



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας

---

## Μοντελοποίηση μετατροπών μικροδικτύου με πολλαπλές πηγές ενέργειας σε κατάσταση νησιδοποίησης

---

Διπλωματική Εργασία

Εκπόνηση:

Κωνσταντίνα Λαζαρίνα

Επίβλεψη:

Δημήτριος Λαμπρίδης, Καθηγητής

Αθηνά Καπράρα, Ε.Τ.Ε.Π.

Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2024



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας

## Μοντελοποίηση μετατροπών μικροδικτύου με πολλαπλές πηγές ενέργειας σε κατάσταση νησιδοποίησης

Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνα Λαζαρίνα

Επιβλέπων Καθηγητής:

Λαμπρίδης Δημήτριος, Καθηγητής Α.Π.Θ.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις

09/07/2024

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....  
Δημήτριος Λαμπρίδης

Καθηγητής

Α.Π.Θ.

.....  
Γεώργιος Ανδρέου

Επικουρος Καθηγητής

Α.Π.Θ.

.....  
Μηνάς Αλεξιάδης

Επικουρος Καθηγητής

Α.Π.Θ.

(Υπογραφή)

.....

Κωνσταντίνα Λαζαρίνα

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Α.Π.Θ.

Copyright © Λαζαρίνα Κωνσταντίνα, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα, δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



## Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή έχει επηρεάσει σημαντικά τα πρότυπα κατανάλωσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργώντας ανάγκη για έξυπνα, ανθεκτικά και αξιόπιστα ενεργειακά συστήματα. Στο πλαίσιο αυτό, τα μικροδίκτυα προσφέρουν μια ευέλικτη λύση, επιτρέποντας την τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ενισχύοντας την αξιοπιστία και αποδοτικότητα του δικτύου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται μια προσομοίωση λειτουργίας ενός μικροδικτύου όταν αυτό αποκόπτεται από το κεντρικό δίκτυο και λειτουργεί σε κατάσταση νησιδοποίησης. Το προσομοιωμένο μικροδίκτυο αποτελείται από τρία διαφορετικά φορτία, μια γεννήτρια diesel, μια υδρογεννήτρια, ένα φωτοβολταϊκό σύστημα και ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες. Ο σκοπός της προσομοίωσης είναι η αξιολόγηση της απόκρισης του μικροδικτύου και της απόδοσης των μετατροπών των συστημάτων φωτοβολταϊκών και μπαταριών στη διαχείριση της ενεργού και άεργου ισχύος μετά τη νησιδοποίηση.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι οι μετατροπείς ισχύος των συστημάτων φωτοβολταϊκών και μπαταριών διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση της ισορροπίας ισχύος. Όταν ο κεντρικός έλεγχος του μικροδικτύου ανιχνεύει μια κατάσταση νησιδοποίησης, ανταποκρίνονται άμεσα και διασφαλίζουν τη σταθερότητα του μικροδικτύου και την αξιόπιστη παροχή ενέργειας.

Συνολικά, τα ευρήματα της παρούσας διπλωματικής καταδεικνύουν τη βιωσιμότητα της χρήσης μικροδικτύων ως μια ενεργειακή λύση. Με την αποτελεσματική εξισορρόπηση της ισχύος και την παροχή ταχείας απόκρισης στις μεταβολές της ζήτησης με τη χρήση αποθηκευτικών μέσων, τα συστήματα αυτά μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη μείωση της εξάρτησης από τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας αλλά και να παρέχουν αξιόπιστη παροχή ενέργειας σε απομακρυσμένες ή πληγείσες από καταστροφές περιοχές.

## Λέξεις Κλειδιά

Μικροδίκτυα, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έξυπνα δίκτυα, διανεμημένη παραγωγή, έλεγχος μικροδικτύων, νησιδοποίηση, ιεραρχικός έλεγχος

# Modeling of Microgrid Converters with Multiple Energy Sources in Islanded Mode

## Abstract

Climate change has had a major impact on electricity consumption and production patterns, creating a need for smart, resilient and reliable energy systems. In this context, microgrids offer a flexible solution, enabling local electricity generation and enhancing grid reliability and efficiency.

In this thesis, a simulation of the operation of a microgrid when it is disconnected from the main grid and operates in islanding mode is carried out. The simulated microgrid consists of three different loads, a diesel generator, a hydro generator, a photovoltaic system and a battery storage system. The purpose of the simulation is to evaluate the response of the microgrid and the performance of the grid-tied inverters of the battery and photovoltaic systems in managing active and reactive power after islanding.

The simulation results show the power converters of the PV and battery systems play a critical role in maintaining the power balance. When the central control of the microgrid detects an islanding condition, they respond immediately and ensure the stability of the microgrid and reliable power supply.

Overall, the findings of this thesis demonstrate the viability of using microgrids as an energy solution. By efficiently balancing power and providing rapid response to demand changes using storage, these systems can significantly contribute to reducing dependence on traditional energy sources and also provide reliable energy supply in remote or disaster-affected areas.

## Key Words

Microgrids, renewable energy sources, smart grids, distributed generation, microgrid control, islanding, hierarchical control

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δημήτριο Λαμπρίδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση και την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και την κ. Αθηνά Καπράρα για την συνεχή βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την στήριξη τους καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου.





## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
Ευχαριστίες.....	7
Κατάλογος Εικόνων .....	11
Κατάλογος Διαγραμμάτων .....	12
Κατάλογος Πινάκων .....	12
Κεφάλαιο 1 .....	14
Εισαγωγή .....	14
Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας .....	16
Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας.....	17
Κεφάλαιο 2 .....	18
Συμβατικά Δίκτυα .....	18
Παραγωγή σε συμβατικά δίκτυα.....	19
Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	21
Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	23
Αξιοπιστία Δικτύων .....	24
Αιτίες Διακοπής Παροχής Ρεύματος .....	24
Παρακολούθηση και Ανίχνευση Σφαλμάτων .....	26
Ασφάλεια Εφοδιασμού & Ενεργειακές Πολιτικές στην ΕΕ .....	26
Ενεργειακή Κρίση.....	28
Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	28
Ηλιακή Ενέργεια & Φωτοβολταϊκά .....	29
Υδροηλεκτρική Ενέργεια.....	30
Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	32
Διανεμημένη Παραγωγή.....	33
Κεφάλαιο 3 .....	34
Έξυπνα Δίκτυα.....	34
Βασικά στοιχεία ενός έξυπνου δικτύου .....	34
Προβλήματα ασφάλειας.....	35
Μικροδίκτυα .....	35
Χαρακτηριστικά μικροδικτύων .....	36
Κίνητρα ανάπτυξης.....	39
Λειτουργία & Έλεγχος Μικροδικτύων .....	40
Στρατηγικές Ιεραρχικού Ελέγχου.....	40

Στρατηγική Κεντρικού Ελέγχου .....	41
Στρατηγική αποκεντρωμένου ελέγχου .....	42
Στρατηγική διανεμημένου ελέγχου .....	42
Κεφάλαιο 4 .....	45
Δυναμική μοντελοποίηση .....	46
Σύστημα Δοκιμής Μικροδικτύου .....	47
Φωτοβολταϊκά και Σύστημα Μπαταριών .....	50
Υδροηλεκτρική Γεννήτρια και Γεννήτρια Diesel .....	57
Κεφάλαιο 5 .....	61
Προσομοίωση Νησιδοποίησης .....	61
Αποτελέσματα Προσομοίωσης RMS.....	65
Συμπεράσματα.....	67
Βιβλιογραφία .....	70

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 - Συμβατικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	18
Εικόνα 2 - Χάρτης Γραμμών Μεταφοράς (Πηγή: ΑΔΜΗΕ) .....	22
Εικόνα 3 - Σχηματική Αναπαράσταση Λειτουργίας ενός Φωτοβολταϊκού Συστήματος .....	29
Εικόνα 4 - Σχηματική Αναπαράσταση Μικροδικτύου .....	36
Εικόνα 5 - Δομή Ιεραρχικού Ελέγχου .....	40
Εικόνα 6 - Διάγραμμα Μπλοκ Δυναμικής Μοντελοποίησης [31] .....	46
Εικόνα 7 - Σύστημα Δοκιμής Μικροδικτύου στο Περιβάλλον του DIgSILENT PowerFactory .....	48
Εικόνα 8 - Ζήτηση Φορτίου 1 .....	49
Εικόνα 9 - Ζήτηση Φορτίου 2 .....	49
Εικόνα 10 - Ζήτηση Φορτίου 3 .....	49
Εικόνα 11 - Παραγωγή Φωτοβολταϊκού Συστήματος .....	49
Εικόνα 12 - Διάγραμμα Λειτουργίας Ελεγκτή Μετατροπέα από την Πλευρά του Δικτύου .....	51
Εικόνα 13 - Σύνθετο Πλαίσιο Μετατροπέα PWM .....	52
Εικόνα 14 - Ορισμός Μοντέλου Ελεγκτή P/f .....	53
Εικόνα 15 - Ορισμός Μοντέλου Ελεγκτή Q/V .....	54
Εικόνα 16 - Αρχικοποίηση Δεδομένων Ελεγκτή P/f (Block Definition) .....	54
Εικόνα 17 - Αρχικοποίηση Δεδομένων Ελεγκτή Q/V (Block Definition) .....	55
Εικόνα 18 - Κοινό Μοντέλο Ελεγκτή Q/V μπαταρίας .....	55
Εικόνα 19 - Κοινό Μοντέλο Ελεγκτή P/f μπαταρίας .....	55
Εικόνα 20 - Κοινό Μοντέλο Ελεγκτή P/f Φωτοβολταϊκού .....	56
Εικόνα 21 - Κοινό Μοντέλο Ελεγκτή Q/V Φωτοβολταϊκού .....	56
Εικόνα 22 - Σύνθετο Μοντέλο Ελέγχου Μπαταρίας .....	56
Εικόνα 23 - Σύνθετο Μοντέλο Ελέγχου Φωτοβολταϊκών .....	57
Εικόνα 24 - Διάγραμμα Λειτουργίας Μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού Παραγωγής [32] .....	58
Εικόνα 25 - Διάγραμμα Λειτουργίας Γεννήτριας Ντίζελ .....	58
Εικόνα 26 - Κοινό Μοντέλο Ρυθμιστή Γεννήτριας Diesel .....	59
Εικόνα 27 - Κοινό Μοντέλο Συστήματος Διέγερσης Γεννήτριας Diesel .....	59
Εικόνα 28 - Σύνθετο Μοντέλο Ελέγχου Γεννήτριας Diesel .....	59
Εικόνα 29 - Κοινό Μοντέλο Συστήματος Ρυθμιστή Υδρογεννήτριας .....	60
Εικόνα 30 - Κοινό Μοντέλο Συστήματος Διέγερσης Υδρογεννήτριας .....	60
Εικόνα 31 - Σύνθετο Μοντέλο Ελέγχου Υδρογεννήτριας .....	60
Εικόνα 32 - Ορισμός Συμβάντων Προσομοίωσης .....	63
Εικόνα 33 - Υπολογισμός Αρχικών Συνθηκών του Συστήματος Δοκιμής .....	64
Εικόνα 34 - Παράθυρο Εξόδου DIgSILENT μετά τον Υπολογισμό Αρχικών Συνθηκών .....	64

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 - Ετήσια Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας ανά Τεχνολογία στην Ελλάδα 2014-2021.....	19
Διάγραμμα 2- Πρόοδος Ελλάδας συγκριτικά με τον Ευρωπαϊκό Μέσο Όρο όσον αφορά την επίτευξη του Στόχου 7.....	20
Διάγραμμα 3 - Ενεργός και Άεργος Ισχύς Γεννήτριας Diesel.....	65
Διάγραμμα 4 - Ενεργός και Άεργος Ισχύς Υδρογεννήτριας .....	65
Διάγραμμα 5 - Ενεργός και Άεργος Ισχύς Μετατροπέα PWM Συστήματος Φωτοβολταϊκών .....	65
Διάγραμμα 6 - Ενεργός και Άεργος Ισχύς Μετατροπέα PWM Συστήματος Μπαταριών .....	65
Διάγραμμα 10 - Υψηλή Τάση Σημείου Κοινής Σύνδεσης.....	66
Διάγραμμα 11 - Χαμηλή Τάση Σημείου Κοινής Σύνδεσης.....	66
Διάγραμμα 12 - Συχνότητα Χαμηλής Τάσης Σημείου Κοινής Σύνδεσης .....	66

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 - Διαθέσιμες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μικροδίκτυα, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα .....	37
Πίνακας 2 - Τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα.....	38
Πίνακας 3 - Χαρακτηριστικά Φορτίων.....	48
Πίνακας 4 - Ενδεικτικές Τιμές Ζήτησης Φορτίων και Παραγωγής Φωτοβολταϊκού ..	49
Πίνακας 5 - Σύνοψη Συμβάντων Προσομοίωσης .....	62



# 1<sup>ο</sup>

## Κεφάλαιο

---

### Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί τόσο από συμβατικές όσο και από μη συμβατικές πηγές. Οι συμβατικές πηγές εξαρτώνται από ορυκτά καύσιμα, τα οποία προβλέπεται να εξαντληθούν τις επόμενες δεκαετίες ενώ ο ηλεκτρισμός αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στην καθημερινή μας ζωή. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες και η εμφάνιση ιδιωτικών φορέων και του ανταγωνισμού έχουν αυξήσει το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη μη συμβατικών πηγών σε μεγάλη κλίμακα.

Τα συμβατικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν σημαντικά μειονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένων ζητημάτων αξιοπιστίας, ποιότητας ισχύος, απωλειών μεταφοράς και διανομής και απόδοσης. Η αυξανόμενη ζήτηση καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη μικρότερων δικτύων που μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες ζήτησης σε τοπικό επίπεδο αξιόπιστα και οικονομικά. Τα δίκτυα μικρής κλίμακας μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις ισχύος απομακρυσμένων περιοχών χωρίς να απαιτούνται σημαντικές επενδύσεις σε γραμμές μεταφοράς.

Η έννοια του μικροδικτύου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενσωμάτωση ενός μείγματος μη συμβατικών πηγών. Ένα μικροδίκτυο είναι ένα μικρό δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από φορτία και κατανεμημένους ενεργειακούς πόρους (Distributed Energy Resources - DER), όπως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP), κυψέλες καυσίμου και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Τα μικροδίκτυα προσφέρουν πλεονεκτήματα όσον αφορά την υψηλότερη ευελιξία, την αξιοπιστία, τη λειτουργική απόδοση, την οικονομική βιωσιμότητα, την αποδοτικότητα, την αποδοτικότητα καυσίμων και την αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ του δικτύου κοινής ωφέλειας και του μικροδικτύου όταν βρίσκονται σε λειτουργία συνδεδεμένη με το δίκτυο. Ενισχύουν την ελαστικότητα του δικτύου και συμβάλλουν στη μείωση των διαταραχών.

Παράγοντες όπως η αντιστάθμιση της άεργου ισχύος, η ποιότητα ισχύος και η δυνατότητα ελέγχου αποτελούν κρίσιμα ζητήματα όσον αφορά τη λειτουργία των μικροδικτύων. Τα μικροδίκτυα συνεχούς ρεύματος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων. Μακροπρόθεσμα, παρέχουν αξιόπιστη ισχύ και είναι οικονομικά αποδοτικά. Η έννοια του μικροδικτύου είναι ιδιαίτερα επωφελής για τις μικρές κοινότητες που θέλουν να αναλάβουν τον έλεγχο της χρήσης ενέργειας και να μειώσουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, χρησιμοποιώντας καινοτόμες μεθόδους παραγωγής και αξιοποίησης της ενέργειας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει στις κοινότητες να υιοθετήσουν πιο έξυπνες πρακτικές διαχείρισης της ενέργειας και να συμβάλουν σε ένα πιο πράσινο περιβάλλον.

Η λειτουργία νησιδοποίησης είναι μια τεχνική ελέγχου που χρησιμοποιείται στα μικροδίκτυα όταν απομονώνονται από το κυρίως σύστημα ηλεκτροδότησης. Οι συνθήκες νησιδοποίησης ταξινομούνται σε δύο γενικές κατηγορίες

1. **Σκόπιμη ή προγραμματισμένη νησιδοποίηση** η οποία είναι μια διαδικασία ανοίγματος του διακόπτη στο σημείο κοινής σύνδεσης (Point of Common Coupling - PCC) για την αποσύνδεση του μικροδικτύου από το δίκτυο κοινής ωφέλειας. Η προγραμματισμένη αυτή αποσύνδεση επιτρέπει την ελεγχόμενη και σταθερή λειτουργία του μικροδικτύου.
2. **Ακούσια νησιδοποίηση** που λαμβάνει χώρα απροσδόκητα λόγω σφαλμάτων ή διαταραχών εντός του συστήματος και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αστάθεια.

Κατά τη διάρκεια της νησιδοποίησης υπάρχουν σημαντικές αλλαγές τόσο στη συχνότητα όσο και στην τάση. Μια ισχυρή στρατηγική ελέγχου είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της συχνότητας και της τάσης του συστήματος εντός των θεσπισμένων ορίων, όπως αυτά ορίζονται από διεθνή πρότυπα.

Παρόλο που η αύξηση της διανεμημένης παραγωγής μπορεί να ενισχύσει την παραγωγή ενέργειας και τη συνολική σταθερότητα του μικροδικτύου, η ενσωμάτωση πολλών και διαφορετικών πηγών ενέργειας εισάγει πολυπλοκότητα στο σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου. Ιδιαίτερα κατά τη λειτουργία νησιδοποίησης, το σύστημα ελέγχου πρέπει να ανταποκρίνεται γρήγορα σε μεγάλες και γρήγορες αλλαγές στη συχνότητα και την τάση. Οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής που συνδέονται με μετατροπείς, όπως τα φωτοβολταϊκά, και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, είναι κρίσιμα για τη διαχείριση των απότομων διακυμάνσεων στο δίκτυο. Άλλοι τύποι διανεμημένης παραγωγής, όπως οι συμβατικές σύγχρονες μηχανές, μπορούν επίσης να στηρίξουν τον έλεγχο της συχνότητας και της τάσης αλλά συνήθως παρουσιάζουν πιο αργή απόκριση ανάλογα με την διαθεσιμότητα και τις λειτουργίες ελέγχου που διαθέτουν.

Ένα τυπικό σύστημα μικροδικτύου περιλαμβάνει μια ιεραρχική αρχιτεκτονική συστήματος ελέγχου με δύο κύρια επίπεδα:

1. Επίπεδο συσκευής, στις μονάδες διανεμημένης παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας
2. Κεντρικό έλεγχο μικροδικτύου (Microgrid Central Control - MGCC)

Στο επίπεδο συσκευής, οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας προσπαθούν να παράγουν ενέργεια η οποία θα πληροί τις απαιτήσεις του δικτύου όπως η διατήρηση της τάσης και της συχνότητας εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Σε αυτό το επίπεδο χρησιμοποιούνται μέθοδοι τοπικού ελέγχου, όπως ο έλεγχος droop, με την επίβλεψη από τον κεντρικό έλεγχο του μικροδικτύου.

Ο κεντρικός έλεγχος είναι καθοριστικός για την λειτουργία του μικροδικτύου τόσο όταν είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο όσο και σε κατάσταση νησιδοποίησης καθώς μπορεί να δώσει εντολές και να ανταλλάξει πληροφορίες με άλλες ελεγχόμενες συσκευές στο σύστημα του μικροδικτύου μέσω συνδέσμων επικοινωνίας, όπως για παράδειγμα καλώδια οπτικής ίνας. Σε λειτουργία νησιδοποίησης ο κεντρικός έλεγχος διαχειρίζεται την παραγωγή ενέργειας από τις διανεμημένες μονάδες και από τις μπαταρίες ώστε να ευθυγραμμιστεί με τη ζήτηση φορτίου εντός του μικροδικτύου. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να αποσυνδέει μη ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής ή φορτία ώστε να διατηρήσει την σταθερότητα του συστήματος.

### Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Η μελέτη που περιγράφεται παρακάτω αποσκοπεί στην επίδειξη της λειτουργίας και του ελέγχου του συστήματος μικροδικτύου σε νησιδοποιημένη λειτουργία, με ικανοποιητικό επίπεδο συχνότητας και τάσης, ενώ ο αριθμός των αποκοπών φορτίου θα πρέπει να είναι ελάχιστος. Ωστόσο, η αβεβαιότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθιστά δύσκολο για το σύστημα μικροδικτύου να διατηρήσει μια ισορροπημένη παροχή ενέργειας. Μια μπαταρία επιλέγεται ως η κύρια συσκευή αποθήκευσης για την αντιμετώπιση των ξαφνικών μεταβολών της συχνότητας και της τάσης μετά τον εντοπισμό της κατάστασης νησιδοποίησης. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνεχίζουν να συνδέονται στο σύστημα, εφόσον μπορούν να προσφέρουν δυνατότητες ελέγχου συχνότητας και τάσης. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, το οποίο είναι συνδεδεμένο με μετατροπέα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη του ελέγχου ισχύος και τάσης στο σύστημα εάν η ηλιακή ακτινοβολία είναι διαθέσιμη. Ο έλεγχος περικοπής ισχύος μπορεί να απαιτείται σε περίπτωση χρήσης φωτοβολταϊκών συστημάτων για την αποφυγή υπερβολικής ισχύος που παρέχεται στο σύστημα. Οι μέθοδοι ελέγχου droop εφαρμόζονται για τον διαμοιρασμό της ενεργού και της άεργου ισχύος μεταξύ αυτών των μονάδων φωτοβολταϊκών και μπαταρίας.

Εναλλακτικά, μια μικρή υδροηλεκτρική γεννήτρια και μια γεννήτρια diesel, που βασίζονται σε σύγχρονες μηχανές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ελεγκτές συχνότητας και τάσης, εάν περιλαμβάνουν συστήματα διέγερσης τουρμπίνας και τάσης. Η μικρή υδρογεννήτρια είναι εγκατάσταση αξιοποίησης διαθέσιμης παροχής νερού (run-of-river), δηλαδή η ισχύς εξόδου καθορίζεται από τη στάθμη του νερού και είναι αρκετά σταθερή. Η γεννήτρια diesel έχει ως στόχο να χρησιμοποιείται όταν η υποστήριξη από την αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας είναι ανεπαρκής.

Η μελέτη βασίζεται σε προσομοιώσεις μεταβατικών καταστάσεων με στόχο να καταδειχθεί ο μηχανισμός εξισορρόπησης ισχύος και ο έλεγχος της τάσης από τα συστήματα διανεμημένης παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας στο μικροδίκτυο κατά τη διάρκεια της κατάστασης νησιδοποίησης. Πραγματοποιείται προσομοίωση RMS μέσω του λογισμικού DIgSILENT PowerFactory για την εξέταση των γρήγορων δυναμικών επιδόσεων του μικροδικτύου κατά τη λειτουργία νησιδοποίησης, ενώ



αναπτύσσονται δυναμικά μοντέλα πηγών ενέργειας με τη χρήση της γλώσσας προσομοίωσης DIgSILENT (DSL).

## Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Η διάρθρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξής:

- **Κεφάλαιο 1** – Εισαγωγή στην έννοια του μικροδικτύου, των τεχνικών ελέγχου και σύντομη περιγραφή της διπλωματικής εργασίας
- **Κεφάλαιο 2** – Μελέτη των συμβατικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας και των περιορισμών τους, της ασφάλειας εφοδιασμού και των ενεργειακών πολιτικών. Βιβλιογραφική ανασκόπηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διανεμημένης παραγωγής.
- **Κεφάλαιο 3** – Ανασκόπηση των έξυπνων δικτύων και των μικροδικτύων. Ανάλυση των διάφορων στρατηγικών ελέγχου ενός μικροδικτύου.
- **Κεφάλαιο 4** – Περιγραφή του περιβάλλοντος DIgSILENT PowerFactory, της γλώσσας προσομοίωσης δυναμικού προγραμματισμού DIgSILENT (DSL), της δημιουργίας των δυναμικών μοντέλων και του συστήματος δοκιμής.
- **Κεφάλαιο 5** – Προσομοίωση της λειτουργίας νησιδοποίησης του συστήματος δοκιμής και αποτελέσματα. Συμπεράσματα από την διπλωματική εργασία και προτεινόμενα θέματα μελλοντικής έρευνας.

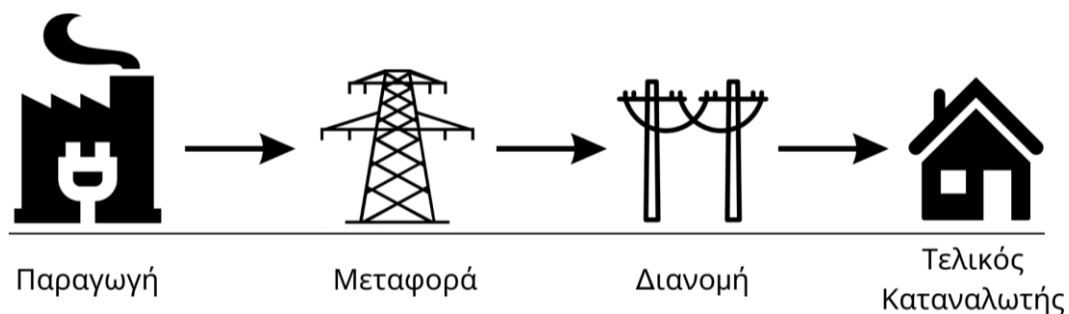
# 2<sup>ο</sup>

## Κεφάλαιο

### Συμβατικά Δίκτυα

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν θεμελιώδη υποδομή της σύγχρονης κοινωνίας υποστηρίζοντας την οικονομική δραστηριότητα φέρνοντας ενέργεια στα σπίτια, τη βιομηχανία και τις υπηρεσίες. Καθώς προχωρούν οι μεταβάσεις στην καθαρή ενέργεια, ο ρόλος της ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι πιο σημαντικός, όμως χωρίς επαρκή δίκτυα για τη σύνδεση της νέας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας με τη ζήτηση, υπάρχει κίνδυνος η ενεργειακή μετάβαση να παρουσιάσει σημαντικές καθυστερήσεις.

