

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ



Σχολή Μηχανικών

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής

Διπλωματική Εργασία

Τίτλος

**Στρατηγικές Blackstart σε σύγχρονα μικροδίκτυα με υψηλή
διείσδυση ανανεώσιμων πηγών και στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας**

Κωνσταντίνος Καραμανλής

A.M. 222017120

Επιβλέπων Καθηγητής

Νικόλαος Λάσκαρης

Αθήνα, Ιούλιος 2023

UNIVERSITY OF WEST ATTICA



**SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL DESIGN AND PRODUCTION
ENGINEERING**

Diploma Thesis

Title

**Blackstart Strategies In Modern Microgrids With High Penetration
Of Renewable And Energy Components**

Konstantinos Karamanles

Registration Number:222017120

Supervision:

Nikolaos Laskaris

Athens, July 2023

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του
Εισηγητή**

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

No	Όνοματεπώνυμο και Ιδιότητα	Ψηφιακή Υπογραφή
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 Καραμανλής Κωνσταντίνος με αριθμό μητρώου 222017120 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



Καραμανλής Κωνσταντίνος

Περίληψη.....	8
Αναγνωρίσεις.....	10
Κεφάλαιο 1: Μικροδίκτυα.....	11
1.1 Εισαγωγή στα μικροδίκτυα.....	11
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	12
1.3 Πλεονεκτήματα των μικροδικτύων.....	14
1.4 Εξοπλισμός των μικροδικτύων.....	16
1.5 Η ένταξη των ΑΠΕ στα μικροδίκτυα και οι προκλήσεις από την χρήση τους.....	28
1.6 Βασικά είδη δικτύων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας στα μικροδικτύων.....	29
Κεφάλαιο 2: Έλεγχος.....	32
2.1 Έλεγχος των μικροδικτύων.....	32
2.2 Οι αρμοδιότητες και οι λειτουργίες του CC (Central Controller- Κεντρικός Ελεγκτής).....	33
2.3 EMM (Energy Management Module -Εφαρμογή Διαχείρισης Ενέργειας).....	33
2.3.1 Έλεγχος τάσης.....	34
2.3.2 Έλεγχος στροφών κινητήριας μηχανής.....	34
2.3.3 Ρύθμιση της συχνότητας.....	34
2.3.4 Έλεγχος του συντελεστή ισχύος.....	35

2.4 PCM (Protection Coordination Module-Μονάδα συντονισμού Προστασίας).....	35
2.4.1 Προστασία κατά την διασυνδεδεμένη λειτουργία.....	36
2.4.2 Προστασία κατά την αυτόνομη λειτουργία.....	38
2.5 Μέθοδοι βελτιστοποίησης της ροής ισχύος.....	39
2.6 Δομές ελέγχου (Control Structures).....	40
Κεφάλαιο 3: Grid forming inverters (GFI).....	43
3.1 Εισαγωγή στους grid forming inverters.....	43
3.1.1 Τι είναι οι grid forming inverters.....	44
3.1.2 Ποιες οι λειτουργίες των GFI στα μικροδίκτυα.....	44
3.2 Πλεονεκτήματα-Προκλήσεις.....	45
3.3 Που τοποθετούνται τα GFI στα μικροδίκτυα.....	47
Κεφάλαιο 4: Blackstart.....	50
4.1 Εισαγωγή στο Blackstart.....	50
4.2 Τι είναι το Blackstart.....	51
4.3 Ιστορική αναδρομή.....	52
4.4 Πως επιτυγχάνεται το Blackstart με την χρήση σύγχρονων γεννητριών.....	54
4.5 Σύγχρονες γεννήτριες.....	57
4.6 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	59
4.7 Προκλήσεις και τρόποι αντιμετώπισης.....	62

4.8 Παράδειγμα Blackstart.....	65
Κεφάλαιο 5: Islanding.....	74
Κεφάλαιο 6: Υλοποίηση μικροδικτύου στο Simulink και εκτέλεση διαδικασίας επανασυγχρονισμού.....	77
Συμπέρασμα.....	84
Κατάλογος αναφορών.....	85

Περίληψη

Ως πλέον αναπόσπαστη πτυχή του κυρίως δικτύου ηλεκτροδότησης, τα σύγχρονα μικροδίκτυα (microgrids) καθίστανται παρομοίως επιρρεπή αλλά και σε μεγαλύτερο εύρος παραγόντων που ενδέχεται να οδηγήσουν σε διακοπές ρεύματος (blackouts). Μεγάλη ευθύνη επιρρίπτεται στην εκτεταμένη χρήση αποκεντρωμένων ανανεώσιμων πηγών αλλά και στα πολλαπλά στοιχεία δικτυωμένων υποσυστημάτων ευπρόσβλητων σε κυβερνοεπιθέσεις, αμφότερα χαρακτηριστικά των μικροδικτύων. Προκειμένου να αποκατασταθεί άμεσα η ισχύς μετά από διακοπή ρεύματος, θα πρέπει να αναπτυχθεί μία αποτελεσματική μεθοδολογία αποκατάστασης (Black Start). Κατά τη διπλωματική εργασία θα διεξαχθεί μία ενδεδειγμένη έρευνα συμβατικών αλλά και σύγχρονων τεχνικών αποκατάστασης με εστίαση στα στοιχεία που διαθέτουν τα μικροδίκτυα για αυτό το σκοπό όπως οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας (BESS) και οι σύγχρονες γεννήτριες.

Abstract

As the most integral aspect of the main power grid, modern microgrids are becoming similarly susceptible but also to a wider range of factors that may lead to blackouts. Much of the blame is placed on the extensive use of decentralized renewables and the multiple elements of networked subsystems vulnerable to cyber-attacks, both characteristics of microgrids. In order to immediately restore power after a power outage, an effective restoration methodology (Black Start) should be developed. In the thesis, a thorough investigation of conventional and modern restoration techniques will be carried out, focusing on the elements available in microgrids for this purpose such as BESSs and synchronous generators.

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

Τα μικροδίκτυα αποτελούν δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία εμπεριέχουν άλλα επιμέρους δίκτυα χαμηλής τάσης (ΧΤ). Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από τις πηγές από τις οποίες αντλούν ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να είναι κύτταρα καυσίμου, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά), μικρογεννήτριες, γεννήτριες Diesel κτλ.. Η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας οι οποίες αποτελούν το δεύτερο βασικό μέρος των μικροδικτύων και ενδέχεται να είναι ηλεκτρικοί συσσωρευτές και σφόνδυλοι. Επίσης το τρίτο από τα κύρια μέρη των μικροδικτύων είναι οι ελεγχόμενοι φόρτοι, οι οποίοι είναι οι εγκαταστάσεις που τροφοδοτούνται από το δίκτυο. Αναφορικά με τις πηγές ενέργειας, χρησιμοποιούνται οποιεσδήποτε μορφές συμβατικές ή μη.

Σε ένα μικροδίκτυο η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους φόρτους μέσω διαφόρων μεθόδων ελέγχου με σκοπό την καλύτερη δυνατή διαχείρισή της. Η λειτουργία των δικτύων μπορεί να είναι όντας συνδεδεμένα σε κεντρικό δημόσιο δίκτυο ή αυτόνομα σε κατάσταση islanding (νησιδοποίησης) αξιοποιώντας συστήματα ανανεώσιμων και μη πηγών ενέργειας. Τα μικροδίκτυα μπορούν να βρουν εφαρμογή σε οποιαδήποτε περιοχή και εγκατάσταση όπως σε πόλεις, σε βιομηχανικές μονάδες, νησιά κτλ και επιτρέπουν την ενεργειακή ανεξαρτησία τους κατά βούληση με σκοπό την διαχείριση της ενέργειας ανάλογα με τις απαιτήσεις σε ειδικές περιστάσεις αλλά και την άμεση αποκατάσταση του δικτύου σε απρόοπτες καταστάσεις. Επιπλέον εξυπηρετούν περιοχές που είτε είναι απομακρυσμένες είτε δεν είναι συνδεδεμένες σε κεντρικό δημόσιο δίκτυο είτε το δίκτυο του εμφανίζει μεγάλη αστάθεια.

Λόγω των συγχρόνων τεχνολογιών και των εξειδικευμένων μεθόδων ελέγχου που εφαρμόζονται στα μικροδίκτυα εξασφαλίζεται η αξιοπιστία, η βιωσιμότητα και η μέγιστη δυνατή οικονομία ενέργειας και πόρων.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Η αναβάθμιση των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ξεκίνησε από το 1954 με τα συστήματα της εποχής εκείνης. Αξιοσημείωτα έργα ήταν η υποθαλάσσια διασύνδεση συνεχούς ρεύματος του νησιού Gotland όπως και η χρήση μετατροπέων εναλλασσόμενου ρεύματος που χρησιμοποιούσαν βαλβίδες υδραργύρου. Έπειτα ακολούθησε η διασύνδεση της Σαρδηνίας το 1967 καθώς και η διασύνδεση του Ειρηνικού Ωκεανού που έγινε το 1970 και αποτέλεσε ένα ιδιαίτερα μεγάλης κλίμακας έργο. Στην συνέχεια ακολούθησε και η διασύνδεση Nelson River το 1973 και τα συγκεκριμένα έργα αποτέλεσαν την αρχή ραγδαίων τεχνολογικών εξελίξεων για τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Κομβικό σημείο αποτέλεσε η αντικατάσταση των βαλβίδων υδραργύρου με βαλβίδες θυρίστορ με την ασύγχρονη διασύνδεση (Back to Back) Quebec και New Brunswick το 1972. Στην συνέχεια από το 1972 και μετά έγινε εκτεταμένη η χρήση των μετατροπέων φυσικής μεταγωγής (line commutated) και των βαλβίδων θυρίστορ. Επίσης είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί η ανάπτυξη των διακοπτικών στοιχείων στερεάς κατάστασης που προσέφερε βελτιωμένες δυνατότητες ως προς τον χειρισμό μεγάλης ισχύος, τον έλεγχο του χρόνου σβέσης και τον έλεγχο της τάσης. Η ευρεία διάδοση και χρήση του εξοπλισμού αυτού στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συνέβαλε στην μείωση του κόστους του όπως και στην σχεδίαση ελεγκτών για τον έλεγχο ροής της άεργου και της πραγματικής ισχύος. Οι καινοτομίες αυτές οδήγησαν στην βελτίωση της μεταφορικής ικανότητας των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΜΗΕ) και από το 1986 η χρήση των συγκεκριμένων ελεγκτών άνοιξε τον δρόμο για την ανάπτυξη μιας νέας κατηγορίας συστημάτων μεταφοράς που ονομάστηκαν Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος (Flexible AC Transmission System (FACTS)). Αναλυτικά χρησιμοποιούνται στα ευέλικτα αυτά συστήματα προηγμένα μέσα αποστολής και λήψης σημάτων (οπτικές ίνες), εξειδικευμένα σε υψηλές τάσης, διακόπτες ισχύος στερεάς κατάστασης υψηλής ταχύτητας, εξελιγμένων επεξεργαστών και τέλος προχωρημένες θεωρίες ελέγχου.

Κατά το 1980 αναπτύχθηκε σημαντικά ο τομέας των ηλεκτρονικών ισχύος. Τα συστήματα αυτά επέτρεψαν την δημιουργία μετατροπέων ισχύος οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο το οποίο χρειάζεται το δίκτυο όπως και να διαμορφώνουν την συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος. Το

γεγονός αυτό αποτέλεσε εξέλιξη ιδιαίτερης σημασίας για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς ενσωματώθηκαν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) σε αυτά οι οποίες απαιτούν χρήση των συγκεκριμένων μετατροπέων. Συγκεκριμένα τα φωτοβολταϊκά σύστημα και τα κύτταρα καυσίμου τροφοδοτούν το δίκτυο με συνεχές ρεύμα το οποίο πρέπει να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο. Ακόμα οι ανεμογεννήτριες και οι μικροί υδροστρόβιλοι λόγω του ότι ενδέχεται να λειτουργούν σε μεταβλητές στροφές ανάλογα με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες βρίσκονται σε λειτουργία χρειάζονται μετατροπείς για την εξασφάλιση της καλύτερης δυνατής απόδοσης τους. Επιπροσθέτως οι συγκεκριμένοι μετατροπείς έχουν την δυνατότητα εξομάλυνσης της συχνότητας του δικτύου, οι οποία είναι αναμενόμενο να παρουσιάζει διακυμάνσεις. Όλες αυτές οι εξελίξεις στον τομέα της παραγωγής, της μεταφοράς και της διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας μετέτρεψαν τα δίκτυα σε ενεργητικά και διπλής κατεύθυνσης ισχύος σε αντίθεση με παλαιότερα που χαρακτηρίζονταν ως παθητικά και μιας κατεύθυνσης ισχύος. Πλέον η παραγωγή ενέργειας μπορεί να γίνει και αυτόνομα από συστήματα ενσωματωμένα στο δίκτυο και το γεγονός αυτό ονομάζεται Κατανεμημένη ή Διεσπαρμένη Παραγωγή (Distributed or Dispersed Generation (DG)). Στην συνέχεια από το 1991 και μετά τα ηλεκτρονικά ισχύος άρχισαν να αξιοποιούνται και για την βελτίωση των συστημάτων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που συνέβαλλε στην ραγδαία άνοδο της ποιότητας των υπηρεσιών. Κάτι το οποίο καθιέρωσε και τον όρο Ισχύς Καταναλωτών ή Ποιότητα Ισχύος, στοιχείο με βάση το οποίο αξιολογείται η αξιοπιστία και η ποιότητα των υπηρεσιών των παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας. Από το 2000 και έπειτα εισήχθη η ψηφιακή τεχνολογία η οποία προσέφερε προηγμένα προϊόντα και συστήματα για τον έλεγχο και την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κλασικοί αυτοματισμοί που χρησιμοποιούνται κατά κόρον μέχρι τότε στα συστήματα αυτά έδωσαν στην σειρά τους σε νέους εξελιγμένους με την αξιοποίηση ηλεκτρονικών υπολογιστών, προγραμματιζόμενων ελεγκτών, τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και προηγμένων τεχνολογιών αισθητήρων.

1.3 Πλεονεκτήματα των μικροδικτύων

Η σχεδίαση και η εγκατάσταση μικροδικτύων προσφέρει ένα μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων τόσο στις εγκαταστάσεις στις οποίες τροφοδοτούν όσο και σε ευρύτερο επίπεδο για τις περιοχές και γενικότερα για μία χώρα καθώς εξασφαλίζεται ένα καλύτερο μέλλον για τον τομέα της διανομής, της εξοικονόμησης και της διαχείρισης των ενεργειακών πόρων.

Από τα μικροδίκτυα μπορούν να επωφεληθούν διάφορα είδη περιοχών και εγκαταστάσεων που χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ανάγκες σε εξοπλισμό και ενέργεια όπως πόλεις, αγροκτήματα, νησιά, εγκαταστάσεις που επιτελούν κοινωνικό έργο, εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταποίησης προϊόντων όπως εργοστάσια οποιασδήποτε κλίμακας και βιοτεχνίες καθώς και περιοχές όπου η σύνδεσή τους σε ένα κεντρικό δίκτυο είναι ιδιαίτερα δύσκολη.

Η ενεργειακή κρίση όπως και η βελτιστοποίηση των υπηρεσιών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μία πρόκληση που καλούνται να αντιμετωπίσουν όλα τα κράτη του πλανήτη. Στα παγκόσμια ζητήματα αυτά τα μικροδίκτυα μπορούν να αποτελέσουν μία ιδανική λύση λόγω της δυνατότητας που έχουν να προσαρμόζονται στις εκάστοτε συνθήκες.

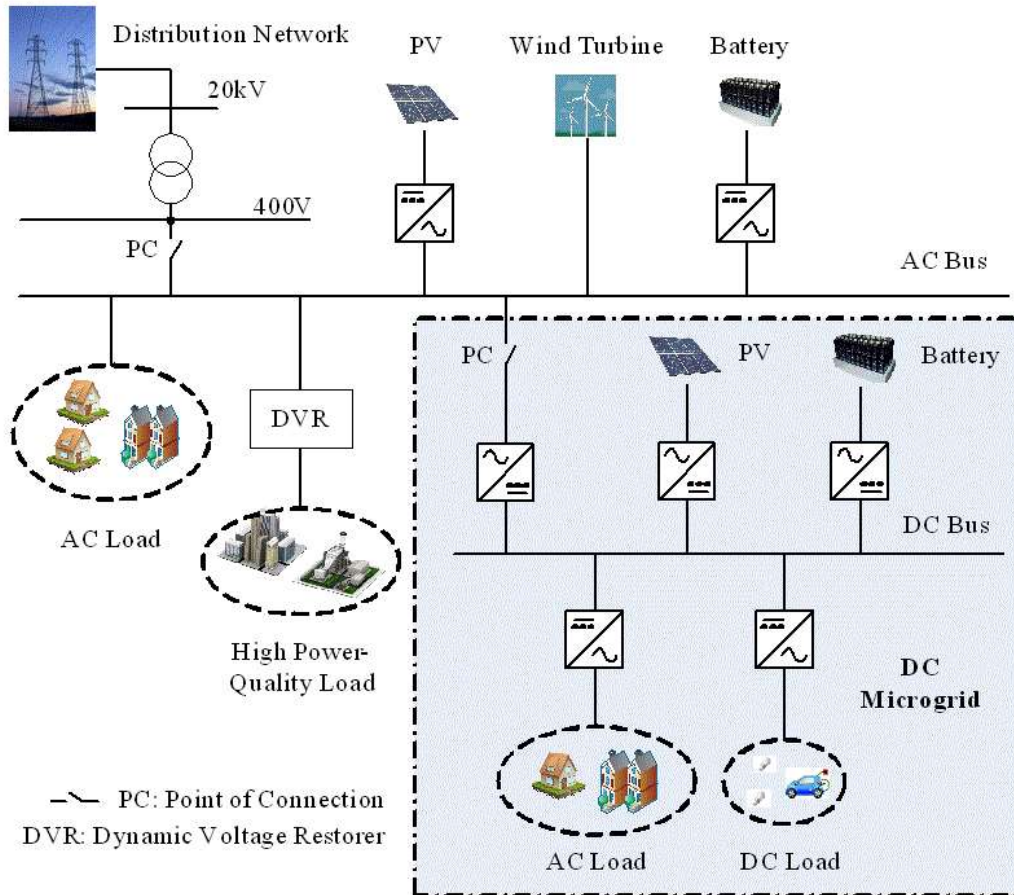
Πιο συγκεκριμένα τα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων σχετίζονται με την καλύτερη δυνατή εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων, την διασφάλιση της ποιότητας και της αξιοπιστίας των υπηρεσιών που παρέχουν στους καταναλωτές, τη βιωσιμότητα με τη χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών ενέργειας καθώς και την ενεργειακή ανεξαρτησία εγκαταστάσεων, ακόμα και ολόκληρων περιοχών. Η ενεργειακή οικονομία μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ειδικευμένου λογισμικού και μεθόδων που θα προσαρμόζουν τη λειτουργία του δικτύου ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες και περιστάσεις. Με την επιβολή ενός συνεχόμενου ελέγχου στα συστήματα που συνθέτουν το μικροδίκτυο εξασφαλίζεται η σταθερότητα στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και επίσης γίνεται όσο το δυνατόν καλύτερη εξοικονόμηση εφόσον η παροχή προσαρμόζεται ακριβώς στις απαιτήσεις του κάθε φόρτου χωρίς να γίνεται αλόγιστη σπατάλη ενέργειας. Επιπλέον ο συνεχής έλεγχος σε πραγματικό χρόνο προσδίδει το προσόν της έγκαιρης ανίχνευσης και πρόληψης βλαβών, όπως και της μείωσης της ταχύτητας με την οποία φθείρεται ο εξοπλισμός.

Αναφορικά με την εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων, τα μικροδίκτυα αποτελούν μία αρκετά οικονομική λύση η οποία συμβάλει στην ελάττωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα καθώς και στην εξασφάλιση της αιεφόρας. Το γεγονός αυτό βασίζεται στο ότι ένα μεγάλο ποσοστό της ενέργειας αντλείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και παράλληλα αποθηκεύεται σε μπαταρίες, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη εξασφάλιση ικανοποιητικών ενεργειακών αποθεμάτων σε άμεση διαθεσιμότητα προς χρήση ανά πάσα στιγμή. Επίσης κατά το σχεδιασμό των μικροδικτύων από τους επιστήμονες δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη γεωμορφολογία και στις περιβαλλοντικές συνθήκες της κάθε περιοχής με σκοπό να γίνει η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση οποιασδήποτε πιθανής πηγής ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο οι περιοχές και οι εγκαταστάσεις που λαμβάνουν ενέργεια από τα μικροδίκτυα επωφελούνται καθώς αποκομίζουν μεγάλο κέρδος σε ηλεκτρικό ρεύμα με την μεγαλύτερη εφικτή απόδοση. Ακόμα ένα πλεονέκτημα από τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η σταδιακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα όπως οι γαιάνθρακες και οι υδρογονάνθρακες των οποίων γίνεται εκτενής χρήση με δυσάρεστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η χρήση ήπιων μορφών ενέργειας καθιστά τα μικροδίκτυα ανεξάρτητα από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι το οποίο συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση του κόστους του ηλεκτρικού ρεύματος. Επίσης οικονομία επιτυγχάνεται και από την ευελιξία στη διανομή της ενέργειας που προσφέρει η τεχνολογία των μικροδικτύων καθώς μπορούν ανάλογα με την κατάσταση να τροφοδοτηθούν συγκεκριμένα τμήματα του δικτύου που βρίσκονται σε άμεση ανάγκη και να αποκοπούν άλλα που δεν επείγει η ηλεκτροδότησή τους. Το γεγονός αυτό συμβάλλει και στην βελτίωση της απόδοσης των υπηρεσιών όπως και στην μείωση της καταπόνησης του εξοπλισμού δεδομένου ότι δεν βρίσκεται μόνιμα υπό τάση. Ακόμα είναι αδήριτη ανάγκη να αναφερθεί το ότι υπάρχει συνεχής ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο για την συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο και στα τμήματά του, κάτι το οποίο δίνει τη δυνατότητα στους ειδικούς να προβλέψουν πιθανές μελλοντικές βλάβες και επίσης να κινητοποιηθούν άμεσα σε περίπτωση βλάβης για την επιδιόρθωσή της με τις μικρότερες δυνατές απώλειες.

1.4 Εξοπλισμός των μικροδικτύων

Η τεχνολογία των μικροδικτύων αποτελεί μια καινοτομία σε σχέση με τα κλασσικά δίκτυα. Τα συστήματα που εμπεριέχει κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον σκοπό που επιτελούν, δηλαδή εάν είναι αρμόδια για την παραγωγή, την μεταφορά, την αποθήκευση και την διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας. Πολύ σημαντικό για την καλύτερη δυνατή λειτουργία των μικροδικτύων είναι ο συνεχής έλεγχος και η εποπτεία τους καθώς παράλληλα με την ροή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται και ροή δεδομένων μεταξύ των κέντρων ελέγχου και κάθε τμήματος του δικτύου. Σε αυτό έχει συμβάλει σημαντικά η εισαγωγή της ψηφιακής τεχνολογίας η οποία επιτρέπει την αυτοματοποίηση και την συνδεσιμότητα με συστήματα επικοινωνιών προηγμένης τεχνολογίας. Τα δεδομένα ανταλλάσσονται σε πραγματικό χρόνο κάτι το οποίο παρέχει συνεχή εικόνα για τις συνθήκες που επικρατούν στο μικροδίκτυο και χάρις σε αυτό επιτυγχάνεται η άμεση ανίχνευση σφαλμάτων και βλαβών για την άμεση αποκατάσταση τους. Επίσης μπορεί να γίνει και πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών, στο οποίο παίζει καθοριστικό ρόλο η ενσωμάτωση και η αξιοποίηση αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης. Επιπροσθέτως η αναβάθμιση αυτή υπόσχεται την δημιουργία ευφυών δικτύων με πολύ περισσότερες δυνατότητες για αυτόνομη διαχείριση του ηλεκτρικού ρεύματος ανάλογα με την περίσταση.



Σχήμα 1.1: Απεικόνιση ενός τυπικού μικροδικτύου.

Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των κυριότερων στοιχείων των μικροδικτύων.

