



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – epminfo@power.ece.ntua.gr

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Δυνατότητα Ένταξης Ανανεώσιμων Πηγών
Ενέργειας (ΑΠΕ) σε Υφιστάμενο Υποσταθμό
χωρίς επιπλέον επενδύσεις»*

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Βαρβάρας Λέκκα

Επιβλέπων

Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Ομότιμος Καθηγητής
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών
Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – epminfo@power.ece.ntua.gr

POST-GRADUATE THESIS

«Integration potential of Renewable Energy Sources (RES) into an existing substation without additional investments»

Student

Varvara Lekka

Supervisor

Nikolaos Hatziargyriou
Professor Emeritus
Department of Electrical & Computer Engineering, NTUA

Athens, October 2023

Στον πατέρα μου, Σοφοκλή.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, για την συνεργασία μας και την ευκαιρία που μου παρείχε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα στην διπλωματική μου εργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ερευνητή του Εργαστηρίου Smart Rue Θάνο Λαγό και τον υποψήφιο διδάκτορα Ανδρέα Γάτο για τις πολύτιμες συμβουλές τους και την συνεχή καθοδήγηση κατά τη διάρκεια αυτής της έρευνας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους συναδέλφους του ΔΕΔΔΗΕ της Περ. Ιωαννίνων που ήταν πάντα διαθέσιμοι για εμένα και να εκφράσω την βαθύτερη εκτίμησή μου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, Σοφία και Ντίνο, για την υποστήριξη και την γενναιοδωρία τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Αυτή η επιτυχία δεν θα ήταν δυνατή χωρίς εσάς.

Περίληψη

Η ενσωμάτωση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στα ηλεκτρικά δίκτυα αποτελεί μια παγκόσμια προτεραιότητα, καθοδηγούμενη από την ανάγκη για βιωσιμότητα και τη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Ωστόσο, η προσθήκη ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής περιορίζεται λόγω του κορεσμού των υφιστάμενων δικτύων και της τρέχουσας μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση ένταξης ΑΠΕ στα δίκτυα. Σ' αυτήν την διπλωματική εργασία αναπτύχθηκαν τα κριτήρια σύνδεσης των φωτοβολταϊκών σταθμών όπως καθορίζονται από τον Διαχειριστή Δικτύου (ΔΕΔΔΗΕ). Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε ψηφιοποίηση μιας ροηφόρου γραμμής του Υποσταθμού Δολιανών στον Νομό Ιωαννίνων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Microsoft Visio. Η ανάλυση συνεχίστηκε με την εκτέλεση προσομοιώσεων στο MATLAB, συγκρίνοντας σενάρια με την τρέχουσα μεθοδολογία του ΔΕΔΔΗΕ και με μια στοχαστική προσέγγιση, η οποία ευνοεί την ένταξη φωτοβολταϊκών, χωρίς την ανάγκη για πρόσθετες αναβαθμίσεις δικτύου. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει νέες προοπτικές για τη διαχείριση των δικτύων, ενισχύοντας την ολοκληρωμένη και αποδοτική ενσωμάτωση των ΑΠΕ. Η στοχαστική μεθοδολογία επιτρέπει την ένταξη φωτοβολταϊκών στο δίκτυο, αν οι παραβιάσεις των τάσεων διατηρούνται κάτω από 5% στη διάρκεια ενός έτους. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στον διαχειριστή να πραγματοποιεί περικοπές παραγωγής χωρίς αποζημίωση, εφόσον υπερβαίνεται το καθορισμένο όριο. Η σύγκριση διαφορετικών σεναρίων με την τρέχουσα μεθοδολογία του ΔΕΔΔΗΕ και της νέας στοχαστικής προσέγγισης, απέδειξε ότι η νέα μεθοδολογία επιτρέπει μεγαλύτερη ενσωμάτωση ΑΠΕ, χωρίς να επηρεάζεται η ευστάθεια του δικτύου.