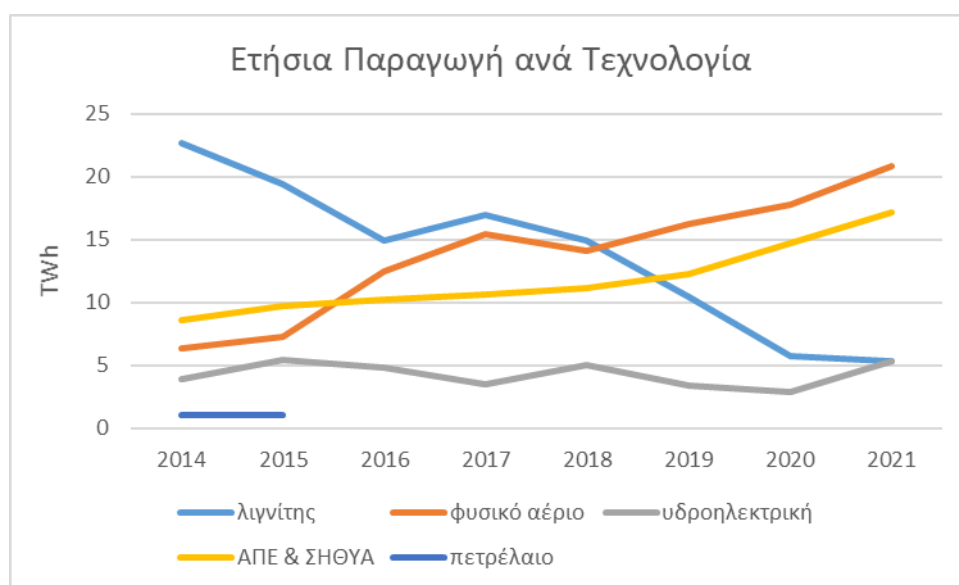
Ως ηλεκτρικό δίκτυο ορίζεται το σύστημα με το οποίο μεταφέρεται ηλεκτρική ενέργεια από τον παραγωγό στον καταναλωτή. Τα συμβατικά δίκτυα είναι μονής κατεύθυνσης, λειτουργούν δηλαδή μονόδρομα καθώς η ενέργεια ρέει από τις γεννήτριες στον τελικό καταναλωτή χωρίς ανάδραση, και μπορούν να διακριθούν σε τρεις “φάσεις”: παραγωγή, μεταφορά και διανομή. Στις τρεις αυτές φάσεις των συμβατικών δικτύων παρουσιάζονται διαφορετικά προβλήματα που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα του δικτύου και την ασφάλεια εφοδιασμού στους καταναλωτές.



Εικόνα 1 - Συμβατικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας

## Παραγωγή σε συμβατικά δίκτυα

Η παραγωγή στα συμβατικά δίκτυα είναι συνήθως κεντρική και μακριά από τον αστικό ιστό, ενώ οι περισσότεροι σταθμοί είναι θερμοηλεκτρικοί και λειτουργούν με την καύση ορυκτών. Στην Ελλάδα ο λιγνίτης αποτελούσε για χρόνια το πιο διαδεδομένο καύσιμο για την ηλεκτροπαραγωγή καθώς είναι το μόνο εγχώριο ορυκτό καύσιμο, ενώ μέχρι και το 2015 διατηρούσε το μεγαλύτερο ποσοστό στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (46,41%) σύμφωνα με την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ). Από το 2016 και έπειτα παρατηρείται σημαντική άνοδος της παραγωγής από μονάδες φυσικού αερίου, γεγονός που οφείλεται κυρίως στις μειώσεις τιμών πώλησής του μέσω αγωγών, με αποτέλεσμα η χρήση λιγνίτη να σημειώνει καθοδική πορεία. Το 2021 το ποσοστό λιγνιτικής παραγωγής στην Ελλάδα επί της συνολικής παραγωγής ήταν 10,96% ενώ του η παραγωγή από φυσικό αέριο ανήλθε στο 42,85% [1].



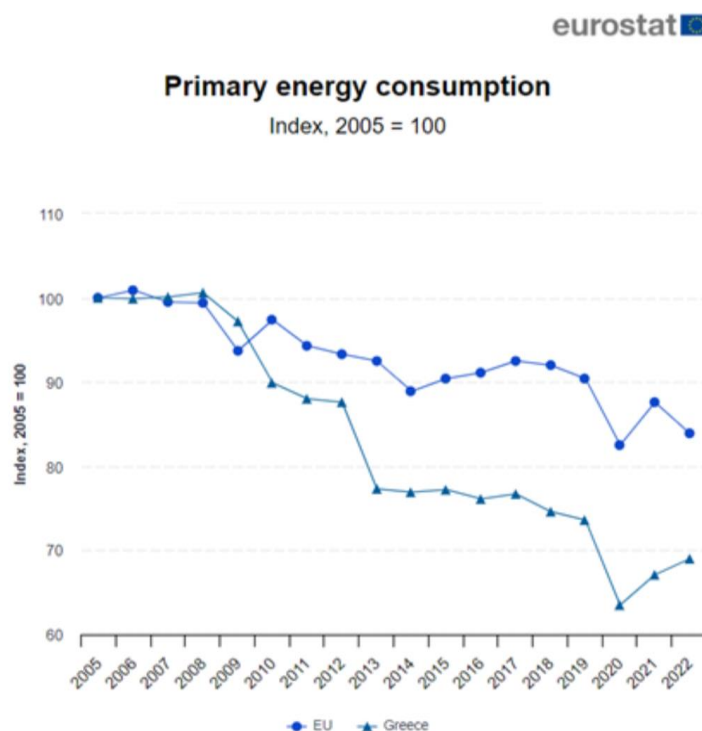
Διάγραμμα 1 - Ετήσια Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας ανά Τεχνολογία στην Ελλάδα 2014-2021

Ωστόσο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα υποβαθμίζει την ποιότητα του αέρα και επιδρά αρνητικά στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, ενώ θεωρείται ο κύριος λόγος για την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη καθώς αντιπροσωπεύει το 60% των συνολικών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Η μείωση των εκπομπών άνθρακα στον τομέα της ενέργειας αποτελεί μία σημαντική επιδίωξη των μακροπρόθεσμων στόχων του ΟΗΕ για το κλίμα. Στην Διάσκεψη για τη Κλιματική Αλλαγή το 2015 στο Παρίσι (COP 2015) όλες οι χώρες συμφώνησαν να περιορίσουν την υπερθέρμανση του πλανήτη κατά τουλάχιστον 1,5°C σε σύγκριση με την προβιομηχανική εποχή, και στην COP26 το 2021, επανέλαβαν τη δέσμευση, συμφωνώντας να επιταχύνουν επείγοντως τη δράση για το κλίμα. Οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (SDG) περιλαμβάνουν ένα ολόκληρο κεφάλαιο για την ενέργεια, SDG7, με στόχο την πρόσβαση σε οικονομική, αξιόπιστη, βιώσιμη και σύγχρονη ενέργεια για όλους και ένα ολόκληρο κεφάλαιο για τη δράση για το κλίμα, SDG13, για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και των συνέπειών της [2].

Έτσι, ο Στόχος 7 επιδιώκει:

- 7.1 - Έως το 2030, διασφάλιση της καθολικής πρόσβασης σε προσιτές, αξιόπιστες και σύγχρονες υπηρεσίες ενέργειας.
- 7.2 - Έως το 2030, σημαντική αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα.
- 7.3 - Έως το 2030, διπλασιασμός του παγκόσμιου ποσοστού βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας.
  - ο 7.α - Έως το 2030, ενίσχυση της διεθνούς συνεργασίας ώστε να διευκολυνθεί η πρόσβαση στην έρευνα και τη τεχνολογία καθαρής ενέργειας –συμπεριλαμβανομένων των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, της ενεργειακής αποδοτικότητας και των προηγμένων και καθαρών τεχνολογιών ορυκτών καυσίμων – και να προωθηθούν οι επενδύσεις σε ενεργειακές υποδομές και τεχνολογίες καθαρής ενέργειας.
  - ο 7.β- Έως το 2030, επέκταση των υποδομών και αναβάθμιση της τεχνολογίας για την παροχή σύγχρονων και βιώσιμων υπηρεσιών ενέργειας για όλους στις αναπτυσσόμενες χώρες, και ιδίως στις λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες, στα μικρά αναπτυσσόμενα νησιωτικά καθώς και στα περικλειστά αναπτυσσόμενα κράτη, σύμφωνα με τα αντίστοιχα προγράμματα στήριξής τους.

Για την μέτρηση της επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDG) στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχει αναπτυχθεί ένα σύνολο δεικτών SDG της ΕΕ υπό την ηγεσία της Eurostat με σκοπό την παρακολούθηση της προόδου των κρατών μελών. Παρακάτω φαίνεται η πρόοδος της Ελλάδας σε σχέση με τον ευρωπαϊκό μέσο όρο όσον αφορά την επίτευξη του Στόχου 7 [3].



Διάγραμμα 2- Πρόοδος Ελλάδας συγκριτικά με τον Ευρωπαϊκό Μέσο Όρο όσον αφορά την επίτευξη του Στόχου 7

Παρά την συνεχή αύξηση τα τελευταία χρόνια, το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παραμένει κάτω από 25% σε παγκόσμιο επίπεδο ενώ στην Ευρώπη είναι 35%. Σε χώρες με υψηλό ποσοστό διείσδυσης των ΑΠΕ (πχ Δανία, Γερμανία) η αιολική και η ηλιακή ενέργεια μπορούν να καλύψουν μέχρι και το 60% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παγκοσμίως υπάρχουν αρκετές προοπτικές για την επέκταση της δυναμικότητας των ΑΠΕ σε πολλές περιοχές του κόσμου.

Πέρα όμως από τις πολύ σοβαρές επιπτώσεις της καύσης ορυκτών καυσίμων στο περιβάλλον, τα συμβατικά δίκτυα είναι ευάλωτα στις καιρικές συνθήκες αλλά και σε γεωπολιτικά ζητήματα που επηρεάζουν άμεσα τις τιμές των ορυκτών καυσίμων στις παγκόσμιες αγορές. Το 2022, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετώπισαν προκλήσεις σε πολλές περιοχές λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων. Οι καύσωνες και οι ξηρασίες επιβάρυναν την κατάσταση εφοδιασμού τόσο στην Κίνα όσο και στην Ινδία, ενώ στη Γαλλία σημειώθηκε ρεκόρ χαμηλής πυρηνικής παραγωγής. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, οι χειμερινές καταιγίδες προκάλεσαν εκτεταμένες διακοπές ρεύματος. Παράλληλα, η κατάσταση επιδεινώθηκε από την εκτόξευση των τιμών ορυκτών καυσίμων, κυρίως του φυσικού αερίου και του LNG, ως αποτέλεσμα της εισβολής της Ρωσίας στην Ουκρανία, οδηγώντας σε ένα κύμα αλλαγής καυσίμου προς τον άνθρακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παγκόσμια παραγωγή με καύση άνθρακα αυξήθηκε κατά 1,5% το 2022 ενώ σύμφωνα με υπολογισμούς της IEA, ο πλανήτης έφτασε σε νέο, ιστορικά υψηλό, επίπεδο εκπομπών που σχετίζονται με την ηλεκτροπαραγωγή (περίπου 13,2 Gt CO<sub>2</sub>), μια ετήσια αύξηση της τάξης του 1,3%.

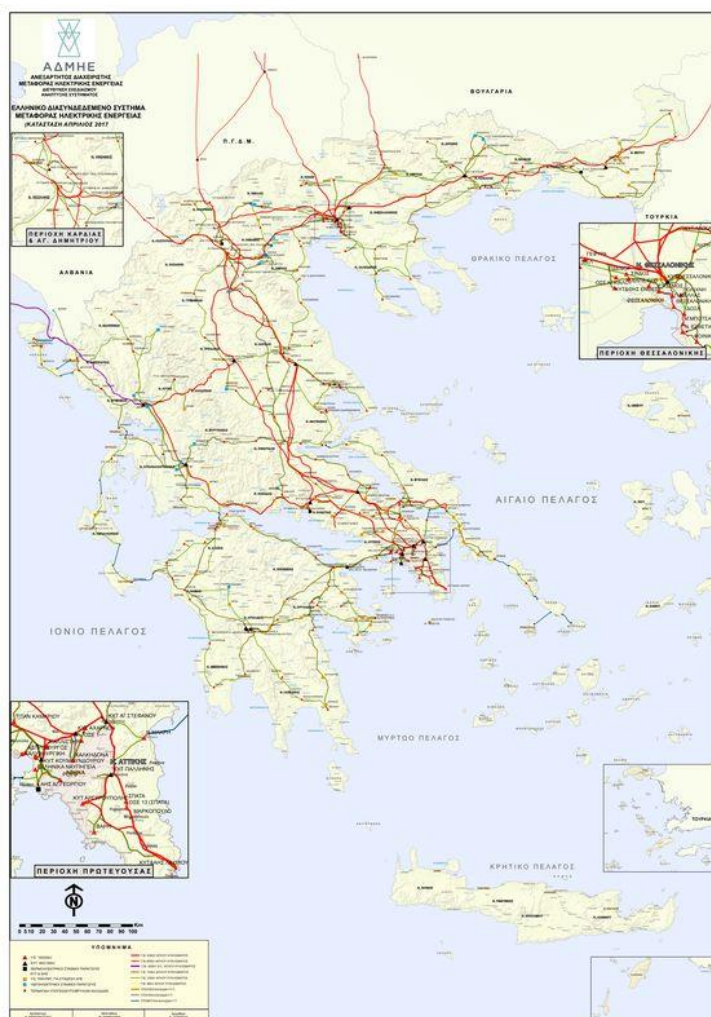
Αυτά τα ακραία φαινόμενα ενισχύουν την επιτακτική ανάγκη να αυξηθεί η ευελιξία των δικτύων και να ενισχυθεί η ασφάλεια εφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας για την καλύτερη αντιμετώπιση έκτακτων αναγκών. Εξίσου σημαντική είναι η ενσωμάτωση περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο [4].

## Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το δίκτυο μεταφοράς συνδέει τα μεγάλα και γεωγραφικά διάσπαρτα κέντρα παραγωγής με τα κέντρα ζήτησης, που βρίσκονται συνήθως κοντά σε πόλεις και βιομηχανικές περιοχές, διατηρώντας το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διασυνδεδεμένο και σε συγχρονισμένη λειτουργία. Αποτελείται από γραμμές μεταφοράς, μετασχηματιστές και υποσταθμούς. Η δομή του είναι συνήθως δικτυωτή με κάθε κόμβο του δικτύου να υποστηρίζεται από όλους τους υπόλοιπους ώστε να αποφεύγονται οι συνέπειες ενδεχόμενων βλαβών. Είναι εφοδιασμένο με εξελιγμένο εξοπλισμό μέτρησης, προστασίας και ελέγχου, ώστε η συνολική λειτουργία του συστήματος να μην τίθεται σε κίνδυνο από σφάλματα, δηλαδή βραχυκυκλώματα, κεραυνούς, σφάλματα κατανομής ή βλάβες εξοπλισμού.

Όπως και για τις περισσότερες υποδομές μεταφορών μιας χώρας (πχ, σιδηρόδρομοι, οδικά δίκτυα), η δημιουργία ανταγωνιστικών δικτύων για την παράλληλη παροχή της ίδιας υπηρεσίας δεν αποτελεί λογική κοινωνική, περιβαλλοντική ή οικονομική κίνηση

για αυτό και το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να θεωρείται ελεγχόμενο μονοπώλιο [5].



Εικόνα 2 - Χάρτης Γραμμών Μεταφοράς (Πηγή: [ΔΔΜΗΕ](#))

### Γραμμές Μεταφοράς

Οι γραμμές των δικτύων μεταφοράς αποτελούνται συνήθως από αγωγούς αλουμινίου με χαλύβδινο πυρήνα. Ο σχεδιασμός των αγωγών βασίζεται τόσο σε μηχανικές όσο και ηλεκτρικές απαιτήσεις. Η μεταφορά τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις συνεπάγεται τη λειτουργία σε υψηλή τάση για τη μείωση της έντασης ρεύματος, μειώνοντας έτσι το μέγεθος των καλωδίων, την πτώση τάσης και τις ωμικές απώλειες στις γραμμές μεταφοράς. Η διατομή των αγωγών καθορίζει το μέγιστο ρεύμα που μπορούν να μεταφέρουν, ενώ όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι απώλειες της γραμμής λόγω του φαινομένου Joule.

Οι πύργοι στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί θα πρέπει να αντέχουν το βάρος τους, διατηρώντας παράλληλα τις ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας (μεταξύ τους και με το έδαφος). Μεταξύ των αγωγών και του πύργου μεσολαβούν πάντα μονωτήρες. Συνήθως, κάθε φάση της γραμμής διαιρείται σε δύο, τρεις ή περισσότερους αγωγούς προκειμένου να μειωθούν τα φαινόμενα εκκένωσης κορώνα, δηλαδή η ρήξη της μονωτικής ικανότητας του αέρα γύρω από τους αγωγούς λόγω υψηλών ηλεκτρικών πεδίων, που προκαλούν απώλειες στη γραμμή και ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές. Σε



ορισμένες περιπτώσεις, κυρίως σε αστικές περιοχές, οι γραμμές μεταφοράς μπορεί να διέρχονται υπόγεια, όμως τέτοια συστήματα υψηλής τάσης είναι δαπανηρά και συναντώνται σπάνια.

Τέλος, είναι δυνατή και η μεταφορά ενέργειας με συνεχές ρεύμα. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται ακριβή τεχνολογία, όπως σταθμοί μετατροπής και στα δύο άκρα της γραμμής που βασίζονται σε ηλεκτρονικά ισχύος καθώς και μετασχηματιστές ισχύος για να επιτευχθεί η απαιτούμενη τάση. Υπάρχουν όμως ορισμένα πλεονεκτήματα όπως η απουσία άεργους ισχύος, χαμηλότερες απώλειες, μικρότερες πτώσεις τάσεις και η μη εξάρτηση από την συχνότητα, που έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένα προβλήματα ευστάθειας και υψηλότερη ικανότητα μεταφοράς. Τα πλεονεκτήματα αυτά καθιστούν την μεταφορά με συνεχές ρεύμα ιδανική σε περιπτώσεις όπως η μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις και με υποθαλάσσια καλώδια σε μικρότερες αποστάσεις.

### Υποσταθμοί

Οι υποσταθμοί αποτελούν κόμβο διασύνδεσης γραμμών και μετασχηματισμού για την τροφοδοσία του δικτύου διανομής, ενώ παράλληλα είναι το σημείο τοποθέτησης εξοπλισμού μέτρησης, προστασίας και διακοπής του συστήματος σε περίπτωση ανάγκης.

Συνήθως πολλαπλές γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης υποβιβάζονται σε έναν υποσταθμό, μέσω ενός μετασχηματιστή ισχύος, συνδεδεμένο με το σύστημα διανομής. Αντίστοιχα οι υποσταθμοί παραγωγής λαμβάνουν την εισερχόμενη ισχύ από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αυξάνουν την τάση και την εγχέουν στο σύστημα μεταφοράς.

### Περιορισμοί

Εάν μια γραμμή μεταφοράς συμφορηθεί είναι πολύ δύσκολο να μεταφερθεί το φορτίο της σε άλλες γραμμές. Μια διακοπή σε οποιοδήποτε στοιχείο του συστήματος μεταφοράς μπορεί στιγμιαία να αλλάξει σημαντικά τις ροές ισχύος σε πολλαπλές γραμμές και να επηρεάσει την ασφαλή λειτουργία όλου του δικτύου σε περίπτωση που αποτύχουν τα συστήματα ασφαλείας (ηλεκτρονόμοι).

## Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας διακλαδίζεται από το δίκτυο μεταφοράς μέσω των υποσταθμών και μεταφέρει την ενέργεια στους καταναλωτές χαμηλής τάσης. Σε αστικές περιοχές όπου συγκεντρώνονται υψηλές πυκνότητες φορτίου σε μικρές περιοχές, τα δίκτυα διανομής είναι συνήθως υπόγεια, με το επίπεδο αξιοπιστίας να είναι υψηλό λόγω των μικρών αποστάσεων. Σε επαρχιακές περιοχές προτιμώνται οι εναέριες γραμμές καθώς είναι λιγότερο δαπανηρές και ο διαθέσιμος χώρος δεν αποτελεί ζήτημα, όμως τα επίπεδα αξιοπιστίας είναι χαμηλότερα καθώς μειώνονται όσο αυξάνεται η απόσταση από τον υποσταθμό.

Τα δίκτυα διανομής, επειδή αποτελούνται από χιλιάδες γραμμές και διακλαδώσεις, υπόκεινται σε συχνότερες βλάβες από ότι τα δίκτυα μεταφοράς. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του δικτύου αντιπροσωπεύει μεγάλο μερίδιο του συνολικού κόστους

του συστήματος και είναι συχνά πολλαπλάσιο από το μερίδιο του δικτύου μεταφοράς. Εκτός από τη διαχείριση των πελατών και την πώληση ενέργειας σε ρυθμιζόμενους καταναλωτές, οι εταιρείες διανομής εκτελούν μια σειρά τεχνικών λειτουργιών που σχετίζονται με το δίκτυο και εμπίπτουν στους ακόλουθους γενικούς τομείς:

- Σχεδιασμός δικτύου
- Ανάπτυξη έργων και κατασκευή
- Λειτουργία και συντήρηση εγκαταστάσεων και εξοπλισμού.

## Αξιοπιστία Δικτύων

Μια αξιόπιστη δημόσια παροχή ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται εν μέρει από ένα αξιόπιστο σύστημα δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας για τη μεταφορά και τη διανομή ρεύματος από τους σταθμούς παραγωγής στους καταναλωτές. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (international Energy Agency: IEA), ως αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος ορίζεται η ικανότητα αυτού να διασφαλίζει την αδιάλειπτη διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας αντέχοντας και ανακάμπτοντας από διαταραχές και απρόοπτα. Η αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί επαρκή αριθμό μονάδων παραγωγής με ασφαλείς πηγές καυσίμων ή ενέργειας. Απαιτεί όμως και ένα αξιόπιστο σύστημα ηλεκτρικού δικτύου για να μεταφέρει την ενέργεια από τις μονάδες παραγωγής στα κέντρα ζήτησης και να τη διανέμει σε καταναλωτές [6].

Η αξιόπιστη και σταθερή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο είναι το κλειδί για την οικονομική ανάπτυξη, τη μείωση της φτώχειας και τον κοινωνικό και πολιτιστικό μετασχηματισμό κάθε χώρας. Οι τομείς της οικονομίας, όπως η βιομηχανία, η γεωργία, οι μεταφορές κ.λπ., εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία τους και επομένως οποιαδήποτε διακοπή του εφοδιασμού συνεπάγεται διακοπή αυτών των οικονομικών δραστηριοτήτων. Τέτοιου είδους διακοπές έχουν άμεσες και έμμεσες οικονομικές συνέπειες που είναι πολύ μεγαλύτερες από την αξία της ηλεκτρικής ενέργειας που δεν παρέχεται, ιδίως για μεγάλες διακοπές ρεύματος (blackout).

Το δίκτυο αντιμετωπίζει συχνές δυσλειτουργίες, που οδηγούν σε διακοπές ρεύματος οι οποίες μπορεί να είναι σε διαφορετικές χρονικές και χωρικές κλίμακες. Αυτές μπορεί να οφείλονται σε πολλούς λόγους, που κυμαίνονται από δυσλειτουργικό εξοπλισμό, κακή διαχείριση, έλλειψη επενδύσεων, καθώς και καιρικά φαινόμενα και καταστροφές. Επιπλέον, η γήρανση του εξοπλισμού, η υποχρηματοδότηση, η κακή συντήρηση και η απρογραμμάτιστη και ταχεία επέκταση των ηλεκτρικών δικτύων μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε αναξιόπιστη απόδοση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας [7].

## Αιτίες Διακοπής Παροχής Ρεύματος

### Περιβαλλοντικοί/Καιρικοί παράγοντες

Ως περιβαλλοντικοί/καιρικοί παράγοντες νοούνται ευρέως οι συνθήκες λειτουργίας υπό τις οποίες λειτουργεί (ή αναμένεται να λειτουργεί) το ηλεκτρικό σύστημα και επηρεάζουν την αξιοπιστία του δικτύου με πολλούς τρόπους. Τα καιρικά φαινόμενα όπως τυφώνες, βροχόπτωση, καταιγίδες, κεραυνοί, τα φαινόμενα El Nino/La Niña,



χιονοθύελλες, ριπές ανέμου, σεισμοί καθώς και η θερμική αγωγιμότητα και άλλα χαρακτηριστικά του εδάφους είναι οι μεγαλύτεροι παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και κυρίως τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής.

Μελέτες έχουν αποκαλύψει ότι περίπου το 56% της αναξιοπιστίας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας αποδίδεται σε καιρικές προκλήσεις. Ορισμένες μεγάλες διακοπές στην Ευρώπη και την Ασία έχουν αποδοθεί σε φυσικές καταστροφές ή τεχνικές βλάβες. Αρκετές διακοπές ρεύματος στις Φιλιππίνες ήταν αποτέλεσμα της έλλειψης επαρκούς παραγωγικής δυναμικότητας και αυτό είχε ως αποτέλεσμα η μέση διάρκεια διακοπής ρεύματος να είναι 12 ώρες την ημέρα. Επιπλέον, οι καύσωνες στην Αυστραλία τον Ιανουάριο του 2019 οδήγησαν σε εκδηλώσεις διακοπής φορτίου, ενώ στο Ηνωμένο Βασίλειο, οι έντονες καταιγίδες και οι πλημμύρες είχαν ως αποτέλεσμα διακοπές ρεύματος για δεκάδες χιλιάδες πελάτες ετησίως το 2016. Στη βορειοδυτική Αγγλία οι πλημμύρες οδήγησαν σε διακοπές ρεύματος που διήρκεσαν έως και 56 ώρες ενώ η πρωτόγνωρη βροχόπτωση που έπληξε την κεντρική Ελλάδα τον Σεπτέμβριο του 2023 είχε ως αποτέλεσμα την διακοπή ρεύματος σε πολλές περιοχές για παραπάνω από τρία εικοσιτετράωρα. Η κύρια αιτία των διακοπών ρεύματος στις αφρικανικές χώρες, για παράδειγμα στην Τανζανία και την Ουγκάντα, είναι οι συχνές αστικές πλημμύρες και η ευαισθησία στις διακυμάνσεις του νερού από τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, αντίστοιχα.

#### Τεχνικοί Παράγοντες

Πρόκειται για συμβάντα που αναμένεται να συμβούν κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος και αφορούν τεχνικούς παράγοντες όπως τα επίπεδα μόνωσης, το φορτίο του δικτύου, τα επίπεδα τάσης και ισχύος, το μήκος των γραμμών κ.α.. Βλάβες μπορούν επίσης να παρουσιαστούν και στα λογισμικά υπολογιστών που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση των δικτύων.

#### Οργανωτικοί Παράγοντες

Πρόκειται για ενέργειες διαχείρισης και συντήρησης του συστήματος και περιλαμβάνουν προγραμματισμένες και μη διακοπές για λόγους συντήρησης, ανθρώπινα λάθη, διαχείριση της βλάστησης, συχνότητα επιθεωρήσεων του συστήματος, ακατάλληλος συντονισμός συστημάτων ασφαλείας (πχ, ηλεκτρονόμων), κ.α..

#### Παράγοντες Ασφάλειας

Οι απειλές για την ασφάλεια του συστήματος συνεπάγονται σκόπιμη εχθρική δράση στο σύστημα του δικτύου, και αυτές μπορεί να είναι φυσικές επιθέσεις στο σύστημα (π.χ. εμπρησμός, δολιοφθορά και κλοπή) ή κυβερνοεπιθέσεις, αν και τέτοιου είδους φαινόμενα είναι πιο σπάνια.