Στοιχεία βασικού εξοπλισμού	Λειτουργία
Batteries (Μπαταρίες)	Μπαταρίες τύπου μολύβδου-οξέως για την αποθήκευση ενέργειας και οι χρήσεις τους είναι βιομηχανικές, οικιακές και εμπορικές
Inverters (Αντιστροφείς)	Συστήματα για την μετατροπή της ισχύος συνεχούς ρεύματος σε ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος που έχουν ενσωματωμένους μικροεπεξεργαστές

PV panels (Φωτοβολταϊκά πάνελ)	Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιώντας την ηλιακή.
Generators (Γεννήτριες)	Μηχανές όπου με την χρήση καυσίμου παράγουν κινητήρια ισχύ που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.
Smart meters (Εξυπνοι μετρητές)	Μετρητές συνδεδεμένοι με τον πάροχο υπεύθυνοι για την καταγραφή δεδομένων για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας
Circuit Breakers (Διακόπτης κυκλώματος)	Διακόπτης που λειτουργεί είτε αυτόνομα είτε κατά βούληση με σκοπό να απομονώσει τμήματα του δικτύου
Wind Turbines (Ανεμογεννήτριες)	Μηχάνημα ή συσκευή για την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική
Motors (Ηλεκτροκινητήρες)	Μηχανές για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική
Phasor Measurement Units (Μονάδες μέτρησης φάσης)	Μονάδες για την μέτρηση του ρεύματος και της τάσης κατά πλάτος και φάση
Transformers (Μετασχηματιστές)	Είναι παθητικό εξάρτημα που μεταφέρει επαγωγικά ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ των ηλεκτρικών κυκλωμάτων που διαθέτει για ανύψωση ή υποβίβαση τάσης
Environmental sensors (Αισθητήρες περιβάλλοντος)	Χρησιμοποιούνται αισθητήρες για τη λήψη δεδομένων σχετικών με τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε εγκατάσταση που περιλαμβάνει το μικροδίκτυο
Loads (Φόρτοι)	Οι καταναλωτές της ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου

Υποβοηθητικός εξοπλισμός	Λειτουργία
Power meters (Μετρητές Ισχύος)	Μετρητές υπεύθυνοι για την μέτρηση ηλεκτρικής ισχύος
Relays (Ρελαί)	Ηλεκτρικός διακόπτης που αποκόπτει και επανασυνδέει το ηλεκτρικό κύκλωμα και ελέγχεται από ένα άλλο κύκλωμα
Power analysers (Αναλυτές Ισχύος)	Αναλυτές της ροή της ισχύος στο ηλεκτρικό σύστημα
Switches (Διακόπτες)	Ηλεκτρικό εξάρτημα που ελέγχει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος
Weather stations (Μετεωρολογικοί σταθμοί)	Αποτελεί εγκατάσταση με όργανα και αισθητήρες για την μέτρηση ατμοσφαιρικών συνθηκών με σκοπό την πρόβλεψη του καιρού
Merging Units (Μονάδες συγχώνευσης)	-
Pyanometers (Πυρανόμετρα)	Αισθητήρας για την μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας
Current and voltage transformers CT/VTs (Μετασχηματιστές ρεύματος και τάσης)	-
Auto-reclosers (αποζεύκτες)	Διακόπτης κυκλώματος υψηλής τάσης που αποκόπτει με ασφάλεια ρεύματα μέχρι την τιμή του ονομαστικού ρεύματος
Sectionalizers (τιμηματοποιητής)	Συστήματα για την αυτόματη απομόνωση τμημάτων σε εναέρια δίκτυα που εμφανίζουν μόνιμη βλάβη
Routers/Switches (Δρομολογητής)	Ο δρομολογητής είναι υπεύθυνος για την ταυτόχρονη σύνδεση διάφορων δικτύων λειτουργώντας σε επίπεδο δικτύου / Ο διακόπτης είναι υπεύθυνος

	για την ταυτόχρονη σύνδεση διαφόρων συσκευών και λειτουργεί στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων
Remote/Local IOs	-
Remote/Local databases (Απομακρυσμένες/Τοπικές Βάσεις Δεδομένων)	Οργανωμένες και διακριτές συλλογές σχετιζόμενων δεδομένων που αποθηκεύονται ηλεκτρονικά και χειρίζονται με κατάλληλο λογισμικό
Platforms (e.g., OpenPDC)	-
Αισθητήρες	Συσκευές που ανιχνεύει ένα φυσικό μέγεθος και το μετατρέπει σε μετρήσιμο ηλεκτρικό σήμα

Πίνακας 1.1: Εξοπλισμός μικροδικτύων.

- **Μπαταρίες (συσσωρευτές)**

Οι συσσωρευτές, κοινώς μπαταρίες είναι συσκευές που έχουν την δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και λειτουργούν ως πηγές που παρέχουν συνεχές ρεύμα. Μπορούν να επαναφορτιστούν σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά στοιχεία και λειτουργούν βάσει δυο βασικών σταδίων: την φόρτιση και την εκφόρτιση. Το στάδιο της φόρτισης είναι η διαδικασία κατά την οποία εισέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα στην μπαταρία με σκοπό να αλληλοεπιδράσει με τα στοιχεία της και έτσι επιτυγχάνεται η αποθήκευση της ενέργειας με την μορφή χημικής ενέργειας. Το στάδιο της εκφόρτισης εκτελείται η αντίστροφη διαδικασία από την φόρτιση και η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Τα στάδια αυτά επαναλαμβάνονται συνέχεια μέχρι να φτάσει η μπαταρία στο σημείο όπου θα έχει ξεπεραστεί το όριο ζωής της. Ο πιο προηγμένος τύπος μπαταριών του οποίου η χρήση είναι αρκετά διαδεδομένη είναι μολύβδου-οξέως. Η απόδοση τους ανέρχεται στο 75% για περισσότερους από 5000 κύκλους παρέχοντας αδιάληπτα ηλεκτρική ισχύ. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικά και εμπορικά συστήματα, τα οποία μπορούν να τροφοδοτηθούν για έως και 8 ώρες. Επίσης χρησιμοποιούνται και σε οικιακά συστήματα με την ίδια απόδοση και κύκλους, όμως για λιγότερο χρόνο παροχής ηλεκτρικού ρεύματος σε σχέση με τις βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές, συγκεκριμένα μέχρι 2 ώρες.

- **Inverters**

Οι μετατροπείς ισχύος ή αλλιώς αντιστροφείς (inverters) είναι ηλεκτρονικές συσκευές ή κυκλώματα ισχύος τα οποία εκτελούν τη διαδικασία μετατροπής του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Η λειτουργία τους είναι αντίθετη από αυτής των ανορθωτών που μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Οι μετατροπείς ισχύος ποικίλουν ανάλογα με την τάση εισόδου τους και την τάση και την συχνότητα εξόδου και έχουν την ικανότητα διαμόρφωσης της συχνότητας του εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι εφαρμογές τους είναι πολυάριθμες, βασικό ρόλο παίζουν στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα τα inverter είναι απαραίτητα για τα μικροδίκτυα στα οποία χρησιμοποιούνται και άλλοι πιο εξειδικευμένοι τύποι όπως τα grid-forming inverters όπου εμπλέκονται και στον έλεγχο και στην διατήρησης της ευστάθειας τους.

- **Φωτοβολταϊκά πάνελ (PV panels)**

Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλιακή επιτυγχάνεται με την χρήση ηλιακών ή φωτοβολταϊκών κυψελών στις οποίες πραγματοποιείται ένα κβαντικό φαινόμενο γνωστό ως φωτοηλεκτρικό. Οι ηλιακές κυψέλες είναι επαφές p-n που έχουν κατασκευαστεί από ημιαγωγά υλικά με πιο διαδεδομένο το πυρίτιο. Η φωτεινή ακτινοβολία του ηλίου όταν προσπέφτει πάνω σε μια ηλιακή κυψέλη η ενέργεια των φωτονίων που μεταφέρει παράγει ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών. Δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή κένωσης και έτσι επιτυγχάνεται η κίνηση των ηλεκτρονίων προς τον ημιαγωγό τύπου n και η κίνηση των οπών προς τον ημιαγωγό τύπου p. Με το φαινόμενο αυτό δημιουργείται διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες της κυψέλης και παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα στο συνδεδεμένο φορτίο.

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά σχηματίζουν φωτοβολταϊκές μονάδες από τις οποίες λαμβάνεται η επιθυμητή τάση και ισχύς. Οι συγκεκριμένες μονάδες κατασκευάζονται συνήθως σε τάσεις είτε των 12V είτε των 24V είτε των 48V και με ισχύ έως και 400W. Για την προστασία των κυψελών από τις καιρικές συνθήκες, οι μονάδες διαθέτουν προστατευτικό κάλυμμα, του οποίου η σχεδίαση καθώς και το υλικό παίζουν σημαντικό παράγοντα στην διατήρηση της κατάλληλης θερμοκρασίας στο εσωτερικό των μονάδων. Η θερμοκρασία αυτή θα πρέπει να είναι σε γενικές γραμμές χαμηλή για την καλύτερη δυνατή απόδοση και την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Για την εξασφάλιση της παραγωγής της απαιτούμενης τάσης και

ισχύος οι φωτοβολταϊκές μονάδες συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν φωτοβολταϊκές διατάξεις. Οι διατάξεις αυτές πρέπει να έχουν επιφάνεια από 8 έως και 12m² ανά kW της παραγόμενης ισχύος.

• Γεννήτριες

Οι ηλεκτρογεννήτριες είναι μηχανήματα για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική η οποία επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση ενός φαινομένου γνωστού ως ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Οι γεννήτριες αποτελούνται από δυο κυρία μέρη: τον στάτορα που είναι το σταθερό μέρος και έχει μαγνήτες, είτε μόνιμους είτε ηλεκτρομαγνήτες για την δημιουργία μαγνητικού πεδίου και το κινητό μέρος που ονομάζεται ρότορας που περιέχει πηνία. Για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος θα πρέπει να περιστραφεί ο ρότορας εντός του στάτορα έτσι ώστε το μαγνητικό του πεδίο να παράξει ηλεκτρικό ρεύμα στα πηνία του ροτορα. Η περιστροφή αυτή επιτυγχάνεται με την χρήση κινητήριας μηχανής η οποία διαφέρει ανάλογα με το είδος και τις εφαρμογές της γεννήτριας (πετρελαιοκινητήρας, ατμομηχανή, υδροστρόβιλος, κλπ.). Οι γεννήτριες χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες ανάλογα με το είδος του ρεύματος που παράγουν, είτε γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος είτε γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος μοιάζουν αρκετά με εκείνες του εναλλασσόμενου ρεύματος όμως διαφέρουν ως προς αυτές λόγω της ύπαρξης ενός μηχανισμού που λέγεται συλλέκτης. Επιπλέον οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος κατατάσσονται ανάλογα με την διέγερση τους στις ακόλουθες κατηγορίες: γεννήτριες διέγερσης σειράς, γεννήτριες παράλληλης διέγερσης, γεννήτριες ανεξάρτητης διέγερσης, γεννήτριες με αθροιστική συνθέτη διέγερση και γεννήτριες με διαφορική συνθέτη διέγερση. Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, είναι πιο διαδεδομένη η χρήση γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνδυασμό με ανορθωτή και όχι τόσο η χρήση γεννητριών συνεχούς ρεύματος των οποίων οι εφαρμογές είναι πιο περιορισμένες.

- **Smart Meters**

Οι έξυπνοι μετρητές αποτελούν εξέλιξη των κλασικών μετρητών ηλεκτρικής ισχύος προσαρμοσμένη στα δεδομένα της ψηφιακής τεχνολογίας. Καταγράφουν πληροφορίες σχετικά με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, τα επίπεδα της τάσης, τα χαρακτηριστικά του ρεύματος και τον συντελεστή ισχύος. Χαρακτηρίζονται από πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις τους και έχουν την δυνατότητα παρακολούθησης της κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο για τον έλεγχο και την κοστολόγηση των καταναλωτών. Σχετικά με την επικοινωνία μεταξύ προμηθευτή και καταναλωτή είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι είναι αμφίδρομη και αξιοποιούνται διαφορά είδη ασύρματων και ενσύρματων δικτύων ανταλλαγής δεδομένων. Χρησιμοποιούνται συνήθως ασύρματα δίκτυα WiFi, ad hoc δίκτυα μέσω WiFi, ασύρματα δίκτυα πλέγματος, κυψελοειδείς τηλεπικοινωνίες, Wi-SUN έξυπνα δίκτυα βοήθεια και αλλά.

- **Circuit breakers**

Ο διακόπτης κυκλώματος αποτελεί μια ηλεκτρική διάταξη ασφαλείας η οποία προορίζεται για την προστασία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων από ζημιές που προκαλούν οι υπερεντάσεις και τα βραχυκυκλώματα. Θυμίζουν τις ηλεκτρικές ασφάλειες ως προς την λειτουργία τους λόγω του ότι διακόπτουν την ροή του ρεύματος προλαμβάνοντας πυρκαγιές, όμως οι διακόπτες κυκλώματος δεν καταστρέφονται μετά την χρήση τους όπως οι ασφάλειες αλλά μπορούν να επαναρυθμιστούν είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα. Επίσης κατασκευάζονται σε διαφορά μεγέθη και έχουν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, από μικρές εφαρμογές μέχρι και δίκτυα υψηλής τάσης.

- **Ανεμογεννήτριες (Wind Turbines)**

Οι ανεμογεννήτριες είναι συσκευές ή μηχανήματα που εκμεταλλεύονται την αιολική ενέργεια, δηλαδή την κινητική ενέργεια του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής. Αποτελούνται από δυο βασικά τμήματα τα οποία είναι ο μετατροπέας της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική και η ηλεκτρογεννήτρια η οποία μετατρέπει την

μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Το τμήμα στο οποίο πραγματοποιείται η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε μηχανική ονομάζεται δρομέας και είναι σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να παράγει την μέγιστη δυνατή μηχανική ισχύ εκμεταλλευόμενος την αιολική ενέργεια. Για την εξασφάλιση υψηλής απόδοσης της ανεμογεννήτριας πρέπει ληφθούν υπόψιν όλες οι αεροδυναμικές παράμετροι για τον σχεδιασμό του δρομέα.

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες ανεμογεννητριών:

1. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα όπου ο άξονάς τους είναι κάθετος ως προς την επιφάνεια του εδάφους και αυτές χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες ανάλογα με τον σχεδιασμό του δρομέα:
1)Savonius-rotor, 2)Darrieus-rotor, 3)H-rotor
2. Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα όπου ο άξονάς τους είναι παράλληλος με την φορά του ανέμου καθώς και με την επιφάνεια του εδάφους. Ο συγκεκριμένος τύπος είναι ο πιο διαδεδομένος (το 95% των ανεμογεννητριών είναι οριζοντίου άξονα). Επίσης οι ανεμογεννήτριες αυτές παρουσιάζουν μικρότερη διακύμανση σε παραγόμενη ισχύ και έχουν τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης για το είδος τους.

• Ηλεκτροκινητήρες (Motors)

Οι ηλεκτροκινητήρες είναι μηχανήματα για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική. Για την παραγωγή ροπής περιστροφής απαιτείται η ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του κινητήρα για την περιστροφή του δρομέα. Για την δημιουργία του μαγνητικού πεδίου τροφοδοτούνται τα τυλίγματα του σπλισμού του στατη με ηλεκτρικό ρεύμα. Κατηγοριοποιούνται κατα βάση του είδους του ρεύματος που χρησιμοποιούν δηλαδή εάν είναι εναλλασσόμενο ή συνεχές. Στην συνέχεια χωρίζονται σε άλλες επιμέρους κατηγορίες. Οι κινητήρες που λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα χωρίζονται σε ασύγχρονους ή επαγωγικούς κινητήρες οι οποίοι ενδέχεται να λειτουργούν είτε με μονοφασικό είτε με τριφασικό ρεύμα. Οι ασύγχρονοι κινητήρες είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ηλεκτροκινητήρων στην

βιομηχανία λόγω των πολυάριθμων πλεονεκτημάτων τους. Συγκεκριμένα χαρακτηρίζονται από απλότητα ως προς την κατασκευή τους, χαμηλό κόστος, η συντήρηση που απαιτούν είναι ελάχιστη και εμφανίζουν μεγάλη συγκέντρωση ισχύος, στοιχεία τα οποία τους καθιστούν απαραίτητους για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και αποδοτικούς σε διεργασίες μεγάλης κλίμακας. Στην συνέχεια υπάρχουν οι σύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες οι οποίοι κατηγοριοποιούνται βάσει του τρόπου κατασκευής του δρομέα τους. Οι δυο βασικές κατηγορίες τους είναι οι εξής: κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα και κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα. Οι μονοφασικοί κινητήρες διαχωρίζονται σε ασύγχρονους μονοφασικούς κινητήρες και σε μονοφασικούς κινητήρες με συλλέκτη. Βρίσκουν εφαρμογή σε διεργασίες μικρής κλίμακας όπου δεν απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη ισχύς. Λόγω αυτού χρησιμοποιούνται σε μικρές επιχειρήσεις και βιοτεχνίες, καταστήματα, για οικιακές χρήσεις και κυρίως σε μη βιομηχανικές εφαρμογές. Αναφορικά με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος η συγκεκριμένη κατηγορία προλαμβάνει τέσσερις υπό κατηγορίες: τους κινητήρες παράλληλης διέγερσης, τους κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες, τους κινητήρες διέγερσης σειράς και τους κινητήρες συνθέτης διέγερσης. Οι εφαρμογές τους είναι πιο περιορισμένες σε σχέση με τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος και βασική προϋπόθεση για την επιλογή τους είναι οι εφαρμογές στις οποίες θα χρησιμοποιηθούν να αφορούν μεταβλητές ταχύτητες με μεγάλες μεταβολές ροπής.

- **Μονάδες μέτρησης φάσης**

Οι μονάδες μέτρησης φάσης χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της ισχύος ως προς το μέτρο και την φάση ακολουθώντας μια διαδικασία λήψης δειγμάτων 12 φορές ανά κύκλο τα οποία στην συνέχεια υποβάλλονται σε επεξεργασία μέσω ειδικευμένου αναδρομικού αλγορίθμου διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) παρέχοντας δεδομένα για την κατάσταση του συστήματος. Η διαδικασία αυτή δίνει το μέτρο και τη φάση για το κάθε σήμα εισόδου τα οποία παράγουν φάσεις που συνδυάζονται για τον σχηματισμό μια ακολουθίας θετικών φάσεων ανά σετ εισόδων τριών φάσεων. Από τα μεγέθη της θετικής ακολουθίας λαμβάνονται δεδομένα για τον υπολογισμό του μέτρου και της φάσης της τάσης και του ρεύματος καθώς και της πραγματικής και την άεργου ισχύος όπως και της συχνότητας και της συνθέτης αντίστασης.

• Μετασχηματιστές

Οι μετασχηματιστές είναι συσκευές των οποίων η χρήση είναι αρκετά διαδεδομένη στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και στις τηλεπικοινωνίες. Ανήκουν στην κατηγορία των ηλεκτρικών μηχανών με βασικό γνώρισμα το ότι δεν έχουν κινούμενα μέρη και για τον λόγο αυτό ονομάζονται στατοί μετασχηματιστές. Υπάρχουν αρκετές κατηγορίες μετασχηματιστών οι οποίες διακρίνονται ανάλογα με κάποια βασικά χαρακτηριστικά: εάν προορίζονται για υπαίθριο ή κλειστό χώρο, εάν θα εγκατασταθούν σε μονοφασικό ή σε τριφασικό δίκτυο, τον τρόπο ψύξης τους, δηλαδή εάν είναι λαδιού ή ξηρού τύπου. Επίσης κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την ισχύ τους καθώς υπάρχουν οι μετασχηματιστές ισχύος και οι μετασχηματιστές οργάνων μέτρησης. Ακόμα συναντώνται στο εμπόριο μετασχηματιστές οι οποίοι εξειδικεύονται στην υποβοήθηση ειδικών διαδικασιών και ονομάζονται ειδικοί μετασχηματιστές.

Αναλυτικότερα υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες ειδικών μετασχηματιστών (Μ/Σ):

- Οι Μ/Σ ηλεκτρικής έλξης
- Οι αυτομετασχηματιστές
- Οι Μ/Σ 1:1
- Οι Μ/Σ ηλεκτροσυγκολλήσεων

Συγκεκριμένα στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για την ανύψωση ή την υποβίβαση της τάσης του ρεύματος. Σχετικά με τα βασικά κατασκευαστικά στοιχεία τους οι μετασχηματιστές αποτελούνται από έναν πυρήνα που αποτελεί το μαγνητικό κύκλωμα και δύο τυλίγματα πηνίων. Το ένα τύλιγμα ονομάζεται υψηλής τάσης και το άλλο χαμηλής τάσης, επίσης εκείνο που είναι συνδεδεμένο στην πηγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι το πρωτεύον και αυτό που παρέχει την μετασχηματισμένη τάση ονομάζεται δευτερεύον. Σε μια εφαρμογή όπου απαιτείται ανύψωση τάσης το πρωτεύον θα είναι εκείνο της χαμηλής τάσης και το δευτερεύον θα είναι της υψηλής τάσης.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει αυξήσει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση των μετασχηματιστών σε σημείο που οι απώλειες ισχύος έχουν ελαχιστοποιηθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό. Η τεχνολογική ανάπτυξη αυτή έχει εξοπλίσει τα δίκτυα με έναν νέο τύπο μετασχηματιστών, τους έξυπνους μετασχηματιστές. Η κατηγορία αυτή

συναντάται αρκετά συχνά σε μικροδίκτυα σε συνύπαρξη με τους κλασσικούς μετασχηματιστές. Η συμβολή των έξυπνων μετασχηματιστών στην λειτουργία των μικροδικτύων επιτρέπει την ενσωμάτωση αρκετών συστημάτων διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας λόγω των δυνατοτήτων για διασύνδεση. Εξυπηρετούν την ενσωμάτωση σε φωτοβολταϊκά, σε συστήματα φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων καθώς και σε συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας δεδομένου επιτυγχάνεται αμφίδρομη διασύνδεση ισχύος. Σχετικά με τις διαδικασίες της νησιδοποίησης και της τοπικής διαχείρισης που αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό των μικροδικτύων, οι έξυπνοι μετασχηματιστές μπορούν να θεωρηθούν απαραίτητος εξοπλισμός καθώς ενσωματώνουν εντολές και λειτουργίες ελέγχου. Τέλος οι μετασχηματιστές αυτοί εγγυούνται υψηλή απόδοση και αξιοπιστία για την καλύτερη δυνατή εξυπηρέτηση για των χρηστών του δικτύου.

- **Περιβαλλοντικοί αισθητήρες**

Η ύπαρξη των περιβαλλοντικών αισθητήρων είναι απαραίτητη για τα μικροδίκτυα καθώς είναι πολύ σημαντική η συνεχής παρακολούθηση και η λήψη δεδομένων σχετικών με την κατάσταση και την λειτουργία των συστημάτων όπως και για τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται, οι οποίες έχουν άμεση επίδραση σε αυτά. Ακόμα αναγκαία μπορεί να χαρακτηριστεί η λήψη δεδομένων σχετικών με τα καιρικά φαινόμενα που επικρατούν στις περιοχές που βρίσκονται τα μικροδίκτυα για την πρόβλεψη ακραίων καιρικών φαινομένων που θα μπορούσαν να είναι επιζήμια για τις εγκαταστάσεις. Γενικώς χρησιμοποιούνται οι εξής αισθητήρες: υγρασίας, θερμοκρασίας, τάσης, ρεύματος, πίεσης, μαγνητικοί παιδιού, καιρικών συνθηκών και βαρομετρικής πίεσης

- **Φόρτοι (Loads)**

Σε γενικές γραμμές τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια για οικιακή, εμπορική, αγροτική και βιομηχανική χρήση. Οι εγκαταστάσεις διακρίνονται σε οικιακές όπου οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια είναι χαμηλές, σε αγροτικές και εμπορικές όπου οι απαιτήσεις αυξάνονται, καθώς και σε βιομηχανικές όπου οι απαιτήσεις είναι ασύγκριτα μεγαλύτερες ανάλογα με το τι κλίμακας είναι. Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει υποσταθμούς για την διαμόρφωση της τάσης

ανάλογα με τις ανάγκες των καταναλωτών, οι οποίοι δύνανται να αξιοποιήσουν και άλλες πηγές ενέργειες είτε ανανεώσιμες είτε μη για την υποστήριξη τους. Η τάση και η συχνότητα του δικτύου διαφέρει από χώρα σε χώρα και η παροχή μπορεί να είναι είτε μονοφασική είτε τριφασική ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε χρήστη του δικτύου. Κατά μέσο όρο στις ευρωπαϊκές χώρες η οικιακή τάση είναι 230V και 50Hz και η βιομηχανική ξεκινά από 380V και 50Hz και ενδέχεται να είναι αυξημένη ανάλογα με το είδος του εξοπλισμού και το είδος των εγκαταστάσεων.

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

Οι ανανεώσιμες πηγές είναι γνωστές και ως ήπιες μορφές ενέργειας αλλά και γενικότερα ως πράσινη ενέργεια. Αποτελούν πηγές ενέργειας που αντλούν την ενέργεια τους από φυσικά φαινόμενα και διεργασίες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η γεωθερμία, ο άνεμος, η κίνηση και θερμότητα του νερού, βιολογικά απόβλητα καθώς επίσης και η θερμότητα του αέρα. Βάσει της αξιοποίησης των φυσικών αυτών παραγόντων έχουν σχεδιαστεί συστήματα τα οποία εκμεταλλεύονται τις συγκεκριμένες πηγές ενέργειας οι οποίες είναι οι εξής: αιολική, υδροηλεκτρική, γεωθερμική, ωκεάνια, ηλιακή, υδροθερμική, αεροθερμική και η ενέργεια που λαμβάνεται από την αξιοποίηση της βιομάζας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σε αντίθεση με τις συμβατικές όπως τα ορυκτά καύσιμα που απαιτούν διαδικασίες εξόρυξης και καύσης για να γίνουν εκμεταλλεύσιμα, αξιοποιούνται άμεσα δεσμεύοντας την ενέργεια που υπάρχει ελεύθερη στην φύση μέσω των φυσικών φαινομένων. Τα αποτελέσματα της χρήσης των ήπιων μορφών ενέργειας είναι σε γενικές γραμμές θετικά τόσο ως προς τον άνθρωπο όσο και ως προς το περιβάλλον καθώς αποδίδουν ηλεκτρικό ρεύμα και θερμότητα με μειωμένες ή και μηδενικές εκπομπές ρύπων.

