούν όπως και οι φόρτοι που τροφοδοτούνται με την σειρά τους από τους μικροπαραγωγούς και το κύριο δίκτυο. Τόσο οι τροφοδότες όσο και οι φόρτοι συνδέονται και αποσυνδέονται μέσω διακοπών που στην κατάσταση της κανονικής λειτουργίας είναι κλειστοί για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και επίσης μέσω αυτών ελέγχεται η ροή της.

- **Βραχυκύκλωμα σε τροφοδότη του μικροδικτύου**

Κατά την συνδεδεμένη λειτουργία του μικροδικτύου που είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο το όλο σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ένα παθητικό ακτινικό σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν προκληθεί βραχυκύκλωμα, το ρεύμα βραχυκυκλώματος κατευθύνεται από την πηγή προς το σημείο που έχει προκληθεί η βλάβη. Για να επιτευχθεί ο εντοπισμός βραχυκυκλώματος στο μικροδίκτυο αξιοποιούνται δεδομένα που αφορούν το μέτρο του ρεύματος βραχυκυκλώματος

χωρίς να εξετάζεται η κατεύθυνση του. Για την απομόνωση και την αντιμετώπιση της βλάβης απαιτείται το άνοιγμα του διακόπτη στο σημείο που έχει προσβληθεί. Σε περίπτωση σφάλματος που θα οδηγήσει σε βραχυκύκλωμα το ρεύμα βραχυκυκλώματος θα τροφοδοτείται τόσο από το ρεύμα του δικτύου όσο και από το ρεύμα των μικροπαραγωγών. Για αυτό τον λόγο μια βλάβη είναι ικανή να προκαλέσει αποσύνδεση των μικροπαραγωγών του μικροδικτύου εάν δεν αποκατασταθεί άμεσα. Το φαινόμενο αυτό με την σειρά του μπορεί να οδηγήσει σε γενική διακοπή της ηλεκτροδότησης. Επομένως για την πρόληψη του συγκεκριμένου προβλήματος οι τροφοδότες είναι διαχωρισμένοι σε ζώνες που περιλαμβάνουν διακόπτες όπου με το άνοιγμα τους θα γίνει τμηματική απομόνωση. Αναφορικά όσον αφορά στο είδος των συγκεκριμένων διακοπών, οι συγκεκριμένοι είναι ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης – υπερέντασης που μπορούν να ανιχνεύσουν την περιοχή όπου έχει προκληθεί βλάβη. Οι ηλεκτρονόμοι ρυθμίζονται από την PCM για τον έλεγχο των ζωνών του μικροδικτύου, κάτι το οποίο ευνοεί την αδιάκοπη ροή του ρεύματος.

- **Βραχυκύκλωμα στο κυρίως δίκτυο**

Στην περίπτωση που υπάρχει βραχυκύκλωμα στο κεντρικό δίκτυο, η PCM εκδίδει εντολή για αποσύνδεση του μικροδικτύου από αυτό, χρησιμοποιώντας τον κύριο διακόπτη που τα συνδέει. Η PCM προγραμματίζεται με τις επιθυμητές ρυθμίσεις για τα επίπεδα των μεγεθών που σχετίζονται με το ηλεκτρικό ρεύμα και το χρονικό διάστημα που πρέπει να ενεργήσει. Επιπλέον, η προστασία του μικροδικτύου αναλαμβάνει να διαχειριστεί τη διαδικασία απομόνωσης σε περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων, προσπαθώντας να αποφύγει την αποσύνδεση κρίσιμων φορτίων. Με άλλα λόγια, η διαδικασία εξασφαλίζει τον ασφαλή τρόπο αποσύνδεσης των μικροπαραγωγών πριν από την αποσύνδεσή τους από το κεντρικό δίκτυο. Αυτό αποτρέπει τη διακοπή της παραγωγής και τη φθορά των ηλεκτρονόμων που θα προκύψει αν οι μικροπαραγωγοί παραμείνουν συνδεδεμένοι με το δίκτυο ανεξέλεγκτα.

- **Βραχυκύκλωμα στο ζυγό του του μικροδικτύου**

Όταν συμβεί ένα λάθος στο ζυγό του μικροδικτύου, οι συνδέσεις μεταξύ του μικροδικτύου και του κεντρικού δικτύου διακόπτονται. Ταυτόχρονα, οι γραμμές παροχής ενέργειας που συνδέουν τους μικροπαραγωγούς απομονώνονται. Η PCM είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο του ηλεκτρονόμου στο σημείο σύνδεσης με το κύριο

δίκτυο. Ο ηλεκτρονόμος λαμβάνει ρυθμίσεις σχετικά με τις συσκευές προστασίας των μικροπαραγωγών, ώστε να αποτραπούν τυχόν εσφαλμένες αποσυνδέσεις και διακοπές της παροχής ενέργειας. Επιπλέον, βελτιστοποιείται η παραγωγή ενέργειας.

- **Επανασυγχρονισμός**

Ο συγχρονισμός του μικροδικτύου εκτελείται από την PCM δεδομένου ότι έχει εκτελεστεί προηγουμένως ενέργεια επανασύνδεσης με το κυρίως δίκτυο. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να επανασυνδεθούν όλα τα φορτία που είχαν αποσυνδεθεί και η διαδικασία αυτή ενδέχεται να διαρκέσει από μερικά δευτερόλεπτα έως κάποια λεπτά, ανάλογα με την φύση του τροφοδότη και των φορτίων. Για το συγχρονισμό των μικροπαραγωγών η PCM αξιοποιεί δεδομένα σχετικά με το μέτρο και την φασική γωνία της κάθε φάσης όπως και την ακολουθία των φάσεων και την συχνότητα τους. Θα πρέπει να έχουν δοθεί στην PCM τιμές αναφοράς καθώς και δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τα φυσικά μεγέθη που αναφέρθηκαν με σκοπό να προβεί στις κατάλληλες ενέργειες για την επίτευξη του επανασυγχρονισμού. Τέλος η εκτέλεση του επανασυγχρονισμού μπορεί να γίνει είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση.

## **2.4.2 Προστασία κατά την αυτόνομη λειτουργία**

Στην αυτόνομη λειτουργία ένα μικροδίκτυο έχει πολύ πιο χαμηλή ανοχή σε βραχυκύκλωμα του ζυγού του συγκριτικά με την διασυνδεδεμένη λειτουργία. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι μικροπαραγωγές διαθέτουν ηλεκτρονικούς μετατροπείς οι οποίοι παρέχουν ρεύματα βραχυκύκλωσης των οποίων η τιμή δεν ξεπερνά το διπλάσιο του ρεύματος φορτίου. Λόγω του ότι τα συγκεκριμένα ρεύματα είναι χαμηλά ενδέχεται να μην είναι ανιχνεύσιμα από τους συμβατικούς ηλεκτρονόμους υπερέντασης. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι τρόποι προστασίας: σχήματα προστασίας που ανιχνεύουν τα ρεύματα γης με κατεύθυνσης-υπερέντασης ηλεκτρονόμους ή εναλλακτικά προστασία απόστασης και διαφορικούς ηλεκτρονόμους ρεύματος-τάσης.

## **Οι δυο καταστάσεις που αφορούν την PCM κατά την αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου.**

Η PCM βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία για την προστασία του μικροδικτύου και καλείται να αντιμετωπίσει δυο περιπτώσεις που σχετίζονται με την αυτόνομη λειτουργία του. Η πρώτη περίπτωση είναι η κατάσταση της κανονικής λειτουργίας όπου ο ζυγός του μικροδικτύου είναι αποκομμένος από το κεντρικό δίκτυο τροφοδοσίας καθώς ο βασικός διακόπτης που τα συνδέει είναι ανοιχτός. Οι διακόπτες των μικροπαραγωγών είναι κλειστοί προκειμένου να τροφοδοτείται το μικροδίκτυο από αυτούς. Η δεύτερη περίπτωση είναι η κατάσταση όπου εντοπίζεται βραχυκύκλωμα σε τροφοδότη. Με σκοπό τον περιορισμό των ρευμάτων βραχυκυκλώματος που πρόκειται να εισέλθουν στο μικροδίκτυο χρησιμοποιούνται εξειδικευμένοι ηλεκτρονόμοι που χαρακτηρίζονται από υψηλή ευαισθησία για την ανίχνευση χαμηλών ρευμάτων που προέρχονται από τους μικροπαραγωγούς.

## **2.5 Μέθοδοι βελτιστοποίησης της ροής ισχύος**

Κατά το σχεδιασμό των αλγορίθμων των μεθόδων ελέγχου της ροής της ισχύος των μικροδικτύων χρησιμοποιούνται μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης. Βάσει των μεθόδων αυτών επιλέγεται η καλύτερη δυνατή λύση δεδομένου ότι έχουν ληφθεί υπόψιν όλες οι παράμετροι της κάθε περίπτωσης και σχεδιάζεται ένας αλγόριθμος που θα εκτελείται από τον κεντρικό έλεγχο του μικροδικτύου με στόχο την πιο οικονομική και αποδοτική ροή της ισχύος.

Οι μέθοδοι κατηγοριοποιούνται στις κλασσικές-παραδοσιακές μεθόδους, οι οποίες αποκαλούνται ντετερμινιστικές και στις μεθόδους που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη:

Οι κλασσικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τις ακόλουθες:

- Γραμμικός Προγραμματισμός
- Μέθοδοι κλίσης

- Τετραγωνικός προγραμματισμός
- Newton-Raphson
- Μη γραμμικός προγραμματισμός
- Εσωτερικό σημείο

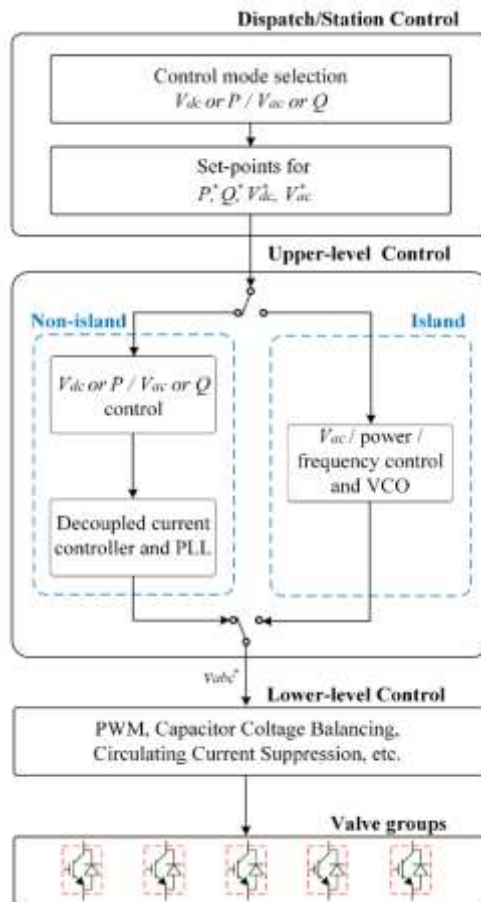
Οι μέθοδοι που είναι βασισμένες σε τεχνητή νοημοσύνη είναι οι ακόλουθες:

- Γενετικός αλγόριθμος
- Σμήνος σωματιδίων
- Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο
- Βελτιστοποίηση αποικίας μελισσών
- Διαφορική εξέλιξη
- Βελτιστοποιητής γκρίζου λύκου
- Shuffled frog leaping

## 2.6 Δομές ελέγχου (Control Structures)

Τα MMC-VSC παρουσιάζουν μια ιεραρχική-βασική δομή. Μια τέτοια δομή μπορεί να προσφέρει ευελιξία στις προσεγγίσεις των προσομοιώσεων, τον τύπο της μελέτης και ως εκ τούτου, στις πραγματικές εφαρμογές που βασίζονται στα MMC. Η συνολική δομή ελέγχου ενός VSC μπορεί να χωριστεί σε τρία διακριτά επίπεδα:

- Αποστολή/έλεγχος του σταθμού
- Έλεγχος ανώτερου επιπέδου
- Έλεγχος κατώτερου επιπέδου



Σχήμα 2.2: Ιεραρχία μεθόδων ελέγχου του μετατροπέα πηγής τάσης (VSC-Voltage Source Converter).

## Αποστολή/έλεγχος σταθμού-Dispatch/station control

Ο έλεγχος αποστολής/σταθμού είναι υπεύθυνος για τις παραμέτρους λειτουργίας (όπως τάση Vdc, τάση Vac, κλπ.) και τις λειτουργικές μεθόδους που απαιτούνται για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των συστημάτων DC και AC.

Συνολικά, ο έλεγχος αναφέρεται στα σύνολα και τις δομές ελέγχου που χρησιμοποιούνται από έναν μετατροπέα (όπως έλεγχος τάσης συνεχούς ρεύματος, έλεγχος ισχύος ή συχνότητας και έλεγχος τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος έναντι ανενεργού ισχύος ή έλεγχος συντελεστή ισχύος). Οι εντολές διανομής πρέπει να ελέγχονται από έναν διαχειριστή του συστήματος, παρόμοια με τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος.

## Έλεγχος ανώτερου επιπέδου- Upper-level control

Ο έλεγχος ανώτερου επιπέδου αποδέχεται σήματα αναφοράς ( $V^*_{dc}$ ,  $V^*_{ac}$ ,  $P^*$ ,  $Q^*$ ) από την αποστολή και τον έλεγχο του σταθμού και παράγει ένα σήμα αναφοράς



τάσης  $v_{abc}$ . Ο κύριος παράγοντας επιρροής είναι η επιλογή μεταξύ της "μη νησιωτικής" και "νησιωτικής" λειτουργίας. Στη μη νησιωτική λειτουργία, οι VSC συνδέονται σε ένα ισχυρό σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος με ενεργό σύγχρονη παραγωγή. Ο βρόχος κλειδώματος φάσης (PLL) χρησιμοποιείται για την παραγωγή της γωνιακής αναφοράς  $\theta$  από την τάση  $V_{abc}$  στο σημείο κοινής σύζευξης (PCC). Τα ρεύματα αναφοράς  $i^*_d$  και  $i^*_q$  παράγονται από τους βρόχους ενεργού και άεργου ισχύος, που βρίσκονται στους άξονες  $d$  και  $q$  αντίστοιχα. Η ενεργός ισχύς (που ορίζεται στον άξονα  $d$ ) ρυθμίζεται με τον έλεγχο της τάσης συνεχούς ρεύματος ή τον άμεσο έλεγχο της ενεργού ισχύος. Αντίστοιχα, η άεργος ισχύς (που ορίζεται στον άξονα  $q$ ) ρυθμίζεται από την τάση εναλλασσόμενου ρεύματος ή τον άμεσο έλεγχο της άεργου ισχύος στο PCC. Τα σήματα αναφοράς  $i^*_d$  και  $i^*_q$  επεξεργάζονται στον αποσυνδεδεμένο ελεγκτή ρεύματος. Σε αυτό το στάδιο, παράγονται τα σήματα αναφοράς τάσης  $v^*_d$  και  $v^*_q$  τα οποία, με τη βοήθεια του PLL, μετατρέπονται στο πλαίσιο  $abc$  και στη συνέχεια αποστέλλονται στον έλεγχο χαμηλότερου επιπέδου. Για λόγους σταθερής και ασφαλούς λειτουργίας των δικτύων της πλευράς DC και της πλευράς AC, μπορούν να προστεθούν εξωτερικοί βρόχοι ελέγχου στον έλεγχο ανώτερου επιπέδου. Αυτοί οι βρόχοι ελέγχου επιτρέπουν την προηγμένη κατανομή της ενεργού και άεργου ισχύος μεταξύ των VSC που συνδέονται στο ίδιο σύστημα, αλλά και μεταξύ των VSC και των δικτύων εναλλασσόμενου ρεύματος, συμπεριλαμβανομένων των αιολικών πάρκων. Αυτοί οι εξωτερικοί βρόχοι ελέγχου συμβάλλουν στη διατήρηση ενός ασφαλούς εύρους για την τάση AC/DC και τη συχνότητα, καθώς και ενισχύουν την ευστάθεια του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική AC και DC.