#### Άλλοι Εξωτερικοί Παράγοντες

Άλλοι εξωγενείς παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την αξιοπιστία του συστήματος είναι τυχόν πολιτικές αποκοπής φορτίου (loadshedding), η αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ και η υπερβάλλουσα ζήτηση.

## Παρακολούθηση και Ανίχνευση Σφαλμάτων

Διάφορα συστήματα και μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση του δικτύου, τόσο για την πρόβλεψη όσο και για την έγκυρη ανίχνευση σφαλμάτων. Για παράδειγμα, μια μέθοδος κατανεμημένου υπολογισμού όπως περιγράφεται στο [8] μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της ευστάθειας του δικτύου σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και την ανίχνευση αλυσιδωτών αστοχιών. Οι συγγραφείς στο [9] ανέπτυξαν ένα σύστημα για την ανίχνευση των θέσεων και την παρακολούθηση βλαβών σε πραγματικό χρόνο. Δημιούργησαν τρία διαφορετικά συστήματα παρακολούθησης που επιτηρούν το ηλεκτρικό ρεύμα με αισθητήρες σε διαφορετικές θέσεις στο δίκτυο.

Οι λειτουργίες παρακολούθησης υποστηρίζονται από συστήματα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA) προκειμένου να παρακολουθείται το δίκτυο και τα στοιχεία του. Τέτοιου είδους συστήματα αποτελούνται συνήθως από το δίκτυο ελέγχου, υποδομές επικοινωνίας και ένα δίκτυο διεργασιών, ενώ είναι σε θέση να κάνουν χειροκίνητες ή απομακρυσμένες επεμβάσεις μέσω του κέντρου ελέγχου το οποίο παρέχει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Μια ακόμη λύση που χρησιμοποιείται για την αποφυγή αστάθειας και διακυμάνσεων στο δίκτυο είναι η αποκοπή φορτίου.

Πολύ σημαντική είναι η ανίχνευση της τοποθεσίας του σφάλματος για την ταχύτερη διόρθωσή του. Οι μέθοδοι εντοπισμού σφαλμάτων εφαρμόζονται στα συστήματα μεταφοράς και διανομής και χρησιμοποιούν διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες συνήθως εμπίπτουν σε μία από τις δύο κατηγορίες: προσεγγίσεις που βασίζονται σε μοντέλα και προσεγγίσεις που βασίζονται σε δεδομένα [10]. Όπως προαναφέρθηκε, τα συστήματα SCADA διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην παρακολούθηση του δικτύου αλλά και στην ανίχνευση σφαλμάτων καθώς με την μέτρηση και την επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μας επιτρέπουν να καταλάβουμε σε ποιον κλάδο του δικτύου λαμβάνει χώρα η διαταραχή. Μια ακόμη εφαρμογή τέτοιων συστημάτων είναι η ανίχνευση σφαλμάτων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, για παράδειγμα σε ανεμογεννήτριες [11].

## Ασφάλεια Εφοδιασμού & Ενεργειακές Πολιτικές στην ΕΕ

Μετά από περισσότερο από έναν αιώνα αυξανόμενης ηλεκτροδότησης, οι περισσότερες χώρες μεσαίου και υψηλού εισοδήματος έχουν καταφέρει να φτάσουν σε υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το επίτευγμα είναι το αποτέλεσμα πολύπλοκων θεσμικών πλαισίων στα οποία συχνά εμπλέκονται πολλά ιδρύματα και ενδιαφερόμενοι φορείς. Αυτά τα πλαίσια διέπουν διάφορες πτυχές, από τον σχεδιασμό της φυσικής υποδομής, τον καθορισμό των πλαισίων αγοράς και επενδύσεων, έως την ασφαλή λειτουργία του συστήματος και την ετοιμότητα για φυσικές καταστροφές.

Στα συμβατικά δίκτυα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κατανεμόμενοι σταθμοί θερμικής και υδροηλεκτρικής ενέργειας, ενώ τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ελέγχονται από έναν κεντρικό σταθμό. Πλέον όμως οι μεταβλητές ανανεώσιμες πηγές, όπως η αιολική και η ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια, έχουν γίνει φθηνότερες από την παραγωγή θερμικής ενέργειας και αυξάνουν το μερίδιό τους στην προσφορά καθώς είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και η ανάπτυξη

τους μπορεί να μειώσει τους λογαριασμούς εισαγωγής ορυκτών καυσίμων για πολλές χώρες. Αυτή η εξέλιξη είναι ευπρόσδεκτη καθώς οι χώρες επιδιώκουν να απελευθερώσουν τον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας από άνθρακα. Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά είναι ένας από τους σπάνιους τομείς τεχνολογίας που βρίσκεται σε καλό δρόμο για την επίτευξη των στόχων βιωσιμότητας. Παράλληλα, αυτές οι νέες μεταβλητές πηγές απαιτούν ευελιξία στο σύστημα για την κάλυψη της μεταβλητότητάς τους και πιο περίπλοκη πρόβλεψη των εκροών τους. Για τη διαχείριση τέτοιων πολύπλοκων συστημάτων, ο ρόλος των ψηφιακών τεχνολογιών πληροφοριών αυξάνεται εκθετικά, εκθέτοντας το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε κυβερνοαπειλές.

Σύμφωνα με πρόσφατη παγκόσμια μελέτη [12], ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας διαπιστώνει ότι θα πρέπει να προστεθούν ή να αντικατασταθούν 80 εκατομμύρια χιλιόμετρα του δικτύου έως το 2040, όσα δηλαδή είναι όλα τα δίκτυα παγκοσμίως σήμερα, για να επιτευχθούν οι εθνικοί στόχοι και να υποστηριχθεί η ενεργειακή ασφάλεια. Η έκθεση, διαπιστώνει ενδείξεις ότι τα ηλεκτρικά δίκτυα δεν συμβαδίζουν με την ταχεία ανάπτυξη των τεχνολογιών καθαρής ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και οι αντλίες θερμότητας, βάζοντας σε κίνδυνο τον στόχο περιορισμού της υπερθέρμανσης του πλανήτη στον 1,5 °C. Εντοπίζετε μια μεγάλη και αυξανόμενη ουρά έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που περιμένουν το πράσινο φως για να συνδεθούν στο δίκτυο, έργα αξίας τουλάχιστον 1,500 GW που βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης. Αυτό είναι πενταπλάσιο από το ποσό της φωτοβολταϊκής και αιολικής ισχύος που προστέθηκε παγκοσμίως πέρυσι.

Οι κυβερνήσεις και η βιομηχανία προωθούν την απαλλαγή των ενεργειακών συστημάτων από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για την επίτευξη στόχων βιωσιμότητας, όπως ο μετριασμός της κλιματικής αλλαγής. Οι περισσότερες μεγάλες διακοπές ρεύματος έχουν πολλαπλές αιτίες και, ως εκ τούτου, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής πρέπει να λαμβάνουν υπόψη πολλές διαφορετικές διαστάσεις στο θεσμικό πλαίσιο που διέπει τον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Από τη διαθεσιμότητα των καυσίμων και τους επαρκείς πόρους για την κάλυψη της ζήτησης αιχμής και περιόδων πίεσης, όπως μια απροσδόκητη διακοπή λειτουργίας του σταθμού, έως τους πόρους που απαιτούνται για τη διασφάλιση της σταθερής συμπεριφοράς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, όλες αυτές οι διαστάσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να αξιολογούνται. Ήδη από το 2016 έχει καθιερωθεί ένας νομικά δεσμευτικός κώδικας δικτύου σε όλα τα κράτη μέλη ο οποίος απαιτεί όλες οι νέες συνδέσεις στο ηλεκτρικό δίκτυο να έχουν βασικές δυνατότητες επικουρικών υπηρεσιών (ancillary services).

Η ψήφιση του λεγόμενου EU Clean Energy Package [13] είναι μια προσπάθεια αναδιάρθρωσης του θεσμικού πλαισίου για τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας της ΕΕ, συμπεριλαμβανομένης της ασφάλειας ηλεκτρικής ενέργειας, ενόψει των συνεχιζόμενων αλλαγών στο μείγμα καυσίμων και της αυξανόμενης διασυνδεσιμότητας μεταξύ των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για μια σταδιακή εξέλιξη από προηγούμενες ευρωπαϊκές νομοθετικές πρωτοβουλίες ή πακέτα για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που δημοσιεύθηκαν το 1996, το 2003 και το 2009 [14].

## Ενεργειακή Κρίση

Από το δεύτερο εξάμηνο του 2021 σημειώθηκε αύξηση των τιμών τόσο της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και του φυσικού αερίου σε επίπεδα που δεν είχαν παρατηρηθεί εδώ και δεκαετίες, με τις τιμές να μην έχουν ανακάμψει ακόμη και σήμερα. Αυτό είναι αποτέλεσμα πολυάριθμων παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων των ακραίων καιρικών φαινομένων, της αύξησης της ζήτησης που σχετίζεται με την ανάκαμψη από την πανδημία, γεωπολιτικών ζητημάτων καθώς και διακοπών στον εφοδιασμό φυσικού αερίου από την Ρωσία, τον βασικό πάροχο αερίου μέχρι τότε. Το πρόβλημα είχε γίνει τόσο έκδηλο, ώστε το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο το φθινόπωρο του 2021 το έβαλε στην ημερήσια διάταξη, υποσχόμενο στήριξη για τους πολίτες και τις μικρές επιχειρήσεις (Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, 2021). Επιπλέον, οι υπουργοί ενέργειας των κρατών μελών της ΕΕ συναντήθηκαν στα τέλη Οκτωβρίου 2021 για να συζητήσουν πιθανές λύσεις για το συνεχιζόμενο πρόβλημα, καθώς και να διερευνήσουν πώς θα αποτραπεί η επανάληψή του στο μέλλον.

Η μεγάλη εξάρτηση της ΕΕ από τις εισαγωγές ενέργειας και η ευπάθεια σε εξωτερικά προβλήματα εφοδιασμού αναδεικνύουν ένα ζήτημα ενεργειακής ασφάλειας. Η εγχώρια παραγωγή υδρογονανθράκων μειώνεται, ενώ η εξάρτηση από τις εισαγωγές αυξάνεται, καθιστώντας την πιο ευάλωτη σε εξωτερικές διαταραχές. Η Ευρωπαϊκή Ένωση άρχισε να αναπτύσσει την ενεργειακή της πολιτική στα τέλη της δεκαετίας του 1980, με κανόνες για μια ανταγωνιστική και δίκαιη εσωτερική αγορά ενέργειας να αναδύονται τις επόμενες δύο δεκαετίες. Η κρίση αυτή ωστόσο έδειξε ότι τα υφιστάμενα μέτρα δεν μπορούν να προστατεύσουν τις χώρες της ΕΕ από ενεργειακές αιχμές ή διακοπές εφοδιασμού που επιβαρύνουν την ευρωπαϊκή οικονομία, ειδικά όταν συνδυάζονται με τις συνέπειες της πανδημίας COVID-19. Παρόλο που οι ΑΠΕ συμβάλλουν στην εγχώρια παραγωγή ενέργειας, η ενεργειακή μετάβαση απέχει πολύ από την ολοκλήρωση, πράγμα που σημαίνει ότι αυτή τη στιγμή, σε πολλές περιπτώσεις δεν υπάρχουν βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις στα ορυκτά καύσιμα (ειδικά στη βαριά βιομηχανία).

## Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν γίνει μια σημαντική επιλογή για την επίλυση της ενεργειακής κρίσης και των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Μια βιώσιμη ανάπτυξη χρειάζεται στρατηγικές πολιτικές οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση και να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Το 2023 για πρώτη φορά το 30% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας παράχθηκε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [15], λόγω της ανάπτυξης της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας. Με ρεκόρ κατασκευής ηλιακής και αιολικής ενέργειας τον περασμένο χρόνο, μια νέα εποχή πτώσης της παραγωγής με ορυκτά καύσιμα είναι επικείμενη.

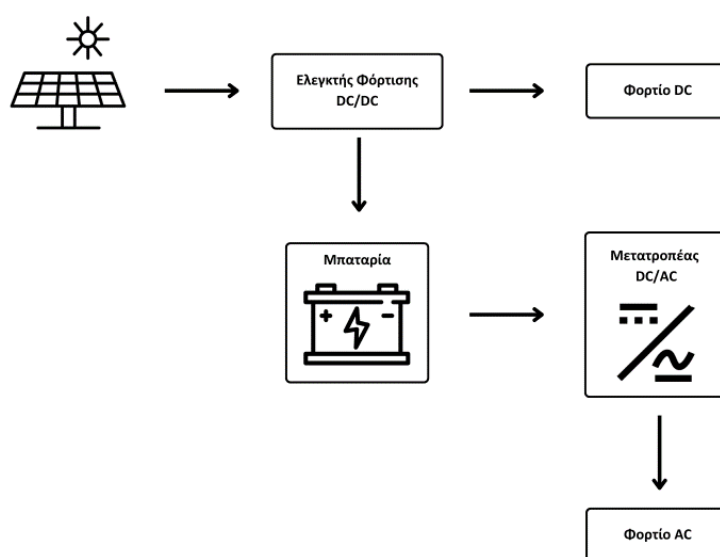
Η έρευνα για τα συστήματα 100% ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι σχετικά πρόσφατο φαινόμενο. Ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1970, με αφορμή την εκτόξευση των τιμών του πετρελαίου. Από τα μέσα της δεκαετίας του 2000, εξελίχθηκε γρήγορα σε ένα σημαντικό ερευνητικό πεδίο που περιλαμβάνει έναν εκτεταμένο και αυξανόμενο αριθμό ερευνητικών ομάδων και οργανισμών σε όλο τον κόσμο.

Προηγμένες έννοιες και μέθοδοι επιτρέπουν πλέον στον τομέα αυτό να χαράξει βελτιστοποιημένες και αποτελεσματικές διαδρομές μετάβασης προς ένα μέλλον χωρίς τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Η ηλιακή και η αιολική ενέργεια αναδεικνύονται όλο και περισσότερο ως οι κεντρικοί πυλώνες ενός βιώσιμου ενεργειακού συστήματος, σε συνδυασμό με μέτρα ενεργειακής αποδοτικότητας.

### Ηλιακή Ενέργεια & Φωτοβολταϊκά

Η ηλιακή ενέργεια είναι η ακτινοβολούμενη ενέργεια ιονισμού που εκπέμπεται από τον ήλιο. Χρησιμοποιείται παγκοσμίως σε πολύ μεγάλο βαθμό, ενώ παράλληλα διεξάγονται συνεχώς καινούριες έρευνες προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός και η απόδοση τέτοιων συστημάτων. Η επιφάνεια της γης δέχεται  $1366 \text{ W/m}^2$  άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία μειώνεται μέσω της ατμόσφαιρας σε μια μέγιστη κανονική επιφανειακή ακτινοβολία περίπου  $1000 \text{ W/m}^2$  στο επίπεδο της θάλασσας μια καθαρή ημέρα. Αυτό καθιστά τον ήλιο ως μια τεράστια, αξιόπιστη πηγή παραγωγής ενέργειας με τεράστιο περιβαλλοντικό πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών μέσων παραγωγής.

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται συνήθως από συστοιχίες και συνδυασμούς φωτοβολταϊκών πλαισίων, έναν ελεγκτή φόρτισης (DC προς DC), έναν μετατροπέα DC προς AC, έναν μετατροπέα ισχύος και συχνά από μία, ή περισσότερες αναλόγως του μεγέθους του συστήματος, μπαταρίες αποθήκευσης.



Εικόνα 3 - Σχηματική Αναπαράσταση Λειτουργίας ενός Φωτοβολταϊκού Συστήματος

Γενικά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι γνωστά για τις χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και δεν απαιτούν ορυκτά καύσιμα για τη λειτουργία τους. Ωστόσο, οι διαδικασίες μεταφοράς, εγκατάστασης και απόρριψης των φωτοβολταϊκών μονάδων συνεπάγονται σημαντική κατανάλωση ενέργειας και άλλες επιβλαβείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις που δεν πρέπει να αγνοούνται. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φωτοβολταϊκών τεχνολογιών και διαφέρουν ως προς τα υλικά, τις διαδικασίες κατασκευής και τις ηλεκτρικές προδιαγραφές.

### Ενσωμάτωση στο δίκτυο

Η ενσωμάτωση ηλιακών φωτοβολταϊκών στο δίκτυο θέτει πολλές λειτουργικές, τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις όπως η ακριβής πρόβλεψη ισχύος εξόδου, η τάση, η συχνότητα, η έγχυση αρμονικών και η ικανότητα αντιμετώπισης σφαλμάτων του συστήματος. Άλλες προκλήσεις περιλαμβάνουν την αναβάθμιση των συστημάτων προστασίας των παραδοσιακών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, τη διαχείριση της συμφόρησης της μεταφοράς, τη διείσδυση στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και κοινωνικοοικονομικά και περιβαλλοντικά ζητήματα λόγω της ενσωμάτωσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων στα δίκτυα.

Ένας τρόπος επίλυσης τέτοιων προκλήσεων είναι η θέσπιση κωδικών διαχείρισης του δικτύου (grid codes). Πρόκειται για τεχνικές προδιαγραφές που εξασφαλίζουν την ασφαλή, αξιόπιστη και οικονομική λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου, ενώ είναι υπεύθυνες για την παρακολούθηση της ακεραιότητας και της λειτουργίας του σχεδιασμού του. Το περιεχόμενων των κωδικών διαχείρισης διαφέρει από χώρα σε χώρα και υπαγορεύει την ενσωμάτωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο από ανανεώσιμες όσο και από συμβατικές πηγές, στα εθνικά δίκτυα ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητα και η ασφάλεια του. Ως εκ τούτου, οι παραγωγοί ενέργειας θα πρέπει να συμμορφώνονται με τους διαθέσιμους κώδικες, συμπεριλαμβανομένων των απαιτήσεων για τη συχνότητα και τη μεταβολή της τάσης του δικτύου, την αντιμετώπιση σφαλμάτων, την άεργο ισχύ και τις δυνατότητες ρύθμισης του συντελεστή ισχύος.

Για την εξομάλυνση των διακυμάνσεων ισχύος που εισάγουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα στο δίκτυο χρησιμοποιούνται επίσης προηγμένες τεχνικές ελέγχου όπως η γεωγραφική διασπορά, η ανάλυση κύριων συστατικών, το ασαφές φιλτράρισμα κυματιδίων, νευρωνικά δίκτυα κ.α.. Ο έλεγχος τάσης γίνεται είτε με κεντρικά είτε με αποκεντρωμένα συστήματα όπως έλεγχος volt-watt ή volt-var, έλεγχος άεργου ισχύος και περικοπή ενεργού ισχύος. Παρομοίως, πολλές στρατηγικές ελέγχου έχουν προταθεί για τη βέλτιστη κατανομή άεργου ισχύος καθώς επηρεάζει σημαντικά πολλές παραμέτρους του δικτύου. Τέτοιες στρατηγικές μπορούν να ταξινομηθούν σε γραφικές, αναλυτικές, αριθμητικές και δυναμικές μεθόδους προγραμματισμού και χρήση ελεγκτών PI [16].

Τέλος, σημαντικό ρόλο στην ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων, αλλά και άλλων διακοπτόμενων ΑΠΕ, στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι η ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας τα οποία μειώνουν την ζήτηση φορτίου αιχμής και τις τιμές ρεύματος σε ανταγωνιστικές αγορές.

### Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια παραμένει η μεγαλύτερη πηγή καθαρής ενέργειας παγκοσμίως, ενώ το 2023 το 14% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προήλθε από υδροηλεκτρικές πηγές [15]. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί συμβάλλουν σημαντικά στην ευελιξία και την ασφάλεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς μπορούν να αυξάνουν και να μειώνουν την παραγωγή τους πολύ γρήγορα σε σχέση με άλλους σταθμούς όπως οι πυρηνικοί, λιγνιτικοί και φυσικού αερίου, ενώ μπορούν να σταματήσουν και να επανεκκινήσουν σχετικά ομαλά. Αυτός ο υψηλός βαθμός ευελιξίας τους επιτρέπει να προσαρμόζονται γρήγορα στις μεταβολές της



ζήτησης και να αντισταθμίζουν τις διακυμάνσεις της προσφοράς από άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό καθιστά την υδροηλεκτρική ενέργεια μια ελκυστική επιλογή για την υποστήριξη της ταχείας ανάπτυξης και της ασφαλούς ενσωμάτωσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών και αιολικών, των οποίων η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες και η ώρα της ημέρας ή του έτους.

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση ποικίλα χαρακτηριστικά όπως ο τρόπος κατασκευής, η δυνατότητα αποθήκευσης, η εγκατεστημένη ισχύς, η διάταξη τους, το ύψος υδατόπτωσης κ.α.. Οι πιο διαδεδομένοι τύποι με κριτήριο το είδος κατασκευής είναι οι εξής:

- Υδροηλεκτρικές μονάδες με ταμιευτήρα: περιλαμβάνουν την κατασκευή φράγματος σε ποτάμι, δημιουργώντας έναν μεγάλο ταμιευτήρα στον οποίο αποθηκεύεται το νερό και στην συνέχεια απελευθερώνεται μέσω στροβίλων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όταν υπάρχει ζήτηση.
- Υδροηλεκτρικές μονάδες συνεχούς ροής: εκτρέπουν ένα μέρος της φυσικής ροής του ποταμού μέσω ενός καναλιού ή σωλήνα προς τους στροβίλους. Δεν απαιτούν τη χρήση μεγάλων ταμιευτήρων και είναι συνήθως μονάδες με μικρότερη ισχύ.
- Υδροηλεκτρικές μονάδες αντλησιοταμίευσης: αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια αντλώντας νερό από έναν κατώτερο ταμιευτήρα σε έναν ανώτερο σε περίοδο χαμηλής ζήτησης και στη συνέχεια απελευθερώνεται μέσω στροβίλων όταν αυξάνεται η ζήτηση φορτίου.

#### Ενσωμάτωση στο δίκτυο

Παρόλα τα πολλά πλεονεκτήματα των υδροηλεκτρικών σταθμών υπάρχουν και αρκετές προκλήσεις όσον αφορά την ενσωμάτωση τους στα ηλεκτρικά δίκτυα. Αρχικά, η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν να παράγουν εξαρτάται άμεσα από τη διαθεσιμότητα νερού η οποία μπορεί να αυξομειώνεται εποχιακά και ετησίως. Οι ξηρασίες ή οι παρατεταμένες ξηρές περιόδους, που έχουν αυξηθεί σε ένταση τα τελευταία χρόνια λόγω της κλιματικής αλλαγής, μειώνουν σημαντικά την παραγωγή τους θέτοντας θέματα αξιοπιστίας και ασφάλειας παροχής.

Κοινωνικό-οικονομικές ανησυχίες προκύπτουν στις τοπικές κοινότητες στις τοποθεσίες κατασκευής μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών και κυρίως φραγμάτων, καθώς μπορούν να εκτοπίσουν μέρος του πληθυσμού. Παράλληλα η άνοδος της στάθμης των υδάτων επηρεάζει τις υπάρχουσες υποδομές ενώ αυξάνεται ο θόρυβος και η κυκλοφορία της περιοχής. Είναι λοιπόν απαραίτητη η αυστηρή διαβούλευση και η συμφωνία με τις τοπικές κοινότητες για να εξασφαλιστεί η δίκαιη αποζημίωση των πληθυσμών που επηρεάζονται.

Παρόλο που η υδροηλεκτρική ενέργεια πρόκειται για μια καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, σχετίζεται και με πολύπλοκα περιβαλλοντικά ζητήματα. Τα φράγματα μπορούν να εμποδίσουν την ελεύθερη ροή του νερού, δημιουργώντας τεχνητές λίμνες ή λίμνες που μεταβάλλουν τον όγκο και τα επίπεδα του νερού, ενώ οι κύκλοι λειτουργίας ενός εργοστασίου μπορούν να μεταβάλουν τη θερμοκρασία, τη χημεία και την ποιότητα του νερού. Όλα αυτά μπορεί να διαταράξουν τη φυσική

κατανομή των ιζημάτων, διαταράσσοντας τη μετανάστευση των ζώων, βλάπτοντας τα τοπικά οικοσυστήματα και επηρεάζοντας τη βιοποικιλότητα.

Η αντιμετώπιση των πολυάριθμων προβλημάτων που σχετίζονται με την υδροηλεκτρική ενέργεια απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση που αναλύει ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός έργου. Οι κατασκευαστές υδροηλεκτρικών έργων, μαζί με τις κυβερνήσεις και διεθνείς οργανισμούς, έχουν αναγνωρίσει την ανάγκη αντιμετώπισης των προβλημάτων βιωσιμότητας κατά την υλοποίηση νέων υδροηλεκτρικών έργων και, ως εκ τούτου, έχουν δημιουργήσει πρότυπα που συμβάλλουν στην καθοδήγηση της βιώσιμης ανάπτυξης [17].

### Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η διαλείπουσα φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και οι διακυμάνσεις της ισχύος αυξάνουν την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και της λειτουργίας του δικτύου ενισχύοντας την ανάγκη για προηγμένη τεχνολογία συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Τα συστήματα αποθήκευσης μπορούν να απορροφήσουν την ενέργεια όταν η παραγωγή υπερβαίνει το φορτίο και να τροφοδοτήσουν το δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής.

Σήμερα, διερευνώνται διάφοροι τύποι εφαρμογών αποθήκευσης, οι περισσότερες από αυτές με απώτερο στόχο τη μείωση του κόστους καθώς και τη διασφάλιση της μακροζωίας. Ένας άλλος απώτερος στόχος των ερευνητών είναι επίσης να διασφαλιστεί ότι οι εν λόγω συσκευές αποθήκευσης δεν επηρεάζουν αρνητικά το περιβάλλον. Το κύριο ζήτημα ωστόσο που επηρεάζει τη χρήση των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας έχει να κάνει με το αρχικό κεφάλαιο που απαιτείται και το κόστος λειτουργίας του συστήματος.

Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν σε συστήματα μηχανικής αποθήκευσης, ηλεκτροχημικά συστήματα, συστήματα χημικής αποθήκευσης και συστήματα θερμικής αποθήκευσης. Η μορφή της ενέργειας που αποθηκεύεται καθορίζει τον τύπο της συσκευής αποθήκευσης που είναι κατάλληλος για την εφαρμογή.

### Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία είναι τα πιο κοινά και διαδεδομένα παγκοσμίως. Η αποθήκευση ενέργειας γίνεται σε ηλεκτροχημική μορφή, η οποία αποτελείται από πολλαπλά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα για να παράγουν την επιθυμητή τάση και χωρητικότητα. Οι κυψέλες των μπαταριών αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια αγωγών και έναν ηλεκτρολύτη, που συνδέονται μεταξύ τους σε ένα σφραγισμένο δοχείο και συνδέονται με μια εξωτερική πηγή ή φορτίο. Η χημική αντίδραση περιλαμβάνει μεταφορά ηλεκτρονίων μεταξύ δύο ηλεκτροδίων, με όλα τα ηλεκτρόνια να κινούνται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος/φορτίου [18]. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες αποτελούνται συχνά από μπαταρίες, συστήματα ελέγχου και συστήματα κλιματισμού ισχύος (CPCS), σε συνδυασμό με μια εγκατάσταση που εξασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία ολόκληρου του συστήματος.