Η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και των ηλεκτρονικών ισχύος έχουν συμβάλει στην αύξηση της αξιοπιστίας και της απόδοσης των συστημάτων που αντλούν ενέργεια από ΑΠΕ και πλέον έχουν καθιερωθεί δεδομένη η ύπαρξη τους στα σύγχρονα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα η εξέλιξη της τεχνολογίας των μετατροπέων ισχύος όπως τα inverter

που χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την διαμόρφωση της συχνότητας και της τάσης εξόδου των συστημάτων ΑΠΕ, έχει συμβάλλει στην ομαλή ένταξη των πηγών αυτών και στην μεγαλύτερη δυνατή αξιοποίηση τους. Γεγονός που αφορά άμεσα και τα μικροδίκτυα τα οποία έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό την δυνατότητα επίτευξης ενεργειακής ανεξαρτησίας από το κεντρικό δίκτυο. Όμως η ένταξη των ΑΠΕ στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί ιδιαίτερο χειρισμό λόγω του ότι πρέπει να ληφθεί υπόψη η γεωγραφική τοποθεσία και το είδος και η συχνότητα των φυσικών φαινομένων και των καιρικών συνθηκών που επικρατούν στην κάθε περιοχή. Συνηθέστερη είναι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών μονάδων και ανεμογεννητριών λόγω του ότι η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας και της αιολικής ενέργειας είναι πιο εφικτή σε περισσότερες περιοχές σε σχέση με τα υπόλοιπα έργα που απαιτούν κατάλληλο γεωλογικό υπόβαθρο. Επίσης το κόστος εγκατάστασης είναι μικρότερο σε σχέση με τα άλλα είδη αξιοποίησης ΑΠΕ και η απόσβεση του κόστους αυτού πιο γρήγορη. Επιπροσθέτως πρέπει να τονιστεί ότι βασική πρόκληση από την χρήση των ΑΠΕ είναι ότι έχουν αρκετά χαμηλό συντελεστή απόδοσης (της τάξης 30% και χαμηλότερο) γεγονός που μέχρι σήμερα τις καθιστά συμπληρωματικές πηγές ενέργειας και όχι κύριες. Σχετικά με τις φωτοβολταϊκές μονάδες και τις ανεμογεννήτριες ότι απαιτείται η χρήση inverter για την αξιοποίηση της ισχύος του από το δίκτυο. Συγκεκριμένα τα φωτοβολταϊκά συνθήματα δίνουν στην έξοδο τους συνεχές ρεύμα το οποίο μέσω inverter θα μετατραπεί σε εναλλασσόμενο και οι ανεμογεννήτριες χρειάζονται διαμόρφωση της τάσης και της συχνότητας του ρεύματος εξόδου τους, επομένως απαιτούν και εκείνες με την σειρά τους κατάλληλους μετατροπείς ισχύος.

1.6 Βασικά είδη δικτύων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας στα μικροδικτύων

Στα μικροδίκτυα όλα τα κύρια στοιχεία που τα απαρτίζουν είναι αλληλένδετα μεταξύ τους τόσο με ενσύρματες όσο και με ασύρματες δικτυακές συνδέσεις. Η σύνδεση αυτή έχει μεγάλη σημασία για τα μικροδίκτυα, καθώς εκτός από την ανταλλαγή ενέργειας, πραγματοποιείται και ανταλλαγή δεδομένων που αφορούν την κατάσταση και τη λειτουργία τους. Αυτό συμβαίνει λόγω της εισαγωγής της ψηφιακής τεχνολογίας, η οποία οδηγεί στην ανάπτυξη του Internet of Things (IoT),

επιτρέποντας την αμερόληπτη επικοινωνία και σύζευξη μεταξύ των συστημάτων του μικροδικτύου. Τα δεδομένα που μεταδίδονται ασύρματα μπορούν να περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του μικροδικτύου, όπως δεδομένα 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 της αυτοματισμού, τη βελτιωμένη επιτήρηση και διαχείριση των μικροδικτύων με ευελιξία και αξιοπιστία. Έτσι, διασφαλίζεται η αδιάλειπτη επικοινωνία μεταξύ των συνδεδεμένων συσκευών, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα και την απόδοση του μικροδικτύου. Τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στα μικροδίκτυα είναι τα ακόλουθα:

- **IEC 61850:** Το πρωτόκολλο επικοινωνίας IEC 61850 χρησιμοποιείται ευρέως στα μικροδίκτυα για τη διαχείριση και τον έλεγχο των ηλεκτρικών συστημάτων. Με τη βοήθεια του IEC 61850, μπορούν να ανταλλάσσονται δεδομένα πραγματικού χρόνου μεταξύ των συσκευών σε ένα μικροδίκτυο, παρέχοντας ένα αξιόπιστο και ασφαλές περιβάλλον για την επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων διαχείρισης και ελέγχου. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση των δικτύων ενέργειας σε μικρές κλίμακες, επιτρέποντας την ελαχιστοποίηση του χρόνου ανταπόκρισης και την αύξηση της αξιοπιστίας και της απόδοσης του συστήματος.
- **DNP3:** Το πρωτόκολλο επικοινωνίας DNP3 (Distributed Network Protocol 3) χρησιμοποιείται ευρέως στα μικροδίκτυα για την αξιόπιστη και αποδοτική διαχείριση των δικτύων ενέργειας. Το DNP3 παρέχει μια πλατφόρμα επικοινωνίας πραγματικού χρόνου για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ συσκευών ελέγχου, όπως αισθητήρες και μετρητές, και του κεντρικού συστήματος διαχείρισης. Αυτό επιτρέπει τη συλλογή, την ανάλυση και τον έλεγχο των δεδομένων ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την αξιοπιστία και την απόδοση του συστήματος. Με την υποστήριξη αξιόπιστης μεταφοράς δεδομένων και προηγμένων λειτουργιών ασφαλείας, το DNP3 αποτελεί ιδανική επιλογή για την αυτοματοποίηση και την αποτελεσματική διαχείριση των μικροδικτύων.
- **Modbus:** Το πρωτόκολλο επικοινωνίας Modbus είναι ένα από τα πιο δημοφιλή πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στα μικροδίκτυα για την

αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ συσκευών δικτύου. Το Modbus επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων ανάμεσα σε αισθητήρες, ελεγκτές και άλλες συσκευές ελέγχου, παρέχοντας απλότητα και ευελιξία στην ανταλλαγή πληροφοριών. Με την χρήση Modbus, μπορούν να συλλεχθούν και να μεταβιβαστούν δεδομένα όπως μετρήσεις, καταστάσεις και εντολές επιτρέποντας τον έλεγχο και την παρακολούθηση του μικροδικτύου. Η απλή δομή και η ευελιξία του Modbus το καθιστούν ιδανικό για την επικοινωνία σε μικρή κλίμακα, βοηθώντας στην αυτοματοποίηση και την αποτελεσματική λειτουργία των μικροδικτύων.

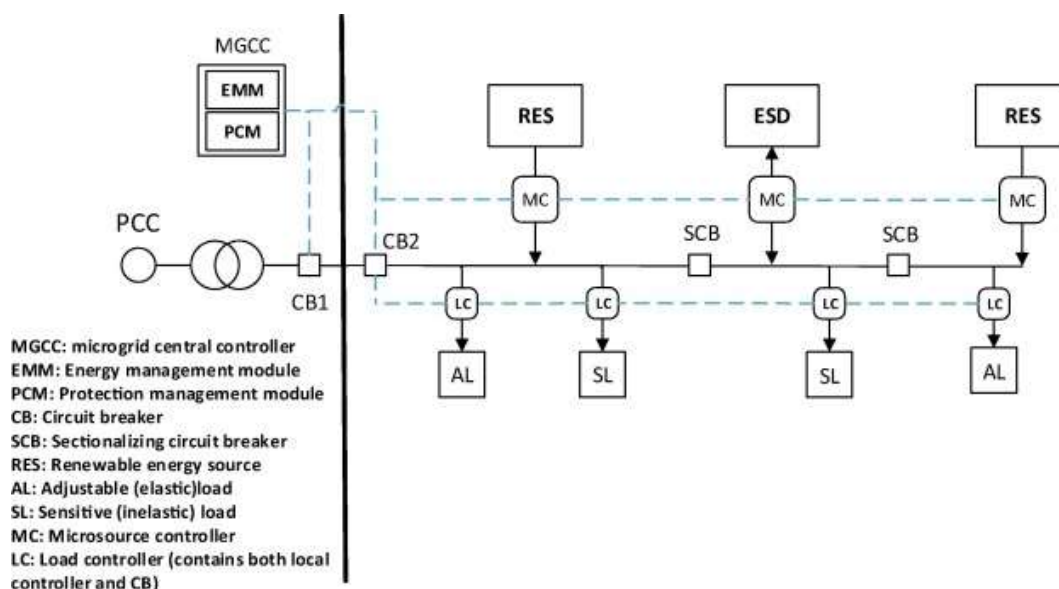
- **TCP/IP:** Το πρωτόκολλο επικοινωνίας TCP/IP είναι κρίσιμο για τη λειτουργία των μικροδικτύων, παρέχοντας ένα πρότυπο για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ συσκευών. Το TCP (Transmission Control Protocol) εξασφαλίζει την αξιοπιστία και την ακεραιότητα των μεταδιδόμενων πακέτων, ενώ το IP (Internet Protocol) χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση των πακέτων μεταξύ των δικτυακών συσκευών. Με την χρήση του TCP/IP, μπορούν να ανταλλάσσονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας αξιόπιστη και ασφαλή επικοινωνία. Αυτό επιτρέπει τον έλεγχο, την παρακολούθηση και τη διαχείριση των μικροδικτύων, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας τους.

Κεφάλαιο 2

Έλεγχος

2.1 Έλεγχος των μικροδικτύων

Για να επιτευχθεί η εξασφάλιση της βέλτιστης λειτουργίας, της ομαλής μετάβασης από την συνδεδεμένη λειτουργία του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο στην αποσυνδεδεμένη, της ασφάλειας των συστημάτων και η μείωση των εκπομπών των ρύπων είναι αναγκαία η εφαρμογή εκτεταμένου ελέγχου. Το γεγονός αυτό θα διασφαλίσει την βέλτιστη δυνατή λειτουργία και απόδοση του γενικού συστήματος τηρουμένων των απαιτήσεων και των προδιαγραφών. Συγκεκριμένα ο έλεγχος αυτός παρέχεται από έναν κεντρικό ελεγκτή (Central Controller (CC)) και από τους εξειδικευμένους ελεγκτές οι οποίοι ασκούν έλεγχο σε κάθε μεμονωμένο μικροπαραγωγό και συσκευή αποθήκευσης της ενέργειας (Microsource Controller (MC)).



Σχήμα 2.1: Βασικές εφαρμογές ελέγχου των μικροδικτύων (EMM-PCM).

2.2 Οι αρμοδιότητες και οι λειτουργίες του CC

Ο κεντρικός ελεγκτής (CC) έχει ως κύρια αρμοδιότητα την διατήρηση της αξιοπιστίας και της ποιότητας της ισχύος του μικροδικτύου μέσω ειδικών σημείων αναφοράς των ελεγκτών ισχύος-συχνότητας (P-f control) και άεργου ισχύος-τάσης (Q-V control) καθώς και του συντονισμού προστασίας. Επίσης συμβάλει στον προγραμματισμό οικονομικής λειτουργίας των μικροπαραγωγών και στην διατήρηση της εισαγόμενης ισχύος από το κύριο δίκτυο εντός των συμφωνηθέντων τιμών. Επιπλέον ακόμα μια λειτουργία που επιτελεί ο CC είναι η βελτιστοποίηση του μικροδικτύου διατηρώντας την ονομαστική συχνότητα και τάση. Ο ελεγκτής είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί αυτόματα όμως οποιαδήποτε στιγμή είναι δυνατή η ανάληψη του ελέγχου από εξουσιοδοτημένο χειριστή.

Οι δυο εφαρμογές για την παρακολούθηση των MCs

Η παρακολούθηση των ελεγκτών των μικροπαραγωγών (MCs) επιτυγχάνεται μέσα από την χρήση δύο εφαρμογών. Οι εφαρμογές είναι οι εξής:

- EMM: Εφαρμογή Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management Module)
- PCM: Εφαρμογή Συντονισμού της Προστασίας (Protection Coordination Module)

Αναλυτικότερα σχετικά με την EMM, η εφαρμογή αυτή καλύπτει τις ανάγκες διαχείρισης της ενέργειας

2.3 EMM

Η εφαρμογή EMM είναι υπεύθυνη για την βέλτιστη και οικονομικότερη δυνατή λειτουργία των μικροδικτύων. Ασκεί ορισμένα είδη ελέγχου όμως αυτά μπορούν να αυξηθούν διευρύνοντας το φάσμα ελέγχων που μπορεί να καλύψει η εφαρμογή σε περιπτώσεις που απαιτείται λόγω της έκτασης και των στοιχείων του δικτύου. Βέβαια όσο πιο σύνθετη γίνεται η εφαρμογή τόσο πιο δύσκολος και πολύπλοκος γίνεται ο σχεδιασμός της όπως και του συστήματος ελέγχου.

2.3.1 Έλεγχος τάσης

Η EMM έχει τη δυνατότητα ελέγχου της τάσης και του συντελεστή ισχύος των μικροπαραγωγών. Συγκεκριμένα οι έλεγχοι αυτοί γίνονται τοπικά από τους MCs και αυτό επιτυγχάνεται με μεταβολή του μέτρου και της γωνίας φάσης της τάσης τους. Η λειτουργία της EMM περιορίζεται στον καθορισμό του σημείου αναφοράς της τάσης για συγκεκριμένους υψηλής σημασίας ζυγούς του μικροδικτύου. Οι τοπικοί επιμέρους έλεγχοι γίνονται από τους MCs οι οποίοι παρέχουν συνεχή ανατροφοδότηση στην EMM για την συνεχή παρακολούθηση του συστήματος. Η EMM στη συνέχεια θέτει τα κατάλληλα σημεία αναφοράς στους MCs για την σωστή ρύθμιση της τάσης.

2.3.2 Έλεγχος στροφών κινητήριας μηχανής

Το συγκεκριμένο είδος ελέγχου εφαρμόζεται σε μικροπαραγωγούς που διαθέτουν μηχανήματα όπως μικροστροβίλους και ανεμογεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή συστήματα που διαθέτουν κινούμενα μέρη. Ειδικότερα πρέπει να μεταβληθεί η ταχύτητα περιστροφής της κινητήριας μηχανής έτσι ώστε το φορτίο να λάβει τιμή σύμφωνη με την ονομαστική ισχύ του μικροδικτύου και να γίνει ομαλά η εξισορρόπηση του. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός θα πρέπει να αλλάξει ο ρυθμός της εισαγωγής του καυσίμου στη μηχανή δεδομένου ότι η ίδια κινείται με σταθερή ταχύτητα. Το γεγονός αυτό όμως θα επηρεάσει την απόδοσή της η οποία είναι συνάρτηση της ταχύτητας της μηχανής και της εισαγωγής καυσίμου, επομένως θα πρέπει να γίνουν οι σωστές ρυθμίσεις για την βέλτιστη και οικονομικότερη εφικτή λειτουργία της για την άμεση κάλυψη των αναγκών του μικροδικτύου.

2.3.3 Ρύθμιση της συχνότητας

Στα συμβατικά συστήματα ισχύος η τιμή της συχνότητα τάσης που παράγεται ελέγχεται από την ταχύτητα με την οποία περιστρέφονται οι σύγχρονες γεννήτριες. Στα μικροδίκτυα είναι εφικτή η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε οποιαδήποτε επιθυμητή συχνότητα με την αξιοποίηση μετατροπέων εγκατεστημένων σε κάθε μικροπαραγωγή. Ο έλεγχος των συγκεκριμένων συστημάτων διενεργείται από τους MCs των κάθε μικροπαραγωγών ξεχωριστά. Η ρύθμιση της συχνότητας των μικροδικτύων διαφέρει ανάλογα με την κατάσταση σύνδεσης τους με το κεντρικό δίκτυο. Στην διασυνδεδεμένη κατάσταση οι MCs δεν εκτελούν P-f έλεγχο για την

κάθε μικροπαραγωγή καθώς η μεταβολές στην συχνότητα εξομαλύνονται από το κυρίως δίκτυο. Αντιθέτως στην αυτόνομη λειτουργία οι MCs είναι εκείνοι που είναι υπεύθυνοι για την διατήρηση της συχνότητας στις προκαθορισμένες για το δίκτυο τιμές στις περιπτώσεις όπου μεταβάλλεται το φορτίο. Κατά την αποσυνδεδεμένη λειτουργία η EMM είναι αρμόδια για την συνεχή παρακολούθηση των τιμών της συχνότητας. Σε καταστάσεις όπου παρατηρείται πτώση τους η οποία εάν αυτή δεν αποκατασταθεί εγκαίρως προβαίνει στην αποσύνδεση φορτίων για την εξισορρόπηση τις ισχύος και την εξασφάλισης της ευσταθούς λειτουργίας.

2.3.4 Έλεγχος συντελεστή ισχύος

Για τον έλεγχο του συντελεστή ισχύος πρέπει να αναφερθεί ότι οι μικροπαραγωγές σε γενικές γραμμές δεν διαθέτουν ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου. Για τον έλεγχο του παρεχόμενου ηλεκτρικού φορτίου οι MCs έχουν δικό τους έλεγχο του συντελεστή ισχύος ως βασικό στοιχείο για την λειτουργία τους. Υπάρχουν περιπτώσεις όμως όπου εγκαθίστανται στους μικροπαραγωγούς συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος ελέγχου του συντελεστή ισχύος τους για να ελέγξουν την φασική γωνία του ρεύματος και να ελαχιστοποιήσουν τις διακυμάνσεις των κυματομορφών του. Επομένως στις συγκεκριμένες περιπτώσεις εκτελείται από τον MC ο έλεγχος του συντελεστή ισχύος της κάθε μικροπαραγωγής χωρίς να χρειάζεται επέμβαση από την EMM εκτός του προσδιορισμού της τάσης αναφοράς.

2.4 PCM (Μονάδα Συντονισμού Προστασίας)

Η μονάδα συντονισμού προστασίας (PCM) αποτελεί την βασική μονάδα που είναι υπεύθυνη για την προστασία όλων των στοιχείων ενός μικροδικτύου ενεργώντας με συγκεκριμένη τακτική κατά την διασυνδεδεμένη και κατά την αυτόνομη λειτουργία του. Είναι σχεδιασμένη για να προλαμβάνει και να αντιμετωπίζει βλάβες του δικτύου και να ενεργεί άμεσα σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Δεδομένου ότι τα μικροδίκτυα απαρτίζονται από μικροπαραγωγές ενέργειας και φόρτους, το όλο σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ακτινικό καθώς η ροή της ισχύος χωρίζεται σε δυο κατευθύνσεις. Αναλυτικότερα όταν το μικροδίκτυο βρίσκεται σε αποσυνδεδεμένη κατάσταση γίνεται ενεργό από παθητικό δίκτυο και η τροφοδοσία του βασίζεται στους μικροπαραγωγούς. Η μετάβαση από την διασυνδεδεμένη λειτουργία στην αποσυνδεδεμένη επιφέρει δραστική αλλαγή στην αντοχή του μικροδικτύου στην

κατάσταση βραχυκυκλώματος, κάτι το οποίο έχει επίδραση στους συμβατικούς ηλεκτρονόμους υπερέντασης που για την λειτουργία τους βασίζονται στις 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**

Στην κανονική κατάσταση λειτουργίας το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το βασικό δίκτυο ηλεκτροδότησης μέσω του κυρίου διακόπτη που τα συνδέει, ο οποίος βρίσκεται στο PCC. Όλοι οι τροφοδότες που είναι συνδεδεμένοι στο ζυγό του μικροδικτύου καθώς και οι φόρτοι που λαμβάνουν ηλεκτρική ενέργεια από τους μικροπαραγωγούς και το βασικό δίκτυο, διαθέτουν διακόπτες που κατά την κανονική λειτουργία είναι κλειστοί για την ροή του ρεύματος και τις επιθυμητές κατευθύνσεις.

- **Βραχυκύκλωμα σε τροφοδότη του μικροδικτύου**

Όταν το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο αποτελεί ένα παθητικό ακτινικό σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος το ρεύμα βραχυκυκλώματος κινείται προς μια μόνο κατεύθυνση, από την πηγή τροφοδοσίας προς το σημείο που υπάρχει η βλάβη. Για την ανίχνευση βραχυκυκλωμάτων σε κάποιο σημείο του μικροδικτύου χρησιμοποιούνται δεδομένα αποκλειστικά και μόνο σχετικά με το μέτρο του ρεύματος βραχυκυκλώματος χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η κατεύθυνση του. Για την αποκατάσταση του προβλήματος απαιτείται απλά το άνοιγμα του διακόπτη του σημείου που έχει εντοπιστεί. Κατά την διασυνδεδεμένη λειτουργία το ρεύμα του μικροδικτύου προέρχεται τόσο από το κεντρικό δίκτυο όσο και από τους μικροπαραγωγούς. Για αυτό τον λόγο σε περίπτωση βραχυκυκλώματος το ρεύμα του σφάλματος θα τροφοδοτείται και από το ρεύμα του δικτύου και των μικροπαραγωγών. Στην περίπτωση αυτή εάν η βλάβη δεν αποκατασταθεί εγκαίρως υπάρχει πιθανότητα αποσύνδεσης όλων των

μικροπαραγωγών. Κάτι το οποίο θα παρεμποδίσει εξ ολοκλήρου την παραγωγή ενέργειας. Για την αποφυγή ενός τέτοιου συμβάντος οι τροφοδότες χωρίζονται σε ζώνες που έχουν διακόπτες για την επιμέρους απομόνωση συγκεκριμένων τμημάτων και τον περιορισμό του βραχυκυκλώματος. Οι συγκεκριμένοι διακόπτες αποτελούνται από ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης-υπερέντασης που εξειδικεύονται στον εντοπισμό της ζώνης που έχει υποστεί βραχυκύκλωμα. Ο έλεγχος των ζωνών αυτών πραγματοποιείται από την PCM που θέτει τις ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων και έχει την ικανότητα απομόνωσης των προβληματικών ζωνών για την προστασία του μικροδικτύου και την εξασφάλιση συνεχούς ροής ηλεκτρικού ρεύματος.

- **Βραχυκύκλωμα στο κυρίως δίκτυο**

Στην περίπτωση που παρατηρείται βραχυκύκλωμα στο κεντρικό δίκτυο το μικροδίκτυο αποσυνδέεται από αυτό μέσω του κύριου διακόπτη που τα συνδέει, κάτι το οποίο γίνεται με εντολή της PCM όταν παρατηρήσει μεταβολή στο μέτρο και της κατεύθυνση του ρεύματος της κάθε φάσης. Η PCM είναι προγραμματισμένη με τις επιθυμητές ρυθμίσεις για τα επίπεδα των μεγεθών που σχετίζονται με το ηλεκτρικό ρεύμα καθώς και το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο θα πρέπει να ενεργήσει. Επίσης η εφαρμογή προστασίας του μικροδικτύου καλείται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις βραχυκυκλώματος να χειριστεί όσο το δυνατόν καλύτερα την διαδικασία απομόνωσης χωρίς να αποσυνδεθούν κρίσιμα φορτία. Επιπροσθέτως εξασφαλίζει την μη λανθασμένη αποσύνδεση μικροπαραγωγών πριν την αποσύνδεση από το κεντρικό δίκτυο, γεγονός που θα προκαλούσε αναίτια διακοπή της παραγωγής και φθορά των ηλεκτρονόμων.

- **Βραχυκύκλωμα στο ζυγό του του μικροδικτύου**

Όταν συμβεί σφάλμα στον ζυγό του μικροδικτύου το μικροδίκτυο αποσυνδέεται από το κεντρικό δίκτυο και ταυτόχρονα απομονώνονται και οι γραμμές τροφοδοσίας ως προς τους μικροπαραγωγούς. Η PCM είναι υπεύθυνη για την ρύθμιση του ηλεκτρονόμου στο σημείο σύζευξης με το κυρίως δίκτυο, ο οποίοςς ηλεκτρονόμος λαμβάνει ρυθμίσεις σχετικά με τις συσκευές προστασίας των μικροπαραγωγών ώστε

να αποφευχθούν τυχόν λανθασμένες αποσυνδέσεις, διακοπές της τροφοδοσίας όπως και να βελτιστοποιείται η παραγωγή ενέργειας.

