



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Τεχνικές Υψηλών Τάσεων για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεοδώρα Νίκου

**Επιβλέπων :** Χρήστος Χριστοδούλου

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2024





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

## Τεχνικές Υψηλών Τάσεων για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεοδώρα Μ. Νίκου

**Επιβλέπων :** Χρήστος Χριστοδούλου  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2024.

.....  
Χρήστος Χριστοδούλου  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ιωάννης Γκόνος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Νικόλαος Παπανικολάου  
Καθηγητής ΔΠΘ

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

.....

Θεοδώρα Νίκου

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

Copyright © Θεοδώρα Νίκου, 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 και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

---

Η κλιματική αλλαγή έχει αυξήσει σημαντικά την συχνότητα και την σφοδρότητα των ακραίων καιρικών φαινομένων. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, οι υποδομές των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας - και συνεπώς και των Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας - επηρεάζονται, οδηγώντας σε δυσλειτουργίες και διακοπές ηλεκτροδότησης. Επιπλέον, η σύγχρονη κοινωνία έχει αυξήσει τις απαιτήσεις της σε ενέργεια. Οι διεσπαρμένες παραγωγές εμφανίζονται σε όλη την έκταση του Δικτύου και αυξάνονται ραγδαία. Παράλληλα, οι κυβερνοεπιθέσεις μπορούν να υποβαθμίσουν την λειτουργία του Δικτύου, καθώς οι νέες τεχνολογίες που τοποθετούνται για την εποπτεία και την διαχείριση του Δικτύου είναι επιρρεπείς σε αυτές. Επομένως, ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός ανθεκτικού Δικτύου καθίσταται επιβεβλημένη ανάγκη, προκειμένου να μειωθούν οι επιπτώσεις των φαινομένων στο Δίκτυο και ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται η ποιοτική και αδιάλειπτη εξυπηρέτηση των καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ανάπτυξη ενός ανθεκτικού Δικτύου αποτελεί πρόκληση για τους διαχειριστές του. Γι' αυτόν τον λόγο είναι απαραίτητο να βρεθούν κατάλληλες μέθοδοι ενίσχυσης της ανθεκτικότητας του Δικτύου, με την εφαρμογή των οποίων περιορίζεται στο ελάχιστο ή και εξαλείφεται η επίδραση των ακραίων καιρικών φαινομένων και άλλων απειλών στο Δίκτυο. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην εύρεση κατάλληλων τεχνικών λύσεων, με την εφαρμογή των οποίων το Δίκτυο μπορεί και λειτουργεί εύρυθμα ακόμη και σε περιπτώσεις διαταραχής. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν σενάρια με μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης στο Δίκτυο, τα οποία εξετάζονται με προσομοίωση στο πραγματικό Δίκτυο Διανομής της Κεφαλονιάς. Για την αντιμετώπιση των δυσμενών για το Δίκτυο καταστάσεων που δημιουργούν αυτά τα σενάρια, προτείνονται τρόποι αποκατάστασης της ομαλής λειτουργίας, έπειτα από δοκιμές. Από τις προσομοιώσεις αυτές εξάγονται τα σχετικά αποτελέσματα και γίνεται αξιολόγηση των δοκιμών, έτσι ώστε να εφαρμοστεί τελικά η καλύτερη μέθοδος αντιμετώπισης, ανάλογα την περίπτωση.

### Λέξεις-κλειδιά

Ανθεκτικότητα, Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, κλιματική αλλαγή, ακραία καιρικά φαινόμενα, κυβερνοεπιθέσεις, «έξυπνα» Δίκτυα, μικροδίκτυα, τεχνητή νοημοσύνη



## Abstract

---

Climate change has significantly increased the frequency and intensity of extreme weather events. As a result, the infrastructure of Power Systems - and consequently the Electric Distribution Networks - is affected, leading to malfunctions and power outages. Additionally, modern society has increased its energy demands. Distributed generation appears throughout the network and is rapidly expanding. At the same time, cyberattacks can degrade the operation of the Network, as the new technologies implemented for its monitoring and management are vulnerable to them. Therefore, the design and operation of a resilient Network becomes an imperative need, to reduce the impact of these phenomena on the Network while ensuring quality and uninterrupted service for electricity consumers.

The development of a resilient Network presents a challenge for its operators. For this reason, it is necessary to find appropriate methods to enhance the Network's resilience. The application of these methods can minimize or even eliminate the impact of extreme weather events and other threats on the Network. This thesis aims to identify suitable technical solutions, through the application of which the Network can function properly even in cases of disruption. To this end, scenarios with a high probability of occurrence in the Network were created, which are examined through simulation on the actual Distribution Network of Kefalonia. To address the adverse conditions for the Network created by these scenarios, methods of restoring normal operation are proposed after testing. The results from these simulations are then evaluated, leading to the implementation of the best mitigation method depending on the situation.

### Key words

Grid resilience, Power Distribution Network, climate change, extreme weather events, cyber-attacks, “smart” Grids, microgrids, artificial intelligence





## Ευχαριστίες

---

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επίκουρο καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Χρήστο Χριστοδούλου, που μου έδωσε την δυνατότητα, μέσω της ανάθεσης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στην υποψήφια διδάκτορα του Ε.Μ.Π. κ. Ελένη Γουλιώτη για τις επισημάνσεις, την βοήθεια, τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε, την γενική συνεισφορά της στο τελικό αποτέλεσμα και την ιδανική συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την κ. Βασιλική Κονταργύρη, Ε.ΔΙ.Π. του Ε.Μ.Π. για τις εύστοχες παρατηρήσεις της όπως επίσης και τον κ. Εμμανουήλ Βουμβουλάκη για την καθοδήγηση του αναφορικά με τις προσομοιώσεις που περιλαμβάνει η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Η βοήθεια και οι γνώσεις που μου προσέφεραν θα αποτελέσουν πολύτιμα εφόδια για την μετέπειτα επαγγελματική μου σταδιοδρομία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την βοήθεια, την στήριξη και την κατανόηση που έδειξαν σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον στενό φιλικό μου κύκλο για την παρέα, την αλληλοϋποστήριξη, τις κοινές μας προσπάθειες και την ανταλλαγή γνώσεων. Η παρουσία σας ήταν πολύτιμη και έκανε αυτή τη διαδρομή πιο όμορφη και λιγότερο απαιτητική.

## Περιεχόμενα

|                                                                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Περίληψη.....</b>                                                                                                                     | <b>5</b>  |
| <b>Abstract.....</b>                                                                                                                     | <b>7</b>  |
| <b>Ευχαριστίες.....</b>                                                                                                                  | <b>9</b>  |
| <b>Περιεχόμενα .....</b>                                                                                                                 | <b>10</b> |
| <b>Κεφάλαιο 1: Κλιματική αλλαγή και άλλες απειλές προς το Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας</b>                                                | <b>13</b> |
| 1.1 Εισαγωγή - Στόχος της διπλωματικής εργασίας.....                                                                                     | 13        |
| 1.2 Το ελληνικό Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....                                                                                | 13        |
| 1.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά Δικτύου.....                                                                                                 | 13        |
| 1.2.2 Ο ρόλος του ΔΕΔΔΗΕ.....                                                                                                            | 14        |
| 1.2.3 Βασικά μεγέθη του Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....                                                                       | 15        |
| 1.2.4 Δραστηριότητες του Διαχειριστή Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ).....                                                 | 16        |
| 1.3 Κλιματική αλλαγή και καιρικά φαινόμενα επικίνδυνα για το Δίκτυο Διανομής (πυρκαγιές, πλημμύρες, καύσωνες, σφοδρές χιονοπτώσεις)..... | 16        |
| 1.3.1 Συνέπειες και επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.....                                                                               | 16        |
| 1.3.2 Τρόποι περιορισμού της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στα Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής ενέργειας.....                              | 19        |
| 1.3.3 Διεθνείς συμφωνίες για το κλίμα και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής....                                                    | 19        |
| 1.4 Άλλες απειλές σε βάρος του Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας (κυβερνοεπιθέσεις, σεισμοί κ.α.).....                                        | 21        |
| 1.4.1 Σεισμοί.....                                                                                                                       | 21        |
| 1.4.2 Κυβερνοεπιθέσεις (cyber - attacks) .....                                                                                           | 23        |
| 1.4.3 Πολεμικές συρράξεις - Τρομοκρατικές επιθέσεις.....                                                                                 | 24        |
| 1.5 Ακραία καιρικά φαινόμενα και ελληνικό Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....                                                      | 25        |
| 1.5.1 Πλημμύρες - Μάνδρα, Νοέμβριος 2017.....                                                                                            | 26        |
| 1.5.2 Κυκλώνας «Ιανός», Σεπτέμβριος 2020.....                                                                                            | 27        |
| 1.5.3 Κακοκαιρία «Μήδεια», Φεβρουάριος 2021.....                                                                                         | 29        |

|                                                                                                                 |                                                                                                  |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.5.4                                                                                                           | Κύμα καύσωνα - Πυρκαγιές, Αύγουστος 2021.....                                                    | 30        |
| 1.5.5                                                                                                           | Κακοκαιρία «Έλπις», Ιανουάριος 2022: .....                                                       | 33        |
| 1.5.6                                                                                                           | Βέλτιστες πρακτικές αντιμετώπισης καταστροφών του Δικτύου από ακραία καιρικά φαινόμενα.....      | 36        |
| <b>Κεφάλαιο 2: Μέθοδοι αντιμετώπισης επιπτώσεων των ακραίων φαινομένων στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας.....</b> |                                                                                                  | <b>38</b> |
| 2.1                                                                                                             | Ανθεκτικότητα Δικτύου.....                                                                       | 38        |
| 2.1.1                                                                                                           | Παράμετροι ανθεκτικότητας – Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.....                                        | 39        |
| 2.1.2                                                                                                           | Καμπύλη ανθεκτικότητας.....                                                                      | 40        |
| 2.1.3                                                                                                           | Τύποι ανθεκτικότητας.....                                                                        | 42        |
| 2.2                                                                                                             | Μέτρηση και μοντελοποίηση επίδρασης ακραίων καιρικών φαινομένων και ανθεκτικότητας.....          | 43        |
| 2.2.1                                                                                                           | Μοντελοποίηση επίδρασης καιρικών φαινομένων στο Δίκτυο.....                                      | 44        |
| 2.2.2                                                                                                           | Μοντελοποίηση του Δικτύου σε μορφή Γράφου.....                                                   | 47        |
| 2.2.3                                                                                                           | Ταξινόμηση των μεθόδων μέτρησης της ανθεκτικότητας ενός Δικτύου που αναπαρίσταται ως γράφος..... | 47        |
| 2.2.4                                                                                                           | Εναλλακτική ταξινόμηση μεθόδων μέτρησης ανθεκτικότητας ενός Δικτύου.....                         | 49        |
| 2.3                                                                                                             | Στρατηγικές ενίσχυσης ανθεκτικότητας.....                                                        | 51        |
| 2.3.1                                                                                                           | «Έξυπνα» Δίκτυα .....                                                                            | 51        |
| 2.3.1.1                                                                                                         | Παράδειγμα χρήσης τεχνολογιών ενός «έξυπνου» Δικτύου.....                                        | 55        |
| 2.3.1.2                                                                                                         | «Έξυπνα» δίκτυα στην Ελλάδα.....                                                                 | 57        |
| 2.3.2                                                                                                           | Μικροδίκτυα.....                                                                                 | 58        |
| 2.3.2.1                                                                                                         | Παραδείγματα μικροδικτύων στην Ελλάδα.....                                                       | 68        |
| 2.3.3                                                                                                           | Τεχνητή Νοημοσύνη.....                                                                           | 72        |
| 2.3.3.1                                                                                                         | Εφαρμογές μεθόδων TN.....                                                                        | 75        |
| 2.3.3.2                                                                                                         | Προβλήματα και δυσκολίες εφαρμογής των μεθόδων TN.....                                           | 80        |
| <b>Κεφάλαιο 3: Περιβάλλον λογισμικού DigSilent PowerFactory.....</b>                                            |                                                                                                  | <b>81</b> |

|                                |                                                                                                                               |            |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1                            | Εισαγωγή - Γενικά Χαρακτηριστικά Εφαρμογής.....                                                                               | 81         |
| 3.2                            | Βασικές λειτουργίες προγράμματος.....                                                                                         | 81         |
| 3.3                            | “Project” – Μελέτη Περιπτώσεων - Σενάρια Λειτουργίας.....                                                                     | 84         |
| 3.3.1                          | Δημιουργία Project .....                                                                                                      | 84         |
| 3.3.2                          | Μελέτη Περιπτώσεων (Study Cases) .....                                                                                        | 86         |
| 3.3.3                          | Σενάρια λειτουργίας (Operation Scenarios).....                                                                                | 88         |
| 3.4                            | Εισαγωγή ενός αρχείου /εξαγωγή αρχείων και δεδομένων.....                                                                     | 89         |
| 3.5                            | Βιβλιοθήκες Εφαρμογής.....                                                                                                    | 90         |
| 3.6                            | Μελέτη ροής φορτίου.....                                                                                                      | 90         |
| 3.6.1                          | Διαδικασία επιλογής παραμέτρων ανάλυσης ροής φορτίου.....                                                                     | 90         |
| 3.6.2                          | Πρόσβαση στα αποτελέσματα της ανάλυσης.....                                                                                   | 94         |
| 3.6.3                          | Εξαγωγή αποτελεσμάτων σε διαγράμματα.....                                                                                     | 97         |
| 3.7                            | Χρήση του PowerFactory - Συμπεράσματα.....                                                                                    | 99         |
| <b>Κεφάλαιο 4:</b>             | <b>Εξεταζόμενες περιπτώσεις στο Δίκτυο της Κεφαλονιάς.....</b>                                                                | <b>100</b> |
| 4.1                            | Εισαγωγή.....                                                                                                                 | 100        |
| 4.2                            | Εξεταζόμενη περίπτωση 1 (CaseStudy_1): Μετασχηματιστής 29 εκτός λειτουργίας (Transformer 29 off).....                         | 101        |
| 4.3                            | Εξεταζόμενη περίπτωση 2 (CaseStudy_2): Γραμμή-02 εκτός λειτουργίας (Line 02 off).....                                         | 115        |
| 4.4                            | Εξεταζόμενη περίπτωση 3 (CaseStudy_3): Διακοπή Διασύνδεσης του Δικτύου Μεταφοράς (Τροφοδότηση μόνο με τοπικές παραγωγές)..... | 125        |
| <b>Κεφάλαιο 5:</b>             | <b>Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.....</b>                                                                | <b>135</b> |
| 5.1                            | Συμπεράσματα.....                                                                                                             | 135        |
| 5.2                            | Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....                                                                                          | 136        |
| <b>Βιβλιογραφία.....</b>       |                                                                                                                               | <b>139</b> |
| <b>Παράρτημα: Εικόνες.....</b> |                                                                                                                               | <b>147</b> |

# Κεφάλαιο 1

---

## Κλιματική αλλαγή και άλλες απειλές προς το δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας

### 1.1 Εισαγωγή - Στόχος διπλωματικής εργασίας

Οι σύγχρονες κοινωνίες εξαρτώνται ολοένα και περισσότερο από την αδιάλειπτη και αξιόπιστη παροχή ενέργειας. Το γεγονός αυτό αποδίδει στην ανθεκτικότητα των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) εξέχουσα σημασία. Ειδικά σήμερα, που καταγράφονται συνεχώς αλλαγές στο κλίμα, η ανάγκη για ανθεκτικά ΣΗΕ είναι επιβεβλημένη. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο να εξετάσει την αρνητική επίδραση που έχουν τα φαινόμενα αυτά στο Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, όπως επίσης να αναζητήσει τις καταλληλότερες μεθόδους με την εφαρμογή των οποίων περιορίζεται ή και ορισμένες φορές εξαλείφεται εντελώς η επίδραση των φαινομένων αυτών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει στην ανάπτυξη των τεχνολογιών που βοηθούν στην αποδοτικότερη διαχείριση της ενέργειας του Δικτύου. Ένας δεύτερος σκοπός αυτής είναι η εστίαση στην αντιμετώπιση των σφαλμάτων που μπορεί να εμφανιστούν σε στοιχεία που υπάρχουν κατά μήκος του Δικτύου (π.χ. βλάβες σε γραμμές, μετασχηματιστές κτλ.), κυρίως λόγω φυσικών καταστροφών που μπορεί να οδηγήσουν σε μη προγραμματισμένες διακοπές. Στόχος είναι να βρεθούν οι καλύτερες στρατηγικές για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του Δικτύου (μετάβαση στα «έξυπνα» Δίκτυα, ανάπτυξη μικροδικτύων κ.α.) όπως επίσης και ο περιορισμός της έκτασης του Δικτύου που βγαίνει εκτός λειτουργίας κατά την διάρκεια εκτεταμένων διακοπών. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων, στόχο αποτελεί η αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο, ώστε να περιοριστεί η έκταση του αποκομμένου και μη ηλεκτροδοτημένου Δικτύου και κυρίως η εξασφάλιση τροφοδότησης των κρίσιμων φορτίων, δίνοντας με τον τρόπο αυτό το χρόνο για εργασίες οριστικής αποκατάστασης του Δικτύου και περιορίζοντας τις όποιες προσωρινές λύσεις.

Το θέμα της εργασίας προσεγγίζεται συνδυαστικά, μέσω θεωρητικού υπόβαθρου και με τη χρήση αποτελεσμάτων που προκύπτουν από δοκιμές σε προσομοίωση του πραγματικού Δικτύου Διανομής της Κεφαλονιάς, εφαρμόζοντας τεχνικές διαχείρισης του φορτίου.

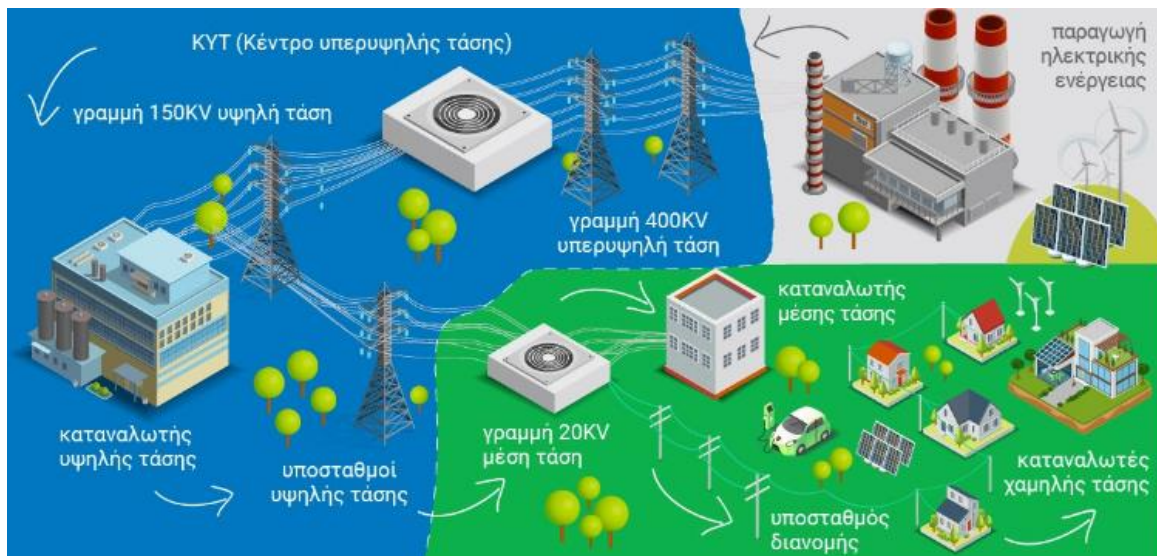
### 1.2 Το Ελληνικό Δίκτυο Διανομής

#### 1.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά Δικτύου

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αποτελούν τον κύριο μηχανισμό με τον οποίο παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές. Ένα ΣΗΕ αποτελείται από επιμέρους τμήματα, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 1.1, καθένα εκ των οποίων διακρίνεται από τα υπόλοιπα ως προς την λειτουργία του. Τα τμήματα από τα οποία αποτελείται ένα ΣΗΕ, είναι:

- Οι Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΠΗΕ)
- Τα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΜΗΕ)

- Τα Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΔΗΕ)



**Εικόνα 1.1:** Η δομή ενός ΣΗΕ [1].

Τα Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΔΗΕ), αποτελούν σημαντικό τμήμα των ΣΗΕ. Με την λειτουργία αυτών τα φορτία τροφοδοτούνται με την κατάλληλη ηλεκτρική ισχύ, προκειμένου να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών. Τα ΔΔΗΕ ξεκινάνε από τους υποσταθμούς Υψηλής Τάσης/Μέσης Τάσης, (Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ), εκεί όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης από 150kV σε 20kV για τις περισσότερες περιπτώσεις για το σύστημα της Ελλάδας, και τελειώνουν στις καταναλώσεις. Αυτό αποτελεί και μία από τις βασικές διαφορές του ΔΔΗΕ από το ΣΜΗΕ (Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας), καθώς το ΣΜΗΕ λειτουργεί με στόχο να μεταφέρει την ενέργεια από τους Σταθμούς Παραγωγής (ΣΠ) έως τους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ.

Ουσιαστικά τα ΔΔ αποτελούνται από τα Δίκτυα ΜΤ (δηλαδή υπό τάση 20kV κυρίως, 22kV ή 15kV για το ελληνικό Δίκτυο), τα οποία εξυπηρετούν την μεταφορά ενέργειας από τους Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ στους Υ/Σ διανομής Μέσης Τάσης/Χαμηλής Τάσης (ΜΤ/ΧΤ) και από τα Δίκτυα ΧΤ (λειτουργούν υπό τάση 230V φασική ή 400V πολική) τα οποία εξυπηρετούν την μεταφορά ενέργειας από τους Υ/Σ διανομής ΜΤ/ΧΤ έως τις τελικές καταναλώσεις. Τα Δίκτυα ΜΤ και ΧΤ αποτελούνται από εναέριες γραμμές, υπόγεια καλώδια και υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ. Όλα τα μέρη του ΔΔ είναι απαραίτητα έτσι ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να φτάσει στους τελικούς καταναλωτές. Τα φορτία των καταναλώσεων αποτελούν και αυτά τμήμα του Δικτύου και τροφοδοτούνται από το Δίκτυο ΜΤ ή από το Δίκτυο ΧΤ, ανάλογα με το αν πρόκειται για βιομηχανικό ή οικιακό καταναλωτή.

Ενώ στο παρελθόν, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λάμβανε χώρα μόνο στους σταθμούς παραγωγής των ΣΗΕ και η κατανάλωση γινόταν μόνο στην πλευρά της διανομής (παραδοσιακό μοντέλο ΣΗΕ), πλέον αυτό έχει αλλάξει. Πολλές μονάδες παραγωγής (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά συστήματα, κυψέλες καυσίμου) βρίσκονται αποκεντρωμένες πλέον κατά μήκος του Δικτύου Διανομής. Επομένως, η ενέργεια δεν ρέει πλέον μόνο σε μία κατεύθυνση, από τους σταθμούς παραγωγής προς τα φορτία, αλλά μπορεί να ρέει και αμφίδρομα.

### 1.2.2 Ο ρόλος του ΔΕΔΔΗΕ

Μετά την απόσχιση του Κλάδου Διανομής της ΔΕΗ (Δημόσια επιχείρηση ηλεκτρισμού), τον Μάιο του 2012, την διαχείριση του Δικτύου Διανομής την έχει αναλάβει θυγατρική της εταιρεία,

ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας). Κύριος ρόλος του ΔΕΔΔΗΕ είναι να διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια σε καταναλωτές που βρίσκονται σε όλη την χώρα μέσα από δίκτυα ΜΤ και ΧΤ, αλλά και δίκτυα ΥΤ στην Αττική και τα νησιά. Αυτό το επιτυγχάνει μέσω της κατάλληλης λειτουργίας, της σωστής συντήρησης, της ομαλής πρόσβασης και της συνεχούς ανάπτυξης του Δικτύου Διανομής της χώρας. Ακόμη διασφαλίζει την ομαλή πρόσβαση σε αυτό καθώς επίσης διαχειρίζεται τα ηλεκτρικά συστήματα των μη διασυνδεδεμένων νησιών.

Ο ΔΕΔΔΗΕ δεν έχει άλλες ανταγωνιστικές εταιρείες στην χώρα και αποτελεί φυσικό μονοπώλιο για την διαχείριση των ΔΔ. Για τον λόγο αυτό, οι δραστηριότητες της εταιρείας επιβλέπονται και ρυθμίζονται από την ανεξάρτητη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), πλέον Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων (ΡΑΑΕΥ).

Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ) χαρακτηρίζονται τα νησιά της Ελληνικής Επικράτειας των οποίων το Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας δεν συνδέεται με το Σύστημα Μεταφοράς ή το Δίκτυο Διανομής της ηπειρωτικής χώρας.

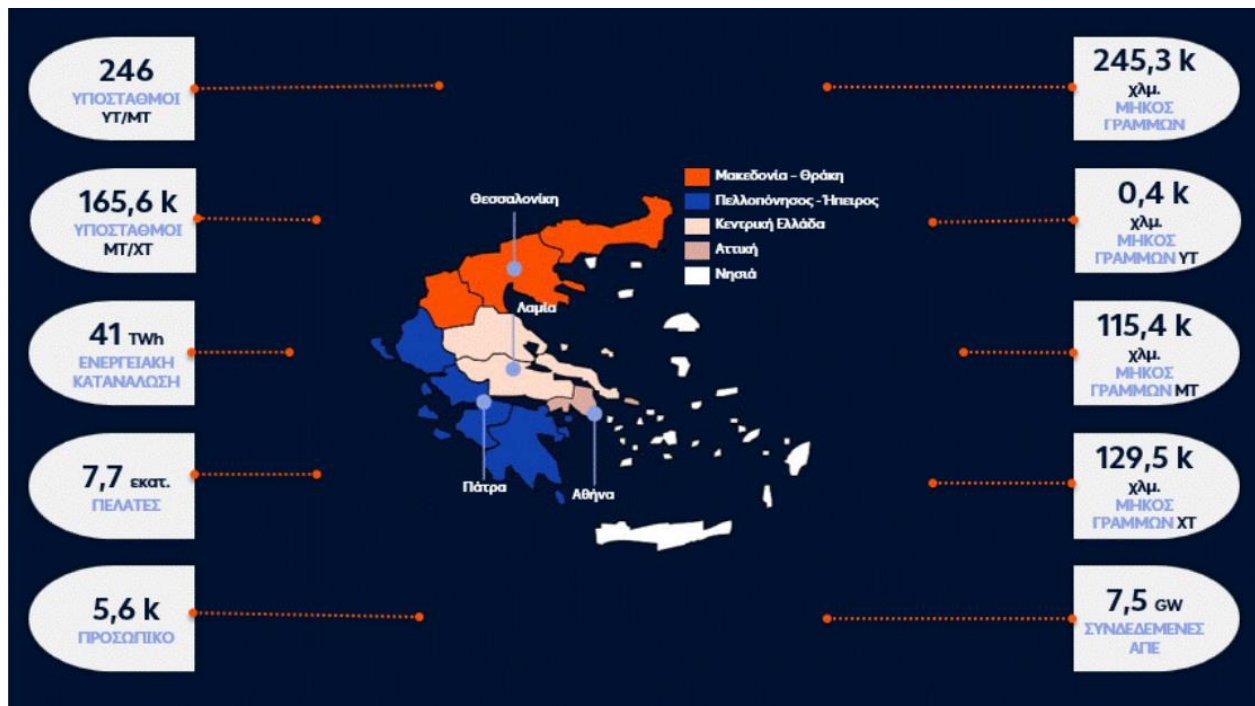
Η διαχείριση των Ηλεκτρικών Συστημάτων των ΜΔΝ, που περιλαμβάνει τη διαχείριση της παραγωγής, τη λειτουργία της αγοράς και των συστημάτων των νησιών αυτών, είναι ευθύνη της ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. [1].

### 1.2.3 Βασικά μεγέθη του Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σύμφωνα με στοιχεία του ΔΕΔΔΗΕ ΑΕ. το Δίκτυο Διανομής εκτείνεται σε:

- 113.358 χλμ. Δίκτυο Μέσης Τάσης (Μ.Τ.)
- 28.211 χλμ. Δίκτυο Χαμηλής Τάσης (Χ.Τ.)

Συνολικά έχουν εγκατασταθεί 241.569 χλμ. Δικτύου.



**Εικόνα 1.2:** Στοιχεία για το Ελληνικό Δίκτυο Διανομής από το Σχέδιο Ανάπτυξης Δικτύου (ΣΑΔ) 2024 - 2028 του ΔΕΔΔΗΕ [2].

Τα ποσοτικά αυτά μεγέθη λήφθηκαν στο τέλος του έτους 2020. Με το πέρασμα του χρόνου, σαφώς θα υπάρχουν διαφοροποιήσεις στα νούμερα που αντιπροσωπεύουν την συνολική έκταση του Δικτύου. Επιπλέον κατά μήκος του ΔΔΗΕ έχουν εγκατασταθεί:

- 165.290 Υποσταθμοί Μέσης Τάσης προς Χαμηλή Τάση (Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ).
- 993 χλμ. Δίκτυο Υψηλής Τάσης (Υ.Τ.) εκ των οποίων 218 χλμ στην Αττική και 775 χλμ στα μη διασυνδεδεμένα νησιά.
- 241 Υποσταθμοί Υψηλής Τάσης προς Μέση Τάση (Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ)

Συνολικά, το ελληνικό ΔΔΗΕ εξυπηρετεί 7.593.412 Πελάτες (12.668 Μέσης Τάσης (ΜΤ) & 7.580.744 Χαμηλής Τάσης (ΧΤ)), παρέχοντας 41.983 GWH ενέργειας για τις ενεργειακές τους ανάγκες (10.950 στη ΜΤ & 31.033 στη ΧΤ) [1].

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ΔΔ έχει εδραιωθεί σε όλη την έκταση της χώρας, η οποία παρουσιάζει έντονα γεωμορφολογικά στοιχεία (ορεινή ηπειρωτική χώρα, μεγάλη ακτογραμμή και νησιά), με το μεγαλύτερο ποσοστό του Δικτύου να είναι εναέριο (περίπου 88%).

#### **1.2.4 Δραστηριότητες του Διαχειριστή Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Οι εργασίες που εκτελούνται από την Εταιρεία ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. αφορούν αρχικά την ικανοποίηση αιτημάτων των χρηστών του Δικτύου, όπως νέες συνδέσεις στο Δίκτυο, είτε ως καταναλώσεις, είτε ως παραγωγές, τροποποιήσεις σε παλαιές συνδέσεις, αλλά και παραλλαγές του Δικτύου για την εύρυθμη λειτουργία του. Επιπλέον, διάφορα έργα που αναλαμβάνει η εταιρεία έχουν ως στόχο την ενίσχυση του υφιστάμενου Δικτύου και τον εκσυγχρονισμό του. Οι εργασίες εκμετάλλευσης του Δικτύου, όπως η επιθεώρηση και η συντήρηση του, η αποκατάσταση τυχόν βλαβών, αλλά και η καταμέτρηση των καταναλώσεων, αποτελούν επίσης πολύ σημαντικό κομμάτι των δραστηριοτήτων της εταιρείας. Ο ΔΕΔΔΗΕ φροντίζει επίσης για την ομαλή και αποδοτική λειτουργία της Αγοράς Ηλεκτρισμού στο επίπεδο των δικτύων, αλλά και την αξιόπιστη και οικονομική λειτουργία των αυτόνομων νησιωτικών ηλεκτρικών συστημάτων [1].

### **1.3 Κλιματική αλλαγή και καιρικά φαινόμενα επικίνδυνα για το Δίκτυο Διανομής (πυρκαγιές, καύσωνες, σφοδρές χιονοπτώσεις)**

#### **1.3.1 Συνέπειες και επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής**

Σταδιακά, με το πέρασμα των χρόνων, ορισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν επηρεάσει το κλίμα της γης. Η καύση ορυκτών καυσίμων, η αποψίλωση των δασών και η παραγωγή χημικών ουσιών είναι μερικές από τις δραστηριότητες που συμβάλλουν στην αύξηση των αερίων που προκαλούν το «φαινόμενο του θερμοκηπίου», όπως το διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub> και συνεπώς στην αύξηση της θερμοκρασίας της γης. Έχει ήδη ανέβει η θερμοκρασία του πλανήτη κατά 1°C σε σύγκριση με τις εποχές της προβιομηχανικής περιόδου. Όσο οι ενέργειες του ανθρώπου συνεχίζουν να διαταράσσουν το κλίμα της γης, τόσο περισσότερο θα παρουσιάζονται προβλήματα και κίνδυνοι που θα επηρεάζουν το σύνολο της κοινωνίας, την οικονομία και το περιβάλλον [3]. Όλα τα παραπάνω μπορούν να περιγράψουν επακριβώς την έννοια «κλιματική αλλαγή».

Εντός του 21<sup>ου</sup> αιώνα, σύμφωνα πάντα με εκτιμήσεις, αναμένεται ότι η θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης θα αυξηθεί από 1,1 °C μέχρι 6,4°C σε σχέση με την εικοσαετία 1980 - 2000,



ανάλογα με την ποσότητα των εκπομπών αερίων που πρόκειται να εκλυθούν στην ατμόσφαιρα [4].



**Εικόνα 1.3:** Οι επιπτώσεις της αύξησης της θερμοκρασίας στην Ελλάδα [5].

Η κλιματική αλλαγή έχει επιπτώσεις και στην λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Πολλά φαινόμενα, που εμφανίζονται ως επακόλουθα της κλιματικής αλλαγής δυσχεραίνουν την λειτουργία των ΣΗΕ ή και προκαλούν καταστροφές σε αυτά, όπως οι τυφώνες και οι καταιγίδες, οι καύσωνες και η ξηρασία, οι πλημμύρες, οι έντονες χιονοπτώσεις και ο πάγος, οι πυρκαγιές και οι κεραυνοί. Πιο αναλυτικά:

- 1) Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, μπορεί να μειώσει την αποδοτικότητα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, (αναφερόμαστε στις υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας).
- 2) Γενικά η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί αυτεπάγγελα σε αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, για την ικανοποίηση των αυξημένων αναγκών που προκύπτουν για ψύξη. Επομένως αυξάνονται και οι απαιτήσεις στην ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας.
- 3) Οι παρατεταμένες περίοδοι ξηρασίας και η έλλειψη βροχοπτώσεων μπορούν να επηρεάσουν τις υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής και τις πυρηνικές μονάδες, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στην συγκέντρωση αποθέματος νερού. Αντίστοιχα, οι πολύ έντονες βροχοπτώσεις και καταιγίδες που μπορούν να εναποθέσουν μεγάλες ποσότητες νερού, οδηγώντας σε μερικές περιπτώσεις και σε πλημμύρες. Επίσης, ενδέχεται να επηρεαστεί η εύρυθμη λειτουργία τέτοιων μονάδων παραγωγής, όπως είναι τα υδροηλεκτρικά και οι πυρηνικοί σταθμοί.
- 4) Ορισμένες καιρικές συνθήκες, όπως η αστάθεια της ταχύτητας του αέρα, οι ισχυροί άνεμοι ή η κάλυψη του ήλιου από σύννεφα, δυσχεραίνουν την λειτουργία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και μειώνουν την διάρκεια ζωής των υποδομών τους. Τέτοιες συνθήκες τείνουν να εμφανίζονται συχνότερα εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής.
- 5) Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας μπορεί να επηρεάσει τις υποδομές των Δικτύων. Περιορίζονται οι περιοχές που μπορεί να αποτελούσαν επιλογές για την εγκατάσταση σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κι αυτό διότι συνήθως τέτοιοι σταθμοί εγκαθίστανται σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο [4].

Τα Δίκτυα Μεταφοράς και Διανομής, τα οποία λειτουργούν ως αναπόσπαστα τμήματα των ΣΗΕ, επίσης επηρεάζονται άμεσα από τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής. Πιο συγκεκριμένα:

- 1) Τα Δίκτυα είναι ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε περιπτώσεις εμφάνισης μεγάλων θερμοκρασιών, μπορεί να αυξηθεί η ηλεκτρική αντίσταση των στοιχείων που απαρτίζουν ένα Δίκτυο Ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των δικτύων μειώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, ενώ παράλληλα αυξάνονται και οι απώλειες ενέργειας.
- 2) Σε παρατεταμένες περιόδους ζέστης και ξηρασίας, συσσωρεύεται σκόνη στους αγωγούς και στα στοιχεία του Δικτύου γενικότερα, δυσχεραίνοντας την λειτουργία του και δημιουργώντας συνθήκες για την εκδήλωση επικίνδυνων φαινομένων (ηλεκτρικά τόξα από υπερπηδήσεις στους μονωτήρες με ενδεχόμενη πρόκληση πυρκαγιάς, κλπ).
- 3) Η υγρασία, το χιόνι και ο πάγος επηρεάζουν με την σειρά τους τις υποδομές του δικτύου, ως προς την ορθή λειτουργία τους, ακόμη και ως προς την αντοχή τους, και κατά συνέπεια την οδηγούν στην καταστροφή τους. Ο πάγος και το χιόνι μπορεί να δημιουργήσουν γεφύρωση, με ηλεκτρικό τόξο, δηλαδή να δημιουργήσουν έναν αγωγίμο δρόμο μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του αγωγού της γραμμής σε έναν μονωτήρα και του προσγειωμένου σημείου στήριξης ή ανάρτησης του μονωτήρα (υπερπήδηση μονωτήρα), αποξήλωση - λόγω βάρους - των αγωγών του εναερίου Δικτύου ή και καταστροφή αυτού από σπασμένα κλαδιά και δέντρα λόγω τους βάρους του χιονιού που επικάθεται σε αυτά.
- 4) Το δίκτυο καταπονείται από την αύξηση ζήτησης φορτίου σε παρατεταμένες και ακραίες θερμοκρασίες ζέστης το καλοκαίρι (οπότε ανάγκη ψύξης) και κρύου τον χειμώνα (οπότε ανάγκη θέρμανσης).
- 5) Σε περιπτώσεις πλημμυρών και κατολισθήσεων, προκαλούνται μεγάλες ζημιές στις εγκαταστάσεις του Δικτύου, είτε αυτό είναι υπόγειο (π.χ. πλημμυρισμένοι Υ/Σ πόλεως), είτε είναι εναέριο (π.χ. καταστροφή/κατάρρευση του εναερίου δικτύου από τις κατολισθήσεις ή την υποχώρηση του εδάφους).
- 6) Οι ισχυροί άνεμοι μπορούν να καταστρέψουν τις υποδομές του δικτύου, κυρίως τις εναέριες γραμμές, και αυτό γιατί προκαλούνται πτώσεις κλαδιών και δέντρων, προκαλώντας βραχυκυκλώματα και καταστροφές/αποξηλώσεις.



**Εικόνα 1.4:** Πάγος σε αγωγούς Δικτύου [6].



**Εικόνα 1.5:** Καταστροφή εναέριου Δικτύου εξαιτίας ισχυρών ανέμων [6].

### **1.3.2 Τρόποι περιορισμού της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στα Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.**

Προκειμένου να μειωθεί η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στον ενεργειακό τομέα, και πιο συγκεκριμένα στην λειτουργία των Δικτύων Διανομής, είναι αναγκαία η λήψη μιας σειράς προληπτικών και διορθωτικών μέτρων. Τα μέτρα αυτά έχουν σκοπό να περιορίσουν τις συνέπειες που έχει κλιματική αλλαγή στις υποδομές του Δικτύου, ενώ παράλληλα μπορούν να προσαρμόζουν την λειτουργία των δικτύων στις συνθήκες που έχουν καθοριστεί εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής. Κάποιες από αυτές τις ενέργειες μπορούν να είναι:

1. Η ενίσχυση των ήδη εγκατεστημένων υποδομών και η υπογειοποίηση τμημάτων του ΔΔ, όπου αυτό είναι αναγκαίο και εφικτό.
2. Η βελτίωση και ο εκσυγχρονισμός προτύπων σχεδιασμού για τις υποδομές του ΔΔ
3. Η εύρεση εναλλακτικών διαδρομών από την παραγωγή έως την κατανάλωση που μπορεί να ακολουθήσει η ροή της ενέργειας σε περίπτωση διακοπής ηλεκτροδότησης. Σε αυτό μπορούν να συνεισφέρουν και οι διεσπαρμένες παραγωγές.
4. Η προληπτική προστασία των Υ/Σ από υψηλές θερμοκρασίες με εγκατάσταση ενδεχομένως κατάλληλων συστημάτων ηλιοπροστασίας και ψύξης.
5. Βελτιστοποίηση σχεδιασμού εγκατάστασης και εξοπλισμού τόσο για υπόγειους, όσο και για επίγειους υποσταθμούς, ώστε να υπάρχει η μέγιστη δυνατή προστασία από τις επιπτώσεις των ακραίων καιρικών φαινομένων (πλημμύρες, κλπ).
6. Η ενίσχυση της σταθερότητας των στύλων του ΔΔ, κατάλληλες κατασκευές αντιστήριξης σε περιοχές με ισχυρούς ανέμους.
7. Η ενίσχυση των συστημάτων πληροφορικής και επικοινωνιών, με την χρήση ανθεκτικού στην υγρασία και τις ακραίες θερμοκρασίες (παγετό/καύσωνα) εξοπλισμό [4].

### **1.3.3 Διεθνείς Συμφωνίες για το κλίμα και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής**

Τρόπος κοινής αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, όσον αφορά τα ΣΗΕ, είναι η λήψη μέτρων που είναι ικανά να περιορίσουν την επίδραση αυτής στη λειτουργία των Δικτύων. Πολλά

από αυτά λαμβάνονται υπόψη για την χάραξη στρατηγικών για ένα πιο ανθεκτικό Δίκτυο. Ωστόσο, δεν αρκεί να παρθούν μόνο μέτρα προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που έχει προκαλέσει η κλιματική αλλαγή. Χρειάζεται να αλλάξει γενικότερα η κουλτούρα, να υιοθετηθούν εναλλακτικοί τρόποι και συνήθειες για να περιοριστεί η περαιτέρω επίδραση της στο περιβάλλον.

Σε αυτό το πλαίσιο, η Ευρωπαϊκή ένωση, και συνεπώς και η Ελλάδα ως κράτος - μέλος της, έχει συμμετάσχει σε διεθνώς ορισμένες συμφωνίες για το κλίμα που έλαβαν ισχύ μετά από διαπραγματεύσεις μεταξύ χωρών-μελών:

Πρωτόκολλο του Κιότο: 37 χώρες και η ΕΕ συμφώνησαν να ληφθούν μέτρα έτσι ώστε να επιτευχθεί ο στόχος που έθεσε το πρωτόκολλο, ο οποίος είναι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 5% για την περίοδο 2008 – 2012 σε σύγκριση με τα δεδομένα που λήφθηκαν το 1990. Η ΕΕ δεσμεύθηκε να μειώσει τις εκπομπές της κατά 8 % αντί 5 % [7]. Η Ελλάδα υπέγραψε το πρωτόκολλο το 1998, με το οποίο δεσμεύτηκε να περιορίσει την αύξηση των εκπομπών αερίων της στο +25% για το διάστημα 2008 - 2012, προκειμένου να συνεισφέρει στο κοινό στόχο της ΕΕ για 8% μείωση των εκπομπών της για το αυτό διάστημα. Για να ανταποκριθεί στη δέσμευσή της αυτή, η χώρα μας εκπόνησε το Εθνικό Πρόγραμμα μείωσης εκπομπών αερίων φαινομένου θερμοκηπίου για την περίοδο 2000 - 2010 [8]. Σε αυτό παρουσιάζεται μια σειρά από μέτρα που στοχεύουν στον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και αφορούν:

1. τον οικιακό και τον τριτογενή τομέα,
2. τις μεταφορές,
3. τη βιομηχανία,
4. την ηλεκτροπαραγωγή,
5. τη διαχείριση απορριμμάτων,
6. τη γεωργία και
7. τις βιομηχανικές διεργασίες [9].

Το ποσοστό μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου από τις χώρες της ΕΕ αυξήθηκε σε 20% μέχρι το 2020 σε σύγκριση με τα δεδομένα που λήφθηκαν για τα ποσοστά αερίων του θερμοκηπίου το 1990 [7].

Συμφωνία του Παρισιού: Ο στόχος αυτής της συμφωνίας είναι η διατήρηση της αύξησης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας τον 21<sup>ο</sup> αιώνα λιγότερο από κάτω των 2 °C σε σύγκριση με τα επίπεδα της προβιομηχανικής εποχής, με στόχο τον περιορισμό της το ανώτερο σε 1,5 °C [7]. Η Ελλάδα επικύρωσε τη Συμφωνία του Παρισιού στις 5 Οκτωβρίου 2016 [10]. Στη συμφωνία του Παρισιού περιλήφθηκαν επίσης διατάξεις σχετικά με την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή.

Η νέα αυτή συμφωνία αντικαθιστά το πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο θέτει στόχους δέσμευσης με νομική ισχύ. Όμως η συμφωνία του Παρισιού έχει περισσότερο εθελοντικό χαρακτήρα, επιτρέποντας τον καθορισμό μέτρων και στόχων για κάθε χώρα κάτω από ένα ενιαίο πλαίσιο και έναν κοινό σκοπό. Για τον λόγο αυτό, κάθε χώρα υποβάλλει την εθνικά καθορισμένη πρόθεση συνεισφοράς (Intended Nationally Determined Contributions –INDC) [11]. Οι χώρες που έχουν υπογράψει την συμφωνία εγγράφονται σε κοινό σύστημα αναφοράς, παρακολούθησης και επιβεβαίωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου.

Επιπλέον, από το 2020 προσφέρεται βοήθεια 100 δισ. δολαρίων το χρόνο από τις ανεπτυγμένες χώρες στις αναπτυσσόμενες χώρες, ώστε να στραφούν σε καθαρές πηγές ενέργειας και να αντιμετωπίσουν τις όποιες καταστροφές προκαλούνται λόγω της κλιματικής αλλαγής.

## **1.4 Άλλες απειλές σε βάρος του Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας (κυβερνοεπιθέσεις, σεισμοί κ.α.)**

Εκτός των καιρικών φαινομένων που παρουσιάστηκαν αναλυτικά σε προηγούμενα κεφάλαια, υπάρχει πλήθος απειλών, τόσο απρόβλεπτων (όπως οι σεισμοί), όσο και ηθελημένων από τρίτους (όπως οι κυβερνοεπιθέσεις).

Ακολουθεί αναφορά κάποιων από τις απειλές αυτής της κατηγορίας, οι οποίες μπορούν να διαταράξουν την εύρυθμη και απρόσκοπτη λειτουργία του Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.

### **1.4.1 Σεισμοί**

Είναι γνωστό ότι η Ελλάδα είναι μία σεισμογενής χώρα. Οι σεισμοί αποτελούν ένα καταστροφικό φυσικό φαινόμενο, ιδιαίτερα όταν η ένταση τους είναι αρκετά μεγάλη. Μία από τις υποδομές που υφίσταται καταστροφικές συνέπειες από την εκδήλωση ενός σεισμού, είναι τα Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΔ).

Οι σεισμοί συμβαίνουν χωρίς καμία ή με ελάχιστη δυνατότητα πρόβλεψης. Το γεγονός ότι τα σεισμικά κύματα διαδίδονται με μικρή ταχύτητα (μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός), σε ορισμένες περιπτώσεις καθιστά δυνατή την έγκαιρη προειδοποίηση με χρήση κατάλληλων οργάνων. Μία τέτοια προειδοποίηση θα μπορούσε να δώσει χρόνο για κατάλληλες ενέργειες και ρυθμίσεις σε κρίσιμα εξαρτήματα του Δικτύου, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ζημιά που μπορεί να προκαλέσει ο σεισμός [12]. Στις περισσότερες των περιπτώσεων όμως, γίνονται σεισμοί χωρίς να υπάρχει προηγούμενη γνώση για την εμφάνιση τους.

Κατά την διάρκεια ενός σεισμού προκαλούνται διακοπές ηλεκτροδότησης που οφείλονται στην πτώση κτιρίων ή αντικειμένων επάνω στο εναέριο Δίκτυο (γραμμές, στύλους, μετασχηματιστές, κτλ.) Η δυσκολία αποκατάστασης των ΔΔ και επανηλεκτροδότησης των περιοχών εξαρτάται από το μέγεθος και την ακτίνα επίδρασης του σεισμού. Η διάρκεια της αποκατάστασης της ηλεκτροδότησης μπορεί να διαρκέσει από μερικές ώρες έως και μήνες. Πολλές φορές οι μετασεισμοί δυσκολεύουν το έργο αποκατάστασης [13].

Επιπλέον υποδομές που πλήττονται από σεισμούς, είναι τα κτήρια που στεγάζουν τον εξοπλισμό για τον έλεγχο των ΔΔ ή ακόμη και τον ίδιο τον εξοπλισμό των ΔΔ όπως μετασχηματιστές ή μπαταρίες. Γι' αυτόν τον λόγο, για την κατασκευή αυτών των κτηρίων επιλέγονται πιο ανθεκτικά υλικά όπως οπλισμένο σκυρόδεμα ενώ το μέγεθος τους είναι σχετικά μικρό και δεν υψώνονται σε πολλούς ορόφους [13].

Εκτός από το εναέριο Δίκτυο, από τις υποδομές που πλήττονται από σεισμούς δεν εξαιρούνται και κτήρια που στεγάζουν τον εξοπλισμό για τον έλεγχο των ΔΔ, οι Υ/Σ εσωτερικού χώρου και τα Κέντρα Διανομής. Για τον λόγο αυτό, τα κτίρια ιδιοκτησίας του Διαχειριστή Ηλεκτρικής ενέργειας στα οποία στεγάζεται εξοπλισμός δικτύου κατασκευάζονται με αυστηρές αντισεισμικές προδιαγραφές και ενισχυμένα- πιο ανθεκτικά- υλικά όπως οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ το μέγεθός τους είναι σχετικά μικρό και δεν υψώνονται σε πολλούς ορόφους [13]. Όσον αφορά τους Υ/Σ πόλεως, οι οποίοι βρίσκονται εντός οικοδομών στον πολιτικό οικοδομικό ιστό των περιοχών, δίνονται επίσης προδιαγραφές οικονομικής ενίσχυσης του χώρου στους κατασκευαστές των κτιρίων.

Βαρύς εξοπλισμός, όπως μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος ή γεννήτριες, μπορεί να επηρεαστεί απλώς από τους κραδασμούς που προκαλεί ένας σεισμός. Πολλές φορές, Έχει παρατηρηθεί μετατόπιση του εξοπλισμού από την αρχική του θέση, με αποτέλεσμα στην καλύτερη περίπτωση απλή αποσύνδεση αυτού, υπάρχει όμως και η περίπτωση μέρη του εξοπλισμού που περιέχουν υλικά σε υγρή μορφή να αδειάζουν (π.χ. δεξαμενές λαδιού σε μετασχηματιστή) δημιουργώντας καταστάσεις χρονοβόρες ως προς την αποκατάστασή τους [13].

Μελέτες περιπτώσεων σεισμών μικρής εντάσεως που σημειώθηκαν στα βορειοδυτικά των ΗΠΑ, αποδεικνύουν ότι η καθίζηση και η ρευστοποίηση του εδάφους είναι οι πιο καταστροφικές συνέπειες ενός σεισμού για τον εξοπλισμό των ΔΔ. Κυρίως επηρεάζονται τα υπόγεια καλώδια του Δικτύου, καθώς καταπονούνται από τις διαβρώσεις του εδάφους, αλλά και από το τσιμέντο το οποίο τοποθετείται ως επιπλέον προστασία επάνω από τα υπόγεια καλώδια. Σε περιπτώσεις σεισμών, το τσιμέντο αυτό ασκεί πρόσθετη πίεση στα καλώδια. Η αποκατάσταση των υπόγειων καλωδίων είναι δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία, κυρίως γιατί ο εντοπισμός και η επισκευή του κατεστραμμένου υπόγειου εξοπλισμού είναι αρκετά χρονοβόρος [14].

Μετά από αποτελέσματα κάποιων άλλων μελετών, διαπιστώθηκε ότι οι πιο ευάλωτοι μηχανισμοί στους σεισμούς είναι οι διακόπτες που μπορούν να ελέγξουν την συνδεσιμότητα μεταξύ των δικτύων. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω των κεραμικών εξαρτημάτων τους, τα οποία είναι πολύ εύθραυστα. Γίνονται έρευνες με σκοπό την εύρεση και την τοποθέτηση πιο ανθεκτικών, κεραμικών και μη, μονωτών [12]. Από την άλλη, η αποκατάσταση τους δεν έχει μεγάλο κόστος και μπορεί να γίνει εύκολα και γρήγορα, σε αντίθεση με άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στο εξοπλισμό που στελεχώνει τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [13].



**Εικόνα 1.6:** Το ΚΥΤ Αχαρνών μετά το μεγάλο σεισμό του Σεπτεμβρίου, 1999 [15].

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για την αποκατάσταση του Δικτύου μετά από έναν σοβαρό σεισμό, θα πρέπει να προηγηθεί η αποκατάσταση υποδομών όπως των δρόμων και των γεφυρών, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφαλής πρόσβαση στις κατεστραμμένες εγκαταστάσεις του ΔΔ [12].

Μία χαρακτηριστική περίπτωση καταστροφής σημαντικού εξοπλισμού του ελληνικού Δικτύου αποτελεί ο σεισμός της Πάρνηθας τον Σεπτέμβριο 1999. Ο σεισμός αυτός, οδήγησε σε κατάρρευση εξοπλισμού και ικριωμάτων σε δύο κέντρα υπέρ - υψηλής τάσεως στην Αττική, με άμεσες επιπτώσεις στην ηλεκτροδότηση [15]

### 1.4.2 Κυβερνοεπιθέσεις (cyber - attacks)

Με την αύξηση της χρήσης του διαδικτύου, των ψηφιακών συστημάτων και των τηλεπικοινωνιών για την διαχείριση των ΔΔ, οι επιθέσεις που γίνονται στον κυβερνοχώρο αποτελούν σημαντική απειλή για τις υποδομές του Δικτύου [16]. Πέρα από αυτό, οι γεωπολιτικές συγκρούσεις, έχουν αυξήσει δραματικά τον αριθμό των απειλών στον κυβερνοχώρο για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας [17]. Οι κυβερνοεπιθέσεις είναι κακόβουλες ενέργειες που πραγματοποιούνται με απώτερο σκοπό την αλλαγή ή την κλοπή δεδομένων και εκτελούνται με ψηφιακά μέσα (χρήση υπολογιστικών μηχανών και του διαδικτύου) [18].

Επιπλέον, η αναβάθμιση των Δικτύων σε «έξυπνα» Δίκτυα, αυτομάτως τα καθιστά πιο επιρρεπή σε επιθέσεις στον κυβερνοχώρο από ένα συμβατικό Δίκτυο, λόγω της εγκατάστασης ψηφιακών συσκευών. Ωστόσο, η ανθεκτικότητα του Δικτύου ενισχύεται σε μεγάλο βαθμό με την αναβάθμιση του σε «έξυπνο» Δίκτυο, αφού έτσι υπάρχει η δυνατότητα αυτόματης παρακολούθησης και βελτίωσης της λειτουργίας του. Αισθητήρες, κάμερες, αυτόματοι διακόπτες και εγκαθίστανται στις υποδομές του Δικτύου, αξιοποιώντας την ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης, για την αναγνώριση των απειλών στις οποίες εκτίθεται το Δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αδιάλειπτη παρακολούθηση των συστημάτων, έτσι ώστε να αποτραπεί οποιοδήποτε κακόβουλο λογισμικό, προωθημένο από τρίτους (hackers) [19]

Οι κυβερνοεπιθέσεις αποτελούν απρόβλεπτη απειλή. Ο καλύτερος τρόπος να αποτραπεί μία κυβερνοεπίθεση είναι ο εντοπισμός τυχόν κακόβουλου λογισμικού που έχει εγκατασταθεί στο σύστημα διαχείρισης των Δικτύων πριν αυτό ενεργοποιηθεί. Αν κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, οι επιπτώσεις για το Δίκτυο μίας τέτοιας επίθεσης είναι άμεσες, με την ενεργοποίηση του λογισμικού. Αυτού του τύπου ψηφιακές επιθέσεις στον κυβερνοχώρο, ωστόσο, έχουν τη δυνατότητα χρονικού προγραμματισμού ώστε να εκτελεστούν σε προκαθορισμένο χρόνο. Ένας χάκερ μπορεί να μένει σε αδράνεια για αρκετό χρονικό διάστημα προκειμένου να συλλέξει χρήσιμες πληροφορίες [12].

Κάποιοι από τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί μία επίθεση στον κυβερνοχώρο με σοβαρές συνέπειες για το Δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, είναι:

1. Η πρόσβαση στο σύστημα SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition): Οι χάκερς μπορούν εύκολα να αποκτήσουν πρόσβαση στο κεντρικό σύστημα αυτόματου ελέγχου των Δικτύων και να εγκαταστήσουν σε αυτό κακόβουλο λογισμικό. Το λογισμικό αυτό μπορεί να αλλάξει τις παραμέτρους που αφορούν τα επίπεδα τάσης ή ρεύματος που ισχύουν στο σύστημα [15].
2. Η έγχυση ψευδών δεδομένων (False data injection - FDI): Οι χάκερς με τον τρόπο αυτόν έχουν την δυνατότητα ανακατανομής των φορτίων ή και να δώσουν λάθος σήμα σε διακόπτες για το άνοιγμα/κλείσιμο [16].
3. Διάχυση γνώσης της τοπολογίας του Δικτύου: Πρόκειται για αυστηρά απόρρητο στοιχείο των Εταιρειών Διαχείρισης Ηλεκτρικής Ενέργειας, καθώς γνώση αυτού αποτελεί για τους hackers πολύτιμο εργαλείο για οποιοδήποτε είδους επέμβαση και ενέργεια σε οποιοδήποτε τμήμα ή λειτουργία του Δικτύου Διανομής.
4. Έγχυση εσφαλμένων δεδομένων στα συστήματα μέτρησης: Πρόκειται για μορφή ψηφιακής ρευματοκλοπής. Οι εισβολείς μπορούν να συλλέξουν δεδομένα από τους τηλεχειριζόμενους μετρητές και επιπλέον να εισάγουν στο σύστημα των μετρητών λάθος δεδομένα καταμέτρησης οδηγώντας σε λανθασμένη χρέωση για τον καταναλωτή [20].

Οι δυσμενείς συνέπειες μίας τέτοιας επίθεσης υπάρχει περίπτωση να έχουν επιπτώσεις επιδρούν σε μεγάλο τμήμα του Δικτύου, γεγονός που κάνει ακόμη δυσκολότερο τον εντοπισμό



των προβλημάτων. Για τον λόγο αυτό, η αποκατάσταση του Δικτύου μπορεί να χρειαστεί περισσότερο χρόνο και να απαιτείται η δράση εξειδικευμένων συνεργείων. Η διακοπή ηλεκτροδότησης μπορεί να διαρκέσει μόνο για λίγο, αλλά η περίοδος από την παραβίαση στον κυβερνοχώρο έως τον εντοπισμό και την αποκατάσταση μπορεί να διαρκέσει πολύ περισσότερο.

Ο καλύτερος τρόπος να αποτραπεί μία κυβερνοεπίθεση είναι χρήση κατάλληλου λογισμικού για τον εντοπισμό κακόβουλου λογισμικού που έχει εγκατασταθεί στο σύστημα διαχείρισης των Δικτύων από τρίτους. Μεταξύ της ανίχνευσης εξωγενούς λογισμικού και της εκδήλωσης κυβερνοεπίθεσης από τη χρήση αυτού, μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο είναι εφικτό να ληφθούν ορισμένα μέτρα προκειμένου να περιοριστούν πιθανές ανατρεπτικές επιπτώσεις. Αν κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, οι επιπτώσεις για το Δίκτυο μίας τέτοιας επίθεσης είναι άμεσες, εφόσον χρειάζονται λίγο χρόνο για να λειτουργήσουν.

Τέλος υπάρχει και η περίπτωση κυβερνοεπιθέσεων με πρόκληση φυσικής καταστροφής των υποδομών του Δικτύου μπορεί να προκληθεί και φυσική καταστροφή των υποδομών του Δικτύου [12].

#### **1.4.3 Πολεμικές συρράξεις - Τρομοκρατικές επιθέσεις**

Στην περίπτωση μίας χώρας η οποία βρίσκεται σε εμπόλεμη κατάσταση, το δίκτυο πλήττεται τόσο από λειτουργική άποψη (π.χ. κυβερνοεπιθέσεις – όπως αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο) όσο και από άποψη υποδομών που προκαλούνται από τις φυσικές στρατιωτικές επιθέσεις. Ομοίως, τυχόν τρομοκρατικές ενέργειες έχουν ως στόχο τις υποδομές του ηλεκτρικού δικτύου, προκειμένου να προκαλέσουν διαταραχές σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο.

Τρανταχτό παράδειγμα σήμερα αποτελεί ο πόλεμος στην Ουκρανία. Στις 23 Δεκεμβρίου του 2015, σε τρία κέντρα ελέγχου του ηλεκτρικού Δικτύου στην ανατολική Ουκρανία εκτελέστηκε κυβερνοεπίθεση με στόχο τρία κέντρα ελέγχου του ηλεκτρικού Δικτύου. Αποτέλεσμα της επίθεσης αυτής ήταν να παραμείνουν 225.000 οικιακοί χρήστες χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα για 6 ώρες. Εκτός αυτού, η διακοπή ηλεκτροδότησης στα κέντρα ελέγχου κατέστησε αδύνατη την διαχείριση της βλάβης στο ευρύτερο Δίκτυο.

Οι υπεύθυνοι της επίθεσης κατάφεραν, μέσω τεχνικών αλίευσης κωδικών πρόσβασης (phising), να εισέλθουν – όπως διαπιστώθηκε – στα εταιρικά δίκτυα 9 μήνες πριν την επίθεση. Ουσιαστικά, ένα ηλεκτρονικό μήνυμα email που περιείχε ως συνημμένο ένα αρχείο word με μολυσμένο περιεχόμενο ήταν αρκετό για να αποκομίσουν τους απαραίτητους κωδικούς. Το μήνυμα αυτό αποθήκευε τους κωδικούς πρόσβασης του χρήστη του συστήματος SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) και στην συνέχεια τα έστειλε στον δημιουργό του μηνύματος. Ωστόσο έπρεπε επίσης να διέλθουν μέσα από τείχη προστασίας για να έχουν πλήρη πρόσβαση στο σύστημα SCADA. Αυτό έγινε εφικτό μέσω παρακολουθήσεων των δικτύων και έχοντας πρόσβαση στην διαχείριση των λογαριασμών των χρηστών (μερικοί χρειάζονταν vpn για την εξ αποστάσεως σύνδεση τους στο SCADA). Στο διάστημα των 9 μηνών, οι χάκερς έμαθαν να διαχειρίζονται το σύστημα SCADA.

Ως εκ τούτου, κατάφεραν να έχουν πλήρη έλεγχο στους υποσταθμούς του ηλεκτρικού συστήματος της Ουκρανίας. Ουσιαστικά, η διακοπή ηλεκτροδότησης των οικιακών καταναλωτών έγινε μέσω ανοίγματος διακοπών του υποσταθμού, έτσι δεν υπήρχε τρόπος οι



καταναλωτές να αναφέρουν το πρόβλημα μέσω των υπηρεσιών εξυπηρέτησης πελατών. Ακόμη, πολλά από τα δεδομένα που υπήρχαν στα υπολογιστικά συστήματα διαγράφηκαν μετά από εκτέλεση ενός κακόβουλου λογισμικού, του Killdisk, το οποίο – εκτός από τα δεδομένα του συστήματος – διαγράφει και τα στοιχεία των εισβολέων σε αυτό (hackers).

Η μόνη λύση για την αντιμετώπιση της επίθεσης αυτής ήταν απενεργοποίηση των τηλεχειρισμών και η μετάβαση σε χειροκίνητους και μόνο χειρισμούς. Παρόλο που η ηλεκτροδότηση αποκαταστάθηκε σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, χρειάστηκαν μήνες ώστε τα κέντρα ελέγχου να είναι πλήρως λειτουργικά [12].

Εκτός της προαναφερθείσας επίθεσης, η Ρωσία από τον Οκτώβριο του 2022 και μέχρι τον Νοέμβριο του 2022, είχε στοχεύσει στο ηλεκτρικό Δίκτυο της Ουκρανίας με χρήση πυραύλων και drone. Οι συγκεκριμένες επιθέσεις προκάλεσαν ζημιές σε βαθμό τέτοιο ώστε πάνω από 10 εκατομμύρια άνθρωποι να μείνουν χωρίς ρεύμα, έχοντας επίσης να αντιμετωπίσουν τις δύσκολες καιρικές συνθήκες του χειμώνα [21].

Επιπλέον, μέχρι το Μάρτιο του 2023 καταστράφηκαν 37 υποσταθμοί διανομής Ηλεκτρικής ενέργειας. Οι καταστροφές αυτές εμφανίστηκαν σε όλη την έκταση της χώρας, αλλά οι πιο κρίσιμες ήταν κοντά στην εμπόλεμη ζώνη. Σημαντικές ζημιές υπέστησαν και οι γραμμές του ηλεκτρικού δικτύου. Η αποκατάσταση του Δικτύου εξαρτάται από την ασφάλεια της περιοχής στην οποία υπάρχουν προβλήματα στο Δίκτυο, την ικανότητα επισκευής Υπό αυτές τις συνθήκες, την χρηματοδότηση και την διαθεσιμότητα καινούριου εξοπλισμού, προϋποθέσεις που για μία χώρα εμπλεκόμενη σε πόλεμο δεν είναι δεδομένο ότι θα πληρούνται [22].

Οι συγκρούσεις μεταξύ των ισραηλινών δυνάμεων και των παλαιστινιακών οργανώσεων αλλά και δυνάμεων της Χεζμπολάχ, έχουν επίσης προκαλέσει καταστροφές στα Δίκτυα των εμπλεκόμενων χωρών (Ισραήλ, Λίβανος, λωρίδα της Γάζας κ.α.) [23]. Ήδη από την αρχή των πιο πρόσφατων συγκρούσεων, στις 07 Οκτωβρίου του 2023, το Ισραήλ σταμάτησε την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στην Γάζα, κι έτσι ο μοναδικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την περιοχή, είχε εξαντλήσει τα καύσιμα του μέχρι τις 11 Οκτωβρίου του 2023 [24]. Για την αποκατάσταση της ηλεκτροδότησης προσωρινώς χρησιμοποιούνται νηζελογεννήτριες, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο το κόστος ηλεκτροδότησης. Οι συγκρούσεις συνεχίζονται με στόχο τα ΣΗΕ χρησιμοποιώντας πυραύλους και drones.

Όπως είναι γνωστό, υπάρχει μεγάλη εξάρτηση της λειτουργίας των κρατών από την ηλεκτρική ενέργεια, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη σχεδόν με κάθε πτυχή της καθημερινής ζωής, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών, της παροχής νερού (το πόσιμο νερό προκύπτει μέσω της διαδικασίας της αφαλάτωσης στην περίπτωση του Ισραήλ), των επικοινωνιών και τις λειτουργίες των νοσοκομείων που ιδιαίτερα στις εμπόλεμες περιοχές αποτελούν από τις πιο κρίσιμες υποδομές [25].

## **1.5 Ακραία καιρικά φαινόμενα στο ελληνικό Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Η κλιματική αλλαγή έχει προκαλέσει σε σημαντικό βαθμό αύξηση της συχνότητας, της έντασης και της διάρκειας των καιρικών φαινομένων [26]. Ενώ στο παρελθόν τέτοια φαινόμενα εμφανίζονταν σπάνια, πλέον έχουν γίνει σύνηθες φαινόμενο με σοβαρές συνέπειες σε κρίσιμες υποδομές, όπως το Δίκτυο Μεταφοράς και το Δίκτυο Διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην παρούσα ενότητα γίνεται αναφορά στα σημαντικότερα ακραία καιρικά φαινόμενα που συνέβησαν τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα και τα οποία είχαν εμφανείς επιπτώσεις στη λειτουργία του Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας, τα οποία επηρέασαν τις ενέργειες του Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) για την αποκατάσταση του Δικτύου.

### 1.5.1 Πλημμύρες - Μάνδρα, Νοέμβριος 2017

Οι συνεχείς καταιγίδες στο χρονικό διάστημα μεταξύ της 14<sup>ης</sup> και της 16<sup>ης</sup> Νοεμβρίου του 2017, προκάλεσαν πρωτόγνωρες πλημμύρες στη Μάνδρα Αττικής. Κατοικίες και επιχειρήσεις πλημμύρησαν και οι δρόμοι μετατράπηκαν σε ορμητικούς χειμάρρους, μεταφέροντας στο πέρασμά τους συντρίμια και λάσπη. Η κυκλοφορία των οχημάτων διακόπηκε σε μεγάλο τμήμα του οδικού δικτύου της περιοχής αυτής της Αττικής.



**Εικόνα 1.7:** Η πλημμύρα στην Μάνδρα, 2017 [28].

Στο συγκεκριμένο φαινόμενο η διάρκεια της καταιγίδας ήταν μικρή (περίπου 7 ώρες), ωστόσο εκδηλώθηκε σε εντοπισμένη χωρική έκταση. Ως αποτέλεσμα, προκλήθηκε εκτεταμένη πλημμύρα στην περιοχή. Το ύψος της βροχής, κυμάνθηκε μεταξύ των 138,4 και 154,7 mm. Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα, η ποσότητα του νερού που έπεσε εξαιτίας της καταιγίδας αυτής ήταν περίπου ίση με το 40% της ποσότητας νερού που πέφτει όλο τον χρόνο.

Οι χείμαρροι που σχηματίστηκαν προκάλεσαν αρκετά προβλήματα στο Δίκτυο:

1. Η υποχώρηση του εδάφους, έφερε στην επιφάνεια το υπόγειο Δίκτυο και ταυτόχρονα συμπαρέσυρε το εναέριο.
2. Τα αυτοκίνητα και άλλα αντικείμενα που παρασύρθηκαν από τον χείμαρρο συνέβαλαν στην πρόκληση ζημιών στους πυλώνες του εναερίου Δικτύου.

Χρειάστηκε να αντικατασταθούν συνολικά 7 υποσταθμοί (Υ/Σ) διανομής και 36 στύλοι Χαμηλής και Μέσης τάσης για την αποκατάσταση των ζημιών που προκλήθηκαν από αυτήν την πλημμύρα στο Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Επίσης, προκλήθηκαν σφάλματα σε πέντε μετασχηματιστές (Μ/Σ) και σε τρεις γραμμές του Δικτύου Μέσης Τάσης (ΜΤ). Περίπου 80 συνδέσεις οικιακών καταναλωτών έμειναν χωρίς παροχή ρεύματος, ενώ παράλληλα

επηρεάστηκαν 3 κρίσιμες υποδομές, με χαρακτηριστική περίπτωση αυτή του νοσοκομείου. Για την αποκατάσταση χρειάστηκε η κινητοποίηση και 50 ατόμων, μηχανικών και τεχνικών Δικτύου.

Οι καταστροφές στο οδικό δίκτυο κατέστησαν δύσκολη έως αδύνατη την πρόσβαση σε πολλά σημεία του Δικτύου Διανομής. Η αστυνομία και η πυροσβεστική υπηρεσία δεν επέτρεψαν στο τεχνικό προσωπικό του διαχειριστή του Δικτύου να προσεγγίσει τις περιοχές που επλήγησαν, λόγω επικινδυνότητας.

Σοβαρές ζημιές προκλήθηκαν και στο τηλεπικοινωνιακό Δίκτυο εξαιτίας της αποκοπής ενός καλωδίου επικοινωνιών, συμβάλλοντας στη δυσκολία αντιμετώπισης του φαινομένου και της αποκατάστασης των ζημιών. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, έγινε η εγκατάσταση ενός μόντεμ GSM στον Υ/Σ της Μάνδρας, ώστε να καταστεί εφικτή η ασύρματη επικοινωνία με το Κέντρο ελέγχου Κατανομής και Διανομής της Περιφέρειας Αττικής του ΔΕΔΔΗΕ. Σημειωτέων ότι η αποκατάσταση του κατεστραμμένου τηλεπικοινωνιακού καλωδίου ολοκληρώθηκε σχεδόν 2 μήνες μετά το περιστατικό, ενώ για την αποκατάσταση του Δικτύου ο ΔΕΔΔΗΕ περάτωσε τις εργασίες του σε μόλις 3 μέρες.

Ως παράγοντες για το συμβάν θα πρέπει να ληφθούν αρχικά η πρωτοφανής ποσότητα του νερού της βροχής και η ένταση του φαινομένου, σε συνδυασμό με την φύση του εδάφους και την αρχιτεκτονική της περιοχής. Πολύ σημαντικός παράγοντας στο αποτέλεσμα της φυσικής αυτής καταστροφής ήταν, όπως αποδείχτηκε, τόσο η έλλειψη αντιπλημμυρικών έργων, όσο και η έλλειψη νομικού/ρυθμιστικού πλαισίου για την αντιπλημμυρική προστασία σε εθνικό επίπεδο. Έτσι κρίθηκε αναγκαίο να ληφθούν άμεσα μέτρα αντιπλημμυρικής προστασίας των κρίσιμων Υ/Σ υψηλού κινδύνου με την τοποθέτηση και εγκατάσταση συσκευών παρακολούθησης και κατάλληλων αισθητήρων στους συγκεκριμένους υποσταθμούς, το μπάζωμα περιφερειακά των υποσταθμών και των control rooms, εγκατάσταση συστημάτων άντλησης νερού και δημιουργία αναχωμάτων, αυξάνοντας τα επίπεδα ασφαλείας όσον αφορά την είσοδο νερού σε αυτούς σε ενδεχόμενη πλημμύρα [27].

### **1.5.2 Κυκλώνας «Ιανός», Σεπτέμβριος 2020**

Η επίδραση του κυκλώνα αυτού επηρέασε την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Την Ελλάδα πλησίασε την χρονική περίοδο μεταξύ της 15ης Σεπτεμβρίου και της 21ης Σεπτεμβρίου 2020 και προκάλεσε σοβαρές ζημιές, εξαιτίας του ισχυρού ανέμου και των βροχοπτώσεων. Η βροχόπτωση του Κυκλώνα αυτού διήρκεσε περίπου 48 ώρες, μια από τις μεγαλύτερες σε διάρκεια που έχουν σημειωθεί, και σε μερικές περιοχές η ποσότητα του νερού ξεπέρασε τον ετήσιο μέσο όρο [30]. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα μεγάλες κατολισθήσεις πετρωμάτων και βράχων.

Οι περιοχές της Ελλάδας που επηρεάστηκαν περισσότερο από τον Κυκλώνα Ιανό ήταν η δυτική, η κεντρική και η νότια Ελλάδα μέχρι και το νησί της Κρήτης. Στην Κεφαλονιά οι ριπές του ανέμου έφτασαν τα 54 m/s.

Οι επιπτώσεις στη λειτουργία του Δικτύου ήταν εμφανείς, με το Δίκτυο να εκδηλώνει περισσότερα από 2500 σφάλματα στις περιοχές της Καρδίτσας, της Μαγνησίας, της Λάρισας, της Φθιώτιδας και της Ευρυτανίας. Χρειάστηκαν παρεμβάσεις στο Δίκτυο Χαμηλής και Μέσης τάσης σε μήκος 17 χλμ., ενώ παράλληλα 144 στύλοι (MT και XT) και 10 εναέριοι υποσταθμοί χρειάστηκαν αντικατάσταση.



**Εικόνα 1.8:** Καταστροφή στο σύστημα ηλεκτροδότησης, κακοκαιρία “Ιανός” [29].

Περίπου 29.000 χρήστες του Δικτύου στην Καρδίτσα υπέστησαν διακοπές ρεύματος εξαιτίας της βαριάς βροχόπτωσης. 114 υπόγειοι υποσταθμοί πλημμύρησαν και τέθηκαν εκτός λειτουργίας. Γενικά οι υποσταθμοί εσωτερικών χώρων μπορούν να αντιμετωπίσουν περιορισμένη μόνο ποσότητα νερού με τη βοήθεια αντλητικών συστημάτων που υπάρχουν εγκατεστημένα. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη περίπτωση, σύμφωνα με διαπιστώσεις των αρμόδιων φορέων, η υποχώρηση του αναχώματος του ποταμού Καράμπαλη προκάλεσε υπερχείλιση του ποταμού, με αποτέλεσμα η στάθμη του νερού να ξεπεράσει σε πολλά σημεία της πόλης της Καρδίτσας ακόμη και το 1m [31].