## Διανεμημένη Παραγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών διανεμημένης παραγωγής σε διάφορες μορφές και δυναμικότητες αναδιαμορφώνει σημαντικά τον συμβατικό σχεδιασμό των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) ορίζει τη διανεμημένη παραγωγή (ΔΠ) ως μια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέεται απευθείας στο δίκτυο διανομής για την τροφοδότηση ενός τοπικού καταναλωτή και την υποστήριξη του δικτύου. Οι τεχνολογίες ΔΠ βασίζονται συνήθως σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. ανεμογεννήτριες, ηλιακά φωτοβολταϊκά, μικρο-υδρογεννήτριες και γεννήτριες βιομάζας) αλλά και σε πηγές ενέργειας από ορυκτά καύσιμα (π.χ. μικρές τουρμπίνες αερίου, μηχανές εσωτερικής καύσης και μικροτουρμπίνες).

Τα πολλαπλά πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι τεχνολογίες ΔΠ ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν να διακριθούν σε τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά. Τα τεχνικά οφέλη περιλαμβάνουν την ενίσχυση του δικτύου, τη μείωση των απωλειών ισχύος, την αξιοπιστία, τη σταθερότητα της τάσης, τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος και την ασφάλεια εφοδιασμού- τα οικονομικά οφέλη περιλαμβάνουν τη μείωση του κόστους λειτουργίας της μεταφοράς και της διανομής, τη μείωση του κόστους εκπομπών και την εξοικονόμηση κόστους ορυκτών καυσίμων- και, τέλος, τα περιβαλλοντικά οφέλη περιλαμβάνουν τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τη διατήρηση των φυσικών πόρων.

Παρά τα διάφορα οφέλη που προσφέρει η ΔΠ, εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετές οικονομικές και τεχνικές προκλήσεις για την ενσωμάτωσή τους στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα βασικότερα προβλήματα που μπορούν να επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία του δικτύου διανομής είναι:

- Αντίστροφη ροή ισχύος
- Ανύψωση τάσης
- Υπερθέρμανση γραμμών διανομής

Κρίνεται λοιπόν απαραίτητος ο έλεγχος των μονάδων διανεμημένης παραγωγής ώστε να υποστηρίζουν το δίκτυο διανομής. Ο έλεγχος πραγματοποιείται κυρίως με την χρήση ηλεκτρονικών ισχύος αλλά και των αντιστροφών που υπάρχουν στις περισσότερες μονάδες ΔΠ [19].

# 3<sup>ο</sup>

## Κεφάλαιο

---

### Έξυπνα Δίκτυα

Η έννοια του έξυπνου δικτύου προέκυψε ως απάντηση στην αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και στους περιορισμούς των συμβατικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας όπως αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μετάβαση από τα παραδοσιακά δίκτυα σε έξυπνα δίκτυα άρχισε στις αρχές του 21ου αιώνα, διευκολυνόμενη από τις εξελίξεις στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών επικοινωνιών. Αυτή η μετατόπιση απαιτούσε πιο εξελιγμένα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου, μετατρέποντας το δίκτυο από ένα συγκεντρωτικό σε ένα πιο καταναμημένο σύστημα ικανό να χειρίζεται αμφίδρομες ροές ενέργειας.

Η ενσωμάτωση της ψηφιακής τεχνολογίας επέτρεψε την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών κοινής ωφέλειας και των καταναλωτών, ενισχύοντας την ανταπόκριση και την αποτελεσματικότητα των ηλεκτρικών δικτύων. Προηγμένες υποδομές μέτρησης και τεχνολογίες αυτοματισμού προώθησαν και βελτίωσαν σημαντικά την αξιοπιστία των έξυπνων δικτύων. Οι καινοτομίες αυτές όχι μόνο υποστήριξαν την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά βελτίωσαν και την διαχείριση των ηλεκτρικών δικτύων μέσω της δυνατότητας παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο.

### Βασικά στοιχεία ενός έξυπνου δικτύου

#### Έξυπνοι μετρητές

Οι έξυπνοι μετρητές αποτελούν βασικό στοιχείο των έξυπνων δικτύων, επιτρέποντας τη λεπτομερή παρακολούθηση και διαχείριση της χρήσης ενέργειας. Οι συσκευές αυτές καταγράφουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, φυσικού αερίου ή νερού και κοινοποιούν τα δεδομένα αυτά για σκοπούς παρακολούθησης και τιμολόγησης. Παρέχουν σχεδόν σε πραγματικό χρόνο ανατροφοδότηση σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας, επιτρέποντας στους καταναλωτές να προσαρμόζουν τη χρήση ενέργειας με βάση τις ποικίλες τιμές ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η

δυνατότητα αυτή όχι μόνο βοηθά στην εξοικονόμηση ενέργειας αλλά υποστηρίζει επίσης τη συμμετοχή των καταναλωτών σε ενεργειακές κοινότητες και σχήματα κοινής χρήσης ενέργειας. Επιπλέον, οι έξυπνοι μετρητές διευκολύνουν την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με τη διαχείριση των διακυμάνσεων στην παροχή ενέργειας, γεγονός ζωτικής σημασίας για την προσαρμογή νέων φορτίων ηλεκτρικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα οι αντλίες θερμότητας και τα ηλεκτρικά οχήματα [20].

#### Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Τα έξυπνα δίκτυα είναι ικανά να προσαρμόζονται στη μεταβλητή φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Με την αυτόματη παρακολούθηση και προσαρμογή στις μεταβολές της προσφοράς και της ζήτησης ενέργειας, τα έξυπνα δίκτυα εξασφαλίζουν ένα σταθερό και αποδοτικό ενεργειακό σύστημα. Αυτή η προσαρμοστικότητα είναι απαραίτητη για την ενσωμάτωση αυξανόμενων ποσοτήτων ανανεώσιμης ενέργειας, υποστηρίζοντας έτσι μια βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση και μειώνοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.

#### Προηγμένες τεχνικές ελέγχου

Οι προηγμένες τεχνικές ελέγχου είναι απαραίτητες για το σύγχρονο δίκτυο, καθώς περιλαμβάνουν εξελιγμένες συσκευές και αλγορίθμους που αναλύουν, εντοπίζουν και προβλέπουν τις ακριβείς συνθήκες του δικτύου για την αποφυγή διακοπών και τη διατήρηση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιου είδους τεχνικές βασίζονται σε υποδομές επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας για την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων που είναι απαραίτητα για την ανάλυση του συστήματος. Οι τεχνολογίες ελέγχου αποτελούνται από κατανεμημένους ευφυείς πράκτορες, αναλυτικά εργαλεία και προηγμένες εφαρμογές λογισμικού, ενισχύοντας τη διαχείριση και την αποδοτικότητα του δικτύου. Το μέλλον των προηγμένων τεχνικών ελέγχου περιλαμβάνει αυτόνομες ενέργειες για την αντιμετώπιση βλαβών του συστήματος και την παροχή πολύτιμων δεδομένων για άλλες διαδικασίες σε επίπεδο επιχείρησης. Η ενσωμάτωση αυτή είναι ζωτικής σημασίας για τη συνεχή ανάπτυξη και εξέλιξη των δυνατοτήτων των έξυπνων δικτύων, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία και την ασφάλεια στη διανομή ενέργειας.

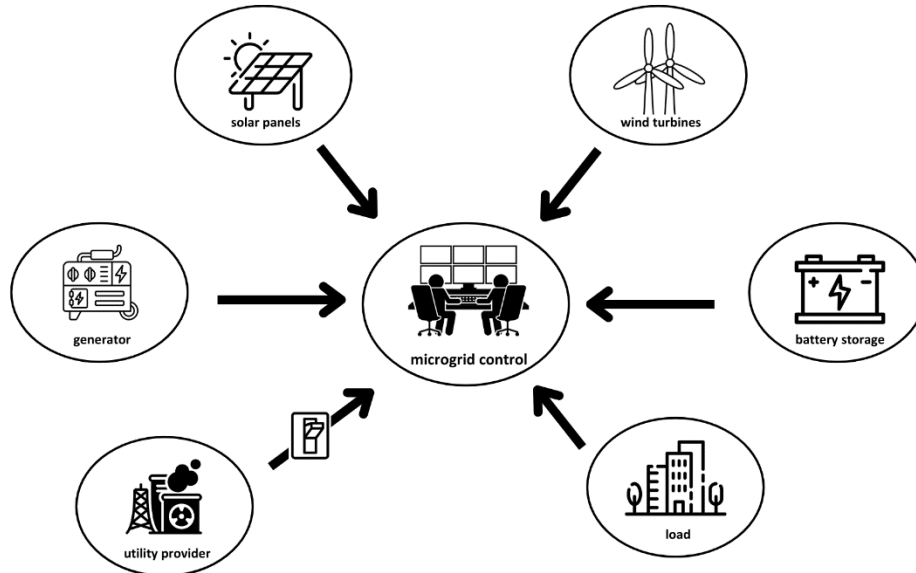
#### Προβλήματα ασφάλειας

Τα έξυπνα δίκτυα προσφέρουν πολλά οφέλη, φέρουν όμως και νέες προκλήσεις ασφαλείας. Λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας και συνδεσιμότητας τους, τα έξυπνα δίκτυα είναι ευάλωτα σε διάφορες απειλές στον κυβερνοχώρο που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα και τη διαθεσιμότητα του δικτύου. Για την πρόληψη και την αντιμετώπιση τέτοιων απειλών είναι απαραίτητα ισχυρά μέτρα κυβερνοασφάλειας. Τέτοια μέτρα περιλαμβάνουν μηχανισμούς ελέγχου ταυτότητας, προστασία από κακόβουλα λογισμικά, συστήματα ανίχνευσης και πρόληψης εισβολών και τακτικές αξιολογήσεις ευπάθειας.

#### Μικροδίκτυα

Αν και υπάρχουν διάφοροι ορισμοί στην βιβλιογραφία για τα μικροδίκτυα, ένας ευρέως διαδεδομένος ορισμός ο οποίος αναπτύχθηκε για το υπουργείο ενέργειας των ΗΠΑ έχει ως εξής:

«Ένα μικροδίκτυο είναι μια ομάδα διασυνδεδεμένων φορτίων και διανεμημένων ενεργειακών πόρων εντός σαφώς καθορισμένων ηλεκτρικών ορίων που ενεργεί ως ενιαία ελεγχόμενη οντότητα σε σχέση με το δίκτυο. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να συνδεθεί και να αποσυνδεθεί από το δίκτυο, ώστε να μπορεί να λειτουργεί τόσο σε λειτουργία συνδεδεμένη με το δίκτυο όσο και σε λειτουργία νησίδας»



Εικόνα 4 - Σχηματική Αναπαράσταση Μικροδικτύου

Αυτή η περιγραφή περιλαμβάνει τρεις απαιτήσεις:

- 1) ότι είναι δυνατόν να αναγνωριστεί το τμήμα του συστήματος διανομής που περιλαμβάνει ένα μικροδίκτυο ως διακριτό από το υπόλοιπο σύστημα
- 2) ότι οι πόροι που συνδέονται σε ένα μικροδίκτυο ελέγχονται σε συνεννόηση μεταξύ τους και όχι με απομακρυσμένους πόρους
- 3) ότι το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα από το αν είναι συνδεδεμένο ή όχι με το ευρύτερο δίκτυο.

Ο ορισμός δεν αναφέρει τίποτα σχετικά με το μέγεθος των διανεμημένων ενεργειακών πόρων ή τους τύπους των τεχνολογιών που μπορούν ή πρέπει να χρησιμοποιηθούν.

### Χαρακτηριστικά μικροδικτύων

#### Επιλογές παραγωγής και αποθήκευσης

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία όσον αφορά τους διανεμημένους ενεργειακούς πόρους που μπορούν να αναπτυχθούν σε μικροδίκτυα. Ορισμένα παραδείγματα των διαθέσιμων επιλογών για την παραγωγή και την αποθήκευση, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 1 - Διαθέσιμες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μικροδίκτυα, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

### Τεχνολογίες Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<b>Στρεφόμενες μηχανές εσωτερικής καύσης ντίζελ και ανάφλεξης με σπινθήρα</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ελεγχόμενες (dispatchable)</li> <li>• Γρήγορη εκκίνηση</li> <li>• Ακολουθούν το φορτίο</li> <li>• Δυνατότητα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εκπομπές οξειδίων του αζώτου και σωματιδίων</li> <li>• Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου</li> <li>• Θορυβώδης</li> </ul>
<b>Μικροτουρμπίνες</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ελεγχόμενες (dispatchable)</li> <li>• Πολλαπλές επιλογές καυσίμων</li> <li>• Χαμηλές εκπομπές</li> <li>• Μηχανική απλότητα</li> <li>• Δυνατότητα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου</li> </ul>
<b>Κυψέλες καυσίμου (στερεού οξειδίου, λιωμένου ανθρακικού οξέως, αλκαλικών κ.α.)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ελεγχόμενες (dispatchable)</li> <li>• Μηδενική τοπική ρύπανση</li> <li>• Δυνατότητα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP)</li> <li>• Υψηλότερη απόδοση έναντι των μικροτουρμπινών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ακριβή τεχνολογία</li> <li>• Περιορισμένη διάρκεια ζωής</li> </ul>
<b>Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία, μικρές ανεμογεννήτριες, μίνι υδροηλεκτρικά)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μηδενικό κόστος καυσίμου</li> <li>• Μηδενικές εκπομπές</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δεν υπάρχει δυνατότητα προγραμματισμού διανομής χωρίς αποθήκευση</li> <li>• Μεταβλητές και μη ελεγχόμενες</li> </ul>

### Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<b>Μπαταρίες (οξέος μολύβδου, θείου νατρίου, ιόντων λιθίου κ.α.)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μακρά ιστορία έρευνας και ανάπτυξης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Περιορισμένος αριθμός κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης</li> <li>Διαχείριση απορριμμάτων</li> </ul>
<b>Μπαταρίες ροής (flow batteries) γνωστές και ως αναγεννητικές κυψέλες καυσίμου</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Αποσύνδεση ισχύος και αποθήκευση ενέργειας</li> <li>Δυνατότητα υποστήριξης συνεχούς λειτουργίας με μέγιστο φορτίο και πλήρη εκφόρτιση χωρίς κίνδυνο ζημιάς</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Σχετικά πρώιμο στάδιο ανάπτυξης</li> </ul>
<b>Υδρογόνο μέσω υδρολύσης</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ανανεώσιμη και καθαρή μορφή ενέργειας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Σχετικά χαμηλή αποδοτικότητα</li> <li>Σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης υποδομών αποθήκευσης υδρογόνου</li> </ul>
<b>Αποθήκευση κινητικής ενέργειας (βολάν)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Γρήγορη ανταπόκριση</li> <li>Υψηλοί κύκλοι φόρτισης – εκφόρτισης</li> <li>Υψηλή απόδοση</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Περιορισμένος χρόνος εκφόρτισης</li> </ul>

#### Ηλεκτρονικά ισχύος

Τα μικροδίκτυα συχνά περιλαμβάνουν τεχνολογίες που απαιτούν ηλεκτρονικά ισχύος όπως μετατροπείς DC/AC (πχ. φωτοβολταϊκά) για διασύνδεση με το ηλεκτρικό σύστημα. Τέτοιου είδους μετατροπείς διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της συχνότητας και της τάσης σε νησιδοποιημένα μικροδίκτυα καθώς και στην εκκίνηση του συστήματος έπειτα από μπλακάουτ (black start).

Η διεπαφή του μικροδικτύου με το κύριο δίκτυο μπορεί να είναι μια σύγχρονη σύνδεση AC ή μια ασύγχρονη σύνδεση με τη χρήση ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Η πρώτη προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα της απλότητας, ενώ η δεύτερη απομονώνει το μικροδίκτυο από το δίκτυο κοινής ωφέλειας όσον αφορά την ποιότητα ισχύος (συχνότητα, τάση, αρμονικές) και είναι συμβατή με στρατηγικές μικροδικτύων που

χρησιμοποιούν μόνο DC. Δεδομένου ότι οι περισσότερες διανεμημένες ενεργειακές πηγές (συμπεριλαμβανομένων των κυψελών καυσίμου, των φωτοβολταϊκών και των μπαταριών) παρέχουν ή αποδέχονται DC ρεύμα, και πολλά τελικά φορτία συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών ισχύος, του φωτισμού και των συστημάτων θέρμανσης, αερισμού και κλιματισμού, χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα εσωτερικά, έχουν προταθεί μικροδίκτυα αποκλειστικά με DC για να αποφευχθούν οι απώλειες από τη μετατροπή μεταξύ DC και AC (και συχνά πάλι πίσω σε DC) [21]. Αυτές οι απώλειες μπορούν να σπαταλήσουν από 5% έως 15% της παραγόμενης ισχύος, ανάλογα με τον αριθμό των μετατροπών. Επιπλέον, με τη χρήση συστημάτων DC τα σφάλματα μπορούν να απομονωθούν με διόδους ενώ εξαλείφονται τα θέματα συγχρονισμού, αρμονικών παραμορφώσεων και ρευμάτων αντίδρασης. Τέλος, μια αρχιτεκτονική βασισμένη σε DC, μη συγχρονισμένη με το δίκτυο, απλοποιεί τη διασύνδεση με το δίκτυο AC και επιτρέπει την εύκολη προσθήκη στοιχείων στο μικροδίκτυο χωρίς την ανάγκη σημαντικού επανασχεδιασμού.

### Κίνητρα ανάπτυξης

Οι παράγοντες που οδηγούν την ανάπτυξη και την εγκατάσταση μικροδικτύων σε τοποθεσίες με υπάρχουσα υποδομή ηλεκτρικού δικτύου εμπίπτουν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: ενεργειακή ασφάλεια, οικονομικά οφέλη και ενσωμάτωση καθαρής ενέργειας.

#### Ενεργειακή ασφάλεια

Τα ακραία καιρικά φαινόμενα γίνονται πιο συχνά και πιο έντονα λόγω της κλιματικής αλλαγής, κάνοντας επιτακτική την ανάγκη για πιο ανθεκτικά δίκτυα. Τα μικροδίκτυα μπορούν να παρέχουν ενέργεια σε σημαντικές εγκαταστάσεις και κοινότητες χρησιμοποιώντας στοιχεία διανεμημένης παραγωγής όταν σταματάει η λειτουργία του κύριου δικτύου. Επίσης, καθώς τα ηλεκτρικά δίκτυα λειτουργούν κοντά σε κρίσιμη χωρητικότητα, ένα φαινομενικά μικρό πρόβλημα σε ένα μέρος του συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε ένα φαινόμενο ντόμινο που καταλήγει σε καταστροφές σε ένα ολόκληρο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα μικροδίκτυα μετριάζουν αυτόν τον κίνδυνο τμηματοποιώντας το δίκτυο σε μικρότερες λειτουργικές μονάδες που μπορούν να απομονωθούν και να λειτουργήσουν αυτόνομα εάν χρειαστεί.

#### Οικονομικά οφέλη

Τα μικροδίκτυα προσφέρουν σημαντικά οικονομικά οφέλη με ποικίλους τρόπους. Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνεπάγεται μείωση κόστους καυσίμων αλλά και αύξηση της αξιοπιστίας και την ανθεκτικότητας, εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη παροχή ενέργειας. Τα καινοτόμα συστήματα διαχείρισης οδηγούν σε αυξημένη απόδοση ενώ μειώνεται το κόστος μεγάλων επενδύσεων που απαιτούνται για τη κατασκευή και συντήρηση μεγάλων υποδομών και κεντρικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.

#### Ενσωμάτωση καθαρής ενέργειας

Σημαντικές πηγές καθαρής ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά και ο άνεμος, είναι μεταβλητές και μη ελεγχόμενες, γεγονός που σε περίπτωση υψηλής διείσδυσης τους στα υπάρχοντα δίκτυα, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα όπως υπέρ-παραγωγή, απότομες υπερτάσεις και δυσκολία ελέγχου τάσης σε αυτά. Τα μικροδίκτυα σχεδιάζονται έτσι ώστε να είναι σε θέση να διαχειριστούν την μεταβλητή παραγωγή



χρησιμοποιώντας τεχνολογίες αποθήκευσης για την εξισορρόπηση της παραγωγής και των φορτίων.

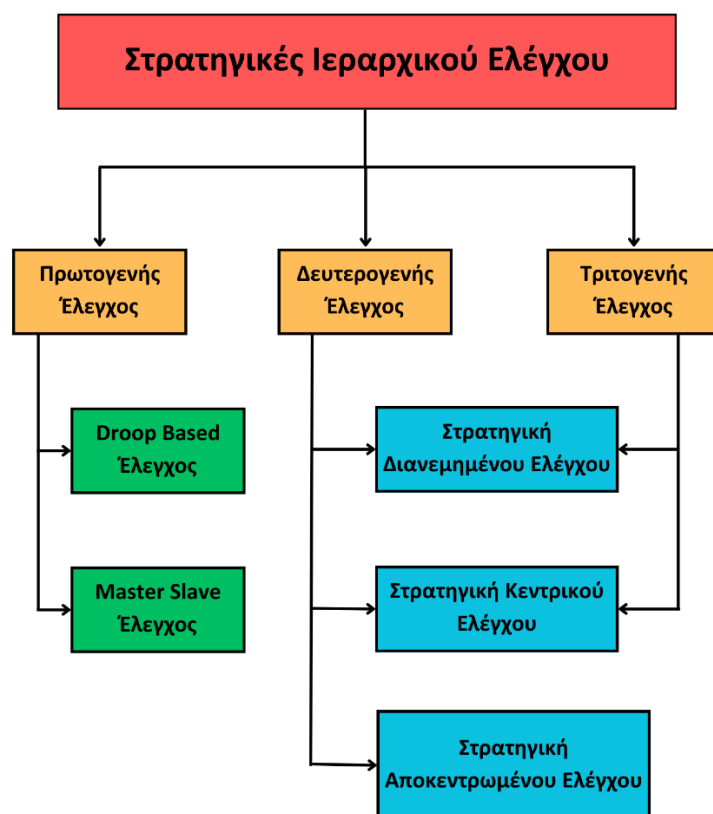
## Λειτουργία & Έλεγχος Μικροδικτύων

Για την εγκατάσταση μονάδων διανεμημένης παραγωγής απαιτείται κατάλληλος, συντονισμένος έλεγχος ώστε να εξασφαλιστεί η σταθερότητα του δικτύου. Τα μικροδίκτυα επιτρέπουν την παροχή καλύτερων λειτουργιών ελέγχου από τα κεντρικά δίκτυα όπου ο συντονισμένος έλεγχος είναι πολυσύνθετο ζήτημα.

### Στρατηγικές Ιεραρχικού Ελέγχου

Οι στρατηγικές ιεραρχικού ελέγχου χρησιμοποιούνται για τον καταμερισμό ισχύος μεταξύ διανεμημένης παραγωγής, τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος και την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας. Ο επιμερισμός φορτίου μπορεί να πραγματοποιηθεί καλύτερα με ιεραρχικό έλεγχο.

Ο ιεραρχικός έλεγχος αποτελείται από τρεις βαθμίδες: πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή. Ο πρωτογενής έλεγχος αποτελείται από τους τοπικούς ελεγκτές πηγής και φορτίου, ενώ ελέγχει και την τάση του κοινού διαύλου. Ο δευτερογενής έλεγχος διασφαλίζει ότι η συχνότητα και η τάση βρίσκονται εντός ορισμένων τιμών στο μικροδίκτυο. Το σύστημα διαχείρισης της διανομής και ο έλεγχος της ροής ισχύος στο σύστημα λαμβάνουν χώρα στον τριτογενή έλεγχο [22]. Με την εφαρμογή μιας κατάλληλης ιεραρχικής αρχιτεκτονικής ελέγχου, το σύστημα γίνεται πιο ευέλικτο και επεκτάσιμο, ώστε να μπορούν να ενσωματωθούν στο σύστημα περισσότερες μονάδες διανεμημένης παραγωγής.



Εικόνα 5 - Δομή Ιεραρχικού Ελέγχου



### Πρωτογενής έλεγχος

Το πρώτο επίπεδο ελέγχου σε μια ιεραρχική δομή ελέγχου είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του ρεύματος και της τάσης. Σε αυτό το στάδιο μειώνονται οι διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας στο μικροδίκτυο ενώ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν αποκεντρωμένες στρατηγικές ελέγχου για την διαχείριση ισχύος στο σύστημα. Ο έλεγχος master-slave και η μέθοδος ελέγχου καμπύλης στατισμού (droop) είναι οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι ελέγχου πρωτογενούς ελέγχου.

Στην αρχιτεκτονική ελέγχου droop, που βασίζεται στη χαρακτηριστική καμπύλη στατισμού (droop) του μετατροπέα, οι διανεμημένες μονάδες παραγωγής λειτουργούν ως πηγή τάσης. Στόχος είναι η ρύθμιση της τάσης αναφοράς και της συχνότητας του συστήματος, αποτρέποντας την κυκλοφορία ρεύματος μεταξύ των διανεμημένων πηγών ενέργειας. Πρόκειται για μια αξιόπιστη αρχιτεκτονική ελέγχου που εκμεταλλεύεται πλήρως την ικανότητα διανομής του μικροδικτύου και χρησιμοποιείται ευρέως στην παράλληλη λειτουργία μετατροπέων. Στη στρατηγική ελέγχου droop χρησιμοποιούνται ο έλεγχος ενεργού/ανέργου ισχύος (PQ) και ο έλεγχος τάσης/συχνότητας (V/f). Στον έλεγχο PQ, οι τιμές αναφοράς για την ενεργό ισχύ (P) και την άεργο ισχύ (Q) καθορίζονται από τον κεντρικό ελεγκτή και οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής λειτουργούν ως πηγές ρεύματος ελεγχόμενης τάσης (VCCS). Στον έλεγχο V/f καθορίζεται μια τιμή αναφοράς για το επίπεδο της τάσης εξόδου της διανεμημένης παραγωγής και της συχνότητας του δικτύου [23].

### Δευτερογενής έλεγχος

Στο δευτερογενή έλεγχο η τάση του κοινού διαύλου τάσης ρυθμίζεται στην ονομαστική της τιμή. Ο κεντρικός ελεγκτής του μικροδικτύου βασίζεται σε επικοινωνία χαμηλού εύρους ζώνης για τη μεταφορά πληροφοριών ελέγχου, όμως θεωρείται λιγότερο αξιόπιστος λόγω του μειονεκτήματος του single-point failure. Για αυτό το λόγο, σε αυτή τη βαθμίδα προτείνεται κατανεμημένος έλεγχος, ο οποίος χρησιμοποιεί επικοινωνία χαμηλού εύρους ζώνης για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των μονάδων μικροδικτύου [24].