- **Επανασυγχρονισμός**

Άλλη μια αρμοδιότητα της PCM είναι ο συγχρονισμός του μικροδικτύου εφόσον έχει προηγηθεί επανασύνδεση με το κύριο δίκτυο. Η διαδικασία αυτή απαιτεί την επανασύνδεση όλων των φορτίων που είχαν αποσυνδεθεί προηγουμένως και μπορεί να διαρκέσει από μερικά δευτερόλεπτα έως κάποια λεπτά, κάτι το οποίο εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του τροφοδότη και των φορτίων. Η μέθοδος που χρησιμοποιεί η PCM για τον συγχρονισμό των μικροπαραγωγών λαμβάνει υπόψιν το μέτρο και την φασική γωνία της τάσης της κάθε φάσης, την συχνότητα και την ακολουθία φάσεων τόσο του κεντρικού δικτύου όσο και του μικροδικτύου. Επίσης δίνεται η δυνατότητα μέσω της PCM για αυτόματο ή χειροκίνητο επανασυγχρονισμό ανάλογα με την περίπτωση.

2.4.2 Προστασία κατά την αυτόνομη λειτουργία

Παρατηρείται μεγάλη διαφορά μεταξύ αυτόνομης και διασυνδεδεμένης λειτουργίας του μικροδικτύου καθώς η αντοχή του ζυγού σε βραχυκύκλωμα είναι πολύ μικρότερη στην περίπτωση της αυτόνομης λειτουργίας. Το φαινόμενο αυτό βασίζεται στην ύπαρξη ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος στους μικροπαραγωγούς οι οποίοι τροφοδοτούν με ρεύματα βραχυκυκλώματος των οποίων η μέγιστη τιμή που μπορούν να λάβουν είναι το διπλάσιο της τιμής του ρεύματος φορτίου. Τα συγκεκριμένα αυτά ρεύματα είναι χαμηλής ισχύος κάτι το οποίο μπορεί να δυσχεραίνει την ανίχνευση τους από τους συμβατικούς ηλεκτρονόμους υπερέντασης. Η συγκεκριμένη πρόκληση αντιμετωπίζεται με τους εξής τρόπους προστασίας:

- (1) Εγκατάσταση διαφορικών ηλεκτρονόμων ρεύματος-τάσης
- (2) Προστασία απόστασης
- (3) Σχήματα προστασίας που ανιχνεύουν ρεύματα γης με ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης-υπερέντασης

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

Σχετικά με την λειτουργία της PCM υπάρχουν δύο περιπτώσεις στις οποίες ενεργεί. Η πρώτη αφορά την κανονική λειτουργία του μικροδικτύου κατά την οποία ο βασικός διακόπτης που το συνδέει με το κεντρικό δίκτυο είναι ανοιχτός και οι διακόπτες που συνδέουν τους μικροπαραγωγούς με τον ζυγό του μικροδικτύου είναι κλειστοί. Επομένως το μικροδίκτυο στηρίζει την τροφοδοσία του στους μικροπαραγωγούς. Η δεύτερη περίπτωση στηρίζεται με βραχυκύκλωμα σε τροφοδότη. Συγκεκριμένα η ανίχνευση ρευμάτων βραχυκυκλώματος που προέρχονται από τροφοδοτές γίνεται από ηλεκτρονόμους οι οποίοι όμως θα πρέπει να έχουν υψηλότερη ευαισθησία καθώς τα συγκεκριμένα ρεύματα είναι πιο μικρά.

2.5 Μέθοδοι βελτιστοποίησης της ροής ισχύος

Κατά τη σχεδίαση των αλγορίθμων για τον έλεγχο της ροής ισχύος σε μικροδίκτυα, χρησιμοποιούνται μαθηματικές μέθοδοι βελτιστοποίησης. Με βάση αυτές τις μεθόδους, επιλέγεται η βέλτιστη λύση που λαμβάνει υπόψη όλες τις παράμετρους της κάθε περίπτωσης και δημιουργείται ένας αλγόριθμος που θα εκτελείται από τον κεντρικό έλεγχο του μικροδικτύου με στόχο την πλέον οικονομική και αποδοτική ροή ισχύος.

Οι μέθοδοι μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: τις κλασικές-παραδοσιακές μεθόδους, οι οποίες είναι γνωστές και ως ντετερμινιστικές και τις μεθόδους που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη.

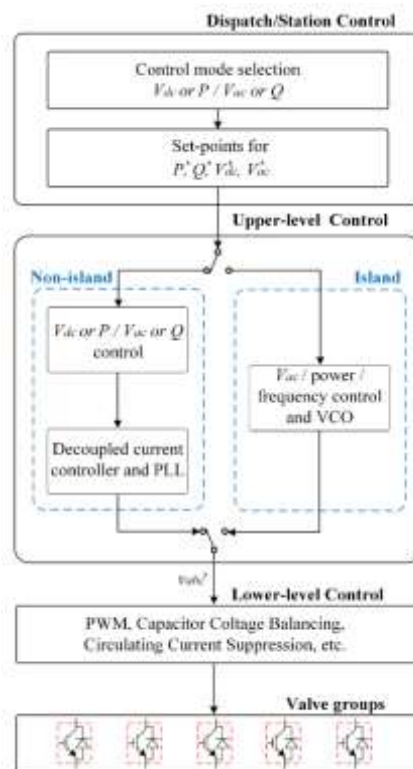
Κλασσικές μέθοδοι	Μέθοδοι που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη
Γραμμικός Προγραμματισμός	Γενετικός αλγόριθμος
Μέθοδοι κλίσης	Σμήνος σωματιδίων
Τετραγωνικός προγραμματισμός	Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο
Newton-Raphson	Βελτιστοποίηση αποικίας μελισσών
Μη γραμμικός προγραμματισμός	Διαφορική εξέλιξη
Εσωτερικό σημείο	Βελτιστοποιητής γκριζού λύκου
-	Shuffled frog leaping

Πίνακας 2.1: Μέθοδοι βελτιστοποίησης ροής ισχύος.

2.6 Δομές ελέγχου (Control Structures)

Τα MMC-VSC (Modular Multilevel Converters-Voltage Source Converters) έχουν κάποια ιεραρχική-βασική δομή. Μια τέτοια δομή μπορεί να παρέχει ευελιξία στις προσεγγίσεις των μοντέλων προσομοίωσης, τον τύπο της μελέτης και επομένως, στις πραγματικές εφαρμογές που βασίζονται σε MMC. Ολόκληρη η δομή ελέγχου ενός VSC μπορεί να διαιρεθεί στα ακόλουθα τρία στρώματα:

- Αποστολή/έλεγχος σταθμού
- Έλεγχος ανώτερου επιπέδου
- Έλεγχος κατωτέρου 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 τα σημεία ρύθμισης λειτουργίας (V_{dc} , V_{ac} κ.λπ.) και τους τρόπους λειτουργίας για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των συστημάτων DC και AC. Εξ ορισμού, η λειτουργία ελέγχου αναφέρεται στα σύνολα και τις δομές ελέγχου λειτουργικότητας που ένας μετατροπέας λειτουργεί (έλεγχος τάσης συνεχούς ρεύματος, έλεγχος ισχύος ή συχνότητας και έλεγχος τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος έναντι άεργου ισχύος ή ελέγχου του συντελεστή ισχύος). Οι εντολές κατανομής πρέπει να ελέγχονται από έναν διαχειριστή του συστήματος, παρόμοια με τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος.

Έλεγχος ανώτερου επιπέδου- Upper-level control

Ο έλεγχος ανώτερου επιπέδου δέχεται σήματα αναφοράς (V^*_{dc} , V^*_{ac} , P^* , Q^*) από την αποστολή και τον έλεγχο του σταθμού και εξάγει ένα σήμα αναφοράς τάσης v^*_{abc} . Ο κύριος παράγοντας επιρροής είναι η επιλογή μεταξύ "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 θ από την τάση V_{abc} στο σημείο κοινής σύζευξης (PCC). Τα ρεύματα αναφοράς i^*_{d} και i^*_{q} παράγονται από το 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 την άμεση ενεργό ισχύ έλεγχο. Ομοίως, η ανταλλαγή άεργου ισχύος (που ορίζεται στον άξονα q) ρυθμίζεται από την τάση εναλλασσόμενου ρεύματος ή τον άμεσο έλεγχο της άεργου ισχύος στο PCC. Σήματα αναφοράς i^*_{d} και i^*_{q} τότε επεξεργάζονται στον αποσυνδεδεμένο ελεγκτή ρεύματος. Σε αυτό το στάδιο, τα σήματα αναφοράς τάσης v^*_{d} και v^*_{q} παράγονται τα οποία, με τη βοήθεια του PLL, μετατρέπονται σε 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, οι εξωτερικές βρόχοι ελέγχου μπορούν να προστεθούν στον έλεγχο ανώτερου επιπέδου. Τέτοιοι βρόχοι ελέγχου επιτρέπουν την προηγμένη κατανομή ενεργού και άεργου ισχύος μεταξύ των VSC που συνδέονται στο ίδιο σύστημα, αλλά και μεταξύ VSC και δικτύων εναλλασσόμενου ρεύματος (συμπεριλαμβανομένων των αιολικών πάρκων). Αυτοί βοηθούν στη διατήρηση ενός ασφαλούς εύρους για την τάση AC/DC, τη συχνότητα αλλά και στην ενίσχυση της ευστάθειας του συστήματος λαμβάνοντας

υπόψη τη δυναμική AC και DC. Τυπικά οι ελεγκτές μπορούν να χαρακτηριστούν σύμφωνα με τις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

- DC voltage droop: χρησιμοποιείται όταν πολλαπλοί μετατροπείς λειτουργούν σε λειτουργία ελέγχου DC τάσης.
- AC voltage droop: χρησιμοποιείται όταν πολλαπλοί μετατροπείς λειτουργούν σε λειτουργία τάσης AC, σε συνδυασμό με άλλες συσκευές ρύθμισης της τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος. (π.χ. STATCOMS, SVC, κ.λπ.).
- Ρύθμιση συχνότητας: χρησιμοποιείται όταν ένας μετατροπέας λειτουργεί σε άμεση ενεργό ισχύ και απαιτείται (συνήθως από τον έλεγχο της κατανομής και τον διαχειριστή του συστήματος) να έχει πρωταρχικές λειτουργίες για την ευστάθεια της πλευράς του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η λειτουργία ελέγχου της νησιδοποιημένης υιοθετείται όταν τα VSC συνδέονται σε ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος με ασύγχρονη παραγωγή (π.χ. αιολικά πάρκα), ασθενή δίκτυα ή παθητικά φορτία. Η υποκείμενη διαδικασία ελέγχου πραγματοποιείται με τη χρήση των τάσεων στον άξονα d. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει ισχυρή σύγχρονη παραγωγή στην πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος, η ανάγκη για συγχρονισμό του δικτύου εξαλείφεται, συνεπώς δεν υπάρχει απαίτηση αποσυνδεδεμένου ελέγχου ρεύματος. Συγκεκριμένα, η γωνία αναφοράς θ^* είναι άμεσα τροφοδοτούμενη από έναν ταλαντωτή τάσης. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι ένα PLL μπορεί να εξαλειφθεί, καθώς η συχνότητα και η φάση της τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος ρυθμίζονται απευθείας από τον από τον ίδιο τον ελεγκτή. Πρόσθετες πτώσεις συχνότητας μπορούν να προστεθούν όταν η ονομαστική ισχύς του συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος είναι συγκρίσιμη με αυτή του VSC και ως εκ τούτου η ανταλλαγή ισχύος μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις συχνότητας. Οι πτώσεις τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος απαιτούνται συνήθως όταν περισσότερες από μία τάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος μονάδες ελέγχου τάσης συνδέονται στον ίδιο δίαυλο.

Κεφάλαιο 3

Grid Forming Inverters

3.1 Εισαγωγή στους grid forming inverters

Τα grid forming inverters είναι ένας νέος τύπος αντιστροφέων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και το συγχρονισμό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι ηλιακοί συλλέκτες και οι αιολικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας. Αντίθετα με τους κλασικούς αντιστροφείς που επηρεάζονται από τις συνθήκες του δικτύου και απαιτούν σταθερή παροχή ενέργειας από το δίκτυο, οι grid forming inverters δημιουργούν ένα δικτυακό συστηματικό σενάριο και επιτρέπουν στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να αναλαμβάνουν τον έλεγχο του δικτύου και το συγχρονισμό της παραγωγής τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ευελιξίας και της ανθεκτικότητας του δικτύου στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας και τις ανωμαλίες, όπως οι διακυμάνσεις της παραγωγής από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και οι βραχυπρόθεσμες απώλειες του δικτύου. Οι grid forming inverters αποτελούν έναν καίριο παράγοντα στην επιτυχή μετάβαση σε ένα βιώσιμο και αποδοτικό σύστημα.



Σχήμα 3.1: Διάταξη grid-forming inverter για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες.

3.1.1 Τι είναι οι grid forming inverters

Οι grid forming inverters είναι μια 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 σήμερα, οι grid forming inverters δεν εξαρτώνται από την παροχή ενέργειας από το δίκτυο. Αντίθετα, δημιουργούν ένα δικό τους σύστημα που συνδέει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο δίκτυο και επιτρέπει σε αυτές να αναλαμβάνουν τον έλεγχο του δικτύου και τον συγχρονισμό της συχνότητας και την ρύθμιση της παραγωγής τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η ευελιξία και η ανθεκτικότητα του δικτύου σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας και ανωμαλίες. Επιπλέον, οι αντιστροφείς αυτοί βοηθούν στην επίτευξη μιας βιώσιμης μετάβασης σε ένα σύστημα ενέργειας με μεγαλύτερη ανανεώσιμη παραγωγή, καθώς βελτιώνουν την απόδοση και την αξιοπιστία του δικτύου.

3.1.2 Ποιες οι λειτουργίες των grid forming inverters στα μικροδίκτυα

Οι grid forming inverters αναλαμβάνουν πολλαπλές λειτουργίες στα μικροδίκτυα. Μεταξύ άλλων, μπορούν να δημιουργήσουν αυτόνομο σύστημα παραγωγής και

διανομής ενέργειας, ανεξάρτητα από την ύπαρξη του κύριου δικτύου. Αυτή η λειτουργία αναφέρεται στην ικανότητα τους να παράγουν, να αποθηκεύουν και να κατανέμουν ενέργεια σε αυτόνομη βάση. Επιπλέον, οι grid forming inverters μπορούν να ρυθμίζουν την τάση, τη συχνότητα και την απόδοση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί και οι ανεμογεννήτριες. Αυτό μπορεί να συνεισφέρει στη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου, στη βελτίωση της απόδοσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Επιπλέον, οι grid forming inverters εκτελούν ενέργειες προστασίας του δικτύου από συνθήκες βραχυκυκλώματος, διαχειρίζονται την φόρτιση του και είναι αρμόδιοι για την ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας του μικροδικτύου.

3.2 Πλεονεκτήματα-Προκλήσεις

Όπως προαναφέρθηκε οι grid forming inverters αντιπροσωπεύουν μια σημαντική τεχνολογική καινοτομία στον τομέα της ανανεώσιμης ενέργειας και της διαχείρισης μικροδικτύων. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει στους παραγωγούς ανανεώσιμης ενέργειας να δημιουργήσουν αυτόνομα μικροδίκτυα, παράγοντας, διανέμοντας και διαχειρίζοντας την ενέργεια χωρίς την ανάγκη σύνδεσης στο κεντρικό δίκτυο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές όπου δεν υπάρχει διαθέσιμο κεντρικό δίκτυο ή όπου η σύνδεση στο κεντρικό δίκτυο είναι ανέφικτη λόγω κόστους ή τεχνικών προβλημάτων. Επιπλέον, οι grid forming inverters μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μειώνοντας την απώλεια ενέργειας από το δίκτυο και αυξάνοντας την αυτάρκεια του συστήματος. Αυτό είναι σημαντικό καθώς συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας και στη βελτίωση της οικονομικής απόδοσης των εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Τα grid forming inverters έχουν αρκετά πλεονεκτήματα για τα μικροδίκτυα, μερικά από αυτά είναι:

- Σταθερότητα Δικτύου: Επιτρέπουν στα μικροδίκτυα να διατηρούν σταθερή τάση και συχνότητα, ακόμη και όταν τα φορτία αλλάζουν δραματικά ή όταν υπάρχουν προβλήματα στο δίκτυο.
- Ευελιξία: Μπορούν να λειτουργήσουν σε αυτόνομο ή παράλληλο τρόπο με το δίκτυο, προσφέροντας έτσι ευελιξία στη λειτουργία τους.
- Αξιοπιστία: Είναι πιο αξιόπιστα από τα grid following inverters, καθώς μπορούν να ανταποκριθούν σε αλλαγές φορτίου και να διατηρήσουν τη σταθερότητα του δικτύου.
- Προστασία του εξοπλισμού: Παρέχουν προστασία του εξοπλισμού από υπερτάσεις και υπερθέρμανση, καθώς και από ανώμαλες συνθήκες λειτουργίας.
- Υποστήριξη για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: Επιτρέπουν την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα μικροδίκτυα, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, ενισχύοντας έτσι τη βιωσιμότητα και την ανεξαρτησία των μικροδικτύων από τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας.
- Μείωση κόστους: Μπορούν να μειώσουν το κόστος εξοπλισμού και λειτουργίας των μικροδικτύων, καθώς μπορούν να αντικαταστήσουν παραδοσιακούς εξοπλισμούς όπως οι γεννήτριες και οι σταθεροποιητές τάσης.
- Ευκολία συντήρησης: Είναι πιο εύκολα στη συντήρηση από τον παραδοσιακό εξοπλισμό, καθώς διαθέτουν αυτοδιάγνωση και εντοπισμό βλαβών, και μπορούν να στείλουν πληροφορίες στο προσωπικό συντήρησης μέσω του διαδικτύου.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα των grid forming inverters είναι η δυνατότητα επίτευξης μεγαλύτερου επιπέδου αξιοπιστίας κάτι το οποίο τα καθιστά απαραίτητα για τα μικροδίκτυα. Η χρήση τους μπορεί να εξασφαλίσει ότι τα μικροδίκτυα θα λειτουργούν ακόμα και σε περίπτωση αποτυχίας της κεντρικής παροχής ισχύος. Αυτό είναι εφικτό διότι οι grid forming inverters μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα από τον κεντρικό πάροχο ισχύος, αναλαμβάνοντας την παραγωγή ισχύος για τη διατήρηση του συστήματος σε λειτουργία. Επιπλέον, η χρήση των grid forming inverters μπορεί να μειώσει την ανάγκη για μεγάλες επενδύσεις στο δίκτυο για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας. Αυτό συμβαίνει διότι οι grid forming

inverters μπορούν να αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά συστήματα ελέγχου σταθερότητας του δικτύου, εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα της συστοιχίας με μειωμένο κόστος επένδυσης. Τέλος, ένα ακόμη πλεονέκτημα των grid forming inverters είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσής τους με προηγμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας.

Προκλήσεις

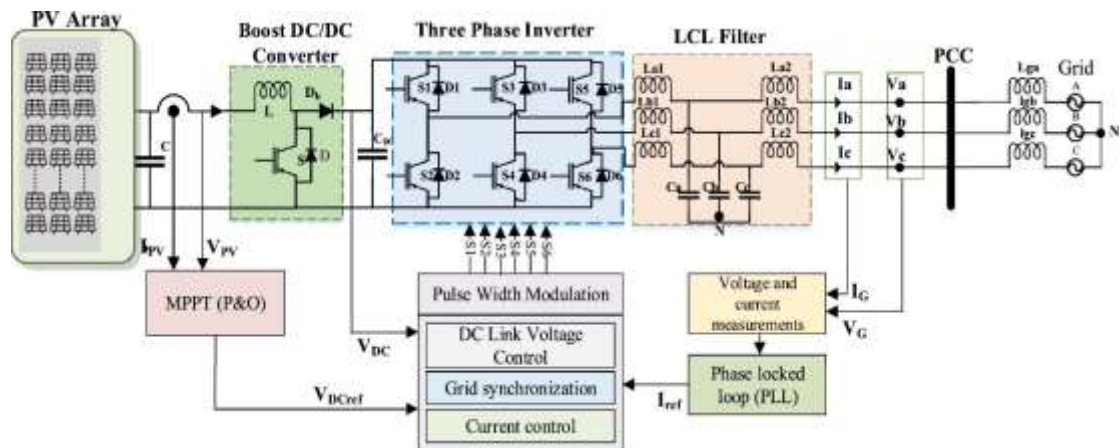
Οι grid forming inverters είναι μια νέα τεχνολογία που επιτρέπει τη σύνδεση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα μικροδίκτυα και αποτελούν μια ελπιδοφόρα λύση για την αειφορία και την ανάπτυξη της πράσινης ενέργειας. Ωστόσο, η εγκατάσταση τους μπορεί να επιφέρει κάποιες προκλήσεις και προβλήματα στη λειτουργία των δικτύων. Μία από τις βασικές προκλήσεις είναι η ανάγκη για συγχρονισμό του συστήματος, καθώς οι grid forming inverters πρέπει να συνεργάζονται με τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας και να διατηρούν τη συχνότητα και την τάση στα επίπεδα που έχουν οριστεί από το δίκτυο. Επιπλέον, η διαχείριση των παραμέτρων του δικτύου, όπως η τάση και η συχνότητα, είναι δύσκολη, καθώς οι grid forming inverters πρέπει να τις διατηρούν σε σταθερά επίπεδα, ανεξάρτητα από τις αλλαγές στο φορτίο. Επιπλέον, οι grid forming inverters μπορεί να παρουσιάζουν προβλήματα στην ανταπόκρισή τους σε αλλαγές φορτίου, καθώς η αύξηση του φορτίου μπορεί να προκαλέσει απώλειες στη σταθερότητα του δικτύου.

Επίσης, οι grid forming inverters μπορεί να δυσκολεύουν τη διαχείριση των παραμέτρων του δικτύου σε περίπτωση βλάβης, καθώς η απομάκρυνση ενός inverter από το δίκτυο μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στις παραμέτρους του δικτύου. Τέλος, η χρήση των grid forming inverters μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητα του συστήματος, καθώς η αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε αστάθειες στο δίκτυο. Επιπλέον, η ανάγκη επένδυσης σε κατάλληλο εξοπλισμό και στην αναβάθμιση του δικτύου μπορεί να αυξήσει το κόστος της εγκατάστασης των grid forming inverters στα μικροδίκτυα. Συνολικά, η χρήση τους αποτελεί μια ελπιδοφόρα λύση για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα μικροδίκτυα, όμως απαιτεί συνεχή παρακολούθηση και διαχείριση των παραμέτρων του δικτύου, καθώς και επένδυση σε κατάλληλο εξοπλισμό και αναβάθμιση του δικτύου.

3.3 Που τοποθετούνται τα grid forming inverters στα μικροδίκτυα

Τα grid forming inverters είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται σε μικροδίκτυα για να διατηρήσουν τη σταθερότητα και τη συχνότητα του δικτύου. Ωστόσο, η χρήση τους μπορεί να επιφέρει προκλήσεις όπως η παραγωγή θερμότητας και η παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση των συνδεδεμένων φορτίων. Επιπλέον, οι συσκευές αυτές απαιτούν συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας και στρατηγικές ελέγχου, ώστε να λειτουργούν σωστά και να αποτρέπουν την αστάθεια του δικτύου. Για αυτό το λόγο, η τοποθέτησή τους στα μικροδίκτυα πρέπει να γίνεται με προσοχή και μελέτη, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες λειτουργίας και την απόδοση των συνδεδεμένων φορτίων.

Μπορούν επίσης να τοποθετηθούν στα σημεία όπου υπάρχουν ευπαθείς φορτία, όπως εργοστάσια, νοσοκομεία, αεροδρόμια, που απαιτούν σταθερότητα στην παροχή ενέργειας. Τα grid forming inverters μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές όπου υπάρχουν προβλήματα στο δίκτυο, όπως απομακρυσμένα νησιά ή απομακρυσμένες περιοχές, όπου η παραγωγή ενέργειας μπορεί να είναι δαπανηρή ή δυσχερής. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα ηλεκτροδότησης σε αναπτυσσόμενες χώρες, όπου η δυνατότητα να συνδεθούν στο κεντρικό δίκτυο είναι περιορισμένη ή ανύπαρκτη. Τέλος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε περιοχές όπου η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι υψηλή, όπως στις περιοχές με ηλιακούς ή αιολικούς σταθμούς, και απαιτείται η διατήρηση σταθερότητας στο δίκτυο.



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση διάταξης φωτοβολταϊκών πάνελ με inverter.

Το σχεδιάγραμμα απεικονίζει μια διάταξη φωτοβολταϊκών πάνελ, τα οποία παράγουν συνεχές ρεύμα που μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο τριφασικό ρεύμα μέσω ενός inverter. Πριν από την τροφοδοσία του δικτύου, το ρεύμα περνά από ένα LCL φίλτρο. Ένα σύστημα ελέγχου παρακολουθεί την ένταση και την τάση του ρεύματος που εξέρχεται από το inverter και το φίλτρο, συγκρίνοντάς τα με μια προκαθορισμένη τιμή αναφοράς, προκειμένου να εντοπίζει ανωμαλίες. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το LCL φίλτρο είναι αναγκαίο για τη σωστή σύνδεση και τροφοδοσία του δικτύου από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Στην συνέχεια μετά το σημείο ελέγχου ακολουθεί το PCC.