Οι τυπικοί ελεγκτές droop μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες:

- DC voltage droop χρησιμοποιείται όταν πολλαπλοί μετατροπείς λειτουργούν σε λειτουργία ελέγχου της τάσης συνεχούς ρεύματος.
- AC voltage droop χρησιμοποιείται όταν πολλαπλοί μετατροπείς λειτουργούν σε λειτουργία της τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος, σε συνδυασμό με άλλες συσκευές ρύθμισης της τάσης στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως τα STATCOMS, SVC, κλπ.
- Η ρύθμιση συχνότητας χρησιμοποιείται όταν ένας μετατροπέας λειτουργεί για την άμεση ρύθμιση της ενεργού ισχύος και απαιτείται (συνήθως από τον έλεγχο και τον διαχειριστή του συστήματος) να έχει πρωταρχικές λειτουργίες για τη διατήρηση της ευστάθειας της πλευράς του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η λειτουργία του νησιού ελέγχου χρησιμοποιείται όταν τα VSC (Voltage Source Converters) συνδέονται σε ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος με ασύγχρονη παραγωγή, όπως αιολικά πάρκα, ασθενή δίκτυα ή παθητικά φορτία. Η νησιδοποιημένη λειτουργία ελέγχου πραγματοποιείται με τη χρήση των τάσεων στον άξονα  $d$ . Επειδή δεν υπάρχει ισχυρή σύγχρονη παραγωγή στην πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος, δεν απαιτείται συγχρονισμός του δικτύου, και ως εκ τούτου δεν απαιτείται αποσυνδεδεμένος έλεγχος ρεύματος. Συγκεκριμένα, η γωνία αναφοράς  $\theta$  παρέχεται απευθείας από έναν ταλαντωτή τάσης. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι δεν απαιτείται ο χρήσης ενός PLL (Phase-Locked Loop), καθώς η συχνότητα και η φάση της τάσης εναλλασσόμενου

ρεύματος ρυθμίζονται απευθείας από τον ίδιο τον ελεγκτή. Σε περιπτώσεις όπου η ονομαστική ισχύς του συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος είναι συγκρίσιμη με την ισχύ του VSC, μπορεί να παρουσιαστούν πρόσθετες πτώσεις συχνότητας. Οι πτώσεις τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος συνήθως απαιτούνται όταν συνδέονται περισσότερες από μία μονάδες ελέγχου τάσης στον ίδιο δίαυλο.

## Κεφάλαιο 3

### Grid Forming Inverters (GFI)

#### 3.1 Εισαγωγή στους Grid Forming Inverters

Οι grid forming inverters είναι μια σχετικά καινούρια τεχνολογία αντιστροφών που χρησιμοποιούνται για να ελέγχουν και να συγχρονίζουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο δίκτυο. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς αντιστροφείς που συνήθως χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα, οι grid forming inverters δεν εξαρτώνται από την παροχή ενέργειας από το δίκτυο, αλλά δημιουργούν ένα δικό τους σύστημα που συνδέει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε αυτό. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπει στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να αναλαμβάνουν τον έλεγχο του δικτύου και τη συγχρονισμό της παραγωγής τους. Συνεπώς έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η ευελιξία και η ανθεκτικότητα του δικτύου σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας και σε τυχόν ανωμαλίες. Αυτό είναι κρίσιμο για την επιτυχή μετάβαση σε ένα βιώσιμο και αποδοτικό σύστημα ενέργειας.



*Σχήμα 3.1: Απεικόνιση ενός Grid Forming Inverter.*

### **3.1.1 Τι είναι οι Grid Forming Inverters**

Οι grid forming inverters αποτελούν μια καινοτόμο τεχνολογία αντιστροφών που επιτρέπουν στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να συνδεθούν στο δίκτυο και να αναλάβουν τον έλεγχο της παραγωγής ενέργειας. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς αντιστροφείς λειτουργούν ανεξάρτητα από το δίκτυο και δημιουργούν ένα δικό τους σύστημα που επιτρέπει τη συγχρονισμένη παραγωγή και διανομή ενέργειας στο δίκτυο. Αυτό βελτιώνει την αξιοπιστία και την απόδοση του δικτύου, καθώς και την ευελιξία του σε περιπτώσεις ανωμαλιών. Επιπλέον, οι grid forming inverters συμβάλλουν στην επίτευξη μιας βιώσιμης μετάβασης σε ένα σύστημα ενέργειας με μεγαλύτερη ανανεώσιμη παραγωγή, βοηθώντας έτσι στη μείωση της ρύπανσης και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

### **3.1.2 Ποιες λειτουργίες των Grid Forming Inverters στα μικροδίκτυα**

Οι grid forming inverters παρουσιάζουν πολλαπλές λειτουργίες στα μικροδίκτυα, οι οποίες σχετίζονται με την αυτόνομη παραγωγή και διανομή ενέργειας, τη ρύθμιση της τάσης, της συχνότητας και της απόδοσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την προστασία του δικτύου από συνθήκες βραχυκυκλώματος και τη διαχείριση της φόρτισης του δικτύου. Η ικανότητα των grid forming inverters να παρέχουν αυτόνομη παραγωγή και διανομή ενέργειας αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, καθώς επιτρέπει τη λειτουργία του συστήματος χωρίς την απαίτηση συνεχούς σύνδεσης στο κύριο δίκτυο. Επιπλέον συνεισφέρουν στη βελτίωση της σταθερότητας του δικτύου και της απόδοσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ συμβάλλουν στην οικονομικότερη λειτουργία του δικτύου. Γενικότερα αντιπροσωπεύουν μια σημαντική τεχνολογική καινοτομία στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διαχείρισης του μικροδικτύου.

### 3.2 Πλεονεκτήματα-Προκλήσεις

Τα grid forming inverters αποτελούν ένα σύγχρονο εξοπλισμό που έχει εισαχθεί στα μικροδίκτυα, και παρέχουν πλεονεκτήματα όπως αξιοπιστία, σταθερότητα του δικτύου, ευελιξία, υποστήριξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μείωση κόστους και ευκολία συντήρησης. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του grid forming inverter είναι η δυνατότητα του να αντικαταστήσει παραδοσιακούς εξοπλισμούς όπως γεννήτριες και σταθεροποιητές τάσης, και να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές όπως οι ηλιακοί και αιολικοί σταθμοί. Η λειτουργία του grid forming inverter βασίζεται στη δημιουργία ενός επιθυμητού συντελεστή ισχύος και τάσης στο μικροδίκτυο, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η σταθερότητα του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι ο αντιστροφέας αυτός διαχειρίζεται τον επιθυμητό συντελεστή τάσης και διατηρεί σταθερή τη συχνότητα του ρεύματος. Επίσης, μπορεί να παρέχει ευέλικτη λειτουργία, προσαρμόζοντας την παραγωγή ισχύος σύμφωνα με τη ζήτηση του δικτύου και τη ζήτηση ενέργειας. Έτσι, μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα στις απαιτήσεις του δικτύου και να αντιμετωπίσει τις αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον προσφέρουν αξιόπιστη προστασία από διάφορες αστάθειες στο δίκτυο, όπως ασύμμετρα φορτία και διακυμάνσεις της τάσης, καθώς και προστασία από βραχυκυκλώματα. Τα grid forming inverters είναι επίσης ελαφριά και συμπαγή, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές σε μικροδίκτυα και σε απομακρυσμένες περιοχές.

Τέλος, τα grid forming inverters μπορούν να συμβάλουν στην επίτευξη των στόχων αειφορίας και μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub>, καθώς παρέχουν τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Με την αύξηση της χρήσης της πράσινης ενέργειας, η χρήση των grid forming inverters αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά στο μέλλον, καθιστώντας τα ένα απαραίτητο εξάρτημα για τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του μικροδικτύου.

## Προκλήσεις

Η χρήση grid forming inverters στα μικροδίκτυα έχει προκαλέσει ανάμεικτες αντιδράσεις στη βιομηχανία και την κοινότητα της ενέργειας. Παρά τα οφέλη τους στην ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την αυτόνομη λειτουργία των μικροδικτύων, η χρήση τους επιφέρει πολλαπλές προκλήσεις. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται οι δυσκολίες στην αντιμετώπιση των διαταραχών στο δίκτυο, η επίτευξη σταθερής λειτουργίας και η διαχείριση της παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον, η χρήση grid forming inverters μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του δικτύου, καθώς και να προκαλέσει ηλεκτρομαγνητικά πεδία που μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία των συσκευών σε κοντινή απόσταση. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, απαιτείται συνεργασία μεταξύ των κατασκευαστών, των παρόχων ενέργειας και των ρυθμιστικών αρχών, προκειμένου να δημιουργηθούν πρότυπα και προδιαγραφές για τη χρήση των grid forming inverters. Επιπλέον, απαιτείται η ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών και λογισμικών που θα βελτιώνουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας, καθώς και η αναβάθμιση του δικτύου για την αντιμετώπιση των νέων απαιτήσεων. Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις είναι η αστάθεια του δικτύου και η δυνατότητα του grid-forming inverter να αντιμετωπίσει αυτήν την αστάθεια. Στα μικροδίκτυα, η αστάθεια μπορεί να προκληθεί από τις αλλαγές στην κατανάλωση ενέργειας όπως και στην παραγωγή της από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τη σύνδεση και αποσύνδεση δικτύων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αστάθειες στο δίκτυο, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του inverter και του μικροδικτύου στο σύνολό του. Μια άλλη πρόκληση είναι η αλληλεπίδραση του grid-forming inverter με άλλες συσκευές του μικροδικτύου. Οι συσκευές αυτές μπορεί να είναι άλλοι grid-forming inverters, grid-following inverters, μπαταρίες ή φωτοβολταϊκά συστήματα. Τέλος, πρέπει να διεξαχθούν πειραματικές δοκιμές και επαληθεύσεις στο πεδίο, προκειμένου να επαληθευτεί η αποτελεσματικότητα και η αξιοπιστία των νέων τεχνολογιών και προτύπων, και να βελτιωθεί η κατανόηση των προκλήσεων και των περιορισμών που επιφέρει η χρήση των grid forming inverters στα μικροδίκτυα.

### **3.3 Που τοποθετούνται τα Grid Forming Inverters στα μικροδίκτυα**

Τα grid forming inverters τοποθετούνται συνήθως στον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου, που ελέγχει τη λειτουργία του συστήματος συνολικά. Αυτό επιτρέπει στον κεντρικό ελεγκτή να διαχειρίζεται την ενέργεια που παράγεται από διαφορετικές πηγές ενέργειας και να εξασφαλίσει τη σταθερότητα της τάσης και της συχνότητας του μικροδικτύου. Επίσης, μπορούν να τοποθετηθούν και σε κάθε μικρογεννήτρια, εξασφαλίζοντας έτσι την ασφαλή λειτουργία του συστήματος ακόμα και σε περίπτωση απομόνωσης του μικροδικτύου από το κεντρικό δίκτυο. Ωστόσο, η τοποθέτησή τους σε κάθε πηγή ενέργειας αυξάνει το κόστος του συστήματος. Επιπλέον, η αξιοπιστία τους εξαρτάται από τη συντήρησή τους και την αντικατάσταση των εξαρτημάτων τους κατά τη διάρκεια του χρόνου.

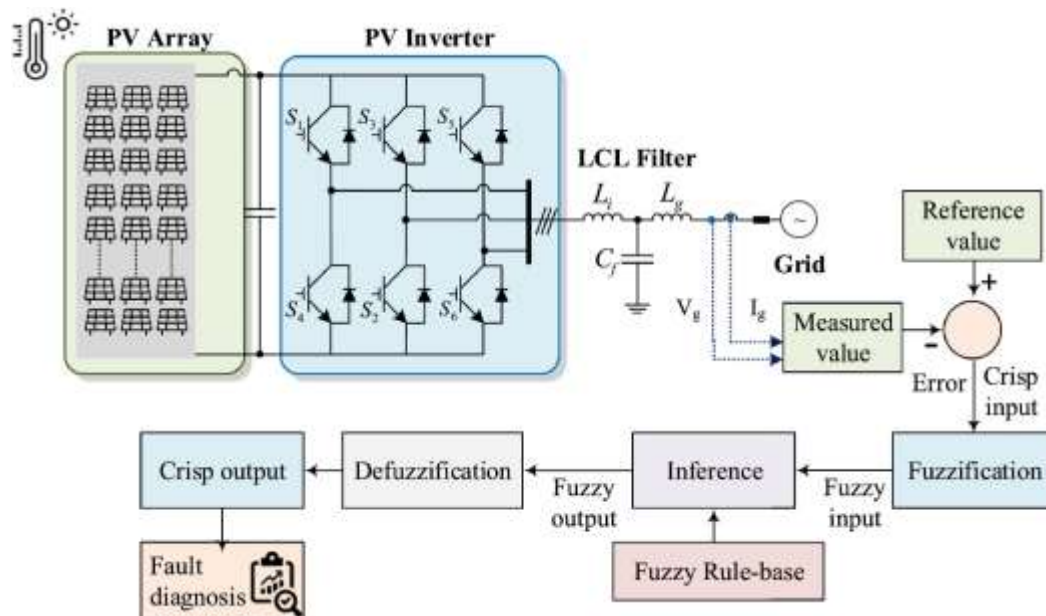
Τα grid-forming inverters τοποθετούνται συνήθως στο επίπεδο της πηγής του δικτύου (μετασχηματιστής ή διασύνδεση στον κεντρικό αγωγό) και λειτουργούν ως πηγές συντονισμού της συχνότητας. Η τοποθέτησή τους εξαρτάται από το μέγεθος του μικροδικτύου και τις απαιτήσεις του συστήματος. Σε μεγαλύτερα μικροδίκτυα, μπορεί να υπάρχουν πολλαπλά grid-forming inverters που τοποθετούνται σε διαφορετικά σημεία του δικτύου για να εξασφαλίσουν τον απαιτούμενο συντονισμό και την ασφάλεια του συστήματος.

Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθούν grid-forming inverters σε συνδυασμό με grid-following inverters για να επιτευχθεί ο συντονισμός της συχνότητας και τάσης του μικροδικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση, οι grid-forming inverters είναι υπεύθυνοι για τον συντονισμό της συχνότητας, ενώ οι grid-following inverters παρέχουν την απαιτούμενη απόδοση ισχύος στο μικροδίκτυο.

Τα grid-forming inverters συνήθως τοποθετούνται κοντά στο κέντρο του μικροδικτύου και συνήθως συνδέονται σε ένα σημείο εναρμόνισης (point of common coupling - PCC) με το κύριο δίκτυο ή με άλλα μικροδίκτυα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα grid-forming inverters μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντικαταστήσουν μια διακοπτόμενη πηγή ισχύος, όπως μία γεννήτρια ή έναν

ηλεκτρονικό εναλλάκτη. Η τοποθέτηση των grid-forming inverters σε ένα μικροδίκτυο μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη λειτουργία του. Για παράδειγμα, εάν τα inverters είναι τοποθετημένα μακριά από το PCC, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη απώλεια ισχύος και μειωμένη αξιοπιστία. Επιπλέον, η τοποθέτηση των grid-forming inverters πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις τις απαιτήσεις για προστασία από διαταραχές στο δίκτυο, όπως κεραυνούς και πτώση τάσης. Συνεπώς, η σωστή τοποθέτηση των grid-forming inverters στα μικροδίκτυα είναι ζωτικής σημασίας για την αξιοπιστία και την απόδοση του συστήματος.

**Αναπαράσταση διάταξης συνδεσμολογίας φωτοβολταϊκών πάνελ με inverter και το σύστημα ελέγχου του:**



*Σχήμα 3.2: Απεικόνιση διάταξης φωτοβολταϊκών πάνελ με Inverter και του συστήματος ελέγχου του.*

Στο σχεδιάγραμμα απεικονίζονται μία διάταξη φωτοβολταϊκών πάνελ των οποίων η έξοδος είναι συνδεδεμένη με ένα inverter που ο ρόλος του σχετίζεται με τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος που παράγουν τα πάνελ σε εναλλασσόμενο τριφασικό ρεύμα. Το ρεύμα που εξέρχεται από το inverter προτού σταλεί προς την τροφοδοσία του δικτύου, διέρχεται από ένα LCL φίλτρο. Επίσης αναπαρίσταται και το σύστημα ελέγχου του κυκλώματος για τυχόν σφάλματα που λαμβάνει δεδομένα σχετικά με την τάση και την ένταση του ρεύματος εξόδου της διάταξης του inverter και του φίλτρου και τα συγκρίνει με μία προκαθορισμένη τιμή αναφοράς για τον εντοπισμό αποκλίσεων. Σχετικά με το LCL φίλτρο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι



η ύπαρξή του είναι απαραίτητη για την ομαλή σύνδεση και τροφοδοσία του δικτύου από τα φωτοβολταϊκά πάνελ.