Αυτό είχε ως συνέπεια να πλημμυρίσουν τα 2/3 της πόλης και το νερό δεν έβρισκε διέξοδο διαφυγής μέχρι να διορθωθεί η ζημία που προκάλεσε η υποχώρηση των αναχωμάτων του ποταμού. Η ορμητικότητα των νερών σε πολλές περιπτώσεις παρέσυρε και αποξήλωσε τις εγκαταστάσεις του εναερίου Δικτύου. Επίσης, δεδομένου ότι η όδευση του πεπαλαιωμένου Δικτύου Μέσης Τάσης δεν ακολουθούσε την όδευση του οδικού δικτύου, αυξήθηκε ο χρόνος αποκατάστασης σημαντικά, λόγω δυσκολίας πρόσβασης. Μεταφέρθηκαν συνολικά 11 γεννήτριες συνολικής ισχύος 6,5 MW στην Καρδίτσα προκειμένου να τροφοδοτήσουν τους χρήστες μέχρι να αποκατασταθεί το κατεστραμμένο Δίκτυο.

Επίσης, εξαιτίας των ισχυρών ανέμων (90χλμ/ώρα) προκλήθηκαν μεγάλες καταστροφές στο Δίκτυο Ηλεκτροδότησης της Κεφαλονιάς, της Ιθάκης και της Ζακύνθου. Ως αποτέλεσμα των ζημιών αυτών ήταν η ολική διακοπή ηλεκτροδότησης στο νησί της Ιθάκης, η οποία είναι ηλεκτρικά διασυνδεδεμένη με υποβρύχιο καλώδιο με την Κεφαλονιά, όπως επίσης και μεγάλο μέρος των άλλων δύο νησιών, Κεφαλονιάς και Ζακύνθου. Οι πιο σημαντικές ζημιές καταγράφηκαν στην Ιθάκη και στο βόρειο τμήμα της Κεφαλονιάς όπου πεσμένα δέντρα κατέστρεψαν το εναέριο Δίκτυο, θέτοντας εκτός τις Γραμμές Μέσης και Χαμηλής Τάσης. Επίσης, οι καταστροφές που προκλήθηκαν στο οδικό δίκτυο δυσχέραναν την πρόσβαση στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας για επιθεώρηση και επέμβαση όπου υπήρχε εντοπισμός ζημιάς. Το συνολικό μήκος του Δικτύου που υπέστη ζημιές στα νησιά αυτά ήταν της τάξης των 1.148 χλμ. για το Δίκτυο της Μ.Τ. και 1.771 χλμ. για το Δίκτυο της Χ.Τ, ενώ ο αριθμός των χρηστών που έμειναν χωρίς ρεύμα ανήρθε στους 56 για τη Μ.Τ. και στους 63.300 για τη Χ.Τ.

Το Δίκτυο αποκαταστάθηκε σχετικά άμεσα, ωστόσο οι οικονομική ζημία για την αποκατάσταση των υποδομών του Δικτύου εκτιμήθηκε περίπου στις 200.000 € για την Ζάκυνθο, 500.000 € για την Κεφαλονιά και 400.000 € για την περιοχή της Καρδίτσας [28].

### 1.5.3 Κακοκαιρία «Μήδεια», Φεβρουάριος 2021

Σύμφωνα με ιστορικά δεδομένα, η κακοκαιρία Μήδεια προκάλεσε την ισχυρότερη χιονόπτωση των τελευταίων 40 ετών στην Ελλάδα.

Η κακοκαιρία προκάλεσε κύμα ψύχους στο χρονικό διάστημα 13 - 17 Φεβρουαρίου 2021 σε περιοχές όπως η Δυτική Μακεδονία, η Θεσσαλία, η Ανατολική Κεντρική Ελλάδα και η Κρήτη. Επίσης σημειώθηκαν έντονες χιονοπτώσεις σε Εύβοια, Βοιωτία, Μαγνησία και Αττική, με το επίπεδο του χιονιού να φτάνει τους 25 πόντους. Εξαιτίας της χιονόπτωσης υπήρξαν διακοπές ρεύματος και νερού, όπως επίσης και δυσκολία στις μετακινήσεις.

Οι θερμοκρασίες έφτασαν στο ελάχιστο τους -25,1οC στην Δυτική Μακεδονία και τους -20,4 °C στην Πτολεμαΐδα.

Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης κακοκαιρίας διαπιστώθηκε ότι οφειλόταν στις υψηλές θερμοκρασίες, εξαιτίας των οποίων η περιεκτικότητα του νερού στις νιφάδες του χιονιού ήταν πολύ μεγάλη οπότε και είχαν μεγαλύτερο βάρος ανά μονάδα επιφανείας. Παρά την αυξημένη ταχύτητα του ανέμου σε σύγκριση με άλλες χιονοπτώσεις, το χιόνι δεν μπορούσε να παρασυρθεί εύκολα κοντά στο έδαφος, με αποτέλεσμα πολλά δέντρα και κλαδιά να καταρρεύσουν από το βάρος του χιονιού.



**Εικόνα 1.9:** Αποκατάσταση από τεχνικό συνεργείο ΔΕΔΔΗΕ σε εξοπλισμό του εναερίου Δικτύου, κακοκαιρία «Μήδεια».

Πολλά από αυτά τα δέντρα (σχεδόν 700 στον αριθμό) έπεσαν σε γραμμές Χαμηλής και Μέσης τάσης στο Δίκτυο της Αττικής, σύμφωνα με στοιχεία του ΔΕΔΔΗΕ [32]. Αυτό είχε ως συνέπεια την αποξήλωση του εναερίου Δικτύου και την κατάρρευση των στύλων αυτού, τσιμέντινων και ξύλινων. Συνολικά οι καταστροφές του Δικτύου καταγράφηκαν σε έκταση 300 χλμ. 3 εναέριοι υποσταθμοί χρειάστηκαν εξολοκλήρου αντικατάσταση, ενώ καταστράφηκαν επίσης 850



μετασχηματιστές και 30 γραμμές Μέσης Τάσης. Όσον αφορά τους χρήστες του Δικτύου, 205.000 παροχές παρέμειναν σβηστές και ακόμη 20 κρίσιμες υποδομές καταναλωτών (όπως νοσοκομεία, δημόσιες υπηρεσίες, σχολεία) επηρεάστηκαν από το φαινόμενο.

Η κατάρρευση του Δικτύου είχε επίσης επίπτωση και στη λειτουργία των αντλιοστασίων νερού, με αποτέλεσμα να υπάρχουν εκτεταμένες διακοπές νερού σε αρκετές περιοχές, όπως επίσης και προβλήματα στην λειτουργία κρίσιμων μονάδων (πχ νοσοκομεία).

Στην αποκατάσταση του Δικτύου συμμετείχαν συνεργεία περίπου 400 υπαλλήλων ΔΕΔΔΗΕ, μηχανικών και τεχνιτών, και συνεργαζόμενων εργολάβων από όλη την επικράτεια της χώρας σε συνεργασία με τους Δήμους, την πυροσβεστική υπηρεσία, την πολιτική προστασία και τον στρατό, οι οποίοι συνέβαλλαν στην διάνοιξη δρόμων και στο κλάδεμα δέντρων. Με αυτόν τον τρόπο, έγινε ευκολότερη η πρόσβαση των τεχνικών συνεργείων για την αποκατάσταση του Δικτύου [32].

Σημαντικός παράγοντας στην αντιμετώπιση των καταστροφών στα όρια της Διεύθυνσης Περιφέρειας Αττικής του ΔΕΔΔΗΕ, ήταν ο διαχωρισμός των περιοχών της Βόρειας Αττικής που επλήγησαν σε 9 κύριες ζώνες, για τον αποτελεσματικότερο συντονισμό των ομάδων, ώστε να εκτελούνται οι απαραίτητες εργασίες με ασφάλεια και ταχύτητα. Ο χρόνος αποκατάστασης του Δικτύου ήταν περίπου 6 ημέρες [32].

#### 1.5.4 Κύμα καύσωνα - Πυρκαγιές, Αύγουστος 2021

Κατά την περίοδο μεταξύ της 27<sup>ης</sup> Ιουλίου και της 6<sup>ης</sup> Αυγούστου εκδηλώθηκε ένα πρωτοφανές κύμα καύσωνα στην χώρα με πολύ υψηλές θερμοκρασίες, μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες για την εποχή, που άγγιζαν τους 43 - 44°C. Ακόμη και οι χαμηλότερες θερμοκρασίες κατά την διάρκεια της ημέρας ξεπερνούσαν τους 29°C.



**Εικόνα 1.10:** Καταστροφή εναέριου Υ/Σ από πυρκαγιά, Ιπποκράτειος Πολιτεία 2021.

Εξαιτίας των παρατεταμένων υψηλών θερμοκρασιών, υπήρξε μεγάλη καταπόνηση του Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας. Επίσης η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια παρουσίασε εξαιρετική αύξηση, κυρίως λόγω της μεγάλης χρήσης κλιματιστικών.

Κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου του καύσωνα που επηρέασε όλη την χώρα, κι ενώ παράλληλα είχε προβλεφθεί υψηλός κίνδυνος πυρκαγιάς σε πολλές περιοχές στην κατηγορία 4 και 5, φωτιές ξέσπασαν σε πολλά σημεία της χώρας. Συνολικά κάηκαν περίπου 1.148.000 στρέμματα δάσους και χαμηλής βλάστησης στην Βόρεια Εύβοια, στην Αρχαία Ολυμπία, στην Ανατολική Μάνη και σε περιοχές τις Αττικής, με όλες τις επιπτώσεις που μπορούσε να έχει το φαινόμενο στο διερχόμενο από αυτές τις περιοχές Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Μία από τις περιοχές που επλήγησαν σε αυτήν την μεγάλη και καταστροφική πυρκαγιά ήταν η Βαρυμπόμπη στην Αττική, στην οποία η φωτιά επεκτάθηκε σχεδόν ακαριαία, ενώ το θερμικό φορτίο ξεπέρασε τους 1000°C.

Οι παράγοντες εκείνοι που συνέβαλαν στην γρήγορη διάδοση της φωτιάς, ήταν:

1. Οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούσαν εκείνο το χρονικό διάστημα στην περιοχή (παρατεταμένες χρονικά υψηλές θερμοκρασίες του αέρα, χαμηλά επίπεδα υγρασίας, ξηρασία)
2. Η περιοχή είναι κατοικημένη αλλά και δασική. Οι εναέριες δυνάμεις ανέλαβαν τον περιορισμό της πυρκαγιάς ενώ στο έδαφος οι δυνάμεις που συντονίστηκαν επικεντρώθηκαν στην διάσωση της ανθρώπινης περιουσίας. Ωστόσο ο συντονισμός αυτός δεν ήταν αποτελεσματικός, διότι μετά τις εναέριες ρίψεις νερού, λόγω της χαμηλής σχετικής υγρασίας που επικρατούσε, η φωτιά αναζωπύρωνε [33].
3. Η παρουσία εύφλεκτων υλικών στο πέρασμα της πυρκαγιάς,
4. Η βλάστηση της περιοχής, αποτελούμενη από εύφλεκτα δέντρα,
5. Η μορφολογία της περιοχής, η οποία εκτείνεται ανάμεσα στην Πάρνηθα και την Πεντέλη δημιουργώντας μια «χοάνη».



**Εικόνα 1.11:** Καταστροφή στύλου Μέσης Τάσης – Πυρκαγιές, καλοκαίρι 2021.

Η φωτιά προκάλεσε ζημιά σε ηλεκτροφόρα καλώδια, με αποτέλεσμα ο ΑΔΜΗΕ να δώσει εντολή για διακοπές ρεύματος στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής προκειμένου να διατηρηθεί η σταθερότητα και η ομαλή λειτουργία του Δικτύου. Οι διακοπές ρεύματος που πραγματοποιήθηκαν διήρκεσαν μικρό χρονικό διάστημα.

Οι συνέπειες όσον αφορά το Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας ήταν καταστροφικές. Αρχικά περίπου 4000 ξύλινοι στύλοι κάηκαν, όπως επίσης κάηκαν και αντικαταστάθηκαν και 285

χλμ. Δικτύου Μέσης και Χαμηλής τάσης, προκειμένου να είναι εφικτή η επανηλεκτροδότηση του Δικτύου. Οι εργασίες αποκατάστασης ξεκίνησαν αμέσως, ωστόσο η αναζωπύρωση της φωτιάς είχε ως αποτέλεσμα εκτεταμένες ζημιές στο Δίκτυο καίγοντας και πάλι τμήματα Δικτύου που είχαν ήδη αντικατασταθεί. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθούν και οι ζημιές που προκλήθηκαν σε υγιή και ανέπαφα από τη φωτιά τμήματα του Δικτύου από την πτώση καμένων κλαδιών και δέντρων επάνω στις Γραμμές.

Καταστροφές του Δικτύου ίδιας κλίμακας με τις Βαρυμπόμπης καταγράφηκαν και σε άλλα μέρη της χώρας, όπως στην Βόρεια Εύβοια και την Πελοπόννησο, για να μπορέσει να κατανοήσει κανείς το μέγεθος της καταστροφής του Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας.



**Εικόνα 1.12:** Καταστροφή εναερίου Δικτύου Μ.Τ.



**Εικόνα 1.13:** Καταστροφή εναερίου Δικτύου Μ.Τ.

Στην αποκατάσταση της λειτουργίας του Δικτύου στην Βαρυμπόμπη συμμετείχε προσωπικό ΔΕΔΔΗΕ και εργολάβων από όλη τη χώρα. Η αποκατάσταση του Δικτύου έγινε:

- Κατά 90% στην Πελοπόννησο μέχρι τις 11 Αυγούστου
- Κατά 90 % στην Εύβοια μέχρι τις 13 Αυγούστου
- Κατά 95 % στην Αττική μέχρι τις 11 Αυγούστου.



**Εικόνα 1.14:** Καταστροφή εναερίου Υ/Σ.



**Εικόνα 1.15:** Αποκατάσταση εναερίου Δικτύου.



Για την εξυπηρέτηση των κρίσιμων φορτίων στις πληγείσες περιοχές στις οποίες ήταν δύσκολη η άμεση αποκατάσταση του Δικτύου, χρησιμοποιήθηκαν φορητές γεννήτριες συνολικής ισχύος 2,12 MW.

Το τελικό κόστος της ζημίας αυτής της πυρκαγιάς υπολογίζεται περί τα 16 εκατ. € [27].

#### 1.5.5. Κακοκαιρία «Ελπίς», Ιανουάριος 2022:

Η κακοκαιρία αυτή ξεκίνησε στις 24 Ιανουαρίου 2022 και επηρέασε κυρίως την Ανατολική Μεσόγειο. Χιονοθύελλες σημειώθηκαν στις ορεινές περιοχές της χώρας, ενώ χιονοπτώσεις έλαβαν χώρα και σε περιοχές με πιο χαμηλό υψόμετρο. Η Αθήνα, η Εύβοια, η Κρήτη και τα νησιά του Αιγαίου ήταν μερικές από τις περιοχές οι οποίες επλήγησαν από αυτήν την κακοκαιρία.

Χαρακτηριστικά του φαινομένου «Ελπίς» ήταν:

1. Πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (το θερμόμετρο άγγιξε τους  $-18^{\circ}\text{C}$ ).
2. Βαριά χιονόπτωση ακόμη και σε πεδινές περιοχές της χώρας, στα Βόρεια προάστια Αθήνας και σε νησιά του Αιγαίου.
3. Δυνατοί άνεμοι, της τάξης των 8 - 9 μποφόρ.
4. Εμφάνιση του σπάνιου φαινομένου της χιονοκαταιγίδας, στην οποία εκδηλώνεται χιονόπτωση με βροντές, κεραυνούς και αστραπές [34].

Επιπτώσεις του φαινομένου αυτού στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας ήταν οι διακοπές ρεύματος σε περισσότερες από 25 περιοχές των Βορείων Προαστίων της Αθήνας, με καταγεγραμμένες περισσότερες από 5.000 βλάβες. Αιτίες των διακοπών αυτών ήταν:

- Η καταστροφή τσιμέντινων και ξύλινων στύλων Χαμηλής και Μέσης τάσης (άνω των 5000 σε αριθμό),
- Η κοπή αγωγών Χαμηλής και Μέσης τάσης,
- Τα βραχυκυκλώματα μεταξύ αγωγών Μέσης Τάσης,
- Η κοπή παροχικών καλωδίων,
- Οι καμένες ασφάλειες λόγω των προκληθέντων βραχυκυκλωμάτων.



**Εικόνα 1.16:** Υποχώρηση δίστυλου Μ/Σ από το βάρος του χιονιού.

Στην Αττική καταγράφηκαν σφάλματα σε 79 γραμμές Μέσης Τάσης (ΜΤ), εκ των οποίων οι 55 εκδηλώθηκαν ταυτόχρονα (!), θέτοντας αυτές εκτός λειτουργίας.

Περίπου 657 περιστατικά βλαβών, 24 εκ των οποίων αφορούσαν την Μέση Τάση, σημειώθηκαν στην Στερεά Ελλάδα, ενώ στα Νησιά του Αιγαίου οι βλάβες ανήλθαν στις 448, με 126 από αυτές να αφορούν τις Γραμμές Μέσης Τάσης (ΜΤ), 113 τις Γραμμές Χαμηλής Τάσης (ΧΤ) και 209 τις Γραμμές παροχών.

Για την υποστήριξη των καταναλωτών και για την καλύτερη επικοινωνία κατά την διάρκεια του φαινομένου, ο Διαχειριστής ενίσχυσε το βλαβοληπτικό του κέντρο με μεγάλο αριθμό μισθωτών, για τη διαχείριση του εξαιρετικά μεγάλου όγκου των τηλεφωνικών κλήσεων που λάμβαναν από τους χρήστες του Δικτύου. Ο ΔΕΔΔΗΕ, αναλαμβάνοντας πρωτοβουλία, πολλές φορές ερχόταν σε επικοινωνία με τους πολίτες κάτοικους των περιοχών στις οποίες το Δίκτυο είχε υποστεί βλάβη. Με τον τρόπο αυτό, έγινε εφικτή η συλλογή απαραίτητων στοιχείων για τις βλάβες στο Δίκτυο και για την σωστή ιεράρχηση των αιτημάτων προς αποκατάσταση. Το υπεύθυνο τεχνικό προσωπικό και εξωτερικοί συνεργάτες (συνολικά 756 άτομα) κλήθηκαν να διαχειριστούν τις καταγεγραμμένες βλάβες έχοντας στη διάθεσή τους 233 οχήματα. Επίσης, τέθηκαν σε λειτουργία 17 γεννήτριες σε κρίσιμα τμήματα του Δικτύου της Κεντρικής Ελλάδας.



**Εικόνα 1.17:** Ο όγκος του χιονιού στον Υμηττό μετά την διέλευση της κακοκαιρίας «Έλπις».



**Εικόνα 1.18:** Ερπυστριοφόρο όχημα στην Περιοχή Φιλοθέης - Κηφισιάς (ΠΦΚ/ΔΠΑ).

Ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για τη διευκόλυνση πρόσβασης στα σημεία ήταν η διάνοιξη των δρόμων για την διέλευση των οχημάτων των αρμόδιων Υπηρεσιών και Φορέων για την αποκατάσταση του Δικτύου. Σε περιοχές που η προσβασιμότητα ήταν σχετικά ομαλή οι ζημιές αποκαταστάθηκαν σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, ενώ για την αποκατάσταση του Δικτύου στις πιο δύσκολα προσβάσιμες λόγω του όγκου του χιονιού περιοχές, απαιτήθηκε μεγαλύτερος χρόνος. Μάλιστα, σε μερικές περιοχές το συνεργείο του ΔΕΔΔΗΕ εξοπλίστηκε με ερπυστριοφόρο όχημα για την πρόσβαση σε αυτές. Εκτός του χιονιού, τα εγκαταλελειμμένα ακινητοποιημένα αυτοκίνητα και τα πεσμένα από το βάρος του χιονιού δέντρα έκαναν ακόμη πιο

δύσκολο το έργο της διάνοιξης των δρόμων και επομένως και την πρόσβαση των τεχνικών συνεργείων στα σημεία του Δικτύου προς αποκατάσταση. Επίσης, δεδομένου ότι επλήγησαν πυκνοκατοικημένες περιοχές του λεκανοπεδίου, όπως οι Δήμοι Ζωγράφου, Καισαριανής, Βύρωνα, ακόμη και το κέντρο της Αθήνας, λόγω της στενότητας των δρόμων και των μεγάλων κλίσεων σε κάποιες περιοχές (π.χ. Ζωγράφου), οι τεχνίτες μπορούσαν να προσεγγίσουν στους Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ μόνο με τα πόδια κουβαλώντας στα χέρια τον απαραίτητο εξοπλισμό, ενώ τα γερανοφόρα οχήματα για την αποκατάσταση του εναερίου Δικτύου ήταν αδύνατο να εισέλθουν στους μικρούς αυτούς δρόμους. Στο εναέριο Δίκτυο ηλεκτροδότησης των κεραιών κινητής τηλεφωνίας και ασύρματων επικοινωνιών των ενόπλων δυνάμεων, τους τεχνίτες τους μετέφερε η Ειδική Μονάδα Αντιμετώπισης Καταστροφών (ΕΜΑΚ).



**Εικόνα 1.19:** Υμηττός (κορυφή – Προς κεραιές κινητής τηλεφωνίας).



**Εικόνα 1.20:** Το οδικό δίκτυο στην περιοχή Ζωγράφου μετά την διέλευση της κακοκαιρίας.



**Εικόνα 1.21:** Σταμάτα - αποκλεισμός εισόδου σε εγκαταστάσεις.

Από την αρχή του φαινομένου, σε πολλά τμήματα του Δικτύου η πρόσβαση ήταν αδύνατη ακόμη και για την επιθεώρησή τους. Ως εκ τούτου, υπήρξαν καθυστερήσεις στην αποκατάσταση



της ηλεκτροδότησης στις αποκλεισμένες περιοχές. Ωστόσο, παρά τις δυσκολίες, το 95% του βλαμμένου Δικτύου είχε αποκατασταθεί μέχρι τις 26 Ιανουαρίου 2022 [27].

### **1.5.6 Βέλτιστες πρακτικές αντιμετώπισης καταστροφών του Δικτύου από ακραία καιρικά φαινόμενα**

Κάνοντας μια σύντομη ανασκόπηση στην εμφάνιση των ακραίων καιρικών φαινομένων των τελευταίων χρόνων, εύκολα μπορεί να κατανοήσει κανείς τις επιπτώσεις που αυτά έχουν στη λειτουργία του Δικτύου. Οι πυρκαγιές, οι πλημμύρες και οι χιονοπτώσεις είναι φυσικά φαινόμενα που ανέκαθεν ο άνθρωπος έπρεπε να διαχειριστεί. Η σφοδρότητα, ωστόσο, αυτών, όπως επίσης και η συχνότητα εκδήλωσής τους, έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια σε βαθμό τέτοιο ώστε να προκαλούν τεράστιες καταστροφές στις υποδομές του Δικτύου. Οι διαχειριστές των Δικτύων Διανομής (ΑΔΜΗΕ και ΔΕΔΔΗΕ) καλούνται να αντιμετωπίσουν τις ζημιές που προκαλούνται στο Δίκτυο σε τακτική βάση, πλέον.

Ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας της αύξησης της συχνότητας εκδήλωσης ακραίων καιρικών φαινομένων είναι η κλιματική αλλαγή. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να μελετηθούν τα νέα κλιματικά δεδομένα, έτσι ώστε η συντήρηση, ο έλεγχος και η επιθεώρηση του Δικτύου να πραγματοποιούνται πλέον προσαρμοσμένα σε αυτά.

Η ταχεία αποκατάσταση του Δικτύου αποτελεί δείκτη εξέχουσας σημασίας. Για να επιτευχθεί αυτό, η πρόσβαση στα σημεία του Δικτύου που έχουν σε κάποια έκταση πληγεί πρέπει να είναι εύκολη και γρήγορη. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη η ύπαρξη σχεδίων δράσης στην περίπτωση που η δίοδος πρόσβασης στο κατεστραμμένο δίκτυο για κάποιο λόγο κοπεί, έτσι ώστε ο χρόνος πρόσβασης των συνεργείων και αποκατάστασης του Δικτύου να περιοριστεί στο ελάχιστο. Για το λόγο αυτό, ένα από τα μέτρα βελτίωσης της Εκμετάλλευσης του Δικτύου είναι η αλλαγή όδευσης αυτού, ώστε να πηγαίνει κατά μήκος του οδικού δικτύου όπου αυτό είναι εφικτό. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή του Δικτύου πρέπει να γίνεται εξ αρχής με τρόπο ώστε να βοηθάει την πρόσβαση τεχνικού συνεργείου, τόσο για επιθεώρηση και συντήρηση όσο και για αποκατάσταση τυχόν προβλημάτων.

Για την μείωση του χρόνου αποκατάστασης, αλλά και για διευκόλυνση στα θέματα πρόσβασης, είναι επίσης απαραίτητη η συνεργασία με άλλους φορείς (υπηρεσίες του δήμου, πυροσβεστική υπηρεσία, αστυνομία κτλ.), όπως και με τους χρήστες του Δικτύου των οποίων οι παροχές ηλεκτρικού ρεύματος παραμένουν κομμένες λόγω βλαβών και ζημιών στο Ηλεκτρικό Δίκτυο. Η συμβολή του ανθρώπινου δυναμικού στην επιδιόρθωση των βλαβών που προκλήθηκαν από τα προαναφερθέντα καιρικά φαινόμενα είναι καθοριστικής σημασίας. Για να είναι κάτι τέτοιο εφικτό, είναι απαραίτητος ο εκσυγχρονισμός και η αναμόρφωση του τρόπου επικοινωνίας, επενδύοντας σε σύγχρονα τηλεφωνικά κέντρα και συστάσεις ειδικών ομάδων με άτομα από διάφορους φορείς, για την αντιμετώπιση ακραίων περιστατικών. Επενδύοντας και εξελίσσοντας την τεχνολογία και την τεχνική των μετεωρολογικών προβλέψεων, υπάρχει η δυνατότητα καταγραφής των περιοχών εκείνων που είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στην εκδήλωση ακραίων καιρικών φαινομένων. Έτσι γίνεται καλύτερη οργάνωση και σχεδιασμός για τον σωστό συντονισμό του προσωπικού και την ισοκατανομή του διαθέσιμου εξοπλισμού (οχήματα, εξοπλισμός για αντικατάσταση κ.α.). Η μορφολογία του εδάφους είναι επίσης σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την σωστή προετοιμασία στην αντιμετώπιση των καταστάσεων αυτών.

Άλλος πολύ σημαντικός δείκτης που χαρακτηρίζει τη λειτουργία του Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι η έκταση εμφάνισης βλαβών. Ορθός και εκσυγχρονισμένος τρόπος σχεδιασμού και μελέτης Δικτύων θεωρείται πλέον η υπογειοποίηση αυτών. Η κατασκευή εναερίου Δικτύου μπορεί να είναι φθηνότερη από αυτή του υπογείου, ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχει αποδειχθεί ότι πρόκειται για επένδυση η οποία αποδεικνύεται ως η πλέον συμφέρουσα και η οποία αποσβαίνει ομαλά σε βάθος χρόνου. Από τις επεμβάσεις αποκατάστασης του κατεστραμμένου εναερίου Δικτύου Μέσης Τάσης στην Αττική, είναι εμφανές ότι η παραλλαγή του υφιστάμενου εναερίου Δικτύου σε υπόγειο έχει μειώσει κατά πολύ το κόστος εκμετάλλευσης αυτού (επιθεωρήσεις, κλαδέματα, βλάβες από εξωτερικούς παράγοντες και καιρικά φαινόμενα, κτλ). Παρ' ότι, δηλαδή, το κόστος αποκατάστασης βλαβών αποτελεί σημαντικό δείκτη λειτουργίας του Δικτύου, όσον αφορά τον σχεδιασμό και τη μελέτη κατασκευής αυτού, ωστόσο δεν πρέπει να παραβλέπουμε τα κόστη της εκμετάλλευσης αυτού, και κατά συνέπεια την ενίσχυση της ανθεκτικότητας γενικότερα.

Από όλα τα παραπάνω καταλήγουμε στο εξής πολύ σημαντικό συμπέρασμα: Όσο μεγαλύτερη είναι η ανθεκτικότητα του δικτύου στα ακραία καιρικά φαινόμενα, τόσο μικρότερες είναι οι επιπτώσεις που αυτά έχουν, τόσο λειτουργικά, όσο και οικονομικά σε βάθος χρόνου.

## Κεφάλαιο 2

### Μέθοδοι αντιμετώπισης επιπτώσεων των ακραίων φαινομένων στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας

#### 2.1 Ανθεκτικότητα δικτύου – Ορισμός

Δεν έχει γίνει εφικτό μέχρι σήμερα να δοθεί σαφής και ξεκάθαρος ορισμός για την έννοια της ανθεκτικότητας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), εξαιτίας της πολύπλευρης φύσης της έννοιας αυτής, η οποία περιλαμβάνει πολλές πτυχές, όπως για παράδειγμα η συσχέτιση της ανθεκτικότητας με την αξιοπιστία, των συγκεκριμένων γεγονότων έναντι των τυχαίων ή/και απρόβλεπτων, καθώς και των ποσοτικών και ποιοτικών δεικτών [35]. Έχουν, ωστόσο, γίνει αρκετές προσπάθειες περιγραφής του περιεχομένου της έννοιας «Ανθεκτικότητα του Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας», καθώς πρόκειται, πλέον, για την ιδιότητα εκείνη στην οποία έχει στραφεί τον τελευταίο καιρό το ενδιαφέρον των μηχανικών για μελέτη.

Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), η ανθεκτικότητα ενός συστήματος ορίζεται ως η ικανότητά του να προβλέπει, να απορροφά και να ανακάμπτει από τις επιπτώσεις επιβλαβών γεγονότων αποτελεσματικά και εντός εύλογου χρονικού πλαισίου. Επίσης, η Ομοσπονδιακή Ρυθμιστική Επιτροπή Ενέργειας των ΗΠΑ (US Federal Energy Regulatory Commission) ορίζει την ανθεκτικότητα του δικτύου ως την «ικανότητα να αντέχει και να μειώνει το μέγεθος ή/και τη διάρκεια των απρόβλεπτων γεγονότων, η οποία περιλαμβάνει την ικανότητα πρόβλεψης, απορρόφησης, προσαρμογής ή/και ταχείας ανάκαμψης από ένα τέτοιο συμβάν».

Ενώ τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας θεωρούνται παραδοσιακά ως αξιόπιστα (κυρίως όσον αφορά τον ενεργειακό εφοδιασμό) έναντι των πιο κοινών απειλών, τα πρόσφατα ακραία καιρικά φαινόμενα που εκδηλώθηκαν ανά την υφήλιο, έχουν υποδείξει την αυξανόμενη σημασία επίτευξης υψηλών επιπέδων ανθεκτικότητας για τα δίκτυα διανομής, με στόχο τον μετριασμό των επιπτώσεων των φαινομένων υψηλού κινδύνου - χαμηλής πιθανότητας (High Impact Low Frequency, HILF events) και γρήγορης ανάκαμψης από αυτά.

Δεδομένης της συνεχούς αυξητικής συχνότητας εμφάνισης των φαινομένων αυτών (HILF events) συγκριτικά με το παρελθόν και των όλο και περισσότερο δυσμενών επιπτώσεών τους στα Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, ο όρος αυτός πλέον θα μπορούσε να μετονομαστεί σε φαινόμενα υψηλού κινδύνου – υψηλής πιθανότητας (High Impact High Frequency, HIHF events). Τα γεγονότα αυτά αποτελούν ουσιαστικά περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, οι οποίες συμβάλουν σημαντικά στον λειτουργικό κίνδυνο του Δικτύου, απαιτώντας άμεσες ενέργειες μετριασμού των επιπτώσεων από τέτοιες απρόβλεπτες καταστάσεις [36].

Δημιουργείται στο σημείο αυτό το ερώτημα: γιατί η ανθεκτικότητα των Δικτύων αποτελεί σημαντική παράμετρο κατασκευής αυτών; Εκτός από το γεγονός ότι ένα ανθεκτικό Δίκτυο έχει την δυνατότητα να καλύπτει πλήρως και αδιαλείπτως τις ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών, διακρίνεται ότι υπάρχει μια ισχυρή εξάρτηση της λειτουργίας του ηλεκτρικού Δικτύου και της λειτουργίας άλλων υποδομών που χρειάζονται αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Σημαντικό παράδειγμα αποτελεί η αδιάλειπτη ηλεκτροδότηση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και των συστημάτων πληροφορικής, καθώς:

- Η λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών δικτύων και των δικτύων πληροφορικής είναι αλληλοεξαρτημένη με την λειτουργία των ΣΗΕ. Καταρχάς η λειτουργία αυτών εξαρτάται άμεσα από την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στις εγκαταστάσεις τους. Κατά δεύτερον, μια διακοπή ηλεκτροδότησης αυτόματα επηρεάζει τόσο την επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους συστημάτων του Δικτύου αλλά και της επικοινωνίας της βάσης με τους τεχνίτες, αυξάνοντας έτσι τον χρόνο αποκατάστασης της ηλεκτροδότησης, αλλά και γενικότερα διαταράσσει την εύρυθμη λειτουργία των ΣΗΕ.
- Οι υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης οι οποίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και συνεπώς από την αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, αδυνατούν να εξυπηρετήσουν το κοινό σε περιπτώσεις εμφάνισης προβλημάτων στην ηλεκτροδότηση των συστημάτων που τις υποστηρίζουν.

Επειδή από την καθημερινότητα στη σύγχρονη ψηφιακή εποχή αποδεικνύεται το μέγεθος της εξάρτησης από την ηλεκτρική ενέργεια, γίνεται κατανοητή η ανάγκη της αδιάλειπτης και ποιοτικής παροχής της ενέργειας αυτής, χωρίς εμπόδια, στον τελικό χρήστη [37].

### 2.1.1 Παράμετροι ανθεκτικότητας – Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά

Έχει αποδειχτεί η ανάγκη σαφούς διαχωρισμού μεταξύ της ανθεκτικότητας και άλλων όρων που μπορούν να χαρακτηρίσουν τις ιδιότητες ενός Δικτύου. Με τον τρόπο αυτό γίνεται πιο εύκολη η κατανόηση και η σημασία αυτών:

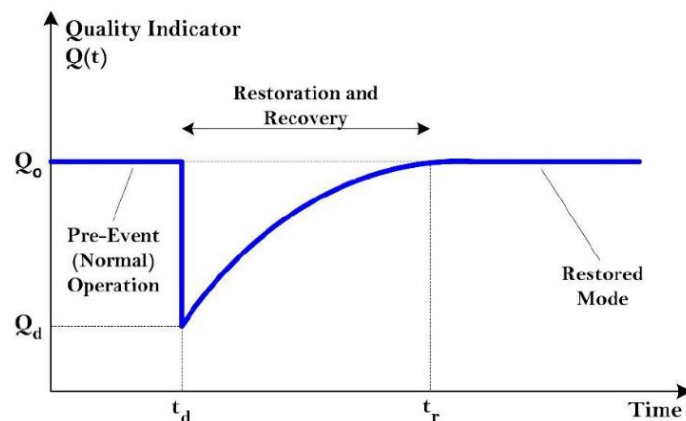
- Αξιοπιστία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ΣΗΕ (reliability): Ένα αξιόπιστο ΣΗΕ είναι ικανό να **λειτουργεί** ομαλά ενώ παράλληλα λαμβάνουν χώρα συνήθεις απειλές [36]. Σε αυτήν την περίπτωση, το Δίκτυο προσβάλλεται από φαινόμενα που μπορεί να έχουν μικρές επιπτώσεις αλλά εμφανίζονται πολύ συχνά. (Low Impact High Frequency, LIHF) [37].
- Δυναμικότητα ή ευρωστία (robustness): Αυτή η ιδιότητα του Δικτύου το καθιστά ικανό να **αντέχει** σε διαφορετικές συνθήκες και να μην καταρρέει, χρησιμοποιώντας τον απαραίτητο εγκατεστημένο εξοπλισμό για την λειτουργία του. Ωστόσο, σε περίπτωση κατάρρευσης του Δικτύου, ο εξοπλισμός αυτός δεν εξασφαλίζει την επαναφορά του. Είναι σαφές ότι αυξάνοντας την ευρωστία του δικτύου μπορούμε να αυξήσουμε και το επίπεδο **ανθεκτικότητας** στο Δίκτυο. Όμως αυτό μπορεί να αποδειχτεί ότι είναι οικονομικά ασύμφορο. Η αντικατάσταση του υπάρχοντος εξοπλισμού με νέες συσκευές καλύτερης τεχνολογίας και μεγαλύτερης αποδοτικότητας σε όλη την έκταση του Δικτύου έχει φυσικά μεγάλο κόστος και πολλές φορές είναι πρακτικά αδύνατη η αντικατάσταση. Ειδικά κατά την διάρκεια ακραίων φαινομένων, μία τέτοια ενέργεια δεν είναι εύκολα πραγματοποιήσιμη, λόγω του περιορισμένου χρόνου για την αποκατάσταση των βλαβών και την επαναφορά λειτουργίας του Δικτύου. Για το λόγο αυτό ο συγκεκριμένος δείκτης δεν μπορεί να προταθεί ως ιδανική και καλή λύση για την αύξηση της ανθεκτικότητας του Δικτύου [37].
- Ασφάλεια (security): Η ιδιότητα αυτή κατέχει πάντα κύρια προτεραιότητα ως προς την εξασφάλισή της για τη λειτουργία και τον σχεδιασμό των ΣΗΕ. Ειδικότερα, με την ψηφιοποίηση των ΣΗΕ και έναρξη χρήσης του διαδικτύου ως βασικό εργαλείο διαχείρισης αυτών, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ασφάλεια (cyber - security) σε περιπτώσεις επιθέσεων στον κυβερνοχώρο (κυβερνοεπιθέσεις – cyber attacks). Γενικότερα, ένα ασφαλές ΣΗΕ αποτρέπει κακόβουλες πράξεις και ενέργειες που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές ή να οδηγήσουν στην καταστροφή αυτού. Οι στρατηγικές που εφαρμόζονται προκειμένου να λειτουργεί ένα Δίκτυο με ασφάλεια έχουν κυρίως προληπτικό χαρακτήρα,

λαμβάνοντας υπόψη όλα τα πιθανά εκείνα γεγονότα και καταστάσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε κίνδυνο, είτε όσον αφορά την ανθρώπινη ζωή, είτε όσον αφορά το Δίκτυο αυτό καθ' εαυτό. Αυτή είναι και η ουσιαστική διαφορά στον τρόπο σχεδιασμού ενός ανθεκτικού Δικτύου, καθώς για την κατασκευή ενός ανθεκτικού Δικτύου εφαρμόζονται λύσεις βασισμένες στην οικονομική και πρακτική κατά το δύναμη κατασκευή του Δικτύου για την αντιμετώπιση των ακραίων φαινομένων. Γι' αυτό και οι δύο αυτές έννοιες θα πρέπει να εξετάζονται χωριστά [37].

### 2.1.2 Καμπύλη ανθεκτικότητας

Στην προσπάθεια οπτικής αναπαράστασης του τρόπου επίδρασης της ανθεκτικότητας στα ΣΗΕ, δημιουργήθηκαν οι λεγόμενες καμπύλες ανθεκτικότητας. Στην πραγματικότητα οι καμπύλες αυτές προσπαθούν να απεικονίσουν σε ένα διάγραμμα την εξέλιξη της ποιότητας ενός συστήματος με τον χρόνο, όταν αυτό πλήττεται από ένα δυσμενές γεγονός. Ως δείκτης ποιότητας μπορεί να υποθεθεί ότι είναι η ενέργεια ή η ισχύς που παρέχεται στο Δίκτυο, οι καταναλωτές που εξυπηρετούνται κ.α. [38].

Το θετικό με αυτές τις καμπύλες είναι η εύκολη ερμηνεία τους, ωστόσο δεν απεικονίζουν επακριβώς τα στάδια από τα οποία περνάει το ηλεκτρικό Δίκτυο κατά τη λειτουργία του. Για παράδειγμα, δεν μπορούν να απεικονίσουν με ακρίβεια τον βαθμό στον οποίο υποβιβάζεται η ποιότητα του Δικτύου [38].



**Εικόνα 2.1:** Καμπύλη ανθεκτικότητας «τριγώνου» [38].

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη απεικόνιση της καμπύλης ανθεκτικότητας είναι η καμπύλη ανθεκτικότητας τριγώνου [38]. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1, η καμπύλη αυτή χωρίζεται σε τρία μέρη.

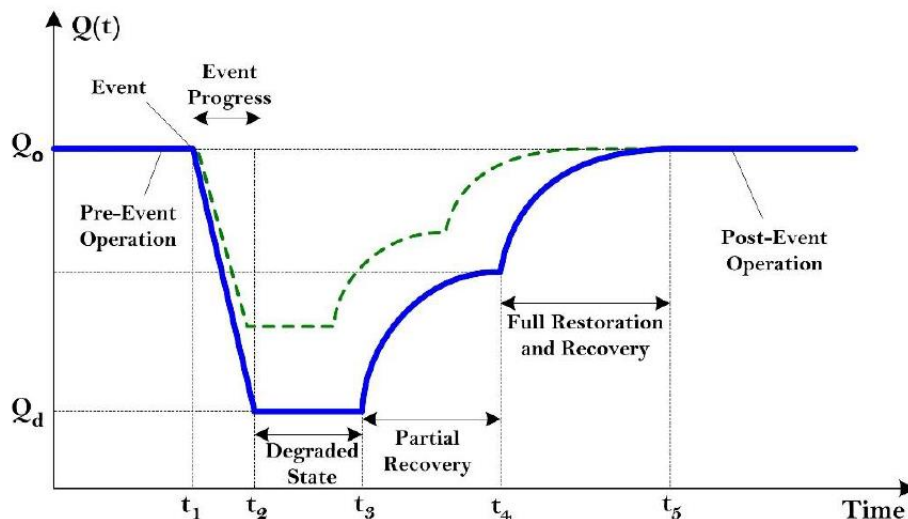
Το πρώτο μέρος αναφέρεται στην κατάσταση κανονικής λειτουργίας του δικτύου (Pre - Event - Normal - Operation), όπου η ποιότητα του δικτύου  $Q(t)$  είναι σταθερά σε υψηλό επίπεδο  $Q_0$  και διατηρείται στην τιμή αυτή μέχρι την εμφάνιση ενός γεγονότος που πλήττει το δίκτυο την χρονική στιγμή  $t_d$  [38].

Στο δεύτερο μέρος (Restoration and Recovery) παρατηρούμε την εμφάνιση του λεγόμενου «τριγώνου», από το οποίο πήρε τον τίτλο η καμπύλη αυτή. Το τρίγωνο αυτό υποδεικνύει την μείωση της ποιότητας του δικτύου από  $Q_0$  σε  $Q_d$  και τον υποβιβασμό ποιότητας λειτουργίας του συστήματος με την εμφάνιση του γεγονότος την στιγμή  $t_d$  και την σταδιακή αύξηση της ποιότητας με το πέρασμα του χρόνου μέχρι την χρονική στιγμή  $t_r$  (χρόνος αποκατάστασης), οπότε και το



Δίκτυο αρχίζει να λειτουργεί και πάλι στην αρχική προβλεπόμενη ποιότητα δικτύου  $Q_0$  [38]. Ο βαθμός υποβιβασμού του συστήματος και ο χρόνος αποκατάστασης εξαρτώνται από την φύση της διαταραχής (φυσικό φαινόμενο, καιρικό φαινόμενο, επίθεση στον κυβερνοχώρο) [39].

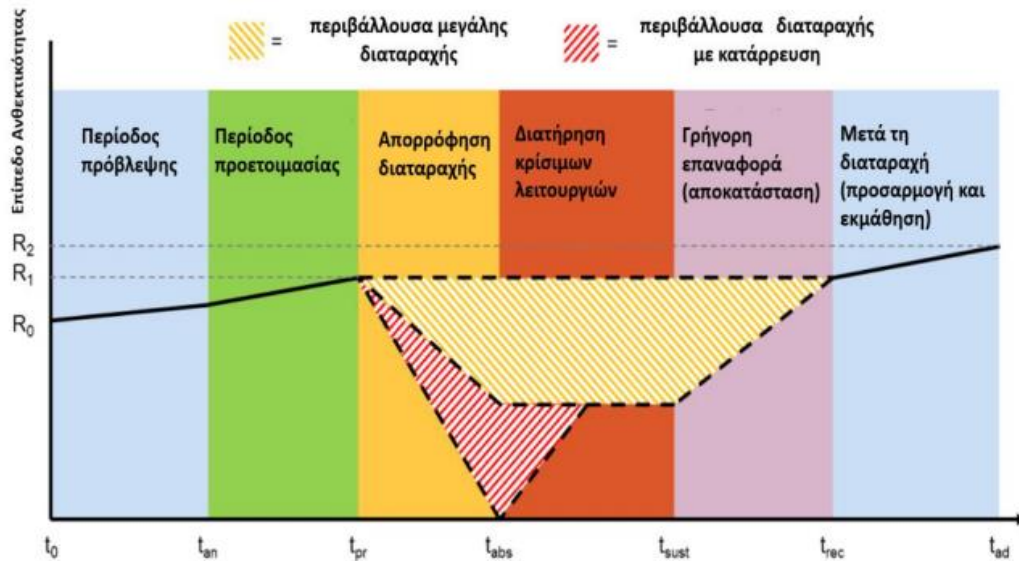
Στο τρίτο μέρος (Restored Mode), μετά την χρονική στιγμή  $t_r$  αποκαθίσταται - πλήρως ή μερικώς - η ποιότητα του Δικτύου και λειτουργεί με βάση τα δεδομένα προ του συμβάντος. Υπάρχει, βέβαια, το ενδεχόμενο να βελτιωθεί η κατάσταση του Δικτύου σε σχέση με την αρχική του κατάσταση (πριν την διαταραχή που δέχτηκε), λόγω έργων βελτίωσης και ανανέωσης του εξοπλισμού του Δικτύου, κάνοντας το πιο αποδοτικό [38][39].



**Εικόνα 2.2:** «Τραπεζοειδής» καμπύλη ανθεκτικότητας [35].

Μια παραλλαγή της καμπύλης ανθεκτικότητας είναι αυτή που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2 και είναι η λεγόμενη «τραπεζοειδής» καμπύλη ανθεκτικότητας. Η καμπύλη αυτή χωρίζεται σε 5 τμήματα: κανονική λειτουργία (Pre - Event Operation), εξέλιξη φαινομένου (Event Progress), κατάσταση υποβιβασμού (Degraded State), μερική αποκατάσταση (Partial Recovery), πλήρης αποκατάσταση (Full Restoration) [38]. Η απεικόνιση της καμπύλης με πράσινη διακεκομμένη γραμμή αποτελεί την καμπύλη ανθεκτικότητας σε ένα βελτιωμένο Δίκτυο σε σχέση με το Δίκτυο που αναπαριστά η μπλε γραμμή [38]. Το γεγονός ότι η πράσινη καμπύλη αντιστοιχεί σε λειτουργία βελτιωμένου Δικτύου, εξηγείται από το γεγονός ότι στην περίπτωση αυτή το Δίκτυο υποβαθμίζεται σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με το Δίκτυο της άλλης περίπτωσης όταν πληγεί από κάποιο εξωτερικό απρόβλεπτο φαινόμενο. Επίσης φαίνεται ότι η λειτουργία του Δικτύου αυτού αποκαθίσταται σε μικρότερο χρονικό διάστημα.

Εν ολίγοις, η καμπύλη αυτή βοηθά στον σχεδιασμό ενός πλάνου παρέμβασης στο Δίκτυο προς αποτροπή εμφάνισης δυσλειτουργιών και καταστροφών, δηλαδή να γίνει μία χρονική ταξινόμηση των μέτρων που πρέπει να ληφθούν. Πριν εμφανιστεί ένα δυσμενές για το Δίκτυο φαινόμενο, μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές πρόβλεψης και προετοιμασίας ώστε να αποτραπεί εν μέρει ή τελείως το πιθανώς καταστρεπτικό γεγονός. Κατά την διάρκεια του συμβάντος είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθούν τεχνικές που θα απορροφήσουν τις επιδράσεις που θα προκαλέσει στο Δίκτυο το συμβάν αυτό, θα διατηρήσουν τις κρίσιμες λειτουργίες του Δικτύου και θα φροντίσουν για την γρήγορη επαναφορά του. Μετά το συμβάν θα πρέπει να δοθεί σημασία στην ταχεία ανάκαμψη και προσαρμογή του Δικτύου, ενώ παράλληλα, καταγράφοντας τα χαρακτηριστικά του συμβάντος, είναι δυνατόν αυτά να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον προς αποτροπή ενός παρόμοιου γεγονότος και βελτίωση της ανθεκτικότητας του Δικτύου[15][37].



**Εικόνα 2.3:** Μέτρα πριν, κατά την διάρκεια και μετά από ένα ακραίο συμβάν που πλήττει το δίκτυο [36].

Τα μέτρα αυτά, για χάρην κατανόησης, απεικονίζονται στην Εικόνα 2.3 σε χρονική σειρά (διαδοχή). Γίνεται αντιληπτή η εξέλιξη της ποιότητας του δικτύου πριν, κατά την διάρκεια και μετά το συμβάν [15].

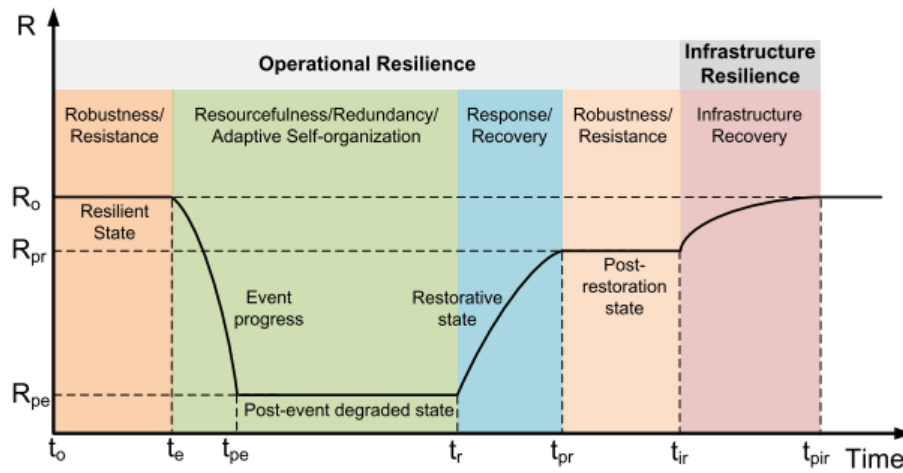
Εφαρμόζοντας τεχνικές που θα αυξήσουν την ανθεκτικότητα του Δικτύου, δεν γίνεται γνωστό μόνο το εάν έχει συμβεί μια ισχυρά ζημιογόνος παρεμβολή στο Δίκτυο, αλλά επιπροσθέτως γίνεται εν μέρει γνωστός και ο βαθμός ζημίας που αυτή προκάλεσε, σε ποιο σημείο του Δικτύου εμφανίστηκε, για πόσο χρόνο αυτή επηρέασε τη λειτουργία του συστήματος, πόσο γρήγορα αποκαταστάθηκε το Δίκτυο και σε ποιο βαθμό αποκαταστάθηκε τελικά. Συνεπώς, διαφορετικά Δίκτυα με διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετικές αποκρίσεις στην διαταραχή, θα παρουσιάζουν διαφορετικές καμπύλες ανθεκτικότητας [39].

### 2.1.3 Τύποι ανθεκτικότητας

Από τα παραπάνω αναφερόμενα, διαπιστώνουμε ότι η ανθεκτικότητα διακρίνεται σε δύο τύπους: α) Λειτουργική Ανθεκτικότητα, και β) Ανθεκτικότητα Εγκαταστάσεων - Υποδομών.

Κατά συνέπεια, η Εικόνα 2.2 θα μπορούσε να χωριστεί επιμέρους σε τμήματα που υποδεικνύουν την αποκατάσταση λειτουργίας του δικτύου ακόμη και στην περίπτωση εύρεσης γρήγορων λύσεων μερικής αποκατάστασης των εγκαταστάσεων του Δικτύου. Πιο λεπτομερής αναπαράσταση καμπύλης ανθεκτικότητας φαίνεται στην Εικόνα 2.4.

Στην καμπύλη της Εικόνας 2.4 είναι ευκρινέστερες οι φάσεις από τις οποίες περνά το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι το χρονικό διάστημα μέχρι και τη μερική αποκατάσταση λειτουργίας τη στιγμή  $t_{ir}$  αφορά τα θέματα ανθεκτικότητας λειτουργίας. Από το σημείο αυτό μέχρι και την οριστική αποκατάσταση του Δικτύου, το χρονικό αυτό διάστημα αφορά τα θέματα ανθεκτικότητας των εγκαταστάσεων και των υποδομών του Συστήματος.



Εικόνα 2.4 Εννοιολογική καμπύλη ανθεκτικότητας που σχετίζεται με ένα συμβάν [40].

## 2.2 Μέτρηση και μοντελοποίηση της επίδρασης ακραίων φαινομένων και της ανθεκτικότητας

Για την ακριβή εκτίμηση του επιπέδου ανθεκτικότητας ενός Δικτύου, αλλά και του ποσοστού επίδρασης ακραίων φαινομένων στο Δίκτυο, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι μέτρησης και μοντελοποίησης παραμέτρων που αφορούν την ανθεκτικότητα. Έχοντας γνώση για τις δυνατότητες του Δικτύου και για τους πιθανούς μελλοντικούς κινδύνους που μπορεί να εμφανιστούν, η αντιμετώπιση των διαταραχών στο Δίκτυο θα είναι πιο εύκολη.

Η έννοια της ανθεκτικότητας είναι πολυδιάστατη. Υπό αυτή την έννοια, δεν είναι εφικτό να αξιολογηθεί η ανθεκτικότητα ενός Δικτύου μόνο από έναν παράγοντα όπως η ετοιμότητά του σε ακραία φαινόμενα ή η σταθερότητα που εμφανίζει σε ακραίες συνθήκες. Γι' αυτό τον λόγο, η αξιολόγηση ενός Δικτύου ως προς την ανθεκτικότητά του, βασίζεται σε πολλές παραμέτρους.

Σημαντικό ρόλο στην ανάλυση του επιπέδου ανθεκτικότητας ενός Δικτύου αλλά και στον τρόπο λειτουργίας του Δικτύου έχουν τα επίσημα πρότυπα και οι μέθοδοι μέτρησης που αφορούν την ανθεκτικότητα. Τα συγκεκριμένα πρότυπα δεν έχουν καθοριστεί επισήμως ωστόσο εγκεκριμένοι φορείς έχουν αρχίσει να τα αναπτύσσουν [41].



Εικόνα 2.5: Βήματα Διαδικασίας Ανάλυσης Ανθεκτικότητας [42].

Το 2015, αναπτύχθηκε η Διαδικασία Ανάλυσης Ανθεκτικότητας (Resilience Analysis Process - RAP) [42]. Η διαδικασία αυτή αποτελείται συνολικά από 7 βήματα. Τα 6 πρώτα βήματα βοηθούν έτσι ώστε να γίνει αξιολόγηση της απόδοσης του εξεταζόμενου συστήματος ως προς την ανθεκτικότητα του ενώ το τελευταίο και 7<sup>ο</sup> βήμα βρίσκει τρόπους με τους οποίους θα μπορούσε η ανθεκτικότητα του εξεταζόμενου συστήματος να βελτιωθεί.

Τα 7 βήματα είναι:

1. Προσδιορισμός των στόχων της ανθεκτικότητας του εξεταζόμενου συστήματος
2. Προσδιορισμός κατάλληλων δεικτών για το σύστημα και την ανθεκτικότητά του
3. Προσδιορισμός των ενδεχόμενων απειλών
4. Προσδιορισμός του επιπέδου της διαταραχής του συστήματος
5. Προσδιορισμός και εφαρμογή μοντέλων
6. Καθορισμός των συνεπειών στο σύστημα
7. Βελτιώσεις για την ανθεκτικότητα

Η ανάπτυξη της συγκεκριμένης διαδικασίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε να αξιολογηθεί όχι μόνο το επίπεδο ανθεκτικότητας ενός Δικτύου, αλλά και τα εγχειρήματα για την βελτίωση της.

Με παρόμοιο τρόπο, μπορούν να αναπτυχθούν διαδικασίες και πρότυπα που θα βοηθήσουν στην ακριβέστερη αποτύπωση της κατάστασης ενός Δικτύου όσον αφορά φυσικά την ανθεκτικότητα. Στην βιβλιογραφία συναντώνται διάφορες μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν γι' αυτόν τον σκοπό, οι οποίες περιγράφονται στο παρόν κεφάλαιο. Το σημαντικότερο βέβαια είναι να θεσπιστούν πρότυπα έτσι ώστε να βελτιωθούν οι μέθοδοι μέτρησης αλλά και να γίνει ευκολότερη η διαδικασία [39].

### **2.2.1 Μοντελοποίηση επίδρασης καιρικών φαινομένων στο Δίκτυο**

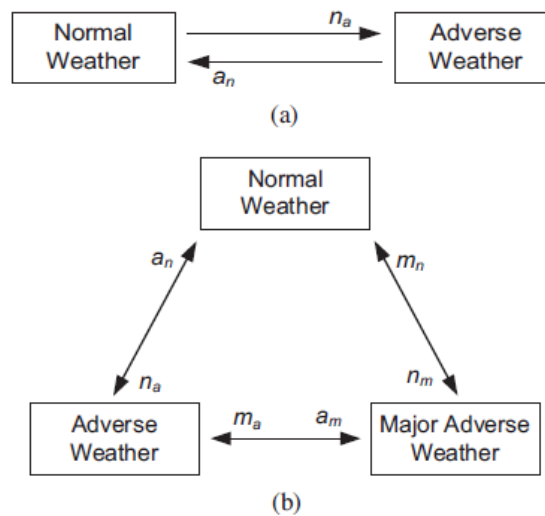
Είναι αρκετά δύσκολο να επιλεχθούν ποιες από τις διαθέσιμες στρατηγικές για την ανάπτυξη ανθεκτικών Δικτύων είναι οι καταλληλότερες. Θεωρώντας ότι τα ακραία καιρικά φαινόμενα τα οποία πλήττουν την ανθεκτικότητα του Δικτύου, πλέον συμβαίνουν αρκετά συχνότερα από ότι στο παρελθόν, ωστόσο είναι δύσκολο να γίνει γνωστή η συχνότητα εμφάνισης, θα πρέπει να διενεργηθούν κατάλληλες τεχνοοικονομικές αναλύσεις για την επιλογή και την εφαρμογή της κατάλληλης στρατηγικής αντιμετώπισης.

Για την επιλογή των κατάλληλων στρατηγικών αντιμετώπισης των ακραίων καιρικών φαινομένων και την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των Δικτύων, φαίνεται χρήσιμη η μοντελοποίηση της επίδρασης των καιρικών φαινομένων. Αυτό μπορεί να γίνει με διάφορες μεθοδολογίες οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν προληπτικά ή διορθωτικά.

Είναι απαραίτητο επίσης να επισημανθεί ότι η κατάσταση των στοιχείων του Δικτύου αποτελεί άλλον έναν παράγοντα που καθορίζει την επιρροή που θα έχουν στο Δίκτυο τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Παλαιότερος εξοπλισμός τείνει να είναι περισσότερο επιρρεπής σε τέτοιου είδους φαινόμενα.

Η μοντελοποίηση της επίδρασης των καιρικών φαινομένων φυσικά δεν είναι εύκολη κι αυτό διότι τα καιρικά φαινόμενα εμφανίζουν στοχαστικότητα. Κατά βάση έχουν αναπτυχθεί οι παρακάτω προσεγγίσεις:

- Αναλυτικές μέθοδοι: είναι λιγότερο πολύπλοκες και συνήθως εφαρμόζονται για μικρότερους σχηματισμούς Δικτύων. Παρακάτω γίνεται περιγραφή μίας αναλυτικής τεχνικής εφαρμόζοντας την γνωστή αλυσίδα Markov, η οποία είναι και η επικρατέστερη.



**Εικόνα 2.6:** Μαρκοβιανές αλυσίδες δύο και τριών σταδίων.  
Περιγράφουν τις καταστάσεις του καιρού [26].

Η μαρκοβιανή αλυσίδα αποτελεί ένα σύστημα στο οποίο η ισχύουσα κατάσταση κάθε δεδομένη στιγμή μεταβάλλεται, ανάμεσα σε ένα πεπερασμένο αριθμό καταστάσεων. Η διαδικασία είναι τυχαία, με την έννοια ότι δεν υπολογίζεται η κατάσταση που ίσχυε στις προηγούμενες μεταβολές [43]. Συνεπώς η επόμενη κατάσταση εξαρτάται μόνο από την τωρινή κατάσταση.

Στην Εικόνα 2.6 φαίνονται:

(α) μοντέλο δύο σταδίων (κανονικές συνθήκες - ακραία δυσμενείς καιρικές συνθήκες)

(β) μοντέλο τριών σταδίων (κανονικές συνθήκες - δυσμενείς καιρικές συνθήκες - πολύ δυσμενείς καιρικές συνθήκες)

Το μοντέλο 3 σταδίων απεικονίζει καλύτερα την μεταβλητότητα που υπάρχει στον καιρό σε σχέση με το μοντέλο 2 σταδίων. Φυσικά όσο περισσότερα στάδια υπάρχουν, τόσο καλύτερα απεικονίζεται αυτή η μεταβλητότητα. Έτσι είναι εφικτό μοντελοποιηθεί η σημαντική αύξηση της πιθανότητας να εμφανιστούν προβλήματα στο Δίκτυο όταν έχουμε ακραίες καιρικές συνθήκες. Επίσης χωρίζονται τα φαινόμενα που επιδρούν στο Δίκτυο σε εκείνα που είχαν μεγάλη επιρροή (καταστροφή Δικτύων, αργή αποκατάσταση) και εκείνες που είχαν μικρή επιρροή (γρήγορη αποκατάσταση και μικρή επίδραση στο Δίκτυο).

Υπάρχουν και άλλα αναλυτικά μοντέλα εκτός του Markov, ωστόσο λόγω της στοχαστικότητας των καιρικών συνθηκών είναι καλύτερο να χρησιμοποιούνται προσομοιώσεις για μελέτες ανθεκτικότητας Δικτύου, οι οποίες εξηγούνται παρακάτω. Οι προσομοιώσεις αυτές έχουν την δυνατότητα να απεικονίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό τις χρονικές και τοπικές παραμέτρους ενός καιρικού φαινομένου.

- Προσομοιώσεις βασιζόμενες στην μέθοδο Monte carlo: Συνήθως εφαρμόζονται όταν κυριαρχούν πιο σύνθετες συνθήκες καιρού. Η μέθοδος Monte Carlo, αποτελεί μια

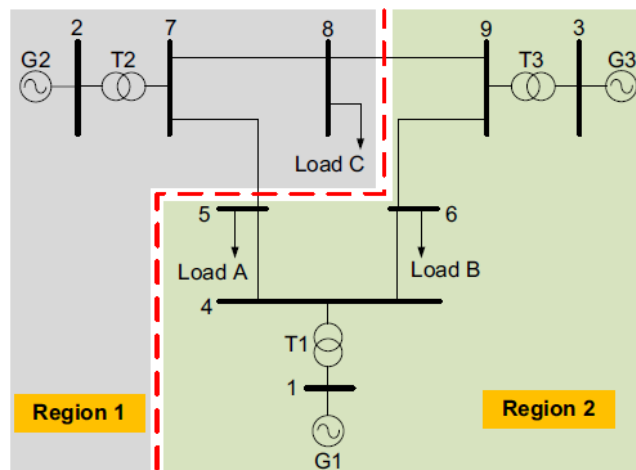
στοχαστική διαδικασία με την οποία μπορεί να προβλεφθούν τα πιθανά ενδεχόμενα που μπορεί να προκύψουν μετά από ένα αβέβαιο γεγονός, όπως ο καιρός [44].

Οι προσομοιώσεις Monte Carlo, σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους οι οποίες μπορούν να αντληθούν από ιστορικά δεδομένα, όπως η διάρκεια του καιρικού φαινομένου, η σφοδρότητα του, η κατεύθυνση στην οποία επεκτείνεται, η αντοχή του εξοπλισμού, η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα στοιχεία του Δικτύου (γραμμές), μπορούν να αναπτύξουν ένα ικανό μοντέλο.

Γενικότερα, για τα Δίκτυα Διανομής μπορεί να θεωρηθεί ότι συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες δεν έχουν χρονική μεταβλητότητα ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα στο μοντέλο. Αυτό κυρίως μπορεί να δικαιολογηθεί στο ότι τα Δίκτυα Διανομής επεκτείνονται σε μία μικρή γεωγραφική περιοχή επομένως οι καιρικές συνθήκες που υφίστανται σε μία χρονική στιγμή μπορεί να είναι ίδιες. Η παραπάνω θεώρηση οδηγεί σε υπερδιαστασιολόγηση των προβλήματος.

Γι' αυτό είναι καλύτερο, το Δίκτυο να χωρίζεται σε περιοχές ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο γίνεται πιο ρεαλιστικό.

Οι καιρικές συνθήκες που κυριαρχούν για μια δεδομένη στιγμή είναι ίδιες εντός μίας περιοχής ενώ οι καιρικές συνθήκες διαφέρουν ανάμεσα σε ξεχωριστές περιοχές τόσο χρονικά όσο και χωροταξικά. Για τον διαχωρισμό των περιοχών μπορούν να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράγοντες όπως τα επίπεδα τάσης (δεν απεικονίζει βέβαια ρεαλιστικά τον καιρό αλλά απλοποιεί την διαδικασία), γεωγραφικά χαρακτηριστικά (βουνά - πεδιάδα). Το καλύτερο βέβαια είναι ο διαχωρισμός να βασιστεί σε ιστορικά δεδομένα για την πιο ακριβή αναπαράσταση του μοντέλου. Επίσης, θα υπάρχουν μερικά στοιχεία του Δικτύου τα οποία θα εμπίπτουν και στις δύο περιοχές, όπως γραμμές του Δικτύου. Αυτό μάλιστα είναι το σημείο στο οποίο θα μπορούσε κάποιος να χαρακτηρίσει το μοντέλο ως μη αξιόπιστο και αδύναμο.



**Εικόνα 2.7:** Διαχωρισμός Δικτύου σε περιοχές, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στην κάθε μία [26].

Γι' αυτό προτείνεται μία τακτική στην οποία οι γραμμές που βρίσκονται μεταξύ κάποιων περιοχών να διαχωρίζονται σε τμήματα στα οποία είναι δυνατό να υφίστανται διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προκύψει η πιθανότητα σφάλματος λόγω



καιρικών συνθηκών κατά μήκος της γραμμής, συμψηφίζοντας τα ποσοστά που προκύπτουν για κάθε τμήμα ξεχωριστά [26].

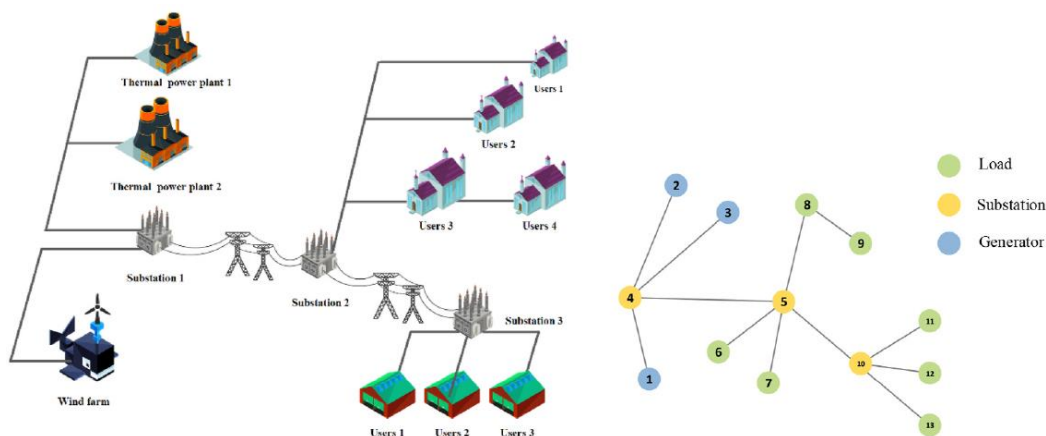
### 2.2.2 Μοντελοποίηση του Δικτύου σε μορφή Γράφου

Για την μέτρηση της ανθεκτικότητας ενός Δικτύου, μπορεί να φανεί χρήσιμη και η αναπαράσταση του Δικτύου ως ένας γράφος. Το Δίκτυο Διανομής είναι εύκολο να αναπαρασταθεί ως ένα γράφος  $G(V,E,W)$  όπου ως:

- $V$  συμβολίζεται το σύνολο  $N$  κόμβων
- $E$  συμβολίζεται το σύνολο  $K$  ακμών και
- $W$  συμβολίζεται το βάρος των ακμών

Οι κόμβοι του γράφου γενικά αναπαριστούν τους ζυγούς ενός συστήματος ενέργειας, οι οποίοι φέρουν γεννήτριες, υποσταθμούς και φορτία ενώ οι ακμές αναπαριστούν τις γραμμές του συστήματος. Τα βάρη των ακμών αναπαριστούν την αντοχή στην ισχύ που μπορούν να μεταφέρουν οι γραμμές ή την χωρητικότητα των φορτίων.

Η μοντελοποίηση του Δικτύου Διανομής (ΔΔ) με αυτόν τον τρόπο, καθιστά εύκολο, όπως επισημαίνεται παρακάτω, να αναπτυχθούν μέθοδοι μέτρησης της ανθεκτικότητας του ΔΔ [16].



**Εικόνα 2.8:** Αναπαράσταση συστήματος ενέργειας με χρήση γράφου [16].

### 2.2.3 Ταξινόμηση των μεθόδων μέτρησης της ανθεκτικότητας ενός Δικτύου που αναπαρίσταται ως γράφος

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.9 οι μέθοδοι μέτρησης της ανθεκτικότητας του Δικτύου μπορούν να χωριστούν σε στατικές και σε δυναμικές. Η διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών είναι ότι στις στατικές οι αλλαγές που μπορεί να συμβαίνουν στο Δίκτυο κατά την διάρκεια ενός ακραίου φαινομένου, δεν λαμβάνονται υπόψη (δηλαδή θεωρείται ότι διατηρείται σταθερή η κατάσταση του Δικτύου όταν αρχίζει η μέτρηση της ανθεκτικότητας), ενώ στις δυναμικές, οι αλλαγές που συμβαίνουν στο Δίκτυο κάθε χρονική στιγμή έχουν καθοριστικό ρόλο στην μέτρηση ανθεκτικότητας του.

Θεωρώντας το Δίκτυο ως έναν γράφο, οι στατικές μέθοδοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τοπολογικές μεθόδους μέτρησης και σε μεθόδους που βασίζονται στο φάσμα του γράφου:



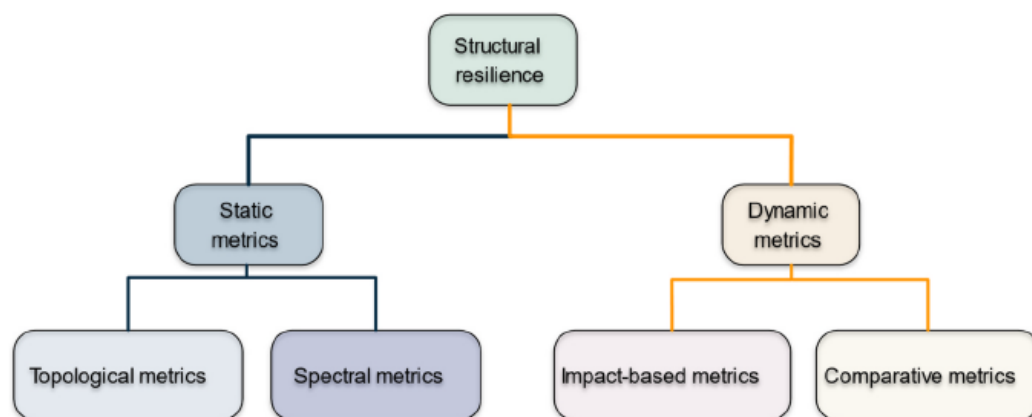
- Στις τοπολογικές δίνεται βάση στην συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων (ποιοι είναι οι γειτονικοί κόμβοι, ποια είναι τα βάρη των ακμών που συνδέουν αυτούς τους κόμβους, ποιοι κόμβοι συνδέονται μέσω ενός άλλου κόμβου κλπ.). Από όλες αυτές τις παραμέτρους, το Δίκτυο μπορεί να αξιολογηθεί ως προς την ανθεκτικότητά του. Όσες περισσότερες διαδρομές μεταξύ των κόμβων του δικτύου είναι δυνατόν να εξυπηρετήσουν την διανομή της ενέργειας, τόσο πιο ανθεκτικό θα είναι αυτό το Δίκτυο.
- Ως φάσμα του γράφου ορίζεται το σύνολο των ιδιοτιμών του γράφου. Ιδιοτιμή ονομάζεται ένας αριθμός  $\lambda$  αν υπάρχει ένα μη μηδενικό διάνυσμα - στήλη  $u$  τέτοιο ώστε:

$$Au = \lambda u \quad (2.1)$$

όπου ο πίνακας  $A$  είναι ο πίνακας γειτνίασης του γράφου. Στην θεωρία γράφων, ο πίνακας γειτνίασης είναι ένας τετραγωνικός πίνακας που αναπαριστά έναν γράφο. Συγκεκριμένα, ο πίνακας γειτνίασης ενός πεπερασμένου απλού γράφου  $G(V,E)$  με  $n$  κόμβους είναι ο πίνακας  $A$  διαστάσεων  $n \times n$  με στοιχεία 0 ή 1, όπου:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{αν } (i,j) \in E \\ 0 & \text{αν } (i,j) \notin E \end{cases} \quad (2.2)$$

Η τιμή της δεύτερης μικρότερης ιδιοτιμής μπορεί και υποδεικνύει την ανοχή σε σφάλματα που συμβαίνουν στο Δίκτυο. Αυτό μπορεί να αποτελεί μία μετρική για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας ενός δικτύου. Υπάρχουν και άλλες μετρικές μία εκ των οποίων μπορεί να είναι η διαφορά μεταξύ των ιδιοτιμών του πίνακα γειτνίασης ενός γράφου. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η διαφορά τόσο πιο εύκολο είναι το Δίκτυο να επεκταθεί αφού δεν υπάρχει συμφόρηση τοπολογικά στο Δίκτυο. Συμφόρηση στο Δίκτυο υποδεικνύεται όταν υπάρχουν λίγες συνδέσεις μεταξύ πολλών κόμβων και επομένως η αποκοπή αυτών των συνδέσεων μπορούν να χωρίσουν το Δίκτυο σε περισσότερα μέρη.



**Εικόνα 2.9:** Ταξινόμηση μεθόδων μέτρησης της ανθεκτικότητας [16].

Στις δυναμικές μεθόδους, συγκαταλέγεται ο δείκτης LLD (Loss of Load Degree - δείκτης απόρριψης φορτίου) που αποτελεί και την πιο απλή μέθοδο από τις δυναμικές μεθόδους και βασίζεται στην αναπαράσταση του δικτύου ως γράφο. Με αυτόν τον δείκτη μπορεί να αναπαρασταθεί ο βαθμός των διαταραχών στις οποίες υπόκειται το Δίκτυο μία δεδομένη στιγμή, αν θεωρηθεί ως διαταραχή κάθε κόμβος - φορτίο που δεν πληρείται το φορτίο του. Μπορεί να

εφαρμοστούν και πιο πολύπλοκες μέθοδοι όπως η PNN (percentage of non critical nodes - ποσοστό μη κρίσιμων φορτίων), στην οποία ορίζεται ένα όριο  $\theta$ .

Οι προαναφερθείσες μέθοδοι εκμεταλλεύονται την εμφάνιση των δυσμενών επιπτώσεων προκειμένου να ποσοτικοποιήσουν το επίπεδο ανθεκτικότητας ενός Δικτύου.