Στο σύστημα εμφανίζονται δυο επιπλέον στοιχεία των οποίων η ύπαρξη παίζει καθοριστικό ρόλο για το μικροδίκτυο και είναι τα εξής:

- **LCL φίλτρο**

Ο σκοπός που ένα φίλτρο LCL τοποθετείται στην έξοδο ενός inverter είναι για να απορροφήσει τις υψηλές συχνότητες και να βελτιώσει την ποιότητα της τάσης και του ρεύματος που παράγεται. Τα inverter συνήθως χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν την ενέργεια σε μια συγκεκριμένη μορφή για τη χρήση σε κάποια εφαρμογή. Ωστόσο, η χρήση inverter μπορεί να οδηγήσει σε παραμορφώσεις στο ρεύμα και την τάση που παράγουν, αυτό μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία άλλων ηλεκτρικών συσκευών που είναι συνδεδεμένα στο σύστημα. Το LCL φίλτρο απομακρύνει τις υψηλές συχνότητες και τις παραμορφώσεις, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα του ρεύματος και εξομαλύνοντας την τάση και την ένταση του ρεύματος που παράγεται. Αυτό αποτρέπει την πιθανότητα προβλημάτων στο σύστημα και ενισχύει την απόδοσή του.

Το LCL φίλτρο αποτελείται από μια διάταξη στοιχείων που συνδέονται μεταξύ τους, όπως δύο πηνία (L) και έναν πυκνωτή (C) που οδηγεί το ρεύμα που διέρχεται από αυτόν σε μια γείωση. Τέλος ο συνδυασμός των στοιχείων αυτών έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την γενική λειτουργία του δικτύου παρέχοντας ρεύμα υψηλής ποιότητας και σταθερότητας και με μειωμένες διακυμάνσεις.

- **PCC (Point of Common Coupling)**

Η λειτουργία του PCC στο μικροδίκτυο αναφέρεται στο σημείο σύνδεσης μεταξύ του μικροδικτύου και του κύριου δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, το PCC είναι το "Point of Common Coupling". Στο PCC, το μικροδίκτυο συνδέεται με το δίκτυο και ελέγχει τη ροή του ρεύματος και διασφαλίζει ότι το μικροδίκτυο λειτουργεί σταθερά και αξιόπιστα.

Το PCC (Point of Common Coupling) έχει ζωτική σημασία για τη λειτουργία του μικροδικτύου, καθώς όλοι οι παραγωγοί και οι καταναλωτές πρέπει να συνδεθούν μέσω αυτού του σημείου. Αποτελεί το σημείο όπου οι ενεργειακοί φορείς (τάση και ρεύμα) μπορούν να μεταφέρονται μεταξύ του μικροδικτύου και του κύριου δικτύου. Η ποιότητα της τάσης και του ρεύματος στο PCC είναι σημαντική για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία του μικροδικτύου. Επομένως, είναι σημαντικό να γίνεται επαρκής παρακολούθηση του PCC για τη διασφάλιση της ποιότητας της ενέργειας που μεταφέρεται σε αυτό.

Κεφάλαιο 4

Blackstart

4.1 Εισαγωγή στο Blackstart

Η τεχνική Blackstart αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της λειτουργίας των μικροδικτύων. Στην ουσία, αναφέρεται στη διαδικασία επανεκκίνησης ενός δικτύου που έχει αποσυνδεθεί από το κύριο δίκτυο κατά τη διάρκεια μιας διακοπής ηλεκτροδότησης. Η τεχνική Blackstart είναι απαραίτητη για τα μικροδίκτυα καθώς αυτά εξαρτώνται από το κύριο δίκτυο για να λειτουργήσουν. Στην περίπτωση μιας διακοπής ρεύματος, οι μικροπαραγωγοί στα μικροδίκτυα πρέπει να είναι σε θέση να ξεκινήσουν τα δικά τους συστήματα χωρίς την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από το

κύριο δίκτυο. Η διαδικασία Blackstart απαιτεί προηγούμενη προετοιμασία και συντονισμό μεταξύ των μικροπαραγωγών και του κύριου δικτύου. Κατά τη διάρκεια της διακοπής ρεύματος, οι μικροπαραγωγοί πρέπει να είναι σε θέση να ενεργοποιηθούν τα δικά τους συστήματα και να αρχίσουν να παράγουν ενέργεια για την επανεκκίνηση του μικροδικτύου. Η τεχνική Blackstart είναι ζωτικής σημασίας για την αξιοπιστία των μικροδικτύων καθώς εξασφαλίζει ότι τα μικροδίκτυα μπορούν να αποκατασταθούν μετά από μια διακοπή ρεύματος. Αυτό εξασφαλίζει ότι οι καταναλωτές στα μικροδίκτυα θα έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια και ότι οι επιχειρήσεις και οι οργανισμοί θα μπορούν να συνεχίσουν τη λειτουργία τους. Η τεχνική Blackstart είναι επίσης σημαντική για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των μικροδικτύων. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως οι ηλιακοί συλλέκτες και οι ανεμογεννήτριες, συνήθως συνδέονται σε μικροδίκτυα για να τα τροφοδοτούν και η επαναφορά του δικτύου επιτυγχάνεται με τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού όπως οι σύγχρονες γεννήτριες που παίζουν καθοριστικό ρόλο. Η τεχνική Blackstart εξασφαλίζει ότι οι μικροπαραγωγοί μπορούν να ξεκινήσουν τις συσκευές τους μόνοι τους, χωρίς τη βοήθεια του κύριου δικτύου. Συνολικά, το Blackstart είναι ένα κρίσιμο κομμάτι της λειτουργίας των μικροδικτύων και εξασφαλίζει την αξιοπιστία της ηλεκτροδότησης.

4.2 Τι είναι το Blackstart

Το Blackstart είναι η διαδικασία εκκίνησης ενός ηλεκτρικού δικτύου χωρίς εξωτερική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, είτε από το δίκτυο μεγάλης κλίμακας είτε από τα μικροδίκτυα, μετά από μια πλήρη διακοπή ρεύματος. Στα μικροδίκτυα, όπως είναι τα νησιωτικά δίκτυα ή τα μικρά δίκτυα παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι σύγχρονες γεννήτριες αποτελούν συνήθως το κύριο μέσο για την επαναφορά του ρεύματος μετά από μια διακοπή. Για να πραγματοποιηθεί ένα Blackstart σε ένα μικροδίκτυο, οι σύγχρονες γεννήτριες πρέπει να είναι σε θέση να εκκινήσουν το δίκτυο με τη χρήση της ενέργειας που έχει αποθηκευτεί στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ή από τη χρήση άλλων πηγών ενέργειας όπως οι ανεμογεννήτριες ή οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Επιπλέον, οι γεννήτριες πρέπει να συγχρονιστούν με το δίκτυο και να σταθεροποιήσουν την τάση του δικτύου. Η διαδικασία αυτή είναι

σημαντική για την ασφαλή επαναφορά του μικροδικτύου στη λειτουργία του και απαιτεί τη συνεργασία των επαγγελματιών του τομέα της ενέργειας. Η χρήση συγχρονισμένων γεννητριών για το Blackstart στα μικροδίκτυα έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες λύσεις, όπως η χρήση εξωτερικών γεννητριών ή η επαναφορά του δικτύου μέσω των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η χρήση σύγχρονων γεννητριών εξασφαλίζει την ακρίβεια του συγχρονισμού και τη σταθερότητα του δικτύου, ενώ παράλληλα βελτιώνει την αξιοπιστία του δικτύου και μειώνει τον κίνδυνο για περαιτέρω διακοπές ρεύματος. Σε γενικές γραμμές, το Blackstart είναι μια διαδικασία ανακτήσεως της λειτουργίας του δικτύου μετά από μια πλήρη διακοπή ρεύματος, και η χρήση γεννητριών αποτελεί μια αξιόπιστη και αποτελεσματική λύση για την αποκατάσταση του ρεύματος στα μικροδίκτυα. Οι σύγχρονες γεννήτριες απαιτούν ένα σταθερό δίκτυο για να λειτουργήσουν σωστά, και για αυτό το λόγο, η διαδικασία Blackstart στα μικροδίκτυα πρέπει να συντονίζεται με προσοχή. Η αντιστάθμιση της χωρητικότητας και της αντίστασης του δικτύου μπορεί να είναι κρίσιμη για τη σταθερότητα του δικτύου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας Blackstart, ενώ οι επαγγελματίες του τομέα της ενέργειας πρέπει να είναι επίσης εξοικειωμένοι με τις ιδιαιτερότητες των σύγχρονων γεννητριών. Μια τέτοια διαδικασία εκκίνησης απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και δικτυακή τεχνολογία, για να εξασφαλιστεί ότι η διαδικασία της εκκίνησης θα είναι ασφαλής και αποτελεσματική. Σε περιπτώσεις όπου οι μικροπαραγωγοί δεν είναι σε θέση να παρέχουν επαρκή ισχύ για την εκκίνηση του δικτύου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικοί εξωτερικοί πάροχοι ενέργειας για την εκκίνηση του συστήματος. Επιπλέον, οι μικροπαραγωγοί και οι παραγωγοί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν να ενταχθούν στη διαδικασία Blackstart και να βοηθήσουν στην επαναφορά του δικτύου, ενισχύοντας έτσι την αντοχή και την ανθεκτικότητα του συστήματος. Το Blackstart λοιπόν είναι ένα κρίσιμο στάδιο στην ανάκτηση του μικροδικτύου από μια διακοπή ρεύματος και επαναφορά του στη λειτουργία του. Η επαναφορά του συστήματος στην λειτουργία του μπορεί να διαρκέσει από μερικές ώρες έως και μερικές ημέρες, ανάλογα με την έκταση της διακοπής ρεύματος και το μέγεθος του μικροδικτύου. Εν κατακλείδι, το Blackstart αποτελεί ένα πολύπλοκο και κρίσιμο στάδιο στη διαχείριση ενός μικροδικτύου και απαιτεί τη συνεργασία των εμπλεκόμενων φορέων και τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού και τεχνολογίας.

4.3 Ιστορική αναδρομή

Η ιστορική αναδρομή του Blackstart στα μικροδίκτυα ξεκινά από τη δεκαετία του 1960, όταν οι επιχειρήσεις και οι οργανισμοί άρχισαν να αποκτούν δικά τους δίκτυα διανομής ενέργειας. Αρχικά, αυτά τα μικροδίκτυα δεν είχαν τη δυνατότητα να επαναφέρουν τη λειτουργία τους μετά από μια διακοπή της παροχής ενέργειας, καθώς δεν υπήρχε καμία εξωτερική πηγή ενέργειας για την επανεκκίνηση του συστήματος. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε η τεχνική Blackstart, η οποία επιτρέπει την επαναφορά της παραγωγής ενέργειας σε ένα μικροδίκτυο μετά από μια πλήρη διακοπή. Η τεχνική Blackstart απαιτεί τη χρήση ειδικών γεννητριών, οι οποίες μπορούν να ξεκινήσουν αυτόνομα χωρίς την υποστήριξη του δικτύου, και στη συνέχεια να επαναφέρουν τη λειτουργία του συστήματος. Η τεχνική Blackstart αρχικά χρησιμοποιούνταν κυρίως σε μεγάλα δίκτυα, όπως αυτά των μεγάλων πόλεων και των βιομηχανικών περιοχών. Ωστόσο, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την αύξηση του αριθμού των μικροδικτύων, η τεχνική Blackstart έχει γίνει απαραίτητη και για τα μικρότερα δίκτυα. Η χρήση της τεχνικής Blackstart στα μικροδίκτυα είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί αυτά τα δίκτυα συνήθως εξυπηρετούν ευαίσθητες περιοχές, όπως νοσοκομεία, αεροδρόμια, στρατιωτικές εγκαταστάσεις και κατοικημένες περιοχές. Η τεχνική Blackstart στα μικροδίκτυα είναι εφικτή μόνο με τη χρήση σύγχρονων γεννητριών, οι οποίες μπορούν να ξεκινήσουν αυτόνομα χωρίς τη στήριξη του δικτύου και να επαναφέρουν το δίκτυο μετά από μια πλήρη διακοπή της παροχής ενέργειας. Αυτές οι σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται για να παρέχουν την αρχική ενέργεια στο δίκτυο και να αποκαταστήσουν τη σταθερότητα της τάσης στο δίκτυο. Στη σημερινή εποχή, η τεχνική Blackstart στα μικροδίκτυα είναι αναγκαία για την επίτευξη μιας ασφαλούς και αξιόπιστης διανομής ενέργειας στους καταναλωτές. Επίσης, η χρήση σύγχρονων γεννητριών για την τεχνική Blackstart στα μικροδίκτυα είναι μια απόδειξη της εξέλιξης της τεχνολογίας και της σταδιακής μετάβασης από τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής ενέργειας σε πιο αποδοτικές και αειφόρες εναλλακτικές λύσεις. Παρόλο που η τεχνική Blackstart στα μικροδίκτυα έχει σημαντική αξία και χρησιμότητα στο σύγχρονο ενεργειακό τοπίο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι απαιτείται εξειδικευμένη γνώση και εμπειρία για τη σωστή υλοποίησή της. Επίσης, απαιτείται η τακτική συντήρηση και ανανέωση του εξοπλισμού για να διασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του. Η τεχνική Blackstart στα μικροδίκτυα αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της στρατηγικής για τη διαχείριση κρίσεων στον ενεργειακό τομέα και

αναμένεται να συνεχίσει να βελτιώνεται και να εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξη της τεχνολογίας.

Πριν από την εξέλιξη της τεχνολογίας που επέτρεπε την εφαρμογή της τεχνικής Blackstart, οι τεχνικές αποκατάστασης ηλεκτρικών δικτύων σε περίπτωση blackout ήταν διαφορετικές. Οι αναλαμβανόμενες ενέργειες περιλάμβαναν την ανίχνευση της βλάβης, την αποσύνδεση των εγκαταστάσεων που επηρεάζονταν από τη βλάβη και τη σταδιακή επαναφορά τους μετά την επιδιόρθωση της βλάβης. Επίσης, στις περιπτώσεις που αυτές οι τεχνικές αποκατάστασης ήταν ανεπαρκείς ή δεν ήταν δυνατή η ανίχνευση της βλάβης, χρησιμοποιούνταν γεννήτριες με μηχανική κίνηση, όπως οι ατμοκίνητες γεννήτριες, για την αποκατάσταση της ενέργειας. Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές ήταν περιορισμένες και περιλάμβαναν μεγάλο χρόνο αναμονής για την εκκίνηση των γεννητριών, καθώς και υψηλό κόστος συντήρησης και λειτουργίας τους. Σήμερα, η τεχνολογία έχει εξελιχθεί και η τεχνική Blackstart έχει αντικαταστήσει αυτές τις παλαιότερες τεχνικές. Μια από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν για την αποκατάσταση των ηλεκτρικών δικτύων σε περίπτωση blackout ήταν η μηχανική επαναφορά του δικτύου, η οποία συνίστατο στη χειρωνακτική αποκατάσταση των βλαβών και της λειτουργικότητας του δικτύου. Αυτή η τεχνική ήταν πολύ χρονοβόρα και δύσκολη, καθώς απαιτούσε την απομόνωση των επιμέρους τμημάτων του δικτύου, την επισκευή των βλαβών και τη συνεχή επικοινωνία μεταξύ των ομάδων που εργάζονταν στην αποκατάσταση του δικτύου. Επιπλέον, αυτή η τεχνική δεν εξασφάλιζε την αποκατάσταση του δικτύου σε λειτουργική κατάσταση στο σύνολό του, και συχνά υπήρχε η ανάγκη για περαιτέρω εργασίες και επισκευές προκειμένου να επανέλθει στη λειτουργία του. Ωστόσο, η τεχνολογική πρόοδος έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνικών όπως ο Blackstart, οι οποίες επιτρέπουν την πιο γρήγορη και αξιόπιστη αποκατάσταση των ηλεκτρικών δικτύων. Οι τεχνικές αποκατάστασης ηλεκτρικών δικτύων κατά τη διάρκεια ενός blackout στο παρελθόν περιλάμβαναν συνήθως τη χρήση αναλογικών συσκευών και μηχανών, όπως διακόπτες και γεννήτριες χαμηλής ισχύος, για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές είχαν τα περιοριστικά τους στοιχεία, καθώς επιτρέπαν μόνο την αποκατάσταση μικρού αριθμού καταναλωτών και δεν μπορούσαν να αντιμετωπίσουν μεγάλες διακυμάνσεις φορτίου. Τον 20ο αιώνα, με την εμφάνιση πιο αξιόπιστων και αποτελεσματικών τεχνολογιών, όπως οι ψηφιακοί υπολογιστές και οι αυτόματοι διακόπτες, οι τεχνικές αποκατάστασης δικτύων έχουν βελτιωθεί

σημαντικά. Με τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών, όπως η αυτόματη απομόνωση και η αυτόματη επανασύνδεση, τα ηλεκτρικά δίκτυα μπορούν πλέον να αντιμετωπίσουν με αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία τα προβλήματα που προκαλούνται από τις διακυμάνσεις. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου αποκατάστασης δικτύων είναι ότι είναι πολύ πιο αργή από τη μέθοδο του Blackstart και μπορεί να διαρκέσει αρκετές ημέρες ή ακόμη και εβδομάδες. Επιπλέον, η δυνατότητα αναζήτησης και επιλογής εξωτερικών πηγών ενέργειας μπορεί να είναι περιορισμένη κατά τη διάρκεια μιας κρίσης ενέργειας. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος αποκατάστασης παραμένει μια εναλλακτική λύση σε περιπτώσεις που η τεχνολογία δεν επιτρέπει τη χρήση της τεχνικής του Blackstart.

4.4 Πως επιτυγχάνεται το Blackstart με την χρήση σύγχρονων γεννητριών

Οι σύγχρονες γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στο Blackstart των μικροδικτύων, πρέπει να είναι σε θέση να ξεκινήσουν τη λειτουργία τους από μηδέν. Στο Blackstart δεν υπάρχει καμία πηγή εξωτερικής ενέργειας για να επανεκκινήσει το σύστημα, οπότε η γεννήτρια πρέπει να παράγει επαρκή ενέργεια για να επανεκκινήσει το σύστημα. Για να λειτουργήσει στο Blackstart, η γεννήτρια πρέπει να έχει ένα ενσωματωμένο σύστημα εκκίνησης που θα ξεκινά την κίνηση του ρότορα και του στάτορα από το μηδέν. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ισχυρού ηλεκτρικού κινητήρα που συνδέεται με τον ρότορα και τον στάτορα της γεννήτριας και τους επιτρέπει να περιστραφούν αργά και με ασφάλεια. Μετά την εκκίνηση του ρότορα και του στάτορα, η γεννήτρια αρχίζει να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και η ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται για να επανεκκινήσει τα υπόλοιπα συστήματα του δικτύου. Η γεννήτρια παρέχει επίσης την απαραίτητη ενέργεια για να διατηρηθεί η σταθερότητα της τάσης στο δίκτυο και να αποφευχθούν ζημιές στο εξοπλισμό. Στα μικροδίκτυα, η χρήση σύγχρονων γεννητριών στο Blackstart είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι συνήθεις πηγές ενέργειας, όπως οι συνδεδεμένες γεννήτριες ή οι πηγές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δεν είναι πάντα διαθέσιμες. Επιπλέον, η χρήση σύγχρονων γεννητριών στο Blackstart μειώνει τον κίνδυνο μη αντιστοιχίας της συχνότητας, καθώς οι γεννήτριες αυτές μπορούν να επανέλθουν στη λειτουργία τους σχεδόν αμέσως μετά την αποκατάσταση της ενέργειας. Συνολικά, οι σύγχρονες γεννήτριες

που χρησιμοποιούνται στο Blackstart των μικροδικτύων πρέπει να έχουν ειδικά συστήματα εκκίνησης που θα επιτρέπουν στη γεννήτρια να ξεκινήσει από το μηδέν και να παρέχουν επαρκή ενέργεια για την αποκατάσταση της λειτουργίας του δικτύου. Επιπλέον, η χρήση τους μειώνει την ανάγκη για μεγάλες μπαταρίες αποθήκευσης ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση κρίσεων στο δίκτυο κάτι το οποίο τις καθιστά μια οικονομική επιλογή. Συνολικά, η χρήση σύγχρονων γεννητριών στο Blackstart στα μικροδίκτυα είναι κρίσιμη για την αποκατάσταση της λειτουργίας του δικτύου μετά από μια διακοπή ρεύματος. Η επιλογή σωστών γεννητριών και η σωστή διαχείριση τους είναι καίριας σημασίας για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του δικτύου, καθώς και για την επίτευξη των στόχων της βιωσιμότητας στον τομέα της ενέργειας.

Η διαδικασία Blackstart αφορά την επαναφορά ενός δικτύου ρεύματος μετά από μία πλήρη διακοπή ρεύματος. Στην περίπτωση ενός μικροδικτύου, η διαδικασία Blackstart μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση σύγχρονων γεννητριών. Ακολουθούν τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για να επιτευχθεί μια διαδικασία Blackstart με τη χρήση σύγχρονων γεννητριών σε ένα μικροδίκτυο:

- Ενεργοποίηση του συστήματος ελέγχου και των αισθητήρων: Οι αισθητήρες πρέπει να ενεργοποιηθούν για να παρέχουν πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου. Ο συστηματικός έλεγχος πρέπει να ενεργοποιηθεί για να ελέγχει την παραγωγή και τη διανομή του ρεύματος στο δίκτυο.
- Προετοιμασία των γεννητριών: Οι γεννήτριες πρέπει να ελεγχθούν και να ετοιμαστούν για την εκκίνησή τους. Αυτό περιλαμβάνει τον έλεγχο της κατάστασης των μηχανικών μερών, του εξοπλισμού ελέγχου και της κατάστασης των μετασχηματιστών. Επίσης, πρέπει να ελεγχθεί ο συντονισμός μεταξύ των γεννητριών για να εξασφαλιστεί ότι θα λειτουργούν συντονισμένα κατά τη διαδικασία εκκίνησης.
- Εκκίνηση των γεννητριών: Οι γεννήτριες πρέπει να εκκινηθούν σε μια συγκεκριμένη σειρά για να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία του δικτύου. Η εκκίνηση μπορεί να γίνει με τη χρήση ενός εξωτερικού πηνίου εκκίνησης ή με τη χρήση της ικανότητας εκκίνησης του ίδιου του συστήματος.

- Συγχρονισμός των γεννητριών: Αφού εκκινηθούν οι γεννήτριες, πρέπει να συγχρονιστούν μεταξύ τους και με το δίκτυο για να διασφαλιστεί ότι η παραγωγή τους είναι συντονισμένη και συμβατή με τις απαιτήσεις του δικτύου.
- Ανάκτηση του δικτύου: Αφού οι γεννήτριες είναι συγχρονισμένες και έχουν ξεκινήσει την παραγωγή ρεύματος, μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία ανάκτησης του δικτύου. Αυτό περιλαμβάνει την ενεργοποίηση των κυκλωμάτων διανομής και των φορτίων.

Η διαδικασία Blackstart πρέπει να προετοιμαστεί προσεκτικά και να δοκιμαστεί περιοδικά για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η ασφάλεια του δικτύου. Η προετοιμασία αυτή περιλαμβάνει την αναβάθμιση του εξοπλισμού και των δικτυακών υποδομών, τη διενέργεια περιοδικών ελέγχων και δοκιμών και την εκπαίδευση του προσωπικού. Στη σύγχρονη εποχή, οι γεννήτριες μπορούν να ελεγχθούν και να συγχρονιστούν αυτόματα με τη χρήση προηγμένων συστημάτων ελέγχου και παρακολούθησης. Επίσης, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως οι αιολικοί και οι ηλιακοί σταθμοί μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που συνδέονται με την εκκίνηση του δικτύου μετά από μακρά διακοπή. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία Blackstart είναι μια πολύπλοκη διαδικασία και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η πολιτική και οικονομική κατάσταση σε μια περιοχή καθώς και η διαθεσιμότητα των πόρων. Ωστόσο, η σωστή προετοιμασία και διαχείριση της διαδικασίας μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του χρόνου ανάκτησης του δικτύου μετά από μια μακρά διακοπή. Η διαδικασία Blackstart μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση συγχρόνων γεννητριών, όπως προαναφέρθηκε, ή με τη χρήση αυτόνομων συστημάτων απόθεσης ενέργειας, όπως μπαταρίες ή συστήματα υδρογόνου. Στη δεύτερη περίπτωση, η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκκίνηση του δικτύου και στη συνέχεια μπορεί να επαναφορτιστεί με τη χρήση των σύγχρονων γεννητριών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συνολικά, η διαδικασία Blackstart αποτελεί ένα σημαντικό στάδιο στη διαχείριση της ενέργειας και της ασφάλειας του δικτύου. Η προετοιμασία, η δοκιμή και η διαχείριση της διαδικασίας αυτής πρέπει να πραγματοποιούνται με τον κατάλληλο τρόπο για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία του δικτύου και η προστασία της δημόσιας ασφάλειας.