Abstract

The integration of Renewable Energy Sources (RES) into electrical networks is a world-wide imperative, motivated by the pursuit of sustainability and the reduction of carbon emissions. Nonetheless, the expansion of RES within distribution networks faces constraints owing to the existing networks' capacity limitations and the prevalent methods employed for assessing the integration of RES. In this thesis, criteria for connecting photovoltaic stations were established, as defined by the Network Operator (HEDNO). In this project, a flow line diagram of the Dolianon Substation, located near the city of Ioannina, was digitally rendered using Microsoft Visio software. The study progressed with conducting simulations in MATLAB, contrasting scenarios using HEDNO's existing methodology with a stochastic model that supports the incorporation of photovoltaic systems without necessitating further upgrades to the network. This method provides innovative viewpoints for the sustainable operation of energy grids, promoting a more thorough and efficient incorporation of Renewable Energy Sources (RES). The stochastic approach permits the inclusion of photovoltaic systems into the grid, provided that the instances of voltage non-compliance remain under 5%. This approach enables the Distribution System Operator (DSO) to reduce the output of photovoltaic systems without offering compensation, provided that the predetermined threshold is surpassed. Comparing various scenarios using HEDNO's existing methods and the stochastic approach demonstrated that the latter enables more substantial integration of RES into the network without compromising its stability.

Πίνακας περιεχομένων

| | |
|--|------|
| Ευχαριστίες | v |
| Περίληψη | vii |
| Abstract | ix |
| Πίνακας περιεχομένων | x |
| Κατάλογος σχημάτων | xiii |
| Κατάλογος πινάκων | xv |
| 1 Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Συνεισφορά | 3 |
| 1.2 Δομή Εργασίας | 3 |
| 2 Σύνδεση Φωτοβολταϊκών Σταθμών στο Δίκτυο | 5 |
| 2.1 Κριτήρια και Προϋποθέσεις για την Σύνδεση Σταθμών Παραγωγής στο Δίκτυο | 5 |
| 2.2 Όρια σχεδιασμού για διαταραχές της Ποιότητας Τάσης | 10 |
| 2.3 Πρότυπο EN 50160 | 12 |
| 2.4 Διεσπαρμένη Παραγωγή στη Γερμανία | 13 |
| 3 Ψηφιοποίηση πραγματικού Δικτύου ΔΕΔΔΗΕ | 17 |
| 3.1 Χαρακτηριστικά του Δικτύου που μελετήθηκε | 17 |
| 4 Στοχαστική Μεθοδολογία | 23 |
| 4.1 Μέθοδοι υπολογισμού της Πιθανοτικής Ροής Φορτίου | 24 |
| 4.1.1 Στόχος Υπολογισμού της Πιθανοτικής Ροής Φορτίου | 24 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.1.2 | Ταξινόμηση των Μεθόδων Πιθανοτικής Ροής Φορτίου | 25 |
| 4.1.3 | Monte Carlo | 26 |
| 4.2 | Εύρεση Κατανομής Δειγματοληψίας | 27 |
| 4.2.1 | Εκτίμηση σε Οριακές Κατανομές | 27 |
| 4.2.2 | Συντελεστές Συσχέτισης | 29 |
| 4.2.3 | Μέθοδος των Copulas | 29 |
| 4.2.4 | Εφαρμογή της Στοχαστικής Μεθοδολογίας | 30 |
| 4.3 | Ανάλυση Ροής Ισχύος και Δειγματοληψία | 32 |
| 4.3.1 | Εξισώσεις ροής ισχύος για δίκτυα διανομής | 32 |
| 4.3.2 | Δειγματοληψία από κατανομή | 34 |
| 4.4 | Εύρεση Πιθανότητας Παραβίασης Περιορισμών | 35 |
| 5 | 5. Παράμετροι Προσομοιώσεων σε Πραγματικό Δίκτυο Διανομής | 37 |
| 5.1 | Χρονοσειρές | 37 |
| 5.2 | Καμπύλες Φορτίου και Παραγωγής | 38 |
| 5.3 | Συσχετίσεις μεταξύ ΦΒ και Παραγωγών | 39 |
| 5.4 | Πλήθος Δειγμάτων Monte Carlo | 40 |
| 5.5 | Παράμετροι ΔΕΔΔΗΕ | 40 |
| 6 | 6 Προσομοιώσεις | 43 |
| 6.1 | Σενάριο 1 | 43 |
| 6.2 | Σενάριο 2 | 49 |
| 6.3 | Σενάριο 3 | 60 |
| 7 | 7 Συμπεράσματα | 65 |
| 7.1 | Σύνοψη και συμπεράσματα | 65 |
| 7.2 | Συγκρίσεις μεθοδολογιών και επιπτώσεις | 67 |
| | Βιβλιογραφία | 69 |