Επίσης μπορούν να αναπτυχθούν δυναμικές μέθοδοι οι οποίες βασίζονται στην σύγκριση μεταξύ των καταστάσεων του Δικτύου πριν και μετά από μία διαταραχή. Αυτό γίνεται με βάση τον εξής τύπο:

$$C_m = \frac{|M_0 - M_1|}{M_0} \quad (2.3)$$

όπου:

- $C_m$  είναι ο δείκτης με τον οποίο αξιολογείται η ανθεκτικότητα του Δικτύου
- $M_0$  είναι η τιμή με την οποία αξιολογείται η λειτουργία του Δικτύου πριν την διαταραχή και
- $M_1$  είναι η τελική με την οποία αξιολογείται η λειτουργία του Δικτύου μετά την διαταραχή

Με αυτόν τον τρόπο, εξάγεται η μετρική  $C_m$  με την οποία μπορεί να μετρηθεί η επίπτωση ενός ακραίου φαινομένου στο Δίκτυο.

Σε άλλη μέθοδο, εξάγεται δείκτης στον οποίο χρησιμοποιούνται τιμές με τις οποίες έχουν αξιολογηθεί η κατάσταση του Δικτύου στην εξεταζόμενη χρονική στιγμή και η κατάσταση του Δικτύου την χρονική στιγμή κατά την οποία βρίσκεται στην δυσμενέστερη κατάσταση μετά την εμφάνιση ενός ακραίου φαινομένου. Ο τύπος που περιγράφει την προαναφερθείσα μέθοδο είναι:

$$R_Q(t) = \frac{F(t) - F(t_D)}{F(t_E) - F(t_D)} \quad (2.4)$$

όπου:

- $t_D$  είναι η χρονική στιγμή που αρχίζει ένα δυσμενές για το Δίκτυο φαινόμενο
- $t_E$  είναι η χρονική στιγμή που εμφανίζεται η δυσμενέστερη κατάσταση για το Δίκτυο
- $F(t_D)$  είναι η απόδοση του Δικτύου την στιγμή  $t_D$  και
- $F(t_E)$  είναι η απόδοση του Δικτύου την στιγμή  $t_E$

Για την αποδοτικότερη αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του Δικτύου, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί μία μέθοδος που θα είναι εύκολο στο να αναπτυχθεί αλλά και χρησιμοποιεί όλες τις απαραίτητες παραμέτρους του Δικτύου. Προτείνεται η εφαρμογή των μεθόδων οι οποίες βασίζονται στον συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων για την εξαγωγή του ακριβέστερου αποτελέσματος [16].

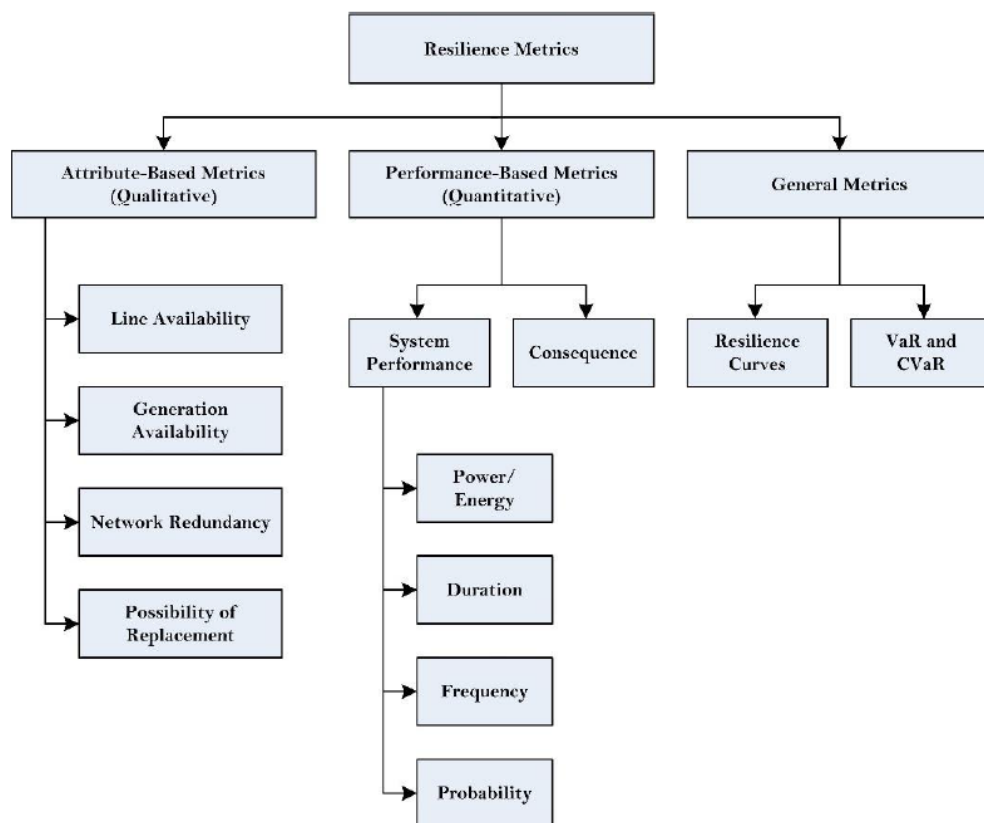
#### 2.2.4 Εναλλακτική ταξινόμηση μεθόδων μέτρησης ανθεκτικότητας ενός Δικτύου.

Οι δείκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση της ανθεκτικότητας ενός Δικτύου μπορούν να ταξινομηθούν με διαφορετικό τρόπο από αυτόν που αναφέρθηκε παραπάνω. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [38], οι μέθοδοι μέτρησης της ανθεκτικότητας μπορούν να διαχωριστούν όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.10.

Βάσει χαρακτηριστικών (Attribute based): Με βάση αυτή την κατηγορία, η ανθεκτικότητα ενός Δικτύου μπορεί να μετρηθεί μέσω των χαρακτηριστικών που αυτό φέρει και ενισχύουν την ανθεκτικότητα. Μπορεί να απαντήσει στην ερώτηση : «τι κάνει το Δίκτυο περισσότερο/λιγότερο ανθεκτικό;» [41]. Τα χαρακτηριστικά του Δικτύου μπορούν και αντικατοπτρίζουν τη κατάσταση του Δικτύου. Μερικά από αυτά είναι η διαθεσιμότητα των γραμμών, των γεννητριών ή η δυνατότητα αποκατάστασης στοιχείων του Δικτύου.

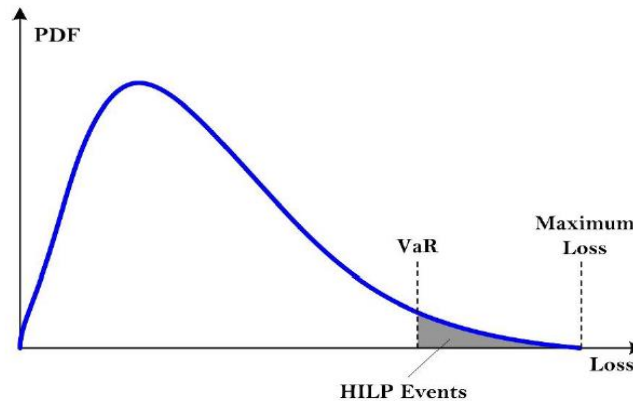
Βάσει της απόδοσης: Αξιολογούν την ανθεκτικότητα ενός Δικτύου με βάση την απόκριση του Δικτύου κατά την διάρκεια ενός ακραίου φαινομένου. Απαντάνε στο ερώτημα : «Πόσο ανθεκτικό είναι το Δίκτυο;» [41]. Επίσης με αυτόν τον τρόπο, διάφορες στρατηγικές που εφαρμόζονται στο Δίκτυο προκειμένου να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα του Δικτύου μπορούν να αξιολογηθούν. Ουσιαστικά αξιολογείται η απόδοση του Δικτύου σε ακραία γεγονότα με βάση την διάρκεια διακοπής λειτουργίας, την συχνότητα διακοπής λειτουργίας, την πιθανότητα να διακοπεί η λειτουργία του Δικτύου ή αν η παραγωγή μπορεί να καλύψει την ζήτηση των φορτίων. Ακόμη μπορούν να αξιολογηθούν με βάση τις επιπτώσεις των διακοπών λειτουργίας στους καταναλωτές (οικονομικός αντίκτυπος, θέματα ασφαλείας) [38].

Γενικά: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη ανθεκτικότητας είτε στην τριγωνική της μορφή είτε στην τραπεζοειδή της μορφή καθώς μπορεί να περιγράψει την απόδοση του Δικτύου σε ακραία φαινόμενα αλλά και την ανταπόκριση του Δικτύου σε αυτά. Υπάρχει δυνατότητα μετρώντας τις αποστάσεις μεταξύ της καμπύλης ανθεκτικότητας που προκύπτει για το Δίκτυο μια δεδομένη στιγμή με την ιδανική καμπύλη ανθεκτικότητας, να αξιολογήσουμε το πόσο ανθεκτικό είναι ένα Δίκτυο [38]. Η καμπύλη ανθεκτικότητας μπορεί να αποτυπώσει την κάλυψη της ζήτησης, την διάρκεια ενός καταστροφικού για το Δίκτυο φαινομένου αλλά και τον ρυθμό αποκατάστασης του Δικτύου.



**Εικόνα 2.10:** Ταξινόμηση μεθόδων μέτρησης της ανθεκτικότητας [38].

Ακόμη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέθοδοι μέτρησης της ανθεκτικότητας οι δείκτες Value at Risk (VaR) ο οποίος δηλώνει τον μεγαλύτερο αποδεκτό αριθμό μονάδων απωλειών ενέργειας καθώς και το ποσοστό των απωλειών που ξεπερνούν αυτό το όριο, και ο δείκτης Conditional Value at Risk (CVaR) ο οποίος μπορεί και υπολογίζει την αναμενόμενη τιμή των απωλειών άνω του ορίου VaR [38].



**Εικόνα 2.11:** Οι δείκτες VaR και CvaR, όπως αναπαρίστανται σε συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας [38].

## 2.3 Στρατηγικές ενίσχυσης ανθεκτικότητας

### 2.3.1. Έξυπνα Δίκτυα

Το 2009, το υπουργείο ενέργειας των ΗΠΑ ισχυρίστηκε ότι η ανθεκτικότητα είναι χαρακτηριστικό ενός «έξυπνου» Δικτύου (smart grid) [46]. Συνεπώς, η εγκατάσταση συσκευών οι οποίες μετατρέπουν το Δίκτυο σε «έξυπνο», καθώς επίσης και ο εκσυγχρονισμός του εξοπλισμού του Δικτύου ώστε αυτός να συνάδει με τις απαιτήσεις των νέων συσκευών, ενδείκνυνται ως προτάσεις έτσι ώστε το Δίκτυο να γίνει πιο ανθεκτικό σε φαινόμενα που μπορεί να διαταράξουν την λειτουργία του.

Το εγκατεστημένο Δίκτυο Διανομής, το οποίο χρησιμοποιείται σήμερα από έναν μεγάλο αριθμό τελικών χρηστών, αποτελεί κυρίως ένα μηχανικό σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι η ψηφιακή τεχνολογία δεν έχει ενσωματωθεί – ακόμη τουλάχιστο - στην λειτουργία του Δικτύου. Ένα «έξυπνο» Δίκτυο από την άλλη, χρησιμοποιεί την ψηφιακή τεχνολογία για την αναβαθμισμένη και εκσυγχρονισμένη λειτουργία του.

#### Τι είναι το «έξυπνο» Δίκτυο;

Γενικά, δεν έχει τεκμηριωθεί συγκεκριμένος ορισμός για το «έξυπνο» Δίκτυο. Γνωστοί οργανισμοί, φορείς και εταιρείες, αλλά και διάφορες χώρες, έχουν δώσει ο καθένας δικό τους ορισμό στην έννοια αυτή. Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω, το «έξυπνο» Δίκτυο θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μία καινοτομία, μια εξέλιξη του Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας [47]. Με τον όρο αυτό μπορεί να αναφέρεται κανείς στο σύνολο των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ τμημάτων του Δικτύου και των διαχειριστών αυτού σε πραγματικό χρόνο. Οι «έξυπνοι» μετρητές και τα δίκτυα επικοινωνιών είναι κάποιες από τις τεχνολογίες που μπορούν να θεωρηθούν εξοπλισμός στα «έξυπνα» Δίκτυα [48].

Στο «έξυπνο» Δίκτυο μπορούν να τοποθετηθούν τηλεχειριζόμενοι διακόπτες και μετασχηματιστές, ρυθμιστές τάσης, αισθητήρες, «έξυπνοι» αντιστροφέες (Inverters) και πληθώρα άλλων συσκευών (τεχνολογία Internet of Things, IoT), τα οποία διευκολύνουν την

επικοινωνία και επιτρέπουν την ανταλλαγή δεδομένων. Κάθε μία τεχνολογία προσδίδει στο Δίκτυο νέες λειτουργίες για καλύτερο έλεγχο, ρύθμιση και εποπτεία από τον διαχειριστή του. Έτσι, αυτές οι τεχνολογίες συνδράμουν στην μετάβαση από τη χρήση ενός παθητικού Δικτύου για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών στη χρήση ενός καινοτόμου και εξελιγμένου Δικτύου το οποίο παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση λειτουργίας του [37]. Για παράδειγμα:

- Με τους «ευφυείς» μετρητές, παρέχεται η δυνατότητα διαχείρισης της ηλεκτροδότησης (σύνδεση – αποκοπή) [15].
- Οι «έξυπνοι» αντιστροφείς (Inverters), εκτός από την κύρια λειτουργία τους στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (δηλαδή να μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο (AC)), έχουν την δυνατότητα να παρέχουν πληροφορίες για την συμμετοχή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια που διαχειρίζεται το Δίκτυο, και να την ελέγχουν όταν αυτό κρίνεται αναγκαίο. Δηλαδή επιτρέπουν την επικοινωνία των διαχειριστών με τις μονάδες παραγωγής [12].
- Με τους τηλεχειριζόμενους διακόπτες μπορούν να απομονωθούν τμήματα του Δικτύου που έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας, λόγω τεχνικών/λειτουργικών θεμάτων ή εξωτερικών παραγόντων, συνδράμοντας στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας του Δικτύου, αφού μειώνεται ο χρόνος αποκατάστασης και το κόστος απωλειών [48].

#### Πως συμβάλει ένα «έξυπνο» Δίκτυο στην ενίσχυση της ανθεκτικότητάς του;

Γενικότερα, μέσα από διάφορες μεθόδους, εκτός από την εγκατάσταση τηλεχειριζόμενων διακοπών όπως προαναφέρθηκε, φαίνεται πως η όλη μετάβαση του Δικτύου από την υφιστάμενη μηχανική δομή σε «έξυπνη» μορφή, είναι από μόνη της ένας τρόπος ενίσχυσης της ανθεκτικότητάς του.

Ιδιαίτερα καινοτόμα μέθοδος προς αυτήν την κατεύθυνση είναι η νησιδοποίηση τμημάτων Δικτύου. Η νησιδοποίηση (islanding) είναι μία κατάσταση κατά την οποία το δίκτυο, το οποίο περιλαμβάνει φορτίο, παραγωγή και αποθήκευση, αποκόπτεται από το υπόλοιπο δίκτυο και απομονώνεται. Η τροφοδοσία του αποκομμένου τμήματος του δικτύου γίνεται από τις μονάδες παραγωγής που το ίδιο περιλαμβάνει, συνεχίζοντας έτσι την απρόσκοπτη και αδιάλειπτη λειτουργία του. Μέσα από την παρακολούθηση και τον έλεγχο μίας ευρείας περιοχής του Δικτύου, χρησιμοποιώντας τις τεχνολογίες που παρέχει το «έξυπνο» Δίκτυο, είναι εφικτός ο διαχωρισμός της σε μικρότερα τμήματα (νησίδες) που μπορούν να λειτουργούν κατά την εμφάνιση κρίσιμων καταστάσεων, προς αποφυγή διαδοχικών σφαλμάτων. Μάλιστα, η ενέργεια αυτή γίνεται εφικτή, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες που προαναφέρθηκαν (όπως οι τηλεχειριζόμενοι διακόπτες και οι «έξυπνοι» αντιστροφείς (Inverters)) κι έτσι όσο περισσότεροι ενσωματώνονται στο Δίκτυο, τόσο πιο εύκολο αυτό μπορεί να διαχωριστεί σε επιμέρους μικροδίκτυα (microgrids) που θα μπορούν να νησιδοποιηθούν και να διατηρούν αδιάλειπτα την παροχή ενέργειας για τα κρίσιμα φορτία [12].

Επιπροσθέτως, το «έξυπνο» Δίκτυο, μπορεί να προγραμματίσει αυτόματα την επαναδρομολόγηση της ροής φορτίου (δηλαδή να προσαρμόσει την διαδρομή μέσω της οποίας η ισχύς μεταφέρεται στο Δίκτυο) εάν συμβεί ένα καταστρεπτικό γεγονός και να μειώσει με αυτόν τον τρόπο την έκταση του ηλεκτρικού Δικτύου που τίθεται εκτός λειτουργίας [49]. Η διαδικασία αυτή δεν είναι απλή, καθώς απαιτείται ο συντονισμός διαφόρων στοιχείων του Δικτύου, η χρήση προβλεπτικών αλγορίθμων κ.α. Όμως, με τη χρήση των τεχνολογιών που διαθέτει ένα «έξυπνο» Δίκτυο, η διαδικασία μπορεί να γίνει πολύ πιο εύκολη. Τα φορτία μπορούν να αποκαθίστανται και

να επανατροφοδοτείται μια περιοχή που δεν ηλεκτροδοτείται σε περιπτώσεις που το Δίκτυο πλήττεται από εσωτερικά ή εξωτερικά φαινόμενα.

Προς αποφυγή μεγάλων καταστροφών στο Δίκτυο, οι τεχνολογίες του “έξυπνου” Δικτύου είναι ικανές να διακόψουν την παροχή ισχύος σε μικρές περιοχές, έτσι ώστε να μειωθεί η επίδραση ορισμένων ακραίων φαινομένων στο Δίκτυο. Η συγκεκριμένη ενέργεια βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις στις οποίες τα φαινόμενα που εμφανίζονται είναι εφικτό να προβλεφθούν (π.χ. μετεωρολογικές προβλέψεις για καιρικά φαινόμενα) ή σε περιπτώσεις προγραμματισμένων διακοπών για προγραμματισμένα έργα ανάπτυξης ή συντήρησης του Δικτύου. Σε περιπτώσεις εξωτερικών παρεμβάσεων στην ορθή λειτουργία, όπως είναι οι κυβερνοεπιθέσεις και οι σεισμικές δονήσεις, ο συγκεκριμένος τρόπος αντιμετώπισης δεν είναι εφαρμόσιμος, καθώς είναι δύσκολη η πρόβλεψη της εμφάνισης τους [47][48]. Η παρακολούθηση και η απομακρυσμένη διαχείριση του Δικτύου μέσω τηλεχειρισμών προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες διακοπές όπου αυτό είναι αναγκαίο, μπορεί να γίνεται σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση Συστημάτων Διαχείρισης του Δικτύου Διανομής (Distribution Management Systems, DMS), Προηγμένων Συστημάτων Διαχείρισης Δικτύου (Advanced Distribution Management Systems, ADMS) και ενσωματωμένων Συστημάτων Διαχείρισης Λειτουργιών Ηλεκτροδότησης (Operation Management Systems, OMS). Αυτά τα συστήματα προσφέρουν βελτιωμένη αξιοπιστία και ευελιξία [37].

#### Γενική συμβολή ενός “έξυπνου” Δικτύου:

Βέβαια, τα οφέλη που προκύπτουν από την αναβάθμιση του Δικτύου σε ένα «έξυπνο» Δίκτυο δεν περιορίζονται μόνο στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας, αλλά σε μία σειρά θετικών επιδράσεων:

- 1) Παρατηρείται μείωση εκπομπών αερίων διοξειδίου του άνθρακα, επομένως συμβάλουν στην μικρότερη δυνατή επιβάρυνση της ατμόσφαιρας και κατά συνέπεια στη μείωση επέκτασης της κλιματικής αλλαγής, η οποία, όπως γνωρίζουμε, παίζει καθοριστικό ρόλο στην εμφάνιση και την ένταση των ακραίων καιρικών φαινομένων, των φαινομένων εκείνων που ουσιαστικά αποτελούν σημαντικό παράγοντα καταστροφής των Δικτύων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Για παράδειγμα, μετά από αξιολόγηση της εγκατάστασης των έξυπνων μετρητών αποδείχτηκε μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε ποσοστά από 12 έως 59% [48].
- 2) Το «έξυπνο» δίκτυο ανταποκρίνεται στις ανάγκες των πολιτών. Δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να αποφασίζουν ενεργά για την χρήση της ενέργειας, προγραμματίζοντας την κατανάλωση βάσει των αναγκών τους συναρτήσει του κόστους της μονάδας ενέργειας, γεγονός το οποίο συμβάλλει στον έλεγχο της παραγωγής και της κατανάλωσης και κατά συνέπεια στο μερίδιο της ενέργειας στη ρύπανση της ατμόσφαιρας από το διοξείδιο του άνθρακα [47].
- 3) Υπάρχει μικρότερη εξάρτηση από τον ανθρώπινο παράγοντα στη διαχείριση του Δικτύου. Η διαχείριση του «έξυπνου» Δικτύου βασίζεται περισσότερο σε νέες τεχνολογίες της ψηφιακής εποχής [47].
- 4) Όλο και περισσότεροι χρήστες του Δικτύου έχουν την δυνατότητα ιδιο-παραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας για ιδιο-κατανάλωση. Η σύνδεση των ΑΠΕ γίνεται πιο εύκολα, ενώ παράλληλα διευκολύνεται η διαχείριση της παραγωγής [6][47].

- 5) Το οικονομικό κόστος που προκύπτει από την λειτουργία του Δικτύου, είναι απαραίτητο να είναι όσο το δυνατό μικρότερο. Το «έξυπνο» Δίκτυο έχει την δυνατότητα να εκτιμά τα κόστη που προκύπτουν από τις πιθανές ενέργειες που επιλέγονται για την σωστή διαχείριση του Δικτύου, έτσι ώστε εν τέλει να λαμβάνονται συμφέρουσες τεχνικές και οικονομικές αποφάσεις [47]. Επιπλέον, ο εξοπλισμός που χρειάζεται για την μετάβαση από το παραδοσιακό μοντέλο του Δικτύου στο «έξυπνο» Δίκτυο εγκαθίσταται στην υπάρχουσα δομή του Δικτύου, μαζί με τον ήδη εγκατεστημένο εξοπλισμό, χωρίς να χρειάζεται αντικατάσταση όλων των στοιχείων, ενέργεια που εκτιμάται ως οικονομικά ασύμφορη [6].
- 6) Διευκολύνεται η εξισορρόπηση της ζήτησης μεταξύ των ωρών αιχμής και των ωρών εκτός αιχμής. Αποφεύγονται κρίσιμες καταστάσεις με υψηλή ζήτηση φορτίων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν ενδεχομένως το Δίκτυο σε κατάρρευση [6].

Όλες οι αναφερόμενες αναβαθμίσεις του Δικτύου και βελτιώσεις λειτουργίας αυτού μπορούν έμμεσα να επηρεάσουν την ανθεκτικότητά του, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στην περαιτέρω ενίσχυσή της.

#### Προβλήματα που μπορεί να εμφανιστούν με την χρήση ενός «έξυπνου» Δικτύου:

Οστόσο είναι σημαντικό να σημειωθούν και κάποια από τα προβλήματα που μπορεί ενδεχομένως να εμφανιστούν με την μετάβαση στο «έξυπνο» Δίκτυο. Σκοπός αποτελεί αυτά να επιλυθούν ή να μετριαστούν έως ένα βαθμό. Μερικά από τα ζητήματα που ενδέχεται να προκύψουν από την χρήση του «έξυπνου» Δικτύου, θα μπορούσε να είναι:

- 1) Η αλληλεξάρτηση από τα συστήματα επικοινωνίας τα οποία μπορεί να απενεργοποιηθούν σε περίπτωση διακοπής ρεύματος [12][37]. Είναι αναγκαίο να εξασφαλιστεί εφεδρική τροφοδοσία των συστημάτων αυτών, προκειμένου να αποφευχθεί ο κίνδυνος απώλειας σημαντικών και κρίσιμων δεδομένων.
- 2) Το «έξυπνο Δίκτυο» είναι ευάλωτο σε κυβερνοεπιθέσεις (cyber - attacks) [6][19][46]. Θα πρέπει πριν υλοποιηθεί ένα σχέδιο μετάβασης του Δικτύου σε ψηφιακό περιβάλλον λειτουργίας, να εξασφαλιστεί ότι οι επιθέσεις θα περιοριστούν στο ελάχιστο δυνατό και ότι οι επιτιθέμενοι δεν θα έχουν την δυνατότητα να επιδράσουν πλήρως στο δίκτυο, ακόμη και στην περίπτωση που μπορέσουν να διεισδύσουν στα ψηφιακά συστήματα διαχείρισης.
- 3) Οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές υπάρχει πιθανότητα να επηρεαστούν. Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας λειτουργούν σε ένα πολύπλοκο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον στο οποίο συνυπάρχουν και αλληλοεπιδρούν διάφορα εξαρτήματα και ηλεκτρονικές συσκευές. Όλα αυτά παρουσιάζουν έντονη ευαισθησία σε διαταράξεις εξαιτίας ηλεκτρομαγνητικών παλμών, που μπορεί να προκληθούν από εκρήξεις ή από γεωμαγνητικές καταιγίδες [19]. Επομένως, με την αύξηση του αριθμού των χρησιμοποιούμενων από το Δίκτυο συσκευών παράλληλα αυξάνεται η επίδραση των φαινομένων αυτών στο Δίκτυο.
- 4) Υπάρχει δυσκολία διασύνδεσης και επικοινωνίας των εκσυγχρονισμένων ψηφιακών συσκευών και οργάνων νέας τεχνολογίας με τον παλαιότερο εξοπλισμό (ασύμβατο λογισμικό/ψηφιακό υπόβαθρο). Για το λόγο αυτό το κόστος εκσυγχρονισμού του Ηλεκτρικού Δικτύου με νέο σύγχρονο εξοπλισμό είναι αρκετά υψηλό [6].
- 5) Δεν έχουν αναπτυχθεί - ακόμη - ισχυρά πρότυπα για τις νέες τεχνολογίες που χρησιμοποιεί ένα «έξυπνο» Δίκτυο [6]. Μια αναφορά της CENELEC για τα πρότυπα των έξυπνων Δικτύων, αναφέρει μία λίστα από ορισμούς που αφορούν το «έξυπνο» Δίκτυο και έχουν αναπτυχθεί

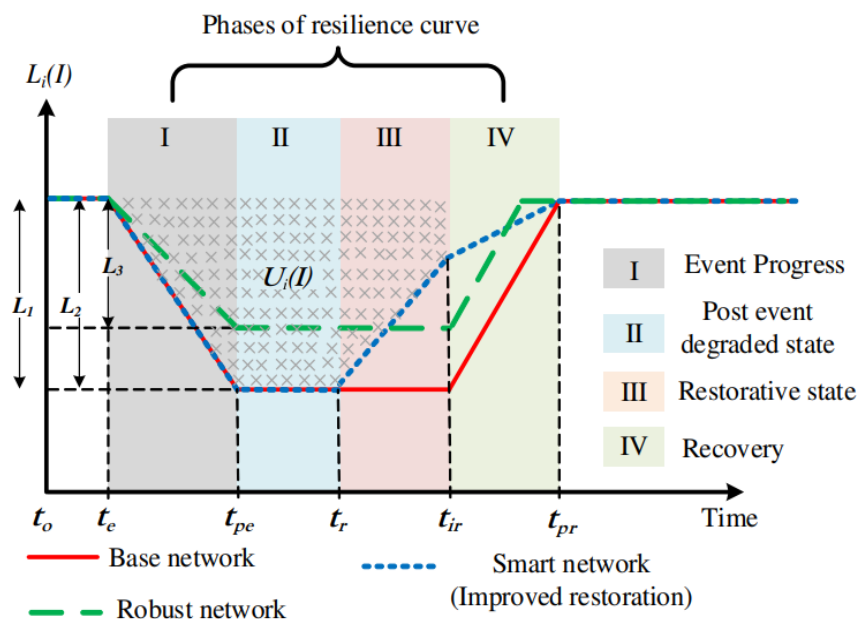


από ορισμένα πρότυπα (IEC), ωστόσο υπάρχουν ανομοιότητες για τους ίδιους όρους σε διαφορετικά πρότυπα. Ορισμένοι όροι που αφορούν το “έξυπνο” Δίκτυο θα πρέπει να αναθεωρηθούν [50].

Η ανάλυση των δυνατοτήτων και των αδυναμιών του «έξυπνου» Δικτύου, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν αρκεί μόνο η ενσωμάτωση στο υφιστάμενο Δίκτυο των τεχνολογιών του «έξυπνου» Δικτύου προκειμένου να ενισχυθεί το επίπεδο της ανθεκτικότητάς του. Τονίζεται η αναγκαιότητα της γενικότερης αναβάθμισης των υποδομών του Δικτύου, σε όλα τα επίπεδα.

Το παραπάνω συμπέρασμα αποδεικνύεται επίσης μέσα από μελέτες προσομοίωσης στις οποίες παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο επίπεδο ανθεκτικότητας στο Δίκτυο επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το υβριδικό μοντέλο που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.12. Το υβριδικό αυτό μοντέλο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του «έξυπνου» δικτύου παράλληλα με την ενίσχυση των υποδομών εκ μέρους του Διαχειριστή Δικτύου Διανομής. Ένας τέτοιος συνδυασμός, ωστόσο, προσδίδει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στο Δίκτυο και στην αντιμετώπιση των προβλημάτων, όσον αφορά την ανθεκτικότητα του [51].

Από τα παραπάνω εύκολα συμπεραίνεται ότι το «έξυπνο» Δίκτυο μέχρι σήμερα αποτελούσε μία μελλοντική και αναμενόμενη εξέλιξη του Δικτύου. Πλέον ο εκσυγχρονισμός του Δικτύου αποτελεί αναγκαίο βήμα για την αναβάθμιση του σε ένα περισσότερο ανθεκτικό Δίκτυο [47].

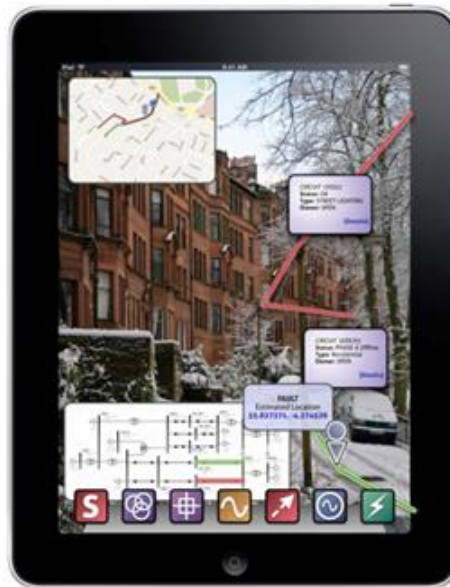


**Εικόνα 2.12:** Καμπύλη ανθεκτικότητας του Δικτύου κατά τη διάρκεια ενός φαινομένου. Η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει την ανθεκτικότητα ενός Δικτύου το οποίο δεν έχει λάβει τα απαραίτητα προληπτικά μέτρα για την βελτίωση της ανθεκτικότητάς του. Η ανθεκτικότητα του «έξυπνου» Δικτύου αναπαρίσταται με την μπλε γραμμή. Η πράσινη γραμμή αναπαριστά το Δίκτυο με ενισχυμένο εξοπλισμό [51].

### 2.3.1.1 Παράδειγμα χρήσης τεχνολογιών ενός “έξυπνου” Δικτύου.

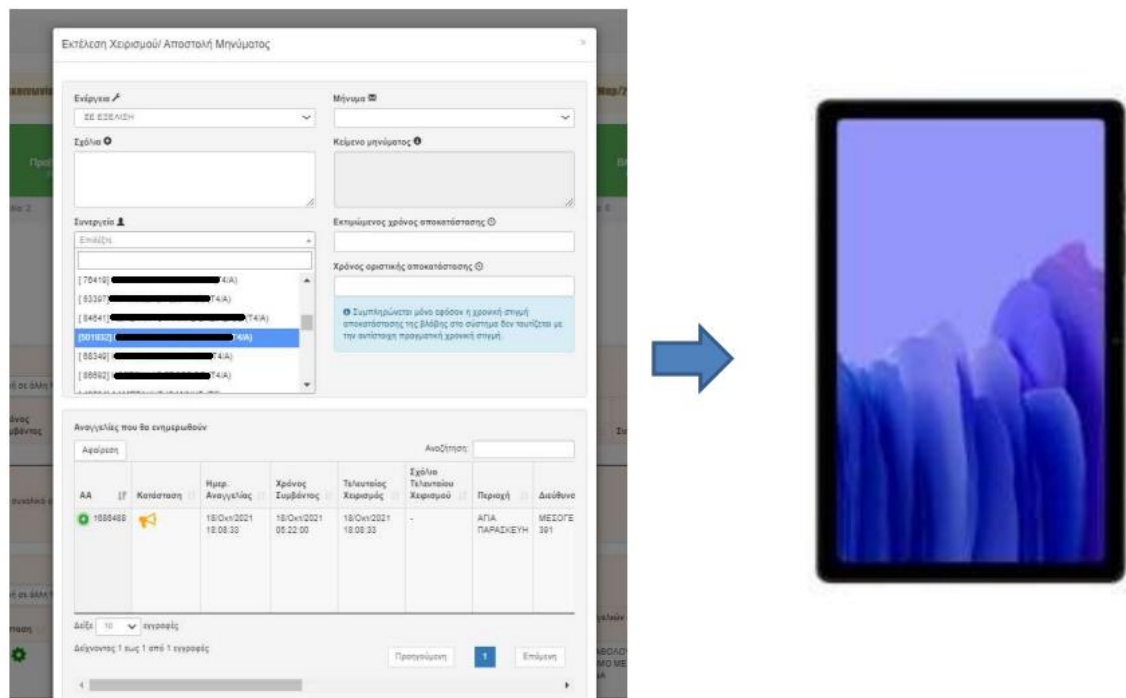
Έχουν δημιουργηθεί καινοτόμα συστήματα και εφαρμογές που επιτρέπουν την πρόσβαση στα δεδομένα του Δικτύου, ακόμα και σε έναν απλό χρήστη. Με την χρήση των tablets και των smartphones που έχουν αρχίσει και χρησιμοποιούνται ως βασικά εργαλεία σε αρκετούς Διαχειριστές σήμερα, αυτά τα συστήματα επιτρέπουν την ανάκτηση δεδομένων σε πραγματικό

χρόνο. Όταν για παράδειγμα ο χρήστης στρέφει την κάμερα προς έναν στύλο διανομής ή και σε άλλα στοιχεία του Δικτύου, το σύστημα δίνει τις απαραίτητες πληροφορίες μέσω του GIS (Geographic Information System - Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών), απεικονίζοντας το μονογραμμικό διάγραμμα του Δικτύου (Single Line Diagram) και τα δομικά στοιχεία αυτού.



**Εικόνα 2.13:** Χρήση ειδικών εφαρμογών για την ανάκτηση δεδομένων του Δικτύου [19].

Η χρήση αυτής της τεχνολογίας, για παράδειγμα, διευκολύνει το έργο των τεχνικών συνεργειών του Δικτύου Διανομής, καθώς με την ανάκτηση όλων των απαραίτητων πληροφοριών του Δικτύου και των Στοιχείων αυτού γίνεται πολύ πιο αποδοτική (ιδιαίτερα σε χρόνο) η αποκατάσταση του όποιου προβλήματος και η επαναφορά της ηλεκτροδότησης.



**Εικόνα 2.14:** Εναλλακτική ειδική εφαρμογή για την ανάκτηση δεδομένων του Δικτύου.

### 2.3.1.2 «Έξυπνα» δίκτυα στην Ελλάδα

Η ανάπτυξη και η λειτουργία του Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας έχει αναληφθεί από τον Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ). Οι στόχοι του διαχειριστή είναι:

- Η αναβάθμιση των υπηρεσιών που παρέχονται στους πελάτες,
- Η βελτίωση της ποιότητας της παρεχόμενης ενέργειας με τον εκσυγχρονισμό και την αναβάθμιση του επιπέδου αξιοπιστίας των εγκαταστάσεων της διανομής
- Η υλοποίηση των έργων με το μικρότερο δυνατό λειτουργικό κόστος, πράγμα που θα επιτευχθεί με την ενίσχυση, τον εκσυγχρονισμό και την αυτοματοποίηση του Δικτύου
- Η διατήρηση ενός αξιόπιστου και ασφαλούς Δικτύου. Οι τρόποι συμβολής ενός “έξυπνου” Δικτύου στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας (αλλά και γενικότερα στην καλύτερη λειτουργία του Δικτύου) έχουν ήδη αναφερθεί παραπάνω. Παρατηρείται, λοιπόν, μία ταύτιση των στόχων του ΔΕΔΔΗΕ με τα οφέλη εγκατάστασης ενός “έξυπνου” Δικτύου. Επομένως, φαίνεται ορθή η απόφαση για την σταδιακή μετατροπή του σημερινού συμβατικού Δικτύου σε ένα “έξυπνο” Δίκτυο [52].

Σύμφωνα με τα Σχέδια Ανάπτυξης Δικτύου (ΣΑΔ) του ΔΕΔΔΗΕ για τις περιόδους 2019 - 2023 [53] και 2021 - 2025 [54], κύριο μέλημα αποτελεί η ανάπτυξη των συστημάτων τηλεμέτρησης, όπως επίσης και η ανάπτυξη σημαντικών συστημάτων για την εποπτεία, τον έλεγχο και τη διαχείριση του Δικτύου, καθώς και τη συλλογή πληροφοριών για τη λειτουργία του (ενδεικτικά αναφέρονται τα συστήματα τήλε-εποπτείας και τήλε-χειρισμών στοιχείων του Δικτύου, τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών, τα συστήματα παρακολούθησης διαστάσεων Ποιότητας Ενέργειας). Όλα αυτά αποτελούν εγχειρήματα για το πρώτο στάδιο μετάβασης προς την λειτουργία ενός «έξυπνου» Δικτύου στον ελληνικό χώρο.

Ο ΔΕΔΔΗΕ ξεκίνησε τις διαγωνιστικές διαδικασίες επιλογής ανάδοχων εταιριών για την ανάληψη έργων, σχετικών με την εγκατάσταση εξοπλισμού για την τηλεμέτρηση και των τηλεχειρισμό του Δικτύου, καθώς επίσης και την εγκατάσταση συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών, σύμφωνα με τα στρατηγικά έργα που ανέπτυξε [55].

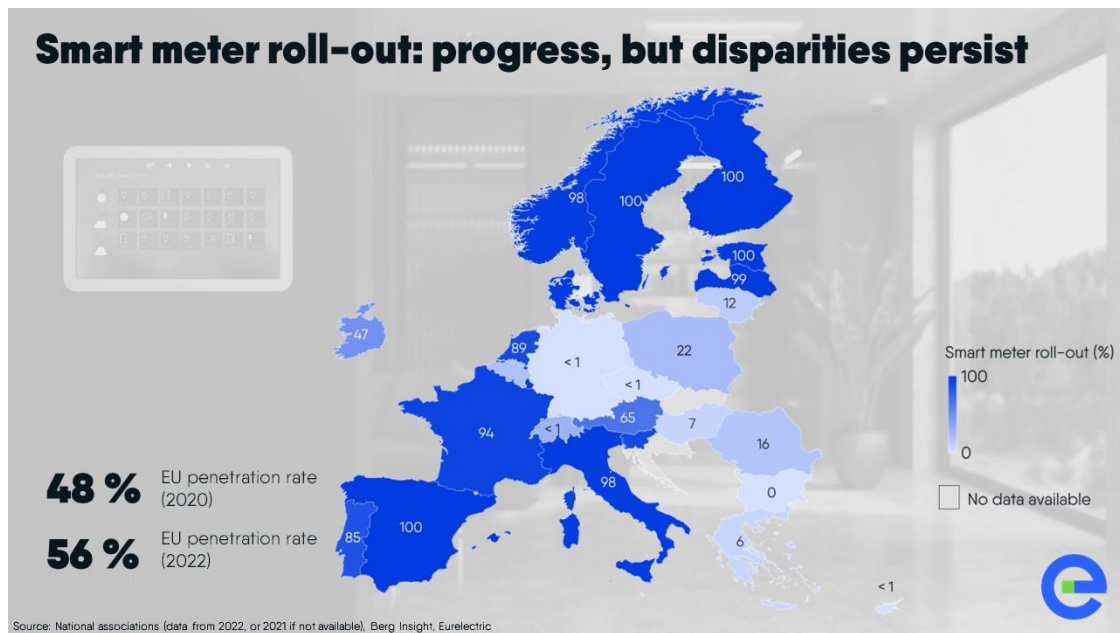
Προσφάτως μάλιστα (07/11/23) έλαβε χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων (ΕΤΕπ) ύψους 150 εκατ. Ευρώ για το έργο του ΔΕΔΔΗΕ σχετικά με την αναβάθμιση του Δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, εγκαθιστώντας έξυπνους μετρητές σε όλη την επικράτεια [56].

Η εξέλιξη του έργου αυτού είναι ακόμη σε πολύ αρχικά στάδια, όπως υποδηλώνει και μία πρόσφατη έρευνα από τον Οργανισμό Συνεργασίας των Ρυθμιστικών Αρχών Ενέργειας [57]. Η έρευνα αυτή υποδεικνύει ένα μεγάλο χάσμα μεταξύ των χωρών της Ευρώπης όσον αφορά την ενσωμάτωση έξυπνων μετρητών στο Δίκτυο Διανομής. Συγκεκριμένα, 13 χώρες έχουν φτάσει σε ποσοστό 80% διείσδυσης των έξυπνων μετρητών στο Δίκτυο, ενώ αναμένεται άλλες 4 χώρες να προχωρήσουν περαιτέρω το έργο της εγκατάστασης των «έξυπνων» μετρητών, με 3 από αυτές να στοχεύουν το 80% κατά το 2024.

Ωστόσο, έξι χώρες μόλις ξεκίνησαν έργα που περιλαμβάνουν την εγκατάσταση των έξυπνων μετρητών, ενώ πέντε - συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας - έχουν πολύ λίγους ή καθόλου έξυπνους μετρητές.

Αξίζει να αναφερθεί ότι δεν αρκεί μόνο να εγκατασταθούν και να τεθούν σε λειτουργία οι έξυπνοι μετρητές. Είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί και το Δίκτυο σε τέτοιο βαθμό, ώστε να είναι

δυνατό να υποστηρίξει όλες τις λειτουργίες εκείνες που οι έξυπνοι μετρητές είναι σχεδιασμένοι και κατασκευασμένοι να προσφέρουν (συλλογή των απαραίτητων στοιχείων, κατάλληλες υποδομές, γεωγραφικός εντοπισμός, ενημέρωση καταναλωτών).



**Εικόνα 2.15:** Η πρόοδος στην Ευρώπη, όσον αφορά την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών [58].

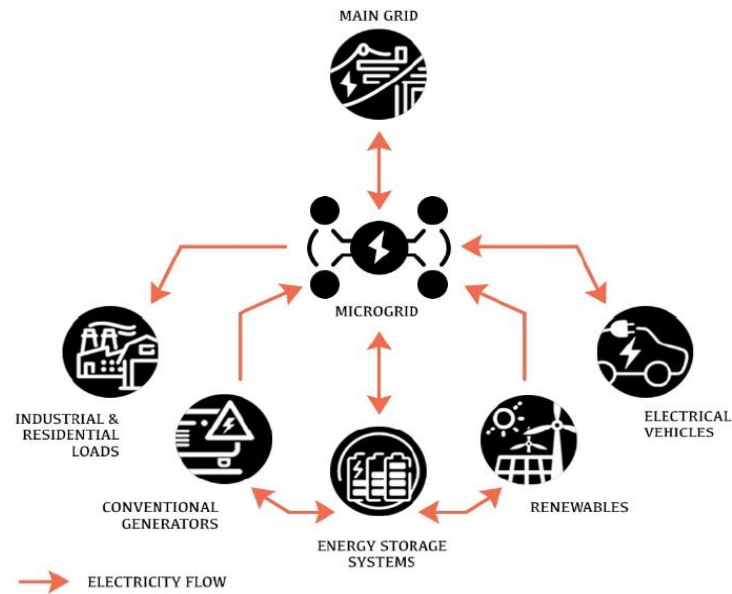
Επιπλέον ο ΔΕΔΔΗΕ έχει αναλάβει την υποχρέωση να εγκαταστήσει κατάλληλα συστήματα τηλεπομπείας και ελέγχου σε σταθμούς Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού - Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (ΣΗΘΥΑ) εγκατεστημένης ισχύος άνω των 400kW. Κύριος λόγος γι' αυτό είναι η μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ και η αδυναμία των συστημάτων προστασίας τους να ανταποκριθούν σε ξαφνικές διαταραχές στις γραμμές μεταφοράς [59].

Είναι φανερό, λοιπόν, ότι έχουν γίνει τα πρώτα βήματα για την σταδιακή εγκατάσταση συστημάτων και εξοπλισμού που θα μεταμορφώσουν το ελληνικό Δίκτυο Διανομής σε «ευφυές» Δίκτυο. Η μετάβαση προς το «έξυπνο» Δίκτυο είναι ακόμη στην αρχή στην Ελλάδα και επομένως προτείνεται η εντατικοποίηση των ενεργειών που θα οδηγήσουν στην λειτουργία όχι μόνο ενός «έξυπνου» Δικτύου αλλά και ανθεκτικού σε ακραία φαινόμενα.

### 2.3.2 Μικροδίκτυα (Microgrids)

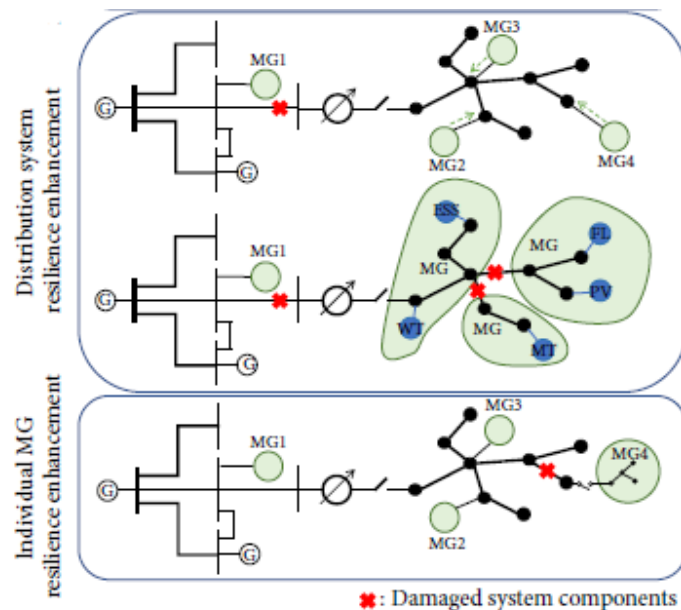
Με την διείσδυση των Διεσπαρμένων Παραγωγών (ΔΠ) στο Δίκτυο, αλλά και την ανάπτυξη των «έξυπνων» Δικτύων, είναι ευκολότερο να σχηματιστούν μικροδίκτυα για την εξασφάλιση του κρίσιμου φορτίου σε περιπτώσεις σφαλμάτων στο Δίκτυο [12][46].

Τα μικροδίκτυα (ΜΔ) είναι μικρότερα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, συνήθως Χαμηλής (~230V) ή Μέσης Τάσης (20kV), που βρίσκονται εντός του ενιαίου μεγαλύτερου Δικτύου. Εξασφαλίζουν την δική τους παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη της απαραίτητης τροφοδοσίας των φορτίων τους, προσφέροντας ενεργειακή αυτονομία. Επίσης διαθέτουν την απαραίτητη τεχνολογία για τον έλεγχο του απομονωμένου από το υπόλοιπο δίκτυο και αυτόνομου συστήματος, χρησιμοποιώντας αποθηκευτικά μέσα για την καλύτερη αξιοποίηση της παραγόμενης σε αυτό ενέργειας.



**Εικόνα 2.16:** Γενική δομή μικροδικτύου [60].

Ορισμένα συστήματα έχουν την ικανότητα να τίθενται σε λειτουργία «νησιδοποίησης» (islanding), να λειτουργούν δηλαδή αυτόνομα και ανεξάρτητα από το υπόλοιπο Δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένα. Με τη δυνατότητα αυτή, σε περίπτωση διακοπής ηλεκτροδότησης συμβάλλουν στην ανθεκτικότητα του Δικτύου. Μάλιστα, η κατάσταση αυτή λειτουργίας των μικροδικτύων ως «νησιά», τα καθιστά ως την ιδανική λύση για την τροφοδότηση φορτίων που ανήκουν σε περιοχές μη διασυνδεδεμένες με το Δίκτυο, όπως για παράδειγμα τα μη διασυνδεδεμένα με το χερσαίο τμήμα της Ελλάδος νησιά. Σε αυτά τα συστήματα μπορούν επίσης να εντάσσονται συστήματα συμπαραγωγής (συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ισχύος), Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε), κ.α. [49], διευκολύνοντας ακόμη περισσότερο την αξιοποίηση της νησιδοποιημένης τους κατάστασης.



**Εικόνα 2.17:** Ενίσχυση ανθεκτικότητας του Δικτύου Διανομής με χρήση μικροδικτύων [61].

Κατά κύριο λόγο, τα ΜΔ τοποθετούνται σε σημεία του Δικτύου όπου η αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας είναι επιβεβλημένη λόγω εξυπηρέτησης κρίσιμων φορτίων, όπως για παράδειγμα τα νοσοκομεία και οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Υπάρχουν βασικές διαφορές μεταξύ των σχηματιζόμενων στο Δίκτυο μικροδικτύων, όπως για παράδειγμα η πρώτη ύλη που χρησιμοποιούν ως καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας, η τοπολογία τους και το μέγεθος που καταλαμβάνουν στο Δίκτυο. Το κόστος εγκατάστασης του κάθε μικροδικτύου προκύπτει συνυπολογίζοντας όλες αυτές τις παραμέτρους [62].

### Τύποι μικροδικτύων

Τα ΜΔ, ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων παραγωγής και κατανάλωσης, μπορούν να ταξινομηθούν σε εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), συνεχούς ρεύματος (DC), και υβριδικά ΜΔ (AC/DC):

**AC συστήματα:** Το κύριο πλεονέκτημα των μικροδικτύων αυτών είναι ότι μπορούν να συνδεθούν απευθείας με το Δίκτυο, το οποίο είναι εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Για τον λόγο αυτό, η διαμόρφωση τέτοιων μικροδικτύων είναι η πιο συχνά απαντούμενη. Έχουν υψηλότερο βαθμό ευελιξίας και αξιοπιστίας, διότι εκμεταλλεύονται ήδη τα πρότυπα και τα συστήματα προστασίας που έχουν εγκατασταθεί στο Δίκτυο. Οι μηχανές ντίζελ και οι ανεμογεννήτριες είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα μονάδων παραγωγής που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα συστήματα. Ακόμη χρησιμοποιούνται μετατροπείς προκειμένου να υπάρχει συμβατότητα των αποθηκευτικών συστημάτων του μικροδικτύου με το Δίκτυο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι μετατροπείς προσδίδουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στο Δίκτυο και η μετατροπή ενέργειας οδηγεί σε σημαντικές απώλειες ενέργειας

**DC συστήματα:** Με την εμφάνιση των ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάστηκε μεγάλη αύξηση στη χρήση αυτού του τύπου μικροδικτύων. Βασικός λόγος επιλογής χρήσης των DC συστημάτων μικροδικτύων αποτελεί η άμεση σύνδεση με τα DC φορτία (συσκευές, λαμπτήρες συνεχούς ρεύματος, κλιματιστικά συνεχούς ρεύματος και υπολογιστές) και των DC πηγών (φωτοβολταικά συστήματα, κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες).

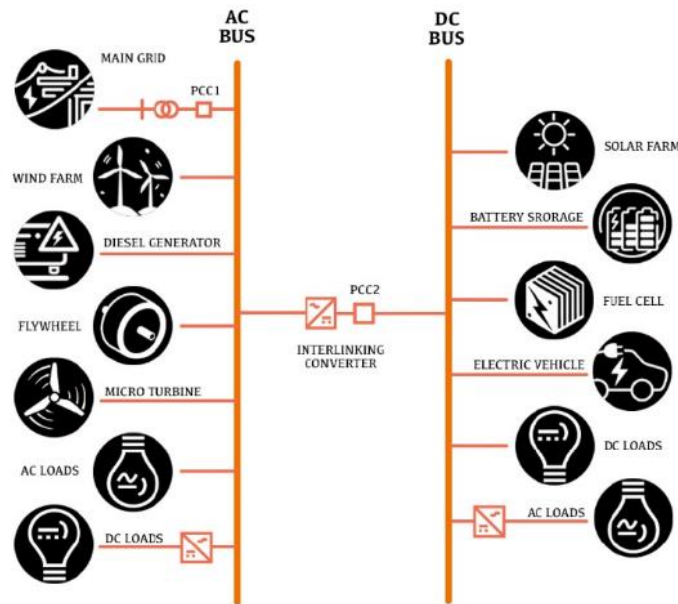
Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του τύπου μικροδικτύων, είναι η σημαντική μείωση των απωλειών. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν είναι αναγκαία η μετατροπή ενέργειας από DC σε AC (συνήθως οι απώλειες ανέρχονται σε ποσοστά της τάξης 5% με 15% της παραγόμενης ενέργειας). Υπάρχει δηλαδή συμβατότητα με τις πηγές ενέργειας συνεχούς ρεύματος. Από την άλλη, η συμβατότητα με το Δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος είναι περιορισμένη. Επίσης, στα DC συστήματα η άεργος ισχύς και ο έλεγχος της συχνότητας δεν λαμβάνονται υπόψη, καθιστώντας την λειτουργία και την σχεδίαση τους απλή. Ακόμη, δεν εμφανίζονται προβλήματα που προκαλούνται από αρμονικά ρεύματα και αρμονικές παραμορφώσεις. Απαιτείται μόνο προσαρμογή του μεγέθους της τάσης για τον συγχρονισμό με το AC Δίκτυο σε αντίθεση με τα AC ΜΔ, όπου για τον συγχρονισμό με το Δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος απαιτούνται αλλαγές στην τάση, την συχνότητα και την φάση μεταξύ των σημείων κοινής σύνδεσης (Point of Common Connection - PCC).

Τα συστήματα αυτά δεν απαιτούν μεγάλες αποστάσεις για την μεταφορά της ενέργειας και έχουν πιο αποδοτικά αποθηκευτικά συστήματα ενέργειας. Γι' αυτό άλλωστε αποδίδουν περισσότερο ενεργειακά σε σχέση με την AC διαμόρφωση. Σημαντική παράμετρο αποτελεί επιπλέον το κόστος εγκατάστασης και τα λειτουργικά έξοδα, τα οποία, όπως υποδεικνύουν τα δεδομένα, είναι χαμηλότερα στα DC συστήματα.



### AC/DC υβριδικά συστήματα:

Τα συστήματα αυτά από AC και DC ζυγούς, στους οποίους συνδέονται ΔΠ (π.χ. ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά συστήματα, ντιζελογεννήτριες), συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και φορτία. Η σύνδεση αυτών υλοποιείται μέσω ενός κοινού αναστροφέα (inverter), ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ των ζυγών των AC και DC φορτίων. Με τον τρόπο αυτό, το σχηματιζόμενο υβριδικό μικροδίκτυο επωφελείται από τα πλεονεκτήματα τόσο του AC όσο και του DC μικροδικτύου. Διευκολύνεται, έτσι, η ενσωμάτωση πολλών ΔΠ διαφορετικής τεχνολογίας, μειώνονται τα στάδια μετατροπής της ενέργειας και άρα μειώνεται η απώλεια ισχύος και το κόστος [60].



**Εικόνα 2.18:** Δομή ενός υβριδικού AC/DC μικροδικτύου [60].

### Τρόποι ελέγχου μικροδικτύων:

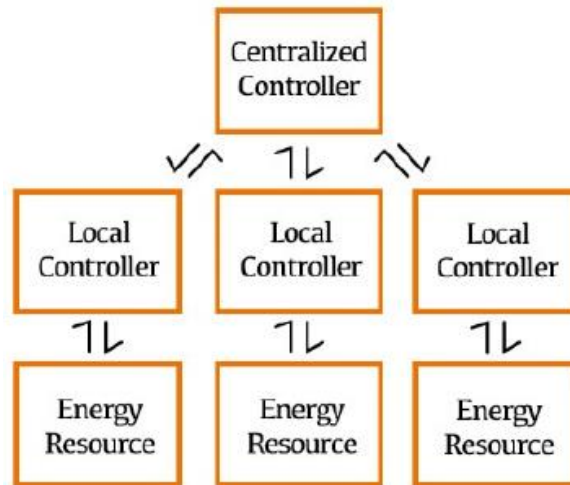
Μεγάλη πρόκληση αποτελεί η εύρεση του βέλτιστου τρόπου με τον οποίο θα ελέγχεται το μικροδίκτυο και θα γίνεται η διαχείριση της ενέργειας σε αυτό. Ουσιαστικά, σε κάθε μικροδίκτυο επιλέγεται εκείνος ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται η καλύτερη παρακολούθηση και διαχείριση του ισοζυγίου της παραγωγής, των αποθηκευτικών μέσων και της ζήτησης των φορτίων, με τον οικονομικότερο τρόπο.

Τρεις είναι κατά βάση οι τρόποι ελέγχου των μικροδικτύων:

#### 1. Κεντρικός έλεγχος:

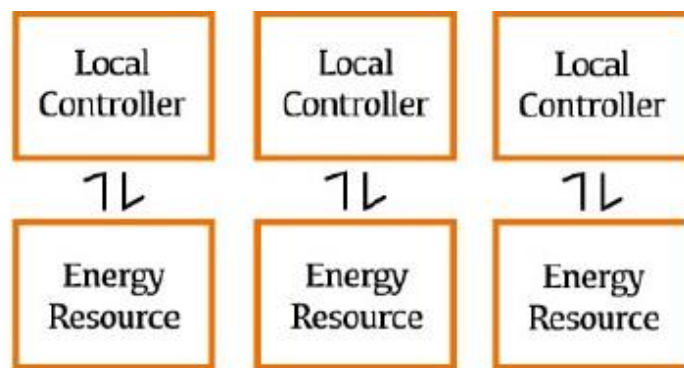
Σε αυτή την μέθοδο υπάρχει μία κεντρική μονάδα ελέγχου, με την οποία ο διαχειριστής του Δικτύου διανομής συλλέγει τα απαραίτητα δεδομένα μέσω των τοπικών μονάδων ελέγχου των μονάδων παραγωγής και προγραμματίζει τα στοιχεία του Δικτύου με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η κατά δύναμη βέλτιστη λειτουργία του μικροδικτύου. Αποτελεί, λειτουργικά, την πιο ασφαλή μέθοδο ελέγχου ενός μικροδικτύου, ωστόσο δεν είναι εύκολη η προσθήκη και η αφαίρεση καινούριων δεδομένων στο σύστημα, όπως πχ προσθήκη νέων στοιχείων στην αρχική αρχιτεκτονική του μικροδικτύου. Επίσης είναι απαραίτητη η χρήση εξελιγμένων συστημάτων επικοινωνίας. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι με την μέθοδο αυτή, τα δεδομένα που μεταφέρονται στο σύστημα ελέγχου είναι περισσότερο ευάλωτα σε πιθανές κυβερνοεπιθέσεις.





**Εικόνα 2.19:** Διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος κεντρικού ελέγχου μικροδικτύων [60].

## 2. Αποκεντρωμένος έλεγχος:

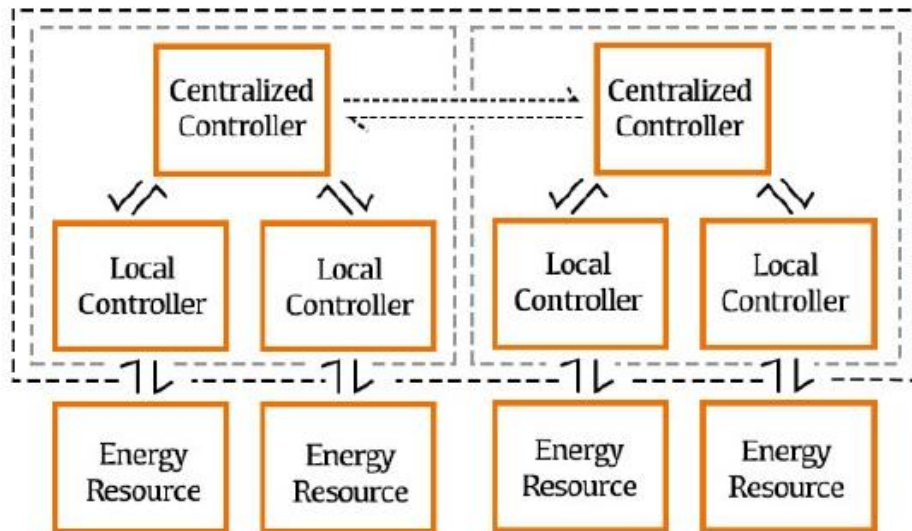


**Εικόνα 2.20:** Διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος αποκεντρωμένου ελέγχου μικροδικτύων [60].

Στον αποκεντρωμένο έλεγχο, κάθε μονάδα παραγωγής ελέγχεται αυτόνομα από την τοπική μονάδα ελέγχου των μονάδων παραγωγής του μικροδικτύου. Οι αποφάσεις για τον έλεγχο κάθε μονάδας παραγωγής γίνονται ανεξάρτητα. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι σαφώς η μικρότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Ακόμη είναι πιο εύκολη η ενσωμάτωση νέων στοιχείων, όπως για παράδειγμα μίας νέας μονάδας παραγωγής, χωρίς να απαιτείται η τροποποίηση στην αρχιτεκτονική του κεντρικού συστήματος ελέγχου.

## 3. Υβριδικό σύστημα ελέγχου:

Σε αυτή την μέθοδο ελέγχου γίνεται συνδυασμός των δύο συστημάτων ελέγχου που προαναφέρθηκαν (κεντρικός και αποκεντρωμένος έλεγχος). Με τον τρόπο αυτό τα πλεονεκτήματα που φέρει κάθε ένα σύστημα ξεχωριστά συνδυάζονται σε ένα σύστημα. Ουσιαστικά, τις απαραίτητες ανταλλαγές πληροφοριών που χρειάζεται να γίνουν μεταξύ των συστημάτων ελέγχου κάθε μονάδας παραγωγής σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα, τις αναλαμβάνουν κεντρικά συστήματα που ελέγχουν ομαδοποιημένες τις μονάδες παραγωγής [60].



**Εικόνα 2.21:** Διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος υβριδικού ελέγχου μικροδικτύων [60].

#### Οφέλη από τη χρήση μικροδικτύων:

Ο σχεδιασμός μικροδικτύων στο Δίκτυο, γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι συνεισφέρει θετικά, τόσο στη λειτουργία του Δικτύου όσο και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητάς του [62]. Ακολουθεί η αναφορά κάποιων από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτών που έχουν καταγραφεί από τη χρήση τους:

- Συνεχής και αδιάλειπτη παροχή ενέργειας, ακόμη και σε περιπτώσεις που για κάποιον λόγο υπάρχει διακοπή της ηλεκτροδότησης από τον κορμό του Δικτύου [48].
- Τα κόστη που προκύπτουν από την μεταφορά ενέργειας μειώνονται ή και μηδενίζονται, εφόσον στην περίπτωση της νησιδοποιημένης κατάστασης το σύστημα μεταφοράς δεν χρησιμοποιείται [48].
- Με την χρήση μικροδικτύων είναι βεβαιωμένο ότι μειώνονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό κυρίως προκύπτει διότι οι μονάδες παραγωγής σε ένα μικροδίκτυο αποτελούνται κυρίως από ΑΠΕ.
- Οι απώλειες ισχύος λόγω μεταφοράς της ενέργειας μειώνονται αρκετά, καθώς τα φορτία και η παραγωγή βρίσκονται σε κοντινές γεωγραφικές αποστάσεις. Σε κατάσταση νησιδοποίησης, η μεταφορά ενέργειας μέσω του κεντρικού Δικτύου δεν είναι απαραίτητη στην περίπτωση των μικροδικτύων, με αποτέλεσμα η απόδοση της παραγόμενης ενέργειας να αυξάνεται.
- Οι καταναλωτές που εξυπηρετούνται μέσω ενός μικροδικτύου μπορούν να αξιοποιήσουν την κοντινή γεωγραφική απόσταση μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης προς όφελός τους, χρησιμοποιώντας τις απώλειες ενέργειας που προκύπτουν από την διανομή για την θέρμανση και την ψύξη κτιρίων (συμπαγωγή ηλεκτρισμού και θέρμανσης).
- Σε ένα μικροδίκτυο οι χρήστες μπορούν να γίνουν αυτόνομοι παραγωγοί, έτσι ώστε να μην εξαρτώνται από την λειτουργία του ευρύτερου Δικτύου.
- Σε περιπτώσεις στις οποίες η ζήτηση είναι αρκετά αυξημένη, οι χρήστες μπορούν να προσφέρουν στο μικροδίκτυο, εξομαλύνοντας την καμπύλη φορτίου και μειώνοντας την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας.

### Συνέπειες χρήσης μικροδικτύων:

Ο σχεδιασμός μικροδικτύων είναι ακόμη σε εξέλιξη και σε καμία περίπτωση δε μπορεί την παρούσα στιγμή να θεωρηθεί πανάκεια στα προβλήματα που αντιμετωπίζει το Δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Εκτός από τα οφέλη που προσφέρει, η λειτουργία αυτών δημιουργεί προβλήματα τα οποία χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης, ώστε να μη διαταραχθεί η εύρυθμη λειτουργία του Δικτύου. Ακολουθεί η αναφορά σε κάποια από τα βασικότερα αυτών, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά των σχεδιασμό των μικροδικτύων ή/και να γίνει περαιτέρω ανάλυση και έρευνα για την αντιμετώπιση τους [62] :

- Η χρήση πολλαπλών ΔΠ στο μικροδίκτυο απαιτεί τον κατάλληλο συγχρονισμό τους, κυρίως όσον αφορά την συχνότητα και την τάση.
- Πολλές φορές η στοχαστικότητα της παραγωγής από τις ΑΠΕ, που ορίζεται από τις καιρικές συνθήκες (άπνοια - ισχυρός άνεμος στην περίπτωση ανεμογεννητριών, συννεφιά - ηλιοφάνεια στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων), έχει ως ενδεχόμενο η παραγωγή ενέργειας να μην επαρκεί για την κάλυψη των φορτίων εντός του μικροδικτύου. Για το λόγο αυτό στη μελέτη σχεδιασμού θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αδυναμία κάλυψης των εγκατεστημένων φορτίων αποκλειστικά από τις ΑΠΕ, αλλά να προβλέπεται υποστήριξη από άλλες τεχνολογίες (μπαταρίες, H/Z, κτλ).
- Ο σχεδιασμός των μικροδικτύων δεν είναι απλός, δεδομένου ότι είναι αναγκαίο να ληφθεί υπόψη πλήθος παραγόντων, όπως είναι για παράδειγμα η τοπολογία.
- Η προστασία των μικροδικτύων και του εξοπλισμού αυτών είναι ένα από τα πλέον φλέγοντα ζητήματα τα οποία διερευνώνται. Είναι απαραίτητο να καθοριστούν κανονισμοί και πρότυπα για την σωστή τοποθέτηση διατάξεων προστασίας.
- Η κατασκευή ενός μικροδικτύου μπορεί να αποδειχτεί αρκετά κοστοβόρα. Είναι απαραίτητος ένας άρτια ολοκληρωμένος τεχνοοικονομικός έλεγχος, προκειμένου να αποδειχθεί ότι η επένδυση για την εγκατάσταση ενός μικροδικτύου είναι βιώσιμη.
- Η έλλειψη ύπαρξης προτύπων και νομοθεσίας σχετικών με τον σχεδιασμό των μικροδικτύων δυσχεραίνει την περαιτέρω ανάπτυξη τους στο χώρο του Δικτύου.

### Μελλοντικές ενέργειες

Τα μικροδίκτυα αποτελούν μια ταχεία αναπτυσσόμενη τεχνολογία, και ήδη υπάρχει μεγάλη εξέλιξη και τεχνολογική πρόοδος στο κομμάτι αυτό [62]. Ακολουθεί η παράθεση σημαντικών τεχνολογικών βημάτων που έχουν γίνει μέχρι σήμερα στο θέμα των μικροδικτύων:

- Εικονικά μικροδίκτυα: Πρόκειται για μικροδίκτυα στα οποία η παραγωγή μπορεί να βρίσκεται σε μακρινή γεωγραφική απόσταση από την κατανάλωση και όχι σε κοντινή, όπως ορίζει η έννοια του μικροδικτύου (αντίστοιχα με τις Ενεργειακές Κοινότητες Φωτοβολταϊκής Παραγωγής Ενέργειας).
- Ανάπτυξη μικροδικτύων ανεξάρτητων και από άλλα κοινωφελή δίκτυα (νερό, θέρμανση κτλ.): Διαμόρφωση πλήρως ανεξάρτητων και αυτόνομων κοινοτήτων.
- Ανάπτυξη επικοινωνιακών συστημάτων μεταξύ των μικροδικτύων, για την εύκολη σύνδεση/αποσύνδεση ενός μικροδικτύου σε/από ένα ευρύτερο δίκτυο, στο οποίο συνδέονται όλα τα επιμέρους υφιστάμενα μικροδίκτυα [19].
- Συμμετοχή των μικροδικτύων στην καλύτερη διαχείριση ενέργειας. Θα ήταν επιθυμητό να αναπτυχθεί μία στρατηγική με την οποία τα μικροδίκτυα συνδέονται στο Δίκτυο Διανομής σε περιόδους όπου η τιμή της kWh είναι σε χαμηλά επίπεδα και να αποσυνδέεται και να λειτουργεί αυτόνομα όταν η τιμή αυτή είναι αυξημένη [60].

### Απόρριψη φορτίου:

Όπως είναι γνωστό, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες εμφανίζονται στο Δίκτυο προβλήματα τα οποία υποβαθμίζουν την λειτουργία του για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, δημιουργώντας αδυναμία πλήρους κάλυψης των φορτίων του για το διάστημα αυτό.

Οι τεχνολογίες που υποστηρίζουν τον σχεδιασμό και την λειτουργία μικροδικτύων έχουν την δυνατότητα να ελέγχουν την ροή της ισχύος στο μικροδίκτυο. Ένας από τους τρόπους ελέγχου της ισχύος που εγχέεται στο μικροδίκτυο είναι η απόρριψη φορτίου, για τη διασφάλιση της ισορροπίας του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή απορρίπτονται φορτία, τα οποία επιλέγονται με σειρά προτεραιότητας, με τα κρίσιμα φορτία (νοσοκομεία, κρίσιμες εγκαταστάσεις) να είναι σε προτεραιότητα έναντι των μη κρίσιμων, τα οποία απορρίπτονται πριν από οποιοδήποτε άλλο φορτίο. Η μέθοδος αυτή υλοποιείται μέσω αυτοματισμών, στους οποίους λαμβάνονται ως δεδομένα η κατάσταση των διακοπών και γενικότερα η τοπολογία του Δικτύου. Έτσι, επιτυγχάνεται επιπλέον και η προστασία της μονάδας παραγωγής του μικροδικτύου [20].

### Σχεδίαση μικροδικτύου

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι μελέτης σχεδίασης των μικροδικτύων, προς ενίσχυση της ανθεκτικότητας του ευρύτερου Δικτύου. Οι βέλτιστες μέθοδοι χωρίζονται σε 2 κατηγορίες: εκείνες που αναπτύσσονται βασισμένες στην ευρετική αναζήτηση (heuristic search) και εκείνες που αναπτύσσονται με μαθηματικό προγραμματισμό [60][63].

- Μέθοδοι βασισμένες στην ευρετική αναζήτηση:

Με αυτές τις μεθόδους το Δίκτυο αναπαρίσταται ως ένας γράφος, με τις ακμές του να υποδεικνύουν τα μονοπάτια του μικροδικτύου που συνδέουν τα κρίσιμα φορτία με την πηγή (ΔΠ μικροδικτύου). Έπειτα αναπτύσσονται μεθοδολογίες στις οποίες χρησιμοποιούνται διαφόρων τύπων αλγόριθμοι. Μερικές από αυτές τις μεθοδολογίες είναι:

- Ο αλγόριθμος αναζήτησης κατά βάθος (*Depth First Search - DFS algorithm*) για την εύρεση των πιθανών μονοπατιών με τα οποία μπορεί να σχηματιστεί το μικροδίκτυο κι έπειτα επιλέγεται το καλύτερο με βάση την τοπολογία του.

- Ο αλγόριθμος αναζήτησης *Spanning tree*. Σε αυτόν θεωρείται ότι το Δίκτυο Διανομής σχηματίζεται από τις κεντρικές αναχωρήσεις του υποσταθμού Υψηλής/Μέσης τάσης οι οποίες τροφοδοτούν το Δίκτυο και τα μικροδίκτυα, τα οποία στην περίπτωση αυτή μοντελοποιούνται ως εικονική τροφοδοσία. Το Δίκτυο διανομής εδώ μπορεί να θεωρηθεί ως ένα *spanning tree* (πρόκειται για ένα υπόγραφο ενός γράφου ο οποίος περιέχει όλους τους κόμβους του γράφου χωρίς να εμφανίζει κυκλικές διαδρομές, χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο δυνατό αριθμό ακμών).

- Ο αλγόριθμος *Hill climbing* και η θεωρία γράφων, για τον υπολογισμό μίας δυναμικής διαμόρφωσης μικροδικτύων κατά την διάρκεια της ανάκαμψης μετά από κατάρρευση λειτουργίας του Δικτύου. Η τοπολογία του μικροδικτύου διαμορφώνεται και προσαρμόζεται με βάση την στοχαστικότητα και την διακύμανση που παρατηρείται στις ΑΠΕ και στα φορτία.

Σε αρκετές μεθόδους που αναπτύσσονται για τον σχεδιασμό των μικροδικτύων με βάση την αναζήτηση, λαμβάνεται υπόψη ως σημαντική παράμετρος η αβεβαιότητα της διάρκειας διακοπής λειτουργίας του Δικτύου. Ουσιαστικά γίνεται συνεχής ανανέωση και βελτίωση της στρατηγικής αποκατάστασης που εφαρμόζεται. Σε περίπτωση δυναμικότητας των διαθέσιμων πληροφοριών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του μικροδικτύου, τα νέα

στοιχεία ανατροφοδοτούν το σύστημα υπολογισμού των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό του μικροδικτύου.

- Μαθηματικός προγραμματισμός:

Για τη σχεδίαση μικροδικτύων με μεθόδους που βασίζονται στο μαθηματικό προγραμματισμό, λαμβάνονται υπόψη:

- Τα γραμμικά/μη γραμμικά χαρακτηριστικά του Δικτύου: Γενικά, το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση του μικροδικτύου, χρειάζεται δυαδικές μεταβλητές για να αναπαραστήσει την κατάσταση των διακοπών, των παραγωγών ή των φορτίων (σε λειτουργία/εκτός λειτουργίας). Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ακριβής ροή ισχύος κατά την διάρκεια λειτουργίας του μικροδικτύου είναι μη γραμμική, το μοντέλο θα αναπαρασταθεί από τον τύπο μαθηματικής βελτιστοποίησης (MINLP), το οποίο συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των Mixed integer programming (MIP) και Non linear programming (NLP) αφού το πρόβλημα περιλαμβάνει τόσο ακέραιες όσο και συνεχείς μεταβλητές, όπως επίσης μη γραμμικές συναρτήσεις στην αντικειμενική συνάρτηση ή στους περιορισμούς. Πρόκειται για ένα NP - hard πρόβλημα, δηλαδή θεωρείται ότι η λύση του προβλήματος αυτού είναι δύσκολο να επιλυθεί σύμφωνα με τη θεωρία υπολογισιμότητας και την επιστήμη των υπολογιστών.

- Η εξέταση των περιορισμών της τάσης και της απώλειας ισχύος: Οι περιορισμοί τάσης και η απώλεια ισχύος μπορεί είτε να ληφθούν υπόψη είτε όχι. Αυτό εξαρτάται από τις εξισώσεις ροής ισχύος που έχουν χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο επηρεάζοντας τον μαθηματικό σχεδιασμό και την επιλυσιμότητα του σχεδιαστικού μοντέλου μικροδικτύων.