4.5 Σύγχρονες γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες αποτελούν ένα σημαντικό στοιχείο της τεχνικής Blackstart στα μικροδίκτυα. Οι γεννήτριες αυτές χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση της λειτουργίας του μικροδικτύου μετά από μια διακοπή ρεύματος. Παρέχουν υψηλή απόδοση και αξιοπιστία, ενώ είναι επίσης περιβαλλοντικά βιώσιμες. Οι γεννήτριες αυτές μπορούν να λειτουργούν με διάφορες πηγές καυσίμων, όπως άνθρακα, φυσικό αέριο, πετρέλαιο καθώς και βιοκαύσιμα, κάτι το οποίο τις καθιστά μια οικολογική επιλογή. Η τεχνολογία αυτή εξασφαλίζει την αξιοπιστία και τη βιωσιμότητα του μικροδικτύου και παρέχει στους καταναλωτές πρόσβαση σε αξιόπιστη και σταθερή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η χρήση σύγχρονων γεννητριών στο πλαίσιο της τεχνικής Blackstart στα μικροδίκτυα βοηθά στην αποφυγή απρόβλεπτων καταστάσεων και στη διατήρηση της σταθερότητας του συστήματος. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται για την διαμόρφωση και την διαχείριση της τάσης και της συχνότητας του δικτύου, γεγονός που ευνοεί και την ενσωμάτωση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που προϋποθέτουν την διαμόρφωση της τάσης και της συχνότητάς τους για την τροφοδοσία του μικροδικτύου από αυτές. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη αξιοπιστία, βιωσιμότητα και επεκτασιμότητα των μικροδικτύων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση σύγχρονων γεννητριών στο πλαίσιο της τεχνικής Blackstart στα μικροδίκτυα απαιτεί την εφαρμογή συγκεκριμένων πρωτοκόλλων και διαδικασιών, όπως ο συντονισμός μεταξύ των διαφόρων γεννητριών και η προσαρμογή στις διαφορετικές συνθήκες του μικροδικτύου για την αρμονική λειτουργία όλων των συστημάτων.

Η τεχνολογία των σύγχρονων γεννητριών έχει προχωρήσει σημαντικά τα τελευταία χρόνια καθώς χρησιμοποιούνται υψηλής ποιότητας μαγνητικά υλικά και ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου γεγονός που έχει αυξήσει σημαντικά την απόδοσή τους. Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι σημαντικές όχι μόνο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και για την ενεργειακή απόδοση και την προστασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον, οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν σχεδιαστεί για να είναι πιο αποδοτικές και να μειώνουν την κατανάλωση καυσίμων. Οι περισσότερες γεννήτριες χρησιμοποιούν σχέδια υψηλής απόδοσης, όπως η χρήση υπεραγωγικών υλικών για να αυξήσουν την απόδοση του μηχανήματος, και έχουν επίσης σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιούν τις απώλειες ισχύος που συμβαίνουν κατά τη μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος από τη γεννήτρια στο δίκτυο. Επιπλέον, η τεχνολογία των γεννητριών έχει επεκταθεί σε περιοχές που παρουσιάζουν προκλήσεις στην

παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως στα απομακρυσμένα νησιά και τα απομακρυσμένα μέρη του κόσμου. Η χρήση μικρών σύγχρονων γεννητριών μπορεί να επιτρέψει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτές τις περιοχές χωρίς την ανάγκη μεταφοράς της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Τέλος, οι σύγχρονες γεννήτριες είναι αναγκαίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η σχεδίαση των σύγχρονων γεννητριών επιτρέπει την αποδοτική μετατροπή της κινητικής ενέργειας του αέρα ή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, μειώνοντας την εξάρτηση από τις παραδοσιακές μορφές ενέργειας που προκαλούν κλιματικές αλλαγές και άλλες επιβλαβείς επιπτώσεις στο περιβάλλον. Συνολικά, οι σύγχρονες γεννήτριες παρέχουν αξιόπιστη και αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και επιτρέπουν την προσαρμογή της τεχνολογίας σε διαφορετικές περιοχές και απαιτήσεις ενέργειας. Με τη συνεχή τεχνολογική ανάπτυξη και τη βελτίωση της απόδοσης, οι σύγχρονες γεννήτριες θα συνεχίσουν να παίζουν ένα καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο μας.

Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να λειτουργούν σε μικροδίκτυα και να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με μεγάλη απόδοση και αξιοπιστία. Συνήθως, οι γεννήτριες αυτές συνδέονται με το δίκτυο μέσω μιας συσκευής μετατροπής, όπως ένας αντιστροφέας (inverter), που μετατρέπει την κατανάλωση ή την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μορφή αποδεκτή από το δίκτυο. Κατά τη λειτουργία τους στα μικροδίκτυα, οι σύγχρονες γεννήτριες ελέγχονται από μια σειρά αλγορίθμων και ελεγκτών που επιτρέπουν την αυτόματη ρύθμιση του ρεύματος και της τάσης του δικτύου. Αυτό είναι σημαντικό για τη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου και την αποφυγή διακυμάνσεων στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γεννήτριες στα μικροδίκτυα μπορούν επίσης να συνδεθούν σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες, για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας και τη χρήση της σε αργότερο χρόνο και να την απελευθερώνουν κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής παραγωγής ενέργειας από τις πηγές ενέργειας, όπως κατά τη διάρκεια νυκτερινών ωρών ή κατά τη διάρκεια μικρής αεροδυναμικής δραστηριότητας. Για τα μικροδίκτυα οι σύγχρονες γεννήτριες λειτουργούν σαν ενδιάμεσο στοιχείο μεταξύ των πηγών ενέργειας και του δικτύου, εξασφαλίζοντας ότι η παραγόμενη ενέργεια είναι συνεχής και σταθερή. Για τον έλεγχο της λειτουργίας των γεννητριών στα μικροδίκτυα, χρησιμοποιούνται ειδικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας, που επιτρέπουν τον έλεγχο της παραγωγής και της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας στο

μικροδίκτυο. Με τη χρήση αισθητήρων και ελεγκτών, αυτά τα συστήματα μπορούν να ανιχνεύσουν την κατανάλωση ενέργειας και την παραγωγή της από τις διάφορες πηγές ενέργειας, και να ρυθμίσουν τη λειτουργία των γεννητριών και των άλλων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα. Τέλος αναμένεται στο μέλλον να γίνει πιο εντατική η χρήση των σύγχρονων γεννητριών στα μικροδίκτυα, καθώς η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνεχίζεται και η ανάγκη για αξιόπιστα, αποδοτικά και αειφόρα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται.

4.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής του Blackstart στα μικροδίκτυα είναι πολλά. Καταρχάς, αυτή η τεχνική επιτρέπει στα μικροδίκτυα να ανακτήσουν τη λειτουργικότητά τους μετά από μια απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας πολύ πιο γρήγορα από ό,τι με άλλες τεχνικές. Αυτό συμβαίνει επειδή η τεχνική του Blackstart επιτρέπει στα μικροδίκτυα να ξεκινήσουν τη διαδικασία της αποκατάστασης ισχύος με μια ελάχιστη ποσότητα ενέργειας από το δίκτυο ή ακόμη και από εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως ηλιακά ή αιολικά συστήματα. Επιπλέον, η τεχνική του Blackstart είναι ένα πολύ αποτελεσματικό μέσο για τη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της αποκατάστασης ισχύος, το Blackstart επιτρέπει στα μικροδίκτυα να επανέλθουν στη λειτουργία τους χωρίς προβλήματα ή αστάθειες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τεχνική αυτή προσφέρει μια σταθερή πηγή ισχύος για την επανεκκίνηση του συστήματος. Επιπλέον, η τεχνική του Blackstart είναι εξαιρετικά ευέλικτη. Μπορεί να προσαρμοστεί σε διάφορες καταστάσεις και συνθήκες, επιτρέποντας στα μικροδίκτυα να ανακτήσουν τη λειτουργικότητά τους ανεξάρτητα από το πόσο σοβαρή είναι η απώλεια ισχύος. Ακόμα, η τεχνική του Blackstart είναι πολύ αξιόπιστη. Έχει αποδειχθεί ότι λειτουργεί αξιόπιστα σε διάφορες καταστάσεις και συνθήκες, και έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλές περιπτώσεις ανά τον κόσμο. Με τη χρήση αυτής της τεχνικής, οι επιχειρήσεις μπορούν να διασφαλίσουν ότι θα έχουν μια αξιόπιστη και αποτελεσματική λύση για την επανεκκίνηση του συστήματος ισχύος τους σε περίπτωση αποσύνδεσης του κεντρικού δικτύου. Επιπλέον, η τεχνική του Blackstart μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο ανεφοδιασμού ισχύος σε περιοχές με απομονωμένα ή απομακρυσμένα δίκτυα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του Blackstart είναι ότι μπορεί να συμβάλει στην προώθηση της ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς

επιτρέπει την αποτελεσματική επαναφορά των μικροδικτύων και την εξυπηρέτηση των αυξημένων απαιτήσεων ενέργειας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μια πιο αποδοτική και βιώσιμη διαχείριση της ενέργειας σε περιοχές με μικροδίκτυα. Με τη δυνατότητα αποτελεσματικής ηλεκτροδότησης των μικροδικτύων, μπορεί να αποφευχθεί η επιδείνωση της κατάστασης σε περίπτωση βλάβης και να ελαχιστοποιηθούν οι δυσμενείς επιπτώσεις σε οικονομικό και κοινωνικό επίπεδο. Ως εκ τούτου, η τεχνική του Blackstart αποτελεί μια αξιόπιστη και αποδοτική λύση για τη διαχείριση της ενέργειας σε μικροδίκτυα και τη διασφάλιση της σταθερότητας τους.

Μειονεκτήματα

Η τεχνική Blackstart αποτελεί μια αποτελεσματική λύση για την επαναφορά της λειτουργίας ενός δικτύου όταν αυτό έχει αποσυνδεθεί από το κεντρικό δίκτυο. Ωστόσο, υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα της τεχνικής αυτής όταν εφαρμόζεται σε μικροδίκτυα:

- **Κόστος:** Οικονομική επιβάρυνση: Η εφαρμογή της τεχνικής Blackstart μπορεί να συνεπάγεται σημαντικές οικονομικές δαπάνες για την απόκτηση του απαραίτητου εξοπλισμού και των απαιτούμενων τεχνολογιών. Το κόστος των σύγχρονων γεννητριών που χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση του μικροδικτύου είναι υψηλό, όπως και το κόστος για τη συντήρηση και αντικατάστασή τους. Επιπλέον, το Blackstart μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτες οικονομικές επιβαρύνσεις λόγω ακραίων καταστάσεων που μπορεί να προκαλέσουν φθορά ή καταστροφή στα στοιχεία του εξοπλισμού. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα έξοδα για την αγορά καυσίμων, ανταλλακτικών και αναλωσίμων, καθώς και τα έξοδα για την εγκατάσταση συστημάτων ελέγχου και επικοινωνίας, τα οποία αποτελούν σημαντικές δαπάνες.
- **Εξάρτηση της απόδοσης από την έκταση του μικροδικτύου:** Η τεχνική του Blackstart δεν μπορεί να είναι το ίδιο αποδοτική σε όλα τα είδη μικροδικτύων. Ο χρόνος αποκατάστασης του δικτύου, η ποιότητα και η παροχή του

ηλεκτρικού ρεύματος εξαρτώνται άμεσα από την έκταση του μικροδικτύου καθώς και από τα στοιχεία που το απαρτίζουν. Επομένως απαιτεί ειδική μελέτη για κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

- **Επιλεξιμότητα:** Η τεχνική Blackstart δεν είναι εφικτή για όλα τα μικροδίκτυα, καθώς απαιτεί την ύπαρξη εξοπλισμού και υποδομής που μπορεί να μην είναι διαθέσιμη σε όλες τις περιοχές. Επιπλέον, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι οι παραπάνω παράγοντες εξαρτώνται από το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του μικροδικτύου, καθώς και από τον τύπο και το επίπεδο ανάπτυξης της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται στο δίκτυο.
- **Αστάθεια του δικτύου:** Η εκκίνηση του μικροδικτύου με τη χρήση της τεχνικής Blackstart μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στο δίκτυο, καθώς η εκκίνηση των μονάδων παραγωγής ενέργειας μπορεί να επηρεαστεί από την αστάθεια του συστήματος, κάτι το οποίο σχετίζεται άμεσα με την πολυπλοκότητα του κάθε μικροδικτύου και των στοιχείων που περιλαμβάνει.
- **Απαιτήσεις σε πόρους:** Η εφαρμογή της μεθόδου Blackstart απαιτεί την αναλογική χρήση πολλών πόρων, όπως καύσιμα για την εκκίνηση των μονάδων παραγωγής ενέργειας, αποθήκευση ενέργειας και ανταλλακτικών. Η διαθεσιμότητα και ο εφοδιασμός αυτών των πόρων μπορεί να αντιμετωπιστούν με δυσκολία, ιδίως σε περιοχές όπου αυτοί είναι περιορισμένοι. Έτσι, το τεχνικό προσωπικό πρέπει να διασφαλίζει συνεχώς την παροχή επαρκούς ποσότητας πόρων, προκειμένου να είναι σε θέση να αντιμετωπιστεί οποιαδήποτε πρόκληση ή απροσδόκητη κατάσταση. Αυτό εξασφαλίζει την απρόσκοπτη διαδικασία εκκίνησης Blackstart και επιτρέπει την άμεση αποκατάσταση του μικροδικτύου στην κανονική του λειτουργία.

4.7 Προκλήσεις και τρόποι αντιμετώπισης

Η τεχνική Blackstart αναφέρεται στην διαδικασία επαναφοράς του ηλεκτρικού δικτύου μετά από μια πλήρη διακοπή της λειτουργίας του. Στην περίπτωση των μικροδικτύων, η εφαρμογή της τεχνικής Blackstart μπορεί να αντιμετωπίζει ορισμένες προκλήσεις, όπως:

Αποτυχία της τεχνικής λόγω ελλιπούς σχεδιασμού και εξοπλισμού: Σε περίπτωση που τα συστήματα επανεκκίνησης του μικροδικτύου υστερούν σε απαραίτητα όργανα

και στοιχεία και δεν έχει γίνει σωστή μελέτη για τον συντονισμό τους, η τεχνική του Blackstart δεν θα εκτελεστεί ή εάν εκτελεστεί θα έχει μειωμένη αποδοτικότητα, γεγονός που ενδέχεται να αποτελέσει αιτία για την εμφάνιση και άλλων προβλημάτων. Για αυτό τον λόγο οι ειδικοί θα πρέπει να μεριμνούν για την σωστή σχεδίαση και εξόπλιση του μικροδικτύου με τα απαραίτητα στοιχεία τα οποία να συντηρούνται τακτικά και να αντικαθίστανται εγκαίρως όταν απαιτηθεί.

Περιορισμένη απόδοση των πηγών ενέργειας: Τα μικροδίκτυα συνήθως διαθέτουν περιορισμένη παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ή συνδεδεμένες κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Συγκεκριμένα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξαρτώνται από φυσικά φαινόμενα και καιρικές συνθήκες, για αυτό τον λόγο η παραγωγή ενέργειας από αυτές εμφανίζει διακυμάνσεις. Αυτό μπορεί να δυσχεράνει την επαναφορά του δικτύου. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος θα πρέπει να υπάρχουν γεννήτριες σε ετοιμότητα με επαρκή ποσότητα καυσίμων για την εκκίνησή τους έτσι ώστε σε περίπτωση ανάγκης να ανταποκριθούν άμεσα. Στη συνέχεια πρέπει να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες και κατανεμημένες εγκαταστάσεις αποθήκευσης που θα λαμβάνουν ενέργεια από όλες τις πηγές ενέργειας (συμβατικές και μη) και θα τροφοδοτούν το δίκτυο με σταθερό ρεύμα.

Πολυπλοκότητα του συστήματος: Τα μικροδίκτυα μπορεί να περιλαμβάνουν διαφορετικούς τύπους πηγών ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά ή αιολικά συστήματα, και ενδεχομένως να μην υστερούν στην τεχνολογία και τον εξοπλισμό σε σχέση με τα μεγάλα δίκτυα. Αυτό μπορεί να αυξήσει την πολυπλοκότητα του δικτύου και να δυσκολέψει τη διαδικασία του Blackstart καθώς μπορεί να προκύψουν προβλήματα ως προς τον συντονισμό όλων των πηγών ενέργειας. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα των συστημάτων διαχείρισης των μικροδικτύων μπορεί να καθιστά δυσκολότερη την αξιολόγηση του κατάλληλου συνδυασμού εξοπλισμού. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα θα πρέπει οι παραγωγοί ενέργειας να εγκαταστήσουν ευφυείς μετρητές και συστήματα ελέγχου για την απομακρυσμένη διαχείριση των συστημάτων και την καλύτερη δυνατή επιτήρηση τους.

Χρήση διαφορετικών μεθόδων για την επαναφορά του δικτύου σε σχέση με τα κλασικά δίκτυα: Στα μικροδίκτυα, τα συστήματα παραγωγής ενέργειας, οι μετασχηματιστές και τα δίκτυα διανομής ενέργειας μπορεί να είναι διαφορετικά από ότι στα μεγάλα δίκτυα, και αυτό μπορεί να επηρεάσει την επιλογή των κατάλληλων παραγόντων για την επαναφορά του δικτύου. Για αυτό τον λόγο η συνεχής εκπαίδευση του προσωπικού και η πρακτική άσκηση είναι απαραίτητη για να μπορούν να συμβάλλουν στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με την τεχνική Blackstart και να λάβουν πρωτοβουλίες για την επιλογή της κατάλληλης τεχνικής και διαχείρισης του εξοπλισμού.

Κίνδυνοι ως προς την ασφάλεια του εξοπλισμού και του προσωπικού: Η διακοπή ισχύος μπορεί να δημιουργήσει επικίνδυνες καταστάσεις για το προσωπικό και το εξοπλισμό. Η επαναφορά του συστήματος μετά από μια διακοπή ισχύος μπορεί να είναι επικίνδυνη, καθώς η αρχική ισχύς που επαναφέρεται στο δίκτυο μπορεί να προκαλέσει καταστάσεις όπως υπερτάσεις και υπερθέρμανση που θα προκαλέσουν φθορά στον εξοπλισμό αλλά και εργατικά ατυχήματα. Για την αντιμετώπιση αυτών των καταστάσεων, οι μικροδικτυακοί φορείς μπορούν να εφαρμόσουν διάφορες τεχνολογίες ελέγχου για τον εντοπισμό των προβλημάτων, όπως η χρήση αυτόματων συστημάτων ελέγχου, η εφαρμογή κατάλληλων συστημάτων λήψης δεδομένων και η ανάπτυξη σχεδίων έκτακτης ανάγκης. Για την προστασία του εξοπλισμού και των εργαζόμενων θα πρέπει να εγκατασταθούν συστήματα ασφαλείας (π.χ. συστήματα απομόνωσης, διακόπτες ασφαλείας, θερμικές ασφάλειες) αλλά επίσης θα πρέπει και το προσωπικό να έχει λάβει σωστή εκπαίδευση για την προστασία του.

Ανεπαρκής ικανότητα του δικτύου για την απορρόφηση της ισχύος: Κατά την διάρκεια της επανεκκίνησης του συστήματος ενδέχεται να παραχθεί από τις γεννήτριες ισχύς η οποία να μην μπορεί να απορροφηθεί από το μικροδίκτυο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτωση του δικτύου και διακοπή ρεύματος, εάν δεν ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα. Επίσης αυτό μπορεί να παράξει ασταθές ρεύμα και κακής ποιότητας που θα προκαλέσει φθορά στα συστήματα ιδίως στα πιο ευαίσθητα στοιχεία του εξοπλισμού. Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων, μπορεί να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες φιλτραρίσματος και σταθεροποίησης της τάσης του ηλεκτρικού ρεύματος.

Όλες αυτές οι προκλήσεις μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία της επαναφοράς του δικτύου μετά από μια πλήρη διακοπή λειτουργίας. Η συνεργασία με άλλους παράγοντες του δικτύου ενέργειας είναι απαραίτητη, όπως με τους παραγωγούς ενέργειας και τους πελάτες για να αναπτύξουν σχέδια για την αποτροπή διακοπών ισχύος και τη βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου. Η ανάπτυξη και η εφαρμογή κατάλληλων τεχνολογιών μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων και στη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας των μικροδικτύων.

Συνολικά, η εφαρμογή της τεχνικής Blackstart αποτελεί μια πρόκληση για τα μικροδίκτυα, καθώς απαιτεί ισχυρή συνεργασία και συντονισμό μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του συστήματος. Ωστόσο, με την κατάλληλη προετοιμασία και εφαρμογή των κατάλληλων τεχνολογιών, μπορεί να επιτευχθεί μια αξιόπιστη και αποτελεσματική εκκίνηση του συστήματος και η αποκατάσταση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Εν κατακλείδι, η εφαρμογή της τεχνικής Blackstart στα μικροδίκτυα αντιπροσωπεύει μια πρόκληση, αλλά και μια ευκαιρία για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας του δικτύου και την αναβάθμιση της αξιοπιστίας του συστήματος. Η επιτυχής εφαρμογή της τεχνικής Blackstart απαιτεί τη σωστή προετοιμασία, την αξιολόγηση των κινδύνων και τη λήψη αποτελεσματικών μέτρων αντιμετώπισης των προκλήσεων που προκύπτουν από την εφαρμογή της.

4.8 Παράδειγμα Blackstart

Περιγραφή της δοκιμής και του δικτύου στο οποίο έλαβε χώρα.

Τον Οκτώβριο του 2020 στην περιοχή Galloway της Σκωτίας έγινε η πρώτη δοκιμή Blackstart που διήρκησε μια μέρα. Το έργο περιλάμβανε δυο φάσεις οπού η πρώτη παρείχε βασικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό και την εκτέλεση της δεύτερης φάσης. Η δεύτερη φάση έγινε τον Σεπτέμβριο με Οκτώβριο του 2021 και η διάρκεια της ήταν τέσσερις ημέρες.

Το δίκτυο στο οποίο εκτελέστηκε η δοκιμή είχε δυο υδροστρόβιλους, τον Glenlee με ισχύ 15MVA που αξιοποιήθηκε στην πρώτη φάση ως γεννήτρια συγχρονισμού (anchor generator). Η γεννήτρια συγχρονισμού χρησιμοποιείται ως αναφορά για την ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος στο δίκτυο. Ο δεύτερος υδροστρόβιλος ήταν ο Kendoon 13MVA και χρησιμοποιήθηκε ως γεννήτρια αγκύρωσης στην δεύτερη φάση.

Οι δύο υδροστρόβιλοι παρήγαγαν 11kV τα οποία μετασηματίζονταν απευθείας σε 132kV μέσω του δικτύου μεταφοράς που ήταν συνδεδεμένο στον υποσταθμό συλλογής του αιολικού πάρκου του New Cumnock 275/132kV. Η μεταφορά του ρεύματος γινόταν μέσω εναέριων γραμμών μεταφοράς 132kV των 30 χιλιομέτρων. Στη συνέχεια τροφοδοτούνταν το δίκτυο διανομής μέσω εναέριων γραμμών μεταφοράς 132kV μήκους 50 χιλιομέτρων στο σημείο τροφοδοσίας του Glenluce 132/33kV όπου συνδέονταν αρκετά αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 100MW στα 33kV.



Σχήμα 4.1: Η γεωγραφική τοποθεσία του μικροδικτύου της περιοχής Galloway της Σκωτίας.