### Τριτογενής έλεγχος

Στον τριτογενή έλεγχο ρυθμίζεται η ροή ισχύος μεταξύ του κυρίως δικτύου και του μικροδικτύου. Παράλληλα, πραγματοποιείται διαχείριση της ισχύος, της ενέργειας και των απωλειών ροής ισχύος, μειώνοντας έτσι το λειτουργικό κόστος. Ο έλεγχος και ο συντονισμός των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας πραγματοποιείται επίσης σε αυτό το επίπεδο ενώ συχνά καθορίζονται και τα βέλτιστα σημεία ρύθμισης, ανάλογα με τις μακροπρόθεσμες και κύριες απαιτήσεις του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η οικονομικότερη λειτουργία του μικροδικτύου [25].

### Στρατηγική Κεντρικού Ελέγχου

Ως κεντρικές στρατηγικές ελέγχου ορίζονται οι μέθοδοι στις οποίες οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής ελέγχονται από έναν κεντρικό ελεγκτή. Ο σχεδιασμός έχει γίνει σύμφωνα με το βασικό σχήμα ελέγχου που χρησιμοποιείται στα συμβατικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Το μικροδίκτυο διαθέτει τοπικούς ελεγκτές που ελέγχουν κάθε στοιχείο του συστήματος και διαθέτουν ένα επίπεδο επικοινωνίας με τον κεντρικό ελεγκτή ο οποίος είναι μοναδικός. Ο κεντρικός ελεγκτής συλλέγει όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες και στη συνέχεια παράγει εντολές για κάθε τοπικό

ελεγκτή. Οι τοπικοί ελεγκτές δεν επικοινωνούν μεταξύ τους και δεν μπορούν να ενεργήσουν μόνοι τους. Οι εντολές αποστέλλονται σε αυτά με την χρήση ψηφιακών συνδέσεων επικοινωνίας (DCL). Ωστόσο και σε αυτή τη στρατηγική ελέγχου το μοναδικό σημείο αστοχίας (single-point failure) προκαλεί χαμηλή αξιοπιστία, για αυτό το λόγο είναι ιδανική για μικροδίκτυα μικρού μεγέθους με περιορισμένες απαιτήσεις συλλογής πληροφοριών όπου ο έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί με μια δομή επικοινωνίας χαμηλού εύρους ζώνης (LBC). Ο έλεγχος Master-Slave είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά στην κεντρική στρατηγική ελέγχου [26].

### Στρατηγική ελέγχου Master Slave

Σε αυτή τη στρατηγική, ένας μετατροπέας, που λειτουργεί ως μετατροπέας πηγής τάσης (VSC), θεωρείται ως κύριος (master). Οι υπόλοιπες μονάδες θεωρούνται ως μονάδες σκλάβοι (slaves) και ακολουθούν τις εντολές του κύριου μετατροπέα. Αυτή η στρατηγική ελέγχου βασίζεται στην επικοινωνία υψηλού εύρους ζώνης (HBC) και έχει μειονεκτήματα, όπως το μοναδικό σημείο αστοχίας (single-point failure) και η εξάρτηση από τον κύριο μετατροπέα [27]. Ωστόσο, παρέχει υψηλότερο επίπεδο συντονισμού στον ιεραρχικό έλεγχο, επιτρέποντας την σύγχρονη λειτουργία του μικροδικτύου. Δεδομένου ότι το δίκτυο καθορίζει τη συχνότητα εντός του δικτύου, δεν υπάρχει ανάγκη ρύθμισης της συχνότητας του μικροδικτύου όταν το σύστημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο με αυτή τη στρατηγική. Ένα ακόμη μειονέκτημα ωστόσο συγκριτικά με τις προσεγγίσεις ελέγχου droop είναι ότι απαιτεί επικοινωνία μεταξύ των μονάδων του μικροδικτύου.

### Στρατηγική αποκεντρωμένου ελέγχου

Στον αποκεντρωμένο έλεγχο δεν υπάρχει κεντρικός ελεγκτής. Κάθε τοπικός ελεγκτής έχει τις δικές του μεταβλητές ελέγχου χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του χωρίς να επικοινωνεί με άλλους τοπικούς ελεγκτές. Το μειονέκτημα αυτής της στρατηγικής είναι οι ανεπαρκείς πληροφορίες για τις μονάδες του συστήματος και η έλλειψη μιας δομής επικοινωνίας και συγχρονισμού, όμως θεωρείται η πιο αξιόπιστη δεδομένου ότι δεν υπάρχει μοναδικό σημείο αστοχίας (single-point failure). Ειδικά σε μικροδίκτυα μεγάλης κλίμακας που τοποθετούνται σε μια ευρεία περιοχή και αυξημένης πολυπλοκότητας, ο αποκεντρωμένος έλεγχος μπορεί να θεωρηθεί η καλύτερη λύση και είναι σε θέση να διαχειριστεί αποτελεσματικά την ενέργεια του συστήματος.

### Στρατηγική διανεμημένου ελέγχου

Οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στα μικροδίκτυα, καθιστώντας δύσκολη την εφαρμογή κεντρικού ελέγχου. Ο διανεμημένος έλεγχος περιλαμβάνει τα πλεονεκτήματα τόσο του κεντρικού όσο και του αποκεντρωμένου ελέγχου. Σε αυτή τη στρατηγική, ένας τοπικός ελεγκτής επικοινωνεί μόνο με έναν άλλο γειτονικό του τοπικό ελεγκτή με ψηφιακές ζεύξεις επικοινωνίας (Digital Communication Links - DCLs), μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις για επικοινωνία. Με αυτή τη στρατηγική ελέγχου, η αξιοπιστία αυξάνεται καθώς το σύστημα μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί σε περίπτωση δυσλειτουργίας σε μια μονάδα. Παράλληλα, η υψηλή αξιοπιστία με μειωμένη απαίτηση επικοινωνίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πολυπλοκότητας και του κόστους, δεν απαιτείται κεντρικός ελεγκτής ενώ βελτιώνεται και η επεκτασιμότητα του μικροδικτύου [28].

### Στρατηγική ελέγχου με βάση τη συναίνεση (Consensus-Based)

Η στρατηγική αυτή ρυθμίζει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ μιας μονάδας και των γειτονικών της, προσφέρει ευέλικτο έλεγχο και δίνει λύση στα προβλήματα βελτιστοποίησης του διανεμημένου ελέγχου. Τέτοιου είδους στρατηγικές διασφαλίζουν τη συντονισμένη λειτουργία των μικροδικτύων βελτιστοποιώντας διάφορους στόχους λειτουργίας όπως η ρύθμιση τάσης και συχνότητας, ο καταμερισμός ισχύος και η απρόσκοπτη νησιδοποίηση και επανασύνδεση του μικροδικτύου στο δίκτυο.

Για την εφαρμογή ελέγχου με βάση τη συναίνεση, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι με τους οποίους επιδιώκεται να έρθουν οι καταστάσεις όλων των μονάδων του συστήματος πιο κοντά σε μια κοινή τιμή. Οι αλγόριθμοι συναίνεσης χρησιμοποιούνται σε προβλήματα εύρεσης βέλτιστης διάταξης και για τον έλεγχο σειράς συστημάτων διπλού ολοκληρωτή (dual integrator systems) [29].

Οι προσεγγίσεις που βασίζονται στη συναίνεση διερευνώνται ως μια ελκυστική λύση για την παροχή επεκτασιμότητας και ευρωστίας σε σφάλματα επικοινωνίας και την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων που οφείλονται στην αργή δυναμική, στις δυσκολίες χαμηλοπερατού φιλτραρίσματος στον έλεγχο της ροής ισχύος του δικτύου και στην ανισορροπία ρεύματος στο σημείο κοινής σύνδεσης (Point of Common Coupling - PCC) του μικροδικτύου.

### Στρατηγική ελέγχου βασισμένη σε πράκτορες

Η τεχνολογία συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων (MAS) είναι ένα πολύπλοκο αλλά πολύ χρήσιμο σύστημα, που αποτελείται από πολυάριθμους ανεξάρτητους πράκτορες, οι οποίοι έχουν περιορισμένες πληροφορίες και ικανότητες, με βάση το σχεδιασμό και τη λειτουργία του μικροδικτύου, ενώ είναι σε θέση να αλληλεπιδρούν για την εκτέλεση ενός ολοκληρωμένου έργου.

Πράκτορας θεωρείται ένα σύστημα που βρίσκεται σε ένα περιβάλλον και έχει τη δυνατότητα να εκτελεί ενέργειες αυτόνομα στο περιβάλλον, προκειμένου να επιτύχει τον στόχο του συστήματος. Οι πράκτορες εκτελούν τις εργασίες τους με εντελώς διαφορετικό τρόπο από άλλα αντίστοιχα συστήματα λογισμικού ή υλικού λόγω της ισχυρής ευφυΐας και της ευέλικτης συμπεριφοράς τους. Ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά για την ικανοποίηση των στόχων σχεδιασμού ενός ευφυούς πράκτορα που διακρίνουν έναν πράκτορα από τους απλούς ελεγκτές είναι τα εξής:

- Αντιδραστικότητα σε τυχόν αποκλίσεις στο περιβάλλον του
- Αυτονομία - εκτελεί τα καθήκοντα του ανεξάρτητα χωρίς εξωτερική παρέμβαση
- Ικανότητα εξαγωγής συμπερασμάτων
- Ανταπόκριση στην τρέχουσα κατάσταση σε ελάχιστο χρόνο
- Προληπτικότητα
- Κοινωνική συμπεριφορά - ικανότητα αλληλεπίδρασης/επικοινωνίας με εξωτερικές πηγές (άλλοι πράκτορες, άνθρωποι ή μονάδες ελέγχου)

Το σύστημα πολλαπλών πρακτόρων είναι ένα εργαλείο, που χρησιμοποιείται όχι μόνο για την παροχή ευφυΐας για την εκτέλεση λειτουργιών που σχετίζονται με πολύπλοκες εργασίες, αλλά και για τη διευκόλυνση της διαχείρισης στο σχεδιασμό και τη

λειτουργία του συστήματος. Επιπλέον, διεξάγεται μεγάλος όγκος ερευνητικών εργασιών σχετικά με το μικροδίκτυο με τη χρήση συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων, όπως η μοντελοποίηση της αγοράς, ο καταναεμημένος έλεγχος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, η βελτιστοποίηση και η γρήγορη αποκατάσταση του συστήματος [30].

# 4<sup>ο</sup>

## Κεφάλαιο

---

Στο παρόν κεφάλαιο, οι δυναμικές επιδόσεις ενός μικροδικτύου υπό τη λειτουργία νησιδοποίησης εξετάζονται με βάση την προσομοίωση μεταβατικών καταστάσεων RMS στο DIgSILENT PowerFactory. Το DIgSILENT PowerFactory είναι ένα πρόγραμμα υπολογισμού που χρησιμοποιείται για την ανάλυση συστημάτων μεταφοράς, διανομής και βιομηχανικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει σχεδιαστεί ως προηγμένο, ολοκληρωμένο και διαδραστικό πακέτο λογισμικού για συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και στον έλεγχο προκειμένου να επιτευχθούν οι κύριοι στόχοι του σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης της λειτουργίας τους.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του PowerFactory περιλαμβάνουν:

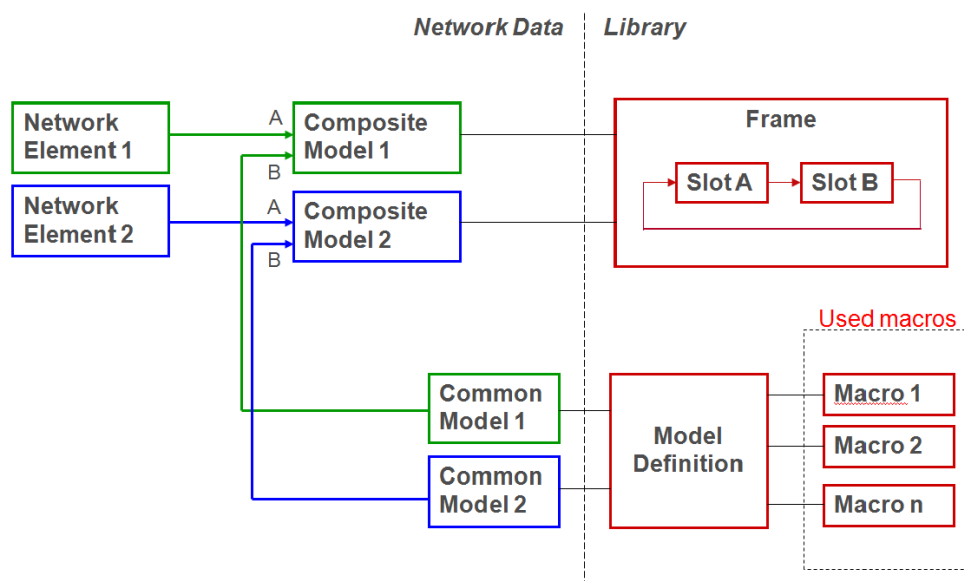
1. Βασικές λειτουργίες: ορισμός, τροποποίηση και οργάνωση περιπτώσεων, βασικές αριθμητικές ρουτίνες, λειτουργίες εξόδου και καταγραφής
2. Διαδραστικός χειρισμός γραφικών και δεδομένων
3. Βάση δεδομένων των στοιχείων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
4. Ολοκληρωμένες λειτουργίες υπολογισμού (π.χ. υπολογισμός παραμέτρων γραμμών και μηχανών με βάση γεωμετρικές πληροφορίες)
5. Διαμόρφωση δικτύου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με διαδραστική ή on-line πρόσβαση SCADA
6. Γενική διεπαφή για συστήματα χαρτογράφησης με βάση υπολογιστή

Η χρήση μιας ενιαίας βάσης δεδομένων, με τα απαιτούμενα δεδομένα για όλο τον εξοπλισμό εντός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. δεδομένα: γραμμές, γεννήτριας, προστασίας, αρμονικών, ελεγκτών), σημαίνει ότι το PowerFactory μπορεί εύκολα να εκτελέσει όλες τις λειτουργίες προσομοίωσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσα σε ένα ενιαίο περιβάλλον προγράμματος - λειτουργίες όπως η ανάλυση ροής φορτίου, υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων, ανάλυση αρμονικών, συντονισμός προστασίας και ανάλυση ευστάθειας

## Δυναμική μοντελοποίηση

Στο PowerFactory δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας μεμονωμένων μηχανικών συστημάτων όπου ο χρήστης καθορίζει τις παραμέτρους, διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο τη μοντελοποίηση συστημάτων υψηλής ακρίβειας. Η δυναμική μοντελοποίηση στο PowerFactory έχει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- *Ευελξία*: οποιοδήποτε μοντέλο, από απλές χρονικές καθυστερήσεις έως πολύπλοκες δομές ελεγκτών, μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας το ίδιο σύνολο εργαλείων. Τα βασικά δομικά στοιχεία είναι οι εξισώσεις του μοντέλου που γράφονται στη γλώσσα προσομοίωσης DIgSILENT (DSL). Οι αναπαραστάσεις υψηλότερου επιπέδου, όπως τα γραφικά διαγράμματα μπλοκ και οι εμφωλευμένες δομές μπλοκ, μετατρέπονται αυτόματα σε ένα σύνολο εξισώσεων DSL, οι οποίες στη συνέχεια αναλύονται και ερμηνεύονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- *Κληρονομικότητα και επαναχρησιμοποίηση*: χρησιμοποιείται μια αντικειμενοστραφής προσέγγιση που ενθαρρύνει την επαναχρησιμοποίηση, πολλαπλά αντικείμενα του δικτύου μπορούν να χρησιμοποιούν το ίδιο αντικείμενο από τη βιβλιοθήκη με τοπικές ρυθμίσεις παραμέτρων.
- *Ενσωματωμένη ανίχνευση και δοκιμή σφαλμάτων*: υπάρχουν ενσωματωμένα εργαλεία για την ανίχνευση δομικών και συντακτικών σφαλμάτων και για τη μεμονωμένη δοκιμή μοντέλων



Εικόνα 6 - Διάγραμμα Μπλοκ Δυναμικής Μοντελοποίησης [31]

Στην Εικόνα 6 - Διάγραμμα Μπλοκ Δυναμικής Μοντελοποίησης αναπαριστάτε με διάγραμμα μπλοκ η δυναμική μοντελοποίηση στο PowerFactory. Η ορολογία που χρησιμοποιείται ορίζεται ως εξής:

*Network Element*: είναι ένα ενσωματωμένο μοντέλο που αντιπροσωπεύει ένα τυπικό κομμάτι εξοπλισμού του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, π.χ. γεννήτριες, κινητήρες, μετασχηματιστές, μετατροπείς κ.λπ.

*Composite Frame (Σύνθετο Πλαίσιο)*: ένα διάγραμμα επισκόπησης που δείχνει τις διασυνδέσεις μεταξύ των υποδοχών (slots). Ένα σύνθετο πλαίσιο περιέχει τους ορισμούς κάθε υποδοχής, υποδεικνύοντας τον τύπο του αντικειμένου που πρέπει να ανατεθεί στην υποδοχή και ανήκει στη βιβλιοθήκη τύπων εξοπλισμού.

*Slot (Υποδοχή)*: είναι ένα μπλοκ στο σύνθετο πλαίσιο που αναπαριστά ένα αντικείμενο στο δίκτυο, π.χ. στοιχεία δικτύου, συσκευές μέτρησης και κοινά μοντέλα DSL. Ο χρήστης πρέπει να ορίσει τον τύπο του αντικειμένου που αντιπροσωπεύει κάθε υποδοχή.

*Composite Model (Σύνθετο Μοντέλο)*: είναι ένα αντικείμενο του δικτύου που αντιπροσωπεύει ένα πλήρες δυναμικό σύστημα (π.χ. γεννήτρια με κινητήρα και έλεγχο τάσης). Συνδέει το σύνθετο πλαίσιο (το οποίο περιέχει υποδοχές) με τα πραγματικά στοιχεία του δικτύου, τις συσκευές μέτρησης και τα DSL κοινά μοντέλα στο δίκτυο.

*Model Definition (Ορισμός Μοντέλου)*: καθορίζει τη συνάρτηση μεταφοράς ενός δυναμικού μοντέλου, με τη μορφή εξισώσεων ή/και γραφικών διαγραμμάτων μπλοκ. Μπορεί να θεωρηθεί ως ο σχεδιασμός ή το σχέδιο για ένα κομμάτι εξοπλισμού (π.χ. σχεδιασμός για ένα μοντέλο ελεγκτή XYZ).

*Common Model (Κοινό Μοντέλο)*: συνδέει έναν ορισμό μοντέλου με ένα πραγματικό κομμάτι εξοπλισμού με συγκεκριμένες ρυθμίσεις παραμέτρων. Ενώ ο ορισμός μπλοκ μπορεί να θεωρηθεί ως το σχέδιο ή το μοντέλο για ένα κομμάτι εξοπλισμού, το κοινό μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ως μια συγκεκριμένη φυσική περίπτωση του ίδιου του στοιχείου εξοπλισμού (π.χ. η φυσική μονάδα ελέγχου). Τα κοινά μοντέλα είναι στοιχεία του δικτύου.

*Block Definition (Ορισμός Μπλοκ)*: είναι το όνομα του αντικειμένου PowerFactory (.BlkDef) που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των σύνθετων πλαισίων καθώς και των ορισμών μοντέλων και μπορεί να κατασκευαστεί τόσο από εξισώσεις όσο και από γραφικά διαγράμματα μπλοκ.

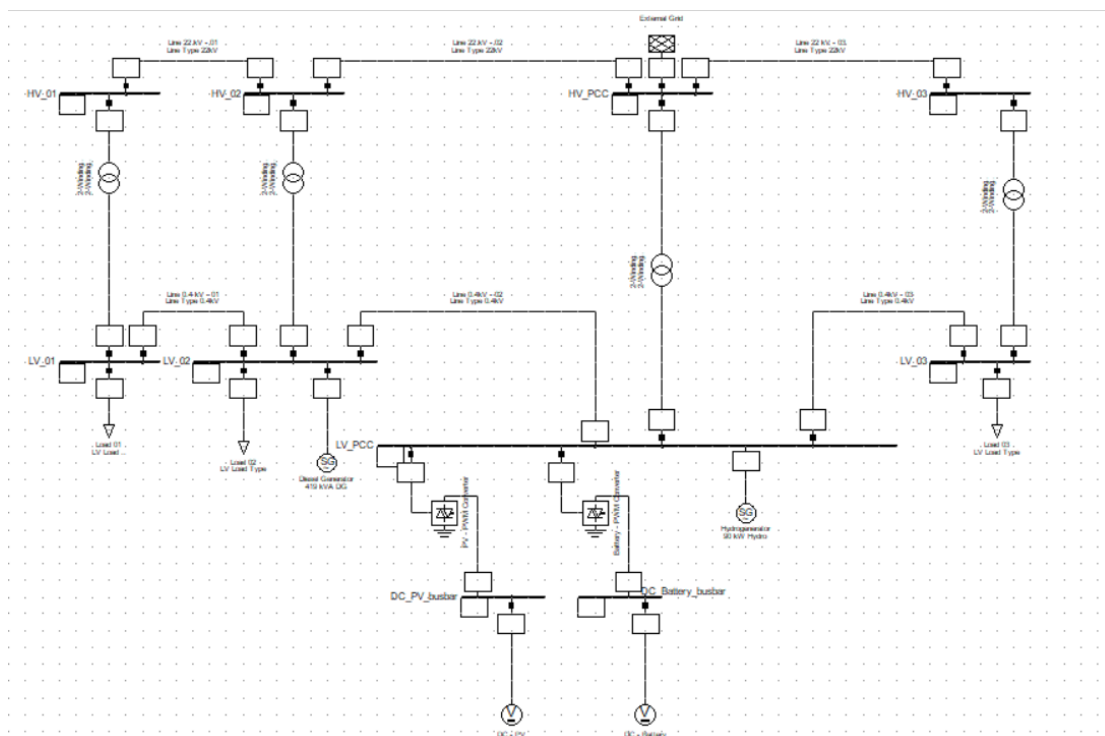
## Σύστημα Δοκιμής Μικροδικτύου

Το σύστημα δοκιμής είναι ένα ισορροπημένο τριφασικό δίκτυο διανομής 22/0,4 kV, συχνότητας 50 Hz, το οποίο περιλαμβάνει μια υδρογεννήτρια 90 kW, ένα φωτοβολταϊκό σύστημα 20 kW, ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες 100 kW/150 kWh και μια γεννήτρια diesel 419 kW. Υπάρχουν τρία συνδεδεμένα φορτία, εκ των οποίων τα 1 και 2 είναι μικρές βιομηχανικές εγκαταστάσεις και το 3 είναι κατάλυμα, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 3. Ο συντελεστής ισχύος του συστήματος είναι 0,9 επαγωγικός (lagging).



Πίνακας 3 - Χαρακτηριστικά Φορτίων

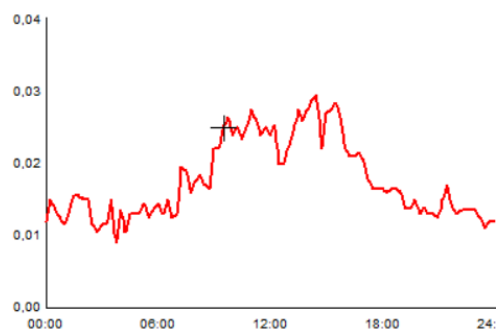
Φορτίο	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Συντελεστής Ισχύος	Χαρακτηριστικά Φορτίων κατά την νησιδοποίηση		
			Ενεργός Ισχύς (MW)	Άεργος Ισχύς (MVar)	Ρεύμα (kA)
1	0,04	0,9	0,03	0,015	0,05
2	0,08	0,9	0,06	0,029	0,1
3	0,05	0,9	0,023	0,011	0,04



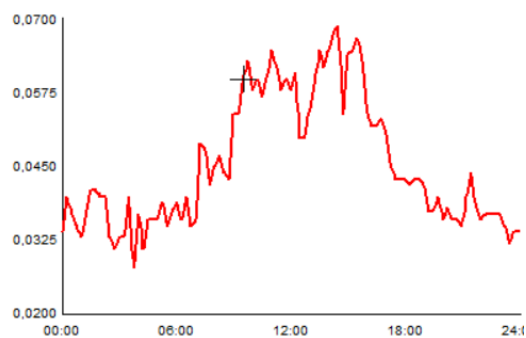
Εικόνα 7 - Σύστημα Δοκιμής Μικροδικτύου στο Περιβάλλον του DIgSILENT PowerFactory

Η ισχύς εξόδου της υδρογεννήτριας θεωρείται σταθερή για όλη την ημέρα, ενώ η φωτοβολταϊκή παραγωγή μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση του ηλιακού φωτός. Η ζήτηση των τριών φορτίων του μικροδικτύου επίσης μεταβάλλεται μέσα στο εικοσιτετράωρο και προστίθεται στο σύστημα δοκιμής με τη χρήση χαρακτηριστικών χρόνου (.ChaTime). Στις εικόνες 8 με 10 φαίνονται ο χαρακτηριστικές των φορτίων του μικροδικτύου και της παραγόμενης ισχύς από το σύστημα φωτοβολταϊκών, ενώ στον Πίνακα 4 φαίνονται ενδεικτικά κάποιες από τις τιμές.