- Η κλίμακα των δυαδικών μεταβλητών: Στον μικτό ακέραιο προγραμματισμό (MIP), η κλίμακα των δυαδικών μεταβλητών έχει σημαντικό αντίκτυπο στην υπολογιστική αποδοτικότητα. Ο MIP (Mixed Integer Programming) προγραμματισμός είναι ένας τύπος μαθηματικής βελτιστοποίησης που περιλαμβάνει προβλήματα στα οποία ορισμένες μεταβλητές είναι ακέραιες, ενώ άλλες μπορούν να είναι συνεχείς. Αυτή η κατηγορία προβλημάτων επιτρέπει τον συνδυασμό και τη μοντελοποίηση καταστάσεων που απαιτούν διακριτές αποφάσεις μαζί με συνεχείς μεταβλητές. Εάν με  $E$  συμβολίζεται το σύνολο των διακλαδώσεων και με  $V$  το σύνολο των ζυγών του δικτύου διανομής, τότε για το σχεδιασμό μικροδικτύων υπάρχουν τρία είδη δυαδικών μεταβλητών: οι δυαδικές μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν την κατάσταση ανοίγματος/κλεισίματος διακοπών (ή διακλαδώσεων) με συνολικό αριθμό  $|E|$ , οι δυαδικές μεταβλητές που δείχνουν εάν ένας ζυγός (φορτίο) ενεργοποιείται από ένα μικροδίκτυο με συνολικό αριθμό  $|V|$  και οι δυαδικές μεταβλητές που δείχνουν εάν οι ΔΠ ενεργοποιούν μία νησίδα με συνολικό αριθμό ίσο με τον αριθμό των ζυγών που είναι συνδεδεμένοι με ΔΠ. Ο αριθμός των δυαδικών μεταβλητών σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από τον καθορισμό των περιορισμών για τη δομή του μικροδικτύου. Η κλίμακα των δυαδικών μεταβλητών επηρεάζεται επίσης από τις ρυθμίσεις της δυνατότητας ελέγχου φορτίου.

- Δυνατότητα ελέγχου φορτίου: Μια γενική υπόθεση για την μοντελοποίηση του προβλήματος είναι ότι κάθε φορτίο έχει έναν ανεξάρτητο διακόπτη για να ελέγχει εάν το φορτίο συνδέεται με τον ζυγό. Σύμφωνα με αυτήν την υπόθεση, είναι αποδεκτό να θεωρηθεί ότι ο ζυγός βρίσκεται εντός του μικροδικτύου ενώ παράλληλα το φορτίο που είναι συνδεδεμένο σε αυτόν δεν είναι ενεργοποιημένο. Η ισχύς των φορτίων δεν μπορεί να

περιορίζεται συνεχώς. Υπό αυτή την προϋπόθεση, χρειάζονται δυαδικές μεταβλητές για να αναπαραστήσουν την κατάσταση του διακόπτη στη μοντελοποίηση. Σε μελέτη περίπτωσης, ο διακόπτης φορτίου δεν θεωρείται ενεργός και στο φορτίο παρέχεται πλήρης ισχύς μόνο εάν ο ζυγός με τον οποίο συνδέεται βρίσκεται εντός του μικροδικτύου. Σε άλλες μελέτες περίπτωσης, το φορτίο θεωρείται ότι μπορεί να αποκοπεί, δηλαδή η ισχύς του φορτίου μπορεί να περιοριστεί μερικώς ή πλήρως. Στην τελευταία περίπτωση, η δυαδική μεταβλητή ελέγχου για την κατάσταση φορτίου μπορεί να αντικατασταθεί από συνεχείς μεταβλητές κι ο αριθμός των δυαδικών μεταβλητών περιορίζεται. Σύμφωνα με αυτές τις παραδοχές, η δυαδική μεταβλητή δεν χρειάζεται για κάθε φορτίο στη μοντελοποίηση σχεδιασμού μικροδικτύου.

- Άλλες πτυχές: Για παράδειγμα, η εξέταση των γραμμών διασύνδεσης και η τοπολογία του πλέγματος. Λαμβάνοντας υπόψη τις γραμμές που διασυνδέουν τα μικροδίκτυα, αυξάνεται ο αριθμός των υποψηφίων μικροδικτύων, προς επιλογή του βέλτιστου σχεδιασμού. Σε αυτή την περίπτωση, οι ρυθμίσεις σχετικά με τον αριθμό των σχεδιασμένων μικροδικτύων είναι επίσης διαφορετικές, ο αριθμός των μικροδικτύων έχει οριστεί να είναι ίσος με τον αριθμό των ΔΠ, που σημαίνει ότι κάθε ΔΠ ενεργοποιεί ένα μικροδίκτυο ξεχωριστά. Μπορούν επίσης πολλές ΔΠ να ενεργοποιούν ένα μικροδίκτυο συνεργαζόμενες.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ως γενική αρχή για την επανατροφοδότηση των φορτίων σε περίπτωση που εμφανιστεί σφάλμα στην λειτουργία του Δικτύου, ακολουθούνται τα εξής βήματα για την τροφοδότηση των φορτίων από μικροδίκτυα :

- 1) Με την βοήθεια των διακοπών, το σφάλμα απομονώνεται με κατάλληλους χειρισμούς αυτών.
- 2) Γίνεται η τροφοδότηση των φορτίων αρχικά από τον υποσταθμό μέσω των γραμμών.
- 3) Τα φορτία που αδυνατούν να αποκατασταθούν, εφαρμόζοντας τα παραπάνω βήματα, συμπεριλαμβάνονται σε μικροδίκτυα. Σκοπός είναι να αποκατασταθεί η τροφοδότηση όσων περισσότερων φορτίων είναι δυνατό χρησιμοποιώντας ΔΠ.

Κατόπιν της ανάλυσης των μεθόδων αυτών, μπορεί να εξαχθεί εύκολα το συμπέρασμα ότι συνδυασμός αυτών μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερο σχεδιασμό για την βέλτιστη λειτουργία ενός μικροδικτύου.

### Νομικά ζητήματα:

Με την εγκατάσταση μικροδικτύων, προκύπτουν νομοθετικά ζητήματα, τα οποία δεν έχουν ακόμη όλα λυθεί. Ένα τέτοιο θέμα αποτελεί ο καθορισμός των νομικών δικαιωμάτων του ιδιοκτήτη του μικροδικτύου, όπως επίσης και οι υποχρεώσεις του προς τους εξυπηρετούμενους καταναλωτές. Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα αφορά την κατανομή του κόστους λειτουργίας του μικροδικτύου, η οποία θα πρέπει να καθοριστεί σαφώς και με ισότιμο τρόπο, όπως επίσης θα πρέπει να είναι εφικτή η πρόσβαση σε χονδρικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας για την πώληση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας ή άλλων υπηρεσιών [64].

Επίσης, η διαχείριση των μικροδικτύων από ιδιώτες αποτελεί φλέγον ερώτημα, δεδομένου ότι έως τώρα αυτό γινόταν από τον διαχειριστή. Προκειμένου να υπάρχει αυτή η δυνατότητα, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η τιμολόγηση της κιλοβατώρας [12].

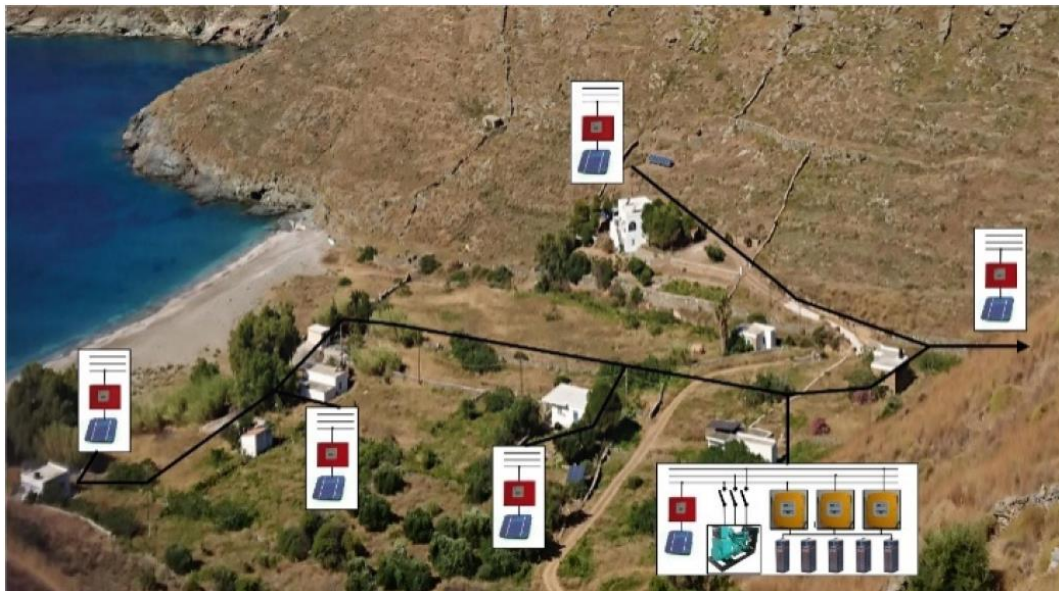


### 2.3.2.1 Παραδείγματα μικροδικτύων στην Ελλάδα

#### Μικροδίκτυο της Κύθνου

Το 2001 στο νησί της Κύθνου σχηματίστηκε το πρώτο μικροδίκτυο στην Ελλάδα, αλλά και στην Ευρώπη. Η Κύθνος αποτελεί ένα από τα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ) με το ηπειρωτικό σύστημα της χώρας. Η τροφοδότηση των φορτίων του εξαρτάται πλήρως από την παραγωγή ενέργειας προερχόμενη από ΑΠΕ (φωτοβολταϊκά συστήματα συνολικής ισχύος 11kWp, 2 αποθηκευτικοί σταθμοί μπαταριών χωρητικότητας 1,000 Ah/48V και 480 Ah/60V). Επιπλέον, έχει εγκατασταθεί τριφασική ντιζελογεννήτρια των 9 kVA ,σε περίπτωση που οι αποθηκευτικοί σταθμοί δεν είναι ικανοί να παρέχουν την απαραίτητη ενέργεια στα φορτία (χαμηλή φόρτιση), λειτουργεί δηλαδή ως εφεδρική μονάδα. Πρόκειται για ένα αυτόνομο ΜΔ.

Εκτός από τα κύρια φωτοβολταϊκά συστήματα των 11kW, έχει εγκατασταθεί και φωτοβολταϊκό σύστημα 2kW, στην οροφή κτηρίου 30m<sup>2</sup> το οποίο στεγάζει το κέντρο ελέγχου του μικροδικτύου και περιλαμβάνει αναστροφείς (inverters) για τις μπαταρίες, τις μπαταρίες, το σύστημα της ντιζελογεννήτριας και την δεξαμενή καυσίμου της, τους υπολογιστές για τον έλεγχο και την παρακολούθηση του μικροδικτύου και τα επικοινωνιακά συστήματα [65].



**Εικόνα 2.22:** Το μικροδίκτυο στο νησί της Κύθνου [61].

Το συγκεκριμένο μικροδίκτυο χρησιμοποιείται για την ηλεκτρική τροφοδότηση 12 εξοχικών κατοικιών. Ελέγχεται μέσω τριφασικού αντιστροφέα (inverter) για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα φορτία, ενώ για την τροφοδότηση των συστημάτων ελέγχου και επικοινωνίας χρησιμοποιείται μονοφασικός αντιστροφέας [61].

Με το μικροδίκτυο της Κύθνου δόθηκε η δυνατότητα να δοκιμαστούν διάφορες τεχνολογίες και να εξαχθούν πολύτιμα συμπεράσματα:

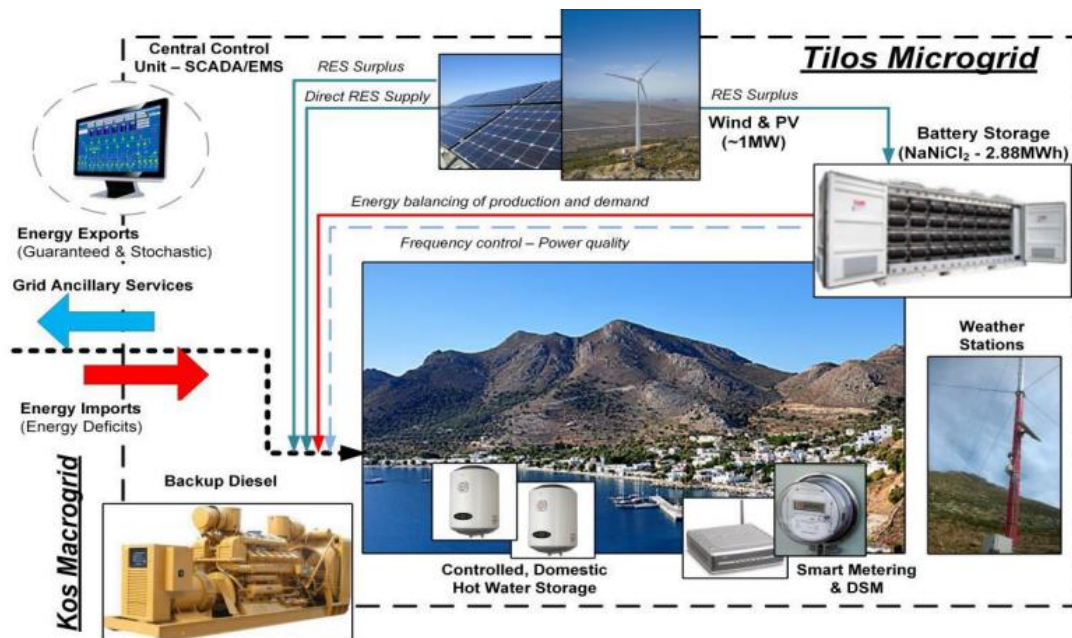
- Τεχνικές διαχείρισης της ενέργειας σε αυτόνομα μικροδίκτυα.
- Διαχείριση φόρτισης συσσωρευτών μέσω μεταβολής χαρακτηριστικών στατισμού (droop) Ενεργού Ισχύος/Συχνότητας (P/f).
- Παραλληλισμός αναστροφέων συσσωρευτών.
- Έξυπνοι ελεγκτές φορτίων.



Υπάρχει, φυσικά, η δυνατότητα να δοκιμαστούν και άλλες τεχνολογίες στο μικροδίκτυο αυτό. Φυσικά με τον σχηματισμό μικροδικτύων και σε άλλα νησιά, η ανάπτυξη τεχνολογιών σχετικών με τα ΜΔ θα γίνει ευκολότερη.

### Μικροδίκτυο της Τήλου

Από το 2015 έχει αρχίσει να αναπτύσσεται ένα νέο ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα (TILOS Project - Horizon 2020 - Eunice ) με το οποίο υλοποιείται ένα έξυπνο μικροδίκτυο στο νησί της Τήλου. Πιο συγκεκριμένα, εκτός από την ανάπτυξη ενός “έξυπνου” μικροδικτύου, σκοπός του ερευνητικού αυτού έργου είναι και η ανάπτυξη και λειτουργία ενός πρωτότυπου υβριδικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελούμενο από συσσωρευτές  $\text{NaNiCl}_2$  (2,8MWh), ανεμογεννήτριες (800 kW) και φωτοβολταϊκούς σταθμούς (160 kWp). Επίσης το σύστημα περιλαμβάνει συστήματα EMS (Energy management system - Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας) και SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition - Σύστημα εποπτικού ελέγχου και ανάκτησης δεδομένων) [66][67]. Το μικροδίκτυο αυτό αποτελεί το πρώτο στην Ευρώπη εν λειτουργία έργο παραγωγής, αποθήκευσης και έξυπνης διαχείρισης ενέργειας από ΑΠΕ [67].



**Εικόνα 2.23:** Το μικροδίκτυο στο νησί της Τήλου [66].

Επιπλέον το πρόγραμμα αυτό περιλαμβάνει την εγκατάσταση “έξυπνων” μετρητών σε όλους τους οικιακούς καταναλωτές, την ανάπτυξη ειδικών εφαρμογών για την διαχείριση της ενέργειας από τον ίδιο τον καταναλωτή αλλά και τον έλεγχο και την επίβλεψη των ενεργειακών πόρων του νησιού από τον διαχειριστή [66].

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η Τήλος συνδέεται ηλεκτρικά με τα νησιά της Κω και της Καλύμνου χρησιμοποιώντας υποθαλάσσια καλώδια. Με αυτόν τον τρόπο επωφελούνται ενεργειακά από το έργο της Τήλου και τα νησιά τα οποία είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα με αυτήν, με την εξαγωγή περίσσειας ενέργειας.

Η υλοποίηση όλων αυτών των έργων που προτείνονται στο πρόγραμμα TILOS έχει την δυνατότητα να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του νησιού σε μεγάλο βαθμό. Πέραν αυτού, το μικροδίκτυο αυτό συμβάλλει:

- στην προστασία του περιβάλλοντος, με την μείωση της καύσης των υδρογονανθράκων και τον περιορισμό των εκπομπών CO<sub>2</sub> για την παραγωγή ενέργειας. Το νησί δεν εξαρτάται πλέον από το πετρέλαιο για τις ενεργειακές του ανάγκες, πετυχαίνοντας μείωση της κατανάλωσης πετρελαίου σε ποσοστό 70% - 75% ετησίως
- στην αύξηση του δυναμικού & της διείσδυσης των ΑΠΕ, με το υψηλό ηλιακό και αιολικό δυναμικό
- στην εξοικονόμηση τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και σε οικονομικό επίπεδο με την χρήση συστημάτων αποθήκευσης, “έξυπνων” μετρητών και συστημάτων διαχείρισης ενέργειας όσο και σε οικονομικό επίπεδο
- στην εισαγωγή νέων τεχνολογιών όπως η ηλεκτροκίνηση, χρησιμοποιώντας την περίσσεια ενέργεια για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων για τοπικές μεταφορές
- στην ενεργειακή ασφάλεια και αυτονομία των καταναλωτών του νησιού

Το έργο αυτό, εκτός των σημαντικών οφελών που περιγράφηκαν παραπάνω, έχει λάβει και διακρίσεις, κερδίζοντας 4 βραβεία κατά την διάρκεια λειτουργίας του.



**Εικόνα 2.24:** Τα βραβεία του έργου του προγράμματος TILOS [66].

Ο μελλοντικός στόχος με την ανάπτυξη του συγκεκριμένου προγράμματος είναι η εφαρμογή και η υλοποίηση παρόμοιων έργων και σε άλλα νησιά (ελληνικά και μη). Μάλιστα, ήδη έχουν αρχίσει έργα για την ανάπτυξη υβριδικών σταθμών στις νήσους Ανάφη, Δονούσα, Λέρο Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου και στους Φούρνους Κορσεών Περιφέρειας Βορείου Αιγαίου, συνολικής εγγυημένης ισχύος 2,5 MW [68].

### Αστυπάλαια

Το 2020 εγκαινιάστηκε το πρόγραμμα “Astypalea Smart and Sustainable Island (ASSI)” (Αστυπάλαια Έξυπνο και αειφόρο νησί). Το πρόγραμμα αυτό ξεκίνησε με την συνεργασία του Δήμου Αστυπάλαιας, του ελληνικού Δημοσίου και του ομίλου Volkswagen, με κύρια κατεύθυνση να είναι η αλλαγή του συστήματος μεταφορών του νησιού, χρησιμοποιώντας ηλεκτροκίνητα οχήματα που θα συμβάλλουν στην πλήρη απανθρακοποίηση μέχρι το 2050.

Στα πλαίσια του προγράμματος αυτού, πρόκειται να εγκατασταθεί υβριδικός σταθμός ΑΠΕ, έργο που ανέλαβε εταιρεία μετά από διαγωνιστικές διαδικασίες το 2023. Στόχος είναι η χρήση

καθαρής ενέργειας για την φόρτιση των οχημάτων αλλά και για τις ενεργειακές ανάγκες των κατοίκων της Αστυπάλαιας. Το συγκεκριμένο έργο περιλαμβάνει αρχικά την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού σταθμού 3,5 MW και μπαταριών 10 MWh. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να καλυφθεί το 61,2% της ζήτησης του νησιού σε ηλεκτρική ενέργεια [69]. Σε δεύτερη φάση (μέχρι το 2026) πιθανώς θα προστεθεί μια και μόνο ανεμογεννήτρια μεσαίου μεγέθους, που θα οδηγήσει σε κάλυψη άνω του 80% της συνολικής ενεργειακής ζήτησης [70].



**Εικόνα 2.25:** Τα σχέδια του προγράμματος ASSI για την δημιουργία ενός μικροδικτύου στην Αστυπάλαια [71].

### Άγιος Ευστράτιος

Το μικρό αυτό νησί των 270 κατοίκων, βρίσκεται ανάμεσα από την Λήμνο, την Λέσβο και την Σκύρο σε μεγάλη όμως απόσταση από αυτά. Αποτελεί επομένως ένα απομονωμένο νησί τόσο γεωγραφικά όσο και ενεργειακά μιας και δεν είναι συνδεδεμένο με κανένα άλλο δίκτυο ενέργειας. Μέχρι πρότινος, οι ενεργειακές ανάγκες του νησιού καλύπτονταν από μονάδα καύσης πετρελαίου.

Στα πλαίσια ενός πιλοτικού/ερευνητικού προγράμματος με τίτλο: «Υβριδικό Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής και Θερμικής Ενέργειας από ΑΠΕ στο Νησί του Αγ. Ευστρατίου», το νησί γίνεται ενεργειακά αυτόνομο. Με το πρόγραμμα αυτό πρόκειται να εγκατασταθεί ένας αιολικός σταθμός εγκατεστημένης ισχύος 0,9 MW, ένας φωτοβολταϊκός σταθμός μέγιστης ισχύος παραγωγής 0,2268 MW, συσσωρευτές αποθηκευτικής ικανότητας 2,56 MWh, σταθμός για την παραγωγή θερμικής ενέργειας και δίκτυο διανομής και προμήθειας ενέργειας. Το έργο πρόκειται να τεθεί σε λειτουργία εντός του 2024.

Το έργο φέρει Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης και Ελέγχου που θα ελέγχει την παραγωγή της ενέργειας από τον σταθμό. Μάλιστα η πλεονάζουσα παραγόμενη ενέργεια θα μπορεί να αξιοποιείται αποτελεσματικά από το φορτίο του συστήματος τηλεθέρμανσης που επίσης θα εγκατασταθεί για την εξυπηρέτηση των αναγκών των κατοίκων του νησιού. Το σύστημα τηλεθέρμανσης θα περιλαμβάνει κεντρικές μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης θερμότητας (δεξαμενές θερμού νερού), καθώς και το δίκτυο διανομής της θερμικής ενέργειας στους τελικούς καταναλωτές [72][73].



**Εικόνα 2.26:** Ο Υβριδικός σταθμός στο νησί του Αγίου Ευστρατίου [73].

### 2.3.3 Τεχνητή νοημοσύνη

Ο όρος της τεχνητής νοημοσύνης (TN) αναφέρεται στις μηχανές εκείνες που έχουν την δυνατότητα πληθώρας ενεργειών όπως να αναγνωρίζουν αντικείμενα και συμπεριφορές, να λαμβάνουν αποφάσεις, να μαθαίνουν από προηγούμενες εμπειρίες ή να διορθώνουν τα λάθη τους. Κατά μία έννοια, οι μηχανές αυτές μιμούνται στοιχεία της ανθρώπινης συμπεριφοράς. Οι μηχανές τεχνητής νοημοσύνης, σε αντίθεση με τις κοινές μηχανές, αναπτύσσουν στοιχεία συλλογιστικής και προσαρμογής στο περιβάλλον, μπορούν δηλαδή να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα που καλούνται να λύσουν χρησιμοποιώντας δεδομένα που εξήγαγαν σε προηγούμενο χρόνο από παρόμοια προβλήματα που έλυσαν. Μπορούν να αναγνωρίζουν ίδια μοτίβα και να εφαρμόζουν γνωστές σε αυτούς τεχνικές επίλυσης σε προβλήματα που τους θέτονται για να λύσουν [74].

Ο ρόλος της TN γίνεται ολοένα και πιο σημαντικός σε τομείς όπως η υγεία, η εκπαίδευση, η βιομηχανία, αλλά και στην καθημερινή ζωή. Με την σταδιακή μετατροπή των Δικτύων σε «έξυπνα» Δίκτυα φαίνεται πως γίνεται πιο εύκολο να αναπτυχθούν εφαρμογές TN και για την διαχείριση των Δικτύων, ενισχύοντας έτσι και την ανθεκτικότητά τους.

Προτού αναλυθούν οι τρόποι με τους οποίους η TN μπορεί να βοηθήσει στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των Δικτύων Διανομής, είναι χρήσιμο να αναφερθούν και να εξηγηθούν πρώτα μερικές εισαγωγικές έννοιες, για την καλύτερη κατανόηση της συμβολής αυτής στον έλεγχο και τη λειτουργία των Δικτύων Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Η τεχνητή νοημοσύνη αποτελεί έναν διαρκώς αναπτυσσόμενο κλάδο της επιστήμης των υπολογιστών. Πρόκειται για ένα σύνολο μεθοδολογιών και τεχνικών τα οποία συνθέτουν μαζί ένα σύστημα ή μία μηχανή με πολλές δυνατότητες. Μπορεί να χωριστεί σε υποκατηγορίες, κάθε μία από τις οποίες εστιάζει σε διαφορετικές πτυχές της τεχνολογίας αυτής:

1. Μηχανική μάθηση (Machine Learning): αποτελεί μία υποκατηγορία της τεχνητής νοημοσύνης, η οποία επιτρέπει σε μία μηχανή να μαθαίνει μέσω της ανάλυσης δεδομένων και εμπειριών αναπτύσσοντας αλγορίθμους και να κάνει προβλέψεις βάσει αυτών, χωρίς να είναι ρητά προγραμματισμένη. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω μεθόδων εποπτευόμενης μάθησης (supervised learning) ή μη εποπτευόμενης μάθησης (unsupervised learning) [75].

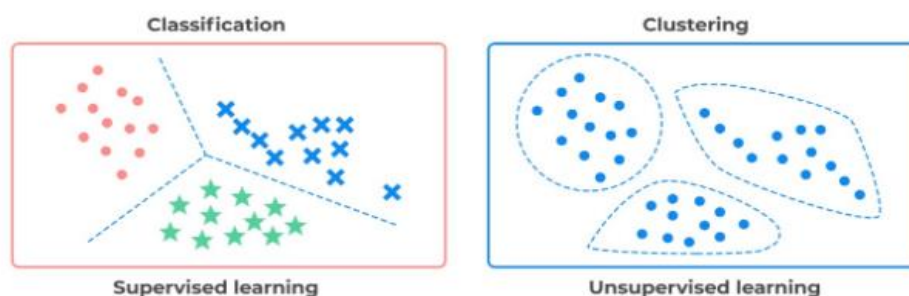


2. Βαθιά μάθηση (Deep learning): αποτελεί υποσύνολο της μηχανικής μάθησης. Επεξεργάζεται πιο σύνθετα και μεγαλύτερα σύνολα δεδομένων χρησιμοποιώντας τα πολυεπίπεδα νευρωνικά δίκτυα για την λήψη αποφάσεων και την εκμάθηση προτύπων, χωρίς τη χρήση αλγορίθμων [76].
3. Επεξεργασία φυσικής γλώσσας (Natural Language Processing - NLP): Πρόκειται για την ανάπτυξη αλληλεπιδράσεων μεταξύ υπολογιστών και ανθρώπινης γλώσσας. Με τον τρόπο αυτό, οι υπολογιστές έχουν τη δυνατότητα προγραμματισμού για την επεξεργασία και την ανάλυση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων φυσικής γλώσσας [77]
4. Υπολογιστική όραση (Computer vision): επιτρέπει στους υπολογιστές να αντλούν βασικές πληροφορίες από διάφορες πηγές, όπως ψηφιακές εικόνες και βίντεο [78]
5. Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks): πρόκειται για επίπεδα διασυνδεδεμένων νευρώνων, στόχος των οποίων είναι η επίλυση κάποιου υπολογιστικού προβλήματος μετά την επεξεργασία πληροφοριών. Μπορούν να εκπαιδευτούν σε μεγάλα σύνολα δεδομένων και να μοντελοποιήσουν περίπλοκες σχέσεις μεταξύ δεδομένων εισόδου και εξόδου, εξαγάγοντας συμπεράσματα και κάνοντας διάφορες γενικεύσεις. Τα δίκτυα αυτά προσπαθούν να μιμηθούν τους νευρώνες ενός ανθρώπινου εγκεφάλου [79]
6. Ρομποτική (Robotics): τομέας της τεχνολογίας με συστήματα ΤΝ, τα οποία χρησιμοποιούνται για να ελέγχουν φυσικά αντικείμενα. Μπορούν να αναπτυχθούν με εποπτευόμενη ή μη εποπτευόμενη μάθηση. Για την υλοποίηση τους συνδυάζονται διάφοροι τομείς εκτός της ΤΝ, όπως η ηλεκτρονική και η μηχανολογία [80]

Όλες οι αναφερόμενες κατηγορίες μπορούν να συνδυαστούν, προκειμένου να αναπτυχθούν συστήματα ικανά να προσφέρουν λύσεις σε προβλήματα αυξημένης πολυπλοκότητας επίλυσης.

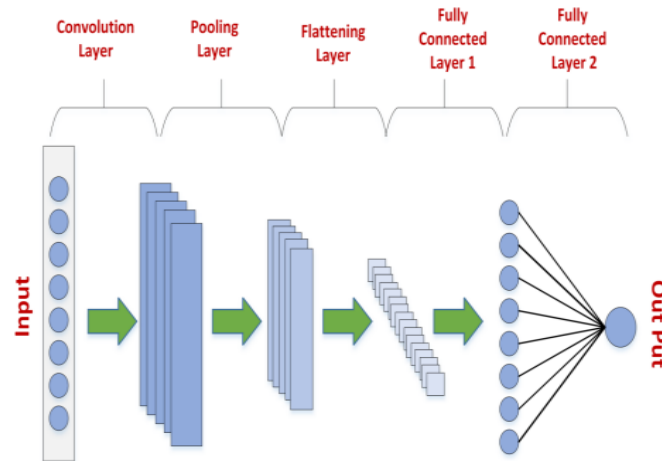
Συμπληρωματικά, ακολουθεί περιγραφή εννοιών σχετικών με την ΤΝ, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως:

- Επιβλεπόμενη μάθηση (supervised learning): διαδικασία βασισμένη στην μηχανική μάθηση, στην οποία ο αλγόριθμος κατασκευάζει μια συνάρτηση που απεικονίζει δεδομένες εισόδους (σύνολο εκπαίδευσης) σε γνωστές επιθυμητές εξόδους, με απώτερο στόχο τη γενίκευση της συνάρτησης αυτής και για τις περιπτώσεις εισόδων με άγνωστη έξοδο. [81]. *Με την διαδικασία αυτή εκπαιδεύεται ένα νευρωνικό δίκτυο.* Είναι κατάλληλη για τον εντοπισμό βλαβών και την ταξινόμηση τους ανάλογα με το μέγεθος της ζημίας.
- Μη επιβλεπόμενη μάθηση (unsupervised learning): διαδικασία στην οποία ο αλγόριθμος κατασκευάζει ένα μοντέλο για συγκεκριμένο σύνολο εισόδων, υπό μορφή παρατηρήσεων, χωρίς να γνωρίζει τις επιθυμητές εξόδους. [81]. Συνεισφέρει στη λήψη αποφάσεων σε στοχαστικά φαινόμενα (καιρικά φαινόμενα, σεισμοί, κυβερνοεπιθέσεις κλπ.) αναγνωρίζοντας παρόμοια μοτίβα στα δεδομένα που λαμβάνουν ως είσοδο στο σύστημα τους.



**Εικόνα 2.27:** Οι διαδικασίες της επιβλεπόμενης και της μη επιβλεπόμενης μάθησης [82].

- Συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks - CNNs) είναι ένα συγκεκριμένο είδος νευρωνικού σχεδιασμού δικτύου για την αναγνώριση και την ταξινόμηση εικόνων και σημάτων και για την αναγνώριση φωνής. Χρησιμοποιούν αρχές της γραμμικής άλγεβρας για την εξαγωγή χαρακτηριστικών και μοτίβων [79]. Η βασική ιδέα πίσω από τα CNN είναι ότι χρησιμοποιούν στρώματα τα οποία φέρουν βάρη και συνδυάζονται με τα δεδομένα εισόδου [83].



**Εικόνα 2.28:** Η δομή ενός συνελικτικού νευρωνικού δικτύου [83].

- Μεγάλο γλωσσικό μοντέλο (Large Language Models - LLM): αποτελεί ένα γλωσσικό μοντέλο ΤΝ που χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές βαθιάς μάθησης, έτσι ώστε να παραχθεί κείμενο σε μορφή που προσομοιάζει στην ανθρώπινη ομιλία. Αυτό γίνεται με την συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων από διάφορες πηγές, όπως άρθρα και βιβλία, τα οποία στην συνέχεια υποβάλλονται σε προεπεξεργασία, μετατρέπουν δηλαδή το κείμενο σε αριθμητική αναπαράσταση που μπορεί να γίνει κατανοητή από αλγόριθμους μηχανικής μάθησης [84].

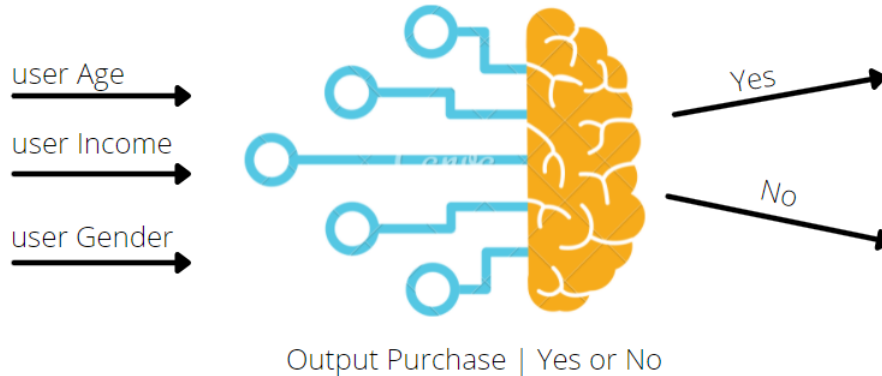


**Εικόνα 2.29:** Οι λειτουργίες του μοντέλου LLM [85].

- Λογιστική Παλινδρόμηση (Logistic regression): μέθοδος με την οποία επιτυγχάνεται η ταξινόμηση τιμών μίας μεταβλητής, βασιζόμενη στην θεωρία των πιθανοτήτων. Συνήθως έχει δυαδικό χαρακτήρα, δηλαδή η μέθοδος εφαρμόζεται παίρνοντας ως παραμέτρους δύο

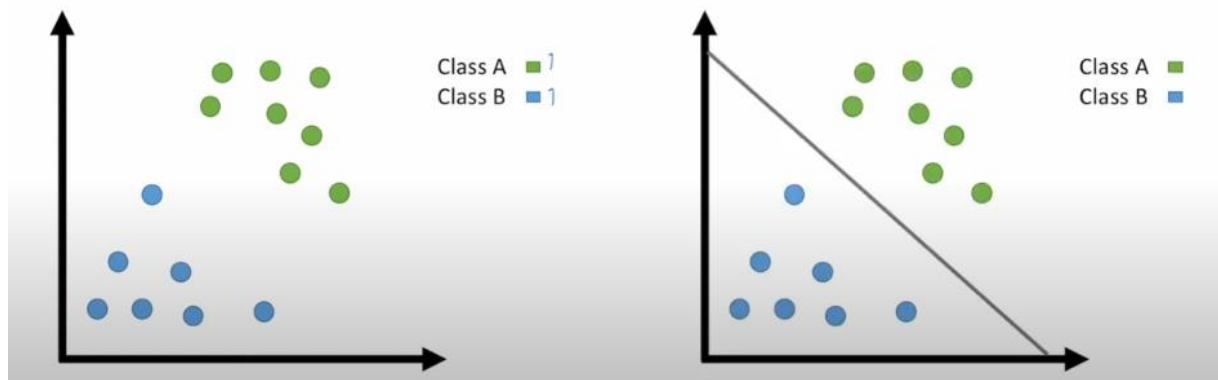
μεταβλητές. Η πιθανότητα εμφάνισης μίας μεταβλητής κυμαίνεται από 0 έως 1, με το 0 να εκφράζει την μειωμένη πιθανότητα, ενώ το 1 εκφράζει την αυξημένη πιθανότητα [86].

## Logistic Regression



**Εικόνα 2.30:** Απεικόνιση λειτουργίας της μεθόδου της λογιστικής παλινδρόμησης [86].

- Μηχανή διανυσμάτων στήριξης (Support vector machine - SVM):** σύνολο εποπτευόμενων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης μέσω των οποίων αναπτύσσεται ένα μοντέλο πρόβλεψης που εκπαιδεύεται με ιστορικά και τεχνητά δεδομένα από καταστροφές του Δικτύου που σχετίζονται με ακραία καιρικά φαινόμενα. Αποτελεί μία μέθοδο η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για ταξινόμηση δεδομένων σε κλάσεις, δημιουργώντας ένα νοητό σύνορο μεταξύ των δύο κλάσεων όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.30. Με αυτόν τον τρόπο, καινούρια δεδομένα μπορούν να προβλεφθούν σε ποια κλάση θα ανήκουν σύμφωνα με το σύνορο που έχει οριστεί ανάμεσα στις δύο κλάσεις. Η αποδοτικότητα της μεθόδου εξαρτάται από το μέγεθος του κενού χώρου μεταξύ στοιχείων των διαφορετικών κλάσεων, δηλαδή από το μέγεθος του κενού χώρου που περιβάλλει το σύνορο που διαχωρίζει τις κλάσεις [75].



**Εικόνα 2.31:** Δισδιάστατη απεικόνιση ενός SVM [87].

### 2.3.3.1 Εφαρμογές μεθόδων TN

Ακολουθεί επισκόπηση των βασικών μεθόδων της TN που μπορούν να εφαρμοστούν στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας. Οι εφαρμογές αυτές αναπτύχθηκαν κυρίως στηριζόμενες στις αρχές της μηχανικής μάθησης.



### Εφαρμογές ΤΝ για την πρόβλεψη διακοπών ηλεκτροδότησης

Θεωρούμε δύο καταστάσεις για την λειτουργία των στοιχείων του δικτύου: 1. Κατεστραμμένο και 2. Λειτουργικό, τις οποίες χρησιμοποιούμε για την πρόβλεψη τυχόν διακοπών ηλεκτροδότησης στο Δίκτυο. Οι αποφάσεις σχετικά με την λειτουργικότητα των στοιχείων του Δικτύου, στις περιπτώσεις των ακραίων καιρικών φαινομένων, γίνονται βάσει παραμέτρων όπως της σφοδρότητας του φαινομένου, αλλά και της απόστασης μεταξύ έκαστου στοιχείου του Δικτύου από το σημείο ή την περιοχή εκδήλωσης του φαινομένου.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των διακοπών αυτών είναι η λογιστική παλινδρόμηση (logistic regression) και οι μηχανές διανυσμάτων στήριξης (support vector machines) [75]. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του ορίου απόφασης μέσω μίας πολυώνυμης εξίσωσης, η οποία εξάγεται βάσει των παραμέτρων που ορίζονται ως παράγοντες λειτουργικότητας ή μη των στοιχείων του Δικτύου (π.χ. η σφοδρότητα του φαινομένου και η απόσταση του από το Δίκτυο). Η δεύτερη μέθοδος είναι πιο αποδοτική, αν αναλογιστεί κανείς ότι χρειάζεται λιγότερα δεδομένα εισόδου για να εξάγει ικανά αποτελέσματα σε σύγκριση με την μέθοδο που βασίζεται στο logistic regression [75].

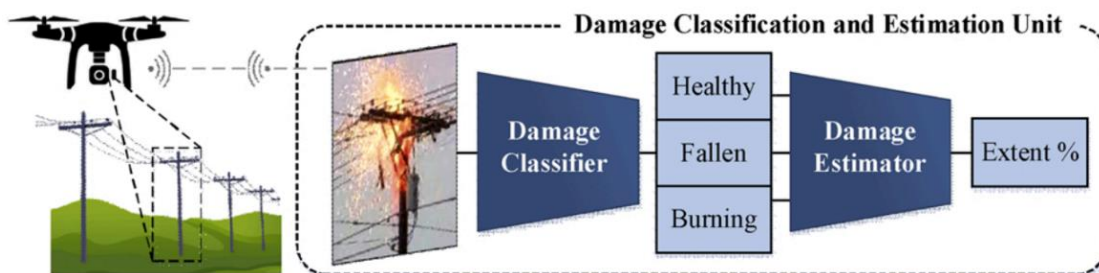
### Εφαρμογές στην ανίχνευση ζημιών στο Δίκτυο

Η επιθεώρηση του ηλεκτρικού δικτύου διανομής αποτελεί βασική και τακτική επαναλαμβανόμενη διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει τον έλεγχο και την καταγραφή των στοιχείων εκείνων των υποδομών που χρήζουν συντήρησης. Στόχος αυτής είναι ο εντοπισμός και η διόρθωση προβλημάτων προς αποφυγή πρόκλησης σοβαρών βλαβών ή διακοπών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, για την εξασφάλιση της ασφαλούς, αδιάλειπτης και αξιόπιστης λειτουργίας του δικτύου.

Η επιθεώρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους, όπως:

- **Οπτική παρατήρηση:** Έλεγχος των γραμμών και των εξαρτημάτων για εμφανή σημάδια φθοράς ή ζημιάς.
- **Θερμογραφία:** Χρήση θερμογραφικών καμερών για τον εντοπισμό υπερθέρμανσης σε εξαρτήματα (κυρίως σημεία σύνδεσης) που μπορεί να μην είναι ορατά με γυμνό μάτι.

Τα τελευταία χρόνια η επιθεώρηση και η λήψη των φωτογραφιών γίνεται με τη χρήση μη επανδρωμένων ιπτάμενων σκαφών (drone), ιδιαίτερα σε τμήματα δικτύου με δυσκολία πρόσβασης με τα πόδια. Η ΤΝ μπορεί να επιταχύνει ακόμη περισσότερο αυτή την διαδικασία, ταξινομώντας τις εικόνες του Δικτύου σε κατηγορίες ανάλογα με το ποσοστό της ζημιάς που έχει γίνει σε αυτά και ανάλογα με τα τμήματα του Δικτύου που έχουν πληγεί. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει καλύτερη οργάνωση και επιτάχυνση του χρόνου αποκατάστασης του Δικτύου.



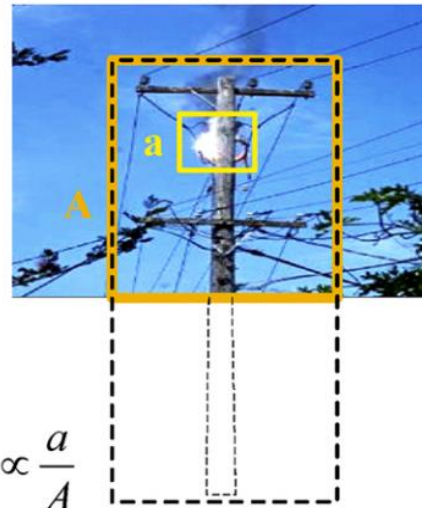
**Εικόνα 2.32:** Ταξινόμηση φωτογραφιών από εφαρμογή ΤΝ [88].

Για την ταξινόμηση των φωτογραφιών βάσει των ευρημάτων ζημιάς και την εκτίμηση του μεγέθους αυτής, χρησιμοποιούνται τα συνελκτικά νευρωνικά Δίκτυα (Convolutional Neural Networks - CNNs). Για την εκπαίδευση των δικτύων αυτών, προκειμένου να εκτιμούν σωστά την έκταση της ζημιάς στο Δίκτυο, εισάγονται στο σύστημα του εικόνες επισημασμένες με κάποιο κριτήριο σύμφωνα με το οποίο θα γίνει η ταξινόμηση τους. Για παράδειγμα στην Εικόνα 2.33 απεικονίζεται ένας κατεστραμμένος στύλος Μέσης Τάσης λόγω ενός τροχαίου ατυχήματος και στην Εικόνα 2.34, ένας καμμένος στύλος Μέσης Τάσης. Στην πρώτη περίπτωση το μέγεθος της ζημιάς μπορεί να εκτιμηθεί από την γωνία κλίσης του κατεστραμμένου στύλου σε σχέση με έναν νοητό κάθετο άξονα στο έδαφος. Για την δεύτερη περίπτωση, το μέγεθος της ζημιάς μπορεί να υπολογιστεί έχοντας ως παράμετρο το μέγεθος της καμένης περιοχής γύρω από τον στύλο. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες τοποθετημένοι στους στύλους. Οι μέθοδοι επεξεργασίας εικόνων όπως επίσης κι ένα ενισχυμένο σύνολο δεδομένων εικόνων ειδικά συλλεγμένο για αυτό τον σκοπό, είναι σημαντικά εργαλεία για την καλύτερη αποδοτικότητα και ακρίβεια στον εντοπισμό διαφόρων τύπων ζημιάς στο Δίκτυο [88].



$$\text{Damage} \propto \theta$$

**Εικόνα 2.33:** Κατεστραμμένος στύλος Μέσης Τάσης. Το μέγεθος της ζημιάς υπολογίζεται από εφαρμογή TN μέσω της γωνίας κλίσης του στύλου [88].



$$\text{Damage} \propto \frac{a}{A}$$

**Εικόνα 2.34:** Καμμένος στύλος Μέσης Τάσης. Το μέγεθος της ζημιάς υπολογίζεται από εφαρμογή TN, ανάλογα με την καμμένη περιοχή του στύλου [88].

### Εφαρμογές για την ανίχνευση επιθέσεων στον κυβερνοχώρο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, εκτός από τις φυσικές βλάβες του Δικτύου, μεγάλη απειλή αποτελεί σήμερα και αυτή των επιθέσεων στον κυβερνοχώρο, καθώς τα τηλεπικοινωνιακά και ψηφιακά συστήματα χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στην διαχείριση των δικτύων. Ένας τρόπος με τον οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί μία επίθεση στον κυβερνοχώρο που διαχειρίζεται τα ΔΔ είναι η έγχυση ψευδών δεδομένων (False data injection - FDI), κατά την οποία οι χάκερ παραποιούν τα δεδομένα που φέρει το σύστημα διαχείρισης (όσον αφορά τις μετρήσεις, τις καταστάσεις των διακοπών του Δικτύου κ.α.).

Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι που συγκρίνουν τις μετρήσεις αισθητήρων με προβλεπόμενες τιμές για τον εντοπισμό τυχόν πλαστών σημάτων τάσης και ρεύματος. Πέραν αυτού, φαίνεται πως οι επιθέσεις στον κυβερνοχώρο εμφανίζουν σε κάποιο βαθμό παρόμοια χαρακτηριστικά. Υπό αυτήν την συνθήκη είναι δυνατόν με την χρήση νευρωνικών δικτύων οι

επιθέσεις αυτές να ταξινομηθούν ανάλογα με την επικινδυνότητα στην οποία θέτουν το Δίκτυο [88].

#### Εφαρμογές για την ανίχνευση στοχαστικών φαινομένων

Τα ακραία καιρικά φαινόμενα, οι επιθέσεις στον κυβερνοχώρο, οι σεισμοί κλπ. μπορούν να θεωρηθούν στοχαστικές διαδικασίες, από την άποψη ότι μπορούν να προκύψουν σε απρόβλεπτες στιγμές, καθώς επίσης και για το λόγο ότι μετά την εκδήλωσή τους η ένταση και η σφοδρότητα τους, αλλά ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να επηρεάσουν ένα Δίκτυο, αποτελούν αβέβαιες παραμέτρους. Πέραν αυτού, το ίδιο το Δίκτυο παρουσιάζει στοχαστικότητα όσον αφορά την αντοχή του εξοπλισμού του. Υπό αυτές τις ακραίες συνθήκες, ο διαχειριστής του Δικτύου καλείται να αποφασίσει για προληπτικές διακοπές και να διαχειριστεί σωστά τα ενεργειακά αποθέματα - που πιθανώς να είναι περιορισμένα σε τέτοιες περιπτώσεις - προκειμένου να αντιμετωπίσει τα ακραία φαινόμενα.

Ορισμένοι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν με βάση μεθόδους μη εποπτευόμενης βαθιάς μάθησης, έχουν αποδειχτεί αποτελεσματικοί βρίσκοντας τις βέλτιστες λύσεις σε τέτοιες περιπτώσεις. Οι αλγόριθμοι αυτοί βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα ή δεδομένα που προέκυψαν μέσω προσομοιώσεων παρόμοιων καταστάσεων και συνδυάζουν παρόμοια μοτίβα. Συνήθως οι μέθοδοι που αναπτύσσονται βασίζονται σε έναν αλγόριθμο αναζήτησης για την εύρεση των καταλληλότερων τακτικών για την αντιμετώπιση των φαινομένων όπως επίσης και σε έναν αλγόριθμο ο οποίος αξιολογεί τους τρόπους αντιμετώπισης έτσι ώστε να επιλεγεί ο καλύτερος δυνατός.

Ένα παράδειγμα αλγορίθμου αναζήτησης που αναπτύσσεται βάσει μεθόδων μη εποπτευόμενης βαθιάς μάθησης (unsupervised deep learning) είναι το δένδρο αναζήτησης Monte Carlo (Monte Carlo Tree Search - MCTS). Το MCTS λειτουργεί δημιουργώντας ένα δέντρο αναζήτησης σταδιακά, χρησιμοποιώντας τυχαία δειγματοληψία για την προσομοίωση πιθανών μελλοντικών καταστάσεων. Αυτή η προσέγγιση του επιτρέπει να λαμβάνει αποφάσεις με βάση τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων, βελτιώνοντας τη στρατηγική του καθώς συλλέγονται περισσότερες πληροφορίες [89].

Ένα ακόμη παράδειγμα αλγορίθμου αναζήτησης που αναπτύσσεται βάσει μεθόδων μη εποπτευόμενης βαθιάς μάθησης (unsupervised deep learning) είναι ο «άπληστος» αλγόριθμος (greedy search algorithm), με την εφαρμογή του οποίου ένα πρόβλημα επιλύεται επιλέγοντας την καλύτερη διαθέσιμη επιλογή κάθε φορά, χωρίς να είναι απαραίτητο ότι αυτή η επιλογή θα φέρει το συνολικό βέλτιστο αποτέλεσμα. Οι συνέπειες αυτών των αποφάσεων στο μέλλον δεν λαμβάνονται υπ' όψη από τον αλγόριθμο, αλλά έχει αποδειχτεί ικανοποιητικός για αρκετά προβλήματα [88][90].

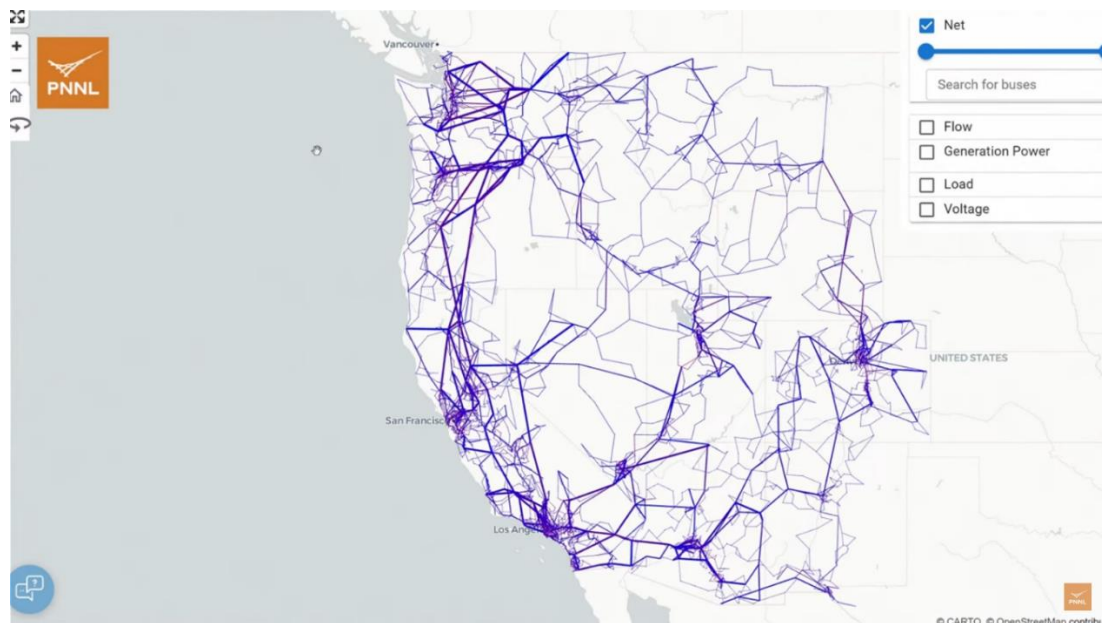
#### Εφαρμογές για την εξασφάλιση του ισοζυγίου παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας

Η ολοένα και αυξανόμενη εισχώρηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο Δίκτυο δυσκολεύει την πρόβλεψη της συνολικής παραγωγής ενέργειας προκειμένου να υπάρχει εξισορρόπηση μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πιθανότητα πρόκλησης προβλημάτων λόγω της υπερπαραγωγής ή της ανεπάρκειας ενέργειας. Για τον λόγο αυτό, οι διαχειριστές των ΔΔ παρακολουθούν συνεχώς την ροή της ενέργειας, έτσι ώστε να λαμβάνουν τις κατάλληλες αποφάσεις όταν το απαιτούν οι συνθήκες (π.χ. περικοπές ισχύος, διακοπή της ροής ισχύος λόγω βλαβών κ.α.) [91]. Ωστόσο, τα μέσα που διατίθενται για την παρακολούθηση της ροής ενέργειας συνήθως δεν είναι τόσο

αποδοτικά και εύκολα στην χρήση, με αποτέλεσμα οι αποφάσεις να λαμβάνονται με καθυστέρηση, χωρίς να αποτελούν έτσι τις βέλτιστες δυνατές [81][92].

Τεχνικές βασισμένες στην ΤΝ μπορούν να βοηθήσουν, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η πρόβλεψη τόσο του φορτίου που αναμένεται να καλυφθεί σε μελλοντικό χρόνο, όσο και της παραγωγής που είναι δυνατή να διανεμηθεί στα φορτία [90]. Με τον τρόπο αυτό απλοποιείται η διαδικασία παρακολούθησης του Δικτύου και λήψης αποφάσεων για την ορθή λειτουργία του.

Ο Shrirang Abhyankar, ερευνητής βελτιστοποίησης και μοντελοποίησης δικτύων στο Εθνικό Εργαστήριο Βορειοδυτικού Ειρηνικού (- PNNL), και ο πρώην ασκούμενος του PNNL, Sichen Jin, σχεδίασαν ένα πρόγραμμα εμπνευσμένο από παρόμοια εργαλεία ΤΝ, το chatgrid. Με το πρόγραμμα αυτό, ο διαχειριστής έχει την δυνατότητα να θέτει ερωτήσεις σχετικά με την κατάσταση του Δικτύου κι αυτό να παρέχει τις απαντήσεις μέσω διαγραμμάτων και εικόνων, τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις του ερωτηθέντα για να λάβει μία όσο το δυνατόν σαφέστερη και ολοκληρωμένη απάντηση.



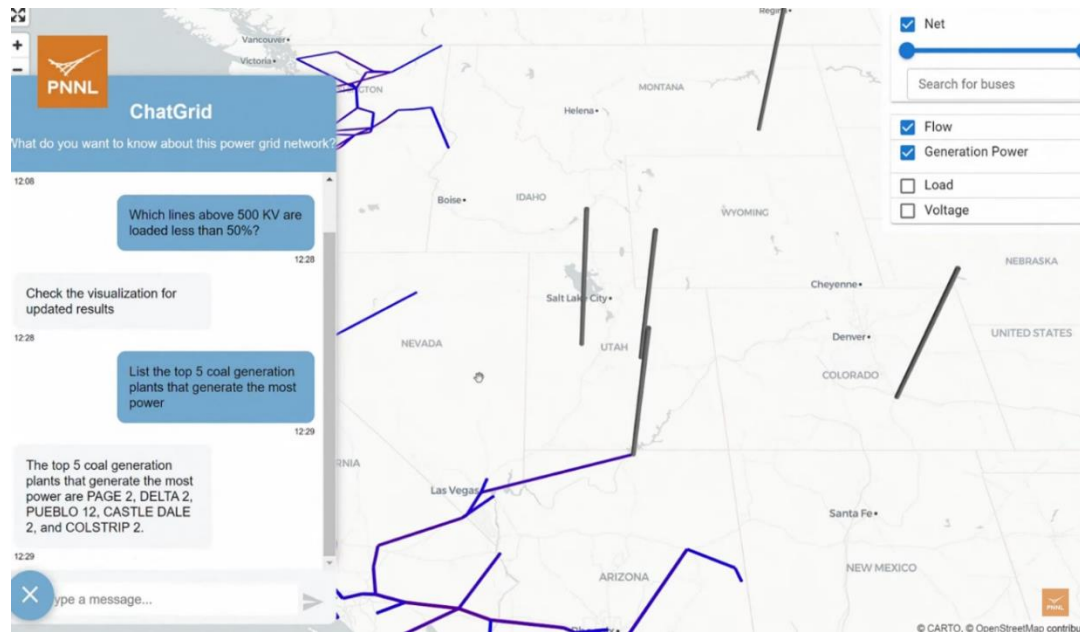
**Εικόνα 2.35:** Το περιβάλλον του προγράμματος ChatGrid [93].

Ουσιαστικά, η λειτουργία του προγράμματος βασίζεται σε ένα γλωσσικό μοντέλο, το «μεγάλο γλωσσικό μοντέλο» (**Large Language Model – LLM**), και στο ExaGO (Exascale Grid Optimization Toolkit). Το LLM επιτρέπει στο ChatGrid να δίνει απαντήσεις σε ερωτήσεις που του θέτονται αξιοποιώντας τα στοιχεία που υπάρχουν σε αυτή τη βάση δεδομένων, αντί να τα αναζητούν σε ανοιχτές πηγές οι οποίες θα μπορούσαν εύκολα να προσβληθούν από κακόβουλα λογισμικά. Το ExaGO μπορεί να προσομοιώνει δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, δίνοντας την δυνατότητα στους διαχειριστές να ελέγχουν τις διαταραχές που πιθανώς προκύπτουν [94][95].

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα δεδομένα που λαμβάνονται από κάθε εθνικό Δίκτυο είναι κρίσιμα και απόρρητα, επομένως είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι με την χρήση του προγράμματος αυτού, τα δεδομένα αυτά θα συνεχίσουν να είναι ασφαλή. Γι' αυτόν τον λόγο τα δεδομένα συγκεντρώνονται σε εσωτερική βάση δεδομένων. Οι απαντήσεις που προτείνει το ChatGrid προέρχονται από αυτήν την βάση δεδομένων και όχι από άλλες ανοιχτές και τυχαίες

πηγές, προστατεύοντας τα ευαίσθητα αυτά δεδομένα από κυβερνοεπιθέσεις και κακόβουλα λογισμικά.

Το ChatGrid είναι διαθέσιμο για λήψη, αλλά χρειάζεται ακόμα αρκετή βελτίωση. Το πρόγραμμα εξυπηρετεί προς το παρόν μόνο το ηλεκτρικό δίκτυο διανομής των ΗΠΑ. Οι δημιουργοί του στοχεύουν στην περαιτέρω εκπαίδευση της εφαρμογής, προτρέποντας τους διαχειριστές να αρχίσουν να θέτουν ερωτήσεις, ώστε να το προπονήσουν και να το βοηθήσουν να δίνει καλύτερες απαντήσεις [96].



**Εικόνα 2.36:** Ενδεικτικές ερωτήσεις και απαντήσεις που μπορούν να τεθούν στο ChatGrid [93].

### 2.3.3.2 Προβλήματα και δυσκολίες εφαρμογής των μεθόδων TN

Η εφαρμογή της TN στα Δίκτυα Διανομής είναι πιθανό να παρουσιάσει σημαντικές δυσκολίες. Κάποιες από αυτές ενδέχεται να είναι:

- Το μεγάλο κόστος ενσωμάτωσης των συστημάτων TN στις δομές των Δικτύων.
- Η διαχείριση του μεγάλου όγκου απόρρητων δεδομένων (πληροφορίες Δικτύων, αλλά και δεδομένα πελατών) και η διαφύλαξη αυτών από κακόβουλες ενέργειες, όπως κυβερνοεπιθέσεις και hacking.
- Η έλλειψη εκπαιδευμένου προσωπικού, τόσο στον τομέα της TN, αλλά και στον ενεργειακό τομέα [97].

Οι προκλήσεις αυτές είναι δυνατό να αντιμετωπιστούν εάν εφαρμοστούν κατάλληλα μέτρα.

Η TN φαίνεται πως αρχίζει να καταλαμβάνει έναν ολοένα και μεγαλύτερο ρόλο στην διαχείριση των Δικτύων Διανομής. Η πρόβλεψη, η ανίχνευση βλαβών και η παρακολούθηση του Δικτύου με την χρήση εργαλείων TN μπορούν να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα των Δικτύων. Μάλιστα, με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, αναμένεται ότι στο μέλλον όλο και περισσότερες εφαρμογές της TN θα ενσωματωθούν στα Δίκτυα Διανομής.



## Κεφάλαιο 3

---

### Περιβάλλον λογισμικού DigSilent PowerFactory

#### 3.1. Εισαγωγή - Γενικά Χαρακτηριστικά Εφαρμογής

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το πρόγραμμα υπολογισμού PowerFactory, το οποίο αναπτύχθηκε από την DigSilent (Digital Simulation of Electrical Networks) και χρησιμοποιείται για την ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (μεταφοράς, διανομής, βιομηχανικών εγκαταστάσεων, παραγωγής ενέργειας). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 15.1.6 του PowerFactory.

Το πρόγραμμα είναι φιλικό προς τον χρήστη και πλήρως συμβατό με το λειτουργικό σύστημα των Windows. Έχει την δυνατότητα αξιόπιστης και ευέλικτης μοντελοποίησης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας εξελιγμένους αλγόριθμους και μία ολοκληρωμένη βάση δεδομένων. Προσφέρει ένα εύρος από προχωρημένες εφαρμογές, σχετικές με την αιολική ενέργεια και τις διεσπαρμένες παραγωγές καθώς επίσης μπορεί και αναπτύσσει προσομοιώσεις σε πραγματικό χρόνο, να παρακολουθεί την απόδοση ενός συστήματος και να συγκρίνει τα αποτελέσματα διαφορετικών αναλύσεων [98].

Με αυτόν τον τρόπο το PowerFactory μπορεί να βοηθήσει έναν μηχανικό στον σχεδιασμό, στην προσομοίωση της λειτουργίας και στην μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα σενάρια.

Στον παρόν κεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται, προκειμένου ο χρήστης του PowerFactory να είναι σε θέση να σχεδιάσει και να προσομοιώσει ποικίλα σενάρια που αφορούν το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που επιθυμεί να αναλύσει, οι βασικές λειτουργίες του προγράμματος, όπως επίσης οι δυνατότητες του στην παρουσίαση αποτελεσμάτων. Το κεφάλαιο αυτό βοηθά στην καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας που ακολουθείται στο 4ο κεφάλαιο, στο οποίο παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε Δίκτυο Διανομής στα πλαίσια των στόχων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

#### 3.2. Βασικές λειτουργίες προγράμματος

Το PowerFactory περιλαμβάνει μία πληθώρα λειτουργιών και μαθηματικών διαδικασιών που μπορεί να εκτελέσει. Μερικές από αυτές είναι:

- Ανάλυση ροής φορτίου,
- Μελέτη βραχυκυκλωμάτων,
- Ανάλυση ευστάθειας δικτύου,
- Αρμονική ανάλυση,
- Ανάλυση μεταβατικών φαινομένων,
- Ανάλυση επάρκειας παραγωγής ενέργειας,
- Αξιολόγηση αξιοπιστίας δικτύων,
- Βελτιστοποίηση Δικτύων Διανομής,

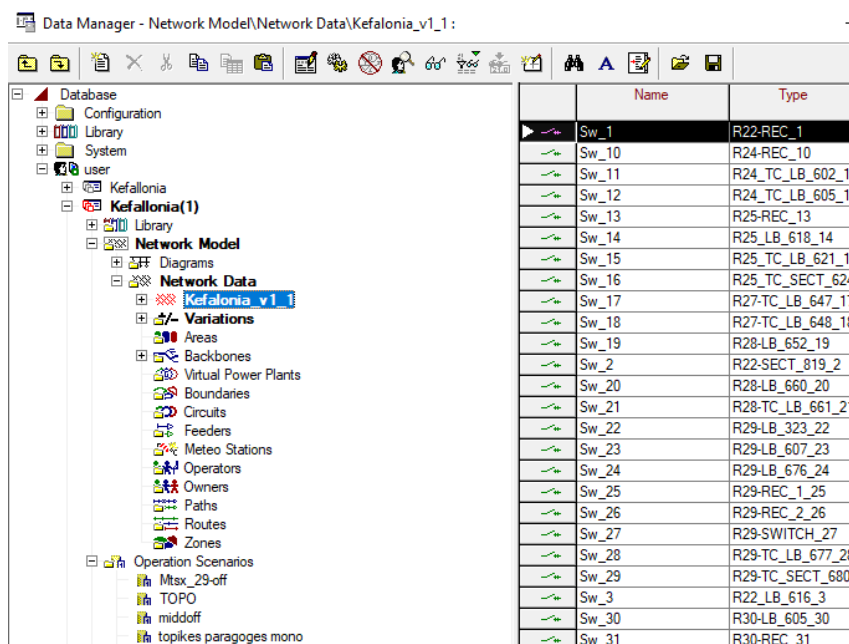
- Προστασία δικτύων,
- Τεχνοοικονομική ανάλυση.

Πέραν των βασικών λειτουργιών, το PowerFactory έχει την δυνατότητα παρουσίασης των αποτελεσμάτων με χρήση διαγραμμάτων και εξαγωγή αναφορών. Στο παρόν κεφάλαιο, δίνεται κυρίως βάση στην ανάλυση ροής φορτίου, η οποία εφαρμόστηκε στις προσομοιώσεις που αναλύονται στο 4ο κεφάλαιο [99].

Για την αντιμετώπιση τυχόν προκλήσεων που εμφανίζονται στο Δίκτυο Διανομής, μέσω της προσομοίωσης του Δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ενσωματωμένα εργαλεία που προσφέρει το πρόγραμμα του PowerFactory. Τα δεδομένα που εξαγονται από το Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographical information System - GIS) και το SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), βοηθούν στην ακριβή μοντελοποίηση του συστήματος, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το PowerFactory [100].

Το PowerFactory προορίζεται κυρίως για χρήση και λειτουργία σε γραφικό περιβάλλον. Δηλαδή, τα δεδομένα εισάγονται με τη σχεδίαση των στοιχείων του Δικτύου και στη συνέχεια είναι εφικτό να εκχωρηθούν τα χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου (π.χ. ισχύς μετασχηματιστή και γενικότερα τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών, κτλ).

Μέσω του Διαχειριστή Δεδομένων (data manager), που φαίνεται στην Εικόνα 3.1., ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση στα δεδομένα κάθε στοιχείου του Δικτύου που προσομοιώνεται σε ένα project. Ο Διαχειριστής Δεδομένων φροντίζει έτσι ώστε τα δεδομένα αυτά να παρουσιάζονται οργανωμένα σε φακέλους για το κάθε αντικείμενο. Για την επεξεργασία των δεδομένων ενός αντικειμένου του Δικτύου, χρησιμοποιείται το εικονίδιο Επεξεργασίας Αντικειμένων για Υπολογισμό:  (edit relevant objects for calculation). Με αυτήν την λειτουργία υπάρχει πρόσβαση σε φορτία, γραμμές, μετασχηματιστές, ζυγούς και άλλα στοιχεία του Δικτύου τα οποία εμφανίζονται κατηγοριοποιημένα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Κάθε ένα από τα εικονίδια που εμφανίζονται στην Εικόνα 3.3, αντιστοιχεί σε μία κατηγορία στοιχείων που υπάρχει στο εξεταζόμενο Δίκτυο.



**Εικόνα 3.1:** Ο Διαχειριστής Δεδομένων (Data Manager) του PowerFactory.



Line - Kefalonia\_v1\_1\Line\_296.Elmlne

Name: Line\_296

Type: Equipment Type Library\Lines\50ACSR\_11.6kV/3

Terminal i: Kefalonia\_v1\_1\R31-49\_34\Line\_296 R31-49\_34

Terminal j: Kefalonia\_v1\_1\R31-49\_49\Line\_296 R31-49\_49

Zone: Terminal i

Area: Terminal i

☐ Out of Service

Number of parallel Lines: 1

Parameters:

Thermal Rating: ...

Length of Line: 1.603 km

Derating Factor: 1

Laying: Ground

Resulting Values:

|                            |               |
|----------------------------|---------------|
| Rated Current (act.)       | 0.296 kA      |
| Pos. Seq. Impedance, Z1    | 0.8956913 Ohm |
| Pos. Seq. Impedance, Angle | 43.69475 deg  |
| Pos. Seq. Resistance, R1   | 0.647612 Ohm  |
| Pos. Seq. Reactance, X1    | 0.618758 Ohm  |
| Zero Seq. Resistance, R0   | 0.884856 Ohm  |
| Zero Seq. Reactance, X0    | 2.539152 Ohm  |
| Earth-Fault Current, Ice   | 0, A          |
| Earth Factor, Magnitude    | 0.7201116     |
| Earth Factor, Angle        | 39.26266 deg  |

Type of Line: Cable

Line Model:

☒ Lumped Parameter (PI)

☐ Distributed Parameter

Sections/Line Loads

**Εικόνα 3.2:** Πρόσβαση στις πληροφορίες αντικείμενου (Γραμμή) Δικτύου, μέσω του Διαχειριστή Δεδομένων.



**Εικόνα 3.3:** Επεξεργασία αντικειμένων, μέσω του edit relevant objects for calculation.

Επιλέγοντας, για παράδειγμα, το εικονίδιο που αντιστοιχεί στις γραμμές του Δικτύου, ανοίγει παράθυρο με καρτέλες που φέρουν έναν πίνακα. Είναι εφικτή η επεξεργασία των κελιών του πίνακα με διπλό κλικ στο επιθυμητό κελί. Στην καρτέλα “Flexible Data”, που φαίνεται στην Εικόνα 3.4, παρουσιάζεται μία σύνοψη των κυριότερων χαρακτηριστικών των στοιχείων [101].

Object Filter: \*.Elmlne

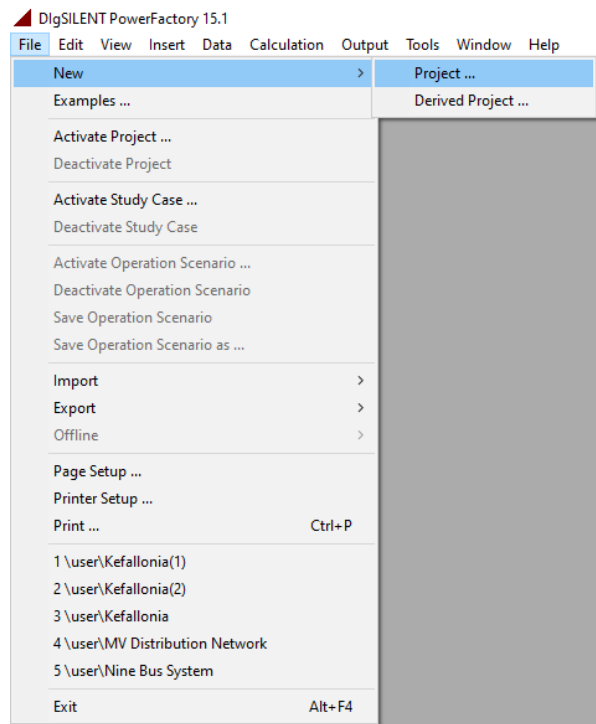
|   | Name     | Grid           | Terminal i Sta/Cubic | Terminal i Busbar | Terminal j Sta/Cubic | Terminal j Busbar | Type TypLine, TypTow, T... | Length km |
|---|----------|----------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------------|-----------|
| ▶ | Line 61  | Kefalonia_v1_1 |                      | R23-100_97        |                      | R23-100_76        | 50ACSR_11.6kV/3            | 1.        |
| ✓ | Line_1   | Kefalonia_v1_1 |                      | MV_1              |                      | R22-28a           | 95ACSR_11.5kV/3            | 2.032     |
| ✓ | Line_10  | Kefalonia_v1_1 |                      | MV_2              |                      | R31-26            | USER_1                     | 1.        |
| ✓ | Line_100 | Kefalonia_v1_1 |                      | R24-337           |                      | R24-112_19        | 16ACSR_11.6kV/3            | 1.755     |
| ✓ | Line_101 | Kefalonia_v1_1 |                      | R24-337           |                      | R24-348           | 50ACSR_11.6kV/3            | 1.029     |
| ✓ | Line_102 | Kefalonia_v1_1 |                      | R24-34            |                      | R24-43            | 95ACSR_11.6kV/3            | 0.761     |
| ✓ | Line_103 | Kefalonia_v1_1 |                      | R24-348           |                      | R24-354           | 50ACSR_11.6kV/3            | 0.665     |
| ✓ | Line_104 | Kefalonia_v1_1 |                      | R24-354           |                      | R24-120_10        | 16ACSR_11.6kV/3            | 0.884     |
| ✓ | Line_105 | Kefalonia_v1_1 |                      | R24-354           |                      | R24-365           | 50ACSR_11.6kV/3            | 0.918     |
| ✓ | Line_106 | Kefalonia_v1_1 |                      | R24-43            |                      | R24-72            | 95ACSR_11.6kV/3            | 2.701     |
| ✓ | Line_107 | Kefalonia_v1_1 |                      | R24-72            |                      | R24-80            | 95ACSR_11.6kV/3            | 0.757     |
| ✓ | Line_108 | Kefalonia_v1_1 |                      | R24-80            |                      | R24-93            | 50ACSR_11.6kV/3            | 1.207     |
| ✓ | Line_109 | Kefalonia_v1_1 |                      | R24-93            |                      | R24-102           | 50ACSR_11.6kV/3            | 0.575     |
| ✓ | Line_11  | Kefalonia_v1_1 |                      | R22-113_7         |                      | R22-113_9         | 16ACSR_11.6kV/3            | 0.2       |
| ✓ | Line_110 | Kefalonia_v1_1 |                      | R24-N1            |                      | R24-N2            | STR150AL_11.6kV/3          | 0.836     |
| ✓ | Line_111 | Kefalonia_v1_1 |                      | R24-N2            |                      | R24-29            | XLPE240_11.6kV/3           | 0.638     |
| ✓ | Line_112 | Kefalonia_v1_1 |                      | R25-1             |                      | R25-14            | 95ACSR_11.6kV/3            | 0.768     |
| ✓ | Line_113 | Kefalonia_v1_1 |                      | R25-14            |                      | R25-32            | 95ACSR_11.6kV/3            | 1.642     |
| ✓ | Line_114 | Kefalonia_v1_1 |                      | R25-15_24         |                      | R25-15_37         | 35AAC_11.6kV/3             | 1.164     |
| ✓ | Line_115 | Kefalonia_v1_1 |                      | R25-15_9          |                      | R25-15_24         | 35AAC_11.6kV/3             | 1.497     |
| ✓ | Line_116 | Kefalonia_v1_1 |                      | R25-1_13          |                      | R25-1_21          | 35ACSR_11.6kV/3            | 0.195     |
| ✓ | Line_117 | Kefalonia_v1_1 |                      | R25-1_21          |                      | R25-1_25          | 35ACSR_11.6kV/3            | 0.067     |
| ✓ | Line_118 | Kefalonia_v1_1 |                      | R25-1_25          |                      | R25-N6            | NAHEKBA240_11.6kV/3        | 1.089     |
| ✓ | Line_119 | Kefalonia_v1_1 |                      | R25-23_5          |                      | R25-25_13A        | 35AAC_11.6kV/3             | 1.156     |

**Εικόνα 3.4:** Επεξεργασία αντικειμένων, μέσω του edit relevant objects for calculation.

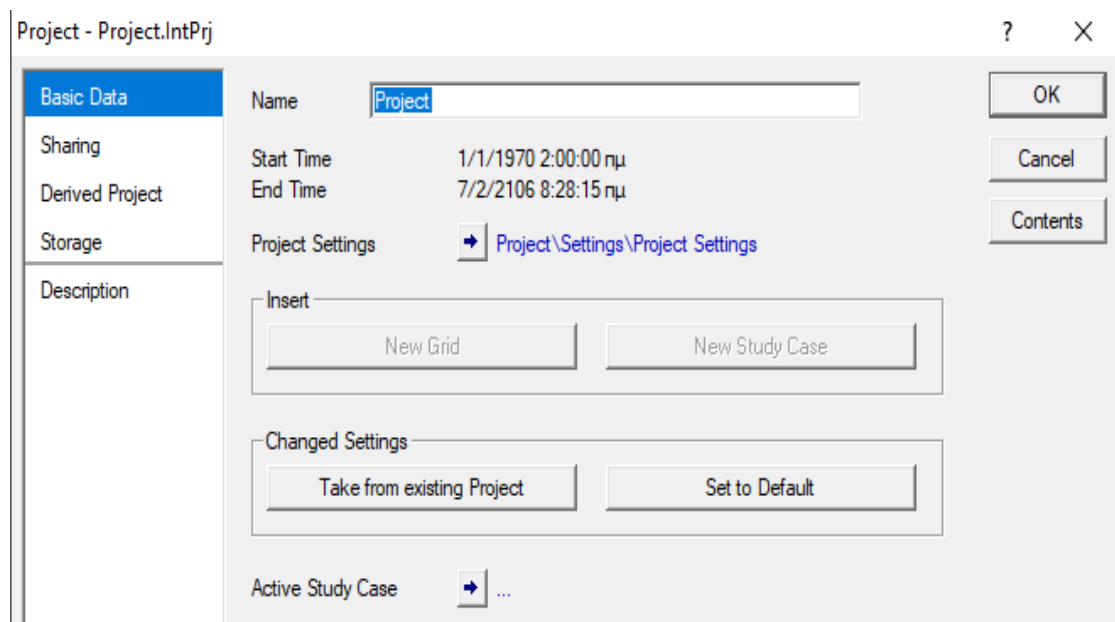
### 3.3. “Project” - Μελέτη περιπτώσεων - Σενάρια λειτουργίας

#### 3.3.1. Δημιουργία Project

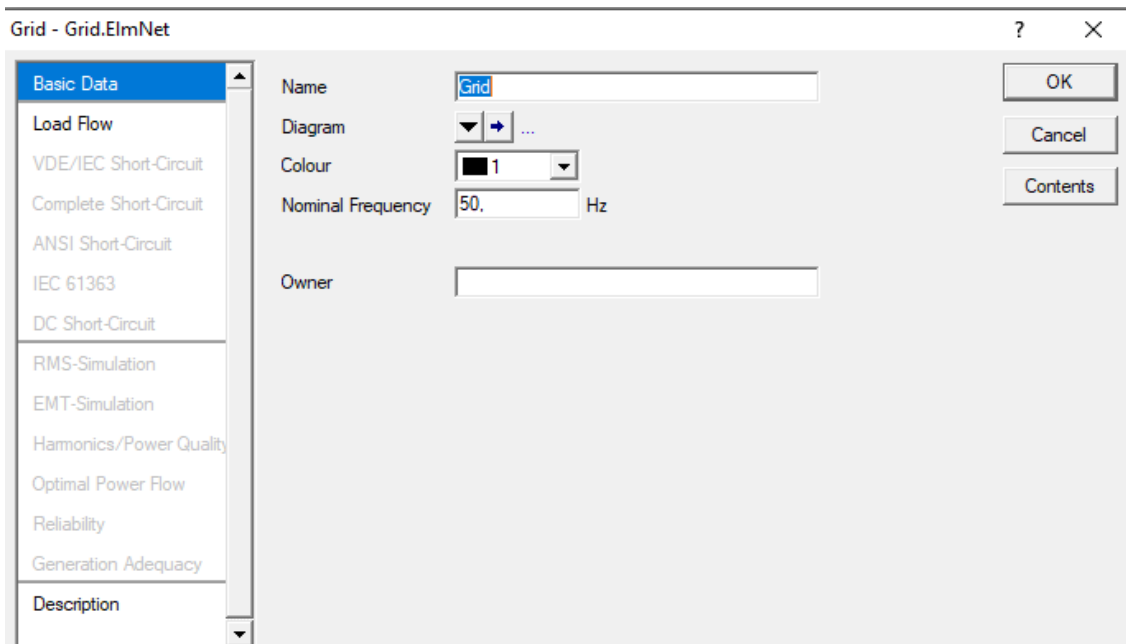
Για την δημιουργία ενός νέου συστήματος, πρέπει να δημιουργηθεί ένα νέο “project” (Εικόνα 3.5). Αυτό γίνεται μέσω της επιλογής New από το μενού “File” και στην συνέχεια της επιλογής “project” που εμφανίζεται. Έπειτα απαιτείται η συμπλήρωση ενός ονόματος για το project στο παράθυρο που εμφανίζεται (Εικόνα 3.6). Στην συνέχεια απαιτείται η εισαγωγή ενός ονόματος για το δίκτυο που πρόκειται να δημιουργήσουμε (Εικόνα 3.7) [101].