Συγκεκριμένα ένα LCL φίλτρο τοποθετείται στην έξοδο ενός inverter για να απομακρύνει τις υψηλές συχνότητες και να βελτιώσει την ποιότητα της τάσης και του ρεύματος που παράγεται από τον inverter. Οι inverter χρησιμοποιούνται συνήθως για να μετατρέψουν την καταλληλότερη μορφή ενέργειας σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Ωστόσο, οι inverter μπορούν να δημιουργήσουν υψηλές συχνότητες και παραμορφώσεις στο ρεύμα και την τάση που παράγουν. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα στο σύστημα και να επηρεάσει τη λειτουργία άλλων ηλεκτρικών συσκευών που είναι συνδεδεμένα σε αυτό. Το LCL φίλτρο βελτιώνει την ποιότητα του ρεύματος και της τάσης, αφαιρώντας τις υψηλές συχνότητες και τις παραμορφώσεις. Έτσι, βελτιώνει την απόδοση του συστήματος και μειώνει τον κίνδυνο προβλημάτων. Το LCL φίλτρο αποτελείται από μια σειρά στοιχείων που συνδέονται μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, αποτελείται από δύο πηνία (L) και έναν πυκνωτή (C) που συνδέεται στη γείωση. Το LCL φίλτρο βελτιώνει την ποιότητα του ρεύματος και της τάσης που παράγεται από τον inverter, έτσι ενισχύει την απόδοση του συστήματος. Επιπλέον, μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των ανεπιθύμητων παραμορφώσεων που μπορούν να προκαλέσουν στο μικροδίκτυο.

## Κεφάλαιο 4

### Islanding (Νησιδοποίηση)

#### 4.1 Εισαγωγή

Η νησιδοποίηση αναφέρεται σε μία μέθοδο που εφαρμόζεται στα σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα και έχει ως στόχο την απομόνωση μικρότερων τμημάτων του δικτύου, χρησιμοποιώντας μια τοπική πηγή ενέργειας σε περίπτωση διακοπής της παροχής από το υπόλοιπο δίκτυο. Η πηγή αυτή μπορεί να είναι ένας κλασικός σταθμός παραγωγής ενέργειας, αλλά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν πιο προηγμένες τεχνολογίες όπως κυψέλες καυσίμου ή μπαταρίες. Η νησιδοποίηση αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο σε περιπτώσεις που χάνεται η παροχή ενέργειας από το κυρίως δίκτυο, όπως κατά τη διάρκεια μιας διακοπής στο ηλεκτρικό σύστημα από διάφορους παράγοντες όπως ακραία καιρικά φαινόμενα, βλάβες, κακόβουλες ενέργειες ή ακόμα και απομόνωση τμημάτων για εργασίες συντήρησης. Αυτό συμβάλλει στη βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου, εξασφαλίζοντας ότι οι διακοπές που θα υποστούν οι πελάτες θα περιορίζονται στο ελάχιστο δυνατό επίπεδο. Επιπλέον, η νησιδοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και μπορεί να επιτρέπει στους πελάτες να γίνουν παραγωγοί ενέργειας μέσω της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων ή άλλων πηγών ανανεώσιμης ενέργειας. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μεγαλύτερη αυτονομία και οικονομία του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να μειώσει το συνολικό φορτίο για λιγότερη επιβάρυνση. Συνολικά, η νησιδοποίηση αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και απόδοσης του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς και για την υποστήριξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όπως και για την εξοικονόμηση πόρων και ενέργειας. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, το Islanding μπορεί να προκαλέσει προβλήματα τόσο στο μικροδίκτυο όσο και στο τεχνικό προσωπικό και στους καταναλωτές. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παρά τα

πολύαριθμα οφέλη του ενδέχεται να δημιουργήσει επικίνδυνες συνθήκες όταν το κύριο δίκτυο επανασυνδεθεί με το μικροδίκτυο, για το λόγο αυτό αποτελεί μία κατάσταση που απαιτεί ειδικό και υπεύθυνο χειρισμό καθώς και σύγχρονες και αποτελεσματικές μεθόδους.

## 4.2 Τι είναι το Islanding

Το Islanding είναι μια κατάσταση στην οποία ένα ηλεκτρικό δίκτυο και συγκεκριμένα ένα μικροδίκτυο παράγει ενέργεια και λειτουργεί ανεξάρτητα από το βασικό δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι, αν το κύριο δίκτυο αποσυνδεθεί από το μικροδίκτυο, το μικροδίκτυο θα συνεχίσει να λειτουργεί και να παράγει ενέργεια για τους καταναλωτές του αυτόνομα. Το γεγονός αυτό μπορεί να ωφελήσει από μικρά νησιά ή απομονωμένες περιοχές όπου η παροχή ενέργειας από το κύριο δίκτυο είναι ανεπαρκής ή αντιμετωπίζει προβλήματα με την σταθερότητα της παροχής ενέργειας έως και οικισμούς και εγκαταστάσεις οποιασδήποτε κλίμακας (βιομηχανικές, οικιακές, νοσοκομειακές, στρατιωτικές και γενικότερα εγκαταστάσεις υψηλής σημασίας και απαιτήσεων σε ηλεκτροδότηση και ποιοτικό ρεύμα). Η κατάσταση Islanding μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, όπως προβλήματα στον εξοπλισμό του κύριου δικτύου ή του μικροδικτύου. Δυσμενείς καιρικές συνθήκες, βλάβες από υπερτάσεις και φθορά εξοπλισμού, κακόβουλες ενέργειες και επιθέσεις σε περιπτώσεις που αφορούν εμπόλεμες ζώνες καθώς και σκόπιμες απομονώσεις τμημάτων του μικροδικτύου για εκτέλεση εργασιών συντήρησης και επισκευής αποτελούν αξιόλογα παραδείγματα που καθιστούν τη νησιδοποίηση αναγκαία. Ειδικευμένος εξοπλισμός στα δίκτυα διανομής έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για να διασφαλιστεί το ότι οι τιμές της τάσης και της συχνότητας στο μικροδίκτυο δεν θα ξεφεύγουν από τα επιτρεπτά όρια. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται αντιστροφείς νέας τεχνολογίας όπως οι grid forming inverters που αποτελούν και το βασικό στοιχείο για την επίτευξη του Islanding καθώς είναι υπεύθυνοι για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στα επί μέρους στοιχεία του μικροδικτύου και για την εξασφάλιση της διατήρησης της ποιότητας του ρεύματος και της διαμόρφωσης της επιθυμητής τάσης και

συχνότητας. Επιπλέον με σκοπό να γίνει μία επιτυχημένη ενέργεια νησιδοποίησης θα πρέπει να τεθούν οι κατάλληλες προδιαγραφές έτσι ώστε ο σχεδιασμός του μικροδικτύου να το επιτρέπει. Επίσης αναγκαίο είναι να ληφθούν υπόψη και οι ιδιαιτερότητες του δικτύου διανομής στο οποίο θα συνδέεται. Η διασύνδεση με το κύριο δίκτυο πρέπει να είναι σταθερή και αξιόπιστη, ενώ πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την αποφυγή υπερτάσεων και υπερσυχνοτήτων.

### **4.3 Ιστορική αναδρομή**

Το Islanding είναι ένα φαινόμενο που εμφανίστηκε με την ανάπτυξη των μικροδικτύων και της σύνδεσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο. Η πρώτη αναφορά στο Islanding έγινε στα μέσα της δεκαετίας του 1980, όταν άρχισαν να εγκαθίστανται οι πρώτες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στη Γερμανία. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η ανάπτυξη των τεχνολογιών παραγωγής αιολικής ενέργειας επίσης συνέβαλε στην αύξηση του αριθμού των μικροδικτύων και την εμφάνιση του Islanding ως μια πρόκληση στη σύνδεση των ανανεώσιμων πηγών στο κεντρικό δίκτυο. Στη συνέχεια, με την ανάπτυξη των τεχνολογιών το Islanding αναγνωρίστηκε ως ένα εργαλείο για τη δημιουργία αυτόνομων και αξιόπιστων συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Με τη συνεχή ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα μικροδίκτυα και το Islanding έχουν γίνει πλέον σημαντικά εργαλεία στη δημιουργία αυτόνομων και αξιόπιστων συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Σήμερα, οι τεχνολογίες διαχείρισης του Islanding έχουν εξελιχθεί πολύ, με τη χρήση έξυπνων αλγορίθμων και συστημάτων ελέγχου που μπορούν να ανιχνεύσουν το Islanding και να διακόψουν τη σύνδεση του συστήματος παραγωγής από το δίκτυο, προστατεύοντας τον ενεργειακό εφοδιασμό και αποφεύγοντας τυχόν βλάβες στο ενεργειακό δίκτυο. Με τη συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας και της οικονομίας, οι μικροπαραγωγοί ενέργειας, όπως οι ιδιώτες και οι επιχειρήσεις, έχουν αρχίσει να συμμετέχουν στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Αυτό έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη των μικροδικτύων και την εφαρμογή του Islanding, ως ένας τρόπος απομόνωσης του μικροδικτύου από το κύριο δίκτυο, όταν υπάρχουν διακυμάνσεις στην παραγωγή ενέργειας. Το Islanding παρέχει μια εναλλακτική λύση για την παραγωγή και διανομή ενέργειας και μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του δικτύου.

## 4.4 Τα πλεονεκτήματα και οι προκλήσεις του Islanding

Το Islanding αναφέρεται στη δυνατότητα ενός μικροδικτύου να απομονωθεί από το κεντρικό δίκτυο σε περίπτωση διακοπής της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ειδικών συστημάτων ανίχνευσης διακοπής παροχής, τα οποία εντοπίζουν τη διακοπή και επιτρέπουν στο μικροδίκτυο να συνεχίσει να λειτουργεί χρησιμοποιώντας τις τοπικές του πηγές ενέργειας (π.χ. φωτοβολταϊκά συστήματα, ανεμογεννήτριες, μπαταρίες αποθήκευσης ενέργειας κλπ.).

Τα οφέλη του Islanding στα μικροδίκτυα περιλαμβάνουν:

- **Αυξημένη αξιοπιστία:** Η δυνατότητα απομόνωσης του μικροδικτύου από το κεντρικό δίκτυο μειώνει τον κίνδυνο διακοπής της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπτωση διακοπής στο κεντρικό δίκτυο.
- **Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση:** Το Islanding μπορεί να επιτρέψει τη χρήση τοπικών πηγών ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά συστήματα και ανεμογεννήτριες, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της εξάρτησης από το κεντρικό δίκτυο και να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος.
- **Μείωση των απωλειών:** Το Islanding μπορεί επίσης να μειώσει τις απώλειες ενέργειας που συνήθως συνδέονται με τη μεταφορά ενέργειας από μακρινές περιοχές του κεντρικού δικτύου.
- **Επεκτασιμότητα:** Το Islanding μπορεί να επιτρέψει την επέκταση του δικτύου με περισσότερα μικροδίκτυα που χρησιμοποιούν τοπικές πηγές ενέργειας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μια πιο αποκεντρωμένη και ανθεκτική υποδομή ενέργειας.
- **Προστασία των εργαζομένων:** Η απομόνωση του μικροδικτύου από το κεντρικό δίκτυο μπορεί να παρέχει πρόσθετη προστασία στους εργαζόμενους του μικροδικτύου κατά τη διάρκεια διακοπής της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνολικά, το Islanding μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία, την αποδοτικότητα και την ανθεκτικότητα των μικροδικτύων στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της εξάρτησης από το κεντρικό δίκτυο και να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

Ωστόσο, οι μηχανισμοί Islanding μπορεί να προκαλέσουν ορισμένα προβλήματα όταν δεν είναι καλά σχεδιασμένοι ή υλοποιημένοι. Για παράδειγμα, εάν το Islanding δεν λειτουργήσει σωστά, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο μικροδίκτυο μπορεί να προκαλέσει επικίνδυνες συνθήκες υπερτάσης και πυρκαγιάς. Επιπλέον, το Islanding μπορεί να δυσχεράνει τη διαχείριση του δικτύου και την αντιμετώπιση προβλημάτων όταν το μικροδίκτυο είναι απομονωμένο από το κεντρικό δίκτυο. Για να αποφευχθούν αυτά τα προβλήματα, απαιτείται προσεκτική σχεδίαση και υλοποίηση του μηχανισμού Islanding. Επίσης, είναι σημαντικό να διατηρείται συνεχής επικοινωνία μεταξύ του μικροδικτύου και του κεντρικού δικτύου, ώστε να επιτυγχάνεται μια ομαλή μετάβαση στη λειτουργία Islanding και πίσω στη σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο όταν αυτό είναι απαραίτητο.

## **4.5 Τα μειονεκτήματα του Islanding και τρόποι αντιμετώπισής τους**

Η λειτουργία του "Islanding" στα συστήματα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά και τα αιολικά συστήματα, μπορεί να έχει τα εξής μειονεκτήματα:

- Κίνδυνος ηλεκτροπληξίας: Στην περίπτωση Islanding, οι εργαζόμενοι στο σύστημα μπορεί να έρθουν σε επαφή με υψηλή τάση και να υποστούν ηλεκτροπληξία.
- Κίνδυνος πυρκαγιάς: Τα μικροδίκτυα με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μπορεί να έχουν αυξημένο κίνδυνο πυρκαγιάς σε περίπτωση Islanding, καθώς η αποσύνδεση από το κεντρικό δίκτυο μπορεί

να οδηγήσει σε υπερτάσεις και υπερθέρμανση των συστημάτων μετατροπής ενέργειας.

- Απώλεια λειτουργικότητας και ζημιές στον εξοπλισμό: Η αποσύνδεση από το κεντρικό δίκτυο μπορεί να οδηγήσει σε πτώση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και να προκαλέσει ζημιές στον εξοπλισμό.
- Απώλεια πρόσβασης σε ενέργεια: Σε περίπτωση Islanding, οι καταναλωτές μπορεί να μείνουν χωρίς πρόσβαση σε ενέργεια, εάν δεν υπάρχουν αποθηκευτικά συστήματα
- Αύξηση του κόστους επισκευής και συντήρησης: Η αποσύνδεση από το κεντρικό δίκτυο μπορεί να προκαλέσει ζημιές στον εξοπλισμό και στο δίκτυο, αυξάνοντας το κόστος επισκευής και συντήρησης του συστήματος.
- Κίνδυνος απώλειας σταθερότητας του συστήματος: Η απότομη αλλαγή του φορτίου στο δίκτυο μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια και προβλήματα στο σύστημα.
- Μείωση της αξιοπιστίας του συστήματος: Η αποσύνδεση από το κεντρικό δίκτυο μπορεί να μειώσει την αξιοπιστία του συστήματος, καθώς δεν υπάρχει πλέον η δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ του μικροδικτύου και του κεντρικού δικτύου.

Οι παραπάνω κίνδυνοι είναι εν γένει αποτέλεσμα του γεγονότος ότι τα μικροδίκτυα δεν συνδέονται πλήρως με το κεντρικό δίκτυο και δεν ελέγχονται από αυτό. Για αυτό το λόγο, είναι σημαντικό να λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα προστασίας και ασφαλείας για τους εργαζόμενους και τους χρήστες του συστήματος, προκειμένου να αποφεύγονται οι πιθανοί κίνδυνοι. Παραδείγματα μέτρων προστασίας περιλαμβάνουν:

- Εγκατάσταση συστημάτων προστασίας από υπερτάσεις και βραχυκυκλώματα, που μπορεί να προκαλέσουν ζημιές στον εξοπλισμό και στο δίκτυο.
- Επιλογή κατάλληλων μεθόδων σύνδεσης του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια και η σταθερότητα του συστήματος.