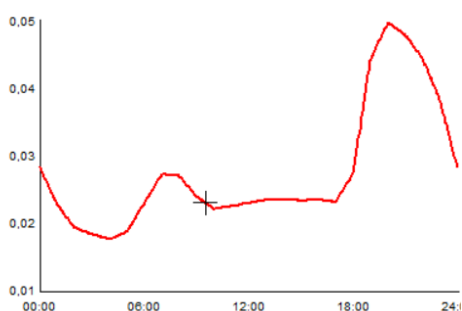




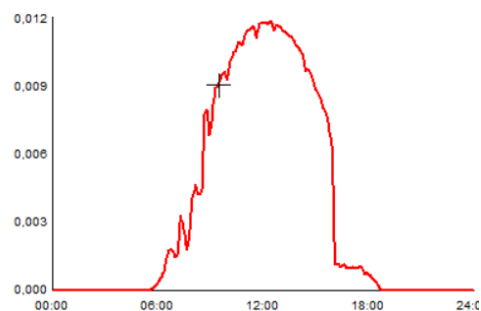
Εικόνα 8 - Ζήτηση Φορτίου 1



Εικόνα 9 - Ζήτηση Φορτίου 2



Εικόνα 10 - Ζήτηση Φορτίου 3



Εικόνα 11 - Παραγωγή Φωτοβολταϊκού Συστήματος

Πίνακας 4 - Ενδεικτικές Τιμές Ζήτησης Φορτίων και Παραγωγής Φωτοβολταϊκού

	Ισχύς (MW)			
Ώρα	Φορτίο 1	Φορτίο 2	Φορτίο 3	Φωτοβολταϊκό
00:00	0,017	0,034	0,02845014	0
01:00	0,0165	0,033	0,02286443	0
02:00	0,02	0,04	0,0194213	0
03:00	0,0165	0,033	0,01844257	0
04:00	0,0185	0,037	0,01767938	0
05:00	0,018	0,036	0,01888939	0
06:00	0,0195	0,039	0,02313344	0,0002913
07:00	0,018	0,036	0,02738557	0,0014771
08:00	0,0225	0,045	0,0271744	0,0039353
09:00	0,027	0,054	0,02406852	0,0068735
10:00	0,029	0,058	0,02224375	0,0093211
11:00	0,0325	0,065	0,02262967	0,0112733
12:00	0,029	0,058	0,02312251	0,0118147
13:00	0,0275	0,055	0,02354328	0,0116873
14:00	0,0325	0,065	0,02365671	0,0107826

15:00	0,032	0,064	0,02345048	0,0090779
16:00	0,0275	0,055	0,02357046	0,0063257
17:00	0,0255	0,051	0,02322171	0,0009786
18:00	0,0215	0,043	0,02759186	0,0007768
19:00	0,021	0,042	0,04435592	0
20:00	0,018	0,036	0,04988597	0
21:00	0,0175	0,035	0,04807142	0
22:00	0,018	0,036	0,04459591	0
23:00	0,0185	0,037	0,03841992	0

### Φωτοβολταϊκά και Σύστημα Μπαταριών

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες βασίζονται συνήθως σε back-to-back μετατροπείς πηγής τάσης, οι οποίοι αποτελούνται από μετατροπέα DC/DC σε κλιμακωτή σύνδεση με μετατροπέα DC/AC. Ο μετατροπέας από την πλευρά της πηγής ενέργειας καθορίζει τη συνάρτηση εξαγωγής μέγιστης ισχύος, ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου εκτελεί τον έλεγχο της διασύνδεσης με το δίκτυο. Η ενεργός και η άεργος ισχύς από τον μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου μπορεί να ελεγχθεί υπό την εποπτεία του κεντρικού ελέγχου του μικροδικτύου. Παρόλο που και τα δύο συστήματα, φωτοβολταϊκών και μπαταριών, έχουν την ίδια διαμόρφωση μετατροπέα, το φωτοβολταϊκό σύστημα χρησιμοποιεί μετατροπέα ισχύος μονής κατεύθυνσης, ενώ για το σύστημα μπαταριών χρησιμοποιείται μετατροπέας ισχύος διπλής κατεύθυνσης.

Κατά τη διάρκεια της σύνδεσης στο δίκτυο, ο μετατροπέας ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να λειτουργεί είτε σε λειτουργία PQ είτε σε λειτουργία PV. Στη λειτουργία PQ, η άεργος ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος ελέγχεται στη σταθερή τιμή ή παράγεται σύμφωνα με τη ζήτηση από τον κεντρικό έλεγχο του μικροδικτύου, ενώ η ενεργός ισχύς εξακολουθεί να παράγεται σύμφωνα με τον κανόνα εξαγωγής μέγιστης ισχύος. Εναλλακτικά, σε λειτουργία PV, το φωτοβολταϊκό σύστημα θα ρυθμίσει την τάση ώστε να διατηρήσει την τάση εναλλασσόμενου ρεύματος του αντιστροφέα στο επιθυμητό επίπεδο. Η δυνατότητα ελέγχου της τάσης περιορίζεται από την επιτρεπόμενη άεργο ισχύ ( $Q_{PV}$ ) του φωτοβολταϊκού συστήματος, η οποία εξαρτάται από την ενεργό ισχύ εξόδου ( $P_{PV}$ ) και τον συντελεστή ισχύος του μετατροπέα συνδεδεμένου (grid-tied) στο δίκτυο ( $PF_{PV}$ ). Αυτή η άεργος ισχύς υπολογίζεται ως εξής:

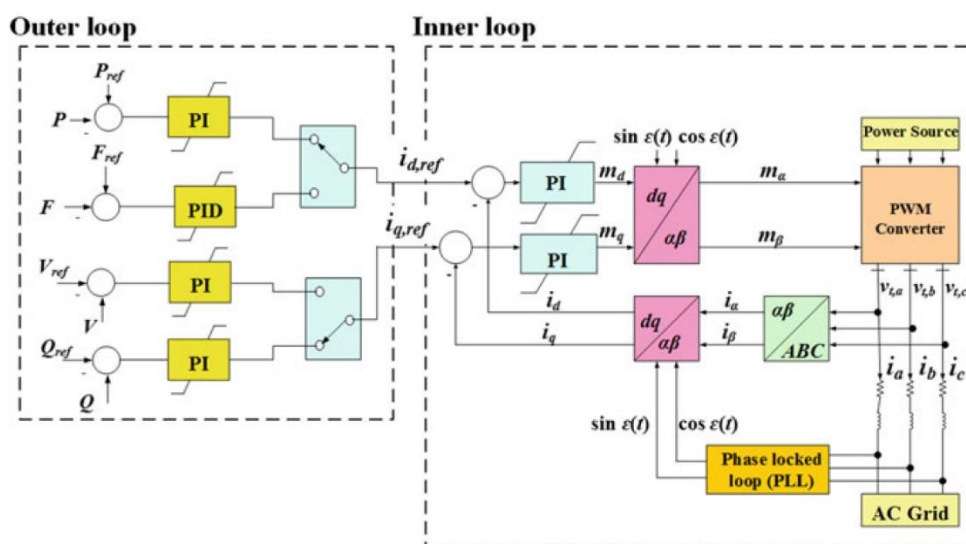
$$Q_{PV} = P_{PV} \times \tan (\cos^{-1} PF_{PV})$$

Στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες, η κατεύθυνση της ενεργού ισχύος εξαρτάται από τις συνθήκες της μπαταρίας. Η μπαταρία εγχέει την ενεργό ισχύ στο σύστημα μικροδικτύου κατά τη λειτουργία εκφόρτισης, ενώ κατά τη λειτουργία φόρτισης η μπαταρία απορροφά ενεργό ισχύ. Η μπαταρία θα λειτουργεί σε κατάσταση φόρτισης ή εκφόρτισης ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης (State of Charge - SOC). Όταν το επίπεδο φόρτισης είναι υψηλό, η μπαταρία εκφορτίζει και παρέχει ισχύ στο

σύστημα ενώ αντιθέτως όταν φτάσει στην κατώτερη επιτρεπόμενη τιμή θα πρέπει να επαναφορτιστεί άμεσα. Το σύστημα μπαταριών αποσκοπεί στη διατήρηση της συχνότητας του συστήματος εντός του θεσμοθετημένου ορίου τόσο σε συνθήκες σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο όσο και σε συνθήκες νησιδοποίησης, ενώ η άεργος ισχύς είναι σταθερή ή εξαρτάται από τη μεταβολή του επιπέδου τάσης (λειτουργία fQ ή fV).

Στη λειτουργία νησιδοποίησης, ο αντιστροφέας από την πλευρά του δικτύου, είτε του φωτοβολταϊκού συστήματος είτε του συστήματος μπαταριών, αλλά ειδικά αυτός που επιλέγεται ως κύρια συσκευή, θα λειτουργεί ως αντιστροφέας με στόχο την εξομοίωση της συμπεριφοράς μιας σύγχρονης μηχανής παρέχοντας μια αναφορά τάσης και συχνότητας. Εάν δύο ή περισσότερες μονάδες φωτοβολταϊκών και αποθήκευσης ενέργειας που βασίζονται σε μετατροπείς συμμετέχουν στον έλεγχο της συχνότητας και της τάσης του δικτύου, οι μέθοδοι ελέγχου droop εφαρμόζονται για τον διαμοιρασμό της ενεργού και της άεργου ισχύος μεταξύ των εν λόγω μονάδων.

Ο έλεγχος του αντιστροφέα δικτύου αναπτύσσεται με βάση το σύγχρονο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (synchronous rotating reference frame) το οποίο αποτελείται από δύο κλιμακωτούς βρόγχους όπως φαίνεται στην Εικόνα 12.

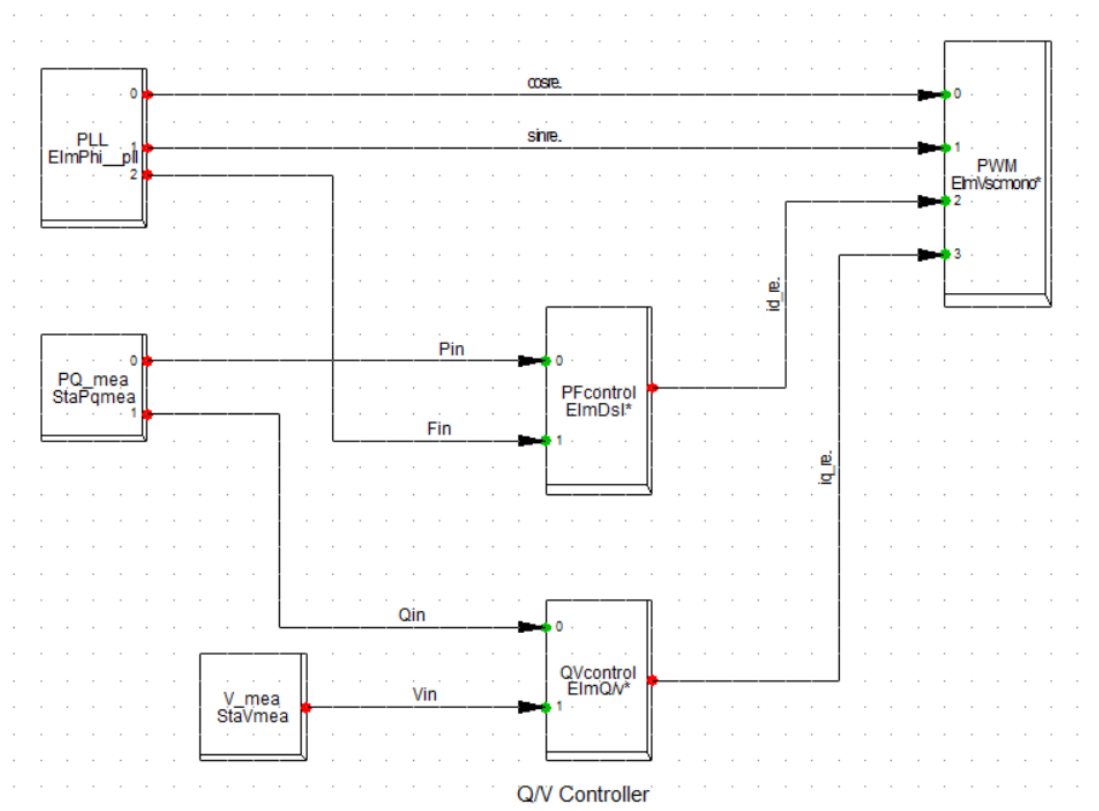


Εικόνα 12 – Διάγραμμα Λειτουργίας Ελεγκτή Μετατροπέα από την Πλευρά του Δικτύου

Η έξοδος του μετατροπέα παράγεται με τη χρήση της τεχνικής διαμόρφωσης πλάτους παλμού (Pulse Width Modulation – PWM). Ο εσωτερικός βρόχος ελέγχου διαχωρίζει τον έλεγχο για τις πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες του ρεύματος. Αυτή η μέθοδος ελέγχου αποτελείται από δύο κλάσεις δισδιάστατων πλαισίων, το ab-πλαίσιο και το dq-πλαίσιο. Οι δύο συνιστώσες ρεύματος,  $i_d$  και  $i_q$ , ελέγχονται ανεξάρτητα, καθώς οι τιμές αναφοράς για τους ελέγχους τους παρέχονται από τον εξωτερικό βρόχο ελέγχου. Η  $i_{d,ref}$  προέρχεται από τον ελεγκτή ενεργού ισχύος (P) ή συχνότητας συστήματος (F) στον άξονα d, ενώ η  $i_{q,ref}$  προέρχεται από τον ελεγκτή άεργου ισχύος (Q) ή τάσης διαύλου (V) στον άξονα q. Και στους δύο βρόγχους ελέγχου, τα σήματα σφάλματος αντισταθμίζονται με τη χρήση ελεγκτών PID και PI.

### Σύστημα Ελέγχου Αντιστροφέα με Σύνδεση στο Μικροδίκτυο

Ο σχεδιασμός των συστημάτων ελέγχου των αντιστροφέων PWM που συνδέουν τα συστήματα φωτοβολταϊκών και μπαταριών με το μικροδίκτυο γίνεται με τη χρήση δυναμικών μοντέλων. Το ενσωματωμένο μοντέλο μετατροπέα PWM με 1 σύνδεση DC χρησιμοποιείται ως αντιστροφέας συνδεδεμένος με το δίκτυο. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει τον ενσωματωμένο ελεγκτή ρεύματος  $dq$ , ο οποίος λειτουργεί ως εσωτερικός βρόγχος ελέγχου (Εικόνα 12). Τα ρεύματα του μετατροπέα PWM ( $i_d$  και  $i_q$ ) ρυθμίζονται από αυτόν τον ενσωματωμένο ελεγκτή ρεύματος χρησιμοποιώντας ρυθμιστές PI. Επιπλέον, τα σήματα εισόδου αυτού του μοντέλου μετατροπέα περιλαμβάνουν τα σήματα  $\cos\phi_i$  και  $\sin\phi_i$  από το ενσωματωμένο μοντέλο μέτρησης συχνότητας (ElmPhi\_pll) και τις αναφορές ρεύματος ( $i_{d\_ref}$  και  $i_{q\_ref}$ ) από τον εξωτερικό βρόχο ελέγχου. Ο εξωτερικός βρόχος ελέγχου αποτελείται από τον ελεγκτή P/f και τον ελεγκτή Q/V. Ο ελεγκτής P/f χρησιμοποιείται για τον έλεγχο είτε της ενεργού ισχύος (P) είτε της συχνότητας του συστήματος (f), ενώ η άεργος ισχύς (Q) ή η τάση διαύλου (V) ελέγχεται από τον ελεγκτή Q/V. Υπό κανονικές συνθήκες, τα φωτοβολταϊκά συστήματα και τα συστήματα μπαταρίας βρίσκονται σε λειτουργία PQ και fQ αντίστοιχα, όμως μπορούν να μεταβούν σε λειτουργία ελέγχου συχνότητας και τάσης (FV mode) μετά την ανίχνευση της κατάστασης νησιδοποίησης.

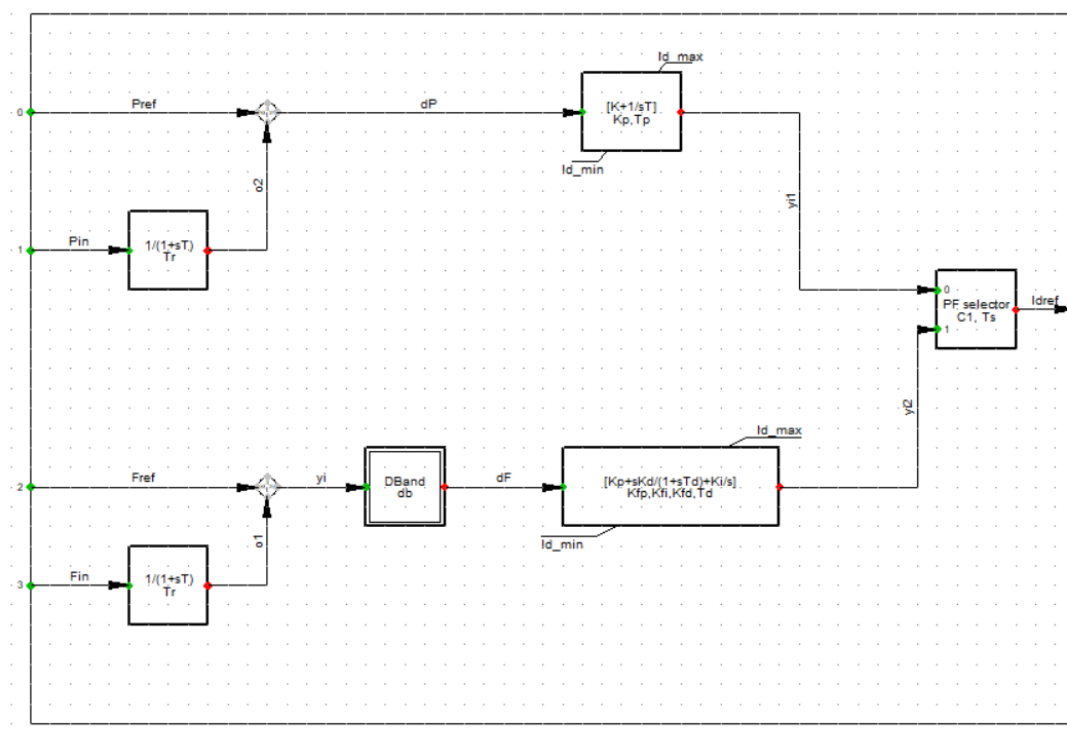


Εικόνα 13 – Σύνθετο Πλαίσιο Μετατροπέα PWM

Το σήμα εξόδου του ελεγκτή P/f είναι το ρεύμα αναφοράς του άξονα d ( $i_{d\_ref}$ ) και τα σήματα εισόδου περιλαμβάνουν τη μετρούμενη συχνότητα ( $f_{mea}$ ) από το ενσωματωμένο μοντέλο μέτρησης συχνότητας (ElmPhi\_pll) και την ενεργό ισχύ εξόδου (p) από το ενσωματωμένο μοντέλο μέτρησης ισχύος (StaPqmea). Στην περίπτωση του ελεγκτή Q/V, το σήμα εξόδου είναι το ρεύμα αναφοράς του άξονα q

( $i_{q\_ref}$ ) και τα σήματα εισόδου αποτελούνται από την άεργο ισχύ εξόδου ( $q$ ) από το ενσωματωμένο μοντέλο μέτρησης ισχύος (StaPqmea) και το μέγεθος της τάσης θετικής ακολουθίας ( $u$ ) από το ενσωματωμένο μοντέλο μέτρησης τάσης (StaVmea). Επιπλέον, οι μετρήσεις συχνότητας, ισχύος και τάσης βρίσκονται στο σημείο κοινής σύνδεσης (point of common coupling - PCC) του αντιστροφέα συνδεδεμένου στο δίκτυο.

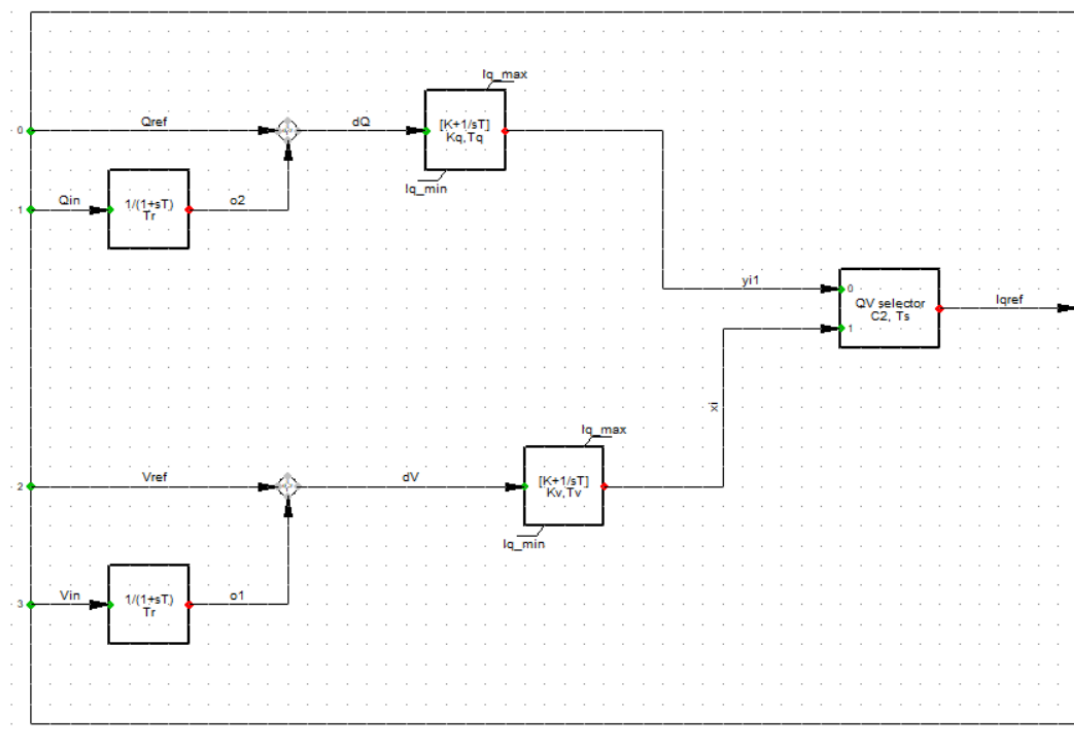
Ο ορισμός του μοντέλου (model definition) του ελεγκτή P/f (PFsupport.BlkDef) βασίζεται σε απλούς ελεγκτές PI και PID. Η ενεργός ισχύς αναφοράς ( $P_{ref}$ ) και η συχνότητα αναφοράς ( $f_{ref}$ ) ορίζονται από τον υπολογισμό της αρχικής κατάστασης. Οι εισοδοί ενεργού ισχύος  $P_{in}$  και συχνότητας  $f_{in}$  φιλτράρονται με τη χρήση καθυστέρησης πρώτης τάξης ( $1/(1+sT)$ ).BlkDef). Η ενεργός ισχύς ρυθμίζεται με τη χρήση ενός ελεγκτή PI με περιοριστή int./ext. μη ανανέωσης ( $[K+1/sT]$ .BlkDef), ενώ η συχνότητα ελέγχεται με τη χρήση ενός ελεγκτή PID με κορεσμό ( $[K_p+sK_d/(1+sT_d)+K_i/s]$ .BlkDef). Επιπλέον, η νεκρή ζώνη (dead band - DBand.BlkDef) προστίθεται στον ελεγκτή συχνότητας ώστε να αποφευχθεί η διακύμανση της όταν ο μετατροπέας λειτουργεί υπό συνθήκες σύνδεσης με το δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση, ο ελεγκτής P/f θα λειτουργεί σε λειτουργία ελέγχου P ή f, ανάλογα με την τιμή του C1 στον ορισμό του μπλοκ επιλογής (PF\_selection.BlkDef). Εάν το C1 βρίσκεται σε λειτουργία ελέγχου P, ενώ μεταβαίνει σε λειτουργία ελέγχου f εάν το C1 είναι 0.



Εικόνα 14 - Ορισμός Μοντέλου Ελεγκτή P/f

Για τον ελεγκτή Q/V, ο ορισμός μοντέλου (QVsupport.BlkDef) υλοποιείται παρόμοια με τον ελεγκτή P/f, όπως φαίνεται παρακάτω. Η άεργος ισχύς αναφοράς ( $Q_{ref}$ ) και η τάση αναφοράς ( $V_{ref}$ ) ορίζονται από τη διαδικασία αρχικοποίησης. Η καθυστέρηση πρώτης τάξης ( $1/(1+sT)$ ).BlkDef) χρησιμοποιείται για το φιλτράρισμα των εισόδων από τις μετρήσεις της άεργου ισχύος και της τάσης. Ο ελεγκτής PI με εσωτερικό/εξωτερικό περιοριστή μη αναδιπλώσης ( $[K+1/sT]$ .BlkDef) χρησιμοποιείται ως ρυθμιστής και για τους δύο ελεγκτές Q και V. Τέλος, ο ελεγκτής

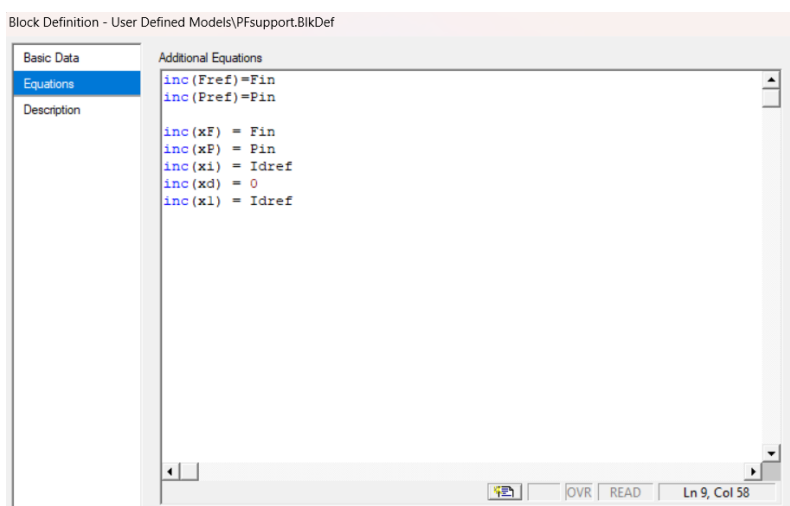
Q/V θα βρίσκεται σε λειτουργία ελέγχου Q, εάν η τιμή του C2 στον ορισμό του μπλοκ επιλογής (QV\_selection.BlkDef) είναι 1 ή σε λειτουργία ελέγχου V αν είναι 0.



Εικόνα 15 - Ορισμός Μοντέλου Ελεγκτή Q/V

### Αρχικοποίηση Μοντέλου (Model Initialisation)

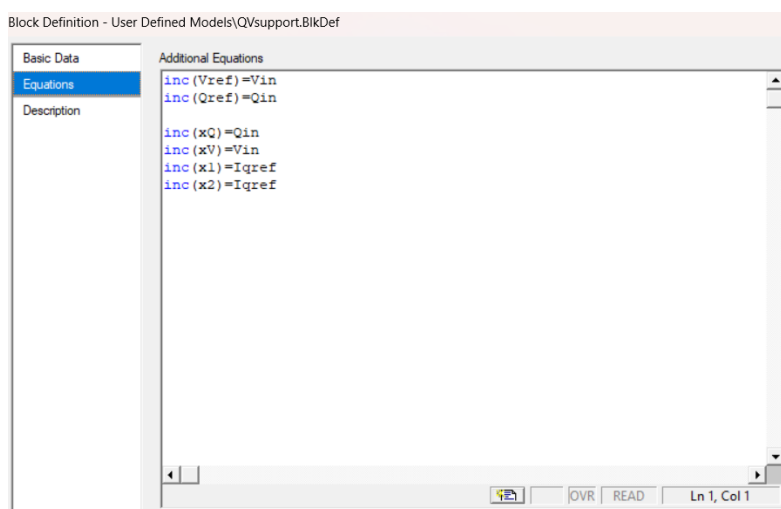
Όλα τα δυναμικά μοντέλα πρέπει να αρχικοποιούνται σύμφωνα με έναν υπολογισμό ροής φορτίου σταθερής κατάστασης πριν από την έναρξη μιας προσομοίωσης στο πεδίο του χρόνου. Στα μοντέλα ελεγκτών P/f και Q/V εισάγονται χειροκίνητα ορισμένες αρχικές τιμές σε μορφή κώδικα μέσα στο παράθυρο εξισώσεων [Εικόνα 16](#).



Εικόνα 16 - Αρχικοποίηση Δεδομένων Ελεγκτή P/f (Block Definition)

Οι άγνωστες εισοδοι, Pref και fref του ελεγκτή P/f, και οι μεταβλητές κατάστασης των φίλτρων υστέρησης πρώτης τάξης (xP και xF) αρχικοποιούνται από τις γνωστές εξόδους των μετρήσεων ισχύος και συχνότητας, οι οποίες είναι Pin και fin, αντίστοιχα.