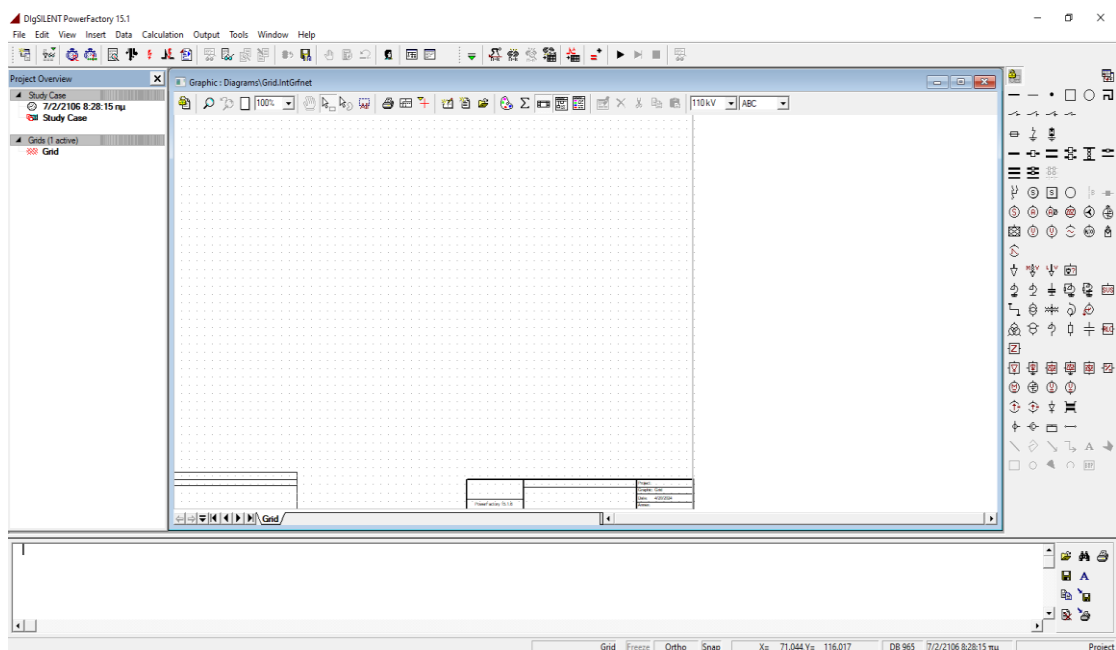
**Εικόνα 3.5:** Δημιουργία νέου “project”.



**Εικόνα 3.6:** Παράθυρο για την εισαγωγή ονόματος ενός “project”.



**Εικόνα 3.7:** Παράθυρο για την εισαγωγή ονόματος σε Δίκτυο ενός "project".



**Εικόνα 3.8:** Η επιφάνεια εργασίας του PowerFactory.

Στο στάδιο αυτό εμφανίζεται η επιφάνεια εργασίας του νέου "project", όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8. Ακολουθώντας τα παραπάνω βήματα, μπορεί να ξεκινήσει κανείς να σχεδιάζει το Δίκτυο χρησιμοποιώντας τα εργαλεία που βρίσκονται στο δεξί μέρος της επιφάνειας εργασίας. Τα πιο σημαντικά, και συχνά χρησιμοποιούμενα, από αυτά τα εργαλεία, είναι τα εξής:

- Ζυγός:



- Γραμμή:



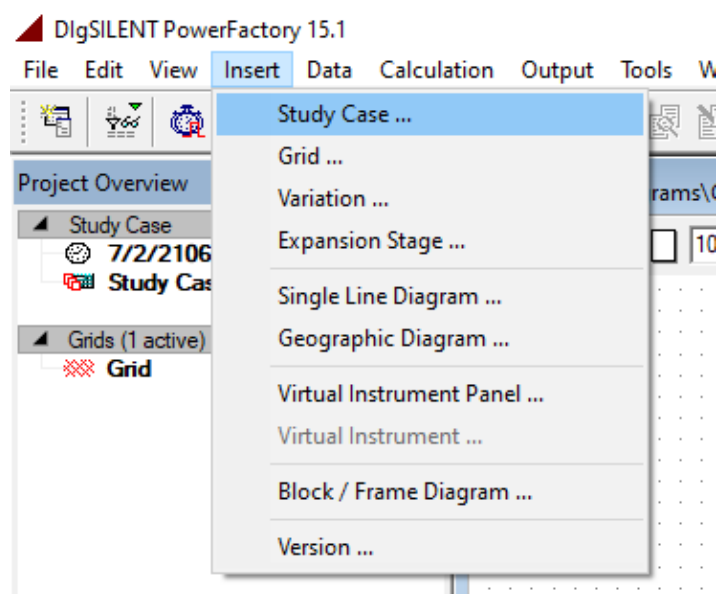
- Διακόπτης:
- Σύγχρονη Μηχανή:
- Ασύγχρονη Μηχανή:
- Φορτίο:
- Μετασχηματιστής 2 - τυλιγμάτων:
- Γραμμή :
- Πυκνωτής:



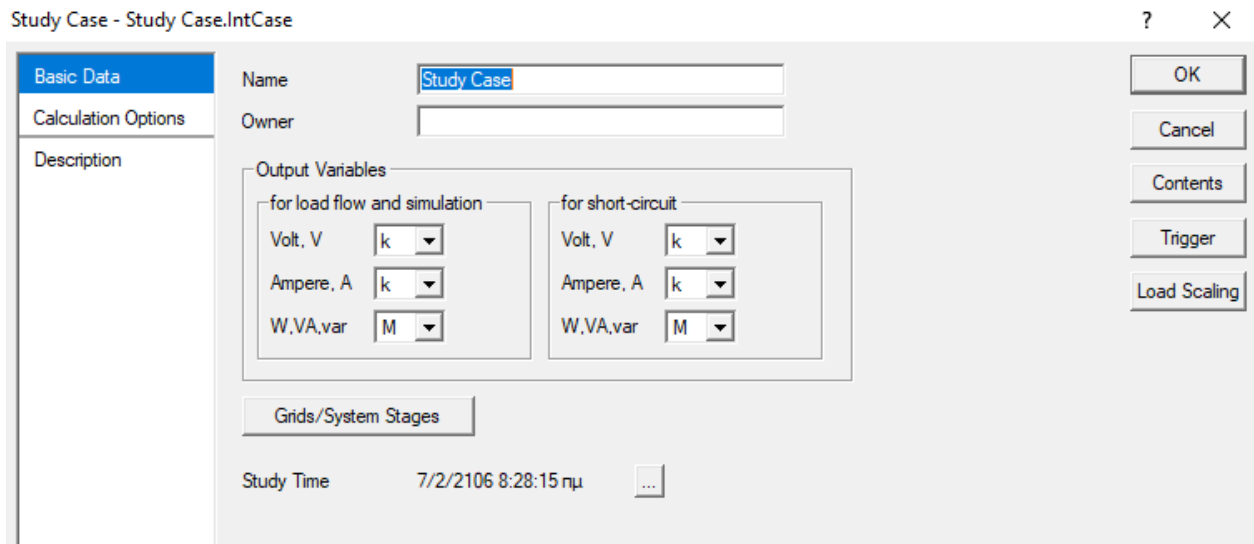
### 3.3.2 Μελέτες Περιπτώσεων (Study Cases)

Το PowerFactory δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να πραγματοποιεί διαφορετικού είδους μελέτες σε ένα δίκτυο, να προσαρμόζει τις παραμέτρους του Δικτύου ξεχωριστά σε καθεμία από αυτές και να εμφανίζει τα κατάλληλα αποτελέσματα . Αυτό γίνεται με την ενεργοποίηση μίας Μελέτης Περίπτωσης (Study Case). Ενεργοποιώντας μία Μελέτη Περίπτωσης (study case), είναι εφικτό να αποθηκευτούν πληροφορίες οι οποίες αφορούν τη συγκεκριμένη Μελέτη Περίπτωσης και μόνο και δεν θα περιπλέκονται με τις πληροφορίες οποιασδήποτε άλλης είναι αποθηκευμένη στο πρόγραμμα.

Για να ενεργοποιηθεί ένα “Study case”, επιλέγεται από το κύριο μενού η καρτέλα “Insert” (Εικόνα 3.9), η οποία στην συνέχεια εμφανίζει διάφορες επιλογές, μεταξύ των οποίων και το “Study Case”. Εν συνεχεία ζητείται σε ξεχωριστό παράθυρο να γίνει εισαγωγή ονόματος για την μελέτη περιπτώσεων που δημιουργείται (Εικόνα 3.10). Στο ίδιο παράθυρο επιλέγονται και οι μονάδες μέτρησης που θα έχουν τα εξαγόμενα αποτελέσματα μετά από κατάλληλη επεξεργασία (όπως για παράδειγμα το ρεύμα I αν θα μετριέται σε A ή kA).

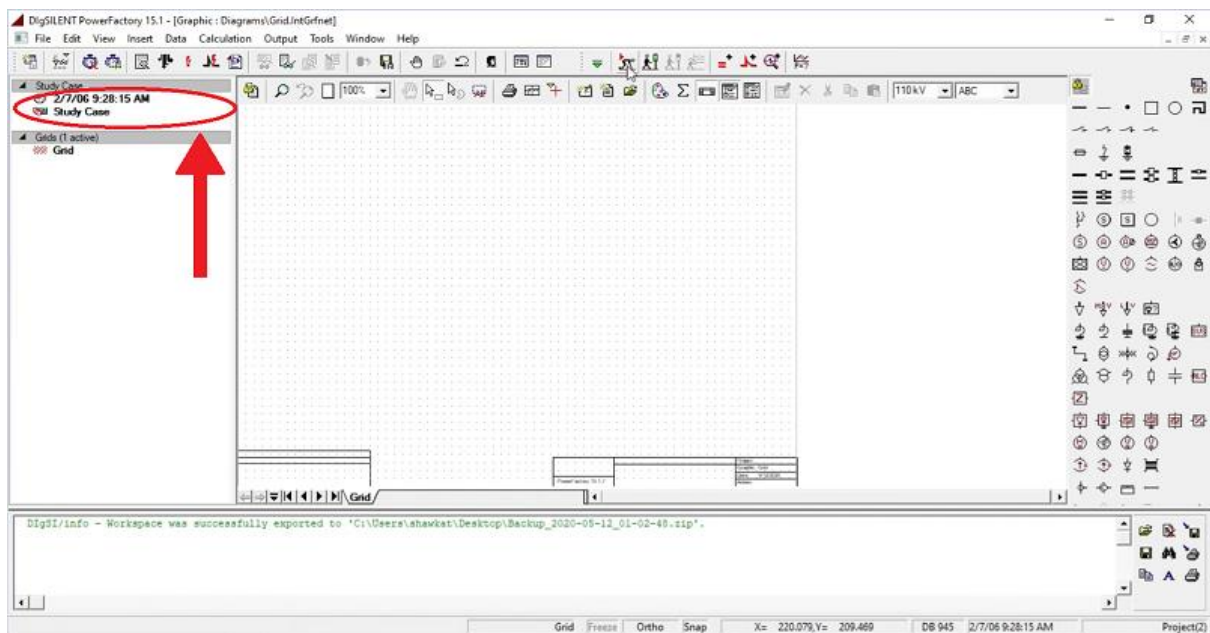


**Εικόνα 3.9:** Εισαγωγή νέας Μελέτης Περίπτωσης.

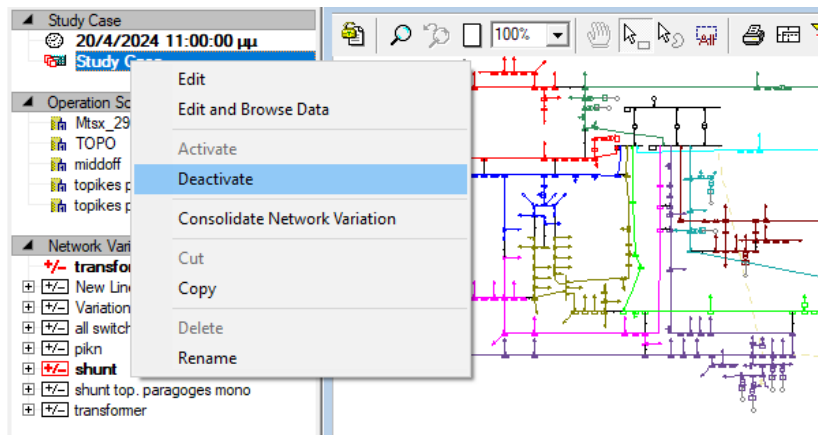


**Εικόνα 3.10:** Αναδυόμενο παράθυρο για την εισαγωγή ονόματος μίας Μελέτης Περίπτωσης.

Το “Study Case” που είναι ενεργοποιημένο φαίνεται στα αριστερά της επιφάνειας εργασίας του προγράμματος με έντονα γράμματα (Εικόνα 3.11). Η απενεργοποίηση του γίνεται με δεξί κλικ στο όνομα του επιθυμητού study case και επιλογή στο “deactivate”, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.12. Για να ενεργοποιηθεί ξανά, ακολουθείται παρόμοια διαδικασία, δηλαδή δεξί κλικ στο “Study case” το οποίο επιθυμεί κάποιος να ενεργοποιήσει, και επιλογή του “activate” [101].



**Εικόνα 3.11:** Ενεργοποιημένη Μελέτη Περίπτωσης.

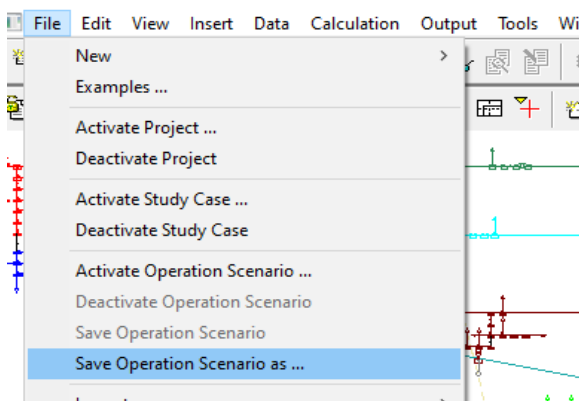


**Εικόνα 3.12:** Απενεργοποίηση Μελέτης Περίπτωσης.

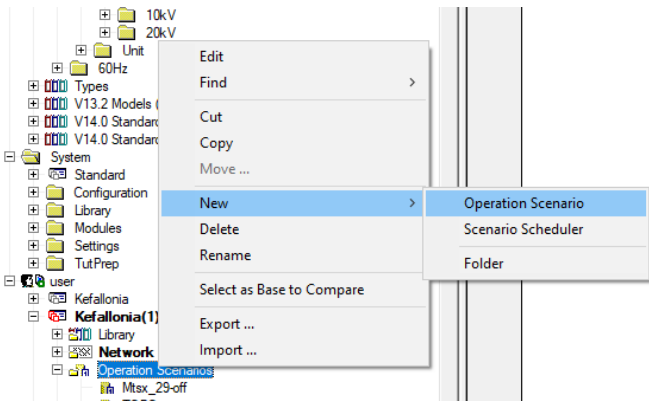
### 3.3.3. Σενάρια λειτουργίας (Operation scenarios)

Εισάγοντας ένα σενάριο λειτουργίας (Operation scenario), είναι εφικτό να αλλάξουν οι παράμετροι ενός στοιχείου (π.χ. τα MW που παράγει μιας γεννήτριας, η κατάσταση λειτουργίας μίας γραμμής ή ενός διακόπτη, τα MW που καταναλώνει ένα φορτίο), έτσι ώστε, οι αλλαγές που ενδέχεται να γίνουν αρκετές φορές κατά την λειτουργία του Δικτύου, να λαμβάνονται υπόψη στην προσομοίωση του. Με αυτόν τον τρόπο, ενεργοποιώντας και απενεργοποιώντας τα σενάρια λειτουργίας, επιταχύνονται οι αναλύσεις που επιθυμεί να εκτελέσει κανείς στο Δίκτυο.

Εάν αλλάξουν ορισμένα λειτουργικά δεδομένα, ενώ ένα σενάριο λειτουργίας είναι ενεργοποιημένο, και οι αλλαγές αυτές αποθηκευτούν στο ενεργό σενάριο, με την απενεργοποίηση του σεναρίου το Δίκτυο θα φέρει τα λειτουργικά δεδομένα που είχε πριν την ενεργοποίηση του σεναρίου.



**Εικόνα 3.13:** 1<sup>ος</sup> τρόπος εισαγωγής σεναρίου λειτουργίας (operation scenario).



**Εικόνα 3.14:** 2<sup>ος</sup> τρόπος εισαγωγής σεναρίου λειτουργίας (operation scenario).

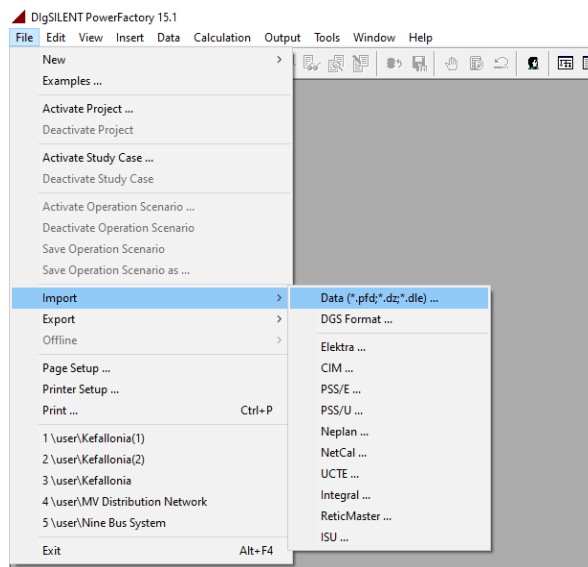
Η διαδικασία που ακολουθείται για την εισαγωγή ενός νέου σεναρίου λειτουργίας φαίνεται στις Εικόνες 3.13 και 3.14 και έχει ως εξής: είτε μέσω των επιλογών “File” στο κύριο μενού και “Save Operation Scenario as...”, είτε μέσω του Διαχειριστή Δεδομένων πατώντας δεξί κλικ στο “Operation Scenarios” και επιλέγοντας έπειτα στο “New” το “Operation Scenario”.



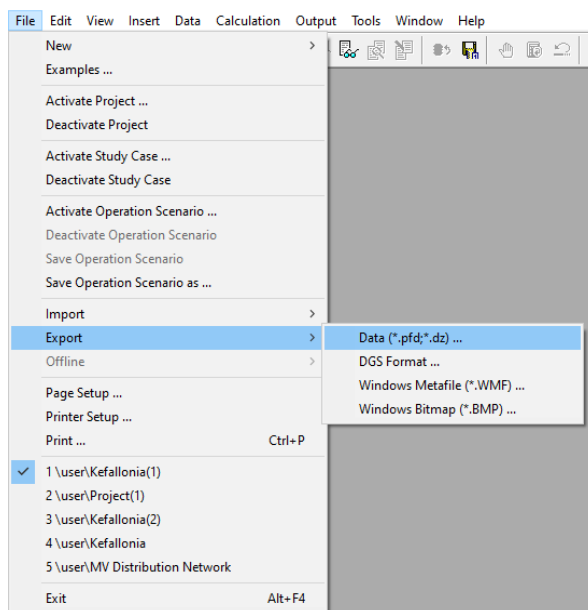
Η ενεργοποίηση/απενεργοποίηση ενός σεναρίου λειτουργίας γίνεται επιλέγοντας αντίστοιχα “activate”/”deactivate” από το “File” στο κύριο μενού ή με δεξί κλικ στο “Operation scenario” που εμφανίζεται στον Διαχειριστή Δεδομένων [100][102].

### 3.4. Εισαγωγή ενός αρχείου /εξαγωγή αρχείων και δεδομένων

Πέραν της δημιουργίας νέου αρχείου, είναι εφικτό να εισάγουμε ένα αρχείου προκειμένου να το επεξεργαστούμε. Τα αρχεία που μπορούν να εισαχθούν είναι τύπου “.dz” και “.pfd”. Η εισαγωγή αρχείων γίνεται από την επιλογή “Import” του μενού “File”, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.15. Στη συνέχεια εμφανίζεται η επιλογή “Data (\*.pfd;\*.dz;\*.dle)” την οποία επιλέγουμε προκειμένου να ανοίξουμε το επιθυμητό αρχείο. Ομοίως γίνεται και η εξαγωγή ενός project σε μορφή ‘Data(\*.pfd, \*.dz)’, “DGS Format”, κ.α (Εικόνα 16) [99].



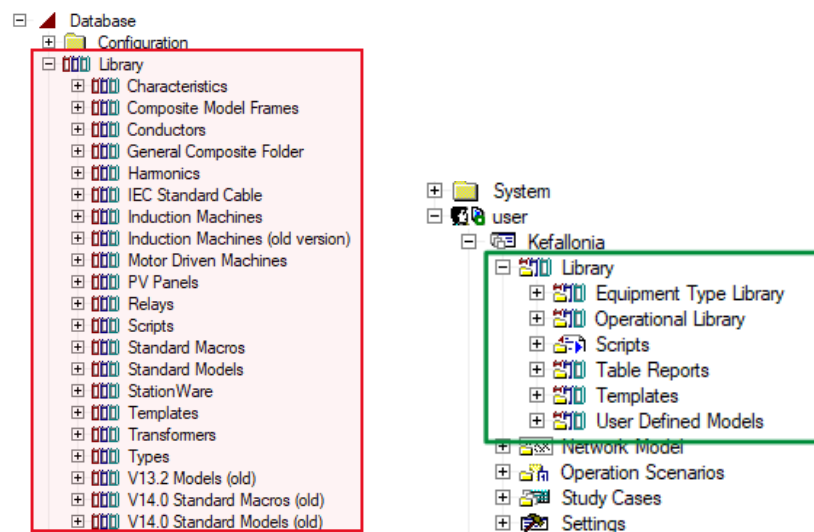
**Εικόνα 3.15:** Εισαγωγή αρχείων στο PowerFactory.



**Εικόνα 3.16:** Εξαγωγή αρχείων από το PowerFactory.

### 3.5. Βιβλιοθήκες Εφαρμογής

Οι Βιβλιοθήκες στο PowerFactory έχουν σκοπό να ομαδοποιούν στοιχεία του Δικτύου που είναι όμοια, δηλαδή φέρουν κοινά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, σε ένα Δίκτυο Διανομής είναι πολύ πιθανό να χρησιμοποιούνται γραμμές που φέρουν του ίδιου τύπου αγωγούς, όπως ACSR - 95, δηλαδή οι γραμμές αυτές φέρουν ίδια ωμική και επαγωγική αντίσταση ανά μονάδα μήκους του αγωγού. Οι Βιβλιοθήκες ορίζονται για κάθε project και φέρουν μοντέλα για κάθε στοιχείο που υπάρχει στο υπό εξέταση Δίκτυο. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να οριστούν είτε από τον ίδιο τον χρήστη εκ νέου σε κάθε project, είτε να ληφθούν από την Βιβλιοθήκη του προγράμματος (Global Library), είτε με την εισαγωγή βιβλιοθηκών στον λογαριασμό με τον οποίο έχει πρόσβαση στο πρόγραμμα ο χρήστης (Εικόνα 3.17) [101].



**Εικόνα 3.17:** Οι Βιβλιοθήκες που εμφανίζονται στα αριστερά της επιφάνειας εργασίας.

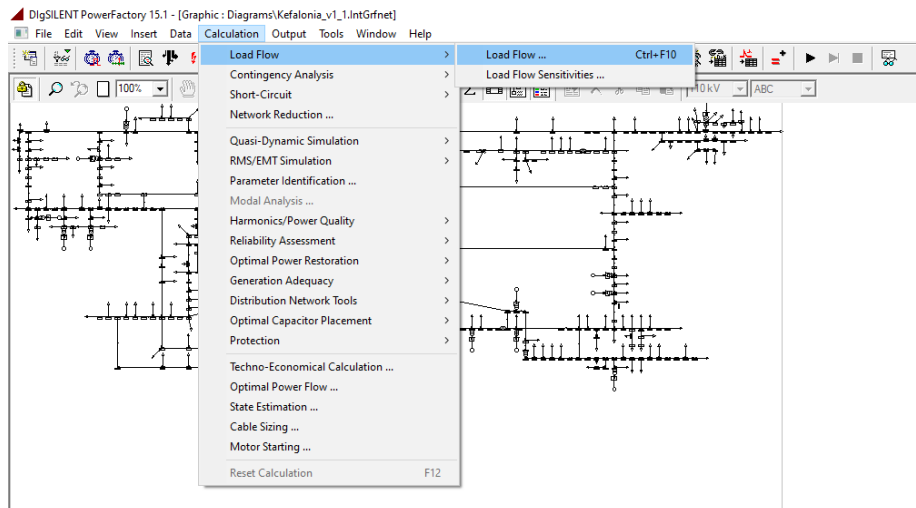
### 3.6. Μελέτη ροής φορτίου

#### 3.6.1. Διαδικασία επιλογής παραμέτρων ανάλυσης ροής φορτίου

Μία μελέτη ροής φορτίου είναι δυνατό να ξεκινήσει είτε έχοντας ένα Δίκτυο έτοιμο προς επεξεργασία, είτε δημιουργώντας ένα Δίκτυο από την αρχή, είτε ανοίγοντας ένα αρχείο, όπως περιεγράφηκε παραπάνω. Αυτό γίνεται πηγαίνοντας στο μενού “Calculation” και διαλέγοντας την επιλογή “Load Flow”. Επίσης η ανάλυση ροής φορτίου μπορεί να ξεκινήσει πατώντας το εικονίδιο:

Για την εξαγωγή των απαραίτητων αποτελεσμάτων από την ανάλυση ροής φορτίου ενός υπό εξέταση Δικτύου, είναι απαραίτητο να επιλυθεί μία σειρά μη γραμμικών εξισώσεων. Το πρόγραμμα λύνει τις εξισώσεις αυτές χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ροής ισχύος “Newton-Raphson”.

Η μέθοδος “Newton - Raphson” αποτελεί μία από τις καλύτερες μεθόδους διαδοχικών προσεγγίσεων για την προσεγγιστική εύρεση των μιας συνάρτησης. Η σύγκλιση σε αυτή την μέθοδο, δηλαδή η κατάληξη σε μία κοινή λύση, γίνεται ιδιαίτερα γρήγορα και πιο συγκεκριμένα τετραγωνικά.



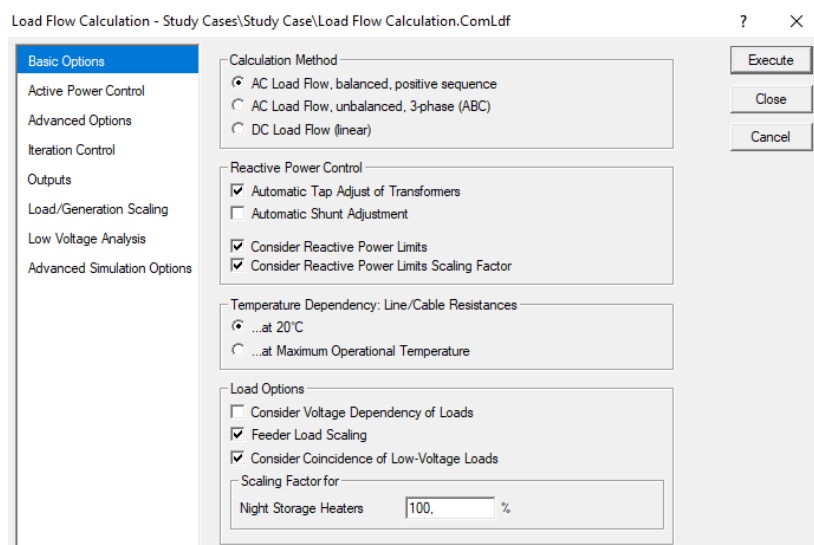
**Εικόνα 3.18:** Εκκίνηση ανάλυσης ροής φορτίου για το εξεταζόμενο Δίκτυο.

Ουσιαστικά, η γενική αναδρομική σχέση που χρησιμοποιείται στη μέθοδο είναι η εξής:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (3.1)$$

όπου  $f$  είναι μία δεδομένη συνάρτηση της οποίας είναι επίσης γνωστή η παράγωγός της,  $x_{n+1}$  είναι η τιμή που προκύπτει μετά την επίλυση της εξίσωσης (3.1) και είναι μία περισσότερο προσεγγιστική τιμή της ρίζας της συνάρτησης  $f(x)$  μετά από  $n+1$  επαναλήψεις της μαθηματικής σχέσης (3.1).

Κατά την 1η επανάληψη χρησιμοποιείται τυχαία τιμή  $x_0$  και έπειτα από εφαρμογή της αναδρομικής σχέσης (3.1), προκύπτει η τιμή  $x_1$  η οποία βρίσκεται πιο κοντά στην ρίζα της συνάρτησης  $f$  σε σχέση με την τιμή  $x_0$ . Η ταχύτητα της σύγκλισης του αλγορίθμου εξαρτάται από το εάν η επαναληπτική διαδικασία ξεκινήσει «αρκετά κοντά» στην ζητούμενη λύση, δηλαδή αν η τιμή  $x_0$  που θα χρησιμοποιηθεί στην 1η επανάληψη της σχέσης (3.1) είναι κοντά στην πραγματική ρίζα της συνάρτησης  $f$ . Αν η μέθοδος ξεκινήσει μακριά από την επιθυμητή λύση υπάρχει πιθανότητα να μην συγκλίνει [103].



**Εικόνα 3.19:** Παράθυρο ρυθμίσεων μελέτης ροής φορτίου (1η καρτέλα).

Μετά την εκκίνηση της ανάλυσης ροής ισχύος, στην οθόνη του υπολογιστή εμφανίζεται το παράθυρο ρυθμίσεων με το οποίο είναι δυνατό να οριστούν οι κατάλληλες ρυθμίσεις για την ανάλυση (Εικόνα 3.19).

Παρακάτω γίνεται προσπάθεια περιγραφής των σημαντικότερων ρυθμίσεων που μπορούν να οριστούν για την ανάλυση ροής φορτίου:

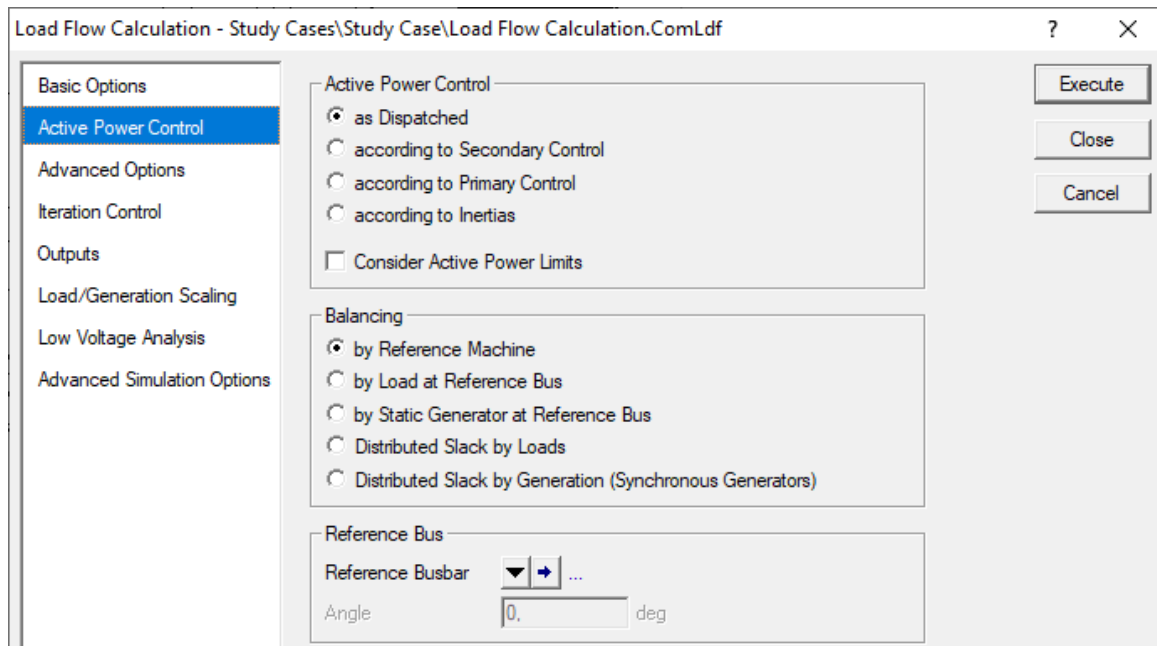
Στην Εικόνα 3.19 φαίνονται οι επιλογές για τον τρόπο υπολογισμού των απαιτούμενων παραμέτρων της ανάλυσης. Συγκεκριμένα στην καρτέλα των Βασικών Επιλογών (Basic Options), μπορούν να επιλεγούν από το πεδίο Μεθόδου Υπολογισμού (Calculation Method) τα εξής:

- Ανάλυση ροής φορτίου AC σε συμμετρικό δίκτυο, με χρήση του μονοφασικού κυκλώματος θετικής ακολουθίας (AC load flow, balanced, positive sequence): Σε αυτή την περίπτωση, αγνοείται η ανισορροπία μεταξύ των φάσεων. Είναι η πιο κλασσική προσέγγιση υπολογισμού της ροής φορτίου. Γενικά η υπόθεση περί συμμετρικότητας του δικτύου, είναι γενικά αποδεκτή για την ανάλυση συστημάτων μεταφοράς ενέργειας. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτής της μεθόδου υπολογισμού φέρεται να είναι ακατάλληλη για ορισμένα δίκτυα διανομής, λόγω συγκεκριμένων χαρακτηριστικών που φέρει το Δίκτυο.
- Ανάλυση ροής φορτίου AC σε μη συμμετρικό δίκτυο, με χρήση του τριφασικού κυκλώματος (AC load flow, unbalanced, 3-phase): Με αυτήν την επιλογή, στον υπολογισμό της ροής φορτίου λαμβάνεται υπόψη η μη συμμετρικότητα στις φάσεις του δικτύου. Συνήθως η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε δίκτυα διανομής στα οποία η ανισορροπία μεταξύ των φάσεων δεν μπορεί να παραληφθεί, λόγω συγκεκριμένων χαρακτηριστικών που φέρει το Δίκτυο.
- Γραμμική ανάλυση ροής φορτίου DC (DC load flow - linear): Χρησιμοποιείται για AC συστήματα και δεν πρέπει να παρερμηνεύεται ότι χρησιμοποιείται ως μέθοδος μόνο για DC συστήματα. Η περίπτωση αυτή εκτελεί μία ταχεία ανάλυση ροής φορτίου, όταν πρόκειται για πολύπλοκα συστήματα μεταφοράς στα οποία χρειάζεται προσέγγιση της ροής ενεργού ισχύος του συστήματος **χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες**. Επίσης, η μέθοδος εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που η AC μέθοδος παρουσιάζει πρόβλημα σύγκλισης, κι αυτό διότι στην DC μέθοδο απλοποιείται το μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων που είναι απαραίτητο να επιλυθεί σε γραμμικό. Η DC ροή φορτίου δεν απαιτεί επαναληπτική διαδικασία και επομένως η ταχύτητα υπολογισμού αυξάνεται σημαντικά, χωρίς να υπάρχουν προβλήματα σύγκλισης [100].

Από το πεδίο Ελέγχου Αέργου Ισχύος (Reactive Power Control) μπορούν να γίνουν επιλογές έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη τα όρια των γεννητριών που έχουν τεθεί (Consider Reactive Power Limits). Υπάρχουν επίσης επιλογές για την αυτόματη αλλαγή του επιπέδου τάσης των μετασχηματιστών (Automatic Tap Adjust of Transformers) ή την σύνδεση εγκάρσιων φίλτρων (Automatic Shunt Adjustment).

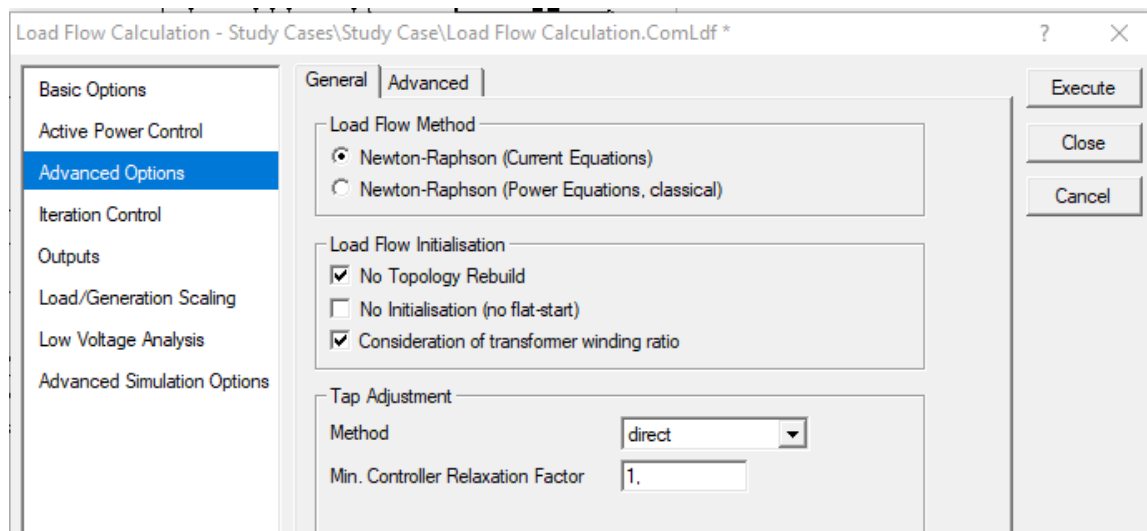
Στο πεδίο “Temperature Dependency” μπορεί να οριστεί η θερμοκρασία στην οποία θεωρούνται ότι λαμβάνονται οι υπολογισμοί για τις γραμμές και τους τα καλώδια. Ορίζουμε τον υπολογισμό των αντιστάσεων των γραμμών στους 20°C.

Τέλος, στο πεδίο “Load Options” υπάρχουν διάφορες επιλογές σχετικά με την συμπεριφορά των φορτίων, όπως εξάρτηση από τάση, συντελεστής ετεροχρονισμού, κτλ.



**Εικόνα 3.20:** Παράθυρο ρυθμίσεων μελέτης ροής φορτίου (2η καρτέλα).

Στην 2η κατά σειρά καρτέλα, όπως εμφανίζεται στο παράθυρο που απεικονίζεται στην Εικόνα 3.20, είναι εφικτό να γίνουν ρυθμίσεις όσον αφορά την ενεργό ισχύ. Επιλέγοντας “as Dispatched” ανοίγει ένα πεδίο “Balancing” στο οποίο μπορούμε να διαλέξουμε πώς θα γίνεται ο έλεγχος της ροής ενεργού ισχύος. Με την δεύτερη επιλογή “according to Secondary control”, ελέγχονται οι συνεισφορές ενεργού ισχύος όταν η συχνότητα του Δικτύου μένει σταθερή στην ονομαστική τιμή. Στο πεδίο Ζυγού αναφοράς (Reference Bus) γίνεται η επιλογή του ζυγού αναφοράς ως προς την τάση.

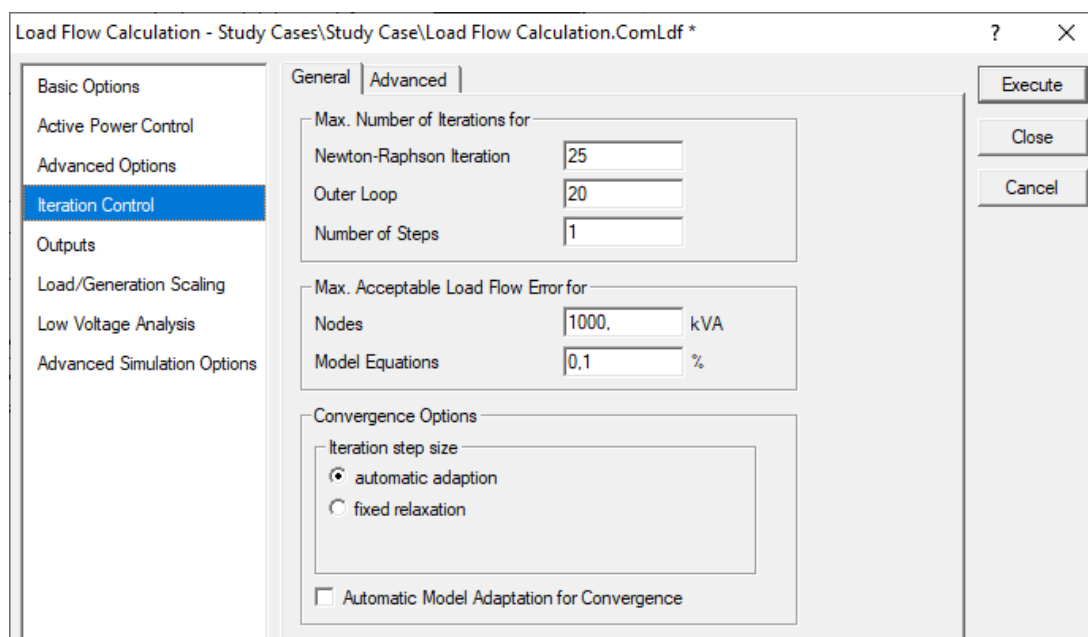


**Εικόνα 3.21:** Παράθυρο ρυθμίσεων μελέτης ροής φορτίου (3η καρτέλα).

Στην Εικόνα 3.21 φαίνεται η 3η καρτέλα των προχωρημένων επιλογών (Advanced Options). Στο πεδίο Μεθόδου Ροής Φορτίου (Load Flow Method) επιλέγεται η μέθοδος επίλυσης της ροής φορτίου “Newton - Raphson” βασισμένη στις εξισώσεις που προκύπτουν για το ρεύμα ή στις εξισώσεις ισχύος. Στο πεδίο Αρχικοποίησης Ροής Φορτίου (Load Flow Initialisation) μπορούν να

γίνουν επιλογές σχετικά με την αρχικοποίηση της επαναληπτικής διαδικασίας που ακολουθείται κατά τον υπολογισμό. Για παράδειγμα, μπορεί να επιλεγεί αν σε κάθε επανάληψη του υπολογισμού θα ελέγχεται η τοπολογία του εξεταζόμενου Δικτύου για κάποια αλλαγή, αν θα χρησιμοποιείται η προηγούμενη λύση ως αρχική για την επόμενη επανάληψη ή αν θα χρησιμοποιούνται οι λόγοι των μετασχηματιστών στην αρχικοποίηση των τάσεων των κόμβων. Στο τελευταίο πεδίο της καρτέλας, Ρύθμιση των Επιπέδων Τάσης των Μετασχηματιστών (Tap Adjustment) επιλέγεται η μέθοδος που ακολουθείται για τον υπολογισμό των συστημάτων αλλαγής τάσης των μετασχηματιστών.

Μέσω της 4ης καρτέλας Έλεγχου Επανάληψης (Iteration Control), που φαίνεται στην Εικόνα 3.22, μπορούν να εφαρμοστούν ρυθμίσεις σχετικά με τον αλγόριθμο της επαναληπτικής διαδικασίας. Στο πεδίο Μέγιστου Αριθμού Επαναλήψεων (Max. Number of Iterations) μπορούμε να ορίσουμε τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων της μεθόδου “Newton - Raphson” που εφαρμόζεται. Στο πεδίο Μέγιστου Επιτρεπόμενου Σφάλματος Ροής Φορτίου (Max. Acceptable Load Flow Error) μπορεί κανείς να ορίσει το όριο σύγκλισης που τερματίζει την επαναληπτική διαδικασία που γίνεται στην μέθοδο “Newton - Raphson”. Εάν είναι επιθυμητή η γραμμική προσέγγιση της λύσης του προβλήματος ανάλυσης της ροής φορτίου, στο πεδίο Επιλογών Σύγκλισης (Convergence Options) μπορεί να επιλεγεί η Αυτόματη Προσαρμογή Μοντέλου για την Σύγκλιση (Automatic Model Adaption for Convergence).



**Εικόνα 3.22:** Παράθυρο ρυθμίσεων μελέτης ροής φορτίου (4η καρτέλα).

Μετά τις απαραίτητες ρυθμίσεις, πατώντας Εκτέλεση (Execute), ξεκινά η ανάλυση ροής φορτίου. Στο τέλος της διαδικασίας εμφανίζεται στο παράθυρο εξόδου σχετικό μήνυμα για την επιτυχή ή ανεπιτυχή ανάλυση ροής φορτίου [101][104].

### 3.6.2. Πρόσβαση στα αποτελέσματα της ανάλυσης

Υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μπορούμε να προσπελάσουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής φορτίου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο Διαχειριστής του

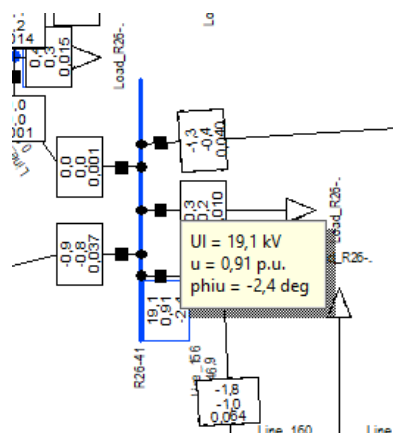


μοντέλου του Δικτύου (Network model manager) για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων καθενός στοιχείου του Δικτύου σε ομάδες. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 3.23 φαίνονται τα επίπεδα τάσης για συγκεκριμένους ζυγούς του Δικτύου, στους οποίους επικεντρώνεται η εξέταση στην παρούσα διπλωματική:

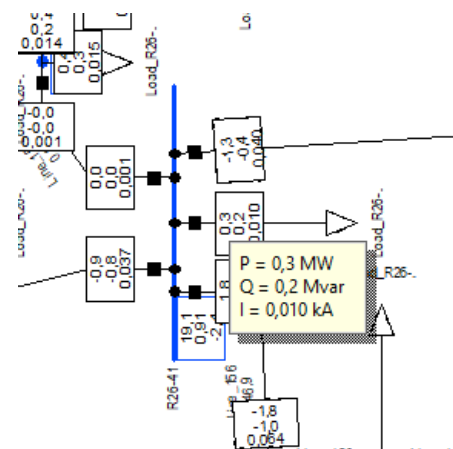
|   |            |                |     |          |         |          |          |
|---|------------|----------------|-----|----------|---------|----------|----------|
| ✓ | R22-113_7  | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,22057 | 0,91526 | -2,45239 | -8,47349 |
| ✓ | R22-113_9  | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,22035 | 0,91525 | -2,45226 | -8,47454 |
| ✓ | R22-114_8  | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,22704 | 0,91557 | -2,39534 | -8,44267 |
| ✓ | R22-117_24 | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,21834 | 0,91515 | -2,38943 | -8,48409 |
| ✓ | R22-117_5  | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,22142 | 0,91530 | -2,39153 | -8,46940 |
| ✓ | R22-120a   | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,48392 | 0,92780 | -2,42841 | -7,21942 |
| ✓ | R22-120b   | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,48392 | 0,92780 | -2,42841 | -7,21942 |
| ✓ | R22-133_70 | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,14308 | 0,91157 | -2,35758 | -8,84248 |
| ✓ | R22-133_N1 | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,14311 | 0,91157 | -2,35771 | -8,84233 |
| ✓ | R22-133_N2 | Kefalonia_v1_1 | 0,4 | 0,38286  | 0,95715 | -2,35771 | -4,28444 |
| ✓ | R22-137    | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,49432 | 0,92830 | -2,41151 | -7,16988 |
| ✓ | R22-155a   | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,59952 | 0,93331 | -2,38184 | -6,66897 |
| ✓ | R22-155b   | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,59952 | 0,93331 | -2,38184 | -6,66897 |
| ✓ | R22-181    | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,52436 | 0,92973 | -2,39284 | -7,02685 |
| ✓ | R22-206    | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,4956  | 0,92836 | -2,39694 | -7,16379 |
| ✓ | R22-214    | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,49501 | 0,92833 | -2,39708 | -7,16663 |
| ✓ | R22-23_10  | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,49139 | 0,92816 | -2,37003 | -7,18387 |
| ✓ | R22-23_41  | Kefalonia_v1_1 | 21, | 19,45658 | 0,92650 | -2,34651 | -7,34960 |

**Εικόνα 3.23:** Παράθυρο εμφάνισης αποτελεσμάτων μελέτης ροής φορτίου μέσω του Διαχειριστή μοντέλου του Δικτύου (Network model manager).

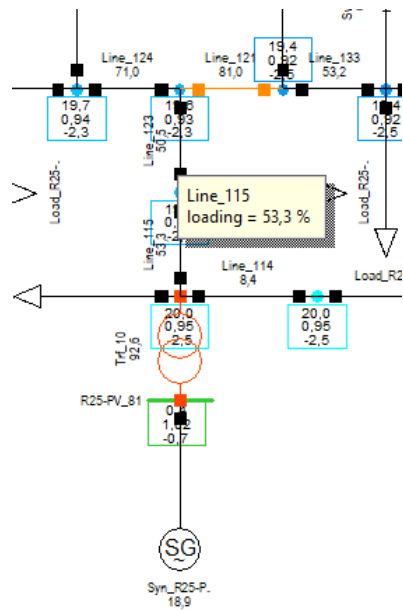
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται, επίσης, επάνω στο σχέδιο του εξεταζόμενου Δικτύου σε πλαίσια που αντιστοιχούν σε στοιχεία του Δικτύου. Τα πλαίσια αυτά αρχικά είναι άδεια, ενώ μετά την ανάλυση της ροής φορτίου σε αυτά εμφανίζονται τρεις τιμές. Εάν το πλαίσιο αντιστοιχίζεται σε ζυγό αναφοράς, τότε αυτό περιλαμβάνει ως τιμές αποτελεσμάτων την φασική τάση του ζυγού, την τάση ανά μονάδα και την γωνία (Εικόνα 3.24). Στα πλαίσια των υπόλοιπων στοιχείων του Δικτύου εμφανίζονται η ενεργός και η άεργος ισχύς, όπως επίσης και το ρεύμα που διέρχεται από αυτό το στοιχείο για συγκεκριμένο φορτίο του Δικτύου (Εικόνα 3.25). Κάθε γραμμή και μηχανή του Δικτύου φέρει επίσης και το ποσοστό φόρτισης (Εικόνες 3.26 και 3.27). Φυσικά, τα πλαίσια μπορούν να διαμορφωθούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χρήστη, κάνοντας δεξί κλικ στο επιθυμητό πλαίσιο και επιλέγοντας “Format for nodes” [101].



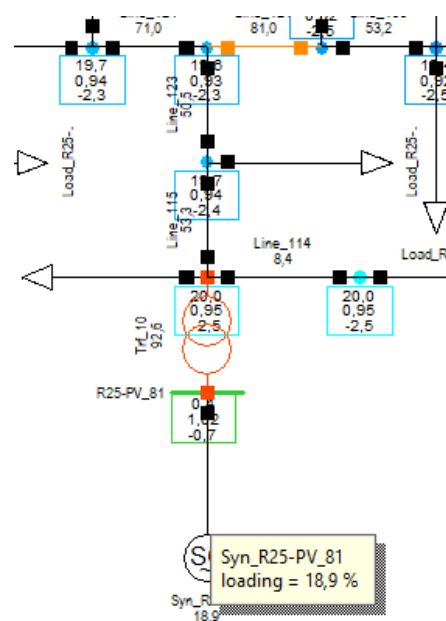
**Εικόνα 3.24:** Αποτελέσματα στο πλαίσιο που αντιστοιχεί σε ζυγό αναφοράς.



**Εικόνα 3.25:** Αποτελέσματα στο πλαίσιο που αντιστοιχεί σε φορτίο.

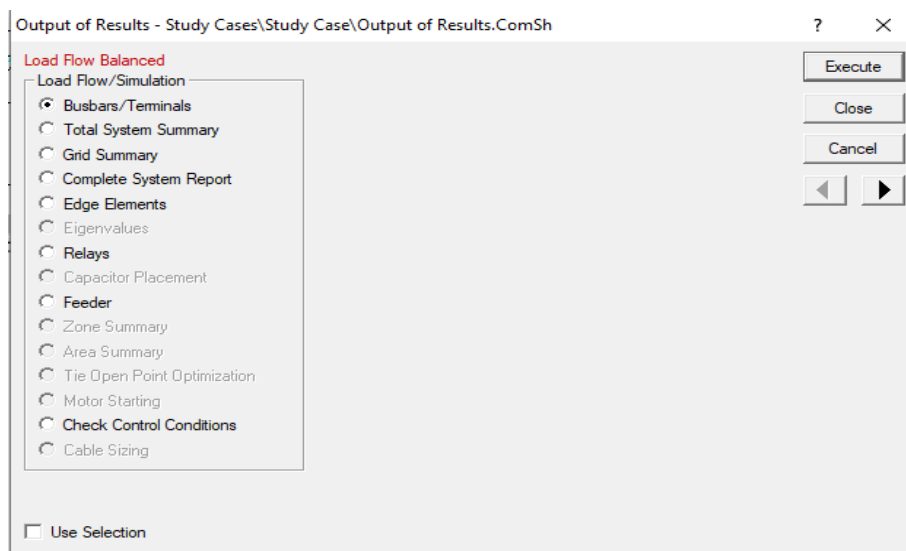


**Εικόνα 3.26:** Αποτελέσματα για το ποσοστό φόρτισης γραμμής.



**Εικόνα 3.27:** Αποτελέσματα για το ποσοστό φόρτισης γεννήτριας.

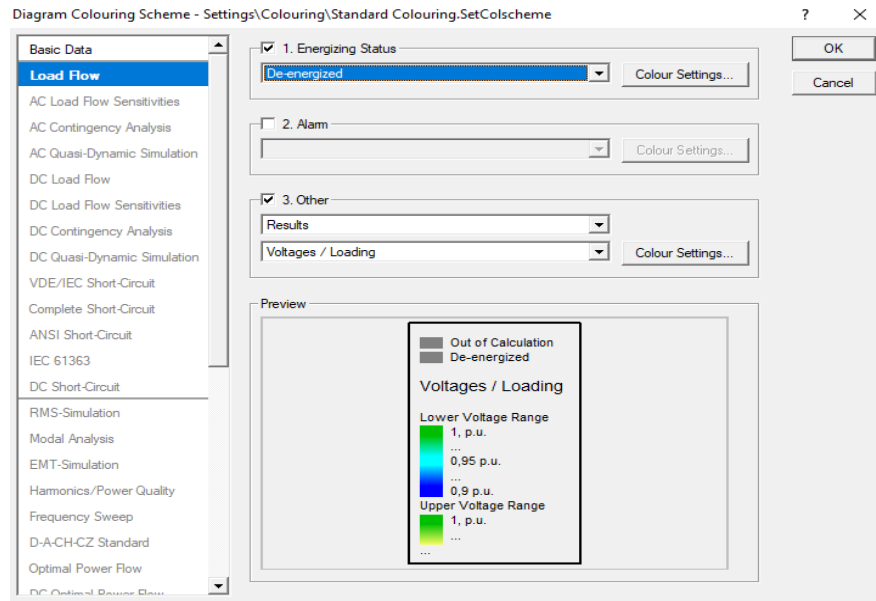
Υπάρχει, επίσης, και η δυνατότητα εξαγωγής αναφορών. Αυτό γίνεται επιλέγοντας από την γραμμή των εικονιδίων το κουμπί . Εμφανίζεται το παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα 3.28, από το οποίο ο χρήστης καλείται να επιλέξει την μορφή της αναφοράς. Στην περίπτωση που γίνεται ανάλυση ροής φορτίου, το αναδυόμενο παράθυρο είναι αυτό που εμφανίζεται στην Εικόνα 3.27. Οι αναφορές εμφανίζονται στο παράθυρο εξόδου, στο κάτω μέρος της επιφάνειας εργασίας. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα να γίνει η εξαγωγή της αναφοράς σε ξεχωριστό αρχείο.



**Εικόνα 3.28:** Επιλογή μορφής αναφοράς.

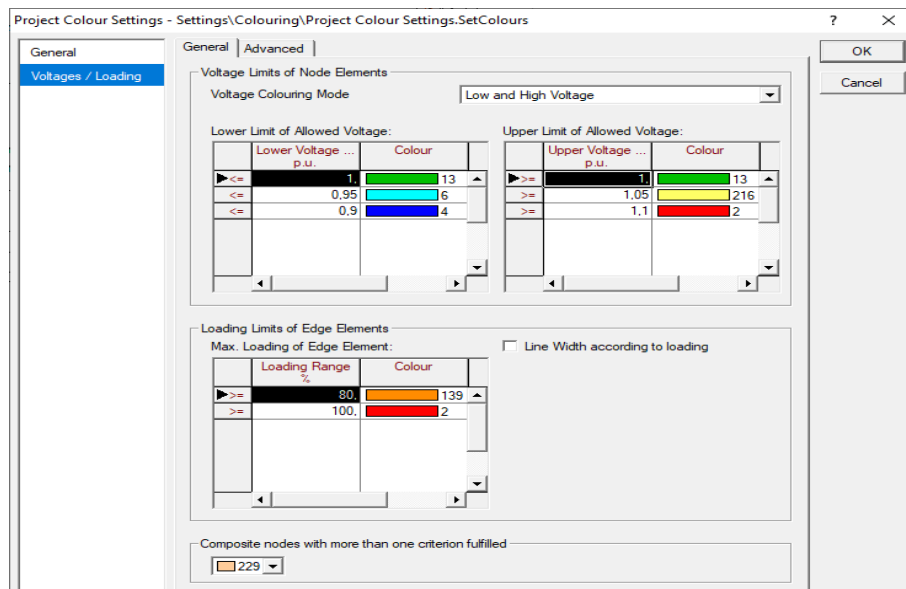
Ακόμη, είναι εφικτό μέσω διαδικασίας χρωματισμού του Δικτύου, να λάβει ο χρήστης τα απαραίτητα δεδομένα που προκύπτουν από την ανάλυση ροής φορτίου. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 3.29 φαίνεται το υπόμνημα σύμφωνα με το οποίο χρωματίζεται το εξεταζόμενο Δίκτυο

ανάλογα με τα επίπεδα τάσης στους κόμβους και ανάλογα με τα επίπεδα φόρτισης των στοιχείων.



**Εικόνα 3.29:** Παράθυρο ρυθμίσεων χρωματισμού, ανάλογα με τα επίπεδα τάσεων και φόρτισης.

Τα χρώματα που υποδεικνύουν τις τιμές της τάσης και τα επίπεδα φόρτισης μπορούν να ρυθμιστούν μέσω του παραθύρου που φαίνεται στην Εικόνα 3.30. Τα επίπεδα του φορτίου και της παραγωγής ισχύος μπορούν να ελεγχθούν μέσω της καρτέλας “Load/Generation Scaling”.

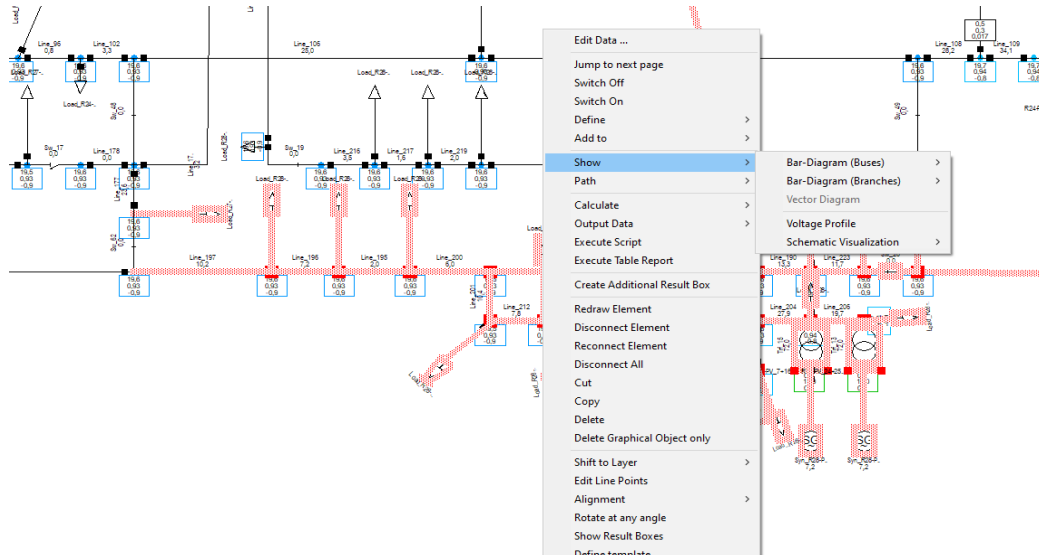


**Εικόνα 3.30:** Επιλογή χρωμάτων.

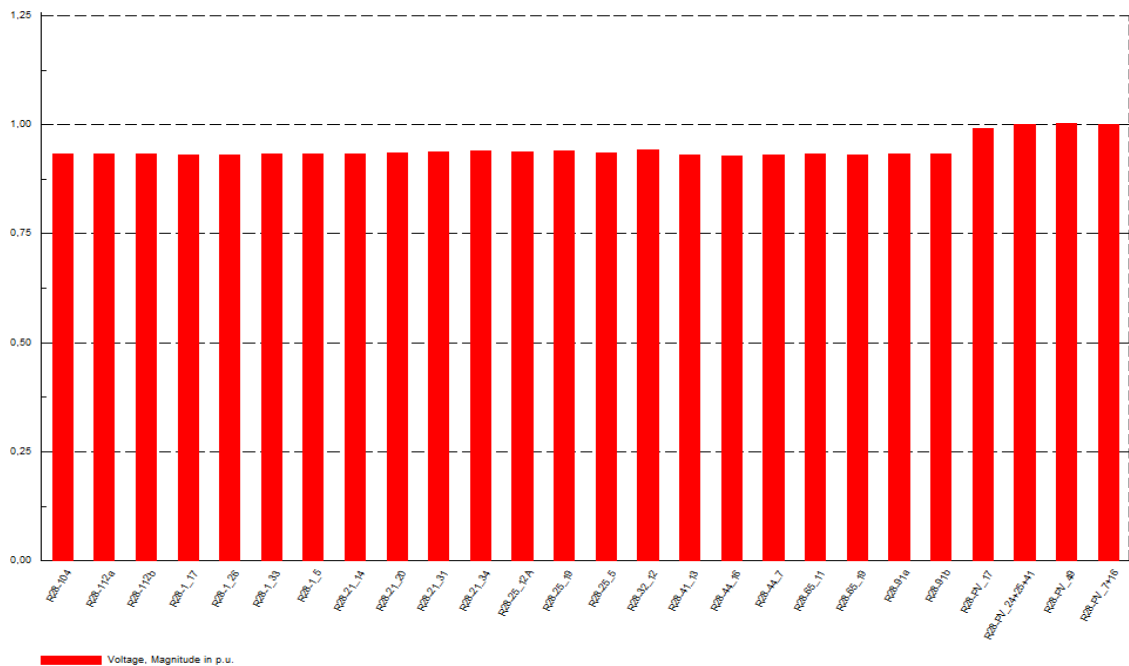
### 3.6.3. Εξαγωγή αποτελεσμάτων σε διαγράμματα

Μετά την ανάλυση ροής ισχύος, τα δεδομένα που εξάγονται είναι εύκολο να αναπαρασταθούν σε διάγραμμα. Αυτό μπορεί να γίνει επιλέγοντας αρχικά τα στοιχεία των

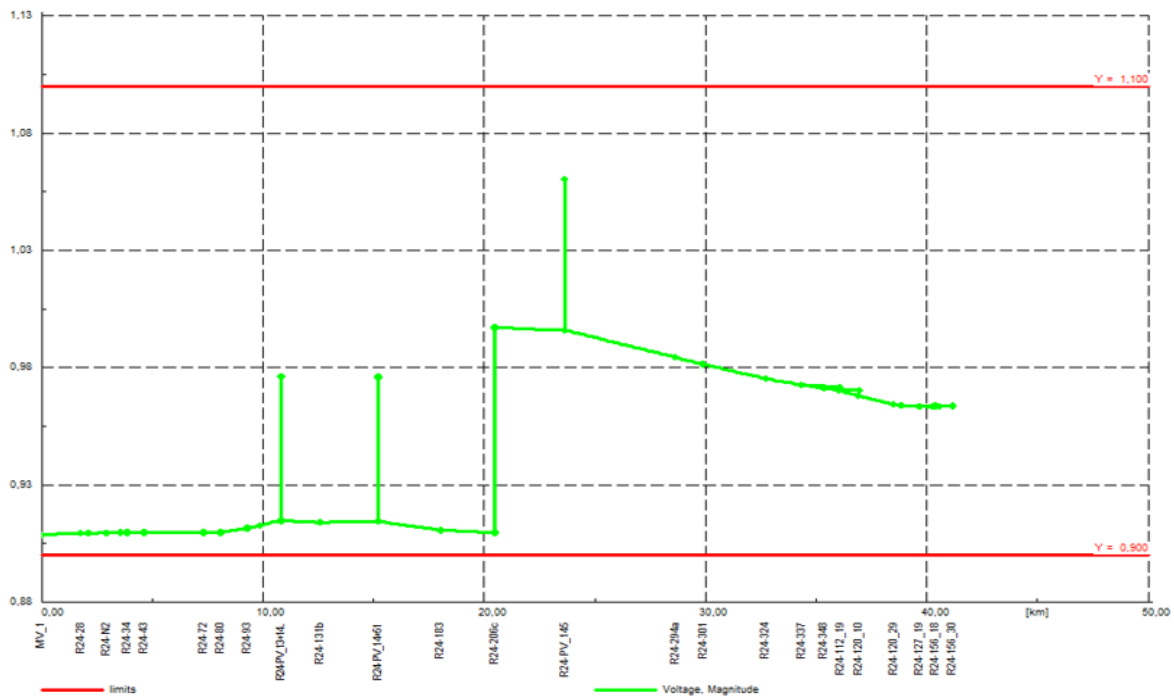
οποίων τα δεδομένα θα φαίνονται στο διάγραμμα. Στην συνέχεια, πατώντας δεξί κλικ εμφανίζονται οι επιλογές από τις οποίες επιλέγεται το “Show”. Μέσω αυτού εμφανίζονται οι μορφές που μπορεί να έχει το διάγραμμα όπως Διάγραμμα με Μπάρες (bar - Diagram) ή Προφίλ τάσης, (voltage profile) το οποίο εμφανίζει τα επίπεδα τάσης κατά μήκος της σύνδεσης των εξεταζόμενων στοιχείων.



**Εικόνα 3.31:** Επιλογή στοιχείων του Δικτύου για την απεικόνιση των δεδομένων τους σε διάγραμμα.



**Εικόνα 3.32:** Διάγραμμα με μπάρες.



**Εικόνα 3.33:** Διάγραμμα “Voltage Profile”.

### 3.7. Χρήση του PowerFactory - Συμπεράσματα

Έχοντας πλέον κατανοήσει τις βασικές λειτουργίες και τα χαρακτηριστικά του Power Factory, είναι εφικτό να γίνει προσέγγιση του θέματος που αναλύεται στην παρούσα διπλωματική από μία περισσότερο πρακτική πλευρά. Μέσω δοκιμών σε προσομοίωση του πραγματικού Δικτύου της Κεφαλονιάς, εφαρμόζοντας κυρίως την ανάλυση ροής φορτίου που περιεγράφηκε στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, λαμβάνονται αποτελέσματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να υποστούν επεξεργασία, προκειμένου να γίνει αντιληπτό το επίπεδο ανθεκτικότητας του, όπως επίσης να βρεθούν οι καταλληλότερες μέθοδοι ενίσχυσης της ανθεκτικότητας του.

Οι δυνατότητες που προσφέρει το PowerFactory, είναι ικανές έτσι ώστε να βοηθήσουν στην αποδοτικότερη ανάλυση του εξεταζόμενου Δικτύου. Η ευκολία στην χρήση, η ευελιξία στην διαμόρφωση των αποτελεσμάτων και η αυτοματοποίηση των διαδικασιών είναι μερικά πλεονεκτήματα της χρήσης του συγκεκριμένου λογισμικού, οι οποίες το καθιστούν ως το καταλληλότερο για την εφαρμογή της πρακτικής διαδικασίας που ακολουθείται στην παρούσα διπλωματική. Το επόμενο κεφάλαιο, εξηγεί αναλυτικότερα την διαδικασία που ακολουθήθηκε καθώς επίσης παρουσιάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

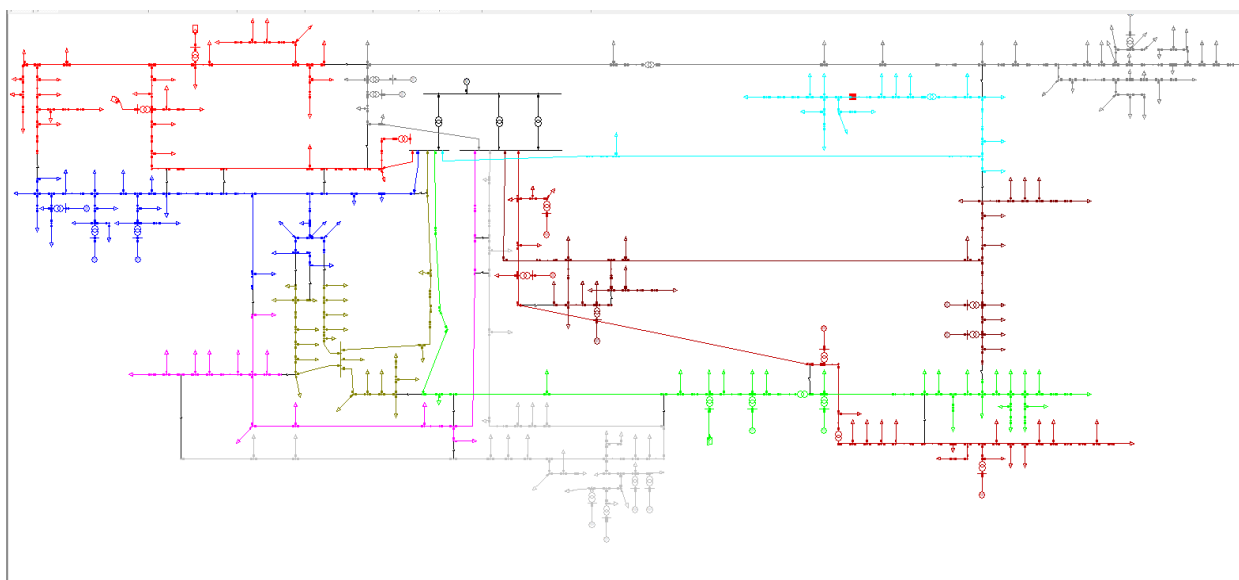
## Κεφάλαιο 4

### Εξεταζόμενες περιπτώσεις στο Δίκτυο της Κεφαλлонιάς

#### 4.1. Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήσαμε ψηφιοποιημένο το πραγματικό Δίκτυο Διανομής της Κεφαλлонιάς για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων πραγματικών πιθανών καταστάσεων θέσης αυτού ή τμημάτων αυτού εκτός λειτουργίας και εξαγωγής δεδομένων για μελέτη ορθής αντιμετώπισης και διαχείρισης της αποκατάστασης ηλεκτροδότησης των φορτίων.

Πρόκειται για διασυνδεδεμένο νησί, δηλαδή το Δίκτυο του νησιού συνδέεται με το Σύστημα Μεταφοράς της ηπειρωτικής χώρας. Ο υποβιβασμός της τάσης από Υψηλή σε Μέση γίνεται μέσω ενός μετασχηματιστή ισχύος 50 MVA και δύο παράλληλων μετασχηματιστών ισχύος 25 MVA ο καθένας.