- Εκπαίδευση των εργαζομένων σχετικά με τους κινδύνους και τις ασφαλείς πρακτικές εργασίας στα μικροδίκτυα.
- Συνεχής επιθεώρηση και συντήρηση του εξοπλισμού και του δικτύου, προκειμένου να αποφεύγονται πιθανές βλάβες ή αστάθειες.

Εγκατάσταση συστημάτων που μπορούν να ελέγξουν το δίκτυο και τον εξοπλισμό και να αποτρέπουν την πιθανή απώλεια της σταθερότητας του συστήματος. όλα τα απαραίτητα μέτρα προστασίας προκειμένου να αποφεύγονται πιθανοί κίνδυνοι για τους εργαζομένους και το δίκτυο. Η αποτελεσματική λειτουργία των μικροδικτύων είναι σημαντική για την ανανεώσιμη ενέργεια και την αειφορία του πλανήτη, όμως η ασφάλεια και η προστασία των εργαζομένων πρέπει να έχουν προτεραιότητα σε κάθε περίπτωση.

Για αυτούς τους λόγους, η λειτουργία του "Islanding" πρέπει να γίνεται με προσοχή και να λαμβάνονται υπόψη τα παραπάνω μειονεκτήματα κατά τον σχεδιασμό και την εγκατάσταση του συστήματος. Επιπλέον, οι καταναλωτές πρέπει να είναι ενημερωμένοι σχετικά με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της λειτουργίας του "Islanding" και να λαμβάνουν υπόψη τους τις συνθήκες του τοπικού δικτύου και τις διαθέσιμες εναλλακτικές λύσεις πριν αποφασίσουν να υιοθετήσουν αυτήν τη λειτουργία. Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η λειτουργία του "Islanding" μπορεί να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η ανεξαρτησία από το δίκτυο, η αυτάρκεια στην παραγωγή ενέργειας και η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, η απόφαση για τη λειτουργία του "Islanding" πρέπει να βασίζεται σε μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων και να λαμβάνεται υπόψη η συνολική ασφάλεια του συστήματος ενέργειας.

## **4.6 Πως επιτυγχάνεται το Islanding**

Το Islanding επιτυγχάνεται μέσω ειδικών συστημάτων ελέγχου που εγκαθίστανται στα μικροδίκτυα και επιτρέπουν την ανίχνευση της απομόνωσης από το κεντρικό δίκτυο. Οι συσκευές αυτές είναι γνωστές ως "inverter" ή "μετατροπείς" και μετατρέπουν την καταναλωτική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά ή τα αιολικά συστήματα σε κατάλληλη μορφή για χρήση από τους τοπικούς

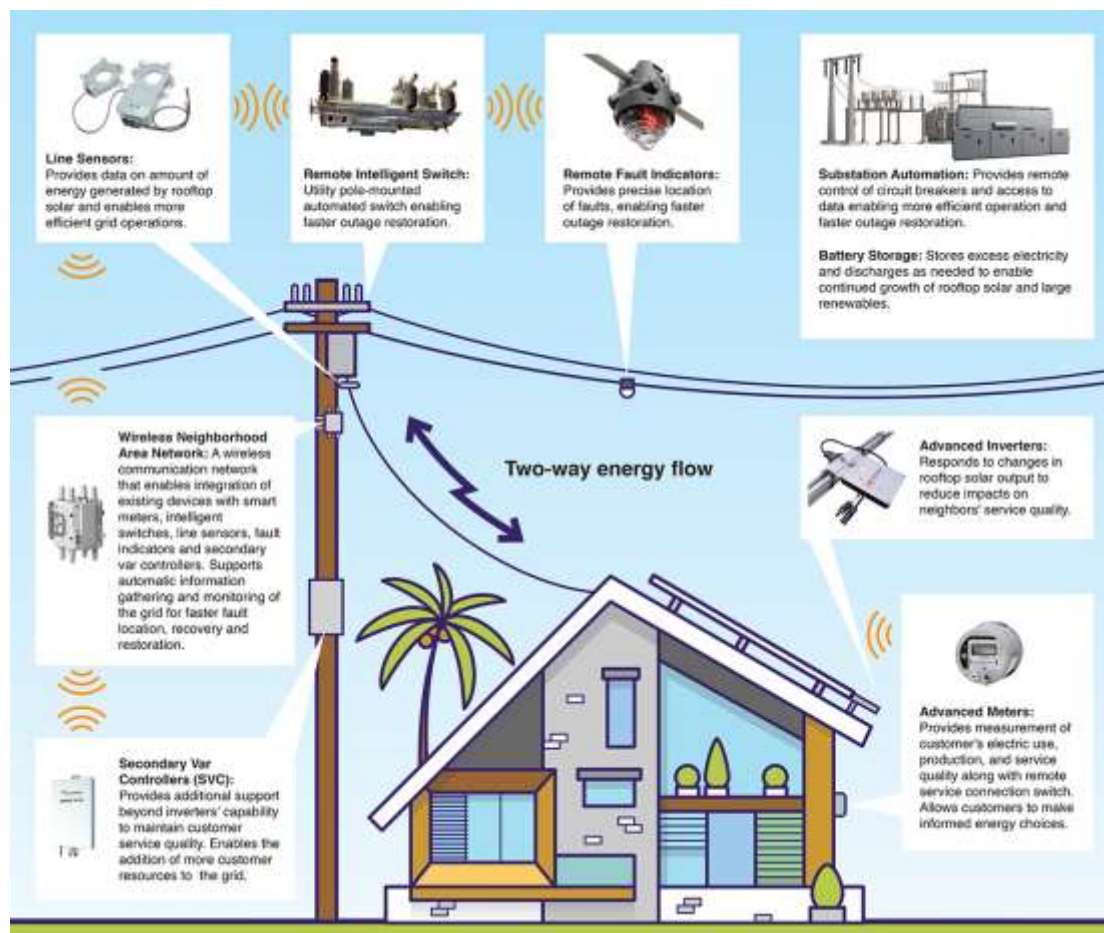


καταναλωτές. Οι μετατροπείς αυτοί διαθέτουν ειδικές λειτουργίες ανίχνευσης απομόνωσης, ώστε να μπορούν να ανιχνεύσουν τη διακοπή του κεντρικού δικτύου και να ενεργοποιήσουν αυτόματα το σύστημα Islanding. Κατά τη διάρκεια της απομόνωσης, ο μετατροπέας ελέγχει τη συχνότητα και την τάση του τοπικού δικτύου και προσαρμόζει την παραγωγή ενέργειας ανάλογα, έτσι ώστε να διατηρεί την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους τοπικούς καταναλωτές. Τα μικροδίκτυα μπορούν επίσης να ενσωματώσουν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες, που μπορούν να αποθηκεύουν την παραγόμενη ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να τη χρησιμοποιούν κατά τη διάρκεια της απομόνωσης από το κεντρικό δίκτυο. Αυτό μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία του τοπικού μικροδικτύου και να μειώσει την εξάρτηση από το κεντρικό δίκτυο. Επιπλέον, η τεχνολογία της επεξεργασίας σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο του τοπικού δικτύου και την ανίχνευση της απομόνωσης. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω συνδεδεμένων αισθητήρων στο τοπικό δίκτυο και ειδικών αλγορίθμων που μπορούν να ανιχνεύσουν τη διακοπή της τάσης ή της συχνότητας στο κεντρικό δίκτυο και να ενεργοποιήσουν αυτόματα το σύστημα Islanding. Για να επιτευχθεί το Islanding, πρέπει να εφαρμοστούν κατάλληλα συστήματα ανίχνευσης και διακοπής. Μια από τις πιο κοινές τεχνολογίες είναι η χρήση συστημάτων αναγνώρισης του διανεμημένου συστήματος (Distributed Generation Identification System - DGIS). Αυτά τα συστήματα μετρούν τη στάθμη τάσης και τη συχνότητας στο σημείο σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο και σε περίπτωση διακοπής, απενεργοποιούν το διανεμημένο σύστημα και επιτρέπουν τη λειτουργία του ως αυτόνομου «νησιού». Άλλη μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται για το Islanding είναι η τεχνολογία των μετασχηματιστών μετατροπής (solid-state transformer - SST). Αυτοί οι μετασχηματιστές μπορούν να διαχωρίσουν το μικροδίκτυο από το κεντρικό δίκτυο και να τροφοδοτήσουν το μικροδίκτυο αποκλειστικά από τις ανανεώσιμες. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι το Islanding μπορεί να επιτευχθεί είτε με αυτόματους ελεγκτές που είναι εγκατεστημένοι στον μετασχηματιστή είτε με ειδικά σχεδιασμένο λογισμικό που ελέγχει το δίκτυο με εντολές από μια ανώτερη αρχή. Επιπλέον, η χρήση προηγμένων τεχνολογιών όπως η ολοκληρωμένη διαχείριση ενέργειας και η αυτόματη ανίχνευση βλαβών μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση και την αξιοπιστία του Islanding στα μικροδίκτυα. Συνοψίζοντας, αποτελεί μια

αποτελεσματική λύση για τη διατήρηση της ηλεκτρικής ενέργειας στα μικροδίκτυα κατά τη διάρκεια της διακοπής του κύριου δικτύου, με σημαντικά πλεονεκτήματα που υπερτερούν των μειονεκτημάτων. Γενικότερα το Islanding είναι μια σημαντική τεχνολογία που συμβάλλει στη βελτίωση της αξιοπιστίας και της απόδοσης της διανομής ενέργειας σε μικρή κλίμακα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς, όπως στα αστικά και αγροτικά δίκτυα, σε επιχειρήσεις καθώς και σε πολυάριθμες περιπτώσεις εγκαταστάσεων.

## 4.7 Εκσυγχρονισμός δικτύων και Islanding

Παράδειγμα από εκσυγχρονισμού δικτύου σε περιοχή της Χαβάης με τεχνολογία που ευνοεί την μετάβαση δικτύου σε κατάσταση Islanding:



**Σχήμα 4.1: Αναπαράσταση βασικών στοιχείων εξοπλισμού για τον εκσυγχρονισμό ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.**

Σε περιοχές της Χαβάης έχουν εγκατασταθεί στα τοπικά δίκτυα καθώς και στους παραγωγούς/καταναλωτές προηγμένα συστήματα και εξοπλισμός τα οποία δίνουν τη δυνατότητα για μία αμφίδρομη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ του δικτύου και των καταναλωτών. Ο εκσυγχρονισμός αυτός του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπει την μετάβαση τμημάτων του δικτύου αλλά και μεμονωμένων καταναλωτών σε αυτόνομη λειτουργία, κάτι το οποίο ευνοεί τη νησιδοποίηση (Islanding). Οι καταναλωτές διαθέτοντας ενσωματωμένες πηγές ενέργειας και μέσα αποθήκευσης ενέργειας όπως μπαταρίες, μπορούν να μετατραπούν σε παραγωγούς που θα είναι σε θέση να καλύψουν τις ανάγκες τους σε ηλεκτροδότηση σε

περίπτωση διακοπής, αλλά και να συμβάλλουν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προς τροφοδοσία του μικροδικτύου όταν απαιτηθεί.

Αυτό επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση και τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών, συγκεκριμένα:

Στους καταναλωτές και γενικότερα στις εγκαταστάσεις που τροφοδοτούνται από το μικροδίκτυο, εγκαθίστανται συστήματα παραγωγής ενέργειας όπως φωτοβολταϊκά πάνελ που αποτελούν την απλούστερη περίπτωση και μπαταρίες για να αποθηκεύεται η παραγόμενη ενέργεια. Επίσης υπάρχουν σύγχρονοι τύποι inverter όπως τα grid forming inverter που διαμορφώνουν την τάση και την συχνότητα του ρεύματος που παράγεται από τις πηγές για να είναι αξιοποιήσιμο από τους καταναλωτές, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ποιότητα του. Σημαντικά στοιχεία του δικτύου είναι επίσης οι αισθητήρες που έχουν τοποθετηθεί σε συγκεκριμένα σημεία που καταγράφουν δεδομένα σχετικά με την τάση και την συχνότητα του ρεύματος τα οποία τα στέλνουν σε πραγματικό χρόνο στον κεντρικό ελεγκτή για την εποπτεία του δικτύου και την ανίχνευση σφαλμάτων. Η επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων και κεντρικού ελεγκτή για τη μεταφορά δεδομένων γίνεται μέσω ασύρματων τοπικών δικτύων δημιουργώντας ένα διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things-IoT) που αποτελεί καινοτομία του άμεσου μέλλοντος με πολλές εφαρμογές. Ακόμα το μικροδίκτυο περιλαμβάνει υποσταθμούς αυτοματισμού με διακόπτες οι οποίοι απομονώνουν αυτόματα τόσο το κεντρικό δίκτυο από το μικροδίκτυο όσο και τμήματα του μικροδικτύου. Σημαντικοί είναι επίσης οι έξυπνοι διακόπτες με ικανότητα τηλεχειρισμού που βρίσκονται εγκατεστημένοι σε πυλώνες και στύλους ηλεκτροδότησης που επιτρέπουν την άμεση απομόνωση τους όταν αυτό απαιτηθεί. Όλο το σύστημα που περιεγράφηκε είναι ένα πραγματικό παράδειγμα μικροδικτύου και εκσυγχρονισμού ενός υπάρχοντος δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας με εισαγωγή ψηφιακών τεχνολογιών που επιτρέπουν την νησιδοποίηση.

### 4.7.1 Σκόπιμη απομόνωση

Η κατά βούληση απομόνωση Islanding είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται σε μικρά δίκτυα ενέργειας όπως οι ηλιακοί και οι αιολικοί σταθμοί, προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία τους. Η απομόνωση Islanding συμβαίνει όταν ένα μικρό δίκτυο ενεργειακής παραγωγής αποσυνδέεται από το μεγαλύτερο δίκτυο, αλλά συνεχίζει να λειτουργεί αυτόνομα. Στη διάρκεια της απομόνωσης Islanding, οι ηλεκτρικές συσκευές που συνδέονται στο μικρό δίκτυο ενεργειακής παραγωγής συνεχίζουν να λειτουργούν χωρίς διακοπή. Αντίθετα, χωρίς την κατάλληλη τεχνολογία, η ασφάλεια και η αξιοπιστία του δικτύου ενέργειας θα μπορούσε να διαταραχθεί ή να υποστεί ζημιά από την αναμενόμενη ή μη αναμενόμενη απομόνωση. Για να επιτευχθεί η κατά βούληση απομόνωση Islanding, απαιτείται ειδικός εξοπλισμός που ελέγχει τη συχνότητα και την τάση του μικροδικτύου. Αν ανιχνευθεί μια αλλαγή στη συχνότητα ή την τάση, το σύστημα επομένως θα πρέπει να διακόψει αυτόματα τη σύνδεση με το κυρίως δίκτυο, προκειμένου να απομονωθεί και να συνεχίσει να λειτουργεί αυτόνομα. Αυτό εξασφαλίζει ότι το μικροδίκτυο δεν θα συνεχίσει να λειτουργεί με ενέργεια που δεν προέρχεται από την τοπική παραγωγή του. Η κατά βούληση απομόνωση Islanding είναι σημαντική για την ασφαλή λειτουργία των μικρών δικτύων ενέργειας και την προστασία τους από δυνητικές ζημιές ή διαταραχές. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η απομόνωση Islanding μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στα μικρά δίκτυα ενέργειας, όπως την υπέρταση ή την υπόταση, εάν δεν διαχειριστούν σωστά. Επομένως, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας και η εγκατάσταση κατάλληλου εξοπλισμού είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία των μικρών δικτύων ενέργειας. Επιπλέον, η σωστή συντήρηση και η τακτική επαλήθευση του εξοπλισμού μπορούν να βοηθήσουν στη διατήρηση της αξιοπιστίας του μικροδικτύου. Στη συνέχεια, η απομόνωση Islanding μπορεί να προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα για τους καταναλωτές. Επιπλέον, η τοπική παραγωγή ενέργειας μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς μειώνει την ανάγκη μεταφοράς ενέργειας μεγάλων αποστάσεων. Η σωστή λειτουργία του συστήματος απομόνωσης μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο ατυχημάτων και των επικίνδυνων καταστάσεων.