Στόχοι της δοκιμής

1. Η ανάπτυξη στρατηγικών για την ηλεκτροδότηση του δικτύου διανομής 132/33kV από την γεννήτρια αγκύρωσης 11kV.
2. Δοκιμή της βιωσιμότητας της τροφοδότησης από τη γεννήτρια αγκύρωσης στο δίκτυο 275kV και στους υπερμετασχηματιστές του δικτύου 275/132kV, 240MVA.
3. Δοκιμή της δυνατότητας δημιουργίας ενός νησιδοποιημένου δικτύου με συνδεδεμένη αιολική παραγωγή. Συγκεκριμένα πρέπει να προσδιοριστεί ο αριθμός των ανεμογεννητριών που μπορούν να συνδεθούν συμπεριλαμβανομένης της χαμηλής τιμής σφάλματος. Επίσης πρέπει να εξασφαλιστεί η σταθερή λειτουργία των αιολικών πάρκων κατά την ενεργοποίηση των πρωτευόντων μετασχηματιστών ή από βηματικές αλλαγές φορτίου (load steps)

Πρώτη φάση της δοκιμής

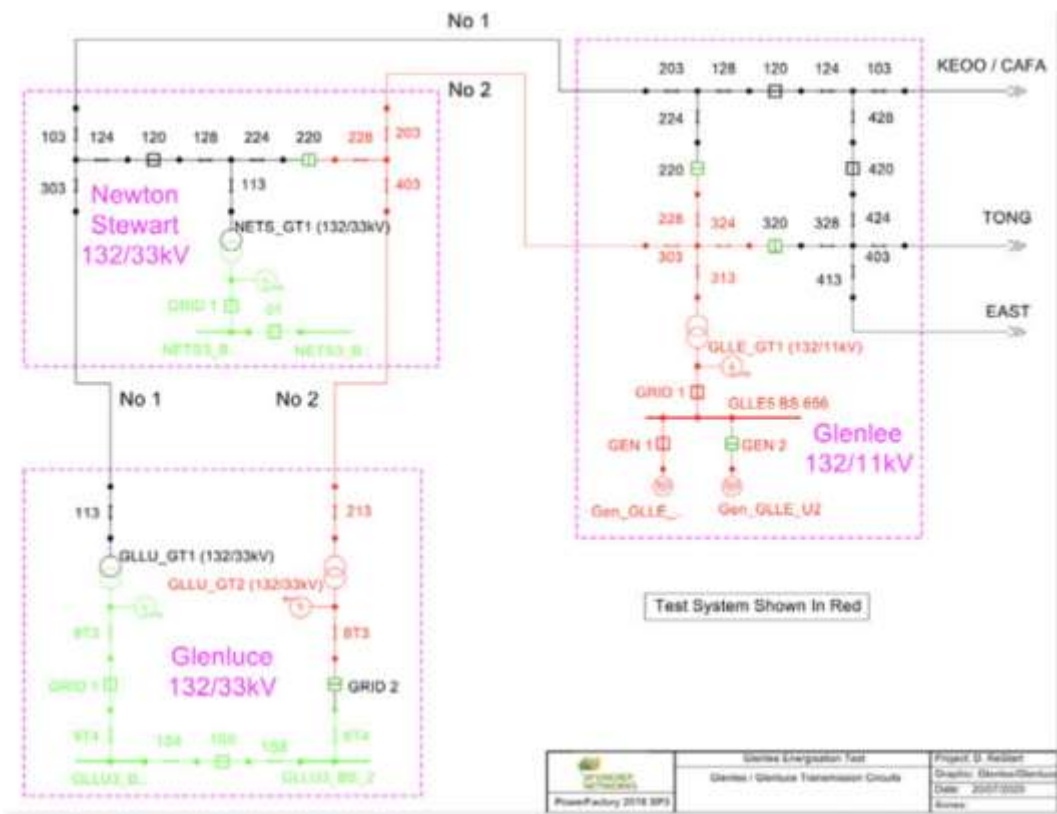
Κατά την διάρκεια της πρώτης φάσης της δοκιμής τον Οκτώβριο του 2020 στο Galloway τέθηκε ως γεννήτρια αγκύρωσης (anchor generator) ο υδροστρόβιλος Glenlee ο οποίος τροφοδοτούνταν από έναν ταμιευτήρα φράγματος της περιοχής που του παρείχε συνεχή τροφοδοσία με νερό, επομένως η παροχή ισχύος του ήταν σταθερή.

Στο δοκιμαστικό δίκτυο που δημιουργήθηκε δεν υπήρχαν διακόπτες κυκλώματος (circuit breakers) επομένως το δίκτυο θα μπορούσε να υποδιαιρεθεί μόνο με το άνοιγμα των αποζευκτών η οποίοι δεν μπορούσαν να κλείσουν όσο το δίκτυο παρέμενε υπό τάση. Ως εκ τούτου, αποφασίστηκε ότι θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μια αρχική δοκιμή που περιλάμβανε γεννήτρια Glenlee που τροφοδοτούσε το μετασχηματιστή της 11/132 kV 30 MVA, το δεύτερο κύκλωμα εναέριας γραμμής 132 kV Glenlee/Newton Stewart/Glenluce (50 km) και το Glenluce 132/33 kV 60 MVA.

Οι προσομοιώσεις της ενεργοποίησης έδειξαν ότι οι υπερτάσεις ήταν πιθανές, και ενόψει των προβλημάτων που είχαν παρουσιαστεί στο παρελθόν με παρόμοιες δοκιμές, προβλέφθηκε ότι θα μπορούσε να απαιτηθεί μείωση της τάσης των ακροδεκτών της γεννήτριας. Η μειωμένη τάση της γεννήτριας θα μείωνε το μέγεθος της υπέρτασης και θα αύξανε το περιθώριο μεταξύ της τάσης της γεννήτριας και των ρυθμίσεων του ηλεκτρονόμου προστασίας της γεννήτριας από υπέρταση. Τα προβλεπόμενα επίπεδα τάσης της γεννήτριας ήταν 100 %, 95 %, 90 %, 85%, 80% και 75% της ονομαστικής τάσης της γεννήτριας.

Λόγω της έλλειψης τροφοδότησης σφαιμάτων από το υπόλοιπο δίκτυο, τα επίπεδα σφαιμάτων στο δοκιμαστικό δίκτυο θα είναι πολύ χαμηλότερα από το κανονικό, έτσι οι ηλεκτρονόμοι προστασίας που καλύπτουν τα τυλίγματα YT και HT του μετασχηματιστή Glenlee θα ήταν μειωμένοι κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Μια περαιτέρω δοκιμή θα περιλάμβανε τη χρήση ενός ηλεκτρονόμου Point on Wave (PoW) για αξιολόγηση κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Αυτό θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο του κλεισίματος του διακόπτη Glenlee 11 kV Grid 1, ο οποίος θα ενεργοποιούσε το δίκτυο δοκιμής. Με τον έλεγχο του σημείου στο της κυματομορφής της τάσης της γεννήτριας, ελπίζαμε να μειωθεί το μεταβατικό φαινόμενο που προκαλείται από τη μαγνητική εισροή στον μετασχηματιστή. Δύο θα γίνονταν δύο προσπάθειες με τη χρήση του ηλεκτρονόμου PoW, η πρώτη με τον ηλεκτρονόμο ρυθμισμένο για να ελαχιστοποιήσει την εισροή, ενώ η δεύτερη ρυθμισμένη για τη μέγιστη τιμή. ώστε να υπάρξει σαφής ένδειξη των πιθανών βελτιώσεων που θα μπορούσαν να επιτευχθούν.

Αναπαράσταση της εξομοίωσης του δικτύου που έλαβε χώρα η πρώτη δοκιμή



Σχήμα 4.2: Εξομοίωση του μικροδικτύου του Galloway.

Description	Test No	Generator Terminal Voltage	Success /Fail
From Glenlee 11 kV hydro:			
Energise Newton Stewart/Glenluce Circuit and Glenlee 132/11 kV grid transformer T1	1	1.0 pu	Fail
Energise Newton Stewart/Glenluce Circuit and Glenlee 132/11 kV grid transformer T1	2	0.75 pu	Fail
Glenlee 132/11 kV grid T1	3	0.75 pu	Success
Glenlee 132/11 kV grid T1	4	1.0 pu (PoW min transient)	Success
Glenlee 132/11 kV grid T1	5	A1.0 pu (PoW min transient)	Success
Energise Newton Stewart/Glenluce circuit and Glenluce 132/33 kV grid transformer T2	6	1.0 pu (PoW min transient)	Success

Πίνακας 4.1: Πίνακας αποτελεσμάτων των test της φάσης 1.

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τα test που διεξήχθησαν. Στα test μεταβάλλεται η τάση των ακροδεκτών της γεννήτριας Glenlee και λαμβάνει είτε την τιμή 0.75 pu που αντιστοιχούν σε 8.25kV είτε σε 1.0 pu που αντιστοιχεί σε 11kV.

Στο πρώτο test στόχος ήταν η ενεργοποίηση του δοκιμαστικού δικτύου Newton Stewart/Glenluce με χρήση της γεννήτριας Glenlee ως γεννήτρια συγχρονισμού η οποία είχε τάση 1.0 pu στους ακροδέκτες της. Η γεννήτρια ενεργοποιήθηκε άμεσα όμως προκλήθηκε υπέρταση, κάτι το οποίο οδήγησε το πρώτο test σε αποτυχία.

Στη συνέχεια ακολούθησε το δεύτερο test που είχε ακριβώς τον ίδιο στόχο με το πρώτο με τη διαφορά ότι η τάση των ακροδεκτών της γεννήτριας Glenlee ήταν 0.75 pu καθώς στο 1^ο test σημειώθηκαν σημαντικές υπερτάσεις και έτσι αποφασίστηκε το 2^ο test να διεξαχθεί με την ελάχιστη προβλεπόμενη τάση (75%) αντί του προβλεπόμενου (95%). Το 2^ο test εν τέλει απέτυχε ξανά λόγω υπέρτασης.

Υπήρχε ανησυχία για περαιτέρω μείωση της τάσης της γεννήτριας σε περίπτωση που το επίπεδο σφάλματος στη γραμμή 132 kV δεν επαρκούσε για να λειτουργήσουν οι ηλεκτρονόμοι προστασίας. Ως εκ τούτου, αποφασίστηκε ότι θα μπορούσε να επιχειρηθεί μόνο η ενεργοποίηση του μετασχηματιστή Glenlee 132/11 kV (στον υποσταθμό Glenlee 132 kV άνοιξε ο απομονωτής 303). Επομένως ακολούθησαν 3 test με διαφορετική στρατηγική το καθένα: Τα test 3,4 και 5 που εκτελέστηκαν μετά

τα δύο πρώτα είχαν ως στόχο την ενεργοποίηση της γεννήτριας Glenlee και την τροφοδότηση του δοκιμαστικού δικτύου. Στο 3^ο test η τάση των ακροδεκτών της γεννήτριας ήταν 0.75 pu ενώ στα test 4 και 5 ήταν 1.0 pu. Τα test ήταν όλα επιτυχή. Αξίζει να σημειωθεί ότι Ο ηλεκτρονόμος PoW είχε παρακολουθήσει με επιτυχία την προηγούμενη επιτυχή ενεργοποίηση του μετασχηματιστή Glenlee 132/11 kV και ήταν πλέον σε θέση να ελέγχει το χρόνο κλεισίματος του διακόπτη του δικτύου 1 για την ελαχιστοποίηση των μεταβατικών φαινομένων.

Τέλος πραγματοποιήθηκε το test 6 που ήταν μια επανάληψη του test 2, κατά ο οποίο ολόκληρο το δίκτυο δοκιμής τέθηκε υπό τάση με μειωμένη την τάση των ακροδεκτών της γεννήτριας στο 75 % της ονομαστικής τάσης (8.25 kV). Ωστόσο, ο ηλεκτρονόμος PoW χρησιμοποιήθηκε για να κλείσει ο διακόπτης του δικτύου 1 και να ελαχιστοποιηθεί το μεταβατικό φαινόμενο.

Δεύτερη φάση δοκιμής

Η δοκιμή περιελάμβανε την ταυτόχρονη ενεργοποίηση ολόκληρου του κυκλώματος, καθώς στο κύκλωμα δοκιμής δεν υπάρχουν διακόπτες 132 kV, Ως εκ τούτου, η ενεργοποίηση έγινε με το κλείσιμο του διακόπτη Glenlee 11 kV Grid 1, ο οποίος ενεργοποίησε το κύκλωμα μέχρι το Glenlucce 33 kV του δικτύου 2. Οι προσπάθειες ενεργοποίησης σε σχέση με τη δοκιμή 1 απέτυχαν έως ότου χρησιμοποιήθηκε ένας ηλεκτρονόμος Point on Wave (PoW) για να κλείσει ο διακόπτης Glenlee του δικτύου 1, όπως και τη μείωση της τάσης της γεννήτριας Glenlee στο 75% της ονομαστικής (8,25 kV) κατά τη διάρκεια της προσπάθειας. Ο ηλεκτρονόμος αυτός υπολόγισε την εναπομένουσα ροή στον μετασχηματιστή Glenlee 132/11 kV όταν αυτός απενεργοποιήθηκε και υπολόγισε τον βέλτιστο χρόνο για να κλείσει τον διακόπτη κυκλώματος για την ελαχιστοποίηση του μαγνητικού ρεύματος εισροής του μετασχηματιστή. Αυτό, μαζί με τη μειωμένη τάση της γεννήτριας, επέτρεψε την ενεργοποίηση του κυκλώματος δοκιμής χωρίς να προκληθεί ενεργοποίηση της προστασίας της γεννήτριας από υπέρταση.

Η σειρά δοκιμών της φάσης 2 είχε προγραμματιστεί να τροφοδοτήσει το υδροηλεκτρικό σύστημα Kendoon έως το Glenluce GSP και να περιλαμβάνει διακοπή μισής μπάρας στο σημείο τροφοδοσίας δικτύου Glenluce (GSP) για να δοκιμαστεί η τροφοδοσία του δικτύου διανομής 33 kV και των πρωτεύοντων μετασχηματιστών (33/11 kV). Προγραμματίστηκε επίσης να τεθεί υπό τάση το κύκλωμα 132 kV προς το New Cumnock και οι SGTs στο New Cumnock ως πιθανή διαδρομή προς άλλα φορτία και αιολικά πάρκα στη Δυτική Κεντρική Σκωτία.

Η διάταξη του υποσταθμού Glenlee 132 kV εμποδίζει την τροφοδότηση του κυκλώματος από τον σταθμό Glenlee προς το New Cumnock ενώ διατηρείται η τροφοδοσία από τους σταθμούς Glenluce και Newton Stewart. Κατά συνέπεια, ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής Kendoon επιλέχθηκε ως η γεννήτρια συγχρονισμού, καθώς μπορεί να τροφοδοτήσει το κύκλωμα New Cumnock καθώς και το κύκλωμα Kendoon/Glenlee/Newton Stewart/Glenluce διατηρώντας παράλληλα τον εφοδιασμό των Newton Stewart και Glenluce από το Dumfries και το Tongland.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, μια προσωρινή γεννήτρια ντίζελ παρείχε τις παροχές χαμηλής τάσης για την εκκίνηση της γεννήτριας Kendoon, καθώς αυτή δεν ήταν δυνατόν να τροφοδοτηθεί ο βοηθητικός μετασχηματιστής του σταθμού. Η τρίτη φάση των δοκιμών θα πραγματοποιηθεί την άνοιξη του 2022, όπου δύο συνδεδεμένα αιολικά πάρκα 33 kV στο Glenluce GSP να συμπεριληφθούν, για να δοκιμαστεί η δυνατότητα να συμπεριληφθούν αιολικά πάρκα σε μια DRZ με τα πολύ χαμηλά επίπεδα σφάλματος που προκύπτουν από το ενιαίο μικρό σύγχρονη γεννήτρια εντός της ζώνης.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται όλα τα τεστ που περιλαμβάνει η δεύτερη φάση της δοκιμής. Περιγράφεται το τμήμα του δικτύου που χρησιμοποιήθηκε στο κάθε τεστ καθώς και η τάση των ακροδεκτών της γεννήτριας και το εάν το τεστ ήταν επιτυχές ή όχι.

Description	Test	Generator Terminal Voltage (11 kV)	Success / Fail
Energise Kendoon grid transformer T2 (Tap 19) to train PoW relay	1.1	10.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise Kendoon grid transformer T2 using PoW relay	1.2	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise Kendoon grid transformer T2 and Kendoon/New Cumnock circuit	2.1	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise Kendoon/Glenlee circuit	2.2	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise Glenlee/Newton Stewart/Glenluce circuit and Glenluce 132/33 kV grid transformer T1	2.3	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise Kendoon/Glenlee/Newton Stewart/Glenluce circuit and Glenluce 132/33 kV grid transformer T1	2.4	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise Kendoon grid transformer T2, Kendoon/New Cumnock circuit and Kendoon/Glenlee/Newton Stewart/Glenluce circuit and Glenluce 132/33 kV grid transformer T1	2.5	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise Kendoon grid transformer T2 and Kendoon/Glenlee/Newton Stewart/ Glenluce circuit and Glenluce 132/33 kV grid transformer T1	2.6	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise Kendoon grid transformer T2 and Kendoon/Glenlee/Newton Stewart/ Glenluce circuit and Glenluce 132/33 kV grid transformer T1	3.1	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise Glenluce 33 kV No.1 busbar	3.2	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise Glenluce/Glenchamber 33 kV cable circuit	3.3	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise Glenluce/Lochans Moor switching station 33 kV circuit	3.4	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise Lochans Moor/Barrhill 33 kV circuit and Barrhill primary transformer	3.5	1.0 pu (11.0 kV)	Fail
Energise Kendoon grid transformer T2 and Kendoon/Glenlee/Newton Stewart/ Glenluce circuit and Glenluce 132/33 kV grid transformer T1	3.6	0.75 pu (8.25 kV)	Success

Energise Kendoon grid transformer T2 and Kendoon/New Cumnock 132 kV circuit using PoW Relay	4.1	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise New Cumnock SGT1A and SGT1B	4.2	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise New Cumnock SGT1B	4.3	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise New Cumnock SGT1B	4.4	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise New Cumnock SGT1A and SGT1B	4.5	0.75 pu (8.25 kV)	Success
Energise Kendoon grid transformer T2 and Kendoon/New Cumnock 132 kV circuit without using PoW relay	4.6	0.75 pu (8.25 kV)	Success

Πίνακας 4.2: Πίνακας αποτελεσμάτων των test της φάσης 2.

Το συμπέρασμα που εξάγεται βάση της ανάλυσης των αποτελεσμάτων των test της κάθε φάσης των δοκιμών είναι ότι η τεχνική του Blackstart για το δίκτυο της περιοχής που διεξήχθη ήταν αποδοτική. Αναλυτικότερα παρατηρείται πώς η πλειοψηφία των test ήταν επιτυχής καθώς η τάση των ακροδεκτών της κάθε γεννήτριας παρέμεινε εντός των επιθυμητών ορίων. Επομένως σε μια κατάσταση πραγματικής διακοπής ρεύματος του δικτύου η εφαρμογή της τεχνικής Blackstart θα αποτελέσει μια ικανοποιητική λύση για την επαναφορά της λειτουργίας του δικτύου και την ηλεκτροδότηση των περιοχών που τροφοδοτεί.

Κεφάλαιο 5

Islanding

Το islanding αναφέρεται σε μια κατάσταση όπου ένα μικροδίκτυο παράγει και διαχειρίζεται τη δική του ηλεκτρική ενέργεια ανεξάρτητα από το κεντρικό δίκτυο. Η τεχνική Blackstart που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα προϋποθέτει την δυνατότητα μετάβασης του μικροδικτύου σε κατάσταση islanding, καθώς μετά την επανεκκίνηση του το μικροδίκτυο όντας απομονωμένο από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης πρέπει να λειτουργήσει αυτόνομα. Κατά τη διάρκεια του islanding, το μικροδίκτυο λειτουργεί ως αυτόνομο σύστημα, εξυπηρετώντας τις ενεργειακές ανάγκες των συνδεδεμένων φορτίων. Οι μηχανισμοί islanding αποτελούν σημαντικό στοιχείο των μικροδικτύων, επιτρέποντας την ευελιξία και την αυτονομία στην παραγωγή ενέργειας. Ωστόσο, η ανεξάρτητη λειτουργία του μικροδικτύου μπορεί να προκαλέσει προβλήματα όταν οι μηχανισμοί islanding δεν είναι επαρκώς σχεδιασμένοι ή υλοποιημένοι, καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει λειτουργικά ζητήματα και ζητήματα ασφαλείας.

Το φαινόμενο του islanding (νησιδοποίηση) είναι σχετικά μια σύγχρονη διαδικασία (συγκεκριμένα από το 1980 και έπειτα) που έκανε την εμφάνιση της ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης των μικροδικτύων και απαιτεί εκσυγχρονισμό των ηλεκτρικών δικτύων. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει ευνοήσει την μετάβαση ενός δικτύου από μια συνδεδεμένη κατάσταση σε μια αυτόνομη, γεγονός που απαιτεί ιδιαίτερο χειρισμό και προσοχή για να γίνει όσο το δυνατόν πιο ομαλά και με ασφάλεια. Αναμένεται να συνεχίσει να εξελίσσεται και να διαδίδεται ανά τον κόσμο στα επόμενα χρόνια. Το islanding συγκεκριμένα αναφέρεται σε μια κατάσταση όπου ένα μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με ένα κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όπου όταν απαιτηθεί θα κληθεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα και παράξει ενέργεια αξιοποιώντας τις πηγές ενέργειας που διαθέτει καθώς και μέσα αποθήκευσης ενέργειας. Οι πηγές ενέργειας μπορεί να είναι συμβατικές και μη, από γεννήτριες diesel και ατμοστρόβιλους έως και εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σχετικά με τα μέσα αποθήκευσης ενέργειας, χρησιμοποιούνται εκτενώς συστοιχίες μπαταριών που είναι ικανές να προμηθεύσουν το μικροδίκτυο ανά πάσα στιγμή. Έτσι το μικροδίκτυο συνεχίζει να λειτουργεί αυτόνομα και να παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα

στους καταναλωτές του, ακόμα και όταν το κύριο δίκτυο δεν είναι διαθέσιμο. Αυτή η κατάσταση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε μικρά νησιά ή απομονωμένες περιοχές, όπου η προμήθεια ενέργειας από το κύριο δίκτυο είναι περιορισμένη ή ασταθής.

Συγκεκριμένα μπορεί να προκληθεί αστάθεια από διάφορους λόγους, όπως προβλήματα στον εξοπλισμό του κυρίως δικτύου ή του μικροδικτύου, δυσμενείς καιρικές συνθήκες, ζημιές από υπερτάσεις, φθορά του εξοπλισμού, κακόβουλες ενέργειες και επιθέσεις σε περιπτώσεις που αφορούν εμπόλεμες περιοχές, καθώς και προγραμματισμένες απομονώσεις τμημάτων του μικροδικτύου για σκοπούς συντήρησης και επισκευής. Η επίτευξη νησιδοποίησης απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού στα δίκτυα διανομής που εξασφαλίζει ότι οι τιμές τάσης και συχνότητας στο μικροδίκτυο δεν υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια. Στα σύγχρονα μικροδίκτυα χρησιμοποιούνται προηγμένης τεχνολογίας αντιστροφείς όπως οι "grid forming inverters", που αποτελούν το κύριο στοιχείο για τη διανομή και το χειρισμό της ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα τμήματα του μικροδικτύου και εξασφαλίζουν τη διατήρηση της ποιότητας του ρεύματος, καθώς και τη διαμόρφωση της επιθυμητής τάσης και συχνότητας. Επίσης τα grid forming inverters αποτελούν βασικό όργανο για την ενσωμάτωση και την αποδοτική λειτουργία των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ιδιαιτερότητες του κύριου δικτύου διανομής, με το οποίο το μικροδίκτυο θα συνδεθεί έτσι ώστε να γίνει ο καλύτερος δυνατός σχεδιασμός για την εκτέλεση της διαδικασίας. Τέλος το islanding είναι ένα φαινόμενο το οποίο αποφέρει αρκετά οφέλη για τα μικροδίκτυα όλων των ειδών όπως από μικρής κλίμακας οικιακά έως και βιομηχανικά, νοσοκομειακά, στρατιωτικών εγκαταστάσεων αλλά και μεγαλύτερων εκτάσεων όπως νησιωτικά ή πόλεων που ενδέχεται να αντιμετωπίσουν δυσμενείς καταστάσεις ως προς την ηλεκτροδότησή τους.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα πλεονεκτήματα του islanding για τα μικροδίκτυα αλλά και τα μειονεκτήματα καθώς και οι προκλήσεις που σχετίζονται με την υλοποίηση και την εφαρμογή της εν λόγω διαδικασίας.