**Εικόνα 4.1:** Προσομοίωση του Δικτύου της Κεφαλлонιάς με το πρόγραμμα: «Dlgsilent PowerFactory».

Στήθηκαν τρεις (3) διαφορετικές περιπτώσεις σεναρίων. Η εκτέλεση των προσομοιώσεων έγινε με τη χρήση του Λογισμικού που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, DigSilent PowerFactory. Συγκεκριμένα, στο Δίκτυο το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 4.1, εξετάστηκαν τα εξής σενάρια:

1. CaseStudy\_1: Μ/Σ-29 εκτός λειτουργίας.
2. CaseStudy\_2: Γραμμή-02 εκτός λειτουργίας.
3. CaseStudy\_3: Διακοπή Διασύνδεσης του Δικτύου Μεταφοράς (Τροφοδότηση μόνο με τοπικές παραγωγές).

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην συγκεκριμένη εφαρμογή την οποία χρησιμοποιήσαμε για τις προσομοιώσεις στο Δίκτυο της Κεφαλлонιάς, οι *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)* αναπαρίστανται ως σύγχρονες γεννήτριες.

Ειδικότερα, κατά την διαδικασία των δοκιμών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σημαντικοί παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση του δικτύου, όπως επίσης και κριτήρια που πρέπει να πληρούνται για την αξιοπιστία του δικτύου. Συγκεκριμένα:

- **Η τάση και η συχνότητα** κατά μήκος του εξεταζόμενου Δικτύου θα πρέπει να είναι εντός καθορισμένων ορίων ( $\pm 10\%$  δηλαδή  $0,90 - 1,1$  p.u. για την τάση και  $\pm 1\%$  για την συχνότητα δηλαδή  $49,5 - 50,5$  Hz)
- **Το μέγιστο ποσοστό φόρτισης των στοιχείων του Δικτύου** είναι απαραίτητο να μην ξεπερνά το  $100\%$  του επιπέδου φόρτισης. Προτιμάται επίσης το επίπεδο φόρτισης των στοιχείων να κυμαίνεται σε ποσοστό κάτω του  $80\%$  ώστε να υπάρχει περιθώριο ασφαλείας.
- **Ελεγχόμενη/Ηθελημένη Νησιδοποίηση:** Όταν δημιουργούνται νησίδες στο δίκτυο ως μέθοδος αντιμετώπισης ενός σφάλματος με τη διατήρηση ηλεκτροδότησης σε τμήμα του Δικτύου, θα πρέπει σε αυτές:
  1. Να υπάρχει ισοζύγιο παραγωγής - κατανάλωσης ισχύος.
  2. Να τηρούνται τα όρια τάσης και συχνότητας των γραμμών (σταθερότητα).
  3. Να τηρούνται τα θερμικά όρια των γραμμών.
  4. Η τροφοδότηση τους να γίνεται από ελεγχόμενες ΑΠΕ, οι οποίες μπορούν να εξασφαλίσουν τη ρύθμιση της συχνότητας στο τμήμα αυτό.

Επίσης, διευκρινίζεται ότι θεωρούμε πως όλοι οι σταθμοί ΑΠΕ φέρουν συσσωρευτές στο σύστημά τους, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αδιάλειπτη ηλεκτροδότηση των νησίδων χρησιμοποιώντας την περίσσεια της παραγόμενης ενέργειας που έχει αποθηκευτεί.

Τέλος, εξετάζεται η ανάγκη προσθήκης Η/Ζ (Ηλεκτροπαραγωγών Ζευγών, γεννητριών), όπου αυτό καθίσταται εφικτό, για την απόλυτη διασφάλιση τροφοδότησης των κρίσιμων φορτίων.

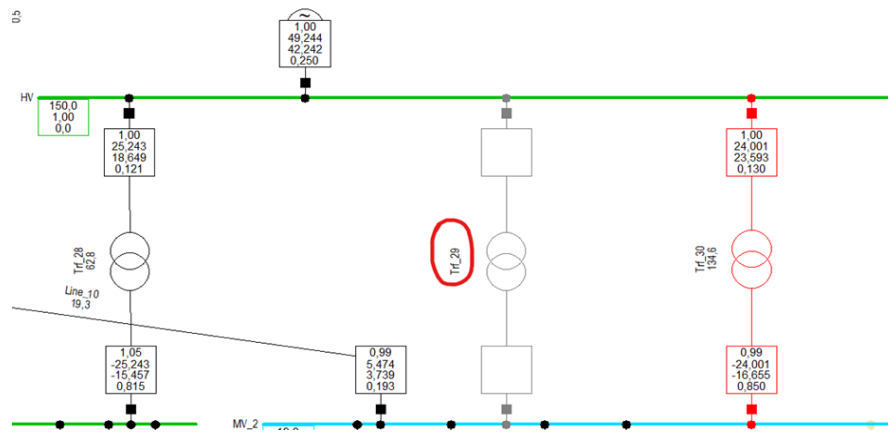
#### 4.2 Εξεταζόμενη περίπτωση 1 (CaseStudy\_1): Μετασχηματιστής 29 εκτός λειτουργίας (Transformer 29 off)

Στο σενάριο αυτό εξετάζεται η λειτουργία του Δικτύου στην περίπτωση που ο Μετασχηματιστής 29 (Μ/Σ-29), ένας από τους 2 παραλληλισμένους Μετασχηματιστές ονομαστικής ισχύος 25 MVA, τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω βλάβης. Παρατηρείται ότι, όταν ο Μ/Σ-29 βρίσκεται εκτός λειτουργίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2, τον μετασχηματισμό από την Υψηλή στην Μέση τάση τον αναλαμβάνουν οι Μ/Σ-28, ονομαστικής ισχύος 50 MVA, και ο Μ/Σ-30, ονομαστικής ισχύος 25 MVA, ο οποίος είναι παράλληλα συνδεδεμένος με τον Μ/Σ-29.

Αναλύοντας τις ροές φορτίου, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στην προσπάθεια να καλυφθεί η ζήτηση των φορτίων από τον Μ/Σ-30, αυτός φορτίζεται σε υψηλά επίπεδα ( $134,6\%$  άνω του  $100\%$ ). **Το αποτέλεσμα αυτό δεν είναι επιθυμητό.**

Προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα που παρουσιάζεται, δηλαδή η υπερφόρτιση του Μ/Σ-30 ονομαστικής ισχύος 25 MVA, για την κάλυψη των φορτίων, πραγματοποιούνται δοκιμές με κατάλληλες ρυθμίσεις, έτσι ώστε να πετύχουμε τις βέλτιστες δυνατές για τον κατά δύναμη αναλογικό διαμοιρασμό του φορτίου στους δύο εν λειτουργία μετασχηματιστές.



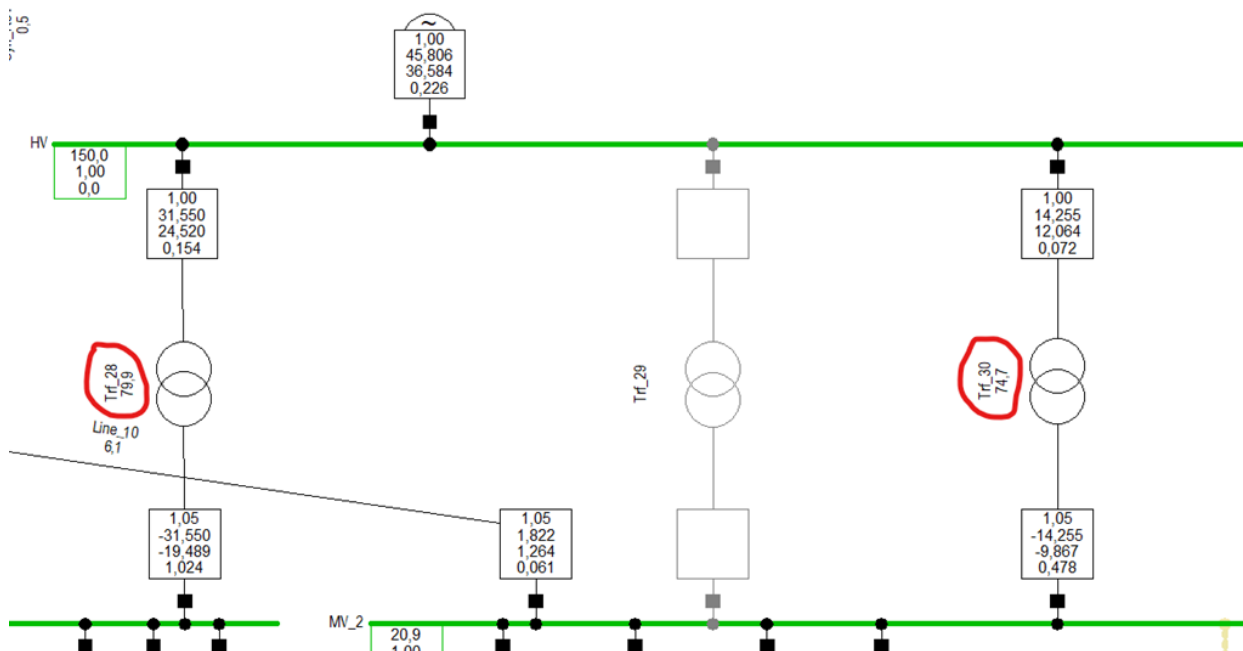


Εικόνα 4.2: M/Σ-29 εκτός λειτουργίας.

Για να επιτευχθεί ο επιθυμητός διαμοιρασμός, κρίνεται αναγκαία η νησιδοποίηση συγκεκριμένων τμημάτων του Δικτύου. Σε αυτά τα τμήματα στόχος μας είναι να περιλαμβάνονται τοπικές παραγωγές από τις εγκατεστημένες ΑΠΕ (είτε απευθείας είτε μέσω αποθήκευσης της περίσσειας παραγόμενης ενέργειας σε μπαταρίες) ή, σε περίπτωση αδυναμίας κάλυψης του φορτίου, εγκατάσταση H/Z, ώστε να εξασφαλίζεται η κατανάλωση των φορτίων των σχηματιζόμενων νησίδων. Ένας ακόμη σημαντικός στόχος είναι η τήρηση των ορίων, όσον αφορά την πτώση τάσης και την φόρτιση των στοιχείων.

- **1<sup>η</sup> Περίπτωση (Case\_1):**

Αλλάζοντας την κατάσταση ορισμένων διακοπών (ανοίγουν οι διακόπτες 10, 12, 15, 17, 21, 23, 24, 26, 29 και 37, ενώ κλείνουν οι διακόπτες 27, 46, 47, 50, 55, 56, 57, 58 και 62), προκύπτει το εξής αποτέλεσμα:



Εικόνα 4.3: Οι M/Σ-28 και M/Σ-30 είναι σε αποδεκτά επίπεδα φόρτισης.

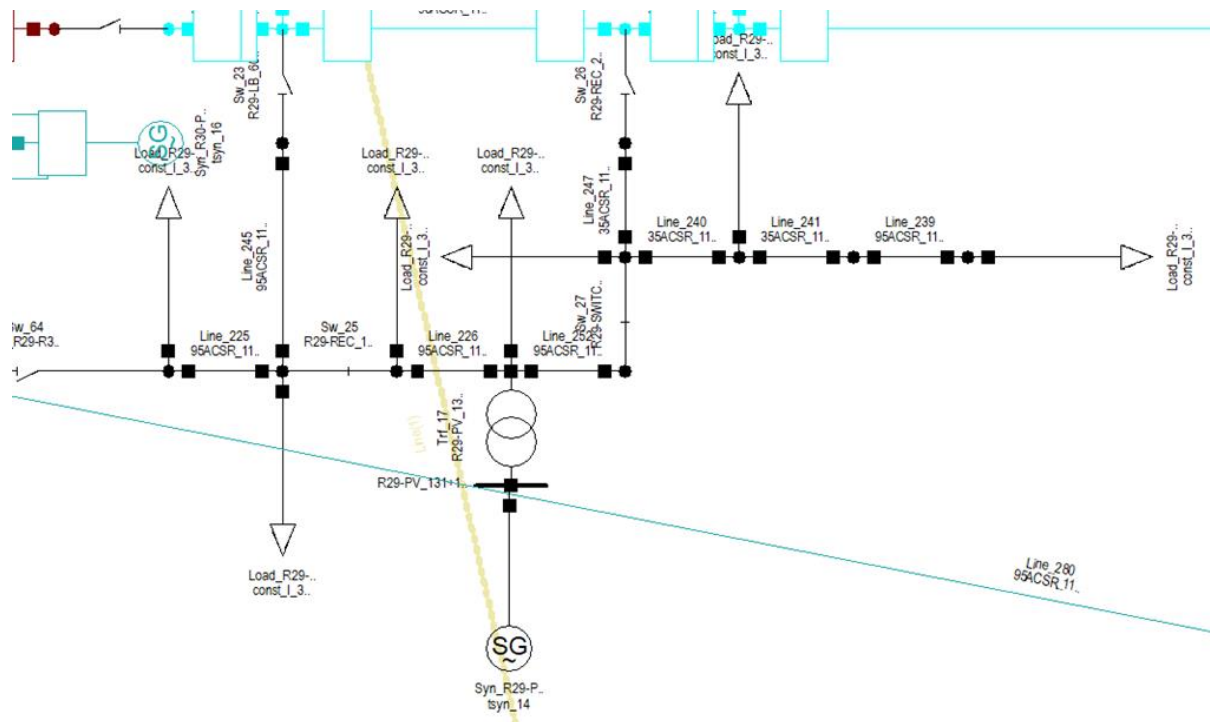
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3, ενώ αρχικά η φόρτιση του Μ/Σ-30 ήταν αρκετά υψηλή, μετά τους αναφερόμενους χειρισμούς στο Δίκτυο το φορτίο αυτού είναι εντός των ορίων αντοχής του (74,7%).

Παρ' όλα αυτά, η πτώση τάσης σε ορισμένα στοιχεία του Δικτύου προκύπτει εκτός ορίων και μάλιστα η απόκλιση από τα όρια είναι μεγάλη. Στην Εικόνα 4.4 φαίνονται ενδεικτικά οι τιμές της πτώσης τάσης που προκύπτουν μετά από ανάλυση ροής φορτίου στο Δίκτυο, σε ορισμένους κόμβους του Δικτύου:

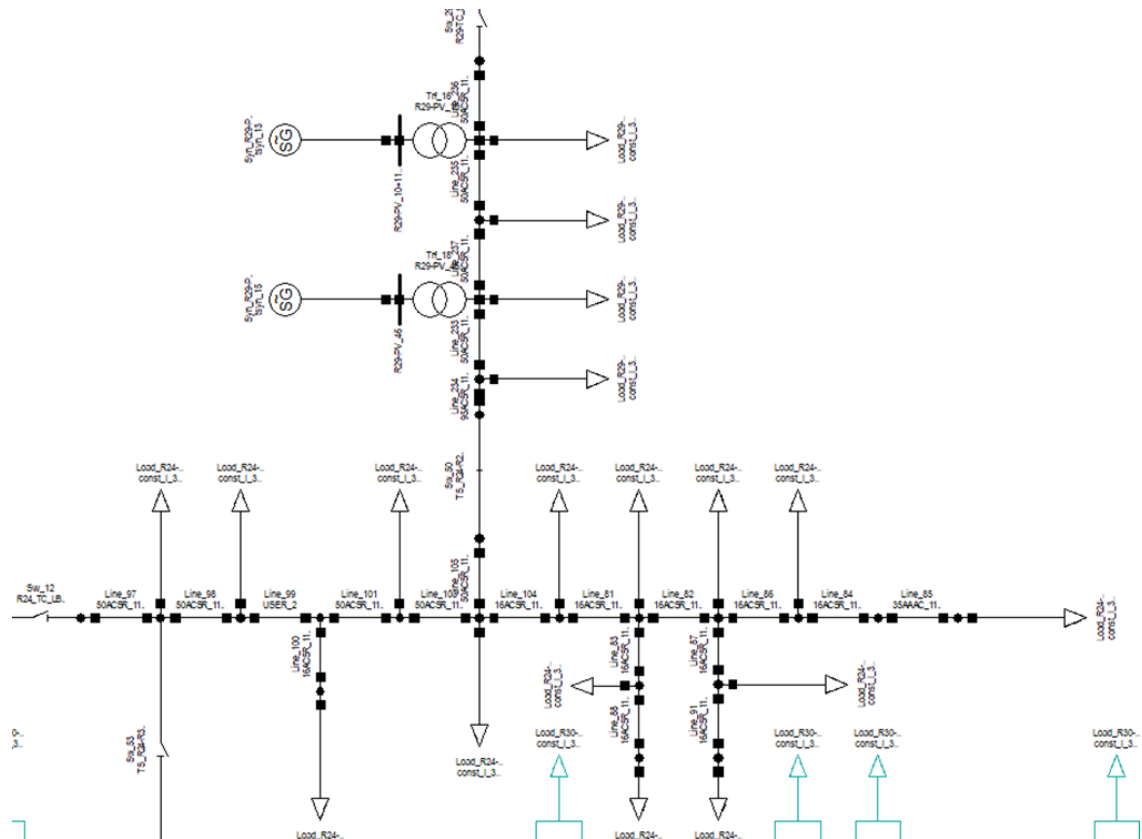
| Busbars   |                                |                           |                             |           |        |
|-----------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------|--------|
| Name      | Nom. L-L V U <sub>I</sub> , kV | Magnitu <sub>I</sub> , kV | Magnitu <sub>U</sub> , p.u. | Angle deg | du %   |
| R24-112_1 | 21                             | 12,53                     | 0,60                        | -22,73    | -40,34 |
| R24-120_1 | 21                             | 12,54                     | 0,60                        | -22,63    | -40,28 |
| R24-120_2 | 21                             | 12,40                     | 0,59                        | -22,48    | -40,94 |
| R24-123_1 | 21                             | 12,38                     | 0,59                        | -22,45    | -41,06 |
| R24-123_2 | 21                             | 12,37                     | 0,59                        | -22,45    | -41,07 |
| R24-123_3 | 21                             | 12,39                     | 0,59                        | -22,46    | -41,00 |
| R24-126_1 | 21                             | 12,37                     | 0,59                        | -22,45    | -41,08 |
| R24-127_1 | 21                             | 12,37                     | 0,59                        | -22,45    | -41,07 |
| R24-127_2 | 21                             | 12,37                     | 0,59                        | -22,44    | -41,09 |

**Εικόνα 4.4:** Ενδεικτικές τιμές της πτώσης τάσης που εμφανίζεται στους ζυγούς του Δικτύου.

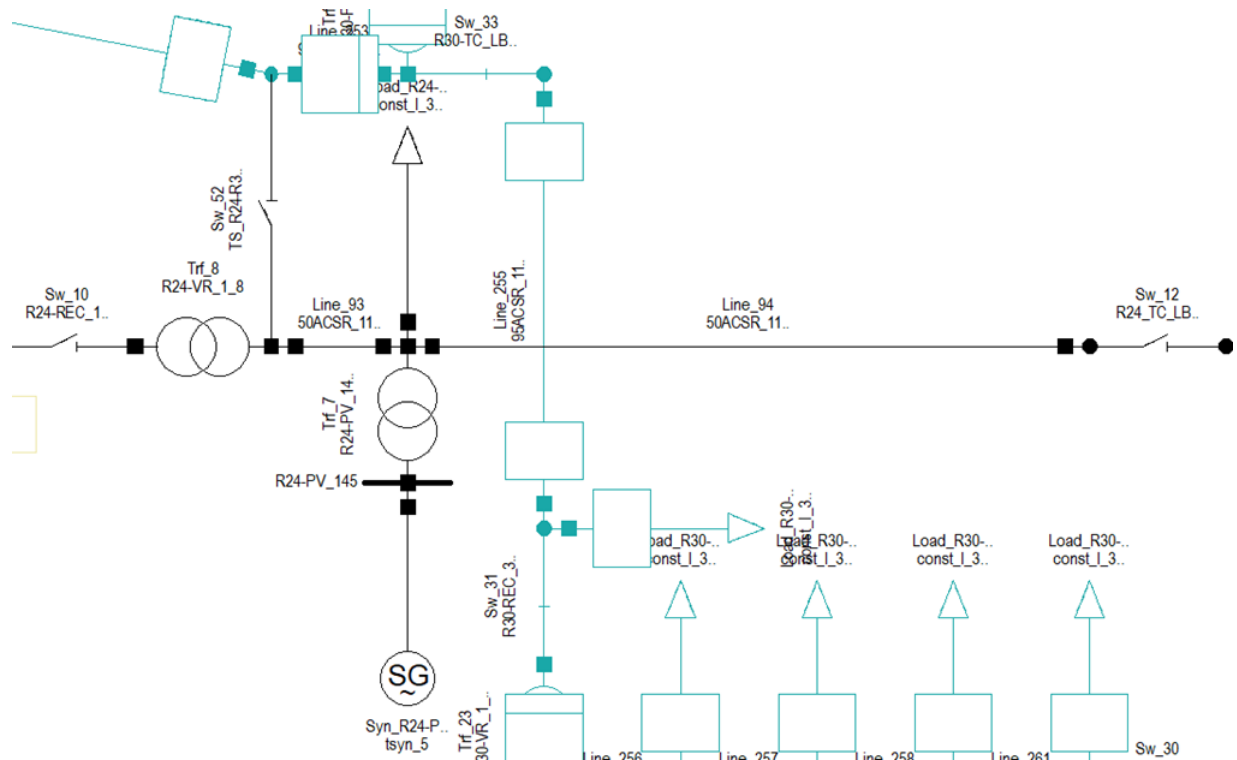
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι: με την αλλαγή της κατάστασης των παραπάνω διακοπών, δημιουργούνται στο Δίκτυο “νησίδες”, οι οποίες τροφοδοτούνται μόνο από τοπική παραγωγή και όχι από το Δίκτυο. Οι νησίδες φαίνονται στις παρακάτω εικόνες (4,5 και 6):



**Εικόνα 4.5:** Νησίδα\_1.



Εικόνα 4.6: Νησίδα\_2.

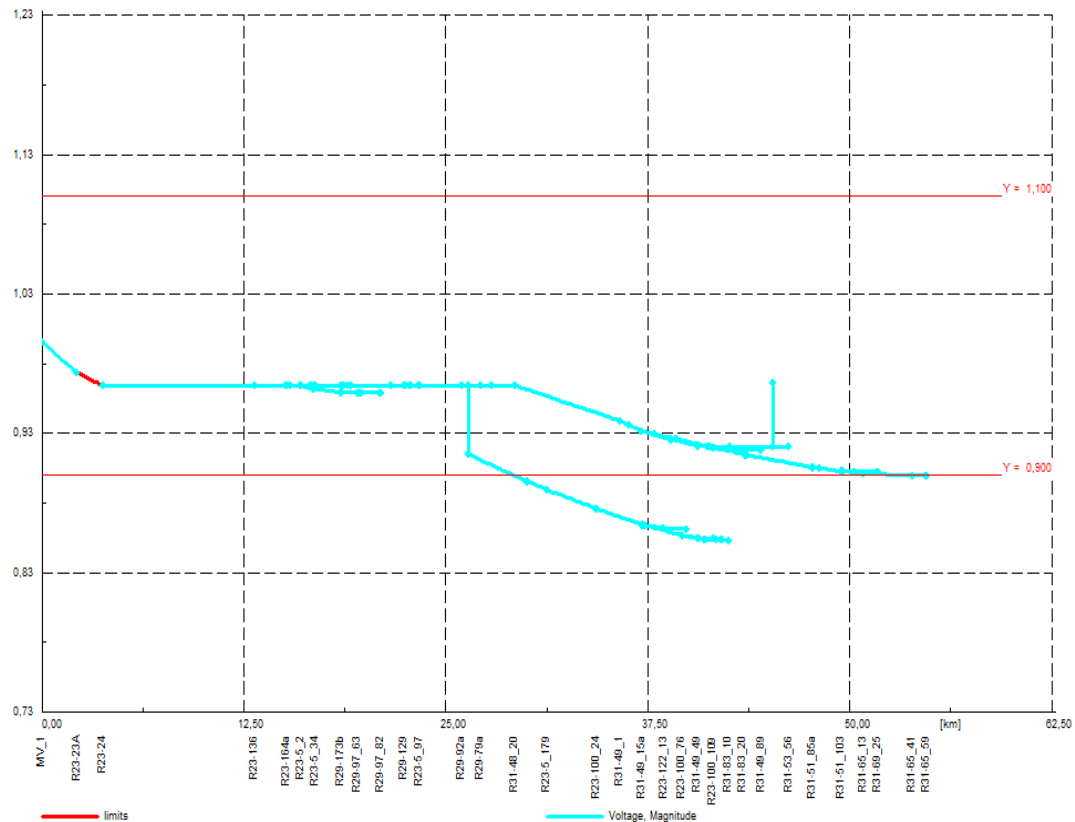


Εικόνα 4.7: Νησίδα\_3.

- **2<sup>η</sup> Περίπτωση (Case\_2):**

Όπως και στην 1η Περίπτωση (case\_1), γίνεται προσπάθεια μέσω χειρισμών να μειωθεί η πτώση τάσης στα στοιχεία εκείνα όπου καταγράφονται υψηλές τιμές, έτσι ώστε αυτή να περιοριστεί στα επιθυμητά όρια για όλα τα στοιχεία.

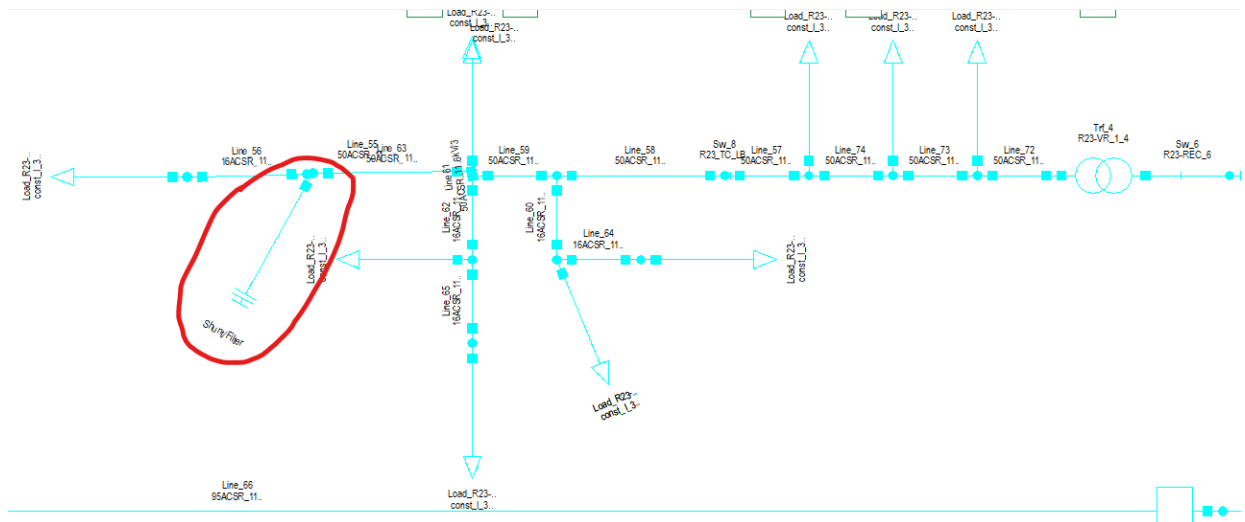
Γίνεται αρχικά προσπάθεια να μειωθεί η πτώση τάσης στα τμήματα του Δικτύου που παραμένουν σε σύνδεση με αυτό (δηλαδή δεν αποτελούν στοιχεία των “νησίδων”). Με βάση αυτό, η μόνη αναχώρηση η οποία εμφανίζει πτώση τάσης κάτω των επιτρεπτών ορίων είναι η P-230. Στην Εικόνα 4.8 εμφανίζεται διάγραμμα το οποίο εμφανίζει τις τάσεις κατά μήκος της αναχώρησης P-230. Με αυτήν την απεικόνιση γίνεται αντιληπτό ότι τα επίπεδα τάσης σε ορισμένους κόμβους του Δικτύου είναι εκτός των επιθυμητών ορίων:



**Εικόνα 4.8:** Διάγραμμα πτώσης τάσης κατά μήκος της αναχώρησης P-230.

Επιπλέον, η Γραμμή-70, η οποία εξυπηρετεί την συγκεκριμένη αναχώρηση, φορτίζεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα 85,4%. Θα ήταν προτιμότερο η φόρτιση της γραμμής να ήταν σε χαμηλότερα επίπεδα.

Δοκιμάζουμε την εγκατάσταση πυκνωτή στον κόμβο P-23-100\_109 (Εικόνα 4.9). Σύμφωνα με συγκεκριμένες προδιαγραφές για τους αποζεξίμους πυκνωτές, οι χαρακτηριστικές τιμές που ορίζονται, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.10, πρέπει να είναι της τάξεως των kVar [105]. Με χαρακτηριστική τιμή ισχύος εξόδου 300 kVA, όπως προκύπτει, η πτώση τάσης δεν οριοθετείται στα επιθυμητά επίπεδα ( $\pm 10\%$  δηλαδή 0,90 - 1,1 επί της ονομαστικής τιμής της τάσης).

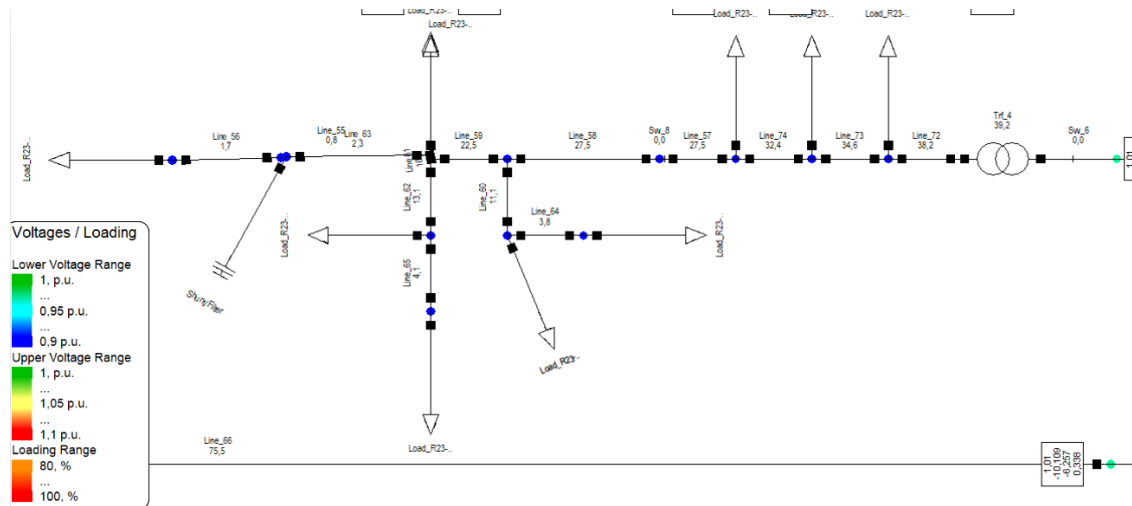


**Εικόνα 4.9:** Προσθήκη πυκνωτή στο Δίκτυο.

| General                                                  |                                                                                                  | Measurement Report                                                                    |                                          | Zero Sequence/Neutral Conductor      |                                  |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Name                                                     | <input type="text" value="Shunt/Filter"/>                                                        |                                                                                       |                                          |                                      |                                  |
| Terminal                                                 | <input type="button" value="▼"/> <input type="button" value="→"/>                                | <input type="text" value="Kefalonia_v1_1\R23-100_109\Cub_1"/>                         | <input type="text" value="R23-100_109"/> |                                      |                                  |
| Zone                                                     | <input type="button" value="→"/> ...                                                             |                                                                                       |                                          |                                      |                                  |
| Area                                                     | <input type="button" value="→"/> ...                                                             |                                                                                       |                                          |                                      |                                  |
| <input type="checkbox"/> Out of Service                  |                                                                                                  |                                                                                       |                                          |                                      |                                  |
| System Type                                              | <input type="text" value="AC"/> ▼                                                                | Technology                                                                            | <input type="text" value="3PH-Y"/> ▼     |                                      |                                  |
| Nominal Voltage                                          | <input type="text" value="20"/> kV                                                               |  |                                          |                                      |                                  |
| Shunt Type                                               | <input type="text" value="C"/> ▼                                                                 |                                                                                       |                                          |                                      |                                  |
| Input Mode                                               | <input type="text" value="Default"/> ▼ ...                                                       |                                                                                       |                                          |                                      |                                  |
| Controller                                               |                                                                                                  |                                                                                       |                                          |                                      |                                  |
| Max. No. of Steps                                        | <input type="text" value="1"/>                                                                   | Max. Rated Reactive Power <input type="text" value="0,3"/> Mvar                       |                                          |                                      |                                  |
| Act.No. of Step                                          | <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/> | Actual Reactive Power <input type="text" value="0,3"/> Mvar                           |                                          |                                      |                                  |
| <input type="checkbox"/> According to Measurement Report |                                                                                                  |                                                                                       |                                          |                                      |                                  |
| Design Parameter (per Step)                              |                                                                                                  |                                                                                       | Layout Parameter (per Step)              |                                      |                                  |
| Rated Reactive Power, C                                  | <input type="text" value="0,3"/> Mvar                                                            | <input type="button" value="→"/>                                                      | Susceptance                              | <input type="text" value="750."/> uS | <input type="button" value="→"/> |
| Loss Factor, tan(delta)                                  | <input type="text" value="0."/> Mvar                                                             |                                                                                       | Parallel Conductance                     | <input type="text" value="0."/> uS   |                                  |

**Εικόνα 4.10:** Ρύθμιση των χαρακτηριστικών τιμών του πυκνωτή.

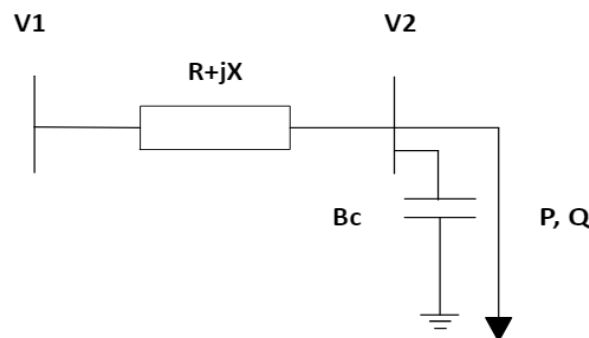
Επαναλαμβάνουμε σειρά δοκιμών με μεγαλύτερες τιμές kVar για τον πυκνωτή. Τελικώς προκύπτει ότι στην προκειμένη περίπτωση η χρήση του πυκνωτή δεν ενδείκνυται, καθώς δεν προκύπτουν ικανοποιητικά και αποδεκτά αποτελέσματα σε καμία από τις δοκιμές. Η Εικόνα 4.11 απεικονίζει τμήμα του Δικτύου στο οποίο, όπως υποδεικνύει και το υπόμνημα, η πτώση τάσης των κόμβων προκύπτει κάτω του 0,9 p.u.



**Εικόνα 4.11:** Πτώση τάσης εκτός ορίων με την εγκατάσταση πυκνωτή.

Σε συνέχεια των δοκιμών που περιεγράφηκαν παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι αυξάνοντας την τιμή της αέργου ισχύος που εγχέει ο πυκνωτής (kVar), η πτώση τάσης στα στοιχεία του Δικτύου μπορεί να μειωθεί σε κάποιο βαθμό. Οι προδιαγραφές για τις τιμές των χρησιμοποιούμενων διαθέσιμων πυκνωτών, όμως, δεν συνιστούν την αύξηση της τιμής της αέργου ισχύος σε επίπεδα Mvar, όπως απαιτείται για την σωστή ρύθμιση της τάσης στην συγκεκριμένη αναχώρηση. Επιπλέον, με την αύξηση της αέργου ισχύος παρατηρείται υπερφόρτιση των γραμμών. Γίνονται επίσης δοκιμές εγκατάστασης και σε άλλους κόμβους στην συγκεκριμένη περιοχή του Δικτύου, χωρίς ωστόσο η πτώση τάσης να υποχωρεί κάτω του ορίου του |10%| της ονομαστικής τάσης.

Το παραπάνω συμπέρασμα αποδεικνύεται και από την σχέση που συνδέει την πτώση τάσης κατά μήκος του Δικτύου σε σχέση με την άεργο ισχύ που εγχέει ο πυκνωτής σε αυτό. Η άεργος ισχύς που εγχέεται από τον πυκνωτή αντισταθμίζει την ζήτηση αέργου ισχύος του συστήματος και επομένως αυξάνει την τάση.



**Εικόνα 4.12:** Υπολογισμός πτώσης τάσης στο Δίκτυο.

Λαμβάνοντας υπόψη το δίκτυο που φαίνεται στην Εικόνα 4.12, ισχύει η σχέση:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{R P + X(Q - Q_c)}{V} \quad (4.1)$$

Όπου:

- $\Delta V$ : η πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής,

- R: αντίσταση της γραμμής,
- X: αντίδραση της γραμμής,
- Q: η άεργος ισχύς του φορτίου,
- QC: η άεργος ισχύς που παράγει ο πυκνωτής,
- V: η τάση του ζυγού του φορτίου.

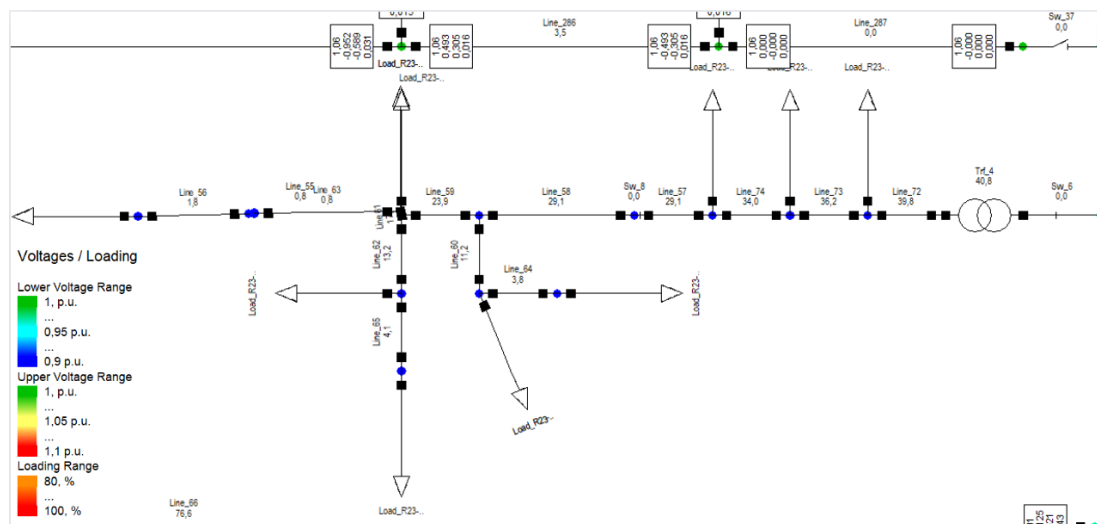
Το ρεύμα της γραμμής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$I = \sqrt{\frac{P^2 + (Q - Q_c)^2}{V}} \quad (4.2)$$

Επομένως, η άεργος ισχύς που παράγει ο πυκνωτής  $Q_C$  πρέπει να ρυθμιστεί έτσι ώστε να αντισταθμίζει κατάλληλα την άεργο ισχύ του φορτίου, προκειμένου το ρεύμα της γραμμής να μειωθεί και η φόρτιση των γραμμών να παραμένει σε χαμηλά ποσοστά.

- **3η Περίπτωση (Case\_3):**

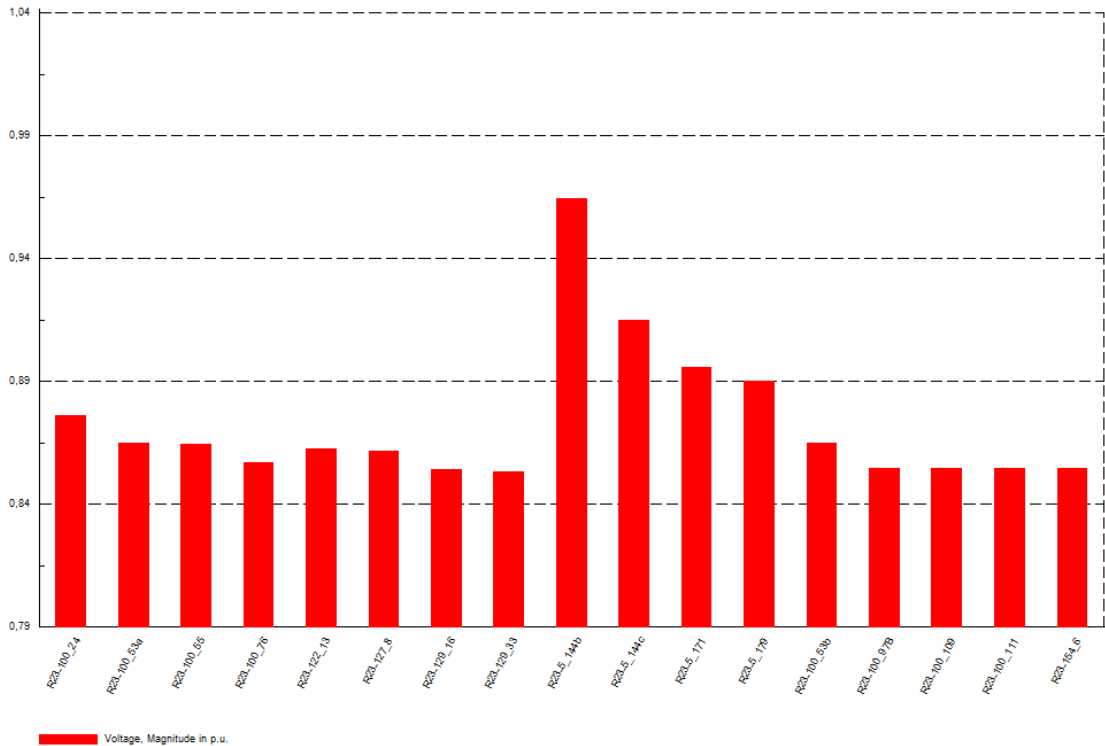
Εφόσον η αρχική προσπάθεια εγκατάστασης πυκνωτή για τον περιορισμό της πτώσης τάσης εντός των επιθυμητών ορίων δεν ήταν επιτυχής, γίνεται δοκιμή στην οποία τοποθετείται Ηλεκτροπαράγωγο Ζεύγος (H/Z) κατά μήκος της αναχώρησης P-230, όπου παρατηρείται μεγάλη πτώση τάσης στο διασυνδεδεμένο Δίκτυο, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.13. Στην Εικόνα 4.14 αναπαρίσταται διάγραμμα των επιπέδων των τάσεων των κόμβων του τμήματος του Δικτύου της Εικόνας 4.13, ενώ στην Εικόνα 4.15 εμφανίζεται η θέση στην οποία τοποθετείται το H/Z.



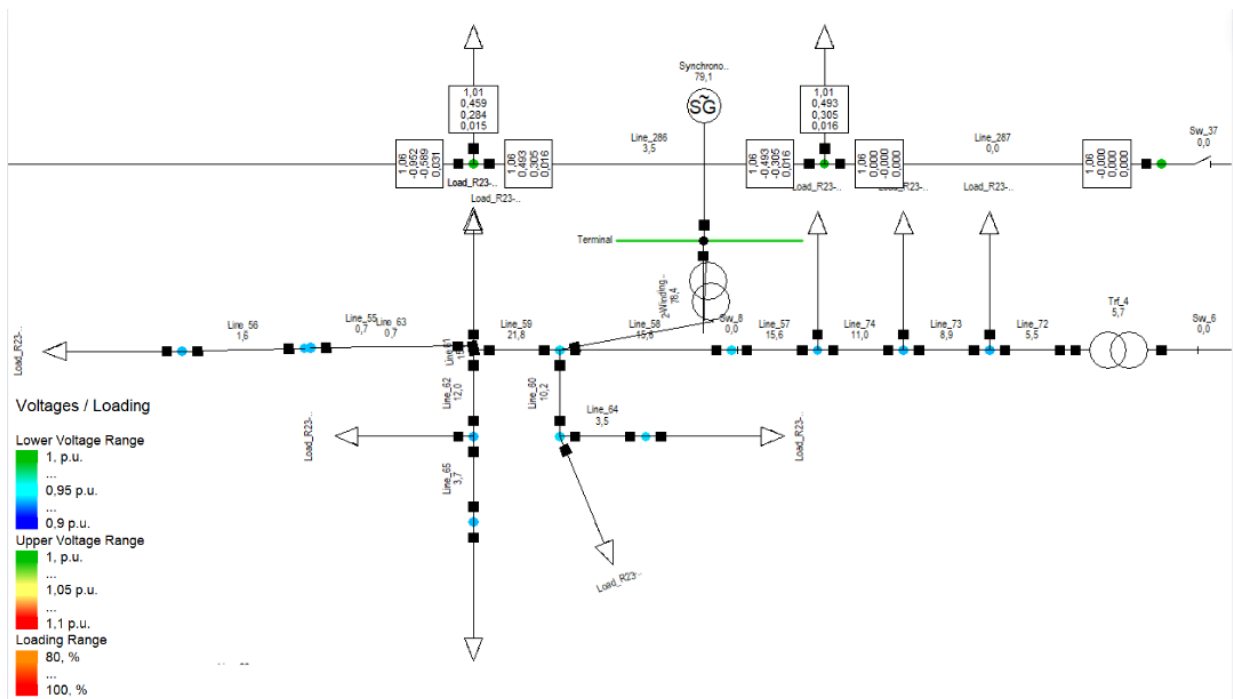
**Εικόνα 4.13:** Αναχώρηση P-230, στην οποία καταγράφεται μεγάλη πτώση τάσης πριν την εγκατάσταση H/Z.

Οι χαρακτηριστικές τιμές του H/Z (MVA γεννήτριας, ισχύς μετασχηματιστή) επιλέγονται ως οι ελάχιστες δυνατές μετά από δοκιμές, έτσι ώστε η παραγωγή ισχύος από αυτό να καλύπτει πλήρως την ζήτηση ισχύος από τα φορτία του τμήματος του Δικτύου όπως επίσης θα πρέπει να τηρούνται τα όρια για τα επίπεδα φόρτισης των στοιχείων.





**Εικόνα 4.14:** Επίπεδα τάσης κατά μήκος της αναχώρησης P-230.



**Εικόνα 4.15:** Προσθήκη ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (H/Z) κατά μήκος της αναχώρησης P-230.

Στην περίπτωση αυτή, επομένως, επιλέγεται τελικά Γεννήτρια (H/Z) ονομαστικής ισχύος 5,5 MVA και Μετασχηματιστής ονομαστικής ισχύος 5,5 MVA. Είναι σημαντικό οι δύο συσκευές να είναι κατάλληλα διαστασιολογημένες και συμβατές μεταξύ τους, ώστε να λειτουργούν αποτελεσματικά και με ασφάλεια. Για να μπορεί ο μετασχηματιστής να διαχειρίζεται την ισχύ

που παράγεται από τη γεννήτρια συνίσταται να μην είναι σημαντικά μικρότερης ισχύος από την γεννήτρια, γιατί αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει υπερφόρτωση ή ακόμα και καταστροφή. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.13, οι κόμβοι στο τμήμα του Δικτύου που εμφανίζουν πτώση τάσης εκτός των επιθυμητών ορίων εμφανίζονται με έντονο μπλε χρώμα, σύμφωνα και με το υπόμνημα της εικόνας πριν την εγκατάσταση του Η/Ζ. Μετά την εγκατάσταση του Η/Ζ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.15, οι κόμβοι εμφανίζονται με γαλάζιο χρώμα, το οποίο υποδεικνύει ότι η πτώση τάσης κατά μήκος της αναχώρησης P-230 είναι εντός του επιθυμητού εύρους  $|10\%|$  επί της ονομαστικής τιμής της τάσης.

#### • 4<sup>η</sup> Περίπτωση (Case\_4):

Σε αυτή την περίπτωση, δίνεται προσοχή στις σχηματιζόμενες νησίδες και στον έλεγχο και την ρύθμιση της τάσης εντός αυτών, καθώς στις προηγούμενες περιπτώσεις πραγματοποιήθηκαν δοκιμές οι οποίες εξασφαλίζουν ότι το διασυνδεδεμένο Δίκτυο **δεν** εμφανίζει πλέον τάσεις εκτός των επιθυμητών ορίων.

Αρχικά γίνεται έλεγχος στο ισοζύγιο παραγωγής – κατανάλωσης και καταγράφονται τα φορτία κάθε νησίδας. Είναι απαραίτητο, για τον σωστό έλεγχο της τήρησης των ορίων, η παραγωγή που τροφοδοτεί την κάθε νησίδα να καλύπτει την ισχύ που απαιτούν τα φορτία. Αρχικά υπολογίζεται το συνολικό φορτίο της νησίδας\_1. Η Εικόνα 4.16 απεικονίζει Πίνακα με τις τιμές των φορτίων της συγκεκριμένης νησίδας:

|   | Name            | Terminal StaCubic | Terminal Busbar | Act.Pow. MW | React.Pow. Mvar | App.Pow. MVA | Pow.Fact. |
|---|-----------------|-------------------|-----------------|-------------|-----------------|--------------|-----------|
| ▶ | Load_R29-10_18a |                   | R29-10_18a      | 0,037       | 0,023           | 0,04356      | 0,84928   |
| ▶ | Load_R29-10_18b |                   | R29-10_18b      | 0,095       | 0,059           | 0,11183      | 0,84950   |
| ▶ | Load_R29-X_31   |                   | R29-X_31        | 0,404       | 0,25            | 0,47509      | 0,85035   |
| ▶ | Load_R29-10_36  |                   | R29-10_36       | 0,035       | 0,021           | 0,04081      | 0,85749   |
| ▶ | Load_R29-2_35   |                   | R29-2_35        | 0,011       | 0,007           | 0,01303      | 0,84366   |
| ▶ | Load_R29-2_62   |                   | R29-2_62        | 0,081       | 0,05            | 0,09518      | 0,85093   |

Εικόνα 4.16: Φορτία νησίδας\_1.

Συνολικό φορτίο:  $S=0,7795$  MVA,  $P=0,663$  MW,  $Q=0,41$  MVar

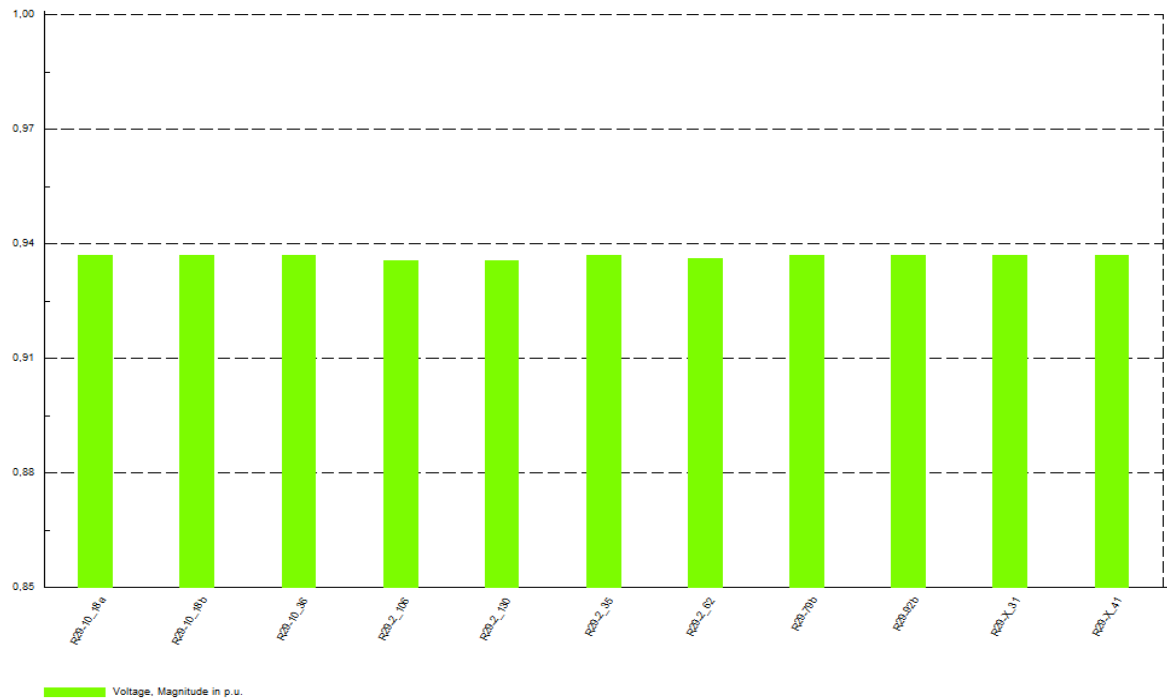
Από την μονάδα παραγωγής της νησίδας\_1 είναι εφικτή παραγωγή ισχύος έως 20 MVA:

Equipment Type Library\Synchronous Machines\tsyn\_14.TypeSym

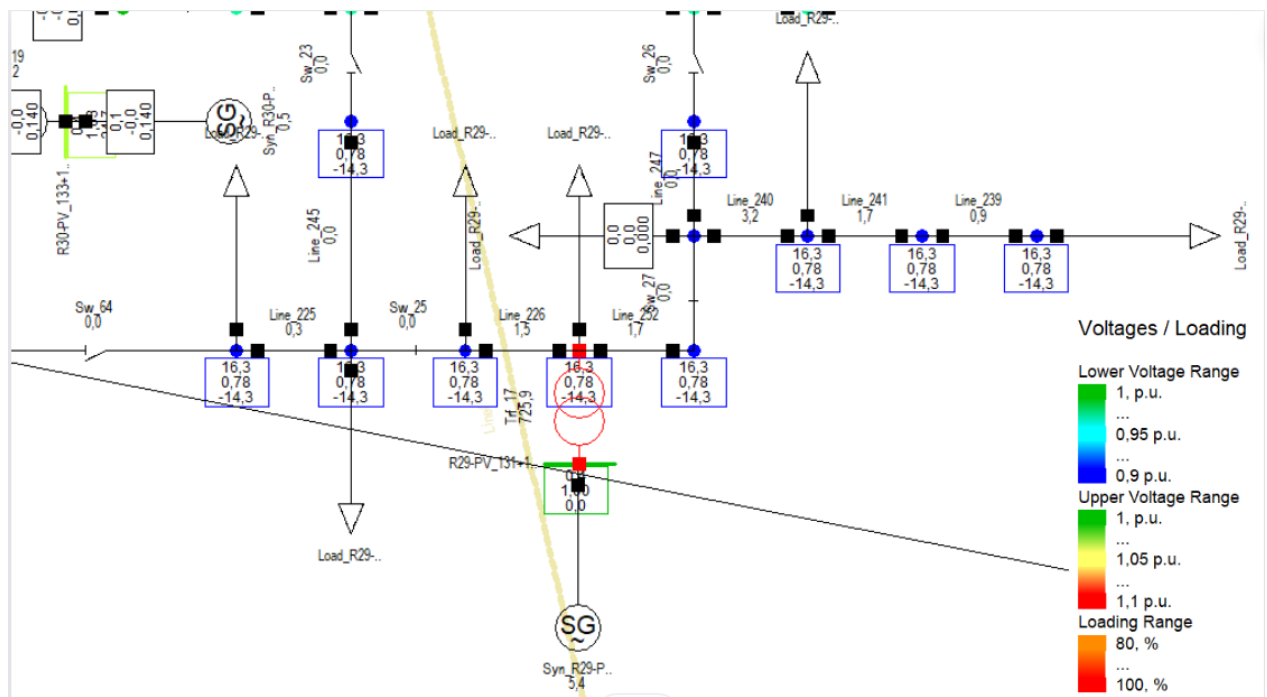
|                        |         |     |
|------------------------|---------|-----|
| Name                   | tsyn_14 |     |
| Nominal Apparent Power | 20      | MVA |
| Nominal Voltage        | 0,4     | kV  |
| Power Factor           | 0,8     |     |
| Connection             | YN      |     |

Εικόνα 4.17: Ισχύς μονάδας παραγωγής της νησίδας\_1.

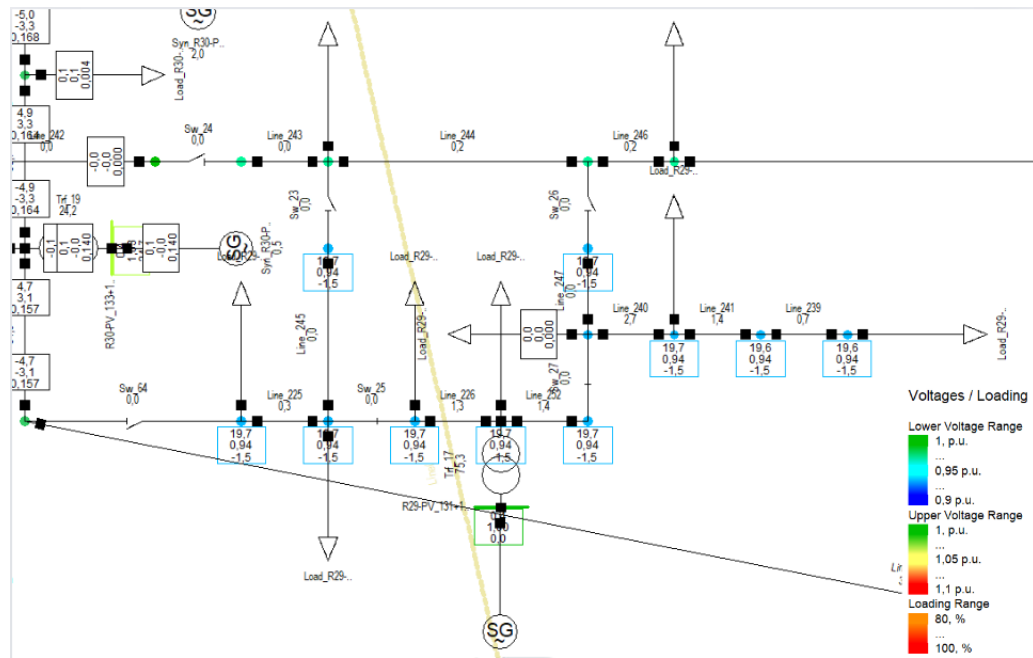
Εν τέλει, στους κόμβους της σχηματιζόμενης νησίδας τα επίπεδα τάσης διαμορφώνονται στις τιμές που φαίνονται στις Εικόνες 4.18, 4.19 και 4.20:



Εικόνα 4.18: Επίπεδα τάσης στους κόμβους της νησίδας\_1.



Εικόνα 4.19: Η σχηματιζόμενη νησίδα του Δικτύου πριν τις απαραίτητες τροποποιήσεις.



**Εικόνα 4.20:** Η σχηματιζόμενη νησίδα του Δικτύου μετά τις απαραίτητες τροποποιήσεις.

Με ανάλογο τρόπο γίνονται ενέργειες για την διασφάλιση της ορθής λειτουργίας και των υπόλοιπων σχηματιζόμενων νησίδων.

|   | Name             | Terminal StaCubic | Terminal Busbar | u, Magnitude p.u. | Active Power MW | Reactive Power Mvar | Apparent Power MVA | Power Factor | du %      |
|---|------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|---------------------|--------------------|--------------|-----------|
| ▶ | Load_R24-324     |                   | R24-324         | 0.59756           | 0.256           | 0.159               | 0.301358           | 0.84948      | -40.24385 |
| ▶ | Load_R24-112_19  |                   | R24-112_19      | 0.59660           | 0.201           | 0.124               | 0.236171           | 0.85107      | -40.33953 |
| ▶ | Load_R24-348     |                   | R24-348         | 0.60001           | 0.303           | 0.188               | 0.356585           | 0.84972      | -39.99894 |
| ▶ | Load_R24-354     |                   | R24-354         | 0.60137           | 0.026           | 0.016               | 0.030528           | 0.85165      | -39.86225 |
| ▶ | Load_R24-120_10  |                   | R24-120_10      | 0.59719           | 0.096           | 0.06                | 0.113207           | 0.84799      | -40.28013 |
| ▶ | Load_R24-120_29  |                   | R24-120_29      | 0.59060           | 0.209           | 0.129               | 0.245605           | 0.85095      | -40.9397  |
| ▶ | Load_R24-127_19  |                   | R24-127_19      | 0.58925           | 0.157           | 0.097               | 0.184548           | 0.85072      | -41.07466 |
| ▶ | Load_R24-127_29  |                   | R24-127_29      | 0.58911           | 0.041           | 0.025               | 0.048020           | 0.85379      | -41.08862 |
| ▶ | Load_R24-123_3A  |                   | R24-123_3A      | 0.58997           | 0.17            | 0.105               | 0.199812           | 0.85079      | -41.00269 |
| ▶ | Load_R24-123_12A |                   | R24-123_12      | 0.58944           | 0.065           | 0.04                | 0.076321           | 0.85165      | -41.05525 |
| ▶ | Load_R24-126_1   |                   | R24-126_1       | 0.58924           | 0.041           | 0.025               | 0.048020           | 0.85379      | -41.07558 |
| ▶ | Load_R24-156_18  |                   | R24-156_18      | 0.58974           | 0.013           | 0.008               | 0.015264           | 0.85165      | -41.02592 |
| ▶ | Load_R24-156_30  |                   | R24-156_30      | 0.58968           | 0.013           | 0.008               | 0.015264           | 0.85165      | -41.03196 |
| ▶ | Load_R24-301     |                   | R24-301         | 0.59698           | 0.083           | 0.051               | 0.097416           | 0.85201      | -40.3011  |
| ▶ | Load_R29-1_20    |                   | R29-1_20        | 0.64840           | 0.381           | 0.236               | 0.448170           | 0.85012      | -35.15902 |
| ▶ | Load_R29-1_72    |                   | R29-1_72        | 0.62383           | 0.296           | 0.183               | 0.348001           | 0.85057      | -37.61601 |
| ▶ | Load_R29-1_105   |                   | R29-1_105       | 0.61014           | 0.13            | 0.081               | 0.153169           | 0.84873      | -38.98594 |
| ▶ | Load_R29-1_118   |                   | R29-1_118       | 0.60514           | 0.011           | 0.007               | 0.013038           | 0.84366      | -39.48569 |

**Εικόνα 4.21:** Φορτία νησίδας\_2.

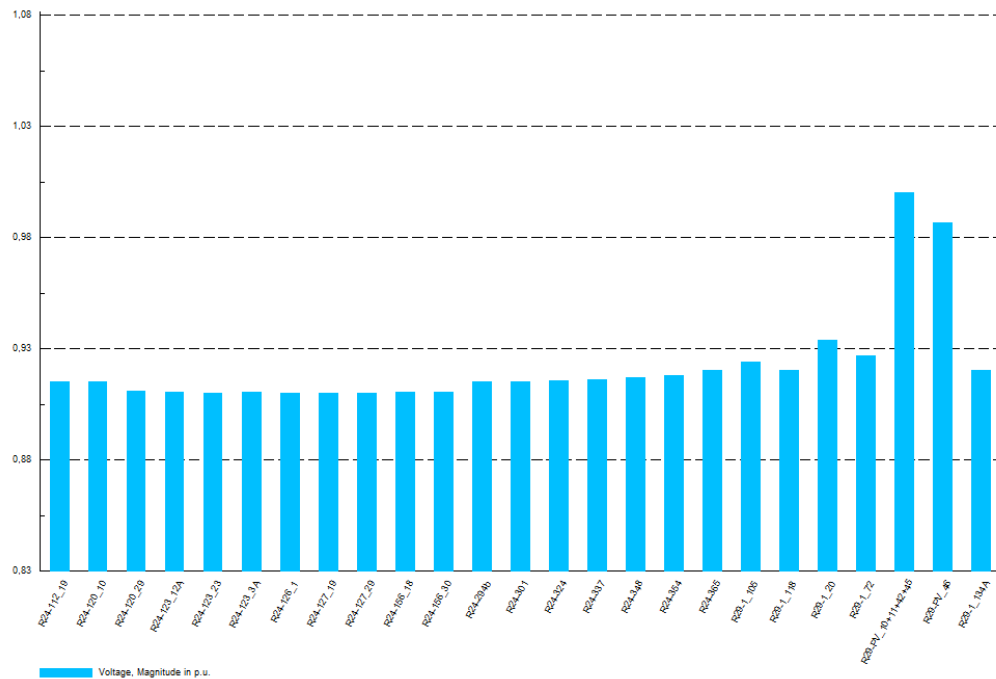
Συνολικό φορτίο:  $S=2,93$  MVA,  $P=2,492$  MW,  $Q=1,542$  MVar.

Από τις εγκατεστημένες μονάδες παραγωγής της νησίδας\_2, είναι εφικτή η παραγωγή έως 20 MVA από κάθε μία:

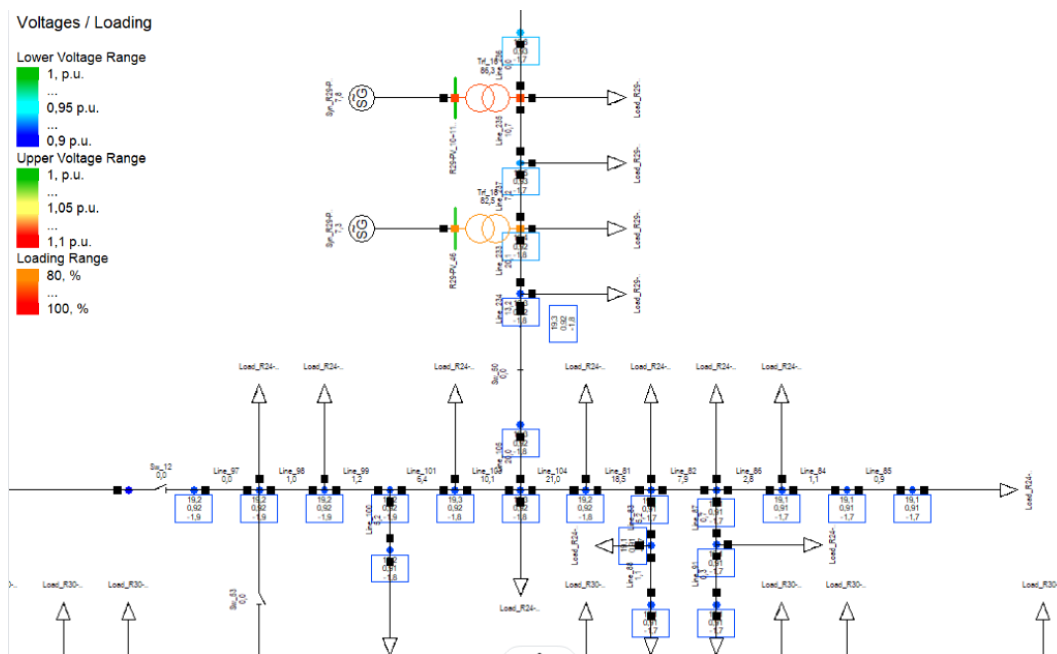
|   | Name                | Terminal StaCubic | Terminal Busbar | Bus T. | Active Power MW | Reactive Power Mvar | Apparent Power MVA | Par.no. | App.Pow. MVA |
|---|---------------------|-------------------|-----------------|--------|-----------------|---------------------|--------------------|---------|--------------|
| ▶ | Syn_R29-PV_10+11+42 |                   | R29-PV_10+      | PQ     | 2.54169         | 3.683921            | 4.475656           | 1       | 20.          |
| ▶ | Syn_R29-PV_46       |                   | R29-PV_46       | PQ     | 0.09936         | 0.                  | 0.09936            | 1       | 20.          |

**Εικόνα 4.22:** Ισχύς μονάδων παραγωγής της νησίδας\_2.

Εν τέλει, στους κόμβους της σχηματιζόμενης νησίδας τα επίπεδα τάσης διαμορφώνονται στις τιμές που φαίνονται στις Εικόνες 4.23 και 4.24:



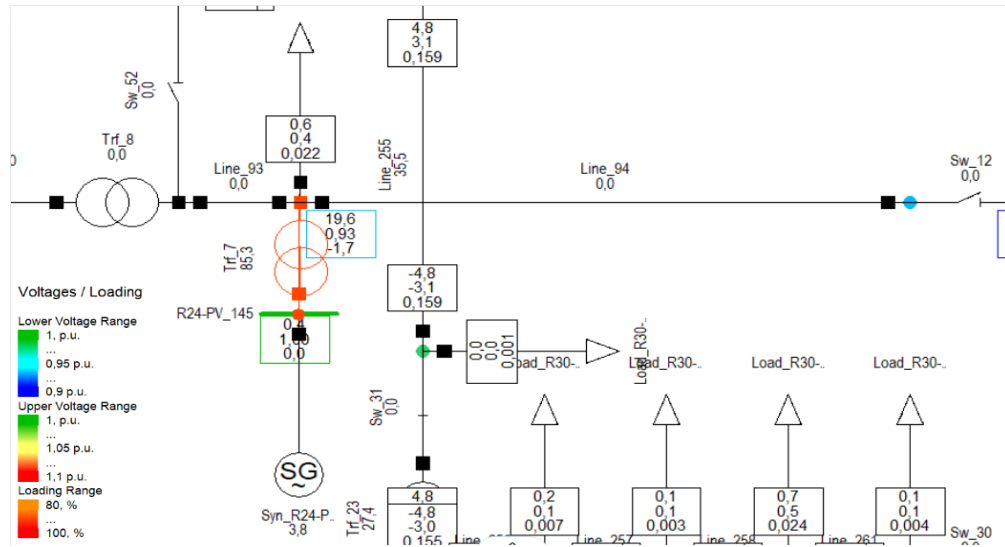
**Εικόνα 4.23:** Επίπεδα τάσης στους κόμβους της νησίδας\_2.



**Εικόνα 4.24: Νησίδα\_2.**

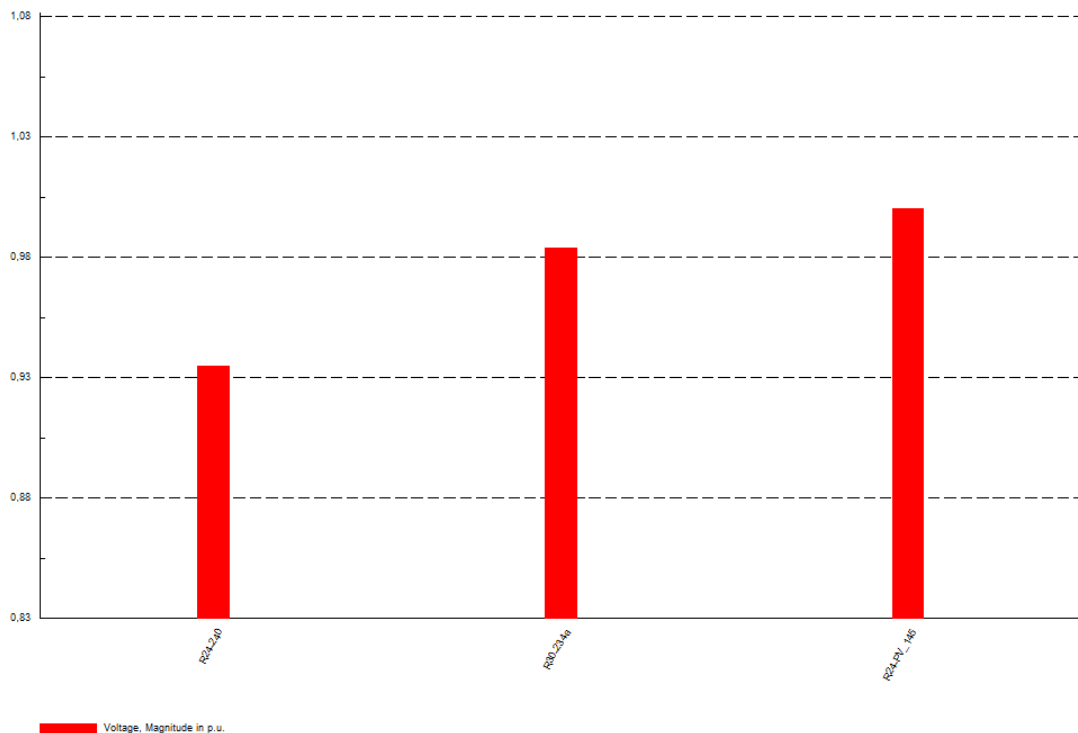
Τέλος, γίνεται έλεγχος στη λειτουργία της τελευταίας σχηματιζόμενης νησίδας, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Το φορτίο που πρέπει να καλυφθεί ανέρχεται στα 0,753982 MVA (0,641 MW -0,397 MVar).
- Η παραγωγή καλύπτει το φορτίο: 0,88 MVA (0,641 MW – 0,6037 MVar).



Εικόνα 4.25: Νησίδα\_3.

Διαπιστώνεται ότι, τα επίπεδα τάσης στους κόμβους που συνδέονται με την νησίδα\_3 είναι εντός των επιθυμητών ορίων:



Εικόνα 4.26: Επίπεδα τάσης στους κόμβους της νησίδας\_3.

### Συμπεράσματα:

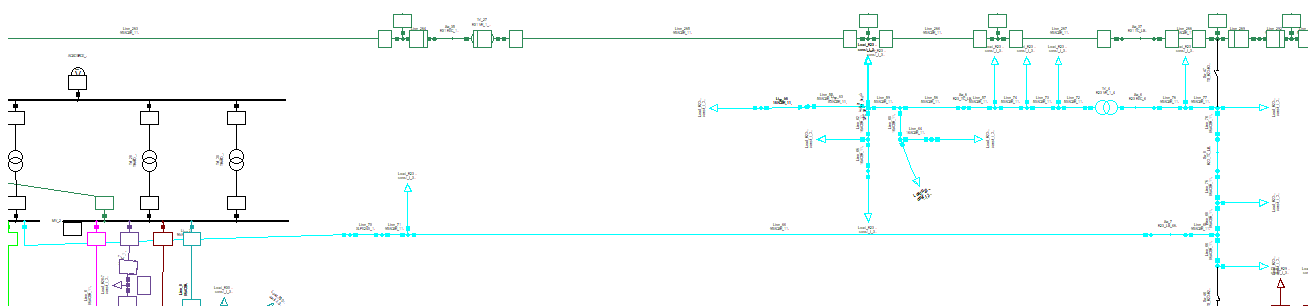
Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της τροφοδότησης των φορτίων σε περίπτωση βλάβης ενός μετασχηματιστή του Δικτύου (εν προκειμένω του Μ/Σ-29 του

υποσταθμού Υψηλής Τάσης/Μέσης Τάσης (ΥΤ/ΜΤ)), προτείνονται λύσεις τέτοιες ώστε το Δίκτυο να λειτουργεί εύρυθμα με την εφαρμογή τους και εντός των ορίων λειτουργίας των χαρακτηριστικών του συστήματος. Μέσω των τεχνικών λύσεων, ελέγχονται οι διακόπτες του Δικτύου, έτσι ώστε να τροφοδοτούνται όλα τα φορτία, να τηρείται το επίπεδο τάσης κατά μήκος του Δικτύου και τέλος τα επίπεδα φόρτισης των στοιχείων (γραμμών, μετασχηματιστών κλπ.) να είναι εντός των αποδεκτών ορίων λειτουργίας.

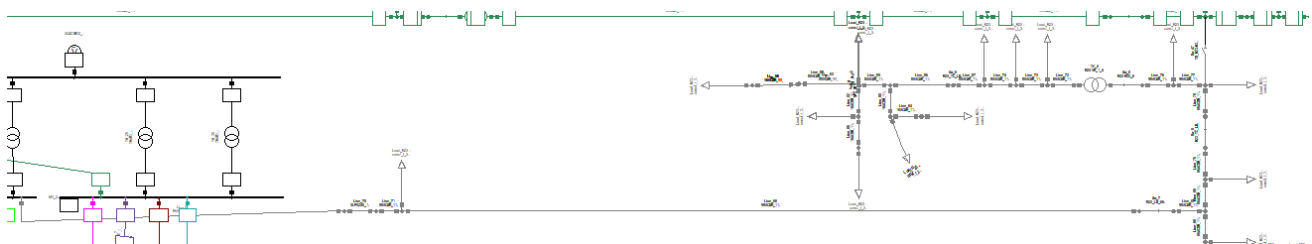
Από τις δοκιμές που έγιναν στα πλαίσια των σεναρίων προσομοίωσης του Δικτύου που αναπτύχθηκαν παραπάνω, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι με κατάλληλους χειρισμούς στους διακόπτες Δικτύου ΜΤ, με σχηματισμό μικροδικτύων με το κατάλληλο ποσοστό παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από συστήματα ΑΠΕ με μπαταρίες και τυχόν ενίσχυση με εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους - όπου αυτό χρειάζεται - είναι εφικτό να ενισχυθεί η ανθεκτικότητα του Δικτύου σε ικανοποιητικό βαθμό στην συγκεκριμένη περίπτωση. Ανοίγει, επομένως, ένα μεγάλο κεφάλαιο μελέτης σχεδιασμού μικροδικτύων σε υφιστάμενα δίκτυα, ως τεχνική ενίσχυσης της ανθεκτικότητας του Δικτύου Διανομής και μικρότερης το κατά δύναμη επίδρασης στους καταναλωτές η όποια αποκατάσταση δικτύου, λόγω εμφάνισης μεγάλης σημαντικότητας βλάβης. Συμπληρωματικά, δοκιμάζεται η προσθήκη αποζεύξιμου πυκνωτή για τον έλεγχο της πτώσης τάσης. Ωστόσο, **το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό**, καθώς ο πυκνωτής δεν καταφέρνει να φέρει την πτώση τάσης εντός των επιθυμητών ορίων, κάτι που καθιστά αναγκαία την έρευνα εναλλακτικών λύσεων για το προκύπτον αυτό ζήτημα.