## 4.7.2 Απρόοπτη Απομόνωση

Για να επιτευχθεί μια αυτόνομη απομόνωση, χρησιμοποιείται μια σειρά μέτρων ασφαλείας, όπως η ανίχνευση της διακοπής ηλεκτρικής ενέργειας, η παρακολούθηση του επιπέδου της τάσης και η ρύθμιση των συχνοτήτων. Οι συσκευές αυτόματης απομόνωσης Islanding συνήθως είναι εγκατεστημένες στον βασικό διακόπτη που μεσολαβεί μεταξύ του κεντρικού δικτύου και του μικροδικτύου και μπορούν να ανιχνεύσουν το αν υπάρχει ή όχι τροφοδοσία. Όταν ανιχνεύσει το σύστημα ελέγχου ότι δεν υπάρχει τροφοδοσία από το κεντρικό δίκτυο τότε θέτει σε εφαρμογή αυτόματα την παράγωγή ενέργειας του μικροδικτύου από τις δικές του μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και τους μικροπαραγωγούς του. Επομένως ο κεντρικός διακόπτης απομονώνει το μικροδίκτυο από το κεντρικό δίκτυο για να αποτρέψει την επιστροφή ηλεκτρικής ενέργειας πίσω στο κεντρικό δίκτυο. Η απομόνωση μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τη συγκεκριμένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται στο μικροδίκτυο.

Η διαδικασία της απομόνωσης και της μετάβασης στην κατάσταση Islanding είναι η εξής:

Με την χρήση αισθητήρων και μονάδων μέτρησης ανιχνεύεται η απουσία τάσης και αλλαγές στη συχνότητα του ρεύματος που προέρχεται από το κεντρικό δίκτυο, τα δεδομένα στέλνονται άμεσα στον κεντρικό ελεγκτή ο οποίος διαθέτει ειδικευμένους αλγόριθμους. Οι αλγόριθμοι αυτοί επενεργούν στα όργανα δράσης που είναι τα grid forming inverters και οι διακόπτες οι οποίοι με την σειρά τους απομονώνουν το μικροδίκτυο και ενεργοποιούν τους τροφοδότες του.

Η χρήση αυτής της τεχνολογίας συνιστάται σε όλες τις μικρές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον, η απομόνωση Islanding μπορεί να προστατεύσει το κεντρικό δίκτυο από ενδεχόμενες βλάβες, όπως η υπέρταση και η υπόταση, που μπορούν να προκληθούν από τις μικροπαραγωγικές μονάδες. Η αυτόματη απομόνωση Islanding είναι υποχρεωτική για τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας μεγαλύτερες από 30 kW, σύμφωνα με τον κανονισμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα παραγωγικά συστήματα σε μικρή κλίμακα (Small-Scale Renewable Energy Sources - RES), η οποία ισχύει από το 2019. Η επιλογή της κατάλληλης

τεχνολογίας αυτόματης απομόνωσης Islanding εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως ο τύπος του δικτύου, οι τεχνικές δυνατότητες των εγκαταστάσεων παραγωγής, ο τρόπος που συνδέονται μεταξύ τους, κ.λπ. Σε κάθε περίπτωση, είναι σημαντικό να υπάρχει μια κατάλληλη σχεδίαση και εγκατάσταση του συστήματος αυτόματης απομόνωσης Islanding, καθώς και η τακτική συντήρηση και έλεγχος του συστήματος, για να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία του και η ασφάλεια του συστήματος.

Ο κανονισμός του Small-Scale Renewable Energy Sources (RES) του 2019 είναι ένας νομικός κανονισμός της Ευρωπαϊκής Ένωσης που έχει ως στόχο την προώθηση των μικρής κλίμακας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη. Ο κανονισμός αυτός θεσπίζει κανόνες για την παραγωγή, τη διανομή και τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από μικρές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ηλιακά, αιολικά και υδροηλεκτρικά συστήματα. Στόχος του κανονισμού είναι να διευκολυνθεί η πρόσβαση των καταναλωτών στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να ενθαρρυνθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε τοπικό επίπεδο. Ο κανονισμός καθορίζει τους κανόνες για τη σύνδεση των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο και τη διαχείρισή τους, καθώς και για την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

### **4.7.3 Inverters**

Τα Grid-following inverters και τα Grid-forming inverters είναι διαφορετικοί τύποι αντιστροφέων (inverters) που χρησιμοποιούνται στα μικροδίκτυα και παίζουν σημαντικό ρόλο στην επίτευξη του Islanding. Κατά τη διάρκεια του Islanding, οι Grid-forming inverters έχουν ως κύριο σκοπό να διατηρήσουν τη σταθερότητα της τάσης και της συχνότητας του μικροδικτύου. Για να το πετύχουν αυτό, οι Grid-forming inverters διαθέτουν ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου που επιτρέπει στο μικροδίκτυο να λειτουργεί ως ανεξάρτητο σύστημα, ανεξάρτητα από το κεντρικό δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της παραγωγής της σωστής τάσης και συχνότητας από τον αντιστροφέα. Αντίθετα, οι Grid-following inverters ακολουθούν την τάση και τη συχνότητα του κεντρικού δικτύου και επιτρέπουν στο μικροδίκτυο να συνεχίσει να λειτουργεί ως μέρος του κεντρικού δικτύου. Κατά τη διάρκεια του

Islanding, οι Grid-following inverters συνεργάζονται με τους Grid-forming inverters για να διατηρήσουν τη σταθερότητα της τάσης και της συχνότητας του μικροδικτύου και να εξασφαλίσουν ότι οι πιο κρίσιμοι φόρτοι τροφοδοτούνται πρώτοι. Οι Grid-following inverters είναι υπεύθυνοι για τη ρύθμιση της ισχύς τους, ώστε να διατηρούν την τάση του μικροδικτύου σταθερή. Ωστόσο, σε περίπτωση υπερφόρτωσης ή έλλειψης ισχύος, οι Grid-following inverters αφήνουν προτεραιότητα στους πιο κρίσιμους φόρτους, που μπορεί να είναι για παράδειγμα νοσοκομεία ή άλλες υπηρεσίες υψηλής σημασίας. Στη συνέχεια, οι Grid-forming inverters αναλαμβάνουν τον έλεγχο της συχνότητας και της τάσης του μικροδικτύου, χρησιμοποιώντας την ενσωματωμένη τους ικανότητα για αυτόνομο έλεγχο. Οι Grid-forming inverters διατηρούν τη σταθερότητα της συχνότητας και της τάσης του μικροδικτύου, επιτρέποντας του να λειτουργεί ως ανεξάρτητο σύστημα. Συνολικά, οι Grid-following inverters και οι Grid-forming inverters συνεργάζονται κατά την κατάσταση του Islanding σε ένα μικροδίκτυο, προκειμένου να διατηρήσουν τη σταθερότητα της τάσης και της συχνότητας του μικροδικτύου.

#### **4.7.4 Τάση και συχνότητα**

Κατά τη διάρκεια του Islanding, όταν ένα μικροδίκτυο λειτουργεί ανεξάρτητα από το κύριο δίκτυο, είναι σημαντικό να διατηρείται η τάση και η συχνότητα μέσα στα επιθυμητά όρια. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, όπως η ρύθμιση της ισχύος του μικροδικτύου, η ρύθμιση των ρυθμών φόρτωσης, η χρήση τεχνικών αποθήκευσης ενέργειας και η ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος ελέγχου του μικροδικτύου. Μια από τις κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι η συνεχής ρύθμιση της ισχύος του μικροδικτύου σε συνάρτηση με τη ζήτηση φόρτου και τη διαθέσιμη παραγωγή ισχύος. Η χρήση τεχνικών αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση της σταθερότητας του μικροδικτύου, καθώς μπορούν να παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής παραγωγής ή υψηλής ζήτησης φόρτου. Επιπλέον, η ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος ελέγχου του μικροδικτύου μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση της σταθερότητας της τάσης και της συχνότητας μέσα στα επιθυμητά όρια. Οι παράμετροι αυτές μπορούν να περιλαμβάνουν τον ρυθμό πτώσης της τάσης, το



επίπεδο της τάσης και τη συχνότητα, καθώς και τον ρυθμό αλλαγής του φορτίου. Η σωστή ρύθμιση αυτών των παραμέτρων μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση της σταθερότητας του μικροδικτύου κατά τη διάρκεια του Islanding. Συνολικά, η διατήρηση της σταθερότητας της τάσης και της συχνότητας σε ένα μικροδίκτυο κατά τη διάρκεια του Islanding απαιτεί συντονισμένες προσπάθειες σε διάφορους τομείς.

Ο κεντρικός έλεγχος του μικροδικτύου για να ανιχνεύσει την μετάβαση σε κατάσταση Islanding λαμβάνει μετρήσεις σχετικά με την συχνότητα και καταγράφει τις μεταβολές της. Συγκεκριμένα ελέγχει τον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας ο οποίος εκφράζεται με τον εξής τύπο:

$$\frac{df}{dt} = \mathbf{ROCOF} = \frac{\Delta P f}{2GH}$$
 όπου  $f$  είναι η συχνότητα η οποία μεταβάλλεται σε σχέση με τον χρόνο  $t$ ,  $\Delta P$  είναι η ανισορροπία ισχύος ( $\Delta P = P_m - P_e$ ),  $G$  η χωρητικότητα του συστήματος και  $H$  είναι η αδράνεια.

Εάν η τιμή **ROCOF** ή ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή, τότε ο κεντρικός έλεγχος του μικροδικτύου δρα έτσι ώστε να αποσυνδέσει ενσωματωμένες παραγωγές για να επαναφέρει το μικροδίκτυο στους φυσιολογικούς ρυθμούς λειτουργίας.

Τα μικροδίκτυα σε κατάσταση Islanding μπορεί να αντιμετωπίσει δυο πιθανές καταστάσεις σχετικά με τις μεταβολές της συχνότητας και της τάσης.

Οι δυο περιπτώσεις είναι οι εξής:

#### **4.7.5 Υπερβολικά υψηλή τάση και χαμηλή συχνότητα**

Κατά τη διάρκεια του Islanding σε ένα μικροδίκτυο, η τάση και η συχνότητα μπορούν να ξεφύγουν από τα επιθυμητά επίπεδα, λόγω του γεγονότος ότι η παραγωγή ενέργειας από τα απομονωμένα δίκτυα γίνεται με βάση την τοπική φόρτιση και όχι με βάση το συνολικό φορτίο του δικτύου. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, συνήθως χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως η ρύθμιση της

παραγωγής ενέργειας από τις πηγές, η χρήση ειδικών αλγορίθμων ελέγχου και η χρήση συσκευών όπως οι μετασχηματιστές απόκρισης συχνότητας (Frequency Responsive Transformers). Οι μετασχηματιστές απόκρισης συχνότητας είναι ένας τύπος μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της συχνότητας και της τάσης σε ένα δίκτυο κατά τη διάρκεια του Islanding. Αυτοί οι μετασχηματιστές λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιδρούν στις μικρές αλλαγές στη συχνότητα του δικτύου και να ρυθμίζουν την τάση και τη συχνότητα στα επιθυμητά επίπεδα. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαχειριστούν την υπερβολική τάση και συχνότητα κατά τη διάρκεια του Islanding. Αυτοί οι αλγόριθμοι λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε να ελέγχουν την παραγωγή ενέργειας από τις πηγές, μειώνοντας την παραγωγή ενέργειας όταν η τάση και η συχνότητα υπερβαίνουν τα επιθυμητά επίπεδα και αυξάνοντας την παραγωγή ενέργειας όταν η τάση και η συχνότητα είναι χαμηλότερες από τα επιθυμητά επίπεδα. Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η διαχείριση της υπερβολικής τάσης και συχνότητας κατά τη διάρκεια του Islanding είναι ένα σύνθετο ζήτημα και απαιτεί ειδικές γνώσεις και εμπειρία στην ανάπτυξη και τη συντήρηση των μικροδικτύων. Οι ειδικοί στον τομέα αυτόν συνήθως χρησιμοποιούν συνδυαστικές τεχνικές για να διασφαλίσουν ότι η τάση και η συχνότητα παραμένουν εντός των επιθυμητών ορίων κατά τη διάρκεια του Islanding.

#### **4.7.6 Χαμηλή τάση και υψηλή συχνότητα**

Για να διατηρηθεί η τάση και η συχνότητα σε επιθυμητά επίπεδα σε κατάσταση Islanding, όταν η τάση είναι υπερβολική και η συχνότητα χαμηλή, μπορούν να ληφθούν συγκεκριμένα μέτρα και για αυτήν την περίπτωση. Αρχικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια στατική συσκευή ζεύξης (static coupling device) για να διατηρηθεί η τάση στα επιθυμητά επίπεδα. Η στατική συσκευή ζεύξης μπορεί να παράγει μια τάση που είναι συμβατή με την τάση του δικτύου, έτσι ώστε η τάση να διατηρείται σταθερή. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια στατική συσκευή συχνότητας (static frequency device) για να διατηρηθεί η συχνότητα στα επιθυμητά επίπεδα. Η στατική συσκευή συχνότητας μπορεί να παράγει μια συχνότητα που είναι συμβατή με τη συχνότητα του δικτύου, έτσι ώστε η συχνότητα να διατηρείται σταθερή. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μονάδα διαχείρισης ενέργειας

(energy management unit) για να ελέγχει την παραγωγή ενέργειας από τη δικτυακή σύνδεση και το μικροδίκτυο. Η μονάδα διαχείρισης ενέργειας μπορεί να παρακολουθεί την τάση και τη συχνότητα του δικτύου και να ρυθμίζει την παραγωγή ενέργειας του μικροδικτύου ανάλογα με τις ανάγκες του. Έτσι, μπορεί να διατηρηθεί η τάση και η συχνότητα στα επιθυμητά επίπεδα ακόμα και σε κατάσταση Islanding. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας προγραμματιζόμενο λογισμικό ελέγχου (programmable control software) για να ελέγχει τη λειτουργία του μικροδικτύου και να διατηρεί την τάση και τη συχνότητα στα επιθυμητά επίπεδα. Το προγραμματιζόμενο λογισμικό ελέγχου μπορεί να προγραμματιστεί έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου και να προσαρμόζει τη λειτουργία του μικροδικτύου ανάλογα. Επίσης είναι σημαντικό να εφαρμοστούν και άλλα μέτρα για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της σταθερότητας του μικροδικτύου. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν τη χρήση αντιστατών (resistors) και αντιηλεκτρομαγνητικών φίλτρων (electromagnetic interference filters), καθώς και την εφαρμογή κατάλληλων πρακτικών ασφαλείας και προληπτικής συντήρησης. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αυτόματος διακόπτης (automatic switch) που να απομονώνει το μικροδίκτυο από το κύριο δίκτυο σε περίπτωση που διαπιστωθεί κάποια αστάθεια ή πρόβλημα στο μικροδίκτυο. Επίσης, ο σχεδιασμός του μικροδικτύου πρέπει να γίνεται με βάση τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές του κύριου δικτύου, καθώς και των τοπικών καταναλωτών. Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβαλλόμενες συνθήκες και οι αλλαγές που μπορεί να επέρχονται στο δίκτυο, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία του μικροδικτύου. Επίσης άλλη μία μέθοδος για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος είναι η αποσύνδεση φόρτων από το ζυγό του μικροδικτύου. Για να αντιμετωπιστεί η πολύ υψηλή συχνότητα και η χαμηλή τάση η αποσύνδεση φορτίων από το μικροδίκτυο θα οδηγήσει στην ελεγχόμενη κατανάλωση ενέργειας και έτσι θα εξομαλυνθούν η συχνότητα και η τάση στα επιθυμητά επίπεδα, καθώς θα υπάρχει λιγότερο φορτίο για τις πηγές παραγωγής ενέργειας.