Η μεταβλητή κατάστασης του ολοκληρωτή στον ελεγκτή PI ( $x_1$ ) αρχικοποιείται από την έξοδο σταθερής κατάστασης, η οποία είναι  $I_{d\_ref}$ . Ομοίως, οι μεταβλητές κατάστασης του ολοκληρωτή και του διαφορικού ( $x_i$  και  $x_d$ ) στον ελεγκτή PID αρχικοποιούνται από τις τιμές  $I_{d\_ref}$  και 0, αντίστοιχα.

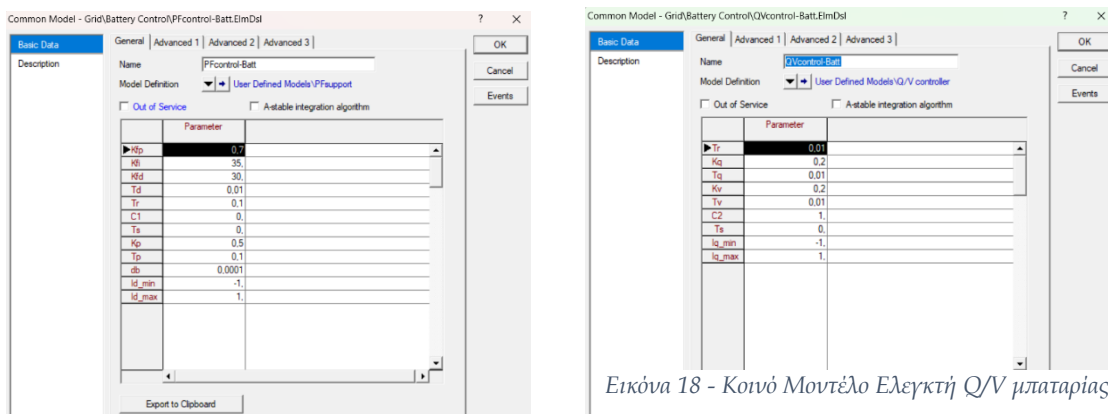


Εικόνα 17 - Αρχικοποίηση Δεδομένων Ελεγκτή Q/V (Block Definition)

Για την αρχικοποίηση του ελεγκτή Q/V οι άγνωστες εισοδοι,  $Q_{ref}$  και  $V_{ref}$ , και οι μεταβλητές κατάστασης των φίλτρων υστερήσης πρώτης τάξης ( $x_Q$  και  $x_V$ ) αρχικοποιούνται από τις γνωστές εξόδους των μετρήσεων ισχύος και τάσης, οι οποίες είναι  $Q_{in}$  και  $V_{in}$ , αντίστοιχα. Οι μεταβλητές κατάστασης των ολοκληρωτών στους ελεγκτές PI ( $x_1$  και  $x_2$ ) αρχικοποιούνται από τη γνωστή έξοδο σταθερής κατάστασης,  $I_{q\_ref}$ .

### Σύνθετα Μοντέλα (Composite Models) και Κοινά Μοντέλα (Common Models)

Ένα κοινό μοντέλο κληρονομεί το διάγραμμα μπλοκ (block definition) του συνδεδεμένου ορισμού μοντέλου αλλά έχει τις δικές του τοπικές ρυθμίσεις παραμέτρων. Υπάρχουν δύο κοινά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στο σύστημα ελέγχου του μετατροπέα PWM που συνδέονται με ορισμούς μοντέλων των ελεγκτών P/f και Q/V (PFsupport.BlkDef και QVsupport.BlkDef). Όλες οι παράμετροι πρέπει να εκχωρηθούν σε κάθε κοινό μοντέλο, συμπεριλαμβανομένων των παραμέτρων κέρδους του φίλτρου και των ελεγκτών PI/PID, καθώς και των τιμών των  $C_1$  και  $C_2$  (για την επιλογή του τρόπου ελέγχου). Για παράδειγμα, ο αντιστροφέας στο σύστημα μπαταριών λειτουργεί στη λειτουργία fQ, για την παροχή ελέγχου συχνότητας με

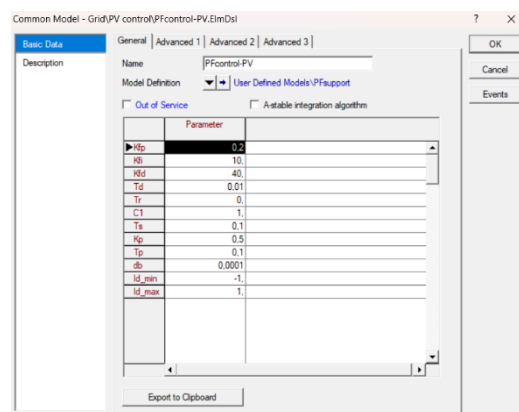


Εικόνα 18 - Κοινό Μοντέλο Ελεγκτή Q/V μπαταρίας

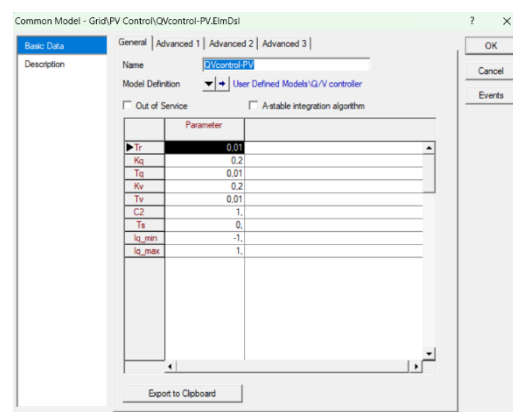


σταθερό συντελεστή ισχύος κατά τη διάρκεια της κανονικής κατάστασης, επομένως  $C1 = 0$  και  $C2 = 1$ .

Αντίστοιχα, τα κοινά μοντέλα του αντιστροφέα στο φωτοβολταϊκό σύστημα, ο οποίος λειτουργεί σε λειτουργία PQ, χρησιμοποιούν τους ίδιους ορισμούς μοντέλων που χρησιμοποιούνται στο σύστημα μπαταρίας, αλλά οι παράμετροι τους είναι διαφορετικές ( $C1 = 1$  και  $C2 = 1$ ).

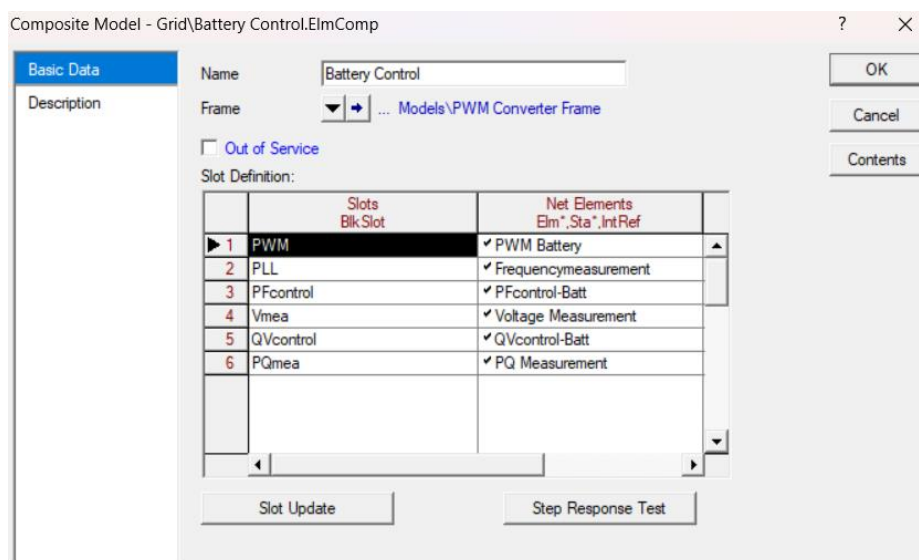


Εικόνα 20 - Κοινό Μοντέλο Ελεγκτή P/f Φωτοβολταϊκού



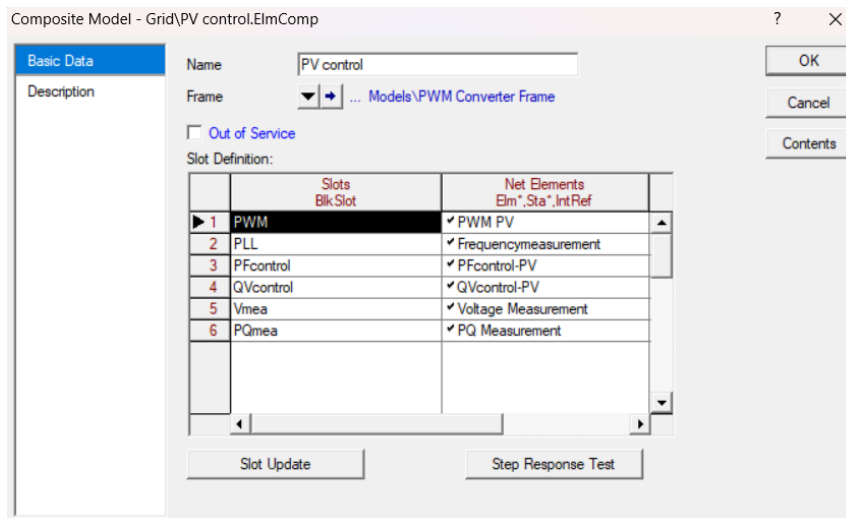
Εικόνα 21 - Κοινό Μοντέλο Ελεγκτή Q/V Φωτοβολταϊκού

Το σύνθετο μοντέλο είναι ένα αντικείμενο του δικτύου που αναπαριστά ένα πλήρες δυναμικό σύστημα. Τα σύνθετα μοντέλα του μετατροπέα και στα συστήματα φωτοβολταϊκών και μπαταρίας χρησιμοποιούν το ίδιο σύνθετο πλαίσιο (PWM Converter Frame.BlkDef) ωστόσο τα σχετικά στοιχεία του συστήματος, όπως τα στοιχεία δικτύου, τα κοινά μοντέλα και οι συσκευές μέτρησης, αντιστοιχίζονται διαφορετικά στο καθένα.



Εικόνα 22 - Σύνθετο Μοντέλο Ελέγχου Μπαταρίας



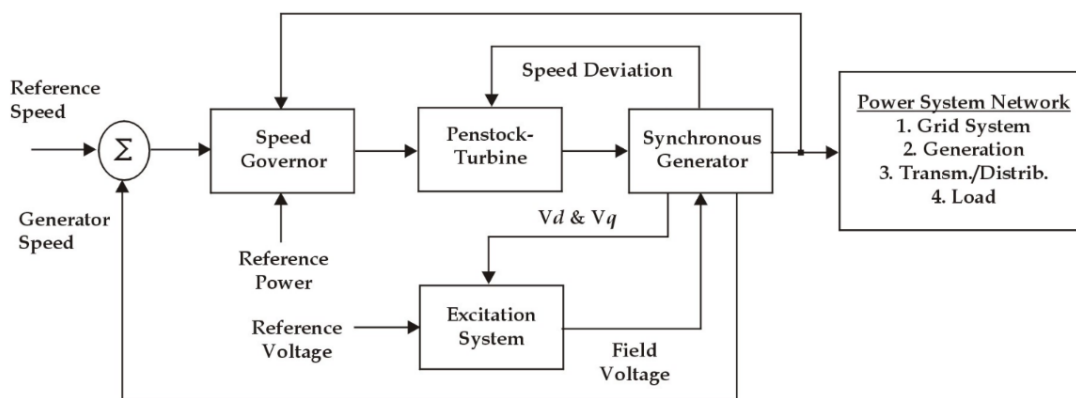


Εικόνα 23 - Σύνθετο Μοντέλο Ελέγχου Φωτοβολταϊκών

## Υδροηλεκτρική Γεννήτρια και Γεννήτρια Diesel

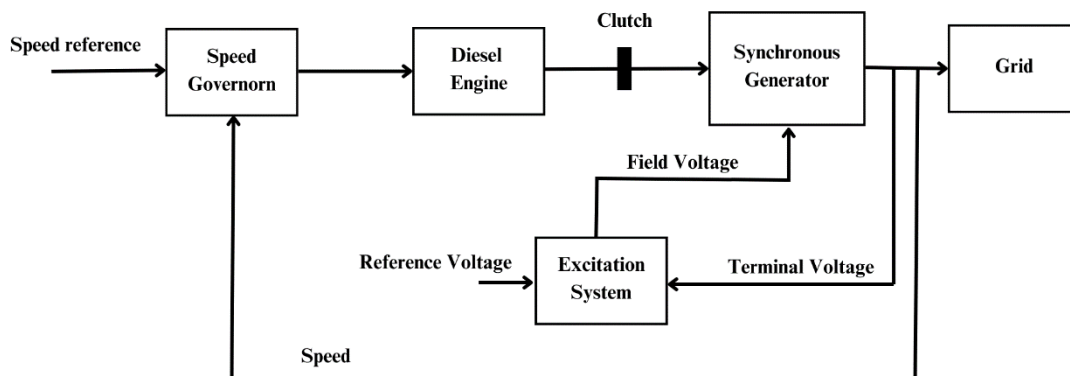
Οι υδρογεννήτριες μικρής κλίμακας χρησιμοποιούνται ευρέως σε αγροτικές περιοχές. Είναι συνήθως εγκαταστάσεις αξιοποίησης της διαθέσιμης παροχής νερού (run-of-river) χωρίς δεξαμενές αποθήκευσης. Η παραγωγή ισχύος καθορίζεται από τη στάθμη του νερού, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τις βροχοπτώσεις. Συνήθως, δεν υπάρχουν αυτόματοι ελεγκτές ισχύος και τάσης στις μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες. Αυτό σημαίνει ότι ο υδροστρόβιλος θα παράγει όσο το δυνατόν περισσότερη ισχύ στο σύστημα μικροδικτύου. Για να αποφευχθεί αυτή η κατάσταση, η υδρογεννήτρια θα αποσυνδεθεί ή θα ζητηθεί η περικοπή της ισχύος, εάν υπάρχει ενεργός ελεγκτής ισχύος.

Η παραγωγή ισχύος της υδρογεννήτριας μπορεί να μειωθεί με τη ρύθμιση της θέσης αγωγού πτώσης ύδατος για τη μείωση της ροής του νερού. Αυτή η πύλη προσαρμόζεται από τον σερβοκινητήρα ο οποίος με τη σειρά του ελέγχεται από τον ρυθμιστή (governor). Ο ρυθμιστής ταχύτητας θα παρακολουθεί τη μεταβολή της συχνότητας του συστήματος ή της ταχύτητας του στροβίλου και στη συνέχεια θα δίνει εντολή για την αλλαγή της θέσης του αγωγού. Το σύστημα διέγερσης το οποίο αποτελείται από τον διεγέρτη DC και τον ρυθμιστή τάσης χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της τάσης πεδίου στο εσωτερικό της σύγχρονης γεννήτριας, προκειμένου να παρέχεται το ικανοποιητικό επίπεδο τάσης και η ομαλή ισχύς στο σύστημα δικτύου. Η απλουστευμένη σχέση μεταξύ των βασικών στοιχείων των διαδικασιών παραγωγής ενέργειας και ρύθμισης της τάσης σε ένα μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό φαίνεται στην [Εικόνα 24](#).



Εικόνα 24 - Διάγραμμα Λειτουργίας Μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού Παραγωγής [32]

Παρόμοια με την υδρογεννήτρια, η συχνότητα και η τάση εξόδου της γεννήτριας diesel ρυθμίζονται με τη χρήση ρυθμιστή στροφών και διέγερσης αντίστοιχα. Η ταχύτητα της γεννήτριας εξαρτάται από την ποσότητα του εγχυόμενου καυσίμου και το φορτίο που εφαρμόζεται στον στροφαλοφόρο άξονα του κινητήρα. Ο ρυθμιστής στροφών διατηρεί σταθερή την ταχύτητα του κινητήρα και την ταχύτητα της γεννήτριας ρυθμίζοντας τη ροή της έγχυσης καυσίμου. Επιπλέον, η έξοδος του ρυθμιστή στροφών είναι το σήμα γκαζιού που ελέγχει το καύσιμο που εισέρχεται στον κινητήρα. Ο συμπλέκτης μπορεί να απαιτείται για την αποσύνδεση της σύγχρονης μηχανής από τον κινητήρα diesel, σε περίπτωση κινητήρα εσωτερικής καύσης υψηλής ταχύτητας (Εικόνα 25).

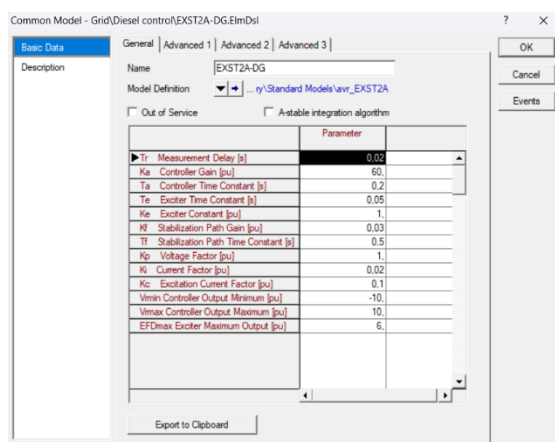


Εικόνα 25 - Διάγραμμα Λειτουργίας Γεννήτριας Ντιζελ

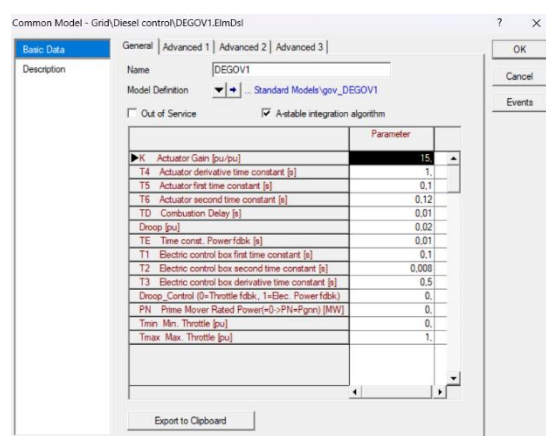
Παρόλο που μια εφεδρική γεννήτρια ντιζελ είναι μια δημοφιλής επιλογή για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της απώλειας παροχής από την κύρια υπηρεσία κοινής ωφέλειας, μια δεξαμενή καυσίμου 1-2 γαλονιών μπορεί να διαρκέσει μόνο από 8 έως 10 ώρες. Πρέπει επίσης να σταματήσει για περίπου 15 λεπτά για ανεφοδιασμό και στη συνέχεια συνεχίζει να λειτουργεί. Ως εκ τούτου, αυτό καθιστά δύσκολη τη χρήση μόνο της γεννήτριας diesel για την υποστήριξη του συστήματος, ιδίως σε περίπτωση μακροχρόνιων διακοπών.

Τόσο για την υδρογεννήτρια όσο και για την γεννήτρια diesel χρησιμοποιείται το ενσωματωμένο μοντέλο σύγχρονης μηχανής (ElmSym) του PowerFactory με ρυθμιστή στροφών και ελεγκτές διέγερσης. Η ισχύς του στροβίλου (pt) και η τάση διέγερσης (ve),

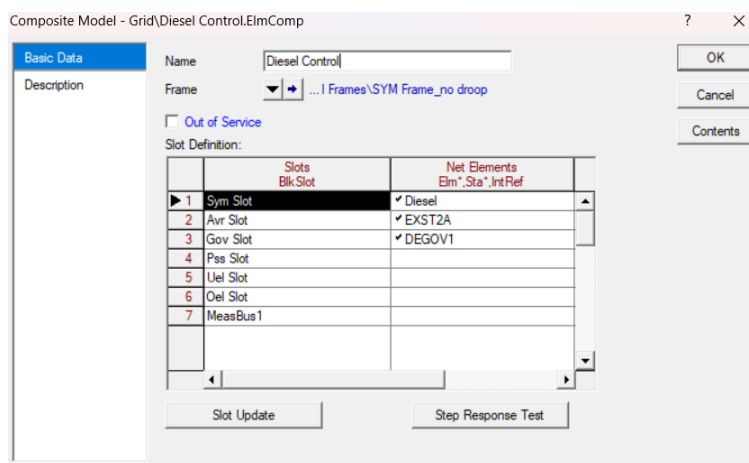
που αποτελούν τις εισόδους της σύγχρονης γεννήτριας, ελέγχονται καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στην παρούσα εργασία, για το σύνθετο πλαίσιο της σύγχρονης μηχανής και για τους ορισμούς μοντέλων του ρυθμιστή ταχύτητας και του συστήματος διέγερσης χρησιμοποιούνται κάποια από τα τυπικά μοντέλα της βιβλιοθήκης DIgSILENT. Αυτοί οι δύο τύποι γεννητριών χρησιμοποιούν το ίδιο σύνθετο πλαίσιο (SYM Frame\_no droop.BlkDef) το οποίο παρέχει τις διασυνδέσεις των σημάτων της σύγχρονης μηχανής που περιλαμβάνουν τις υποδοχές του ρυθμιστή, του διεγέρτη τάσης και του σταθεροποιητή. Ο ρυθμιστής και το σύστημα διέγερσης της υδρογεννήτριας βασίζονται στα μοντέλα HYG0V (gov\_HYG0V.BlkDef) και IEEE Type AC1 Excitation System (avr\_EXAC1.BlkDef), αντίστοιχα, ενώ η γεννήτρια ντιζελ χρησιμοποιεί τα μοντέλα DEGOV1 (gov\_DEGOV1.BlkDef) και IEEE Type ST2 Excitation System (avr\_EXST2A.BlkDef), ως ρυθμιστή στροφών και ρυθμιστή τάσης, αντίστοιχα.



Εικόνα 27 - Κοινό Μοντέλο Συστήματος Διέγερσης Γεννήτριας Diesel



Εικόνα 26 - Κοινό Μοντέλο Ρυθμιστή Γεννήτριας Diesel



Εικόνα 28 - Σύνθετο Μοντέλο Ελέγχου Γεννήτριας Diesel

Common Model - Grid\Hydro control\EXAC1.ElmDst

Basic Data

Name: EXAC1

Model Definition: ...ry\Standard Models\avr\_EXAC1

Out of Service: ☐ As stable integration algorithm

Parameter	Value
Tr Measurement Delay [s]	0.01
Tb Filter Delay Time [s]	0
Tc Filter Derivative Time Constant [s]	0
Ka Controller Gain [pu]	200
Ta Controller Time Constant [s]	0.095
Te Exciter Time Constant [s]	1.75
Kf Stabilization Path Gain [pu]	0.0374
Tf Stabilization Path Delay Time [s]	0.77
Kc Reactor regulation constant [pu]	0.1
Kd Exciter Amplitude reaction Factor [pu]	1.2
E1 Saturation Factor 1 [pu]	9.3
Se1 Saturation Factor 2 [pu]	0.2353
E2 Saturation Factor 3 [pu]	12.4
Se2 Saturation Factor 4 [pu]	1.9737
Ke Exciter Constant [pu]	1
Vmin Controller Minimum Output [pu]	-10
Vmax Controller Maximum Output [pu]	10

Export to Clipboard

Εικόνα 30 - Κοινό Μοντέλο Συστήματος Διέγερσης Υδρογεννήτριας

Common Model - Grid\Hydro control\HYGOV.ElmDst

Basic Data

Name: HYGOV

Model Definition: ...ry\Standard Models\gov\_HYGOV

Out of Service: ☐ As stable integration algorithm

Parameter	Value
Temporary Droop [pu]	0.1
Tr Governor Time Constant [s]	10
Tf Filter Time Constant [s]	0.1
Tg Servo Time Constant [s]	0.5
Tw Water Starting Time [s]	1
Kt Turbine Gain [pu]	3
Drub frictional losses factor pu [pu]	0.01
onl No Load Flow [pu]	0.01
R Permanent Droop [pu]	0.04
PN Turbine Rated Power(<math>\omega>P_{N1}+P_{ggn1}</math>) [MW]	0
Gmin Minimum Gate Limit [pu]	0
Velm Gate Velocity Limit [pu]	0.15
Gmax Maximum Gate Limit [pu]	0.325

Export to Clipboard

Εικόνα 29 - Κοινό Μοντέλο Συστήματος Ρυθμιστή Υδρογεννήτριας

Composite Model - Grid\Hydro control.ElmComp

Basic Data

Name: Hydro control

Frame: ...1 Frames\SYM Frame\_no droop

Out of Service: ☐

Slot Definition:

Slots	Blk Slot	Net Elements	Elm", Sta", Int Ref
1	Sym Slot	✓	Hydrogenerator
2	Avr Slot	✓	EXAC1
3	Gov Slot	✓	HYGOV
4	Pss Slot		
5	Uel Slot		
6	Oel Slot		
7	MeasBus1		

Slot Update

Step Response Test

Εικόνα 31 - Σύνθετο Μοντέλο Ελέγχου Υδρογεννήτριας

# 5<sup>ο</sup>

## Κεφάλαιο

---

### Προσομοίωση Νησιδοποίησης

#### Συμβάντα Προσομοίωσης

Για την προσομοίωση RMS της λειτουργίας του μικροδικτύου μετά από νησιδοποίηση έγινε χρήση δύο αντικειμένων συμβάντων, το συμβάν διακόπτη (switch event - EvtSwitch) και το συμβάν παραμέτρου (parameter event - EvtParam). Θεωρήθηκε ότι η νησιδοποίηση συνέβη όταν το μικροδίκτυο έχει τη μέγιστη κατανάλωση φορτίου (14:30), περίπου 127 kW. Αυτή τη στιγμή τα φωτοβολταϊκά παρέχουν 10 kW και η υδροηλεκτρική γεννήτρια παρέχει σταθερά 40 kW. Το σύστημα μπαταριών χρειάζεται να παρέχει περίπου 70 kW ενεργού ισχύος για τον μηχανισμό εξισορρόπησης ισχύος του συστήματος, ενώ η ζήτηση φορτίου στο σύστημα μετά τη νησιδοποίηση έχει μειωθεί ελαφρώς λόγω της πτώσης της συχνότητας και της τάσης του συστήματος. Το νησιδοποιημένο σύστημα ζητά επίσης από την μπαταρία, τα φωτοβολταϊκά και τα υδροσυστήματα να εγχέουν την άεργο ισχύ σε περίπου 61,5 kVar για να διατηρήσουν το επίπεδο τάσης εντός του θεσμοθετημένου ορίου.

Στην αρχική κατάσταση θεωρείται ότι το σύστημα μπαταριών είναι πλήρως φορτισμένο (SOC = 90%). Η σύνδεση με το κυρίως δίκτυο διακόπτεται στα 10 δευτερόλεπτα και επανέρχεται στα 160 δευτερόλεπτα. Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι χαμηλότερο από 10% στα 96s, οπότε και απαιτείται υποστήριξη από την γεννήτρια diesel. Στον Πίνακα 5 συνοψίζονται τα συμβάντα προσομοίωσης από την στιγμή της νησιδοποίησης μέχρι και την επιστροφή στην αρχική κατάσταση. Στην Εικόνα 32 φαίνονται αναλυτικά τα συμβάντα προσομοίωσης όπως αυτά δημιουργήθηκαν στο DIgSILENT PowerFactory.