### 4.3 Εξεταζόμενη περίπτωση 2 (CaseStudy\_2): Γραμμή-02 εκτός λειτουργίας (Line 02 off )

Σε αυτό το σενάριο εξετάζεται η λειτουργία του Δικτύου στην περίπτωση που η Γραμμή-02 τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω βλάβης. Παρατηρείται ότι όταν η γραμμή αυτή είναι εκτός λειτουργίας, ένα τμήμα του Δικτύου δεν τροφοδοτείται:



**Εικόνα 4.27:** Η Γραμμή-02 είναι σε λειτουργία, τροφοδοτώντας τμήμα του Δικτύου.



**Εικόνα 4.28:** Η Γραμμή-02 είναι εκτός λειτουργίας. Τμήμα του Δικτύου πλέον είναι αποσυνδεδεμένο.



Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη η κατάσταση των διακοπών (ανοιχτοί/κλειστοί) που επικρατεί την δεδομένη στιγμή.

Σκοπός μας είναι η επανηλεκτροδότηση των φορτίων που εξυπηρετούσε η Γραμμή-02 με αποδοτικό τρόπο, δηλαδή να τηρούνται τα όρια της πτώσης τάσης, να μην γίνεται υπερθέρμανση των στοιχείων του Δικτύου, κτλ.

Αρχικά, γίνεται ανάλυση ροής φορτίου, με σκοπό να δούμε τα επίπεδα τάσεως στις γραμμές, τους ζυγούς, τους μετασχηματιστές, τα φορτία. Με αυτόν τον τρόπο εντοπίζονται τα στοιχεία εκείνα του Δικτύου τα οποία θα πρέπει να τροφοδοτηθούν με εναλλακτικό τρόπο (δηλαδή εκτός της σύνδεσης με την Γραμμή-02).

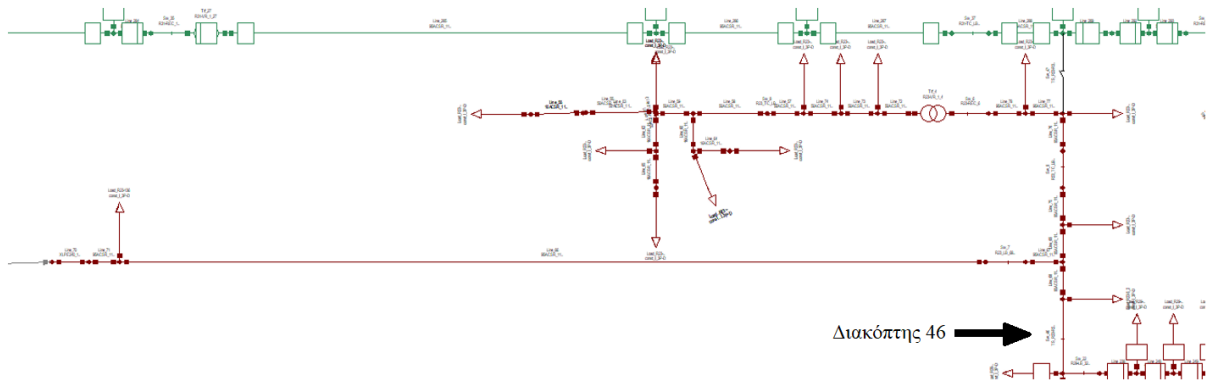
| Busbars     |                           |               |               |     |      |
|-------------|---------------------------|---------------|---------------|-----|------|
| Name        | Nom. L-L V UI, Magnitu kV | u, Magnitu kV | u, Angle p.u. | deg | du % |
| R23-100_109 | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-100_111 | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-100_24  | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-100_53a | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-100_53b | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-100_55  | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-100_76  | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-100_97B | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-122_13  | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-127_8   | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-129_16  | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-129_33  | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-136     | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-154_6   | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-164a    | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-164b    | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-170     | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-23A     | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-24      | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-5_144a  | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-5_144b  | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-5_144c  | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-5_171   | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-5_179   | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-5_2     | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-5_34    | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-5_81a   | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-5_81b   | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-5_88    | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |
| R23-5_97    | 21                        | 0             | 0             | 0   | -100 |

**Εικόνα 4.29:** Κόμβοι του Δικτύου οι οποίοι δεν τροφοδοτούνται.

Αφού εντοπιστούν τα στοιχεία στα οποία δεν υπάρχει τροφοδότηση, γίνεται προσπάθεια εύρεσης λύσης για το συγκεκριμένο πρόβλημα τροφοδότησής τους:

- **1<sup>η</sup> Περίπτωση (Case\_1):**

Κλείνει ο Διακόπτης-46 (switch-46), οπότε το τμήμα του δικτύου που παρέμενε αποσυνδεδεμένο τώρα συνδέεται μέσω της αναχώρησης P-290.

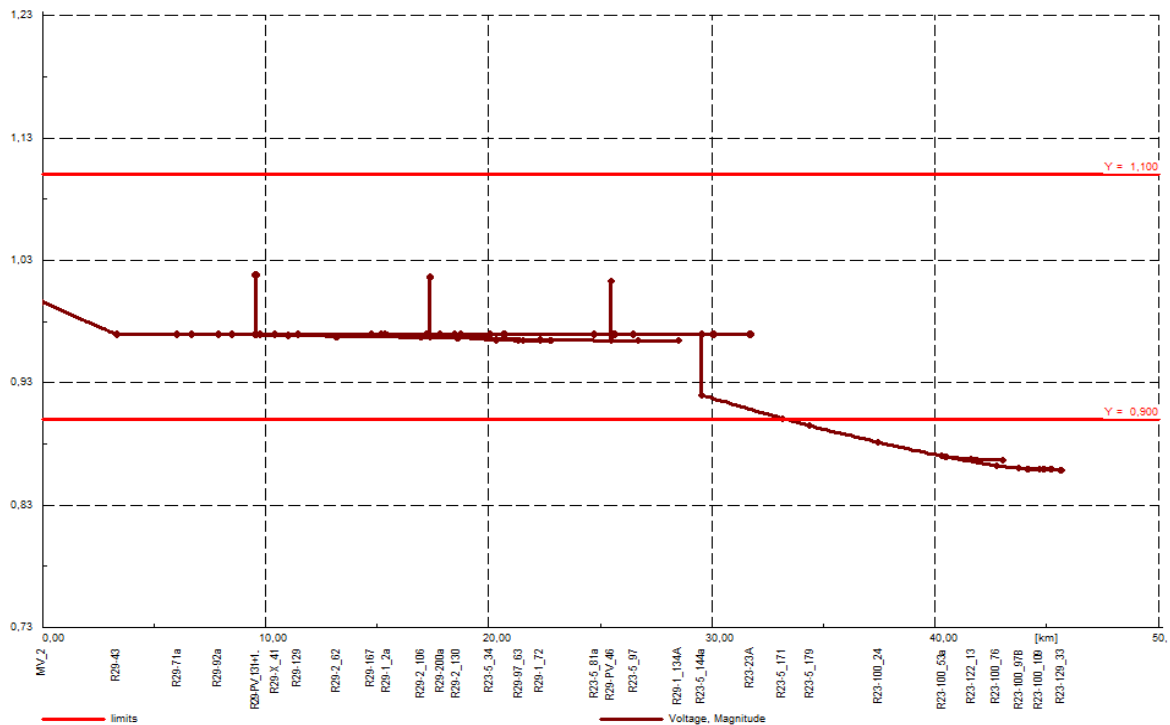


**Εικόνα 4.30:** Τροφοδότηση του αρχικά αποσυνδεδεμένου τμήματος του Δικτύου από την αναχώρηση P-290 μέσω του Διακόπτη-46.

Μετά από αυτόν τον χειρισμό, ωστόσο, παρατηρούμε ότι η πτώση τάσης σε ορισμένα στοιχεία είναι μεγαλύτερη από το επιτρεπόμενο όριο ( $>|10\%$ ).

| Busbars   |               |                   |                  |           |       |
|-----------|---------------|-------------------|------------------|-----------|-------|
| Name      | Nom. L-L V kV | U, Magnitude p.u. | U, Magnitude deg | Angle deg | du %  |
| R23-100_1 | 21            | 18,0              | 0,9              | 22,2      | -14,3 |
| R23-100_1 | 21            | 18,0              | 0,9              | 22,2      | -14,3 |
| R23-100_2 | 21            | 18,5              | 0,9              | 22,6      | -11,9 |
| R23-100_5 | 21            | 18,3              | 0,9              | 22,4      | -13,0 |
| R23-100_5 | 21            | 18,3              | 0,9              | 22,4      | -13,0 |
| R23-100_5 | 21            | 18,3              | 0,9              | 22,4      | -13,1 |
| R23-100_7 | 21            | 18,1              | 0,9              | 22,3      | -13,8 |
| R23-100_9 | 21            | 18,0              | 0,9              | 22,2      | -14,2 |
| R23-122_1 | 21            | 18,2              | 0,9              | 22,4      | -13,2 |
| R23-127_8 | 21            | 18,2              | 0,9              | 22,5      | -13,3 |
| R23-129_1 | 21            | 18,0              | 0,9              | 22,4      | -14,1 |
| R23-129_3 | 21            | 18,0              | 0,9              | 22,4      | -14,1 |
| R23-136   | 21            | 20,4              | 1,0              | 23,7      | -3,0  |
| R23-154_6 | 21            | 18,0              | 0,9              | 22,2      | -14,3 |
| R23-164a  | 21            | 20,4              | 1,0              | 23,7      | -3,0  |
| R23-164b  | 21            | 20,4              | 1,0              | 23,7      | -3,0  |
| R23-170   | 21            | 20,4              | 1,0              | 23,7      | -3,0  |
| R23-23A   | 21            | 20,4              | 1,0              | 23,7      | -3,0  |
| R23-24    | 21            | 20,4              | 1,0              | 23,7      | -3,0  |
| R23-5_144 | 21            | 20,4              | 1,0              | 23,7      | -3,0  |
| R23-5_144 | 21            | 20,4              | 1,0              | 23,7      | -3,0  |
| R23-5_144 | 21            | 19,3              | 0,9              | 23,1      | -8,0  |
| R23-5_171 | 21            | 18,9              | 0,9              | 22,8      | -9,9  |
| R23-5_175 | 21            | 18,8              | 0,9              | 22,8      | -10,5 |

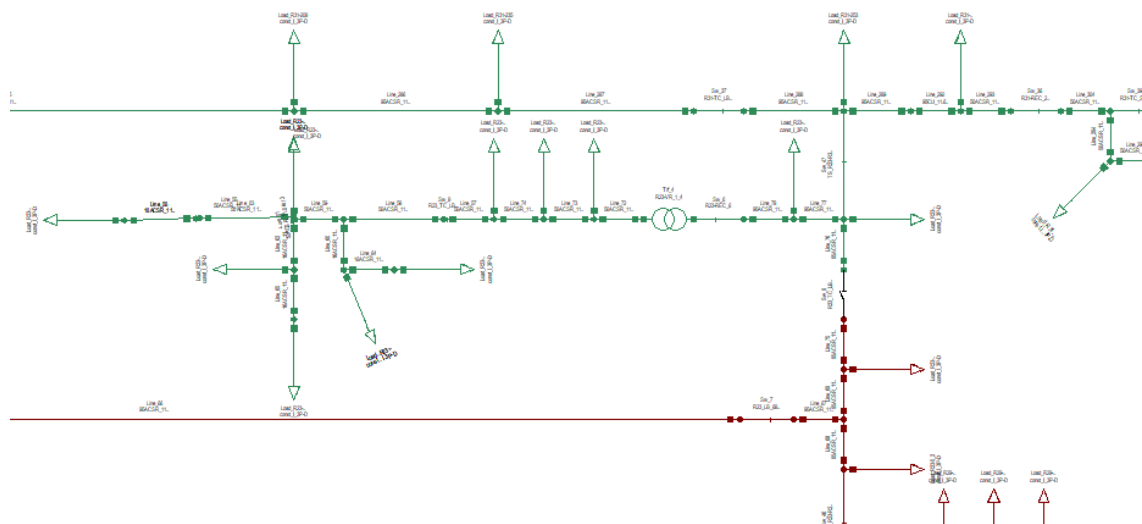
**Εικόνα 4.31:** Πτώση τάσης εκτός ορίων για ορισμένους ζυγούς του Δικτύου - 1η περίπτωση (case\_1).



**Εικόνα 4.32:** Η πτώση τάσης κατά μήκος της αναχώρησης P-290 του υποσταθμού.

• **2<sup>η</sup> Περίπτωση (Case\_2):**

Κλείνουν οι Διακόπτες 27, 40, 41, 43, 47, 50, 58, 62 και παράλληλα ανοίγουν οι Διακόπτες 9,12, 14, 17, 21, οπότε το τμήμα του δικτύου που είχε βγει εκτός του συστήματος, τώρα τροφοδοτείται μέσω των αναχωρήσεων P-290 και P-310.



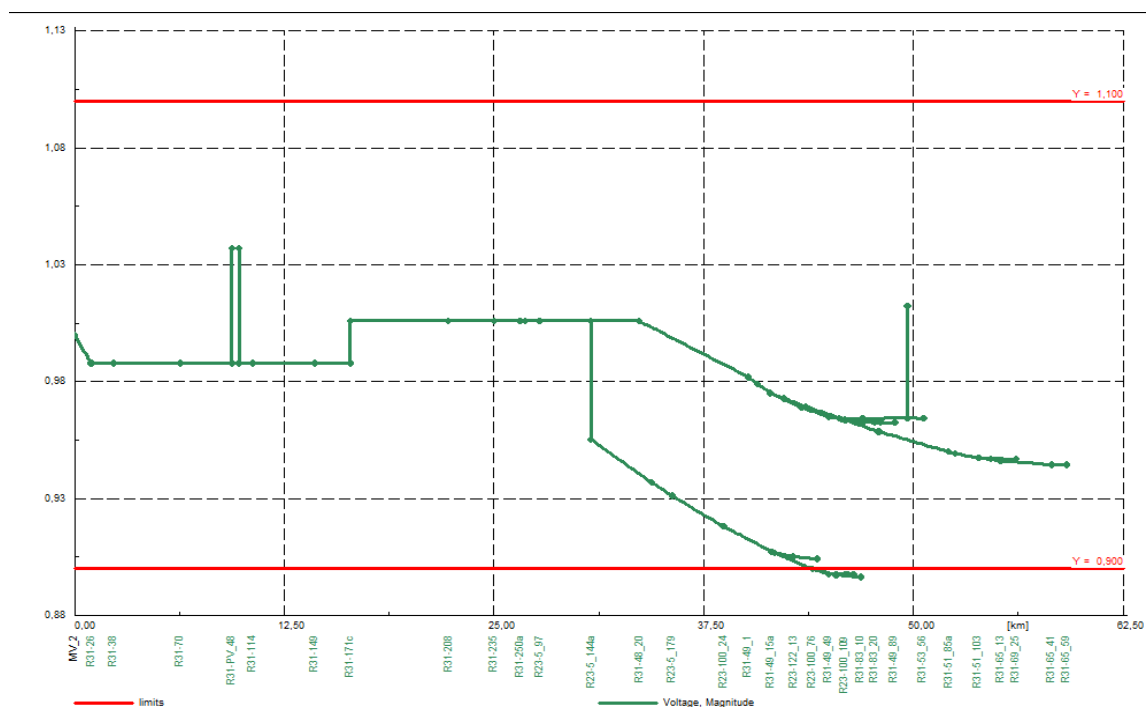
**Εικόνα 4.33:** Τροφοδότηση του αρχικά αποσυνδεδεμένου τμήματος του Δικτύου από τις αναχωρήσεις P-290 και P-310.

Η πτώση τάσης βρίσκεται και πάλι εκτός ορίων για κάποια στοιχεία. Αυτή την φορά, ωστόσο, επηρεάστηκαν λιγότερα στοιχεία, όπως επίσης η απόκλιση μεταξύ των επιθυμητών ορίων

και της πτώσης τάσης που καταγράφηκε τελικά είναι μικρότερη σε σχέση με την 1<sup>η</sup> περίπτωση (case\_1).

| Name        | Nom. L-L V <sub>UI</sub> ,<br>kV | Magnitu <sub>u</sub> ,<br>kV | Magnitu <sub>U</sub> ,<br>p.u. | Angle<br>deg | du<br>% |
|-------------|----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------|---------|
| R23-154_6   | 21                               | 18,8                         | 0,9                            | 22,2         | -10,5   |
| R23-100_111 | 21                               | 18,8                         | 0,9                            | 22,2         | -10,5   |
| R23-100_109 | 21                               | 18,8                         | 0,9                            | 22,2         | -10,5   |
| R23-100_97B | 21                               | 18,8                         | 0,9                            | 22,2         | -10,5   |
| R23-129_33  | 21                               | 18,8                         | 0,9                            | 22,3         | -10,4   |
| R23-129_16  | 21                               | 18,8                         | 0,9                            | 22,3         | -10,3   |
| R23-100_76  | 21                               | 18,9                         | 0,9                            | 22,3         | -10,0   |

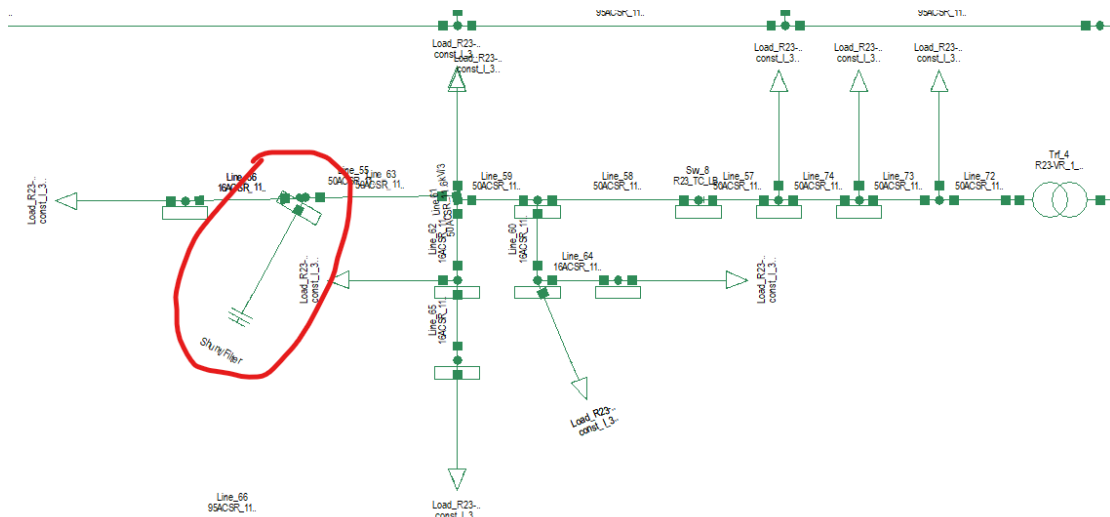
**Εικόνα 4.34:** Πτώση τάσης εκτός ορίων για ορισμένους ζυγούς του Δικτύου - 2η περίπτωση (case\_2).



**Εικόνα 4.35:** Η πτώση τάσης κατά μήκος της αναχώρησης P-310 του υποσταθμού.

- **3η Περίπτωση (Case\_3):**

Χρησιμοποιώντας ως βάση την Περίπτωση 2 (case\_2), γίνεται προσπάθεια ελέγχου της πτώσης τάσης σε εκείνα τα στοιχεία στα οποία η τιμή αυτής ήταν εκτός ορίων. Εγκαθιστώντας πυκνωτή 0,5 MVA στην θέση που απεικονίζεται στην Εικόνα 4.36 (κόμβος P-230-100\_109), **οι τιμές της τάσης προκύπτουν εντός των επιθυμητών ορίων.** Σύμφωνα με προδιαγραφές που υπάρχουν στη βιβλιογραφία [105] σχετικά με τους αποζεύξιμους πυκνωτές, οι χαρακτηριστικές τιμές που ορίζονται πρέπει να είναι της τάξεως των kVar. Με χαρακτηριστική τιμή ισχύος εξόδου 500 kVA προκύπτει από τις δοκιμές μας ότι **η πτώση τάσης οριοθετείται στα επιθυμητά επίπεδα:**



**Εικόνα 4.36:** Εγκατάσταση πυκνωτή.

General | Measurement Report | Zero Sequence/Neutral Conductor

Name:

Terminal:  R23-100\_109

Zone:

Area:

☐ Out of Service

System Type:  Technology:

Nominal Voltage:  kV

Shunt Type:

Input Mode:

Controller

Max. No. of Steps:  Max. Rated Reactive Power 0,5 Mvar

Act.No. of Step:  Actual Reactive Power 0,5 Mvar

☐ According to Measurement Report

Design Parameter (per Step)

Rated Reactive Power, C:  Mvar

Loss Factor, tan(delta):

Layout Parameter (per Step)

Susceptance:  uS

Parallel Conductance:  uS

**Εικόνα 4.37:** Επιλογή χαρακτηριστικών πυκνωτή.

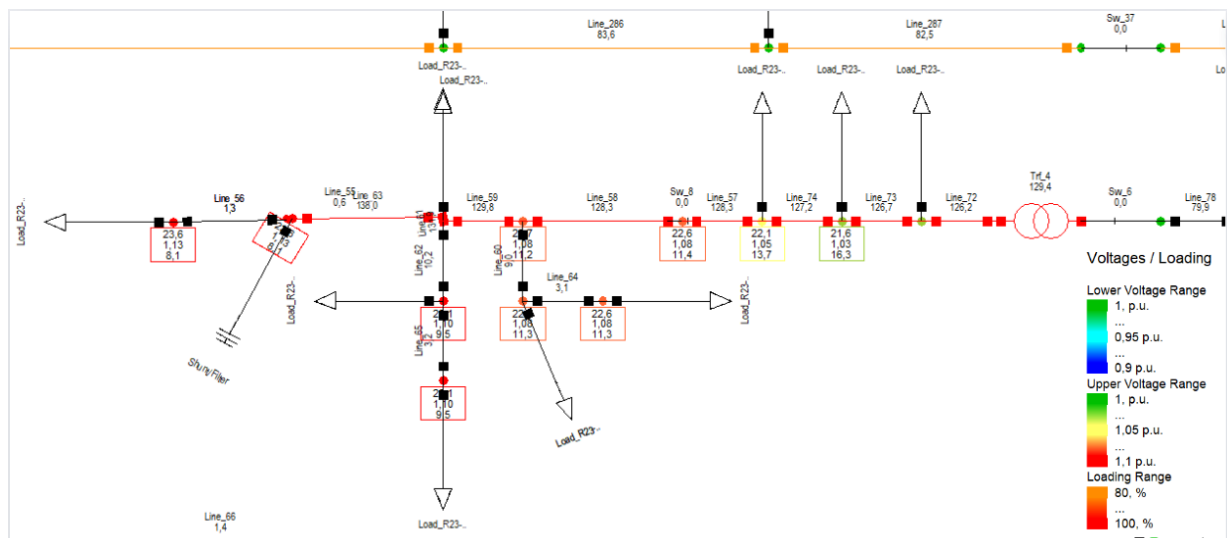
| Name        | Nom.L-L V<br>kV | UI, Magnitu<br>kV | u, Magnitu<br>p.u. | U, Angle<br>deg | du<br>% |
|-------------|-----------------|-------------------|--------------------|-----------------|---------|
| R23-129_33  | 21              | 18,83             | 0,90               | 22,35           | -10,34  |
| R23-129_16  | 21              | 18,85             | 0,90               | 22,33           | -10,25  |
| R23-154_6   | 21              | 18,85             | 0,90               | 22,26           | -10,24  |
| R23-100_111 | 21              | 18,85             | 0,90               | 22,26           | -10,23  |
| R23-100_109 | 21              | 18,85             | 0,90               | 22,26           | -10,23  |
| R23-100_97B | 21              | 18,85             | 0,90               | 22,26           | -10,22  |

**Εικόνα 4.38:** Οι κόμβοι του Δικτύου στους οποίους εμφανίζεται μεγαλύτερο ποσοστό πτώσης τάσης, πριν την εγκατάσταση του πυκνωτή.

| Name        | Nom.L-L V<br>kV | UI, Magnitu<br>kV | u, Magnitu<br>p.u. | U, Angle<br>deg | du<br>% |
|-------------|-----------------|-------------------|--------------------|-----------------|---------|
| R23-129_33  | 21              | 18,92             | 0,90               | 21,98           | -9,90   |
| R23-129_16  | 21              | 18,94             | 0,90               | 21,96           | -9,82   |
| R23-154_6   | 21              | 18,96             | 0,90               | 21,84           | -9,72   |
| R23-100_111 | 21              | 18,96             | 0,90               | 21,84           | -9,71   |
| R23-100_109 | 21              | 18,96             | 0,90               | 21,84           | -9,71   |
| R23-100_97B | 21              | 18,95             | 0,90               | 21,87           | -9,74   |

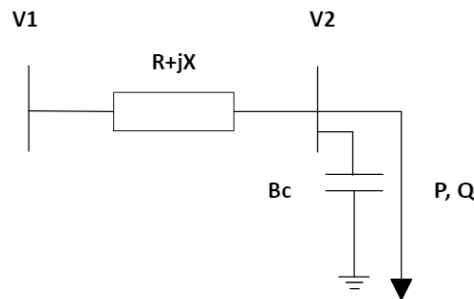
**Εικόνα 4.39:** Η μείωση της πτώσης τάσης στους κόμβους του Δικτύου, μετά την εγκατάσταση του πυκνωτή.

Όπως αποδεικνύεται από τις δοκιμές, μειώνοντας την τιμή της αέργου ισχύος που παράγει ο πυκνωτής (-KVar), η πτώση τάσης στα στοιχεία αυξάνεται, ενώ αντίθετα με αύξηση αυτής, παρατηρείται φόρτιση των γραμμών σε υψηλά ποσοστά επί της ονομαστικής ισχύος του στοιχείου:



**Εικόνα 4.40:** Φόρτιση γραμμών σε υψηλά επίπεδα, έπειτα από επιλογή υψηλών τιμών αέργου ισχύος (MVar) για τον πυκνωτή.

Το παραπάνω συμπέρασμα αποδεικνύεται και από την σχέση που συνδέει την πτώση τάσης κατά μήκος του Δικτύου σε σχέση με την άεργο ισχύ που εγχέει ο πυκνωτής σε αυτό. Η άεργος ισχύς που εγχέεται από τον πυκνωτή αντισταθμίζει την ζήτηση αέργου ισχύος του συστήματος και επομένως αυξάνει την τάση:



**Εικόνα 4.41:** Υπολογισμός πτώσης τάσης στο Δίκτυο.

Λαμβάνοντας υπόψη το παραπάνω εικονιζόμενο δίκτυο, τότε ισχύει η σχέση:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{R P + X(Q - Q_c)}{V} \quad (4.3)$$

Όπου:

- $\Delta V$ : η πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής,
- $R$ : αντίσταση της γραμμής,
- $X$ : αντίδραση της γραμμής,
- $Q$ : η άεργος ισχύς του φορτίου,
- $Q_c$ : η άεργος ισχύς που παράγει ο πυκνωτής,
- $V$ : η τάση του ζυγού του φορτίου.

επίσης, το ρεύμα της γραμμής μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

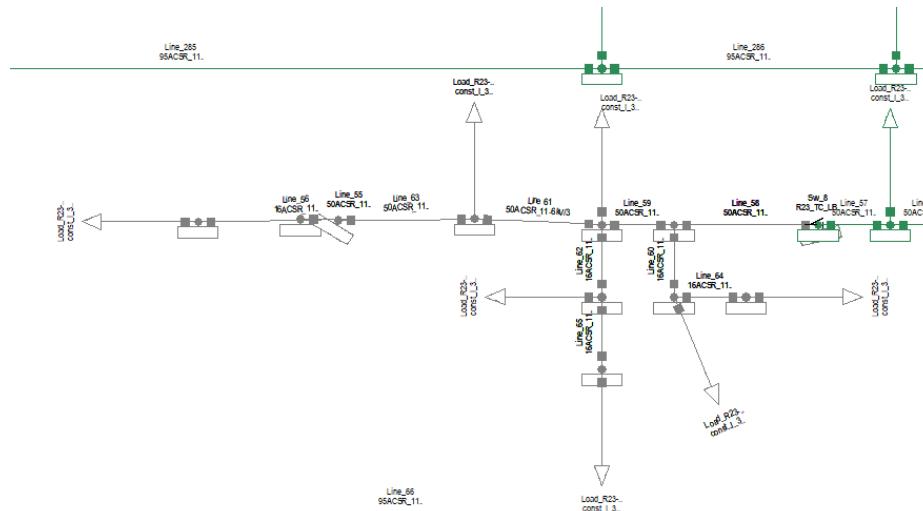
$$I = \sqrt{\frac{P^2 + (Q - Q_c)^2}{V}} \quad (4.4)$$

Επομένως, η άεργος ισχύς που παράγει ο πυκνωτής,  $Q_c$  πρέπει να ρυθμιστεί έτσι ώστε να αντισταθμίζει κατάλληλα την άεργο ισχύ του φορτίου, προκειμένου το ρεύμα της γραμμής να μειωθεί και η φόρτιση των γραμμών να παραμένει σε χαμηλά ποσοστά.

- **4<sup>η</sup> Περίπτωση (Case\_4):**

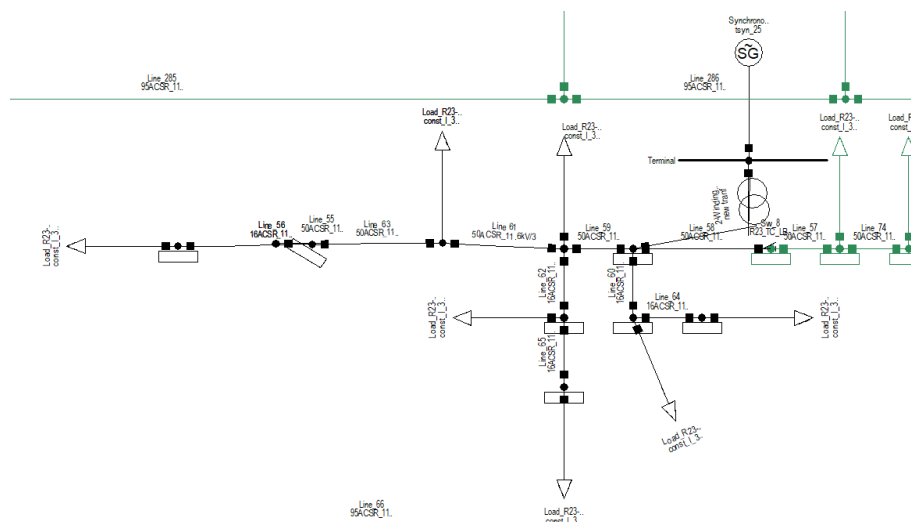
Όπως στην 2<sup>η</sup> Περίπτωση (Case\_2), έτσι και στην παρούσα, κλείνουν οι διακόπτες 27, 40, 41, 43, 47, 50, 58, 62 και παράλληλα ανοίγουν οι διακόπτες 9, 12, 14, 17, 21. Στην τρέχουσα περίπτωση ανοίγει επιπλέον ο Διακόπτης-08 (switch-08). Τμήμα του δικτύου που ήταν αποσυνδεδεμένο, τροφοδοτείται πλέον μέσω των αναχωρήσεων P-310 και P-290, ενώ παρατηρείται σχηματισμός “νησίδας” λόγω της κατάστασης του Διακόπτη-8 (ανοιχτός).





**Εικόνα 4.42:** Σχηματιζόμενη “νησίδα” στο Δίκτυο.

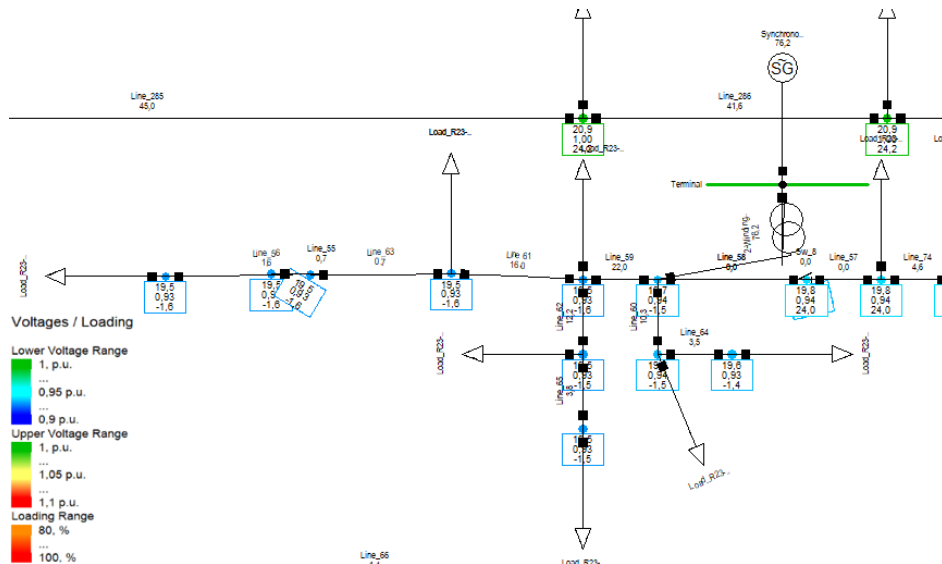
Η “νησίδα” αυτή δεν περιλαμβάνει κανέναν παραγωγό, οπότε δεν τροφοδοτείται από εγκατεστημένη τοπική παραγωγή. Κατά συνέπεια, η μόνη λύση για την πλήρη κάλυψη των απαιτήσεων σε φορτία στην περίπτωση αυτή είναι η τοποθέτηση Ηλεκτροπαραγωγού Ζεύγους (Η/Ζ).



**Εικόνα 4.43:** Προσθήκη ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (Η/Ζ) για την τροφοδότηση της “νησίδας” που σχηματίστηκε στο Δίκτυο.

| Name             | Terminal Busbar | Act.Pow. MW  | React.Pow. Mvar | App.Pow. MVA    | Pow.Fact. |
|------------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------|
| Load_R23-127_8   | R23-127_8       | 0,139        | 0,086           | 0,163453        | 0,850396  |
| Load_R23-100_76  | R23-100_76      | 0,039        | 0,024           | 0,045793        | 0,851658  |
| Load_R23-129_16  | R23-129_16      | 0,327        | 0,203           | 0,384887        | 0,8496    |
| Load_R23-129_33  | R23-129_33      | 0,147        | 0,091           | 0,172887        | 0,850265  |
| Load_R23-122_13  | R23-122_13      | 0,267        | 0,165           | 0,313869        | 0,850672  |
| Load_R23-100_97B | R23-100_97B     | 1,294        | 0,802           | 1,52238         | 0,849985  |
| Load_R23-154_6   | R23-154_6       | 0,063        | 0,039           | 0,074095        | 0,850265  |
| <b>Total</b>     |                 | <b>2,276</b> | <b>1,41</b>     | <b>2,677365</b> |           |

**Εικόνα 4.44:** Φορτία σχηματιζόμενης νησίδας.



**Εικόνα 4.45:** Χρήση του H/Z για την παραγωγή ισχύος προς κατανάλωση από τα φορτία της σχηματιζόμενης “νησίδας” στο Δίκτυο.

Οι χαρακτηριστικές τιμές του εγκατεστημένου H/Z (MVA γεννήτριας, ισχύς μετασχηματιστή) επιλέγονται ως οι ελάχιστες δυνατές μετά από δοκιμές, έτσι ώστε η παραγωγή ισχύος από αυτό να καλύπτει πλήρως την ζήτηση ισχύος από τα φορτία της νησίδας όπως επίσης θα πρέπει να τηρούνται τα όρια για τα επίπεδα φόρτισης των στοιχείων.

Στην περίπτωση αυτή, επομένως, επιλέγεται τελικά Γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 3,6 MVA και Μετασχηματιστής ονομαστικής ισχύος 3,6 MVA. Είναι σημαντικό οι δύο συσκευές να είναι κατάλληλα διαστασιολογημένες και συμβατές μεταξύ τους, ώστε να λειτουργούν αποτελεσματικά και με ασφάλεια. Για να μπορεί ο μετασχηματιστής να διαχειρίζεται την ισχύ που παράγεται από τη γεννήτρια, συνίσταται να μην είναι σημαντικά μικρότερης ισχύος από αυτή, καθώς κάτι τέτοιο θα μπορούσε να προκαλέσει υπερφόρτωση ή ακόμη και καταστροφή. Θεωρείται ότι στον Πίνακα που φαίνεται στην Εικόνα 4.44 εμφανίζονται τα μέγιστα φορτία που μπορεί να προκύψουν στην νησίδα. Μεριμνούμε, επομένως, έτσι ώστε το H/Z που τοποθετείται για την κάλυψη των φορτίων της σχηματιζόμενης νησίδας να παράγει μεγαλύτερη ισχύ ακόμη και από την μέγιστη που πιθανώς να καταναλώσουν τα φορτία, ώστε να εξασφαλίσουμε την πλήρη κάλυψη των αναγκών που ενδεχομένως προκύψουν.

### Συμπεράσματα:

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της τροφοδότησης των φορτίων σε περίπτωση βλάβης σε μία γραμμή του Δικτύου (εν προκειμένω της Γραμμής-02), προτείνονται λύσεις τέτοιες ώστε το Δίκτυο να λειτουργεί εύρυθμα με την εφαρμογή τους.

Αρχικά, γίνονται δοκιμές στις οποίες ρυθμίζονται κατάλληλα οι διακόπτες, όμως η ενέργεια του Δικτύου ελλείπει μίας Γραμμής από μόνη της δεν επαρκεί για την ομαλή λειτουργία αυτού. Η επιπλέον χρήση αποζεύξιμου πυκνωτή μπορεί να εφαρμοστεί ως λύση στο πρόβλημα χαμηλών επιπέδων τάσης σε τμήματα του Δικτύου αφού η άεργος ισχύς που εγχέεται από τον πυκνωτή μπορεί να αντισταθμίσει την ζήτηση άεργου ισχύος του συστήματος και επομένως να αυξήσει την τάση. Ως εναλλακτική λύση, έναντι της εγκατάστασης πυκνωτή, μελετάται ο σχηματισμός

νησίδων σε τμήμα του Δικτύου και η τροφοδότηση αυτού με χρήση ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, εφόσον η νησίδα αυτή δεν τροφοδοτείται από συστήματα ΑΠΕ με εξοπλισμό αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες).

Επομένως, η ενίσχυση του Δικτύου από ΑΠΕ και αποθηκευτικούς σταθμούς, προκειμένου να γίνεται πιο εύκολα και αποδοτικά ο σχηματισμός των μικροδικτύων και να αποφεύγεται η χρήση Η/Ζ, αποδεικνύεται με την εξεταζόμενη περίπτωση αυτής της παραγράφου ότι αποτελεί – υπό τις επικρατούσες σε αυτήν την Περίπτωση συνθήκες – το πλέον αποδοτικό εργαλείο για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του Δικτύου.

Τέλος, για να είναι περισσότερο αποδοτική η λύση της νησιδοποίησης τμημάτων Δικτύου, στη μελέτη και των σχεδιασμό των μικροδικτύων, όπως αποφαίνεται από τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν, οι ΑΠΕ και οι αποθηκευτικοί τους σταθμοί ιδανικά θα πρέπει να βρίσκονται το κατά δύναμη διάσπαρτες στο Δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό είναι πολύ πιο εύκολη η κατάτμηση του Δικτύου σε επιμέρους μικροδίκτυα, ωστόσο πρόκειται για ιδανική περίπτωση η οποία δεν μπορεί να προσχεδιαστεί και να προβλεφθεί.

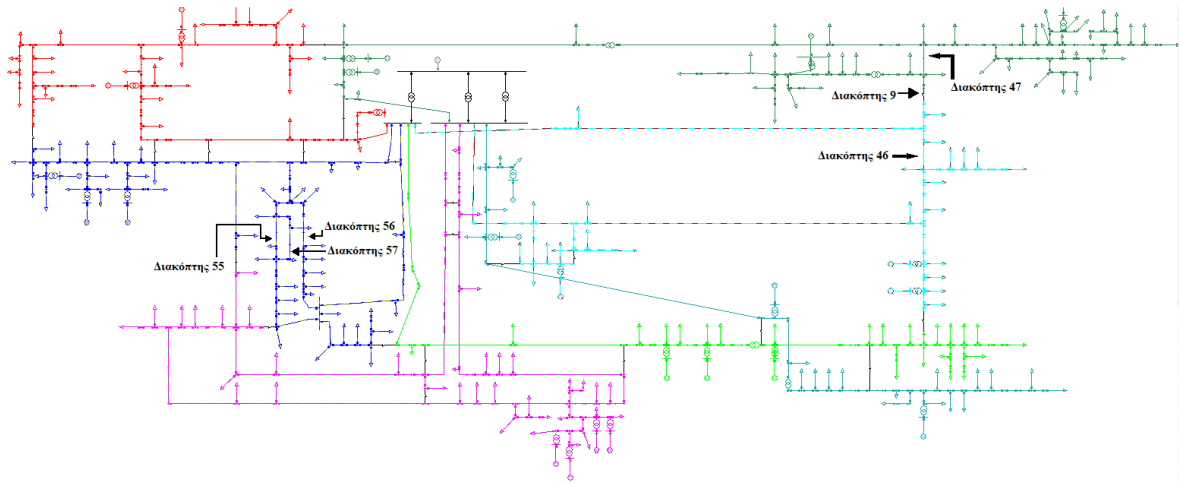
#### **4.4 Εξεταζόμενη περίπτωση 3 (CaseStudy\_3): Διακοπή Διασύνδεσης του Δικτύου μεταφοράς (Τροφοδότηση μόνο με τοπικές παραγωγές)**

Η λειτουργία του Δικτύου στην περίπτωση αυτή βασίζεται στην τροφοδοσία των φορτίων μόνο από τοπικές παραγωγές, αφού η διασύνδεση που υπάρχει μεταξύ του Δικτύου του νησιού και του Συστήματος Μεταφοράς της ηπειρωτικής χώρας έχει διακοπεί. Επομένως θα γίνει προσπάθεια έτσι ώστε όλο το Δίκτυο του νησιού να λειτουργεί απομονωμένο, αποτελούμενο από μικροδίκτυα που συνθέτουν συνολικά το εξεταζόμενο Δίκτυο.

Αρχικά πρέπει να ελεγχθεί ότι όλες οι αναχωρήσεις από τον υποσταθμό, εφόσον πλέον δεν τροφοδοτούνται από αυτόν, συνδέονται με μία τουλάχιστον μονάδα παραγωγής. Οι τοπικές παραγωγές θα αναλαμβάνουν την τροφοδοσία των φορτίων. Στο Δίκτυο, ωστόσο, υπάρχουν αναχωρήσεις όπως η P-230, η P-260 και η P-270, οι οποίες δεν περιλαμβάνουν κάποια μονάδα παραγωγής. Αυτό εύκολα μπορεί να αλλάξει με κατάλληλους χειρισμούς των διακοπών.

- **Περίπτωση 1 (Case\_1):**

Αρχικά, διαμορφώνονται οι “νησίδες” στο Δίκτυο με τρόπο τέτοιο ώστε το κάθε φορτίο να τροφοδοτείται από τουλάχιστον μία τοπική παραγωγή. Γίνεται επομένως δοκιμή στην οποία κλείνουν οι διακόπτες 46, 47, 55, 56, 57, ενώ ανοίγει ο Διακόπτης-9 (switch-9):



**Εικόνα 4.46:** Διαμόρφωση του Δικτύου έτσι ώστε όλα τα φορτία να τροφοδοτούνται από τουλάχιστον μία γεννήτρια.

Τελικώς διαμορφώνονται 7 νησίδες. Ως επόμενο βήμα, πρέπει να ελεγχθεί ότι υπάρχει ισοζύγιο μεταξύ της παραγόμενης ενέργειας από τις τοπικές παραγωγές και των αναγκών των φορτίων που υπάρχουν σε κάθε «νησίδα».

| Name            | Terminal<br>Busbar | Act.Pow.<br>MW | React.Pow<br>Mvar | App.Pow.<br>MVA | Pow.Fact. |
|-----------------|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------|
| Load_R22-28a    | R22-28a            | 0,17           | 0,11              | 0,20            | 0,85      |
| Load_R22-23_53  | R22-23_53          | 0,09           | 0,06              | 0,10            | 0,85      |
| Load_R22-28_21A | R22-28_21A         | 0,04           | 0,03              | 0,05            | 0,86      |
| Load_R22-28_35  | R22-28_35          | 0,01           | 0,01              | 0,02            | 0,87      |
| Load_R22-214    | R22-214            | 0,01           | 0,01              | 0,02            | 0,87      |
| Load_R22-30_17  | R22-30_17          | 0,14           | 0,09              | 0,17            | 0,85      |
| Load_R22-30_37  | R22-30_37          | 0,11           | 0,07              | 0,13            | 0,85      |
| Load_R22-3_26   | R22-3_26           | 0,30           | 0,18              | 0,35            | 0,85      |
| Load_R22-67_11  | R22-67_11          | 0,27           | 0,17              | 0,31            | 0,85      |
| Load_R22-114_8  | R22-114_8          | 0,13           | 0,08              | 0,15            | 0,85      |
| Load_R22-117_5  | R22-117_5          | 0,03           | 0,02              | 0,03            | 0,85      |
| Load_R22-62     | R22-62             | 0,13           | 0,08              | 0,15            | 0,85      |
| Load_R22-117_24 | R22-117_24         | 0,03           | 0,02              | 0,03            | 0,85      |
| Load_R22-3_56a  | R22-3_56a          | 0,22           | 0,14              | 0,26            | 0,85      |
| Load_R22-3_56b  | R22-3_56b          | 0,10           | 0,06              | 0,12            | 0,85      |
| Load_R22-54_18  | R22-54_18          | 0,12           | 0,07              | 0,14            | 0,85      |
| Load_R22-113_9  | R22-113_9          | 0,01           | 0,01              | 0,02            | 0,87      |
| Load_R22-3_80   | R22-3_80           | 0,21           | 0,13              | 0,25            | 0,85      |
| Load_R22-86     | R22-86             | 0,69           | 0,43              | 0,81            | 0,85      |
| Load_R22-93     | R22-93             | 0,83           | 0,51              | 0,97            | 0,85      |
| Load_R22-90_7   | R22-90_7           | 0,18           | 0,11              | 0,21            | 0,85      |
| Load_R22-94_10  | R22-94_10          | 0,20           | 0,12              | 0,23            | 0,85      |
| Load_R22-120a   | R22-120a           | 0,30           | 0,19              | 0,35            | 0,85      |
| Load_R22-120b   | R22-120b           | 0,27           | 0,17              | 0,32            | 0,85      |
| Load_R22-155a   | R22-155a           | 0,18           | 0,11              | 0,21            | 0,85      |
| Load_R22-155b   | R22-155b           | 0,09           | 0,06              | 0,10            | 0,85      |
| Load_R22-23_10  | R22-23_10          | 0,27           | 0,17              | 0,32            | 0,85      |
| <b>Total</b>    |                    | <b>5,13</b>    | <b>3,17</b>       | <b>6,04</b>     |           |

**Εικόνα 4.47:** Τα φορτία της αναχώρησης P-220 (θεωρείται ότι είναι οι μέγιστες τιμές που μπορεί να λάβουν).

Παρατηρείται ότι δεν καλύπτεται πλήρως η ζήτηση ισχύος από την παραγωγή που έχει εγκατασταθεί τοπικά στο Δίκτυο. Ενδεικτικά, στις Εικόνες 4.47 και 4.48 φαίνονται τα φορτία στην “νησίδα” που σχηματίζεται κατά μήκος της αναχώρησης P-220 και η αντίστοιχη παραγωγή ισχύος, που όμως δεν καλύπτει τα φορτία. Συνεπώς, θα πρέπει η παραγωγή ισχύος να αυξηθεί. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε αυξάνοντας την ισχύ των ήδη εγκατεστημένων ΑΠΕ στο Δίκτυο, είτε με την εγκατάσταση νέων ΑΠΕ ή/και Η/Ζ.

| Name           | Terminal<br>Busbar | Act.Pow.<br>MW | React.Pow<br>Mvar | App.Pow.<br>MVA |
|----------------|--------------------|----------------|-------------------|-----------------|
| Syn_R22_PV_129 | R22_PV_129         | 0,1            | 0                 | 0,1             |
| Syn_R22_PV_15  | R22_PV_15          | 0,05           | 0                 | 0,05            |
| <b>Total</b>   |                    | <b>0,15</b>    | <b>0</b>          | <b>0,15</b>     |

**Εικόνα 4.48:** Η παραγωγή που είναι εγκατεστημένη κατά μήκος της αναχώρησης P-220.

Για να αυξηθεί η ισχύς των ήδη εγκατεστημένων ΑΠΕ του Δικτύου, πρέπει να πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις, όπως να μην προκύπτουν θέματα χωροθέτησης ανεμογεννητριών ή φωτοβολταϊκών πλαισίων, να είναι εφικτή η αναθεώρηση της περιβαλλοντικής μελέτης που έχει εκπονηθεί για τις ήδη εγκατεστημένες μονάδες ΑΠΕ και το υφιστάμενο Δίκτυο να μπορεί να υποστηρίξει την επιπλέον παραγωγή ενέργειας.

Θεωρώντας ότι δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός ως προς την εγκατάσταση των νέων στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο Δίκτυο, εξετάζεται το ενδεχόμενο αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος.

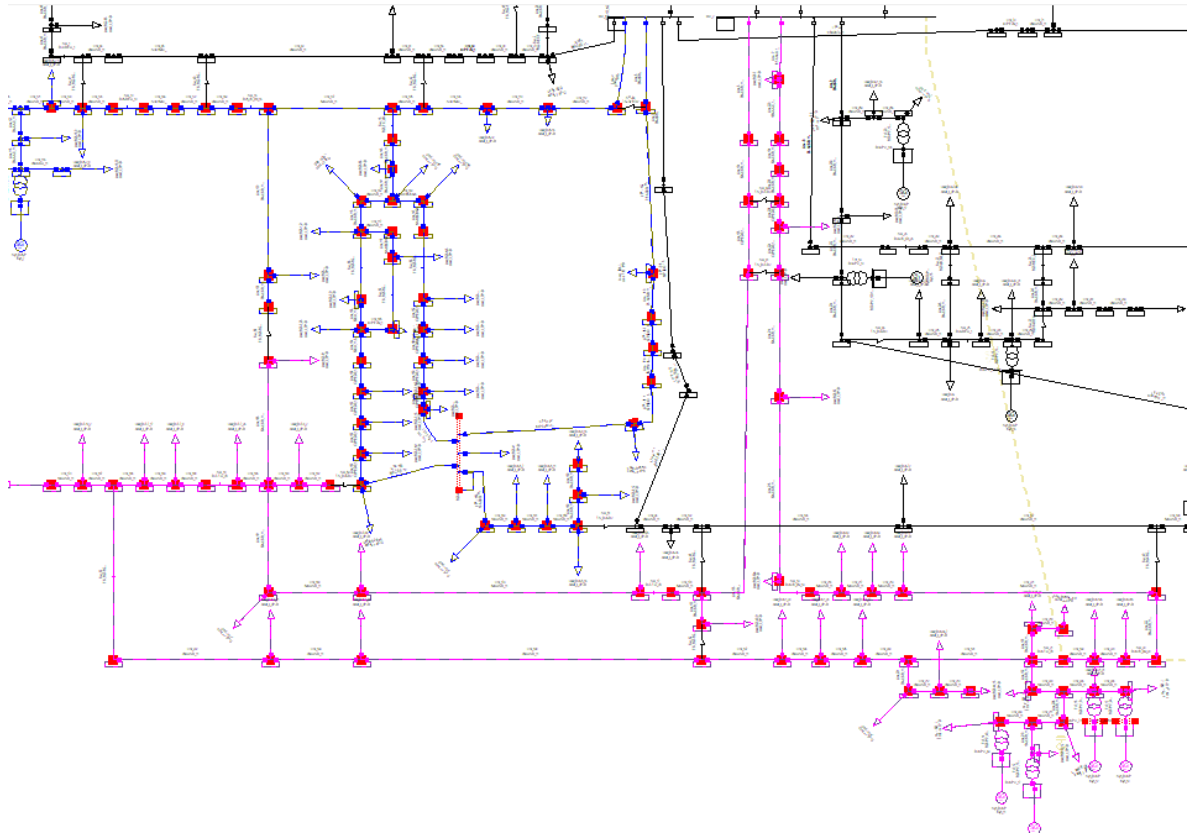
Παρακάτω εμφανίζονται οι παλιές και οι νέες τιμές ισχύος των εγκατεστημένων μονάδων παραγωγής ενέργειας του εξεταζόμενου Δικτύου. Οι νέες τιμές παραγόμενης ισχύος επιλέχθηκαν έτσι ώστε να καλύπτεται πλήρως το φορτίο που χρειάζεται να τροφοδοτήσουν, όπως επίσης να μην υπάρχει φόρτιση σε υψηλά επίπεδα άνω των επιτρεπτών ορίων για τα στοιχεία του Δικτύου (π.χ. Γραμμές).

| Νησίδες  | Συνολικό φορτίο (max) |           | Προηγούμενη εγκατεστημένη ισχύς μονάδας | Νέα εγκατεστημένη ισχύς μονάδας |          |
|----------|-----------------------|-----------|-----------------------------------------|---------------------------------|----------|
| Νησίδα 1 | 6,04 MVA              | 5,13 MW   | 0,1 MW                                  | 3,05 MVA                        | 2,6 MW   |
|          |                       |           |                                         |                                 | 1,6 MVar |
|          |                       | 3,17 MVar | 0,05 MW                                 | 3,05 MVA                        | 2,6 MW   |
|          |                       |           |                                         |                                 | 1,6 MVar |
| Νησίδα 2 | 10,99 MVA             | 9,34 MW   | 0,1 MW                                  | 3,7 MVA                         | 3,2 MW   |
|          |                       |           |                                         |                                 | 2 MVar   |
|          |                       |           | 0,1 MW                                  | 3,7 MVA                         | 3,2 MW   |
|          |                       |           |                                         |                                 | 2 MVar   |
|          |                       | 5,79 MVar | 0,1 MW                                  | 3,7 MVA                         | 3,2 MW   |
|          |                       |           |                                         |                                 | 2 MVar   |
| Νησίδα 3 | 7,27 MVA              | 6,18 MW   | 0,2 MW                                  | 2,47 MVA                        | 2,1 MW   |
|          |                       |           |                                         |                                 | 1,3 MVar |
|          |                       |           | 0,2 MW                                  | 2,47 MVA                        | 2,1 MW   |
|          |                       |           |                                         |                                 | 1,3 MVar |
|          |                       |           | 0,1 MW                                  |                                 | 2,1 MW   |

|          |          |           |        |          |           |
|----------|----------|-----------|--------|----------|-----------|
|          |          | 3,83 MVar |        | 2,47 MVA | 1,3 MVar  |
| Νησίδα 4 | 12,35MVA | 10,5 MW   | 0,3 MW | 4,12MVA  | 3,6 MW    |
|          |          |           |        |          | 2,2 MVar  |
|          |          |           | 0,2 MW | 4,12 MVA | 3,6 MW    |
|          |          |           |        |          | 2,2 MVar  |
|          |          | 6,5 MVar  | 0,1 MW | 4,12 MVA | 3,6 MW    |
|          |          |           |        |          | 2,2 MVar  |
| Νησίδα 5 | 5,01 MVA | 4.26 MW   | 0,1 MW | 1,25 MVA | 1,2 MW    |
|          |          |           |        |          | 0,8 MVar  |
|          |          |           | 0,3 MW | 1,25 MVA | 1,2 MW    |
|          |          |           |        |          | 0,8 MVar  |
|          |          | 2,64 MVar | 0,1 MW | 1,25 MVA | 1,2MW     |
|          |          |           |        |          | 0,8 MVar  |
|          |          |           | 0,2 MW | 1,25 MVA | 1,2MW     |
|          |          |           |        |          | 0,8 MVar  |
| Νησίδα 6 | 7,26 MVA | 6,17 MW   | 0,4 MW | 1,81 MVA | 1,6 MW    |
|          |          |           |        |          | 1 MVar    |
|          |          |           | 0,1 MW | 1,81 MVA | 1,6MW     |
|          |          |           |        |          | 1 MVar    |
|          |          | 3,82 MVar | 0,1 MW | 1,81 MVA | 1,6MW     |
|          |          |           |        |          | 1 MVar    |
|          |          |           | 0,1 MW | 1,81 MVA | 1,6MW     |
|          |          |           |        |          | 1 MVar    |
| Νησίδα 7 | 11,2MVA  | 9,45 MW   | 0,1 MW | 3,71 MVA | 3,15 MW   |
|          |          |           |        |          | 1,95 MVar |
|          |          |           | 0,1 MW | 3,71 MVA | 3,15 MW   |
|          |          |           |        |          | 1,95 MVar |
|          |          | 5,85 MVar | 0,1 MW | 3,71 MVA | 3,15 MW   |
|          |          |           |        |          | 1,95 MVar |

**Πίνακας 4.1:** Στοιχεία των νησίδων πριν και μετά την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος

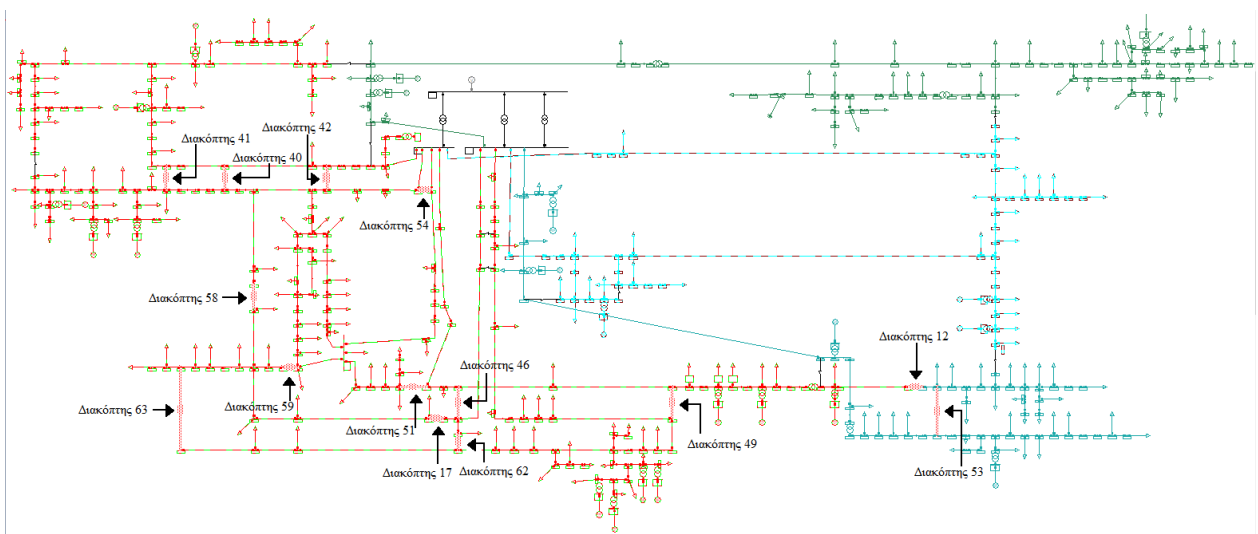
Ελέγχοντας την πτώση τάσης στους κόμβους κάθε νησίδας, διαπιστώνεται ότι σε 2 από τις 7 η τάση δεν βρίσκεται εντός αποδεκτών ορίων. Επομένως η διαμόρφωση αυτή του Δικτύου (Εικόνα 4.46) δεν είναι η καταλληλότερη.



**Εικόνα 4.49:** Πτώση τάσης εκτός αποδεκτών ορίων για 2 από τις 7 νησίδες του Δικτύου.

- **2η Περίπτωση (Case\_2):**

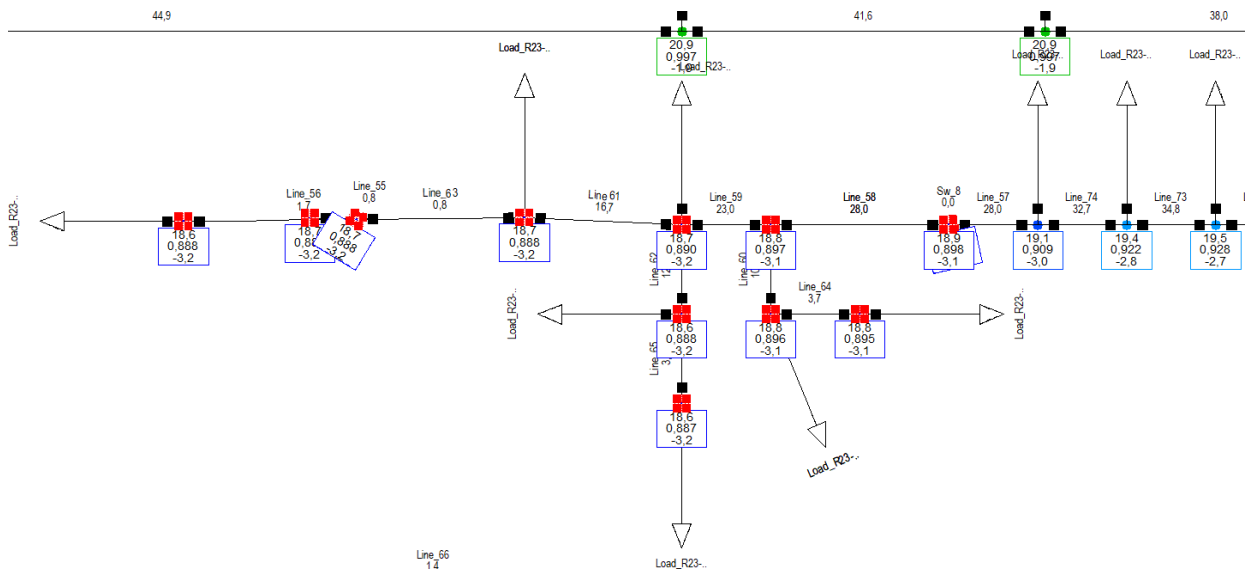
Βασιζόμενοι στο Case\_1, γίνεται δοκιμή στην οποία αλλάζουμε την κατάσταση κάποιων διακοπών, με τρόπο τέτοιο ώστε να περιορίσουμε όσο είναι δυνατόν το πρόβλημα της βύθισης τάσης σε ένα συγκεκριμένο τμήμα του δικτύου (σε όσο το δυνατόν λιγότερους κόμβους). Συγκεκριμένα, κλείνουμε τους διακόπτες 40, 41, 42, 48, 49, 51, 53, 54, 58, 59 και 62, ενώ ανοίγουν οι διακόπτες 12, 17 και 63:



**Εικόνα 4.50:** Διαμόρφωση του Δικτύου μετά την αλλαγή της κατάστασης διακοπών.

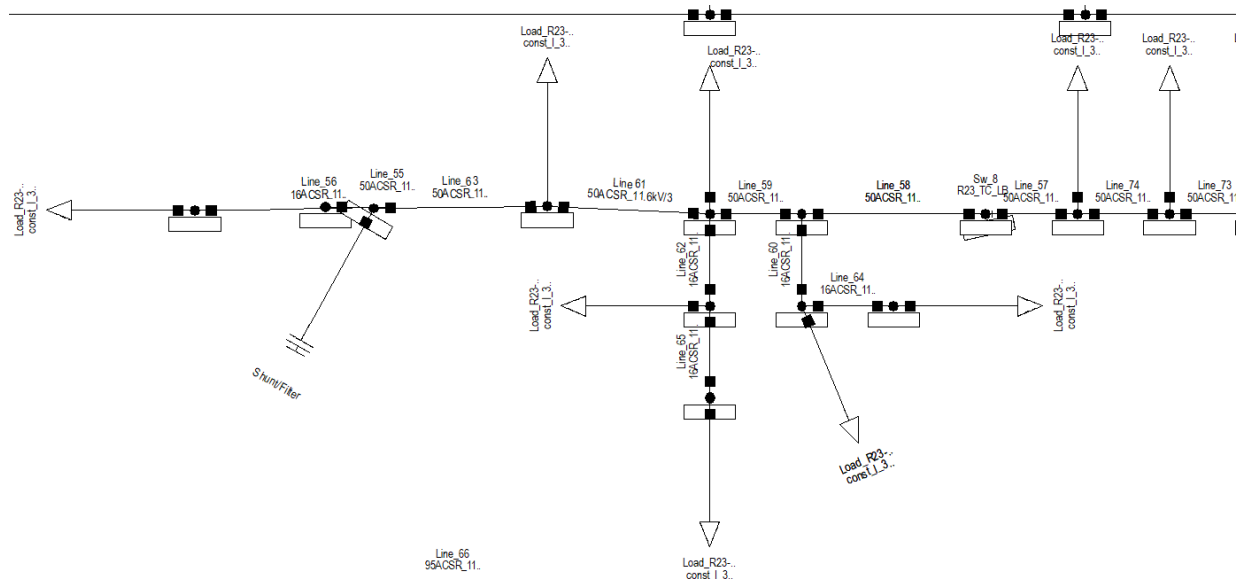


Με την ρύθμιση αυτή, παρατηρείται ότι τηρούνται τα όρια της πτώσης τάσης στα στοιχεία του Δικτύου, εκτός από το τμήμα του Δικτύου που φαίνεται στην Εικόνα 4.51:



**Εικόνα 4.51:** Πτώση τάσης εκτός ορίων σε τμήμα του Δικτύου.

Η κατάσταση αυτή μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα με την εγκατάσταση πυκνωτή κοντά στο σημείο που παρουσιάζει πρόβλημα:



**Εικόνα 4.52:** Εγκατάσταση πυκνωτή στο τμήμα του Δικτύου όπου παρουσιάζεται πτώση τάσης στους κόμβους.

Με την εγκατάσταση πυκνωτή 0,9 MVA στον κόμβο P-23-100\_109, η πτώση τάσης οριοθετείται στα αποδεκτά επίπεδα. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της βιβλιογραφίας για τους αποζεύξιμους πυκνωτές, οι χαρακτηριστικές τιμές που ορίζονται πρέπει να είναι της τάξεως των kVar. Με χαρακτηριστική τιμή ισχύος εξόδου 900 kVA, όπως προκύπτει, η πτώση τάσης οριοθετείται στα επιθυμητά επίπεδα:

General | Measurement Report | Zero Sequence/Neutral Conductor

Name:

Terminal:  R23-100\_109

Zone:

Area:

☐ Out of Service

System Type:  Technology:

Nominal Voltage:  kV

Shunt Type:

Input Mode:

Controller

Max. No. of Steps:  Max. Rated Reactive Power: 0,9 Mvar

Act.No. of Step:  Actual Reactive Power: 0,9 Mvar

☐ According to Measurement Report

Design Parameter (per Step)

Rated Reactive Power, C:  Mvar

Loss Factor, tan(delta):

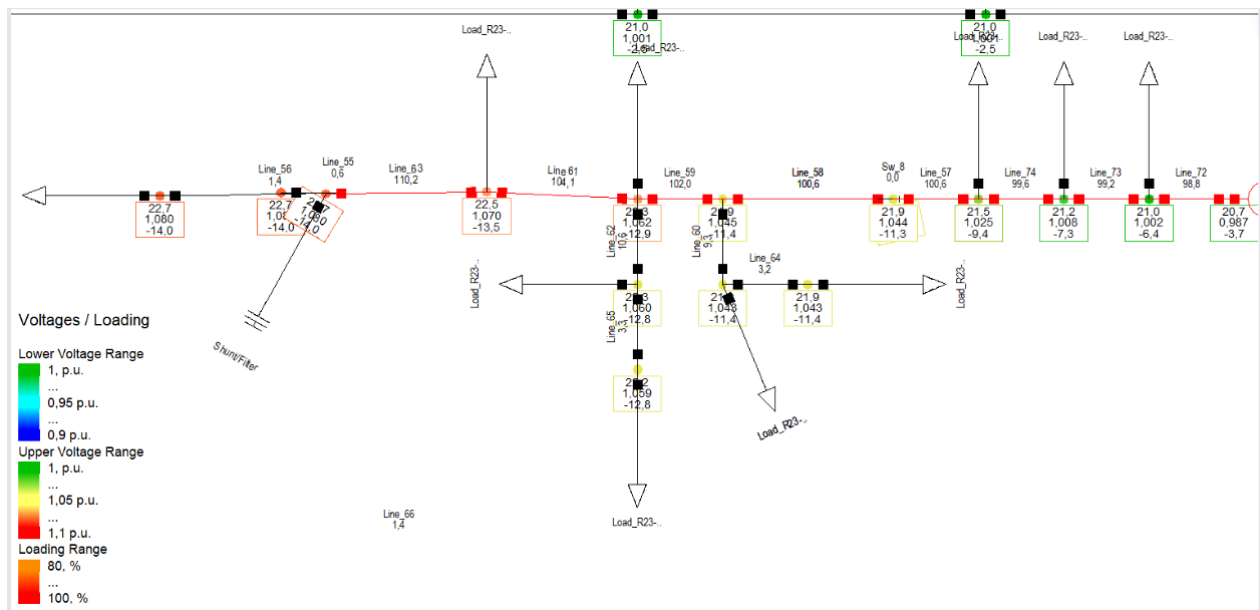
Layout Parameter (per Step)

Susceptance:  uS

Parallel Conductance:  uS

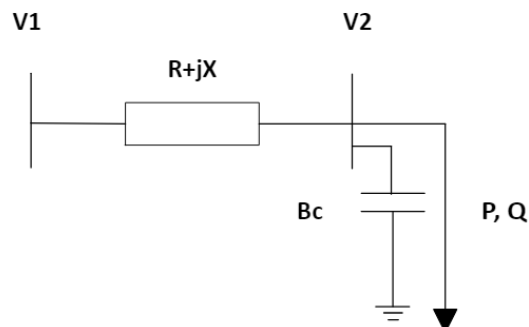
Εικόνα 4.53: Ρύθμιση των χαρακτηριστικών τιμών του πυκνωτή.

Σε συνέχεια των δοκιμών που περιεγράφηκαν παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μειώνοντας την τιμή της αέργου ισχύος που εγχέει ο πυκνωτής (MVar) η πτώση τάσης στα στοιχεία του Δικτύου μεγαλώνει, ενώ αυξάνοντας την τιμή της, παρατηρείται υπερφόρτωση των γραμμών:



Εικόνα 4.54: Αυξημένη φόρτιση γραμμών εξαιτίας της υψηλής έγχυσης αέργου ισχύος από τον πυκνωτή.

Το παραπάνω συμπέρασμα αποδεικνύεται και από την σχέση που συνδέει την πτώση τάσης κατά μήκος του Δικτύου σε σχέση με την άεργο ισχύ που εγχέει ο πυκνωτής σε αυτό. Η άεργος ισχύς που εγχέεται από τον πυκνωτή αντισταθμίζει την ζήτηση αέργου ισχύος του συστήματος, και επομένως αυξάνει την τάση.



**Εικόνα 4.55:** Υπολογισμός πτώσης τάσης στο Δίκτυο

Λαμβάνοντας υπόψη το παραπάνω εικονιζόμενο δίκτυο, ισχύει η σχέση:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{R P + X(Q - Q_c)}{V} \quad (4.5)$$

Όπου:

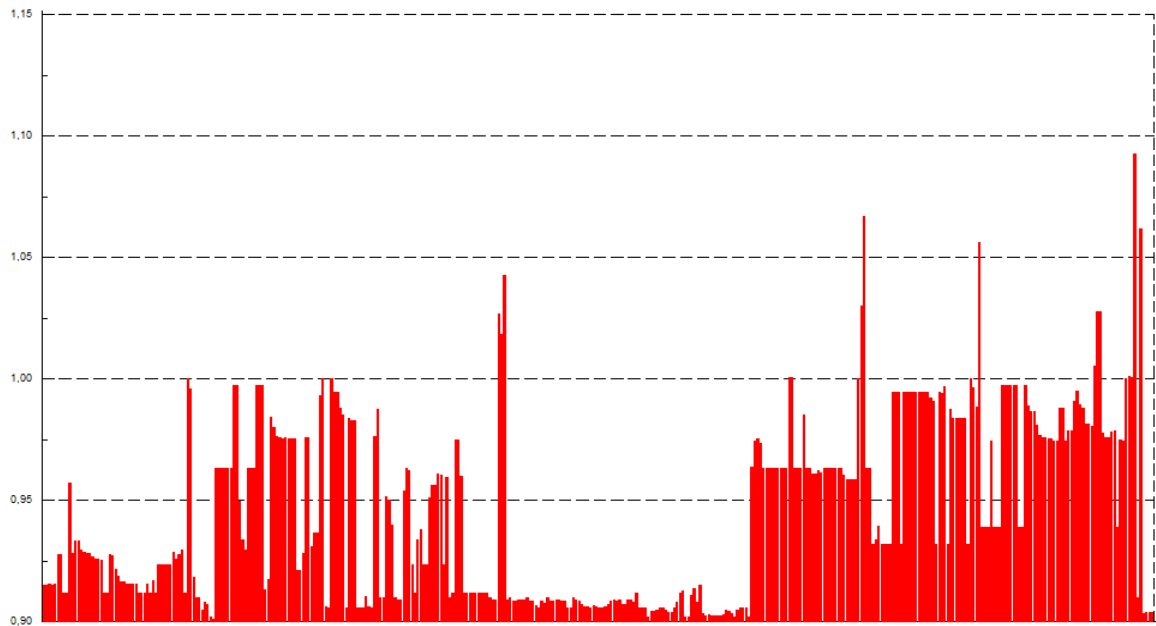
- $\Delta V$ : η πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής,
- $R$ : αντίσταση της γραμμής,
- $X$ : αντίδραση της γραμμής,
- $Q$ : η άεργος ισχύς του φορτίου,
- $Q_c$ : η άεργος ισχύς που παράγει ο πυκνωτής,
- $V$ : η τάση του ζυγού του φορτίου.

Το ρεύμα της γραμμής μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$I = \sqrt{\frac{P^2 + (Q - Q_c)^2}{V}} \quad (4.6)$$

Επομένως, η άεργος ισχύς που παράγει ο πυκνωτής  $Q_c$  πρέπει να ρυθμιστεί έτσι, ώστε να αντισταθμίζει κατάλληλα την άεργο ισχύ του φορτίου, προκειμένου το ρεύμα της γραμμής να μειωθεί και η φόρτιση των γραμμών να παραμένει σε χαμηλά ποσοστά.

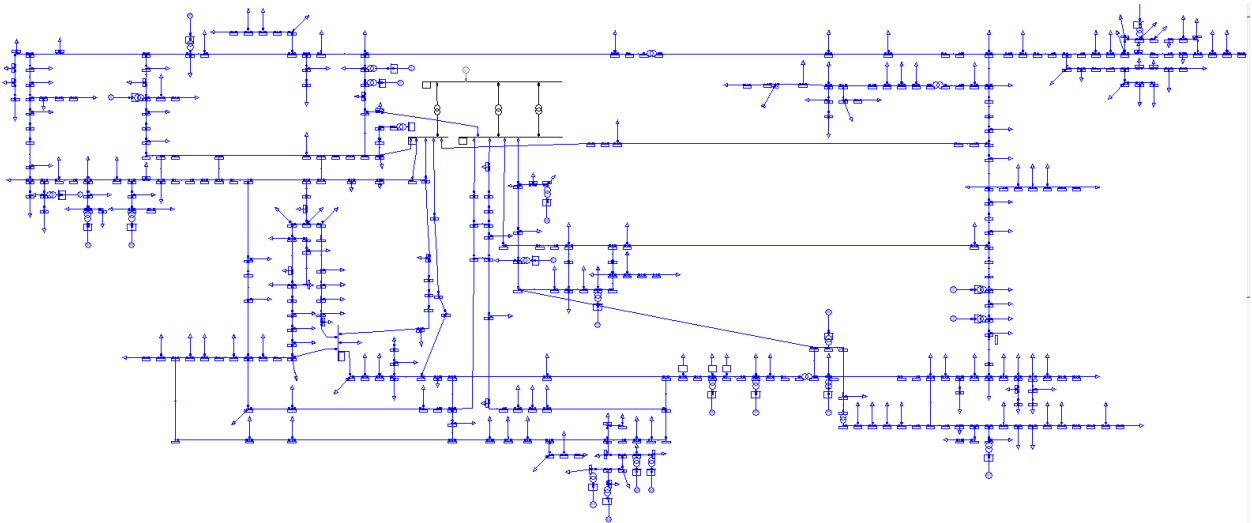
Με αυτές τις ρυθμίσεις τελικώς οριοθετείται η πτώση τάσης στις νησίδες του Δικτύου.