Τέλος, είναι σημαντικό να υπάρχει συνεργασία και συντονισμός μεταξύ των διαφόρων φορέων που είναι αρμόδιοι για τη λειτουργία και τη διαχείριση του

δικτύου, όπως οι παραγωγοί ενέργειας, οι διαχειριστές δικτύου και οι καταναλωτές. Μόνο έτσι μπορεί να διασφαλιστεί η ασφάλεια, η σταθερότητα και η αξιοπιστία του μικροδικτύου σε κατάσταση Islanding. Συνολικά, η διατήρηση της τάσης και της συχνότητας σε επιθυμητά επίπεδα στο μικροδίκτυο σε κατάσταση Islanding είναι μια πρόκληση που απαιτεί την εφαρμογή πολλών μέτρων ασφαλείας και την συνεργασία διαφόρων φορέων. Με τη σωστή σχεδίαση, εφαρμογή και συντήρηση του μικροδικτύου, μπορεί να διασφαλιστεί η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία του σε κατάσταση Islanding.

## Κεφάλαιο 5

### Blackstart

Στα μικροδίκτυα πέραν από το φαινόμενο του Islanding που αναλύεται στην συγκεκριμένη εργασία εκτελείται και μια άλλη διαδικασία εξίσου σημαντική που ονομάζεται Blackstart. Ο όρος "Blackstart" αναφέρεται σε μια σημαντική διαδικασία εκκίνησης του δικτύου μετά από μια πλήρη διακοπή της ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια μιας κρίσης ή μιας έκτακτης κατάστασης, όπως μια διακοπή ρεύματος που επηρεάζει ολόκληρο το δίκτυο, το Blackstart προηγείται του Islanding το οποίο αποτελεί τη διαδικασία ανάκαμψης και επανεκκίνησης της ηλεκτροδότησης σε όλες τις περιοχές ή τα μικροδίκτυα που επλήγησαν και στη συνέχεια το δίκτυο καθίσταται ικανό να λειτουργήσει ανεξάρτητα όντας σε κατάσταση Islanding. Κατά τη διάρκεια ενός Blackstart, η προτεραιότητα δίνεται στην ηλεκτροδότηση επιλεγμένων κρίσιμων περιοχών, όπως νοσοκομεία, αεροδρόμια, σταθμούς μεταφοράς ενέργειας και άλλων ευαίσθητων εγκαταστάσεων. Η διαδικασία Blackstart περιλαμβάνει την εκκίνηση και την αποκατάσταση των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας, των μετατροπέων, των δικτύων διανομής και άλλων συστημάτων που απαιτούνται για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Η επιτυχής διαδικασία Blackstart απαιτεί συνεργασία και συντονισμό ανάμεσα στους διάφορους φορείς του ενεργειακού συστήματος, όπως οι παραγωγοί, οι διαχειριστές του δικτύου και οι καταναλωτές. Συνήθως, για την εκτέλεση μιας επιτυχούς διαδικασίας Blackstart, χρησιμοποιούνται ειδικές διαδικασίες εκκίνησης και αποκατάστασης, καθώς και ανταλλαγή πληροφοριών του δικτύου. Η αποτελεσματική εκτέλεση του Blackstart είναι ζωτικής σημασίας για την επαναφορά της ηλεκτροδότησης μετά από μια κρίσιμη διακοπή ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο αντιπροσωπεύει μια σημαντική επιχειρησιακή ικανότητα για τα μικροδίκτυα, καθώς εξασφαλίζει την αντοχή, την ευελιξία και την ανακτήσιμη λειτουργία τους μετά από μια ανεπάντεχη διακοπή ρεύματος ενισχύοντας έτσι την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα του ηλεκτρικού συστήματος. Η ικανότητα για ένα επιτυχημένο Blackstart επιτρέπει την αποφυγή μακροχρόνιων διακοπών ρεύματος και την αποκατάσταση της ηλεκτροδότησης σε ελάχιστο χρόνο. Επιπλέον,

οι τεχνολογικές εξελίξεις στα μικροδίκτυα έχουν επιτρέψει τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια ή και συμβατικές πηγές όπως οι γεννήτριες diesel σε συνδυασμό με μέσα αποθήκευσης ενέργειας, που μπορούν να συμβάλλουν στην αυτονομία των μικροδικτύων και να διασφαλίσουν τη δυνατότητα Blackstart. Αυτό σημαίνει ότι οι μικρές κοινότητες ή περιοχές μπορούν να αντιμετωπίσουν ανεξάρτητα τις κρίσεις ενέργειας και να αποκαταστήσουν τη λειτουργία τους με αποτελεσματικό τρόπο. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η επιτυχής υλοποίηση του Blackstart σε ένα μικροδίκτυο απαιτεί κατάλληλη προετοιμασία και σχεδιασμό. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη και την υλοποίηση συστημάτων αυτοματισμού, την αξιολόγηση της ικανότητας του μικροδικτύου να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις και τη δοκιμή της αποτελεσματικότητας των διαδικασιών και των συστημάτων. Στο μέλλον, αναμένεται ότι οι τεχνολογικές εξελίξεις θα ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα και την αυτονομία των μικροδικτύων, συμβάλλοντας στην αποκατάσταση της ηλεκτροδότησης μετά από κρίσεις, μειώνοντας την εξάρτηση από τα κεντρικά δίκτυα και εκμεταλλευόμενοι τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την αποθήκευση ενέργειας. Επιπλέον, η χρήση έξυπνων δικτύων (smart grids) και της τεχνολογίας Internet of Things (IoT) μπορεί να βελτιώσει την επίδοση και τη δυναμική ανταπόκριση των μικροδικτύων κατά τη διάρκεια του Blackstart. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν τη συλλογή και την ανάλυση δεδομένων από τις συσκευές και τους αισθητήρες στο δίκτυο, επιτρέποντας την αυτόματη ενεργοποίηση και ρύθμιση των απαραίτητων συστημάτων και εγκαταστάσεων κατά τη διαδικασία Blackstart.

Το Blackstart σαν φαινόμενο έκανε την εμφάνισή του τη δεκαετία του 1960 καθώς αποτελεί μία μέθοδο για άμεση επανεκκίνηση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας μετά από διακοπή ρεύματος ιδίως σε περιπτώσεις που απαιτείται η έγκαιρη ηλεκτροδότηση των εγκαταστάσεων. Στη σύγχρονη εποχή λόγω των τεχνολογικών εξελίξεων το Blackstart έχει εδραιωθεί ως βασική τεχνική των μικροδικτύων και έχει αυξηθεί η αξιοπιστία του σε σχέση με τα παλαιότερα χρόνια. Πλέον τα μικροδίκτυα είναι εξοπλισμένα με στοιχεία υψηλής τεχνολογίας καθώς και με ειδικευμένους αλγόριθμους για την διαχείριση του ρεύματος. Σημαντικό ρόλο για την εκτέλεση της διαδικασίας αυτής διαδραματίζουν οι σύγχρονες γεννήτριες. Οι συγκεκριμένες γεννήτριες αποτελούν το πρωταρχικό στοιχείο για την επανεκκίνηση του μικροδικτύου και ενεργοποιούνται άμεσα όταν ανιχνευτεί διακοπή ρεύματος

επιτρέποντας έτσι την σταδιακή εκκίνηση των υπολοίπων συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Επίσης θέτουν τις τιμές αναφοράς της τάσης και της συχνότητας του ρεύματος που θα τροφοδοτήσει το μικροδίκτυο και για το λόγο αυτό λαμβάνουν το ρόλο γεννήτριας συγχρονισμού (anchor generator). Ακόμα οι γεννήτριες αυτές αποτελούν μία οικονομική επιλογή καθώς με την αξιοποίησή τους τα μικροδίκτυα δεν εξαρτώνται από μεγάλες μπαταρίες που θα τα τροφοδοτήσουν σε περίπτωση ανάγκης, των οποίων το κόστος τους είναι υψηλό.

Το Blackstart προσφέρει πολυάριθμα οφέλη στα μικροδίκτυα με τα ακόλουθα να είναι τα σημαντικότερα εξ αυτών:

- **Ανεξαρτησία από το κεντρικό δίκτυο:** Ένα μικροδίκτυο που διαθέτει συστήματα Blackstart είναι σε θέση να ξεκινήσει ανεξάρτητα από το κεντρικό δίκτυο, χωρίς την ανάγκη να περιμένει να επανέλθει η τροφοδοσία από το κεντρικό δίκτυο.
- **Αξιοπιστία:** Η ικανότητα Blackstart αυξάνει την αξιοπιστία του μικροδικτύου, καθώς μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των ενδεχόμενων διακοπών ρεύματος και των προβλημάτων που προκαλούνται από τις φυσικές καταστροφές.
- **Ευελιξία:** Ένα μικροδίκτυο με δυνατότητα Blackstart μπορεί να επανέλθει στη λειτουργία του πολύ πιο γρήγορα από ότι θα ήταν δυνατό σε ένα μεγάλο κεντρικό δίκτυο, καθώς οι απαιτήσεις ισχύος είναι συνήθως μικρότερες.
- **Μείωση του κόστους επαναφοράς:** Με την εγκατάσταση συστημάτων Blackstart σε μικροδίκτυα, μπορεί να μειωθεί το κόστος για την επαναφορά της τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια μιας διακοπής ρεύματος.
- **Μείωση του χρόνου αποκατάστασης:** Με τη χρήση του Blackstart, ο χρόνος αποκατάστασης του μικροδικτύου μειώνεται σημαντικά, καθώς δεν απαιτείται η παροχή ενέργειας από το κεντρικό δίκτυο για την επανεκκίνηση του μικροδικτύου και επιλέγονται προκαθορισμένες πηγές ενέργειας των κοντινότερων περιοχών για άμεση και αξιόπιστη ηλεκτροδότηση.
- **Εξοικονόμηση ενέργειας:** Με το Blackstart, τα μικροδίκτυα μπορούν να επαναλειτουργήσουν με μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, καθώς δεν απαιτείται η παροχή ενέργειας από το κεντρικό δίκτυο.

Η τεχνική του "Blackstart" αντιπροσωπεύει μία αποτελεσματική λύση για την επαναφορά της λειτουργίας ενός δικτύου μετά από τη διακοπή της σύνδεσής του με το κεντρικό δίκτυο. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ορισμένα αρνητικά στοιχεία που προκύπτουν κατά την εφαρμογή αυτής της τεχνικής σε μικροδίκτυα:

- **Οικονομικό κόστος:** Η εφαρμογή της τεχνικής Blackstart μπορεί να απαιτήσει σημαντικά οικονομικά κόστη για την απόκτηση του απαραίτητου εξοπλισμού και των τεχνολογιών που απαιτούνται. Το κόστος των σύγχρονων γεννητριών που χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση του μικροδικτύου είναι υψηλό όπως και το κόστος για την συντήρηση και την αποκατάσταση τους. Επίσης το Blackstart μπορεί να επιφέρει απροσδόκητες οικονομικές επιβαρύνσεις λόγω ακραίων καταστάσεων που ενδέχεται να φθείρουν ή να καταστρέψουν στοιχεία του εξοπλισμού. Επιπλέον δεν μπορούν να παραληφθούν τα κόστη των καυσίμων, των ανταλλακτικών καθώς και γενικότερα των αναλώσιμων όπως και τα έξοδα για την εγκατάσταση των συστημάτων ελέγχου και επικοινωνιών τα οποία είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα.
- **Εξάρτηση από το μέγεθος του μικροδικτύου:** Η απόδοση της τεχνικής Blackstart διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του μικροδικτύου. Ο χρόνος αποκατάστασης, η ποιότητα του ηλεκτρικού ρεύματος και η παροχή ενέργειας εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του μικροδικτύου και των στοιχείων που το απαρτίζουν. Αυτό απαιτεί την προσαρμογή της τεχνικής για κάθε μοναδική περίπτωση.
- **Επιλεξιμότητα:** Η εφαρμογή της τεχνικής Blackstart δεν είναι εφικτή για όλα τα μικροδίκτυα, καθώς απαιτεί τη διαθεσιμότητα ειδικού εξοπλισμού και υποδομών που μπορεί να μην είναι διαθέσιμες σε όλες τις περιοχές. Το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του μικροδικτύου, καθώς και ο τύπος και ο βαθμός ανάπτυξης της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας.
- **Αστάθεια του μικροδικτύου:** Η εκκίνηση του μικροδικτύου με τη χρήση της τεχνικής Blackstart μπορεί να δημιουργήσει αστάθεια στο δίκτυο, καθώς η εκκίνηση των μονάδων παραγωγής ενέργειας μπορεί να επηρεαστεί από τις συνθήκες και την αστάθεια του συστήματος. Αυτό σχετίζεται με την πολυπλοκότητα του κάθε μικροδικτύου και των στοιχείων του.



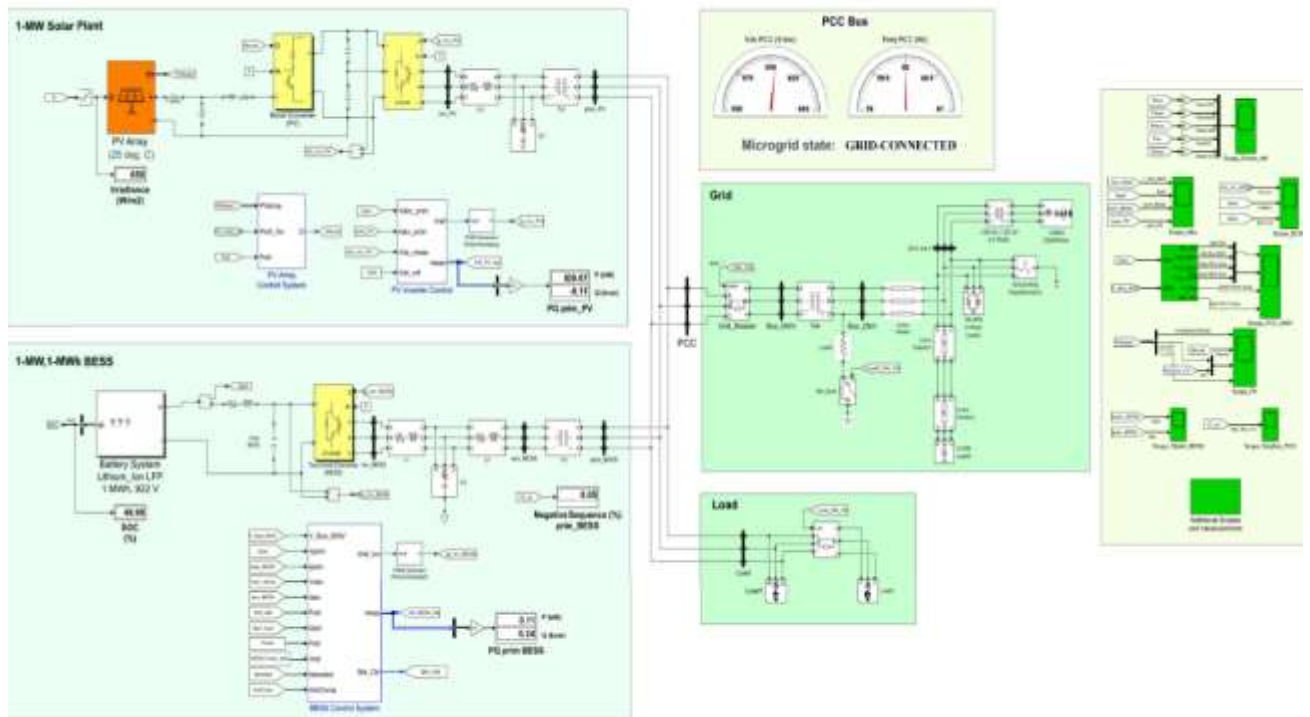
- **Ανάγκη σε πόρους:** Η εφαρμογή της τεχνικής Blackstart απαιτεί τη χρήση πολλών πόρων, όπως καύσιμα για την εκκίνηση των μονάδων παραγωγής ενέργειας, αποθήκευση ενέργειας και ανταλλακτικών. Η διαθεσιμότητα και η προμήθεια αυτών των πόρων μπορεί να αποτελέσει πρόκληση, ειδικά σε περιοχές όπου είναι δαπανηροί ή περιορισμένοι. Επομένως το τεχνικό προσωπικό πρέπει πάντοτε να μεριμνά για την ύπαρξη περίσσιας πόρων έτσι ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν σε οποιαδήποτε πρόκληση ή απρόοπτο γεγονός.
- **Κινδύνους που αφορούν την ασφάλεια του εξοπλισμού και του προσωπικού:** Η διακοπή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να προκαλέσει επικίνδυνες καταστάσεις για το προσωπικό και τον εξοπλισμό. Η επαναφορά του συστήματος μετά από μια διακοπή μπορεί να είναι επικίνδυνη, καθώς η αρχική επαναφορά ισχύος στο δίκτυο μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες καταστάσεις όπως υπερτάσεις και υπερθέρμανση, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε βλάβες στον εξοπλισμό και εργατικά ατυχήματα.