Πίνακας 5 - Σύνοψη Συμβάντων Προσομοίωσης

Ωρα (δευτερόλεπτα)	Συμβάν
10	Ο διακόπτης στο σημείο κοινής σύνδεσης ανοίγει
10.1	<p>Ο κεντρικός έλεγχος δίνει εντολή για αλλαγή κατάστασης συγκεκριμένων διακοπών</p> <p>Ο κεντρικός έλεγχος δίνει εντολή στο φωτοβολταϊκό σύστημα να μεταβεί από λειτουργία PQ σε λειτουργία PV (<math>C_2=0</math>)</p> <p>Το φωτοβολταϊκό σύστημα συνεχίζει να παρέχει ισχύ 10 kW</p> <p>Ο κεντρικός έλεγχος δίνει εντολή στο σύστημα μπαταριών να μεταβεί από λειτουργία fQ σε λειτουργία fV (<math>C_2=0</math>)</p> <p>Η συνδεδεμένη ισχύς από την μπαταρία είναι περίπου 70 kW</p>
96	Η κατάσταση φόρτισης του συστήματος μπαταριών πέφτει κάτω από 10%
96.1	<p>Ο κεντρικός έλεγχος ανοίγει τη γεννήτρια diesel</p> <p>Ο κεντρικός έλεγχος δίνει εντολή στο σύστημα μπαταριών να μεταβεί από λειτουργία fV σε λειτουργία PV (<math>C_1=0</math>)</p>
160	Ο διακόπτης στο σημείο κοινής σύνδεσης κλείνει
160.1	<p>Ο κεντρικός έλεγχος δίνει εντολή για αλλαγή κατάστασης συγκεκριμένων διακοπών</p> <p>Ο κεντρικός έλεγχος κλείνει τη γεννήτρια diesel</p>
161	<p>Ο κεντρικός έλεγχος δίνει εντολή στο φωτοβολταϊκό σύστημα να μεταβεί από λειτουργία PV σε λειτουργία PQ (<math>C_2=1</math>)</p> <p>Ο κεντρικός έλεγχος δίνει εντολή στο σύστημα μπαταριών να μεταβεί από λειτουργία PV σε λειτουργία PQ (<math>C_2=1</math>)</p>
175	Ο κεντρικός έλεγχος δίνει εντολή στο σύστημα μπαταριών να μεταβεί από λειτουργία PQ σε λειτουργία fQ ( $C_2=1$ )

## Simulation Events/Fault - Study Cases\Study Case\Simulation Events/Fault :

	Name	Time	Object StaBar*,ElmTerm*,....	Out of Service
	Islanding_PCC (Open)	10,	PCC	<input type="checkbox"/>
	Islanding_ATS1-1 (Open)	10,1	ATS1-1	<input type="checkbox"/>
	Islanding_ATS2-1 (Open)	10,1	ATS2-1	<input type="checkbox"/>
	Islanding_BRK1 (Open)	10,1	BRK1	<input type="checkbox"/>
	Islanding_BRK2 (Open)	10,1	BRK2	<input type="checkbox"/>
	Islanding_BRK3 (Close)	10,1	BRK3	<input type="checkbox"/>
	Islanding_BRK4 (Close)	10,1	BRK4	<input type="checkbox"/>
	Islanding_BRK5 (Close)	10,1	BRK5	<input type="checkbox"/>
	Batt-QV-C2(Q to V)	10,1	QVcontrol-Batt	<input type="checkbox"/>
	Batt-QV-Iqmin(-0.3293)	10,1	QVcontrol-Batt	<input type="checkbox"/>
	PV-QV-C2(Q to V)	10,1	QVcontrol-PV	<input type="checkbox"/>
	PV-QV-Iqmin(-0.24216)	10,1	QVcontrol-PV	<input type="checkbox"/>
	Batt-QV-Iqmin(-0.24216)	96,1	QVcontrol-Batt	<input type="checkbox"/>
	LV_02_DG01 (Close)	96,1	ATS2-2	<input type="checkbox"/>
	Batt-PF-C1 (F to P)	96,1	PFcontrol-Batt	<input type="checkbox"/>
	Batt-PF-Pref (-0.5)	96,1	PFcontrol-Batt	<input type="checkbox"/>
	Islanding_PCC (close)	160,	PCC	<input type="checkbox"/>
	Islanding_ATS1-1 (Close)	160,1	ATS1-1	<input type="checkbox"/>
	Islanding_ATS2-1 (Close)	160,1	ATS2-1	<input type="checkbox"/>
	Islanding_BRK1 (Close)	160,1	BRK1	<input type="checkbox"/>
	Islanding_BRK2 (Close)	160,1	BRK2	<input type="checkbox"/>
	Islanding_BRK3 (Open)	160,1	BRK3	<input type="checkbox"/>
	Islanding_BRK4 (Open)	160,1	BRK4	<input type="checkbox"/>
	Islanding_BRK5 (Open)	160,1	BRK5	<input type="checkbox"/>
	LV_02_DG01 (Open)	160,1	ATS2-2	<input type="checkbox"/>
	PV-QV-C2(V to Q)	161,	QVcontrol-PV	<input type="checkbox"/>
	Batt-PF-Pref (0)	161,	PFcontrol-Batt	<input type="checkbox"/>
	Batt-QV-C2(V to Q)	161,	QVcontrol-Batt	<input type="checkbox"/>
	Batt-PF-Reset Control	175,	PFcontrol-Batt	<input type="checkbox"/>

Εικόνα 32 - Ορισμός Συμβάντων Προσομοίωσης

## Δημιουργία γραφικών παραστάσεων προσομοίωσης και αρχικοποίησης δεδομένων

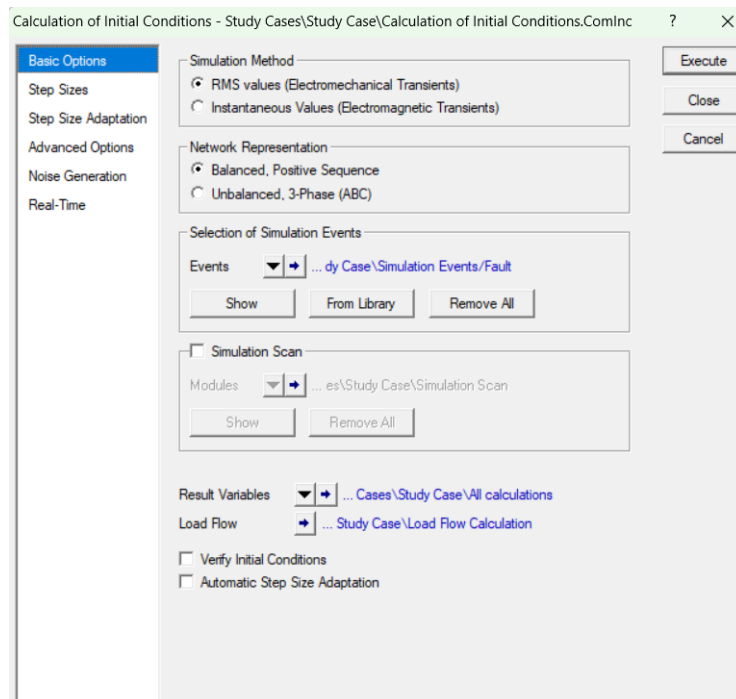
Στα πλαίσια της δυναμικής παρουσίασης μπορούν να παρακολουθούνται χρονικά εξαρτώμενες μεταβλητές (ρεύμα, τάση, ισχύς, σήματα), όπως σήματα εισόδου και εξόδου, μεταβλητές κατάστασης και παράμετροι υπολογισμών και στοιχείων. Πριν την εκτέλεση της προσομοίωσης RMS προστίθενται οι προς μελέτη μεταβλητές οι οποίες είναι:

- ενεργός και άεργος ισχύς:
  - γεννήτριας diesel
  - υδρογεννήτριας
  - μετατροπέα PWM συστήματος φωτοβολταϊκών
  - μετατροπέα PWM συστήματος μπαταριών



- τάση:
  - στο σημείο κοινής σύνδεσης από την μεριά της υψηλής τάσης
  - στο σημείο κοινής σύνδεσης από την μεριά της χαμηλής τάσης
- συχνότητα στο σημείο κοινής σύνδεσης από την μεριά της χαμηλής τάσης

Τέλος, πριν την εκτέλεση της προσομοίωσης υπολογίζονται οι αρχικές συνθήκες του συστήματος δοκιμής, όλες οι μεταβλητές κατάστασης των ελεγκτών, των δυναμικών μοντέλων καθώς και όλες οι ενεργές συσκευές που μπορούν να επηρεάσουν την προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου. Ο υπολογισμός των αρχικών συνθηκών εκτελείται μέσα από το λογισμικό του DIgSILENT PowerFactory με τη χρήση της μεθόδου διαδοχικών προσεγγίσεων Newton-Raphson.



Εικόνα 33 - Υπολογισμός Αρχικών Συνθηκών του Συστήματος Δοκιμής

```
DIgSI/info - Element '■ External Grid' is local reference in separated area of '→HV_PCC'
DIgSI/info - Grid split into 4 isolated areas
DIgSI/info - Calculating load flow...
DIgSI/info - -----
DIgSI/info - Start Newton-Raphson Algorithm...
DIgSI/info - load flow iteration: 1
DIgSI/info - load flow iteration: 2
DIgSI/info - Newton-Raphson converged with 2 iterations.
DIgSI/info - Load flow calculation successful.
DIgSI/info - -----
DIgSI/info - Report of Control Condition for Relevant Controllers
DIgSI/info - -----
DIgSI/info - Control conditions for all controllers of interest are fulfilled.
DIgSI/info - Element '■ External Grid' is local reference in separated area of '→HV_PCC'
DIgSI/info - Grid split into 4 isolated areas
DIgSI/info - Element '■ External Grid' is reference in 50,0 Hz-system
DIgSI/info - (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated.
```

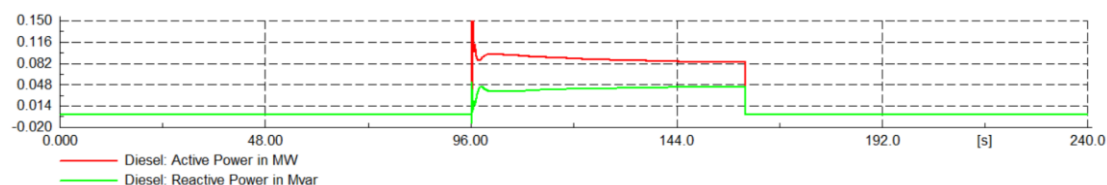
Εικόνα 34 - Παράθυρο Εξόδου DIgSILENT μετά τον Υπολογισμό Αρχικών Συνθηκών



## Αποτελέσματα Προσομοίωσης RMS

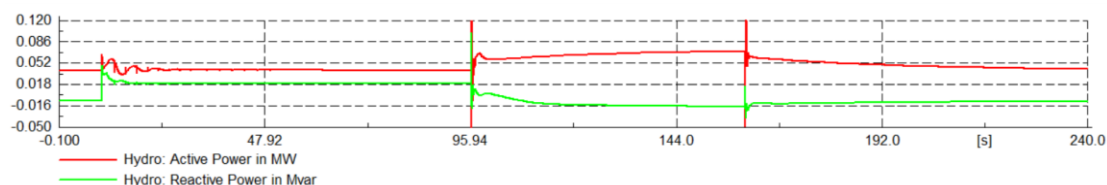
### Ενεργός & άεργος ισχύς γεννητριών και μετατροπέων PWM

Η γεννήτρια diesel είναι αρχικά εκτός λειτουργίας και ενεργοποιείται στα 96 sec όταν η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών (SOC) είναι χαμηλότερη από 10%. Η γεννήτρια diesel αρχίζει να παρέχει ενεργό και άεργο ισχύ στο σύστημα του μικροδικτύου τόσο για παροχή στα φορτία αλλά και για την φόρτιση της μπαταρίας.

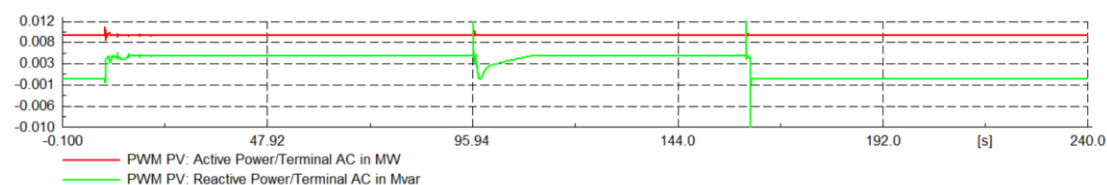


Διάγραμμα 3 - Ενεργός και Άεργος Ισχύς Γεννήτριας Diesel

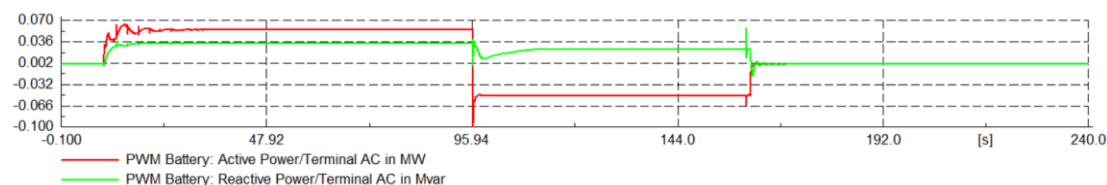
Διαπιστώνεται ότι η γεννήτρια diesel μπορεί να υποστηρίξει επιτυχώς τη μετάβαση αυτής της μπαταρίας, από την κατάσταση εκφόρτισης στην κατάσταση φόρτισης.



Διάγραμμα 4 - Ενεργός και Άεργος Ισχύς Υδρογεννήτριας



Διάγραμμα 5 - Ενεργός και Άεργος Ισχύς Μετατροπέα PWM Συστήματος Φωτοβολταϊκών



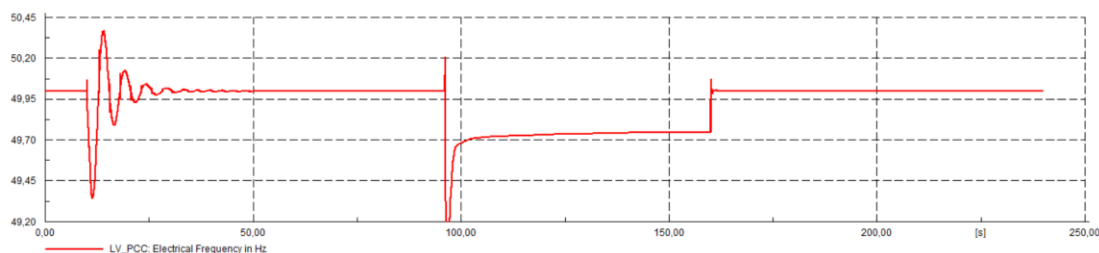
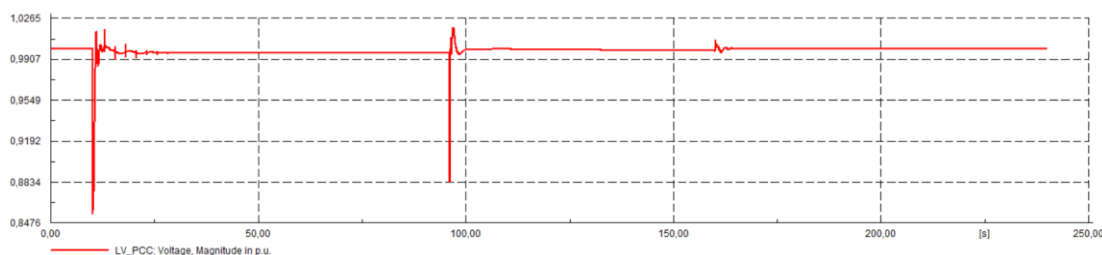
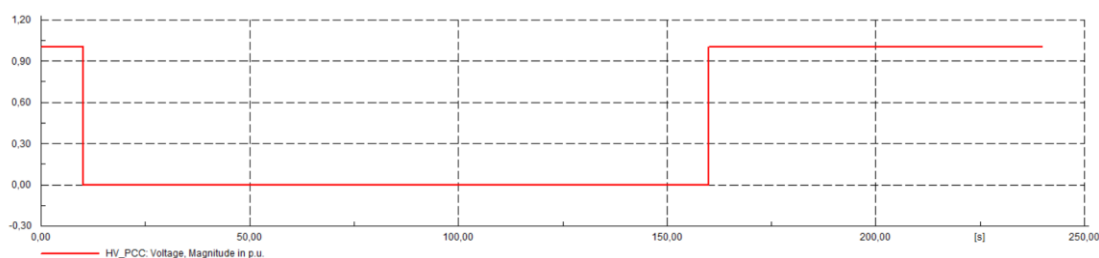
Διάγραμμα 6 - Ενεργός και Άεργος Ισχύς Μετατροπέα PWM Συστήματος Μπαταριών

Το υδροηλεκτρικό σύστημα και το σύστημα φωτοβολταϊκών θα μεταβούν από τη λειτουργία PQ στη λειτουργία PV όταν ανιχνευθεί η κατάσταση νησιδοποίησης. Η ενεργός ισχύς της υδρογεννήτριας παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις ενώ η ενεργός

ισχύς από το φωτοβολταϊκό σύστημα εγχέεται στο σύστημα μικροδικτύου σύμφωνα με τη μέγιστη ισχύ που εξάγεται από την ηλιακή ακτινοβολία.

Το σύστημα μπαταριών απορροφά ενεργό ισχύ από τα 96 sec μέχρι τα 160 sec όποτε και κλείνει ο διακόπτης στο σημείο κοινής σύνδεσης και το μικροδίκτυο βγαίνει από τη λειτουργία νησιδοποίησης.

### Τάση και συχνότητα σημείου κοινής σύνδεσης



Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι τα προτεινόμενα δυναμικά μοντέλα μπορούν να αντιμετωπίσουν τις αποκλίσεις της συχνότητας και της τάσης αποτελεσματικά κατά τη διάρκεια μετάβασης στη νησιδοποιημένη λειτουργία και κατά την επαναφορά της σύνδεσης με το κυρίως δίκτυο. Ο αντιστροφάς του συστήματος μπαταριών ενεργεί ως κύρια συσκευή παροχής τάσης και συχνότητας αναφοράς καθώς ανταποκρίνεται γρήγορα στην μεταβολή, διατηρώντας τη σταθερότητα του μικροδικτύου. Παράλληλα με τον αντιστροφέα του συστήματος

φωτοβολταϊκών παρέχουν γρήγορο έλεγχο της τάσης δίνοντας άεργο ισχύ στο σύστημα.

## Συμπεράσματα

Το μικροδίκτυο είναι ένα εναλλακτικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να συμβάλει στην μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων και στην αξιόπιστη παροχή ενέργειας σε απομακρυσμένες ή πληγείσες από καταστροφές περιοχές. Λειτουργεί αυτόνομα, απαιτεί όμως ένα σύνθετο σύστημα ελέγχου, προσφέροντας αρκετά πλεονεκτήματα αλλά και αξιοσημείωτα μειονεκτήματα.

Πλεονεκτήματα ανάπτυξης μικροδικτύων:

- Δυνατότητα απομόνωσης κατά τη διάρκεια διαταραχών του κεντρικού δικτύου διασφαλίζοντας αδιάλειπτη παροχή ενέργειας, οδηγώντας σε αυξημένη αξιοπιστία.
- Μείωση απωλειών μεταφοράς λόγω της τοπικής παραγωγής, αύξηση της απόδοσης του δικτύου που έχει ως αποτέλεσμα οικονομικά οφέλη.
- Μπορεί να υποστηρίξει το κεντρικό δίκτυο σε περιόδους αιχμής αποτρέποντας την αποτυχία του.
- Περιβαλλοντικά οφέλη με την προώθηση και ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Μειονεκτήματα μικροδικτύου:

- Υψηλό αρχικό κόστος επενδύσεων για την δημιουργία των υποδομών
- Τα σύνθετα συστήματα ελέγχου για την παρακολούθηση των παραμέτρων τάσης και συχνότητας αυξάνουν την πολυπλοκότητα διαχείρισης των μεταβολών φορτίου.
- Η χρήση συστημάτων αποθήκευσης απαιτεί αρκετό χώρο και αυξάνουν το κόστος συντήρησης.
- Απαιτείται θεσμοθέτηση νέων νομοθετικών πλαισίων ανάπτυξη προτύπων για την διασφάλιση της συνέπειας.

## Μελλοντική Έρευνα

Υπάρχουν πολλές περιοχές που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας για την βελτίωση της κατανόησης και του ελέγχου των μικροδικτύων. Θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθούν οι επιδράσεις διαφόρων τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική που δεν συμπεριλήφθηκε σε αυτή την έρευνα. Η ένταξη περισσότερων και διαφοροποιημένων ανανεώσιμων πηγών μπορεί να αυξήσει την πολυπλοκότητα της διαχείρισης, αλλά και να προσφέρει περισσότερες ευκαιρίες για βελτιστοποίηση της απόδοσης.

Η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας και της ευελιξίας διαφορετικών αλγορίθμων διαχείρισης ενέργειας και στρατηγικών ελέγχου για την λειτουργία μικροδικτύων σε νησιδοποιημένη λειτουργία θα μπορούσε να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες. Συγκεκριμένα, η χρήση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης θα μπορούσε

να βελτιώσει τη δυναμική απόκριση και την αποτελεσματικότητα της διαχείρισης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο.

Τέλος, η μελέτη της επίδρασης εξωτερικών παραγόντων, όπως οι κλιματικές συνθήκες και οι διακυμάνσεις στην τιμή της ενέργειας, μπορεί να συνεισφέρει στην ανάπτυξη και προώθηση των μικροδικτύων ως μια βιώσιμη ενεργειακή λύση.



## Βιβλιογραφία

- [1] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, «rae.gr,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.rae.gr/sxetika-me-ti-rae/ektheseis-pepragmenon/>. [Πρόσβαση 2024].
- [2] G. Giacosa και T. R. Walker, «A policy perspective on Nova Scotia's plans to reduce dependency on fossil fuels for electricity generation and improve air quality,» *Cleaner Production Letters, Volume 3*, 2022.
- [3] Ελληνική Στατιστική Αρχή, «statistics.gr,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.statistics.gr/el/sdg7>. [Πρόσβαση 2024].
- [4] International Energy Agency, «Electricity Market Report,» 2023.
- [5] I. Perez-Arriaga, *Regulation of the Power Sector*, London: Springer, 2013.
- [6] D. M. Ward, «The effect of weather on grid systems and the reliability of electricity supply,» *Climate Change*, pp. 103-113, 13 November 2013.
- [7] A. G. Migisha, J. M. Ntayi, F. Buyinza, L. Senyonga, J. Abaliwano και M. S. Adaramola, «Review of Concepts and Determinants of Grid Electricity Reliability,» *energies*, 14 October 2023.
- [8] M. McGranaghan, M. Olearczyk και C. Gellings, «Enhancing Distribution Resiliency: Opportunities for Applying Innovative Technologies,» *Electric Power Research Institute*, 11 January 2013.
- [9] G. Davis, A. F. Snyder και J. Mader, «The future of Distribution System Resiliency,» σε *Clemson University Power Systems Conference (PSC)*, 2014.
- [10] J. Z. Hare, X. Shi, S. Gupta και A. Bazzi, «A review of faults and fault diagnosis in micro-grids electrical energy infrastructure,» σε *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014.
- [11] A. G. Migisha, J. M. Ntayi, F. Buyinza, L. Senyonga, J. Abaliwano και M. S. Adaramola, «Review of Concepts and Determinants of Grid Electricity Reliability,» *energies*, 24 October 2023.
- [12] International Energy Agency, «Electricity Grids and Secure Energy Transitions,» IEA, 2023.
- [13] European Commission, «Clean energy for all Europeans package,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en).

- [14] International Energy Agency, «Electricity security matters more than ever,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iea.org/reports/power-systems-in-transition/electricity-security-matters-more-than-ever>.
- [15] EMBER, «Global Electricity Review,» 2024.
- [16] M. SHAFIULLAH, S. D. AHMED και F. A. AL-SULAIMAN, «Grid Integration Challenges and Solution Strategies for Solar PV Systems: A Review,» *IEEE ACCESS*, 12 May 2022.
- [17] International Energy Agency, «Hydropower Special Market Report,» IEA, 2021.
- [18] A. Olabi, C. Onumaegbu, T. Wilberforce, M. Ramadan, M. A. Abdelkareem και A. H. Al e Alami, «Critical review of energy storage systems,» *Energy*, 3 October 2020.
- [19] Γ. Πριονιστής, «Αποκεντρωμένος Έλεγχος Δικτύου Διανομής με Διεσπαρμένη,» ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ, 2018.
- [20] European Commission, «Smart grids and meters,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters_en).
- [21] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee και J.-W. Jung, «AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 387-405, 23 April 2013.
- [22] S. N. Bhaskara και B. H. Chowdhury, «Microgrids – A Review of Modeling, Control, Protection, Simulation and Future Potential,» *IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA*, pp. 1-7, 2012.
- [23] R. Farooq, M. Laeeq, M. Ahmad, S. Q. Akbar, H. A. Khan και N. A. Zaffar, «Smart DC microgrids: Modeling and power flow analysis of a DC Microgrid for off-grid and weak-grid connected communities,» σε *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2014.
- [24] N. Altin και S. E. Eyimaya, «A Review of Microgrid Control Strategies,» σε *10th IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications* , Istanbul, 2021.
- [25] K. Jithin, R. Harikumar, N. Mayadevi και V. P. Mini , «A Centralized Control Algorithm for Power Management in Interconnected DC Microgrids,» σε *Proceedings of Symposium on Power Electronic and Renewable Energy Systems Control*, 2021.
- [26] J. Vasiljevska\*, J. Pec, as Lopes και M. Matos, «Evaluating the impacts of the multi-microgrid concept using multicriteria decision aid,» *Electric Power Systems Research*, pp. 44-51, October 2012.

- [27] T. Caldognetto και P. Tenti, «Microgrids Operation Based on Master-Slave Cooperative Control,» *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* ( Volume: 2, Issue: 4), pp. 1081-1088, December 2014.
- [28] Q. Zhou, Z. Tian, M. Shahidehpour, X. Liu, A. Alabdulwahab και A. Abusorrah, «Optimal Consensus-Based Distributed Control Strategy for Coordinated Operation of Networked Microgrids,» *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 35, Issue 3, pp. 2452 - 2462, May 2020.
- [29] R. Schonbergerschonberger, R. Duke και S. D. Round, «DC-Bus Signaling: A Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable Nanogrid,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1453-1460, October 2006.
- [30] M. W. Khana και J. Wang, «The research on multi-agent system for microgrid control and optimization,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1399-1411, 29 May 2017.
- [31] DIgSILENT PowerFactory, *Advanced Tutorial Dynamic Modelling (DSL)*, 2016.
- [32] A. Wagas, H. Farooq, A. u. Rehman και M. E. F. Farrag, «Modeling and performance analysis of micro-hydro generation controls considering power system stability,» σε *2017 First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT)*, Karachi, Pakistan, 2017.