Σχετικά με τα πλεονεκτήματα, το islanding παρέχει αυξημένη αξιοπιστία ως προς την παροχή ενέργειας κατά την απομόνωση, βελτιωμένη απόδοση καθώς δύνανται να αξιοποιηθούν όλες οι διαθέσιμες πηγές ενέργειας του δικτύου κατά επιλογήν ή και μαζικά, επίσης παρέχει την δυνατότητα επεκτασιμότητας του δικτύου δημιουργώντας μια αποκεντρωμένη υποδομή παροχής ενέργειας. Επιπροσθέτως συμβάλλει στην

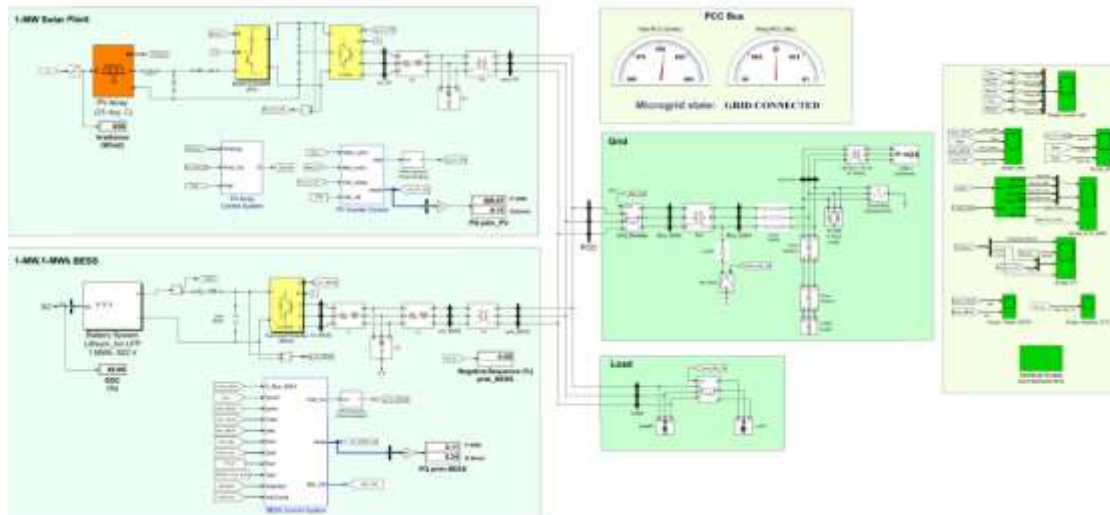
ελάττωση των ενεργειακών απωλειών με την επιλογή των κοντινότερων πηγών για την αποφυγή των απωλειών που προκαλούνται με την μεταφορά ενέργειας από μακρινές περιοχές. Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι εξασφαλίζεται και η προστασία των εργαζομένων από επικίνδυνες καταστάσεις με την απομόνωση προβληματικών τμημάτων του δικτύου. Παρόλα αυτά το islanding εμφανίζει προκλήσεις και ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία δεν μπορούν να παραληφθούν. Κατά την εκτέλεση του islanding ελλοχεύει ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας καθώς και πυρκαγιάς από ανεξέλεγκτες και απρόοπτες υπερτάσεις και βραχυκυκλώματα τα οποία μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο το προσωπικό. Επίσης το μικροδίκτυο εξαρτάται απόλυτα από τις πηγές του όταν βρίσκεται σε αυτόνομη κατάσταση και σε περίπτωση αστοχίας σε κάποια από αυτά τα συστήματα το δίκτυο μπορεί να μείνει χωρίς ηλεκτροδότηση. Ακόμα σχετικά με τα κόστη συντήρησης και επισκευής, πρέπει να σημειωθεί ότι ενδέχεται να είναι υψηλά λόγω του εξειδικευμένου εξοπλισμού που χρησιμοποιείται και να είναι αναπόφευκτα ιδίως σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης που δεν υπάρχει μεγάλη ελευθερία επιλογών. Επιπλέον η αποσύνδεση από το κεντρικό δίκτυο όπου το μικροδίκτυο καλείται να λειτουργήσει αυτόνομα δεν εγγυάται την απόλυτη σταθερότητα ως προς την παροχή ενέργειας καθώς πρόκειται για μια απότομη αλλαγή που είναι επόμενο να προκαλέσει διακυμάνσεις και αστάθεια. Επίσης παρά το γεγονός ότι τα σύγχρονα συστήματα καθιστούν το islanding αξιόπιστο για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας πάντα υπάρχει η πιθανότητα μείωσης της αξιοπιστίας λόγω των απρόοπτων αυτών διακυμάνσεων. Ως αποτέλεσμα της αστάθειας αυτής μπορεί να αυξηθεί η φθορά του εξοπλισμού δεδομένου ότι τα συστήματα αντιμετωπίζουν ακραίες καταστάσεις ως προς την προσαρμογή της τάσης και της συχνότητας.

Εν κατακλείδι το islanding είναι για τα μικροδίκτυα μία ιδιαίτερης και υψηλής σημασίας τεχνική με αρκετά οφέλη. Ωστόσο συμπεραίνεται ότι μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη διαχείριση του δικτύου όταν το μικροδίκτυο είναι απομονωμένο από το κεντρικό δίκτυο. Για να αποφευχθούν αυτά τα προβλήματα, απαιτείται προσεκτική σχεδίαση και υλοποίηση του μηχανισμού islanding. Επιπλέον, είναι σημαντικό να διατηρείται σταθερή επικοινωνία μεταξύ του μικροδικτύου και του κεντρικού δικτύου, ώστε να επιτυγχάνεται μια ομαλή και ασφαλής μετάβαση από τη λειτουργία του islanding πίσω στη σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο όταν αυτό είναι απαραίτητο.

Κεφάλαιο 6

Υλοποίηση μικροδικτύου στο Simulink και εκτέλεση διαδικασίας επανασυγχρονισμού

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια προσομοίωση στο πρόγραμμα Simulink του MatLab, συγκεκριμένα στο Simscape Electrical/Specialized Power Systems (SPS), που απεικονίζει ένα μικροδίκτυο. Αυτό το μικροδίκτυο αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή μονάδα και ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας BESS. Το μικροδίκτυο αυτό μπορεί να λειτουργήσει είτε ως συνδεδεμένο στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης (grid-following mode), είτε αυτόνομα (grid-forming mode), αξιοποιώντας την ηλεκτρική ενέργεια από τη φωτοβολταϊκή μονάδα και τις μπαταρίες που διαθέτει. Ο σκοπός της προσομοίωσης είναι να αποδείξει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας επανασυγχρονισμού, η οποία έχει ως απώτερο στόχο να επαναφέρει τις επιθυμητές τιμές σε συχνότητα και τάση στο μικροδίκτυο. Έχει προηγηθεί η διαδικασία εκκίνησης (Blackstart) στο μικροδίκτυο μετά από μια γενική διακοπή ρεύματος και ο επανασυγχρονισμός αναλαμβάνει να επαναφέρει τις απαιτούμενες τιμές σε συχνότητα και τάση στο μικροδίκτυο, προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες των καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια, χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα στοιχεία.



Σχήμα 6.1: Περιγραφή μοντέλου μικροδικτύου.

1. **Σύστημα διανομής:** Η μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας αναπαρίσταται μέσω ενός ισοδύναμου δικτύου με τάση 120 kV, μετασχηματιστές και τροφοδότες με τάση 25 kV. Για την σύνδεση του μικροδικτύου με το σύστημα διανομής χρησιμοποιούνται ένας τριφασικός διακόπτης και ένας μετασχηματιστής μεταξύ 25 kV και 600V.
2. **BESS:** Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας BESS αποτελείται από διάφορα στοιχεία. Αρχικά, υπάρχει ένα σύστημα μπαταρίας που αποτελείται από κυψέλες φωσφορικού σιδήρου ιόντων λιθίου με τάση 3,2V και χωρητικότητα 14Ah. Αυτές οι κυψέλες οργανώνονται σε μονάδες κυψελών, με κάθε μονάδα να αποτελείται από 4 κυψέλες, και συνδέονται σε σειρά για να δημιουργήσουν μια συστοιχία μπαταριών με συνολική τάση 922V. Το σύστημα μπαταριών περιλαμβάνει 80 τέτοιες συστοιχίες μπαταριών που είναι συνδεδεμένες παράλληλα, με σκοπό να δημιουργήσουν ένα σύστημα με ονομαστική ισχύ 1 MWh. Επιπλέον, το BESS περιλαμβάνει έναν μετατροπέα δύο επιπέδων τύπου Switching Function, ένα φίλτρο LCL και έναν μετασχηματιστή 480V/600V. Ένα σύστημα ελέγχου παράγει αναφορές τάσης (V_{ref}) που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του μετατροπέα και ένα σήμα ελέγχου (άνοιγμα/κλείσιμο) για τον διακόπτη δικτύου. Η γεννήτρια PWM, που λειτουργεί με μέσο όρο παλμών και έχει συχνότητα μεταγωγής 2,7 kHz,

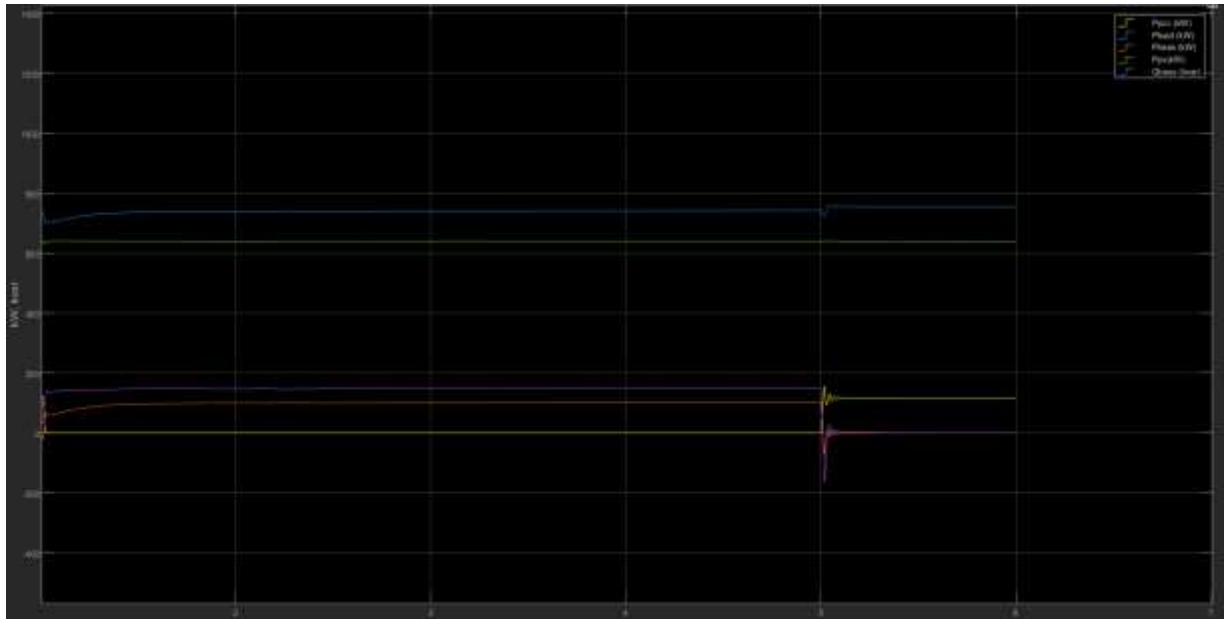
συνεργάζεται με το σύστημα αυτό για να επιτευχθεί μια ακριβής προσομοίωση με χρονικό βήμα 40 μ s.

Τα βασικά στοιχεία από τα οποία απαρτίζεται το σύστημα ελέγχου του BESS είναι τα εξής:

- **Μονάδα επανασυγχρονισμού:** Εάν το μικροδίκτυο συνδεθεί με το σύστημα διανομής χωρίς την απαιτούμενη συγχρονισμένη διαδικασία, θα προκύψει μια ανώμαλη επανασύνδεση και θα εμφανιστούν υψηλές τιμές ρεύματος εισροής. Για να αποφευχθεί αυτή η κατάσταση, η μονάδα επανασυγχρονισμού θα ευθυγραμμίσει την τάση του μικροδικτύου με την τάση του συστήματος διανομής πριν από την επανασύνδεση του διακόπτη δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο θα διασφαλιστεί η απρόσκοπτη σύνδεση με το σύστημα διανομής. Η διαδικασία συγχρονισμού θα διαρκέσει για 3 δευτερόλεπτα. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, οι ρυθμιστές PI θα προσαρμόσουν αργά την τάση και τη συχνότητα του μικροδικτύου έτσι ώστε να είναι ίσες με αυτές του κύριου δικτύου.
- **Έλεγχος Droop:** Κατά την διαδικασία του σχηματισμού δικτύου, οι λειτουργίες της συχνότητας και της τάσης του μικροδικτύου πρέπει να ελέγχονται από το σύστημα BESS. Το σύστημα BESS εφαρμόζει μια ρύθμιση Droop P/F η οποία είναι καθορισμένη στο 0,5%. Αυτό σημαίνει ότι η συχνότητα του μικροδικτύου μπορεί να παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις, από 60,3 Hz (όταν ο αντιστροφέας απορροφά την ονομαστική ενεργό ισχύ) έως 59,7 Hz (όταν ο αντιστροφέας παράγει την ονομαστική ενεργό ισχύ). Όσον αφορά το droop Q/V, η ρύθμισή του είναι στο 3%, που σημαίνει ότι η τάση στο δίκτυο PCC του μικροδικτύου μπορεί να ποικίλει από 609 Vrms (όταν ο αντιστροφέας απορροφά την πλήρη επαγωγική ισχύ) έως 582 Vrms (όταν ο αντιστροφέας παράγει την πλήρη χωρητική ισχύ).
- **Μέτρηση:** Το σύστημα ανάλυσης υπολογίζει την παραγόμενη ενεργό και αέργο ισχύ από τον αντιστροφέα. Επιπλέον, υπολογίζει τις συνιστώσες d-q των τριφασικών τάσεων και ρευμάτων στο σημείο σύνδεσης του μικροδικτύου (Point of Common Coupling - PCC).

3. **Φορτίο 600V:** Η απλή απεικόνιση του φορτίου αποτελείται από ένα σταθερό πρότυπο τριφασικού φορτίου (PQ) και ένα δεύτερο πρότυπο φορτίου PQ που μπορεί να ενεργοποιηθεί/απενεργοποιηθεί.
4. **Ηλιακή εγκατάσταση:** Η εγκατάσταση που λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια αποτελείται από συσκευές που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Η συσκευές αυτές, που αποτελούνται από συστοιχίες φωτοβολταϊκών κυψελών, είναι συνδεδεμένες με έναν μετατροπέα που αυξάνει την παραγόμενη ισχύ. Ο μετατροπέας ελέγχεται από ένα σύστημα που ανιχνεύει το σημείο μέγιστης ισχύος, χρησιμοποιώντας την τεχνική Perturb and Observe για να προσαρμόσει την τάση στους ακροδέκτες των φωτοβολταϊκών κυψελών και να αποσπάσει τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Ωστόσο, η ισχύς ελέγχεται από έναν ενεργό ρυθμιστή όταν απαιτείται περιορισμός της λειτουργίας. Η ενέργεια που παράγεται από τον μετατροπέα συνδέεται με έναν κύκλωμα συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης 1000V. Ένας μετατροπέας τριών επιπέδων NPC μετατρέπει την συνεχή τάση 1000V σε περίπου 500V εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο μετατροπέας NPC ελέγχεται από έναν ρυθμιστή τάσης συνεχούς ρεύματος, ο οποίος διατηρεί σταθερή την τάση στο κύκλωμα συνεχούς ρεύματος στα 1000V, ανεξάρτητα από την ποσότητα της ενεργού ισχύος που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες. Για τη σύνδεση του μετατροπέα με το μικροδίκτυο χρησιμοποιούνται ένα φίλτρο που περιορίζει τις αλληλοεπιδράσεις μεταξύ του μετατροπέα και του δικτύου και ένας μετασχηματιστής που μεταφέρει την ενέργεια από 480V σε 600V και έχει χωρητικότητα 1-MVA.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής που πραγματοποιείται στο μικροδίκτυο, γίνεται αποσύνδεση από το κεντρικό δίκτυο και μεταβαίνει από την κατάσταση όπου ακολουθεί το δίκτυο (grid-following mode) σε αυτόνομη κατάσταση όπου δημιουργεί δίκτυο (grid-forming mode).



Σχήμα 6.2: Διάγραμμα ενδείξεων του παλμογράφου για την διαδικασία του επανασυγχρονισμού.



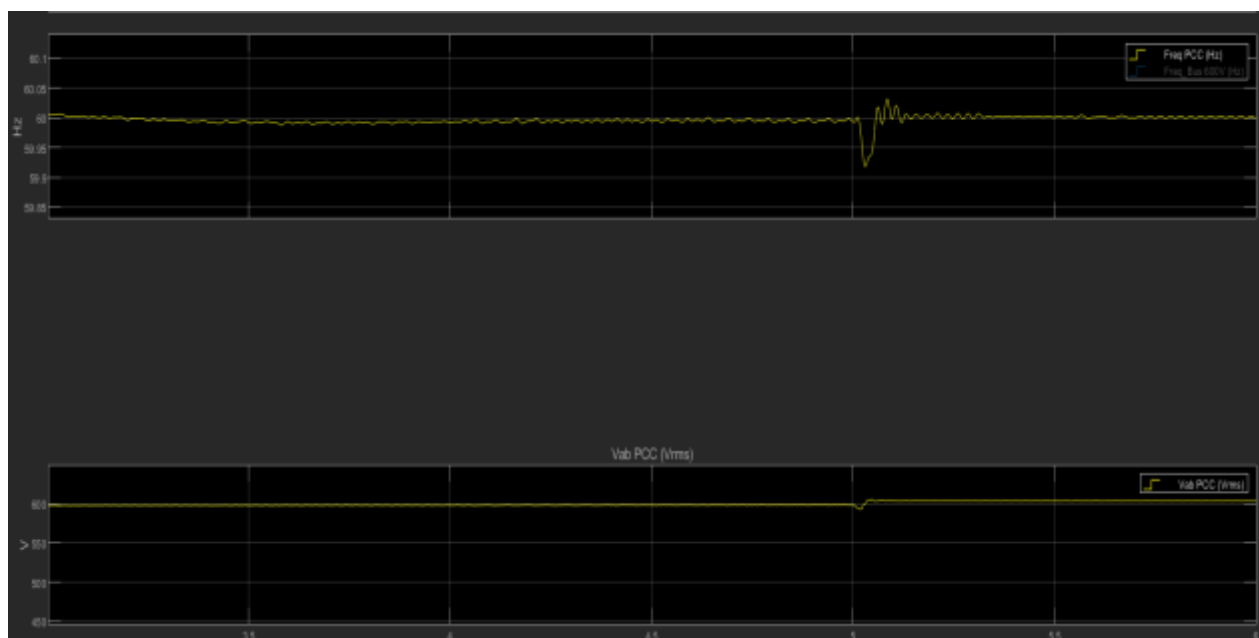
Σχήμα 6.3: Αναλυτικότερη απεικόνιση του παλμογράφου στο σημείο που εκτελείται ο επανασυγχρονισμός.

Ο παλμογράφος παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία των βασικών στοιχείων του μικροδικτύου. Για κάθε στοιχείο, υπάρχει μια χαρακτηριστική καμπύλη με μια μοναδική απόχρωση. Η κίτρινη καμπύλη αντιστοιχεί στο μέτρηση της ενεργού ισχύος (kW) στο σημείο σύζευξης του μικροδικτύου με το κύριο δίκτυο (PCC). Η πορτοκαλί καμπύλη αναπαριστά την ενεργό ισχύ (kW) του συστήματος

αποθήκευσης ενέργειας, ενώ η μωβ καμπύλη αναφέρεται στην άεργο ισχύ (kvar). Η πράσινη καμπύλη συσχετίζεται με την ενεργό ισχύ (kW) των φωτοβολταϊκών μονάδων, και η μπλε καμπύλη αναφέρεται στην ενεργό ισχύ (kW) του δικτύου φορτίου.

Στο συγκεκριμένο μικροδίκτυο που παρουσιάζεται στην εξομοίωση έχει προηγηθεί μια γενική διακοπή ρεύματος επομένως για την επαναφορά του δικτύου έχει εκτελεστεί η τεχνική Blackstart. Το Blackstart κατόρθωσε να επαναφέρει την ηλεκτροδότηση στο μικροδίκτυο και στη συνέχεια το μικροδίκτυο οδηγήθηκε σε νησιδοποιημένη κατάσταση (island mode). Η τάση, η συχνότητα καθώς και η ενεργός ισχύς σταθεροποιήθηκαν και όπως φαίνεται στον παλμογράφο η μπλε καμπύλη που αναπαριστά το φορτίο του δικτύου παραμένει στα 750 kW περίπου. Στη συνέχεια πρέπει να εκτελεστεί η διαδικασία του επανασυγχρονισμού με σκοπό το μικροδίκτυο να επανασυνδεθεί με το κεντρικό δίκτυο. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η κίτρινη καμπύλη που αναπαριστά τις τιμές της ενεργού ισχύος στο σημείο σύζευξης με το κεντρικό δίκτυο (PCC) κατά τη διάρκεια της νησιδοποιημένης κατάστασης βρίσκεται στο 0 ενώ στα 5 sec που εκτελείται ο επανασυγχρονισμός παρουσιάζει διακυμάνσεις έως ότου ανέλθει στα 120 kW στο χρονικό διάστημα 5 και 5,5 sec όπου και σταθεροποιείται στην τιμή αυτή. Όσο το δίκτυο βρίσκεται σε νησιδοποιημένη κατάσταση βασίζει την τροφοδοσία του στην ισχύ των φωτοβολταϊκών η οποία παραμένει σταθερά στα 650 kW και τα οποία φορτίζουν το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (BESS). Επίσης στον παλμογράφο παρουσιάζεται η ενεργός και η άεργη ισχύς του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που ηλεκτροδοτεί το μικροδίκτυο και οι τιμές τους είναι 100 kW για την ενεργό ισχύ και 148 kvar για την άεργο. Στη συνέχεια εκτελείται ο επανασυγχρονισμός όπου το μικροδίκτυο επανασυνδέεται με το κεντρικό δίκτυο και η διαδικασία αυτή εκτελείται στα 5 sec. Παρουσιάζονται διακυμάνσεις ως προς την ενεργό ισχύ του PCC, του BESS και του φορτίου του δικτύου. Παρατηρείται ότι η ενεργός και η άεργος ισχύς του BESS για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα λαμβάνουν αρνητική τιμή επομένως συμπεραίνεται μια μικρή αναταραχή και στέλνεται ρεύμα πίσω στο κεντρικό δίκτυο. Η αναταραχή αυτή εξομαλύνεται γρήγορα και οι τιμές σταθεροποιούνται στο 0 για ενεργό και άεργο ισχύ, επομένως παύει και η λειτουργία της μπαταρίας. Επιπροσθέτως το φορτίο του δικτύου κατά την έναρξη του επανασυγχρονισμού παρουσιάζει και αυτό μια μικρή διακύμανση έως ότου φτάσει στην τιμή των 755 kW. Από τα δεδομένα του

παλμογράφου εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο επανασυγχρονισμός ήταν επιτυχής και η επανασύνδεση με το κεντρικό δίκτυο έγινε άμεσα και ομαλά.



Σχήμα 6.4: Απεικόνιση του παλμογράφου για την μεταβολή της συχνότητας και του V_{rms} .

Από τον ένδειξη του παλμογράφου σχετικά με την συχνότητα παρατηρείται η μεταβολή της συχνότητα στο σημείο σύζευξης PCC. Κατά την διάρκεια της νησιδοποιημένης κατάστασης η συχνότητα κυμαίνεται στα 60 Hz και με την επανασύνδεση με το κυρίως δίκτυο στα 5 sec παρουσιάζει μια διακύμανση η οποία μετά από 0,35 sec εξομαλύνεται πλήρως και επιστρέφει στα 60 Hz.

Από την ένδειξη του παλμογράφου ενεργού τιμής τάσης (V_{rms}) παρατηρείται μια μικρή διακύμανση κατά την εκτέλεση του επανασυγχρονισμού στο διάστημα μεταξύ 5 και 5,06 sec και σταθεροποιείται πάλι στην προκαθορισμένη τιμή.

Συμπέρασμα

Συνοψίζοντας, στην παρούσα εργασία αναλύθηκε τη σημασία των μικροδικτύων (microgrids) καθώς και η ανάγκη για την ενσωμάτωση δύο σημαντικών λειτουργιών, του Blackstart και του Islanding, στα μικροδίκτυα. Αναδείχθηκε ο ρόλος που διαδραματίζουν οι αποκεντρωμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην αδιάλειπτη και ευέλικτη τροφοδοσία του δικτύου αλλά και η ευπρόσβλητος φύση των δικτύων σε διάφορες καταστάσεις, γεγονός που επέβαλε την άμεση σχεδίαση μεθόδων αντιμετώπισης. Επιπλέον, δόθηκε ιδιαίτερη στην ανάγκη για αποτελεσματικές μεθοδολογίες αποκατάστασης μετά από διακοπή ρεύματος (BlackStart) και τη σημασία των προηγμένων συστημάτων, όπως οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας (BESS) και οι σύγχρονες γεννήτριες για την επίτευξή του. Η παρούσα εργασία ανέλυσε και αξιολόγησε τις συμβατικές και σύγχρονες τεχνικές αποκατάστασης, με έμφαση στην πιθανή εφαρμογή τους στα μικροδίκτυα. Με βάση την εκτενή έρευνα και τα αποτελέσματα που προκύπτουν, αναδεικνύονται τα οφέλη των μικροδικτύων με τις λειτουργίες Blackstart και Islanding, καθώς και οι μελλοντικές εξελίξεις στον τομέα αυτό. Η εργασία παρέχει συνολική κατανόηση της σημασίας αυτών των λειτουργιών για την αξιοπιστία και την αντοχή των μικροδικτύων καθώς επίσης και κατευθυντήριες γραμμές για μελλοντικές έρευνες και αναπτύξεις στον τομέα αυτό.

Κατάλογος αναφορών

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

www.oeb.org.c

[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

[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

[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

[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

[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] Jose R. Gracia, Patrick W. O'Connor, Lawrence C. Markel, Rui Shan, D. Thomas Rizy, Alfonso Tarditi, Hydropower Plants as Black Start Resources May 2019.

<https://www.energy.gov/eere/water/articles/hydropower-plants-black-start-resources>

[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] Andrés Peña Asensio, Santiago Arnaltes Gómez, Jose Luis Rodriguez-Amenedo, Black-start capability of PV power plants through a grid-forming control based on reactive power synchronization, International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 146, March 2023.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061522007268?fbclid=IwAR1fHLsj8HrRhloRwt7HeNIhTqd2el7quwGLAJDXID4LS5S4Pd7TW8mz0i0>

[24] Yuko Hirase, Yuki Ohara, Hassan Bevrani, Virtual synchronous generator based frequency control in interconnected microgrids, Energy Reports Volume 6, Supplement 9, December 2020, Pages 97-103

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484720313974?fbclid=IwAR3Z7cM4_fiWN9OgBbqcG87ZcRxtcoinI4RC-PkJmrwSCYIhUf24ykSCnM

[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

[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, Maíra 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

Αναφορές σχημάτων

[1] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671122000079>

[2] <https://electricala2z.com/electrical-power/microgrid-advantages-structure-applications/>

[3] www.pv-magazine.com

[4] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671122000079>