Γενικά, η τεχνική του Blackstart αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την ανάκτηση και την επαναφορά της ενέργειας σε μικροδίκτυα κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος. Ωστόσο, επιφέρει προκλήσεις και κινδύνους και για το λόγο αυτό απαιτεί ειδική προσοχή και προετοιμασία για να μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχημένα σε ένα μικροδίκτυο όταν παραστεί ανάγκη. Είναι αναγκαίο να δοθεί μεγάλη βαρύτητα κατά τον σχεδιασμό του μικροδικτύου με σκοπό να υποστηρίξει την διαδικασία. Επιπλέον είναι σημαντικό να υπάρχουν οι απαραίτητοι πόροι και υλικοτεχνικές υποδομές για την αποδοτική και ασφαλή εκτέλεση του Blackstart.

## Κεφάλαιο 6

### Εξομοίωση μικροδικτύου στο Simulink

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια εξομοίωση στο λογισμικό Simulink του MatLab και συγκεκριμένα στο Simscape Electrical/Specialized Power Systems (SPS) στην οποία έχει σχεδιαστεί ένα μικροδίκτυο αποτελούμενο από μια φωτοβολταϊκή μονάδα και ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας BESS. Το συγκεκριμένο μικροδίκτυο έχει την δυνατότητα να λειτουργεί τόσο συνδεδεμένο στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης (grid-following mode) όσο και αυτόνομα (grid-forming mode-λειτουργία σχηματισμού δικτύου) βασίζοντας την τροφοδοσία του με ρεύμα στην μονάδα φωτοβολταϊκών και στις μπαταρίες που διαθέτει. Στόχος της εξομοίωσης είναι η επιτυχημένη εκτέλεση μιας διαδικασίας νησιδοποίησης (Islanding) με απώτερο σκοπό την απόδειξη της αποδοτικότητας της μεθόδου. Κατά την διάρκεια της νησιδοποιημένης λειτουργίας του το μικροδίκτυο καλείται να καλύψει τις ανάγκες των καταναλωτών σε ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιώντας τα στοιχεία που διαθέτει.



Σχήμα 6.1: Απεικόνιση του μοντέλου του μικροδικτύου της εξομοίωσης.

Τα βασικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται το μοντέλο είναι τα εξής:

1. **Σύστημα διανομής:** Το ηλεκτρικό δίκτυο μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας ένα ισοδύναμο δίκτυο 120 kV, μετασχηματιστές και τροφοδότες 25 kV. Ένας τριφασικός διακόπτης και ένας μετασχηματιστής 25-kV/600V που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση του μικροδικτύου με το σύστημα διανομής.
2. **BESS:** Το μοντέλο του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία αποτελείται από ένα σύστημα μπαταρίας, έναν μετατροπέα δύο επιπέδων, ένα φίλτρο LCL και έναν μετασχηματιστή 480V/600V. Το BESS περιλαμβάνει επίσης ένα σύστημα ελέγχου που παράγει αναφορές τάσης ( $V_{ref}$ ) στη γεννήτρια PWM που ελέγχει τον μετατροπέα, καθώς και ένα σήμα ελέγχου (άνοιγμα/κλείσιμο) στον διακόπτη δικτύου. Το μοντέλο του συστήματος μπαταριών αποτελείται από κυψέλες φωσφορικού σιδήρου ιόντων λιθίου (LFP) των 3,2V, 14Ah. Είναι διατεταγμένες σε διάφορες μονάδες κυψελών (72 μονάδες των 4 κυψελών) συνδεδεμένες σε σειρά για να σχηματίσουν μία συστοιχία μπαταριών 922V. Το σύστημα μπαταριών του μοντέλου έχει 80 συστοιχίες μπαταριών συνδεδεμένες παράλληλα για να σχηματίσει ένα σύστημα ονομαστικής ισχύος 1 MWh. Το μοντέλο τριφασικού μετατροπέα δύο επιπέδων που χρησιμοποιείται στο παράδειγμα είναι τύπου Switching Function. Μαζί με τη γεννήτρια PWM με μέσο όρο παλμών, η οποία έχει συχνότητα μεταγωγής 2,7 kHz, το σύστημα μπορεί να προσομοιωθεί με ακρίβεια με χρονικό βήμα 40  $\mu$ s.

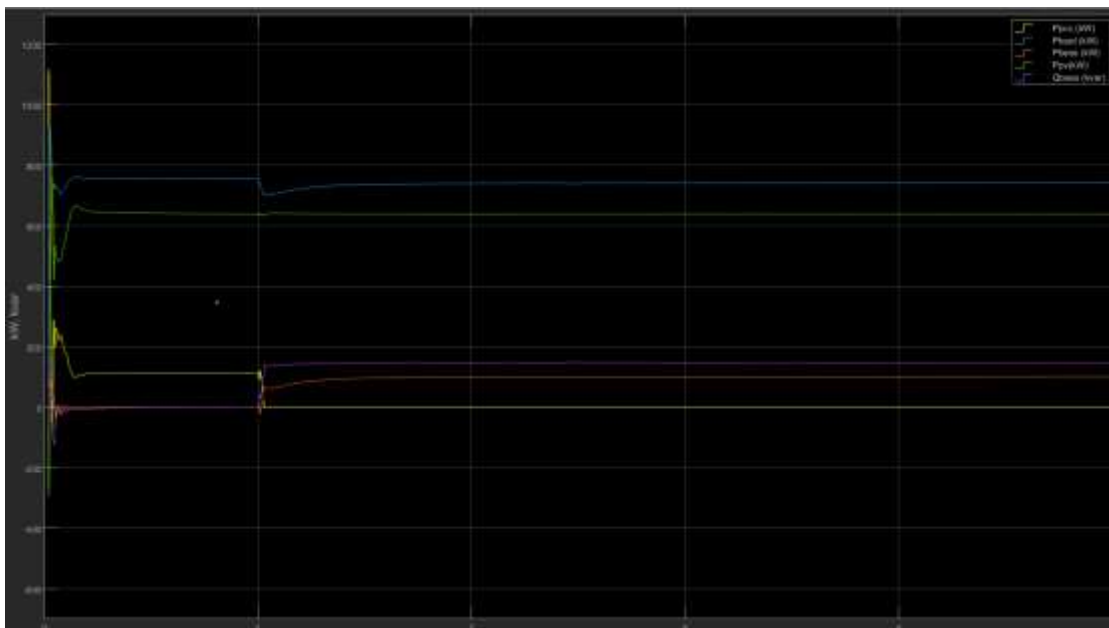
Τα βασικά στοιχεία του συστήματος ελέγχου του BESS είναι τα ακόλουθα:

- **Μονάδα επανασυγχρονισμού:** Εάν το μικροδίκτυο επανασυνδεθεί με το σύστημα διανομής χωρίς συγχρονισμό, θα συμβεί μια εκτός φάσης επανασύνδεση και θα δημιουργηθούν πολύ μεγάλα ρεύματα εισροής. Για να αποφευχθεί αυτό, η μονάδα επανασυγχρονισμού θα φέρει την τάση του μικροδικτύου σε φάση με την τάση του συστήματος διανομής πριν από το επανακλείσιμο του διακόπτη δικτύου. Αυτό θα διασφαλίσει την απρόσκοπτη επανασύνδεση με το σύστημα διανομής. Η διαδικασία συγχρονισμού θα διαρκέσει 3 δευτερόλεπτα. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι ρυθμιστές

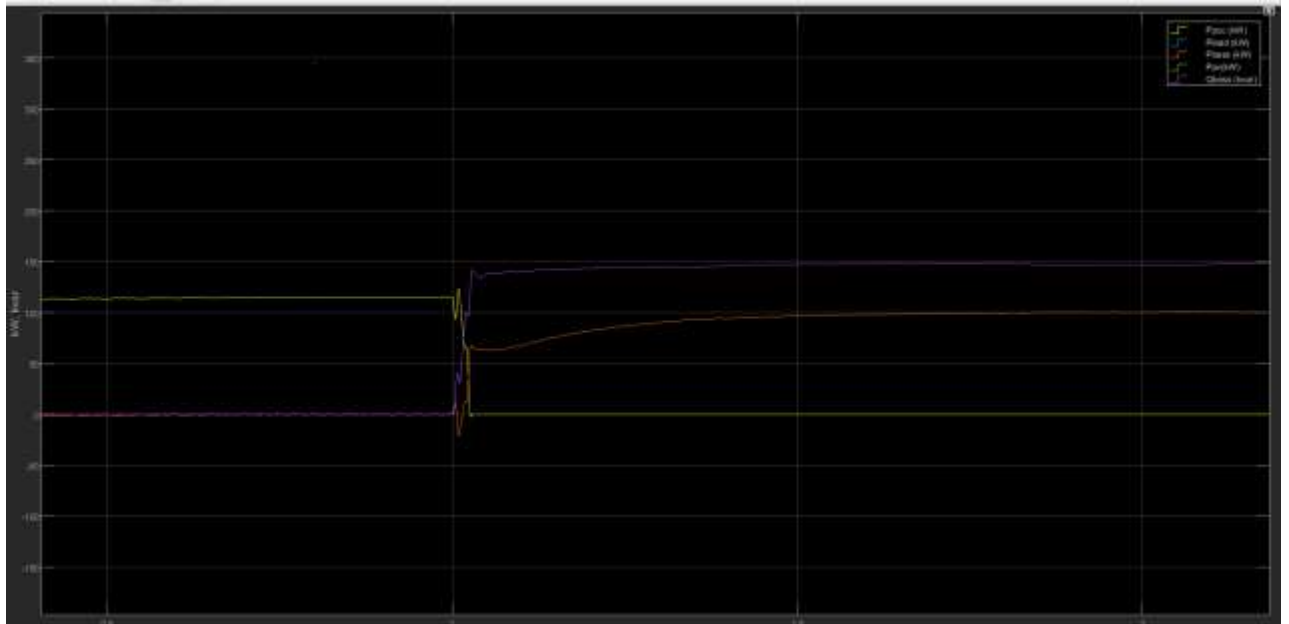
- PI θα κάνουν σταδιακά την τάση και τη συχνότητα του μικροδικτύου ίσες με το κύριο δίκτυο.
- **Έλεγχος Droop:** Στη λειτουργία σχηματισμού δικτύου, το BESS πρέπει να ελέγχει τόσο τη συχνότητα όσο και την τάση του μικροδικτύου. Το BESS έχει ένα Droop P/F ρυθμισμένο στο 0,5%, που σημαίνει ότι η συχνότητα του μικροδικτύου επιτρέπεται να κυμαίνεται από 60,3 Hz (ο αντιστροφέας απορροφά την ονομαστική ενεργό ισχύ του) έως 59,7 Hz (ο αντιστροφέας παράγει την ονομαστική ενεργό ισχύ του). Το droop Q/V ορίζεται στο 3%, που σημαίνει ότι η τάση μικροδικτύου στο διάλυο PCC επιτρέπεται να μεταβάλλεται από 609 Vrms (ο αντιστροφέας απορροφά την πλήρη επαγωγική του ισχύ) έως 582 Vrms (ο αντιστροφέας παράγει την πλήρη χωρητική του ισχύ).
  - **Μέτρηση:** Το υποσύστημα μέτρησης υπολογίζει την ενεργό και την άεργο ισχύ που παράγει ο αντιστροφέας. Υπολογίζει επίσης τις συνιστώσες d-q των τριφασικών τάσεων και ρευμάτων στο διάλυο PCC (Point of Common Coupling) του μικροδικτύου.
3. **Φορτίο 600V:** Η απλή αναπαράσταση του φορτίου αποτελείται από ένα σταθερό μοντέλο τριφασικού φορτίου (PQ) και ένα δεύτερο μοντέλο φορτίου PQ που μπορεί να ενεργοποιηθεί/απενεργοποιηθεί.
4. **Ηλιακή εγκατάσταση:** Η ηλιακή εγκατάσταση αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία που μπορεί να παράγει 1 MW σε ηλιακή ακτινοβολία 1000 W/m<sup>2</sup> και θερμοκρασία κυττάρων 25°C. Η συστοιχία είναι συνδεδεμένη με έναν μετατροπέα ανύψωσης. Η ανύψωση ελέγχεται από ένα σύστημα εντοπισμού σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Το MPPT χρησιμοποιεί την τεχνική Perturb and Observe για να μεταβάλλει την τάση στους ακροδέκτες της φωτοβολταϊκής συστοιχίας προκειμένου να εξάγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Ωστόσο, η ενίσχυση θα ελέγχεται από έναν ενεργό ρυθμιστή ισχύος όταν απαιτείται λειτουργία περιορισμού. Η έξοδος των μετατροπέων ανύψωσης συνδέεται σε διάλυο συνεχούς ρεύματος 1000V. Ένας μετατροπέας τριών επιπέδων NPC (συχνότητα μεταγωγής 2340 Hz)

μετατρέπει τα 1000V DC σε περίπου 500V AC. Ο μετατροπέας NPC ελέγχεται από έναν ρυθμιστή τάσης συνεχούς ρεύματος, του οποίου η αρμοδιότητα είναι να διατηρεί την τάση DC link στα 1000V, ανεξάρτητα από την ποσότητα ενεργού ισχύος που παρέχεται από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Για τη σύνδεση του μετατροπέα με το μικροδίκτυο χρησιμοποιούνται ένα φίλτρο LC και ένας τριφασικός μετασχηματιστής ζεύξης 480V/600V 1-MVA.

Στην δοκιμή που διενεργείται το μικροδίκτυο αποκόπτετε από το κεντρικό δίκτυο και μεταβαίνει από την συνδεδεμένη κατάσταση (grid-following mode) σε αυτόνομη κατάσταση (grid-forming mode).



**Σχήμα 6.2:** Διάγραμμα ενδείξεων του παλμογράφου για την διαδικασία του *Islanding*.



**Σχήμα 6.3:** Αναλυτικότερη απεικόνιση του παλμογράφου στο σημείο που εκτελείται το *Islanding*.

Από τον παλμογράφο λαμβάνονται δεδομένα σχετικά με την λειτουργία των βασικών στοιχείων του μικροδικτύου όπου για το κάθε στοιχείο υπάρχει μια χαρακτηριστική καμπύλη με διαφορετικό χρώμα. Η κίτρινη καμπύλη αφορά μετρητή ενεργού ισχύος (kW) ο οποίος είναι τοποθετημένος στο σημείο σύζευξης του μικροδικτύου με το κυρίως δίκτυο (PCC), η πορτοκαλί καμπύλη αφορά την ενεργό ισχύ (kW) του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και η μωβ την άεργο ισχύ του (kvar). Η πράσινη καμπύλη σχετίζεται με την ενεργό ισχύ (kW) της μονάδας των φωτοβολταϊκών και η μπλε καμπύλη με την ενεργό ισχύ (kW) του φορτίου του δικτύου.