**Εικόνα 4.56:** Τα επίπεδα τάσης στους κόμβους του Δικτύου.

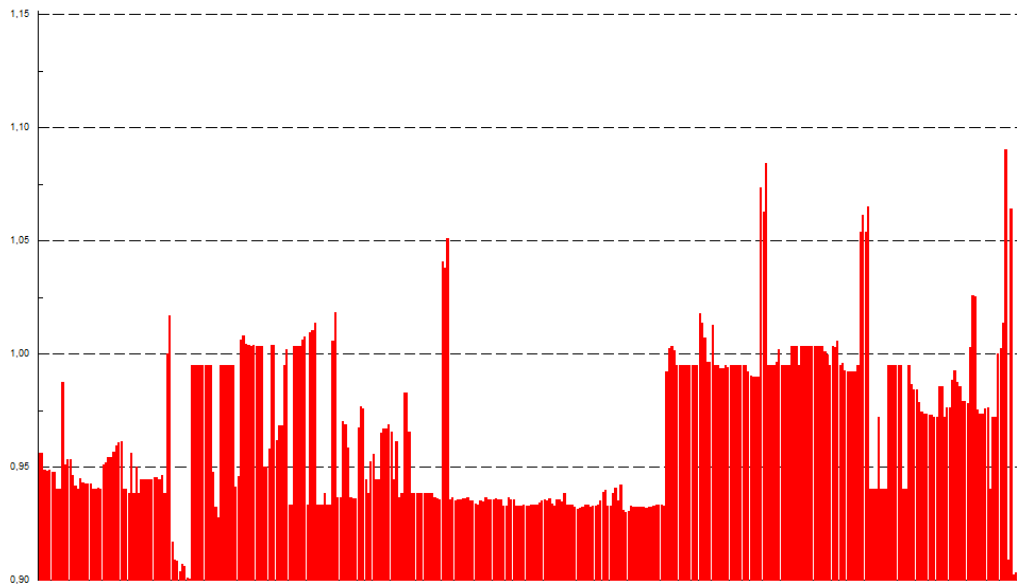
- **3η Περίπτωση (Case\_3):**

Τέλος, δοκιμάζεται η σύνδεση όλου του Δικτύου με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να λειτουργεί ως μία “νησίδα”, δηλαδή σχηματίζεται ένα μικροδίκτυο που τροφοδοτείται από τις τοπικές παραγωγές του Δικτύου. Για αυτόν τον σκοπό, όλοι οι διακόπτες του Δικτύου κλείνουν. Οι ρυθμίσεις που έγιναν στις περιπτώσεις 1 και 2 ισχύουν και σε αυτήν την περίπτωση, με μόνη διαφορά ότι είναι απαραίτητο να αυξηθεί η άεργος ισχύς του πυκνωτή που τοποθετήθηκε στο Δίκτυο, από 0,9 MVA σε 1MVA.



**Εικόνα 4.57:** Όλο το Δίκτυο λειτουργεί ως μία “νησίδα”.

Με αυτό το εγχείρημα, μετά από ανάλυση ροής φορτίου, παρατηρείται ότι η πτώση τάσης είναι εντός αποδεκτών ορίων και τα στοιχεία του Δικτύου δεν φορτίζονται σε υψηλά επίπεδα. Επομένως, η περίπτωση αυτή αποτελεί μία ακόμη αποδεκτή τεχνικά λύση όταν το Δίκτυο του νησιού αποσυνδέεται από το ηπειρωτικό σύστημα.



**Εικόνα 4.58:** Τα επίπεδα τάσης στους κόμβους του Δικτύου.

### Συμπεράσματα:

Για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του Δικτύου της Κεφαλλονιάς σε περίπτωση διακοπής της διασύνδεσης με το Δίκτυο μεταφοράς της Ηπειρωτικής Χώρας, επειδή ο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ ουσιαστικά τίθεται εκτός του Δικτύου, μελετούμε τρόπους εναλλακτικής τροφοδότησης των φορτίων του νησιού.

Σε αυτήν την περίπτωση, η τροφοδότηση των φορτίων βασίζεται μόνο στις τοπικές διεσπαρμένες παραγωγές του Δικτύου (ΑΠΕ), δεδομένου ότι αυτές έχουν αποθηκευτικές μονάδες. Για τον λόγο αυτό η έρευνά μας εστιάζει στις ρυθμίσεις εκείνες που είναι απαραίτητες ώστε να σχηματίζονται κατάλληλης δυναμικότητας ανεξάρτητα μικροδίκτυα, τα οποία όλα μαζί συνθέτουν το ευρύτερο Δίκτυο της Κεφαλλονιάς. Προκειμένου να είναι επιτεύξιμη αυτή η ενέργεια, είναι απαραίτητη η αύξηση της παραγόμενης ισχύος, είτε με χρήση ΑΠΕ και κατάλληλων αποθηκευτικών σταθμών είτε με την χρήση Η/Ζ, για εξασφάλιση της πλήρους κάλυψης ταυτόχρονης ζήτησης του μέγιστου φορτίου. Σε μερικές περιπτώσεις, η εγκατάσταση αποζεύξιμου πυκνωτή για τον έλεγχο της αέργου ισχύος στο Δίκτυο κρίνεται απαραίτητη. Τέλος, εξετάζεται η περίπτωση λειτουργίας του Δικτύου του νησιού ως ένα αυτοτελές απομονωμένο μικροδίκτυο από την Ηπειρωτική χώρα, στην περίπτωση διακοπής της σύνδεσης του Δικτύου Μεταφοράς.

## Κεφάλαιο 5

---

### Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

#### 5.1 Συμπεράσματα

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάστηκαν περιπτώσεις στις οποίες το Δίκτυο της Κεφαλονιάς παρουσιάζει δυσλειτουργία εξαιτίας βλαβών που μπορεί να εμφανιστούν σε αυτό, λόγω εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων ή/και άλλων απειλών. Σε καθεμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις προτείνονται λύσεις τέτοιες ώστε το Δίκτυο να λειτουργεί εύρυθμα και ομαλά με την εφαρμογή τους. Πιο συγκεκριμένα, έγινε κατάλληλη ρύθμιση των διακοπών, σχηματίστηκαν μικροδίκτυα, ενώ επίσης εξετάστηκε το ενδεχόμενο παράλληλης λειτουργίας H/Z ή/και χρήσης πυκνωτή. Οι λύσεις αυτές, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις δοκιμές με χρήση προγράμματος προσομοίωσης, μπορούν να αποδώσουν σε ικανοποιητικό βαθμό, έτσι ώστε το Δίκτυο να επιστρέψει στην κανονική λειτουργία του. Με τα σενάρια που επιλέχθηκαν για μελέτη προσομοίωσης και τα αποτελέσματα που ελήφθησαν τελικά, γίνεται εφικτό να αξιολογηθούν οι προτεινόμενες τεχνικές σε ρεαλιστικές συνθήκες.

Σημαντικά συμπεράσματα από τις παραπάνω προσομοιώσεις:

- Καταρχάς, είναι εμφανής η αρνητική επίδραση που μπορεί να έχει η εκδήλωση ενός ακραίου καιρικού φαινομένου στο Δίκτυο. Σε περίπτωση τέτοιων καταστάσεων προκαλείται απρόβλεπτη διακοπή ηλεκτροδότησης στο Δίκτυο. Όταν πρόκειται για διακοπή ηλεκτροδότησης σε επιμέρους τμήματα του Δικτύου, τα επίπεδα τάσης παρουσιάζουν τιμές εκτός των ορίων κανονικής λειτουργίας του Συστήματος. Οι περιπτώσεις που επιλέχθηκαν να μελετηθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι αντιπροσωπευτικές για αρκετά από τα φαινόμενα που μπορεί να εμφανιστούν σε πραγματικό Δίκτυο, όπως αποδεικνύεται από τη μελέτη των περιπτώσεων κακοκαιρίας που επηρέασαν τον Ελλαδικό χώρο τα τελευταία χρόνια.
- Εξετάστηκε με ιδιαίτερη προσοχή η περίπτωση της ηθελημένης νησιδοποίησης ως εργαλείο άμεσης αποκατάστασης της ηλεκτροδότησης των καταναλωτών, αλλά και ως γενικότερη στρατηγική λύση ενίσχυσης της ανθεκτικότητας του Δικτύου. Όπως αποδεικνύεται από τις δοκιμές σε συγκεκριμένες περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη του μοντέλου των μικροδικτύων έχει θετικά αποτελέσματα. Η ολοένα και συνεχόμενη αύξηση της διεσπαρμένης παραγωγής στην έκταση του Δικτύου Διανομής που παρατηρείται στις μέρες μας, διευκολύνει τον σχηματισμό των νησίδων, υπό προϋποθέσεις ωστόσο, καθώς εξετάζεται στην έρευνά μας η ηθελημένη δημιουργία νησίδων σε περίπτωση αντιμετώπισης κατάστασης κρίσεως, δεδομένου ότι αυτά λειτουργούν συνδεδεμένα με το Δίκτυο Διανομής υπό κανονικές συνθήκες και αποσυνδέονται από αυτό σε έκτακτες περιπτώσεις, για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των Δικτύων.
- Σημαντικό ρόλο έχει η αδιάλειπτη εποπτεία του Δικτύου, κατάσταση η οποία μπορεί να επιτευχθεί με επιτυχία όταν ολοκληρωθεί η ψηφιοποίηση του Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Στις εξεταζόμενες περιπτώσεις στα πλαίσια της έρευνάς μας, για την εύρεση των καταλληλότερων τρόπων και μεθόδων επαναφοράς του Δικτύου στην κανονική λειτουργία, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία για το νησί της Κεφαλονιάς από τα υφιστάμενα συστήματα διαχείρισης, όπως το SCADA και το GIS. Τα συστήματα αυτά συμβάλουν στη συνεχή λήψη δεδομένων κατάστασης λειτουργίας του Δικτύου και έγκαιρου εντοπισμού τυχόν σφαλμάτων. Επίσης, με τα συστήματα αυτά ο διαχειριστής του Δικτύου παρακολουθεί και

ελέγχει εξ' αποστάσεως το Δίκτυο, δίνοντας απομακρυσμένα εντολές σε διακόπτες και οποιοδήποτε άλλο εγκατεστημένο τηλεχειριζόμενο εξοπλισμό. Το σύστημα δίνει αναφορές και ειδοποιήσεις σε περίπτωση βλαβών ή ανωμαλιών, επιτρέποντας την άμεση επέμβαση. Οι τεχνολογίες του «έξυπνου» Δικτύου και της τεχνητής νοημοσύνης, όπως είναι οι τηλεχειριζόμενοι διακόπτες και οι αισθητήρες, μπορούν να συμβάλλουν στην ταχύτερη αντίδραση σε βλάβες και στη βελτίωση της αξιοπιστίας των Δικτύων Διανομής.

- Η χρήση Ηλεκτροπαραγωγού Ζεύγους (H/Z) αποδεικνύεται από την έρευνά μας αποτελεσματική λύση για την ηλεκτροδότηση τμημάτων του Δικτύου, τα οποία λόγω βλάβης δεν μπορούν να τροφοδοτηθούν από το Δίκτυο. Πρόκειται για πεδίο το οποίο πρέπει να μελετηθεί επαρκώς για τη σωστή τοποθέτηση αυτών, αλλά και την ισχύ που θα αποδίδουν, προκειμένου να καλύπτουν το απαραίτητο φορτίο ως τεχνοοικονομικά συμφέρουσα επένδυση.

Γενικότερα, η μελέτη των περιπτώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιβεβαιώνουν υπάρχουσες θεωρίες σχετικά με τους τρόπους ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Στο Κεφάλαιο 2 αναπτύσσονται τρόποι («έξυπνα» Δίκτυα, μικροδίκτυα, τεχνητή νοημοσύνη), οι οποίοι επιβεβαιώνονται μέσω των προσομοιώσεων του Κεφαλαίου 4. Με τον τρόπο αυτό διασυνδέεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αναπτύχθηκε με μία περισσότερο πρακτική λειτουργικά απεικόνιση χρήσης αυτών.

Από την άλλη, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι τρόποι αντιμετώπισης που προτάθηκαν στις μελέτες περιπτώσεων δεν είναι οι μοναδικοί και η συνέχεια στην πρακτική έρευνα θα βοηθήσει στον εντοπισμό και άλλων κατάλληλων λύσεων. Παρ' όλ' αυτά, η παρούσα διπλωματική εργασία υποδεικνύει τη δυνατότητα μέσω των προτεινόμενων μελετών περιπτώσεων να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα, όπως αυτά που παρατέθηκαν παραπάνω. Επιπλέον, κρίθηκε ορθό για το εξεταζόμενο Δίκτυο Διανομής το οποίο επιλέχθηκε για το υπόβαθρο της διπλωματικής, να εφαρμοστούν δοκιμές για τρεις δυνατές περιπτώσεις εμφάνισης προβλημάτων (βλάβη σε μετασχηματιστή του υποσταθμού του Δικτύου, βλάβη σε γραμμή του Δικτύου, διακοπή διασύνδεσης με το Σύστημα Μεταφοράς και τροφοδότηση μόνο με τοπικές παραγωγές). Για την εξέταση Δικτύου Διανομής άλλης περιοχής, πιθανότατα ο αριθμός των εξεταζόμενων περιπτώσεων να διαφέρει.

Το λογισμικό PowerFactory της DigSilent, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των δοκιμών στις μελέτες περιπτώσεων στο Δίκτυο της Κεφαλλονιάς, εκ του αποτελέσματος κρίνεται κατάλληλο για αυτή την χρήση. Θα μπορούσε, ωστόσο, για τον ίδιο σκοπό να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε άλλο λογισμικό ανάλογων δυνατοτήτων για την ανάλυση και την μελέτη περιπτώσεων βλαβών σε Δίκτυα Διανομής λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων ή άλλων απειλών.

## 5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία κατέληξε σε σημαντικά συμπεράσματα και ανοίγει δρόμο για την εύρεση χρήσιμων λύσεων σχετικά με την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των Δικτύων Διανομής, ώστε να μπορεί να συνεχιστεί η έρευνα γύρω από αυτό το αντικείμενο ενδιαφέροντος και να καλυφθούν ορισμένα κενά που ενδεχομένως μπορεί να εντοπιστούν στην παρούσα εργασία.



Ακολουθώντας, παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα, με στόχο να εμπλουτίσουν περαιτέρω τη γνώση στο αντικείμενο και να προσφέρουν νέες προοπτικές.

- Προτείνεται η εξέταση ανάλογων περιπτώσεων, όχι μόνο στο Δίκτυο Διανομής της Κεφαλλονιάς, αλλά και Δικτύων άλλων περιοχών. Λόγω της στοχαστικότητας των καιρικών φαινομένων, δεν είναι εφικτό να γνωρίζουμε εκ των προτέρων σε ποιο τμήμα του Δικτύου θα προκύψει λειτουργική βλάβη ή καταστροφή. Επομένως, θα μπορούσε να ανοίξει πεδίο έρευνας σχετικά με το ποια σημεία του Δικτύου είναι εκείνα που έχουν περισσότερες πιθανότητες να επηρεαστούν από ακραία καιρικά φαινόμενα. Χρησιμοποιώντας τα εξαγόμενα δεδομένα, και μέσω στατιστικής ανάλυσης, μπορεί να εξεταστεί η αποτελεσματικότερη μέθοδος για τα συχνότερα εμφανιζόμενα σφάλματα του ευρύτερου Δικτύου σε ακραίες καιρικές συνθήκες, με βασική παράμετρο του αλγορίθμου την τοποθεσία του Δικτύου και τις μετεωρολογικές συνθήκες αυτού.
- Σε αρκετές περιπτώσεις, οι βλάβες εμφανίζονται ταυτόχρονα σε διαφορετικά τμήματα του Δικτύου, ή σε μικρά χρονικά διαστήματα μεταξύ τους. Θα ήταν χρήσιμο, επομένως, να ληφθούν συμπεράσματα και δεδομένα, εξετάζοντας τις συνέπειες ενός τέτοιου συμβάντος, ως στοιχεία για την ανάπτυξη τεχνικών ενίσχυσης της ανθεκτικότητας του Δικτύου Διανομής.
- Δεδομένου ότι στην διπλωματική αυτή εργασία θεωρήθηκε πως οι σταθμοί ΑΠΕ φέρουν συσσωρευτές στο σύστημά τους, προκειμένου να εξασφαλίζεται η αδιάλειπτη ηλεκτροδότηση των νησίδων με τη χρήση της αποθηκευμένης περίσσειας της παραγόμενης ενέργειας, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τον συγχρονισμό και τη στοχαστικότητα της παραγωγής από ΑΠΕ, ώστε να διασφαλιστεί η σταθερότητα των μικροδικτύων. Επιπλέον, η βιώσιμη επένδυση σε μικροδίκτυα απαιτεί τεχνοοικονομικές μελέτες με υψηλό βαθμό πληρότητας και αρτιότητας. Ο σχηματισμός των μικροδικτύων, από την άλλη, πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη κατά βάση τεχνικές παραμέτρους, οι οποίες δεν είναι πάντοτε οικονομικά οι πιο εύρωστες λύσεις.
- Επιπλέον, αναφορικά με τις ΑΠΕ, είναι αναγκαίο να διερευνηθεί περαιτέρω η ικανότητα τους να συμβάλλουν στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας σε περιπτώσεις που οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν δεν ευνοούν την παραγωγή ενέργειας. Για παράδειγμα, οι εξαιρετικά ισχυροί άνεμοι, όπως σε περιπτώσεις καταιγίδων ή τυφώνων, μπορούν να υπερβούν την ανώτατη αντοχή της ανεμογεννήτριας. Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο όριο, οι ανεμογεννήτριες σταματούν να λειτουργούν για να αποφευχθεί βλάβη στα μηχανικά τους μέρη. Κατά παρόμοιο τρόπο μπορούν να επηρεαστούν και άλλες μορφές ΑΠΕ όπως τα φωτοβολταϊκά όταν υπάρχει παρατετημένη μειωμένη ηλιοφάνεια. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η τροφοδότηση των Δικτύων δεν μπορεί να βασιστεί στις ΑΠΕ, και είναι χρήσιμο επομένως τόσο να γίνει έρευνα για την εύρεση εναλλακτικών λύσεων και την ανάπτυξη των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν οι ΑΠΕ, ώστε να καταστούν απολύτως ή σε μεγαλύτερο βαθμό ανθεκτικές, όσο και ανάπτυξη του πεδίου αποθήκευσης της περίσσειας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για τη χρήση αυτής σε τέτοιες συνθήκες.
- Οι εξελίξεις σήμερα είναι εξαιρετικά ταχύτατες. Για το λόγο αυτό, η συσχέτιση με νέες τεχνολογίες που εισάγονται στον ενεργειακό τομέα, όπως για παράδειγμα τεχνολογία blockchain, είναι απαραίτητη, για την επίτευξη των βέλτιστων μεθόδων αποδοτικού διαμοιρασμού της ενέργειας. Συνέπεια αυτού, είναι για παράδειγμα στην περίπτωση του blockchain, οι καταναλωτές να μπορούν να ανταλλάσσουν ηλεκτρική ενέργεια απευθείας μεταξύ τους μέσω τοπικών μικροδικτύων (peer-to-peer trading), χωρίς την ανάγκη για μεσάζοντες. Το blockchain εξασφαλίζει την ασφάλεια και τη διαφάνεια των συναλλαγών.

Επομένως, σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης στις οποίες το Δίκτυο Διανομής εμφανίσει βλάβη και αδυνατεί να παρέχει ενέργεια στους καταναλωτές του, η τεχνολογία αυτή θα μπορούσε να φανεί χρήσιμη.

- Οι ενεργειακές κοινότητες δίνουν τη δυνατότητα στους πολίτες να παράγουν και να διαχειρίζονται συλλογικά την ενέργεια που καταναλώνουν. Επομένως, σε περιπτώσεις διακοπών ή φυσικών καταστροφών, οι ενεργειακές κοινότητες μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα ως μικροδίκτυα, εξασφαλίζοντας συνεχή παροχή ενέργειας στις συνδεδεμένες με αυτή παροχές ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό καθιστά τα δίκτυα πιο ανθεκτικά και λιγότερο ευάλωτα σε ακραία καιρικά φαινόμενα. Μία σχετική έρευνα στην οποία θα εξεταστεί η συγκεκριμένη πρόταση περισσότερο διεξοδικά, θα μπορούσε να επεκτείνει το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας που διεξήχθη.
- Τέλος, δεν θα πρέπει να παραλείψουμε το εξαιρετικά μείζον θέμα της ασφάλειας του Δικτύου, λόγω της δυναμικότητας αυτού από την έγχυση ενέργειας από παραγωγούς και Η/Ζ, αλλά και από την ασφαλή σύνδεση/αποσύνδεση των σχηματιζόμενων ηθελημένων μικροδικτύων από το κεντρικό Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Ανακεφαλαιώνοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία εστίασε στην ανάλυση σημαντικών ζητημάτων που αφορούν την ανθεκτικότητα των Δικτύων Διανομής, προσφέροντας νέες γνώσεις και προσεγγίσεις. Οι προτάσεις που διατυπώθηκαν παρέχουν σημαντικές κατευθύνσεις για μελλοντική βελτίωση και εφαρμογή. Μέσα από τη θεωρητική ανάλυση του θέματος, αλλά και την πρακτική εφαρμογή, επιτεύχθηκαν ουσιαστικά αποτελέσματα. Ελπίζω, η εργασία αυτή να αποτελέσει σημείο αναφοράς για επόμενες μελέτες για την περαιτέρω εξέλιξη του αντικειμένου.

## Βιβλιογραφία

---

- [1] “Το Δίκτυο Ηλεκτρισμού | ΔΕΔΔΗΕ,” ΔΕΔΔΗΕ, 2024. <https://deddie.gr/el/deddie/to-diktuo-ilektrismou/>
- [2] “Σχέδιο Ανάπτυξης Δικτύου (ΣΑΔ) 2024-2028.” ΔΕΔΔΗΕ, 2024, Αθήνα. Διαθέσιμο: <https://deddie.gr/el/deddie/dimosieuss/dimosies-diavouleuseis/sxedio-anaptyxis-diktyou-2024-2028/>
- [3] “Κλιματική αλλαγή,” [climate-pact.europa.eu](https://climate-pact.europa.eu). [https://climate-pact.europa.eu/about/climate-change\\_el](https://climate-pact.europa.eu/about/climate-change_el)
- [4] P. C. Johnston, J. F. Gomez, and B. Laplante, Climate risk and adaptation in the electric power sector. Mandaluyong City, Metro Manila, Philippines: Asian Development Bank.
- [5] “ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ,” [www.wwf.gr](https://www.wwf.gr). [https://www.wwf.gr/ti\\_kanoume/klimatiki\\_krisi\\_kai\\_energeia/](https://www.wwf.gr/ti_kanoume/klimatiki_krisi_kai_energeia/)
- [6] F. Wenzel, L. Tomik, M. Keršnik, K. Botbaev, I. De Meyer, M. König, J. Reichl, M. Schmidthaler, M. Mumovic, C. Eismann, H. Lemmens, T. Terry, A. Alain, W. Liu, N. Komendantova, D. Kroos, E. Andreini, W. Kröger, G. Sansavini & C. Zobel. (2016). Protecting Electricity Networks from Natural Hazards [Online], Organization for Security and Co-operation in Europe. Available: <https://www.osce.org/secretariat/242651>
- [7] “Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο - Δράση της ΕΕ για την ενέργεια και την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής,” Europa.eu, 2017. <https://op.europa.eu/webpub/eca/lr-energy-and-climate/el/#chapter3>
- [8] “Πρωτόκολλο του Κυότο”, Available: <https://ypen.gov.gr/perivallon/klimatiki-allagi/diethneis-diapragmatefseis/protokollo-tou-kyoto/>
- [9] Α. Χατζηκώστας και Γ. Σδούγκας, “Το πρωτόκολλο του Κιότο και η εφαρμογή του στην Ελλάδα,” Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Λογιστικής, Σχολή Διοίκησης και Οικονομίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Ηράκλειο Ιούλιος 2013, Διαθέσιμο: <https://apothesis.lib.hmu.gr/handle/20.500.12688/4868>
- [10] “Συμφωνία του Παρισιού”. (2024, Απριλίου 12). Βικιπαίδεια, Η Ελεύθερη Εγκυκλοπαίδεια[Online]. Διαθέσιμο: [https://el.wikipedia.org/wiki/Συμφωνία\\_του\\_Παρισιού](https://el.wikipedia.org/wiki/Συμφωνία_του_Παρισιού)
- [11] “Συμφωνία των Παρισίων για την κλιματική αλλαγή”, Διαθέσιμο: <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/climate-change/paris-agreement/>
- [12] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2017). Enhancing the Resilience of the Nation's Electricity System [Online]. Washington, DC: The National Academies Press. Available: <https://doi.org/10.17226/24836>.
- [13] E. Krausmann, G. M. Karagiannis, Z. I. Turksezer, S. Chondrogiannis, Power grid recovery after natural hazard impact [Online]. European Commission, Joint Research Centre, Publications Office, 2017 Available: [https://data.europa.eu/doi/10.2760/87402\\_](https://data.europa.eu/doi/10.2760/87402_)
- [14] A. Mate, T. Hagan, E. Cotilla-Sanchez, T. K. A. Brekken and A. Von Jouanne, "Impacts of Earthquakes on Electrical Grid Resilience," IEEE/IAS 57th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), Las Vegas, NV, USA, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICPS51807.2021.9416632
- [15] Θ. Κορωνίδης, Γ. Γεωργαντζής και Μ. Χαμπάκης, “Αναφορικά με την ανθεκτικότητα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας,” ΠΥΛΩΝΕΣ [Online]. vol. 2, pp. 12–23, Apr. 2022. Available: <https://cigre.gr/wp-content/uploads/2022/05/Pylons-Issue-2.pdf>

- [16] X. Ma, H. Zhou & Z. Li. (2021). "On the resilience of modern power systems: A complex network perspective,". Renewable and Sustainable Energy Reviews [Online]. vol. 152, ISSN 1364-0321. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111646>
- [17] "ΗΠΑ: Ευάλωτα σε κυβερνοεπιθέσεις τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας," Energypress.gr, Apr. 05, 2024. Available: <https://energypress.gr/news/ipa-ayxanontai-oi-kybernoepitheseis-sta-diktya-ilektrikis-energeias>
- [18] "Κυβερνοεπίθεση." (2024, Ιουνίου 12). Βικιπαίδεια, Η Ελεύθερη Εγκυκλοπαίδεια [Online]. Διαθέσιμο: <https://el.wikipedia.org/wiki/Κυβερνοεπίθεση>
- [19] "Electric Power System Resiliency CHALLENGES AND OPPORTUNITIES POWER SYSTEM TRANSFORMATION." Available: <https://www.naseo.org/Data/Sites/1/resiliency-white-paper.pdf>
- [20] F. Dewangan, M. Biswal, and M. Mishra, "An Overview of Power System Resilience: Causes, Planning and Restoration Processes," in Innovation in Electrical Power Engineering, Communication, and Computing Technology, Dec. 2021, pp. 555–571, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7076-3\\_47](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7076-3_47).
- [21] G. P. Noone, S. Beta and Ropes & Gray LLP, (2023, Aug. 11). Are Russian Attacks on Ukraine's Electrical Grid a War Crime? [Online]. Public International Law & Policy Group. Available: <https://www.publicinternationallawandpolicygroup.org/lawyer-justice-blog/2023/8/11/are-russian-attacks-on-ukraines-electrical-grid-a-war-crime>
- [22] "Towards a Green Transition of the Energy Sector in Ukraine." (2023, Jun. 20). UNDP. Available: <https://www.undp.org/ukraine/publications/towards-green-transition-energy-sector-ukraine>
- [23] R. Tollast and Nada Maucourant Atallah. (2024, Jul. 03), Israel and Hezbollah threaten to devastate power grids in war [Online]. The National, Available: <https://www.thenationalnews.com/news/mena/2024/07/03/israel-and-hezbollah-threaten-to-devastate-power-grids-in-war/>
- [24] T. Schneider. (2023). Israel cuts electricity supply to Gaza [Online]. The Times of Israel. Available at: [https://www.timesofisrael.com/liveblog\\_entry/israel-cuts-electricity-supply-to-gaza/](https://www.timesofisrael.com/liveblog_entry/israel-cuts-electricity-supply-to-gaza/)
- [25] S. Surkes. (2024, June 25). As war with Hezbollah looms, concerns over vulnerability of power grid generate unease [Online]. The Times of Israel. Available: <https://www.timesofisrael.com/as-war-with-hezbollah-looms-concerns-over-vulnerability-of-power-grid-generate-unease/>
- [26] M. Panteli and P. Mancarella, "Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies," Electric Power Systems Research, vol. 127, pp. 259–270, Oct. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.012>.
- [27] A. Gkika, E. A. Zacharis, D. N. Skikos, and E. L. Lekkas, "Battling the extreme: lessons learned from weather-induced disasters on electricity distribution networks and climate change adaptation strategies," Hydrology Research, vol. 54, no. 10, pp. 1196–1226, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2023.067>.
- [28] G. Soulios, G. Stournaras, K. Nikas, and C. Mattas, "The floods in Greece: the case of Mandra in Attica," Bulletin of the Geological Society of Greece, vol. 52, no. 1, p. 131, Dec. 2018, doi: <https://doi.org/10.12681/bgsg.16419>.
- [29] iefimerida. (2020, Sep 19). Κακοκαιρία "Ιανός": Σε πλήρη εξέλιξη οι εργασίες αποκατάστασης των ζημιών στις πληγείσες περιοχές [Online]. Available: <https://www.iefimerida.gr/ellada/kakokairia-ianos-ergasies-apokatastasis-zimies>

- [30] K. Lagouvardos, A. Karagiannidis, S. Dafis, A. Kalimeris & V. Kotroni, (2022, Jul 01). "Ianos—A Hurricane in the Mediterranean," *Bulletin of the American Meteorological Society* [Online]. vol 103, issue 6, pp.E1621-E1636. Available: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0274.1>
- [31] D. Zekkos, G. Zalachoris, A. E. Alvertos, P. M. Amatya, P. Blunts, M. Clark, S. Dafis, I. Farmakis, A. Ganas, M. Hille, V. Kalimogiannis, A. Karagiannidis, E. Karantanellis, S. Khan, D. Kirshbaum, R. Kourkoulis, V. Kotroni, O.J. Ktenidou, K. Lagouvardos, M. Loli, A. Makrinikas, V. Marinos, J. Manousakis, K. Nikas, D. Panousis, G. Papathanassiou, C. Saroglou, A. Simopoulos, T. Stanley, A. Tsavalas, S. Valkaniotis. (2020) "The September 18-20 2020 Medicane Ianos Impact on Greece - Phase I Reconnaissance Report". *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Report* [Online]. GEER-068, Available: <https://doi.org/10.18118/G6MT1T>.
- [32] "Συνεχίζονται πυρετωδώς οι εργασίες αποκατάστασης των ζημιών στο δίκτυο που προκλήθηκαν λόγω της κακοκαιρίας 'ΜΗΔΕΙΑ' | ΔΕΔΔΗΕ," ΔΕΔΔΗΕ, 2021. Available: <https://deddie.gr/el/kentro-enhmerwsis/deltia-tupou/deltia-typou-2021/fevrouarios-2021/sinexizontai-piretodos-oi-ergasies-apokatastasis-mideia/>
- [33] G. Xanthopoulos, M. Athanasiou and K. Kaoukis. *Suppression versus prevention - The disastrous forest fire season of 2021 in Greece* [Online]. International Association of Wildland Fire. Available: <https://www.iawfonline.org/article/suppression-versus-prevention-the-disastrous-forest-fire-season-of-2021-in-greece/>
- [34] "Χιονοκαταιγίδα." (2024, Φεβρουαρίου 2). Βικιπαίδεια, Η Ελεύθερη Εγκυκλοπαίδεια [Online]. Διαθέσιμο: <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Χιονοκαταιγίδα&oldid=10411158>.
- [35] A. Gkika, F. Gakis, E. Zacharis & I. Manolis, "Improving the Power Distribution Grid Resilience through the Integration of Distributed Energy Resources: Case Studies in Greece," in 10th International conference on energy, sustainability and climate crisis, Heraklion City, Greece, 2023
- [36] Z. Nazir and M. H. J. Bollen. (2022). "Graphical Ways to Visualize Operational Risk Results for Transmission System Contingencies". *Electricity* [Online]. vol.3, issue 3, pp. 442-462. Available: <https://doi.org/10.3390/electricity3030023>
- [37] A. M. Stanković, K. L. Tomsovic, F. De Caro, M. Braun, J. H. Chow, N. Čukalevski, I. Dobson, J. Eto, B. Fink, C. Hachmann, D. Hill, C. Ji, J. A. Kavicky, V. Levi, C. -C. Liu, L. Mili, R. Moreno, M. Panteli, F. D. Petit, G. Sansavini, C. Singh, A. K. Srivastava, K. Strunz, H. Sun, Y. Xu, S. Zhao, "Methods for Analysis and Quantification of Power System Resilience," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 5, pp. 4774-4787, 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3212688.
- [38] A. Daeli and S. Mohagheghi, "Power Grid Infrastructural Resilience against Extreme Events," *Energies*, vol. 16, no. 1, p. 64, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en16010064>.
- [39] H. H. Willis and K. Loa, "Measuring the Resilience of Energy Distribution Systems," CA: RAND Corporation, Apr. 2015, Available: [https://www.rand.org/pubs/research\\_reports/RR883.html](https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR883.html).
- [40] M. Panteli and P. Mancarella, "The Grid: Stronger, Bigger, Smarter?: Presenting a Conceptual Framework of Power System Resilience," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 58–66, May 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/mpe.2015.2397334>.

- [41] E. D. Vugrin, A. Castillo, and C. A. Silva-Monroy, "Resilience Metrics for the Electric Power System: A Performance-Based Approach.," Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.2172/1367499>.
- [42] J. P. Watson, R. Guttromson, C. Silva-Monroy, R. Jeffers, K. Jones, J. Ellison, C. Rath, J. Gearhart, D. Jones, T. Corbet, C. Hanley & L. T. Walker, "Conceptual Framework for Developing Resilience Metrics for the Electricity, Oil, and Gas Sectors in the United States," Sandia National Lab. (SNL-NM), U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, Albuquerque, NM (United States) SAND-2014-18019, 2014, Available: <https://doi.org/10.2172/117774>
- [43] "Markov chain." (2019, December 13). Wikipedia Contributors. Wikimedia Foundation [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Markov\\_chain](https://en.wikipedia.org/wiki/Markov_chain)
- [44] "Monte Carlo Method.," (2019, June 28). Wikipedia Contributors. Wikipedia; Wikimedia Foundation [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Monte\\_Carlo\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_method)
- [45] Y. Yao, W. Liu, R. Jain, B. Chowdhury, J. Wang, and R. Cox, "Quantitative Metrics for Grid Resilience Evaluation and Optimization," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 14, no. 2, pp. 1244–1258, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3230019>.
- [46] Z. Bie, Y. Lin, G. Li, and F. Li, "Battling the Extreme: A Study on the Power System Resilience," Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 7, pp. 1253–1266, Jul. 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/jproc.2017.2679040>.
- [47] M. Shabanzadeh and M. P. Moghaddam. "What is the Smart Grid? Definitions, Perspectives, and Ultimate Goals," in 28th International Power System Conference (PSC), Tehran, Iran, November 2013, DOI:10.13140/2.1.2826.7525 Available: [https://www.researchgate.net/publication/259981754\\_What\\_is\\_the\\_Smart\\_Grid\\_Definitions\\_Perspectives\\_and\\_Ultimate\\_Goals](https://www.researchgate.net/publication/259981754_What_is_the_Smart_Grid_Definitions_Perspectives_and_Ultimate_Goals)
- [48] A. Lawson, "Resilience strategies for power outages." Center for Climate and Energy Solutions, Washington, DC, 2018. Available: <https://www.c2es.org/document/resilience-strategies-for-power-outages/>
- [49] "Strategies for Grid Resilience," PSE Healthy Energy, Oakland, California, Aug. 2015. Available: <https://www.psehealthyenergy.org/work/grid-resilience/>
- [50] "Final report of the CEN/CENELEC/ETSI Joint Working Group on Standards for Smart Grids". CEN/CENELEC/ETSI Joint Working Group. 2011 May 4. Available at: [https://www.etsi.org/images/files/Report\\_CENCLCETSI\\_Standards\\_Smart\\_Grids.pdf](https://www.etsi.org/images/files/Report_CENCLCETSI_Standards_Smart_Grids.pdf)
- [51] S. Poudel, "Quantifying And Improving Resilience In Power Distribution Systems", Doctoral Dissertation, School of Electrical Engineering and Computer Science, Washington State University, Pullman, Washington, United States 2020. Available: <https://rex.libraries.wsu.edu/esploro/outputs/99900581498001842>
- [52] "Αποστολή - Στόχοι," ΔΕΔΔΗΕ. Available: <https://deddie.gr/el/deddie/i-etairaia/apostoli-stoxoi/>
- [53] "Σχέδιο Ανάπτυξης Δικτύου (ΣΑΔ) 2019-2023." ΔΕΔΔΗΕ, Μάιος 2018, Αθήνα. Διαθέσιμο: <https://deddie.gr/Documents2/DIAVOULEYSEIS%202018/DD%20ANAPTIXI%20DIKTYOY/ΣΑΔ%202019-2023.pdf>
- [54] "Σχέδιο Ανάπτυξης Δικτύου (ΣΑΔ) 2021 - 2025.," ΔΕΔΔΗΕ, Δεκέμβριος 2020, Αθήνα. Διαθέσιμο: <https://deddie.gr/el/deddie/dimosieuseis/dimosies-diavouleuseis/prokatartiko-sxedio-anaptyxis-diktyou/>
- [55] "Στρατηγικά Έργα | ΔΕΔΔΗΕ," ΔΕΔΔΗΕ, 2024. Διαθέσιμο: <https://deddie.gr/el/stratigiki-eksugchronismos/stratigika-erga/>

- [56] “Μητσοτάκης με Χόγιερ στην υπογραφή της δανειακής συμφωνίας ΕτΕΠ – ΔΕΔΔΗΕ για τους έξυπνους μετρητές” Protagon.gr, 2023 Nov. 07, Available: <https://www.protagon.gr/epikairota/mitsotakis-me-xogier-stin-ypografi-tis-daneiakis-symfwnias-etep-deddhe-gia-tous-eksypnous-metrites-44342823484>
- [57] “Energy Retail and Consumer Protection 2023 Market Monitoring Report,” ACER-CEER, Ljubljana Slovenia-Brussels Belgium, Sep. 2023. Available: [https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Publications/2023\\_MMR\\_Energy\\_Retail\\_Consumer\\_Protection.pdf](https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Publications/2023_MMR_Energy_Retail_Consumer_Protection.pdf)
- [58] “Power Barometer - Exploring the energy crisis,” powerbarometer.eurelectric.org, Jul. 07, 2022. <https://powerbarometer.eurelectric.org/>
- [59] Χ. Λιάγγου. (2024, Μάρτιος 21). “Εκτακτα μέτρα για αποφυγή ενεργειακού μπλακ άουτ λόγω ΑΠΕ”. Καθημερινή, pp.25. Available: [https://reports.indigital.gr/report/item/Press/241402922?api\\_user=311e7dfb2be64fc68887cb144ff3d0ce&as=clip](https://reports.indigital.gr/report/item/Press/241402922?api_user=311e7dfb2be64fc68887cb144ff3d0ce&as=clip)
- [60] M. Hamidieh and M. Ghassemi, "Microgrids and Resilience: A Review," in IEEE Access, vol. 10, pp. 106059-106080, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3211511.
- [61] E.-I. E. Stasinou, D. N. Trakas, and N. D. Hatziargyriou, “Microgrids for power system resilience enhancement,” iEnergy, vol. 1, no. 2, pp. 158–169, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.23919/ien.2022.0032>.
- [62] "Microgrids for disaster preparedness and recovery with electricity continuity plans and systems." International electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2014. Available: <https://www.iec.ch/basecamp/microgrids-disaster-preparedness-and-recovery-electricity-continuity-plans-and-systems>
- [63] J. Zhu, Y. Yuan, and W. Wang, “An exact microgrid formation model for load restoration in resilient distribution system,” in International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 116, p. 105568, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105568>.
- [64] “Μικροδίκτυα – Γνώση,” gr.solarmoo.com. <https://gr.solarmoo.com/info/microgrids-77245895.html>
- [65] N. Hatziargyriou, A. Dimeas, N. Vasilakis, D. Lagos, and A. Kontou, “The Kythnos Microgrid: A 20-Year History,” in IEEE Electrification Magazine, vol. 8, no. 4, pp. 46–54, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/mele.2020.3026439>.
- [66] K. Kaousias, "Prospects of smart microgrids in Non-Interconnected Islands (NIIs)," HEDNO SA - Hellenic Electricity Distribution Network Operator SA, Rhodes, 2019 March 18. Available: [https://dafninetnetwork.gr/wp-content/uploads/2019/04/Prospects-of-smart-microgrids-in-NIIs\\_final-dafni-smile-3.19-rhodes.pdf](https://dafninetnetwork.gr/wp-content/uploads/2019/04/Prospects-of-smart-microgrids-in-NIIs_final-dafni-smile-3.19-rhodes.pdf)
- [67] "Tilos Project". Eunice Group. Available: <https://eunice-group.com/el/projects/tilos-project-gr/>
- [68] "Σύστημα ενεργειακής παραγωγής & αυτονομίας S4S by EUNICE". Eunice. Μαρούσι, Ελλάδα, Available: [https://eunice-group.com/wp-content/uploads/2022/11/S4S-by-Eunice\\_GR.pdf](https://eunice-group.com/wp-content/uploads/2022/11/S4S-by-Eunice_GR.pdf)
- [69] “Astypalea | Clean energy for EU islands,” Europa.eu, 2022. Available: <https://clean-energy-islands.ec.europa.eu/countries/greece/astypalea>
- [70] Ν. Φιλιππίδης, “Από υβριδικό σταθμό παραγωγής ενέργειας η ηλεκτροδότηση της Αστυπάλαιας - Μητσοτάκης: Ανεμογεννήτριες μόνο με αποδοχή των τοπικών κοινωνιών,” Energymag, Jun. 03, 2022. Διαθέσιμο:



- [https://www.energymag.gr/ilektrokinisi/28469\\_apo-ybridiko-stathmo-paragogis-energeias-i-ilektrodotisi-tis-astypalaiais](https://www.energymag.gr/ilektrokinisi/28469_apo-ybridiko-stathmo-paragogis-energeias-i-ilektrodotisi-tis-astypalaiais)
- [71] “Φόρτιση και υποδομή | Smart & Sustainable Island,” Smart & Sustainable Island, Jul. 27, 2021. <https://smartastypalea.gov.gr/fortisi-ipodomi/?lang=el>
- [72] “Άγιος Ευστράτιος: Πώς ένα πιλοτικό έργο ΑΠΕ σε ένα μικρό νησί του Αιγαίου μπορεί να αλλάξει την Ελλάδα”, LimnosReport.gr :: Ειδήσεις από τη Λήμνο και το Β. Αιγαίο, Apr. 19, 2021. Available: <https://www.limnosreport.gr/limnos/175563/agios-eustratios-pos-ena-pilotiko-ergo-ape-se-ena-mikro-nisi-toy-aigaiou-mporei-na-allaxei-tin-ellada/>
- [73] “Αη Στράτης: Το πρώτο ενεργειακά αυτόνομο νησί της Ελλάδας,” ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ, Nov. 23, 2023. Available: <https://www.terna-energy.com/restories/ai-stratis-to-proto-energeiaka-aytonom/>
- [74] "Artificial intelligence." (2024, August 29). Wikipedia contributors. in Wikipedia, The Free Encyclopedia [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Artificial\\_intelligence&oldid=1242969037](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Artificial_intelligence&oldid=1242969037)
- [75] R. Eskandarpour, "Power System Resilience Enhancement Using Artificial Intelligence," Ph.D. dissertation, Daniel Felix Ritchie School of Engineering and Computer Science, Electrical and Computer Engineering, University of Denver, Denver, Colorado, United States, 2019. Available: <https://digitalcommons.du.edu/etd/1656>
- [76] J. Holdsworth, M. Scapicchio, “What is Deep Learning?,” IBM [Online], Jun. 17, 2024. Available: <https://www.ibm.com/topics/deep-learning>
- [77] S. Krupsky, (2024, July 5), "Επεξεργασία φυσικής γλώσσας Εισαγωγή: τι είναι η επεξεργασία φυσικής γλώσσας (NLP)", *NLP Cloud* [Online]. Available: <https://nlpccloud.com/el/introduction-what-is-nlp-natural-language-processing.html>
- [78] “Υπολογιστική Όραση (Computer Vision): Ορισμός και Εφαρμογές,” *Big Blue Data Academy* [Online], Sep. 09, 2023. Available: <https://bigblue.academy/gr/upologistiki-orasi>
- [79] “Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks): Ορισμός & Εφαρμογές,” *Big Blue Data Academy* [Online]. Mar. 03, 2023. Available: <https://bigblue.academy/gr/neuronika-diktua>
- [80] E. Keserer, “The five main subsets of AI: (Machine learning, NLP, and more),” Akkio, Jan. 05, 2022. Available: <https://www.akkio.com/post/the-five-main-subsets-of-ai-machine-learning-nlp-and-more>
- [81] Α. Γεωργούλ., (2015) Τεχνητή νοημοσύνη [Online]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-666>
- [82] Saini, S. (2021). Supervised vs. Unsupervised Learning: What’s the Difference [Online]. LinkedIn. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/supervised-vs-unsupervised-learning-whats-difference-smriti-saini/>
- [83] F. M. Almasoudi, "Enhancing Power Grid Resilience through Real-Time Fault Detection and Remediation Using Advanced Hybrid Machine Learning Models" Sustainability, vol. 15, no. 10, p. 8348. Jan. 2023. Available: <https://doi.org/10.3390/su15108348>
- [84] "Τι Είναι τα Large Language Models και Πώς Λειτουργούν;" *Big Blue Data Academy* [Online]. May 31, 2023. Available: <https://bigblue.academy/gr/large-language-models>
- [85] “What is a Large Language Model? | A Comprehensive LLMs Guide,” Elastic, Available: <https://www.elastic.co/what-is/large-language-models>
- [86] M. Ahmed, “Support Vector Machines Explained,” YouTube, Feb. 11, 2021. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=1Pc-EG3Uabk>

- [87] M. M. Hosseini and M. Parvania, "Artificial intelligence for resilience enhancement of power distribution systems," in *The Electricity Journal*, vol. 34, no. 1, p. 106880, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106880>.
- [88] "Πιθανότητες – Λογιστική Παλινδρόμηση Logistic regression", *datanalysis* [Online], Jul. 25, 2022. Available: <https://datanalysis.net/questionnaires/logistic-regression/>
- [89] "Ποια είναι η σημασία του Monte Carlo Tree Search (MCTS) στην ενισχυτική μάθηση και πώς ισορροπεί μεταξύ εξερεύνησης και εκμετάλλευσης κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων;", *EITCA* [Online]. (2024, June 11). Available: <https://el.eitca.org/artificial-intelligence/eitc-ai-arl-advanced-reinforcement-learning/deep-reinforcement-learning/planning-and-models/examination-review-planning-and-models/what-is-the-significance-of-monte-carlo-tree-search-mcts-in-reinforcement-learning-and-how-does-it-balance-between-exploration-and-exploitation-during-the-decision-making-process/>
- [90] "Greedy Algorithms," *GeeksforGeeks* [Online], Feb. 07, 2024. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/greedy-algorithms>
- [91] Λ. Μακρυκώστας. "Η Επανάσταση της Τεχνητής Νοημοσύνης στον Κόσμο της Ενέργειας" *Synenergy Advisors* [Online]. Jan. 8, 2024, Available: <https://www.synenergy-advisors.com/nea/i-epanastasi-tis-tekhnitis-noimosynis-ston-kosmo-tis-energheias>
- [92] "Η Τεχνητή Νοημοσύνη αλλάζει τα δεδομένα στα ηλεκτρικά δίκτυα - Η λύση του ChatGrid," *worldenergynews.gr* [Online], 2024. Available: <https://www.worldenergynews.gr/energeia/articles/552802/i-texniti-noimosyni-allazei-ta-dedomena-sta-ilektrika-diktya-i-lysi-tou-chatgrid>
- [93] "Meet ChatGridTM: a new AI-powered grid visualization tool," , *Pacific Northwest National Laboratory*, YouTube, Mar. 20, 2024. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=qP4N97WJKpU>
- [94] E. Puig-Santana, "Grid Modeling Tool Successfully Launches on World's Fastest Supercomputer," *PNNL*, May 30, 2023. Available: <https://www.pnnl.gov/publications/grid-modeling-tool-successfully-launches-worlds-fastest-supercomputer>
- [95] "ExaGO: Exascale Grid Optimization Toolkit," *PNNL* [Online] Sep. 22, 2021. Available: <https://www.pnnl.gov/copyright/exago-exascale-grid-optimization-toolkit>
- [96] J. Wendel, "ChatGridTM: A New Generative AI Tool for Power Grid Visualization," *PNNL* [Online], Feb. 22, 2024. Available: <https://www.pnnl.gov/news-media/chatgridtm-new-generative-ai-tool-power-grid-visualization>
- [97] Consultancy Services Team, "Top 10 applications of AI in the energy sector," *FDM Group* [Online], Mar. 07, 2024. Available: <https://www.fdmgroup.com/news-insights/ai-in-energy-sector/>
- [98] "PowerFactory - DIgSILENT," *www.digsilent.de*. Available: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>
- [99] Κ. Ψυχογιός, "Χρήση της γλώσσας προγραμματισμού DPL του λογισμικού DIgSILENT PowerFactory για τη συστηματοποίηση μελετών προστασίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας," *Διπλωματική εργασία*, (pp. 59–92), Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα, 2016. Διαθέσιμο: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/42793?show=ful>
- [100] G. K. Suh, "PowerFactory 15 User Manual DIG SILENT PowerFactory," *Academia.edu*, Oct. 20, 2019. Available:

- [https://www.academia.edu/40677599/PowerFactory\\_15\\_User\\_Manual\\_DIG\\_SILENT\\_PowerFactory](https://www.academia.edu/40677599/PowerFactory_15_User_Manual_DIG_SILENT_PowerFactory)
- [101] Φ. Θέμελης, "Εκπόνηση μελετών προστασίας υπερέντασης δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση του λογισμικού DigSILENT PowerFactory," Διπλωματική εργασία, (pp. 51–160), Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα, 2016. Διαθέσιμο: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/42762>
- [102] "digsilent powerfactory tutorials," asa pro, YouTube. Available: [http://www.youtube.com/playlist?list=PLuoxThigvXG6fT4tKhFYgQFDJrAi\\_BL7t](http://www.youtube.com/playlist?list=PLuoxThigvXG6fT4tKhFYgQFDJrAi_BL7t)
- [103] "Μέθοδος του Νεύτωνα." (2023, Φεβρουαρίου 16). Βικιπαίδεια, Η Ελεύθερη Εγκυκλοπαίδεια [Online]. Διαθέσιμο: [https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Ειδικό:ΠαραπομπήΑυτήΤηΣελίδα&page=Μέθοδος\\_του\\_Νεύτωνα&id=991288&wpFormIdentifier=titleform](https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Ειδικό:ΠαραπομπήΑυτήΤηΣελίδα&page=Μέθοδος_του_Νεύτωνα&id=991288&wpFormIdentifier=titleform)
- [104] F. Gonzalez-Longatt, J. Rueda, PowerFactory Applications for Power System Analysis. Springer, Jan. 2015. doi: 10.1007/978-3-319-12958-7
- [105] «Προδιαγραφές Αποζεύξιμου πυκνωτή», 30 Αυγ. 2022, ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. Διεύθυνση Περιφέρειας Αττικής 30 Αυγ. 2022

# Παράρτημα

## Εικόνες

|                                                                                                                          | Σελ. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Εικόνα 1.1:</b> Η δομή ενός ΣΗΕ.                                                                                      | 14   |
| <b>Εικόνα 1.2:</b> Στοιχεία για το Ελληνικό Δίκτυο Διανομής από το Σχέδιο Ανάπτυξης Δικτύου (ΣΑΔ) 2024 - 2028 του ΔΕΔΔΗΕ | 15   |
| <b>Εικόνα 1.3:</b> Οι επιπτώσεις της αύξησης της θερμοκρασίας στην Ελλάδα.                                               | 17   |
| <b>Εικόνα 1.4:</b> Πάγος σε αγωγούς Δικτύου.                                                                             | 18   |
| <b>Εικόνα 1.5:</b> Καταστροφή εναέριου Δικτύου εξαιτίας ισχυρών ανέμων.                                                  | 19   |
| <b>Εικόνα 1.6:</b> Το ΚΥΤ Αχαρνών μετά το μεγάλο σεισμό του Σεπτεμβρίου του 1999.                                        | 22   |
| <b>Εικόνα 1.7:</b> Η πλημμύρα στην Μάνδρα, 2017.                                                                         | 26   |
| <b>Εικόνα 1.8:</b> Καταστροφή στο σύστημα ηλεκτροδότησης, κακοκαιρία “Ιανός”.                                            | 28   |
| <b>Εικόνα 1.9:</b> Αποκατάσταση από τεχνικό συνεργείο ΔΕΔΔΗΕ σε εξοπλισμό του εναερίου Δικτύου, κακοκαιρία «Μήδεια».     | 29   |
| <b>Εικόνα 1.10:</b> Καταστροφή εναέριου Υ/Σ από πυρκαγιά, Ιπποκράτειος Πολιτεία 2021.                                    | 30   |
| <b>Εικόνα 1.11:</b> Καταστροφή σύλου Μέσης Τάσης – Πυρκαγιές, καλοκαίρι 2021.                                            | 31   |
| <b>Εικόνα 1.12:</b> Καταστροφή εναερίου Δικτύου Μ.Τ.                                                                     | 32   |
| <b>Εικόνα 1.13:</b> Καταστροφή εναερίου Δικτύου Μ.Τ.                                                                     | 32   |
| <b>Εικόνα 1.14:</b> Καταστροφή εναερίου Υ/Σ.                                                                             | 32   |
| <b>Εικόνα 1.15:</b> Αποκατάσταση εναερίου Δικτύου.                                                                       | 32   |
| <b>Εικόνα 1.16:</b> Υποχώρηση δίστυλου Μ/Σ από το βάρος του χιονιού.                                                     | 33   |
| <b>Εικόνα 1.17:</b> Ο όγκος του χιονιού στον Υμηττό μετά την διέλευση της κακοκαιρίας «Έλπις».                           | 34   |
| <b>Εικόνα 1.18:</b> Ερπυστριοφόρο όχημα στην περιοχή Φιλοθέης - Κηφισιάς (ΠΦΚ/ΔΠΑ).                                      | 34   |
| <b>Εικόνα 1.19:</b> Υμηττός (κορυφή – Προς κεραίες κινητής τηλεφωνίας).                                                  | 35   |
| <b>Εικόνα 1.20:</b> Το οδικό δίκτυο στην περιοχή Ζωγράφου μετά την διέλευση της κακοκαιρίας.                             | 35   |
| <b>Εικόνα 1.21:</b> Σταμάτα - αποκλεισμός εισόδου σε εγκαταστάσεις.                                                      | 35   |
| <b>Εικόνα 2.1:</b> Καμπύλη ανθεκτικότητας «τριγώνου».                                                                    | 40   |
| <b>Εικόνα 2.2:</b> «Τραπεζοειδής» καμπύλη ανθεκτικότητας.                                                                | 41   |
| <b>Εικόνα 2.3:</b> Μέτρα πριν, κατά την διάρκεια και μετά από ένα ακραίο συμβάν που πλήττει το δίκτυο.                   | 42   |
| <b>Εικόνα 2.4:</b> Εννοιολογική καμπύλη ανθεκτικότητας που σχετίζεται με ένα συμβάν.                                     | 43   |
| <b>Εικόνα 2.5:</b> Βήματα Διαδικασίας Ανάλυσης Ανθεκτικότητας.                                                           | 43   |
| <b>Εικόνα 2.6:</b> Μαρκοβιανές αλυσίδες δύο και τριών σταδίων. Περιγράφουν τις καταστάσεις του καιρού.                   | 45   |
| <b>Εικόνα 2.7:</b> Διαχωρισμός Δικτύου σε περιοχές ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στην κάθε μία.                 | 46   |
| <b>Εικόνα 2.8:</b> Αναπαράσταση συστήματος ενέργειας με χρήση γράφου.                                                    | 47   |
| <b>Εικόνα 2.9:</b> Ταξινόμηση μεθόδων μέτρησης της ανθεκτικότητας.                                                       | 48   |
| <b>Εικόνα 2.10:</b> Ταξινόμηση μεθόδων μέτρησης της ανθεκτικότητας.                                                      | 50   |

|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Εικόνα 2.11:</b> | Οι δείκτες VaR και CVaR όπως αναπαρίστανται σε συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 51 |
| <b>Εικόνα 2.12:</b> | Καμπύλη ανθεκτικότητας του Δικτύου κατά τη διάρκεια ενός φαινομένου. Η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει την ανθεκτικότητα ενός Δικτύου το οποίο δεν έχει λάβει τα απαραίτητα προληπτικά μέτρα για την βελτίωση της ανθεκτικότητας του. Η ανθεκτικότητα του «έξυπνου» Δικτύου αναπαρίσταται με την μπλε γραμμή. Η πράσινη γραμμή αναπαριστά το Δίκτυο με ενισχυμένο εξοπλισμό. | 55 |
| <b>Εικόνα 2.13:</b> | Χρήση ειδικών εφαρμογών για την ανάκτηση δεδομένων του Δικτύου.                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 56 |
| <b>Εικόνα 2.14:</b> | Εναλλακτική ειδική εφαρμογή για την ανάκτηση δεδομένων του Δικτύου.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 56 |
| <b>Εικόνα 2.15:</b> | Η πρόοδος στην Ευρώπη, όσον αφορά την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 58 |
| <b>Εικόνα 2.16:</b> | Γενική δομή μικροδικτύου.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 59 |
| <b>Εικόνα 2.17:</b> | Ενίσχυση ανθεκτικότητας του Δικτύου Διανομής με χρήση μικροδικτύων.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 59 |
| <b>Εικόνα 2.18:</b> | Δομή ενός υβριδικού AC/DC μικροδικτύου.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 61 |
| <b>Εικόνα 2.19:</b> | Διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος κεντρικού ελέγχου μικροδικτύων.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 62 |
| <b>Εικόνα 2.20:</b> | Διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος αποκεντρωμένου ελέγχου μικροδικτύων.                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 62 |
| <b>Εικόνα 2.21:</b> | Διάγραμμα αρχιτεκτονικής συστήματος υβριδικού ελέγχου μικροδικτύων.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 63 |
| <b>Εικόνα 2.22:</b> | Το μικροδίκτυο στο νησί της Κύθνου.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 68 |
| <b>Εικόνα 2.23:</b> | Το μικροδίκτυο στο νησί της Τήλου.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 69 |
| <b>Εικόνα 2.24:</b> | Τα βραβεία του έργου του προγράμματος TILOS.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 70 |
| <b>Εικόνα 2.25:</b> | Τα σχέδια του προγράμματος ASSI προς την δημιουργία ενός μικροδικτύου στην Αστυπάλαια.                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 71 |
| <b>Εικόνα 2.26:</b> | Ο Υβριδικός σταθμός στο νησί του Αγίου Ευστρατίου.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 72 |
| <b>Εικόνα 2.27:</b> | Οι διαδικασίες της επιβλεπόμενης και της μη επιβλεπόμενης μάθησης.                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 73 |
| <b>Εικόνα 2.28:</b> | Η δομή ενός συνελκτικού νευρωνικού δικτύου.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 74 |
| <b>Εικόνα 2.29:</b> | Οι λειτουργίες του μοντέλου LLM.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 74 |
| <b>Εικόνα 2.30:</b> | Απεικόνιση λειτουργίας της μεθόδου της λογιστικής παλινδρόμησης.                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 75 |
| <b>Εικόνα 2.31:</b> | Δισδιάστατη απεικόνιση ενός SVM.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 75 |
| <b>Εικόνα 2.32:</b> | Ταξινόμηση φωτογραφιών από εφαρμογή TN.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 76 |
| <b>Εικόνα 2.33:</b> | Κατεστραμμένος στύλος Μέσης Τάσης. Το μέγεθος της ζημίας υπολογίζεται από εφαρμογή TN μέσω της γωνίας κλίσης του στύλου.                                                                                                                                                                                                                                                   | 77 |
| <b>Εικόνα 2.34:</b> | Καμμένος στύλος Μέσης Τάσης. Το μέγεθος της ζημίας υπολογίζεται από εφαρμογή TN, ανάλογα με την καμένη περιοχή του στύλου.                                                                                                                                                                                                                                                 | 77 |
| <b>Εικόνα 2.35:</b> | Το περιβάλλον του προγράμματος ChatGrid.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 79 |
| <b>Εικόνα 2.36:</b> | Ενδεικτικές ερωτήσεις και απαντήσεις που μπορούν να τεθούν στο ChatGrid.                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 80 |
| <b>Εικόνα 3.1:</b>  | Ο Διαχειριστής Δεδομένων (data manager) του PowerFactory.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 82 |
| <b>Εικόνα 3.2:</b>  | Πρόσβαση στις πληροφορίες αντικείμενου (Γραμμή) Δικτύου μέσω του Διαχειριστή Δεδομένων                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 83 |

|                     |                                                                                                                          |     |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Εικόνα 3.3:</b>  | Επεξεργασία αντικειμένων μέσω του edit relevant objects for calculation.                                                 | 83  |
| <b>Εικόνα 3.4:</b>  | Επεξεργασία αντικειμένων μέσω του edit relevant objects for calculation.                                                 | 83  |
| <b>Εικόνα 3.5:</b>  | Δημιουργία νέου "project".                                                                                               | 84  |
| <b>Εικόνα 3.6:</b>  | Παράθυρο για την εισαγωγή ονόματος ενός "project".                                                                       | 84  |
| <b>Εικόνα 3.7:</b>  | Παράθυρο για την εισαγωγή ονόματος σε Δίκτυο ενός "project".                                                             | 85  |
| <b>Εικόνα 3.8:</b>  | Η επιφάνεια εργασίας του PowerFactory.                                                                                   | 85  |
| <b>Εικόνα 3.9:</b>  | Εισαγωγή νέας Μελέτης Περίπτωσης.                                                                                        | 86  |
| <b>Εικόνα 3.10:</b> | Αναδυόμενο παράθυρο για την εισαγωγή ονόματος μίας Μελέτης Περίπτωσης.                                                   | 87  |
| <b>Εικόνα 3.11:</b> | Ενεργοποιημένη Μελέτη Περίπτωσης.                                                                                        | 87  |
| <b>Εικόνα 3.12:</b> | Απενεργοποίηση Μελέτης Περίπτωσης.                                                                                       | 88  |
| <b>Εικόνα 3.13:</b> | 1 <sup>ος</sup> τρόπος εισαγωγής σεναρίου λειτουργίας (operation scenario).                                              | 88  |
| <b>Εικόνα 3.14:</b> | 2 <sup>ος</sup> τρόπος εισαγωγής σεναρίου λειτουργίας (operation scenario).                                              | 89  |
| <b>Εικόνα 3.15:</b> | Εισαγωγή αρχείων στο PowerFactory.                                                                                       | 89  |
| <b>Εικόνα 3.16:</b> | Εξαγωγή αρχείων στο PowerFactory.                                                                                        | 89  |
| <b>Εικόνα 3.17:</b> | Οι Βιβλιοθήκες που εμφανίζονται στα αριστερά της επιφάνειας εργασίας.                                                    | 90  |
| <b>Εικόνα 3.18:</b> | Εκκίνηση ανάλυσης ροής φορτίου για το εξεταζόμενο Δίκτυο.                                                                | 91  |
| <b>Εικόνα 3.19:</b> | Παράθυρο ρυθμίσεων μελέτης ροής φορτίου (1η καρτέλα).                                                                    | 91  |
| <b>Εικόνα 3.20:</b> | Παράθυρο ρυθμίσεων μελέτης ροής φορτίου (2η καρτέλα).                                                                    | 93  |
| <b>Εικόνα 3.21:</b> | Παράθυρο ρυθμίσεων μελέτης ροής φορτίου (3η καρτέλα).                                                                    | 93  |
| <b>Εικόνα 3.22:</b> | Παράθυρο ρυθμίσεων μελέτης ροής φορτίου (4η καρτέλα).                                                                    | 94  |
| <b>Εικόνα 3.23:</b> | Παράθυρο εμφάνισης αποτελεσμάτων μελέτης ροής φορτίου μέσω του Διαχειριστή μοντέλου του Δικτύου (Network model manager). | 95  |
| <b>Εικόνα 3.24:</b> | Αποτελέσματα στο πλαίσιο που αντιστοιχεί σε ζυγό αναφοράς.                                                               | 95  |
| <b>Εικόνα 3.25:</b> | Αποτελέσματα στο πλαίσιο που αντιστοιχεί σε φορτίο.                                                                      | 95  |
| <b>Εικόνα 3.26:</b> | Αποτελέσματα για το ποσοστό φόρτισης γραμμής.                                                                            | 96  |
| <b>Εικόνα 3.27:</b> | Αποτελέσματα για το ποσοστό φόρτισης γεννήτριας.                                                                         | 96  |
| <b>Εικόνα 3.28:</b> | Επιλογή μορφής αναφοράς.                                                                                                 | 96  |
| <b>Εικόνα 3.29:</b> | Παράθυρο ρυθμίσεων χρωματισμού ανάλογα με τα επίπεδα τάσεων και φόρτισης.                                                | 97  |
| <b>Εικόνα 3.30:</b> | Επιλογή χρωμάτων.                                                                                                        | 97  |
| <b>Εικόνα 3.31:</b> | Επιλογή στοιχείων του Δικτύου για την απεικόνιση των δεδομένων τους σε διάγραμμα.                                        | 98  |
| <b>Εικόνα 3.32:</b> | Διάγραμμα με μπάρες.                                                                                                     | 98  |
| <b>Εικόνα 3.33:</b> | Διάγραμμα "Voltage Profile".                                                                                             | 99  |
| <b>Εικόνα 4.1:</b>  | Προσομοίωση του Δικτύου της Κεφαλλονιάς με το πρόγραμμα: «DIgSilent PowerFactory».                                       | 100 |
| <b>Εικόνα 4.2:</b>  | M/Σ-29 εκτός λειτουργίας.                                                                                                | 102 |
| <b>Εικόνα 4.3:</b>  | Οι M/Σ-28 και M/Σ-30 είναι σε αποδεκτά επίπεδα φόρτισης.                                                                 | 102 |
| <b>Εικόνα 4.4:</b>  | Ενδεικτικές τιμές της πτώσης τάσης που εμφανίζεται στους ζυγούς του Δικτύου.                                             | 103 |

|                     |                                                                                                                   |     |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Εικόνα 4.5:</b>  | Νησίδα_1.                                                                                                         | 103 |
| <b>Εικόνα 4.6:</b>  | Νησίδα_2.                                                                                                         | 104 |
| <b>Εικόνα 4.7:</b>  | Νησίδα_3.                                                                                                         | 104 |
| <b>Εικόνα 4.8:</b>  | Διάγραμμα πτώσης τάσης κατά μήκος της αναχώρησης P-230.                                                           | 105 |
| <b>Εικόνα 4.9:</b>  | Προσθήκη πυκνωτή στο Δίκτυο.                                                                                      | 106 |
| <b>Εικόνα 4.10:</b> | Ρύθμιση των χαρακτηριστικών τιμών του πυκνωτή.                                                                    | 106 |
| <b>Εικόνα 4.11:</b> | Πτώση τάσης εκτός ορίων με την εγκατάσταση πυκνωτή.                                                               | 107 |
| <b>Εικόνα 4.12:</b> | Υπολογισμός πτώσης τάσης στο Δίκτυο.                                                                              | 107 |
| <b>Εικόνα 4.13:</b> | Αναχώρηση P-230 στην οποία στην οποία καταγράφεται μεγάλη πτώση τάσης πριν την εγκατάσταση H/Z.                   | 108 |
| <b>Εικόνα 4.14:</b> | Επίπεδα τάσης κατά μήκος της αναχώρησης P-230.                                                                    | 109 |
| <b>Εικόνα 4.15:</b> | Προσθήκη ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (H/Z) κατά μήκος της αναχώρησης P-230.                                          | 109 |
| <b>Εικόνα 4.16:</b> | Φορτία νησίδας_1.                                                                                                 | 110 |
| <b>Εικόνα 4.17:</b> | Ισχύς μονάδας παραγωγής της νησίδας_1.                                                                            | 110 |
| <b>Εικόνα 4.18:</b> | Επίπεδα τάσης στους κόμβους της νησίδας_1.                                                                        | 111 |
| <b>Εικόνα 4.19:</b> | Η σχηματιζόμενη νησίδα του Δικτύου πριν τις απαραίτητες τροποποιήσεις.                                            | 111 |
| <b>Εικόνα 4.20:</b> | Η σχηματιζόμενη νησίδα του Δικτύου μετά τις απαραίτητες τροποποιήσεις.                                            | 112 |
| <b>Εικόνα 4.21:</b> | Φορτία νησίδας_2.                                                                                                 | 112 |
| <b>Εικόνα 4.22:</b> | Ισχύς μονάδων παραγωγής της νησίδας_2.                                                                            | 112 |
| <b>Εικόνα 4.23:</b> | Επίπεδα τάσης στους κόμβους της νησίδας_2.                                                                        | 113 |
| <b>Εικόνα 4.24:</b> | Νησίδα_2.                                                                                                         | 113 |
| <b>Εικόνα 4.25:</b> | Νησίδα_3.                                                                                                         | 114 |
| <b>Εικόνα 4.26:</b> | Επίπεδα τάσης στους κόμβους της νησίδας_3.                                                                        | 114 |
| <b>Εικόνα 4.27:</b> | Η Γραμμή-02 είναι σε λειτουργία τροφοδοτώντας τμήμα του Δικτύου.                                                  | 115 |
| <b>Εικόνα 4.28:</b> | Η Γραμμή-02 είναι εκτός λειτουργίας. Τμήμα του Δικτύου πλέον είναι αποσυνδεδεμένο.                                | 115 |
| <b>Εικόνα 4.29:</b> | Κόμβοι του Δικτύου οι οποίοι δεν τροφοδοτούνται.                                                                  | 116 |
| <b>Εικόνα 4.30:</b> | Τροφοδότηση του αρχικά αποσυνδεδεμένου τμήματος του Δικτύου, από την αναχώρηση P-290 μέσω του Διακόπτη-46.        | 117 |
| <b>Εικόνα 4.31:</b> | Πτώση τάσης εκτός ορίων για ορισμένους ζυγούς του Δικτύου - 1η περίπτωση (case_1).                                | 117 |
| <b>Εικόνα 4.32:</b> | Η πτώση τάσης κατά μήκος της αναχώρησης P-290 του υποσταθμού.                                                     | 118 |
| <b>Εικόνα 4.33:</b> | Τροφοδότηση του αρχικά αποσυνδεδεμένου τμήματος του Δικτύου, από τις αναχωρήσεις P-290 και P-310.                 | 118 |
| <b>Εικόνα 4.34:</b> | Πτώση τάσης εκτός ορίων για ορισμένους ζυγούς του Δικτύου 2η περίπτωση (case_2).                                  | 119 |
| <b>Εικόνα 4.35:</b> | Η πτώση τάσης κατά μήκος της αναχώρησης P-310 του υποσταθμού.                                                     | 119 |
| <b>Εικόνα 4.36:</b> | Εγκατάσταση πυκνωτή.                                                                                              | 120 |
| <b>Εικόνα 4.37:</b> | Επιλογή χαρακτηριστικών πυκνωτή.                                                                                  | 120 |
| <b>Εικόνα 4.38:</b> | Οι κόμβοι του Δικτύου στους οποίους εμφανίζεται μεγαλύτερο ποσοστό πτώσης τάσης πριν την εγκατάσταση του πυκνωτή. | 121 |



|                     |                                                                                                                    |     |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Εικόνα 4.39:</b> | Η μείωση της πτώσης τάσης στους κόμβους του Δικτύου, μετά την εγκατάσταση του πυκνωτή.                             | 121 |
| <b>Εικόνα 4.40:</b> | Φόρτιση γραμμών σε υψηλά επίπεδα έπειτα από επιλογή υψηλών τιμών αέργου ισχύος του πυκνωτή (MVar) για τον πυκνωτή. | 121 |
| <b>Εικόνα 4.41:</b> | Υπολογισμός πτώσης τάσης στο Δίκτυο.                                                                               | 122 |
| <b>Εικόνα 4.42:</b> | Σχηματιζόμενη “νησίδα” στο Δίκτυο.                                                                                 | 123 |
| <b>Εικόνα 4.43:</b> | Προσθήκη ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (H/Z) για την τροφοδότηση της “νησίδας” που σχηματίστηκε στο Δίκτυο.             | 123 |
| <b>Εικόνα 4.44:</b> | Φορτία σχηματιζόμενης νησίδας.                                                                                     | 123 |
| <b>Εικόνα 4.45:</b> | Χρήση του H/Z για την παραγωγή ισχύος προς κατανάλωση από τα φορτία της σχηματιζόμενης “νησίδας” στο Δίκτυο.       | 124 |
| <b>Εικόνα 4.46:</b> | Διαμόρφωση του Δικτύου έτσι ώστε όλα τα φορτία να τροφοδοτούνται από τουλάχιστον μία γεννήτρια.                    | 126 |
| <b>Εικόνα 4.47:</b> | Τα φορτία της αναχώρησης P-220 (θεωρείται ότι είναι οι μέγιστες τιμές που μπορεί να λάβουν).                       | 126 |
| <b>Εικόνα 4.48:</b> | Η παραγωγή που είναι εγκατεστημένη κατά μήκος της αναχώρησης P-220.                                                | 127 |
| <b>Εικόνα 4.49:</b> | Πτώση τάσης εκτός αποδεκτών ορίων για 2 από τις 7 νησίδες του Δικτύου.                                             | 129 |
| <b>Εικόνα 4.50:</b> | Διαμόρφωση του Δικτύου μετά την αλλαγή της κατάστασης κατάλληλων διακοπών.                                         | 129 |
| <b>Εικόνα 4.51:</b> | Πτώση τάσης εκτός ορίων σε τμήμα του Δικτύου.                                                                      | 130 |
| <b>Εικόνα 4.52:</b> | Εγκατάσταση πυκνωτή στο τμήμα του Δικτύου όπου παρουσιάζεται πτώση τάσης στους κόμβους.                            | 130 |
| <b>Εικόνα 4.53:</b> | Ρύθμιση των χαρακτηριστικών τιμών του πυκνωτή.                                                                     | 131 |
| <b>Εικόνα 4.54:</b> | Αυξημένη φόρτιση γραμμών εξαιτίας της υψηλής έγχυσης αέργου ισχύος από τον πυκνωτή.                                | 131 |
| <b>Εικόνα 4.55:</b> | Υπολογισμός πτώσης τάσης στο Δίκτυο.                                                                               | 132 |
| <b>Εικόνα 4.56:</b> | Τα επίπεδα τάσης στους κόμβους του Δικτύου.                                                                        | 133 |
| <b>Εικόνα 4.57:</b> | Όλο το Δίκτυο λειτουργεί ως μία “νησίδα”.                                                                          | 133 |
| <b>Εικόνα 4.58:</b> | Τα επίπεδα τάσης στους κόμβους του Δικτύου.                                                                        | 134 |