Στον παλμογράφο παρατηρείται ότι στο διάστημα από 0 μέχρι 1sec το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το κυρίως δίκτυο και τροφοδοτείται από αυτό. Για το λόγο αυτό η κίτρινη καμπύλη βρίσκεται σταθερά στα 110 kW μέχρι την στιγμή που το μικροδίκτυο θα αποκοπεί από το κεντρικό δίκτυο. Παράλληλα από την πράσινη καμπύλη παρατηρείται ότι η μονάδα των φωτοβολταϊκών λειτουργεί υπο σταθερές συνθήκες σε όλη την διάρκεια της διαδικασίας και η ενεργός ισχύς της βρίσκεται στα 650 kW περίπου. Στην μονάδα φωτοβολταϊκών βασίζει τη φόρτισή του το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (BESS). Στο διάστημα που το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το κυρίως δίκτυο η συστοιχία των μπαταριών (BESS) είναι ανενεργή και η τιμή της ενεργού και της άεργου ισχύος της είναι μηδενική. Επίσης το φορτίο του δικτύου κατά τη διασυνδεδεμένη λειτουργία βρίσκεται περίπου στα 740 kW και παραμένει

σταθερό. Στο 1 sec το μικροδίκτυο αποκόπτεται από το κυρίως δίκτυο και μπαίνει σε αυτόνομη λειτουργία (grid-forming mode-λειτουργία σχηματισμού δικτύου). Το γεγονός αυτό είναι εμφανές από τη κίτρινη καμπύλη που αφορά την ισχύ στο PCC και πέφτει απότομα στα 0 kW καθώς αποκόπτεται η τροφοδοσία του μικροδικτύου από το κεντρικό δίκτυο. Το γεγονός αυτό αποτελεί μια κατάσταση νησιδοποίησης (Islanding) και το μικροδίκτυο καλείται να λειτουργήσει ανεξάρτητα χρησιμοποιώντας ως μοναδική πηγή ισχύος το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (BESS) που διαθέτει. Με την έναρξη της νησιδοποιημένης κατάστασης ενεργοποιείται άμεσα το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας το οποίο ενώ πριν βρισκόταν στα 0 kW για την ενεργό ισχύ του και στα 0 kvar για την άεργο ισχύ του, ανέρχεται στα 100 kW για την ενεργό και στα 148 kvar περίπου για την άεργο ισχύ. Το φορτίο του δικτύου πριν την νησιδοποίηση κυμαινόταν μεταξύ 750 και 760 kW και κατά την αυτόνομη λειτουργία η τιμή του βρίσκεται μεταξύ 740 και 750 kW. Η τιμή του φορτίου του μικροδικτύου παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της αυτόνομης λειτουργίας κάτι το οποίο δηλώνει την επιτυχημένη εκτέλεση του νησιδοποίησης και φανερώνει το γεγονός του ότι το μικροδίκτυο παραμένει ενεργό και είναι ικανό να τροφοδοτεί τους φόρτους του με ηλεκτρικό ρεύμα ικανοποιητικής και σταθερής ισχύος.

## Συμπέρασμα

Συνοψίζοντας, στην παρούσα εργασία αναλύθηκε η εξέλιξη και τα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τα μικροδίκτυα καθώς και μέθοδοι για τον έλεγχο και την ομαλή λειτουργία τους. Έγινε εκτενής αναφορά σε δύο πολύ σημαντικές λειτουργίες που αφορούν τα μικροδίκτυα, συγκεκριμένα το Islanding και το Blackstart, τα οποία τους επιτρέπουν να λειτουργήσουν είτε ως συνδεδεμένα στο κυρίως δίκτυο είτε αυτόνομα για το Islanding όπως και να ανακάμψουν άμεσα μετά από διακοπή ρεύματος όσον αφορά στο Blackstart, προσφέροντας πλεονεκτήματα και οφέλη σε πολλά επίπεδα. Η λειτουργία Islanding, η οποία αναφέρεται στην αυτονομία του μικροδικτύου, αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την αποφυγή διακοπών ρεύματος. Όταν το κυρίως δίκτυο αντιμετωπίζει προβλήματα ή διακοπές ρεύματος, τα μικροδίκτυα που μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα μπορούν να παράγουν και να παρέχουν ενέργεια στους φόρτους τους. Αυτό είναι κρίσιμο για κατανομημένες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, που μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν ακόμη και όταν το κύριο δίκτυο αποσυνδεθεί. Από την άλλη πλευρά, η λειτουργία Blackstart αφορά την επανεκκίνηση του μικροδικτύου μετά από μια διακοπή ρεύματος. Αυτή η διαδικασία είναι κρίσιμη για την αποκατάσταση της ηλεκτροδότησης μετά από ένα σοβαρό περιστατικό, όπως μια βλάβη στο κύριο δίκτυο. Οι λειτουργίες Blackstart περιλαμβάνουν την εκκίνηση και συγχρονισμό των γεννητριών και την ανάκτηση της σταθερότητας τάσης και συχνότητας στο μικροδίκτυο. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική επανεκκίνηση του μικροδικτύου και την ομαλή επανένταξη στο κύριο δίκτυο. Οι δύο αυτές λειτουργίες παρέχουν πολλά οφέλη για τα μικροδίκτυα. Η ικανότητα να λειτουργούν σε λειτουργία νήσου επιτρέπει την αυτονομία και την αντοχή στις διακοπές ρεύματος, ενώ η λειτουργία Blackstart εξασφαλίζει την γρήγορη αποκατάσταση της ηλεκτροδότησης μετά από ένα περιστατικό. Αυτά τα χαρακτηριστικά ενισχύουν την αξιοπιστία, την ασφάλεια και την αποδοτικότητα των μικροδικτύων, και συμβάλλουν στην προώθηση της αειφορίας και της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιπλέον, οι λειτουργίες Islanding και Blackstart ενισχύουν την ευελιξία των μικροδικτύων, καθώς τους επιτρέπουν να αλλάζουν ανάλογα με τις συνθήκες και τις ανάγκες του συστήματος. Με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών ελέγχου και μετατροπών σχηματισμού δικτύου (grid-forming inverters),



είναι δυνατή η ασφαλής μετάβαση του μικροδικτύου σε λειτουργία νήσου και η διατήρηση της σταθερότητας του συστήματος. Η ενδεδειγμένη έρευνα σε αυτούς τους τομείς συμβάλλει στην ανάπτυξη βελτιωμένων μεθόδων και τεχνολογιών που εξασφαλίζουν την ομαλή και ασφαλή λειτουργία των μικροδικτύων. Εν κατακλείδι, η υιοθέτηση των λειτουργιών Islanding και Blackstart στα σύγχρονα μικροδίκτυα είναι κρίσιμη για την επίτευξη βιώσιμων, αξιόπιστων και αποδοτικών συστημάτων ενέργειας. Αυτές οι λειτουργίες ενισχύουν την αυτονομία, την ανθεκτικότητα και την ευελιξία των μικροδικτύων, ενώ συμβάλλουν στην επίτευξη των στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης και της αειφορίας στον τομέα της ενέργειας. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη σε αυτούς τους τομείς είναι κρίσιμη για τη βελτίωση των μικροδικτύων και την επέκταση της χρήσης τους σε παγκόσμιο επίπεδο.

## Αναφορές

[1] Ντίνος Χαραλαμπίδης PV Technology Laboratory, FOSS, University of Cyprus. Βασικές αρχές μικροδικτύων και η συμβολή τους στην αποτελεσματική διαχείριση των τοπικών ενεργειακών πόρων.

[https://www.oeb.org.cy/wp-content/uploads/2019/09/05-Examples-microgrids\\_CCharalambides.pdf](https://www.oeb.org.cy/wp-content/uploads/2019/09/05-Examples-microgrids_CCharalambides.pdf)

[2] Adam Hirsch., Yael Parag., Josep Guerrero (2018). Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211830128X>

[3] D.E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A.H. Etemadi, C.A. Canizares, R. Iravani, M. Kazerani, et al. Trends in microgrid control IEEE Trans Smart Grid, 5 (2014), pp. 1905-1919

<https://ieeexplore.ieee.org/document/6818494>

[4] F. Martin-Martínez, A. Sánchez-Miralles, M. Rivier A literature review of microgrids: a functional layer based classification Renew Sustain Energy Rev, 62 (2016), pp. 1133-1153

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116301356>

[5] L. Mariam, M. Basu, M.F. Conlon Microgrid: architecture, policy and future trends Renew Sustain Energy Rev, 64 (2016), pp. 477-489

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116302635>

[6] Παύλος Σ. Γεωργιλάκης., Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

<https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2013/3/Georgilakis-Full-KOY.pdf>

[7] Hossein Shayeghi., Masoud Alilou., Distributed generation and microgrids, Hybrid Renewable Energy Systems and Microgrids 2021, Pages 73-102

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128217245000064>

[8] G.V.S. Raj Kumar., B. Raj Koti, in Sustainable Networks in Smart Grid, 2022

<https://www.sciencedirect.com/book/9780323856263/sustainable-networks-in-smart-grid#book-description>

[9] Mark Adamiak , Drew Baigent, Ralph Mackiewicz IEC 61850 Communication Networks and Systems In Substations

<https://www.gegridsolutions.com/multilin/journals/issues/spring09/iec61850.pdf>

[10] Munir Majdalawieh, Francesco Parisi Presicce, Duminda Wijesekera, DNPsec: Distributed Network Protocol Version 3 (DNP3) security framework

[https://www.researchgate.net/publication/227065336\\_DNPsec\\_Distributed\\_Network\\_Protocol\\_Version\\_3\\_DNP3\\_security\\_framework](https://www.researchgate.net/publication/227065336_DNPsec_Distributed_Network_Protocol_Version_3_DNP3_security_framework)

[11] Ricardo J. Rodriguez, Stefano Maronne, Ibai Marcos, Giuseppe Porzio, MOSTO: A toolkit to facilitate security auditing of ICS devices using Modbus/TCP, Computers & Security Volume 132

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167404823002833>

[12] Alok Jain, Suman Bhullar, Network performance evaluation of smart distribution systems using smart meters with TCP/IP communication protocol, Energy Reports Volume 8, Supplement 10, November 2022, Pages 19-34

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722009568>

[13] Dimitrios Tzelepis, Protection, Fault Location & Control in High Voltage Multi Terminal Direct Current (HV-MTDC), Grids December 2017

<https://stax.strath.ac.uk/concern/theses/sj139198j>

[14] Saif Jamal Mahdi, Nandia M. L. Tan, Jagadeesh Pasupuleti, A Review of Energy Management and Power Management Systems for Microgrid and Nanogrid Applications September 2021

[https://www.researchgate.net/publication/354754894\\_A\\_Review\\_of\\_Energy\\_Management\\_and\\_Power\\_Management\\_Systems\\_for\\_Microgrid\\_and\\_Nanogrid\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/354754894_A_Review_of_Energy_Management_and_Power_Management_Systems_for_Microgrid_and_Nanogrid_Applications)

[15] Amandeep Kaur, Prasenjit Basak, A review on microgrid central controller, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115012204>

[16] Belwin J Brearley, Raja Prabu Ramachandran, A review on issues and approaches for microgrid protection June 2021

[https://www.researchgate.net/publication/352020397\\_A\\_review\\_on\\_issues\\_and\\_approaches\\_for\\_microgrid\\_protection](https://www.researchgate.net/publication/352020397_A_review_on_issues_and_approaches_for_microgrid_protection)

[17] Sara Anttila, Jéssica S. Döhler, Janaína G. Oliveira, Cecilia Boström, Grid Forming Inverters: A Review of the State of the Art of Key Elements for Microgrid Operation

<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/15/5517>

[18] Ioan Serban, Catalin Petrea Ion, Microgrid control based on a grid-forming inverter operating as virtual synchronous generator with enhanced dynamic response capability, International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 89, July 2017, Pages 94-105

[https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061516320725?fbclid=IwAR2QHEviH7jFG9ILKvFE9sap3mX2ZBLL3Un6ozhacKeatdTk7\\_ax\\_y\\_N7r0](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061516320725?fbclid=IwAR2QHEviH7jFG9ILKvFE9sap3mX2ZBLL3Un6ozhacKeatdTk7_ax_y_N7r0)

[19] National Grid ESO, Black Start from Non-Traditional Generation Technologies, Network Innovation Allowance June 2019 Technology capability and readiness for distributed restoration

<https://www.nationalgrideso.com/document/148201/download>

[20] A. Cagnano, E. De Tuglie, P. Mancarella, Microgrids: Overview and guidelines for practical implementations and operation, Applied Energy Volume 258, 15 January 2020

[https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030626191931726X?fbclid=IwAR3ze2\\_5aF3vf4G54ltUjcIDUaLu6Uml3gkqFDXR2G1SC6O8GIK-heAg-6k](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030626191931726X?fbclid=IwAR3ze2_5aF3vf4G54ltUjcIDUaLu6Uml3gkqFDXR2G1SC6O8GIK-heAg-6k)

[21] National Grid, Black Start Strategy Produced in accordance with Standard Condition C16 of the NGET Transmission Licence Aug 2017.

<https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/High%20Level%20Black%20Start%20Strategy.pdf>

[22] H. Laaksonen, K. Kauhaniemi, Control Principles for Blackstart and Island Operation of Microgrid

<http://lib.tkk.fi/Conf/2008/urn011614.pdf>

[23] Mohsen Tajdinian, Mostafa Mohammadpourfard, Yang Weng, Istemihan Genc, Preserving microgrid sustainability through robust islanding detection scheme ensuring cyber-situational awareness, Sustainable Cities and Society Volume 96, 2023

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670723002032?fbclid=IwAR3u8w7KAB5GM3Dwgmugkui9e6hKmCQ9HkDGmd1-8Uty7qf3rqYDXFA2iB0>

[24] Alvaro Llaría, Octavian Curea, Jaime Jiménez, Haritza Camblong, Survey on microgrids: Unplanned islanding and related inverter control techniques, Renewable Energy Volume 36, Issue 8, August 2011, Pages 2052-2061

[https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148111000176?fbclid=IwAR3A0BUU\\_j0\\_XRHaQd-xn78UAHSIUIFyVrL5ikWVKENo64BQ1v8U2zXiD5s](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148111000176?fbclid=IwAR3A0BUU_j0_XRHaQd-xn78UAHSIUIFyVrL5ikWVKENo64BQ1v8U2zXiD5s)

[25] Yuko Hirase, Kensho Abe, Kazushige Sugimoto, Kenichi Sakimoto, Hassan Bevrani, Toshifumi Ise, A novel control approach for virtual synchronous generators to suppress frequency and voltage fluctuations in microgrids, Applied Energy Volume 210, 15 January 2018, Pages 699-710

[https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261917308097?fbclid=IwAR1MySfuG0DmcVH\\_1d4AlaCWxDu0BjUWXsYkFWGPKFhvCQXdVFT2gaxS698](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261917308097?fbclid=IwAR1MySfuG0DmcVH_1d4AlaCWxDu0BjUWXsYkFWGPKFhvCQXdVFT2gaxS698)

[26] National grid ESO, Power Engineering and Trials Demonstration of Black Start from DERs (Live Trials Report) Part 1 December 2021

<https://www.nationalgrideso.com/document/226951/download>

[27] Canbing Li, Chi Cao, Yijia Cao, Yonghong Kuang, Long Zeng, Baling Fang, A review of islanding detection methods for microgrid, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 35, July 2014, Pages 211-220

<https://www.nationalgrideso.com/document/226951/download>

[28] Yuri Rodrigues, Máira Monteiro, Morad Abdelaziz, Liwei Wang, Antonio Z. de Souza, Paulo Ribeiro, Improving the autonomy of islanded microgrids through frequency regulation, International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 115, February 2020

[https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061519315340?fbclid=IwAR30fc\\_yebNBBKcf\\_KheAG8CEQhW-qq9gbu3q08fF\\_nYXOoKw-qZIC86AXs](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061519315340?fbclid=IwAR30fc_yebNBBKcf_KheAG8CEQhW-qq9gbu3q08fF_nYXOoKw-qZIC86AXs)

[29] Grid Modernization Technologies

<https://www.hawaiielectric.com/clean-energy-hawaii/grid-modernization-technologies>

Αναφορές σχημάτων

[1] <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/1/303>

- [2] [https://www.researchgate.net/figure/Solar-Photovoltaic-hybrid-diagram-and-AC-Microgrid-connected-wind-turbine-network\\_fig1\\_352494392](https://www.researchgate.net/figure/Solar-Photovoltaic-hybrid-diagram-and-AC-Microgrid-connected-wind-turbine-network_fig1_352494392)
- [3] <https://pv-magazine-usa.com/2020/04/08/ges-grid-forming-inverter-aims-to-make-solar-wind-look-like-traditional-generators/>
- [4] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671122000079>