Κατάλογος σχημάτων

| | |
|---|----|
| 2.1 Καθαρή εγκατεστημένη χωρητικότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Γερμανία το 2023 [1] | 13 |
| 3.1 Συνολικός Χάρτης Περιθωρίων Διασυνδεδεμένου Συστήματος | 18 |
| 3.2 Ακτινική Τοπολογία Δικτύου | 20 |
| 3.3 Ψηφιοποιημένο Δίκτυο μέσω Microsoft Visio | 22 |
| 4.1 Κατηγοριοποίηση υπολογιστικών μεθόδων (Probabilistic Load Flow - PLF) [2] | 25 |
| 5.1 Καμπύλες παραγωγών[3] | 38 |
| 5.2 Καμπύλες φορτίων διαφορετικών τύπων[4] | 39 |
| 6.1 Ζυγοί 1-30 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00 | 45 |
| 6.2 Ζυγοί 31-60 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00 | 45 |
| 6.3 Ζυγοί 61-90 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00 | 46 |
| 6.4 Ζυγοί 91-120 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00 | 46 |
| 6.5 Ζυγοί 121-150 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00 | 47 |
| 6.6 Ζυγοί 151-180 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00 | 47 |
| 6.7 Ζυγοί 181-210 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00 | 48 |
| 6.8 Ζυγοί 211-227 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00 | 48 |
| 6.9 Ζυγοί 1-30 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00 | 50 |
| 6.10 Ζυγοί 31-60 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00 | 50 |
| 6.11 Ζυγοί 61-90 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00 | 51 |
| 6.12 Ζυγοί 91-120 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00 | 51 |
| 6.13 Ζυγοί 121-150 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00 | 52 |
| 6.14 Ζυγοί 151-180 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00 | 52 |

| | | |
|--|-----------|----|
| 6.15 Ζυγοί 181-210 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00 | | 53 |
| 6.16 Ζυγοί 211-227 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00 | | |
| | | 53 |
| 6.17 Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 09:00 | | 55 |
| 6.18 Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 10:00 | | 55 |
| 6.19 Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 11:00 | | 56 |
| 6.20 Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 12:00 | | 56 |
| 6.21 Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 13:00 | | 57 |
| 6.22 Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 14:00 | | 57 |
| 6.23 Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00 | | 58 |
| 6.24 Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 16:00 | | 58 |
| 6.25 Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 17:00 | | 59 |
| 6.26 Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 18:00 | | 59 |
| 6.27 Ζυγοί 1-30 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00 | | 60 |
| 6.28 Ζυγοί 31-60 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00 | | 61 |
| 6.29 Ζυγοί 61-90 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00 | | 61 |
| 6.30 Ζυγοί 91-120 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00 | | 62 |
| 6.31 Ζυγοί 121-150 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00 | | 62 |
| 6.32 Ζυγοί 151-180 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00 | | 63 |
| 6.33 Ζυγοί 181-210 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00 | | 63 |
| 6.34 Ζυγοί 211-227 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00 | | 64 |

Κατάλογος πινάκων

| | |
|---|----|
| 3.1 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Γραμμών ΜΤ | 19 |
| 6.1 Ποσοστά παραβιάσεων | 54 |

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Σε μια εποχή επικεντρωμένη στη βιωσιμότητα, η ενσωμάτωση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στα ηλεκτρικά δίκτυα αποτελεί μια προτεραιότητα παγκοσμίως. Η ένταξη των ΑΠΕ είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση ενός βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος, καθώς συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών άνθρακα και στην αντικατάσταση των παραδοσιακών, ρυπογόνων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, τα υφιστάμενα ενεργειακά δίκτυα αντιμετωπίζουν προκλήσεις στην υποστήριξη της ταχείας και μαζικής εισαγωγής των ΑΠΕ, καθώς πολλά από αυτά είναι κορεσμένα και σχεδιασμένα για τροφοδοσία αποκλειστικά από μία κατεύθυνση. Η αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, δηλαδή η ικανότητα του να δέχεται νέες εγκαταστάσεις ΑΠΕ, χωρίς την ανάγκη αναβαθμίσεων των υποδομών του, απαιτεί την ανάπτυξη καινοτόμων μεθοδολογιών. [5]

Συγκεκριμένα, εξετάζεται μία νέα μεθοδολογία που εστιάζει στην αναλυτική αξιολόγηση κάθε αίτησης ενσωμάτωσης ΑΠΕ, λαμβάνοντας υπόψη τις δυναμικές αλλαγές στο φορτίο και την παραγωγή, καθώς και τις τεχνικές διαχείρισης δικτύου. Η προσέγγιση αυτή, απαιτεί μια σύνθετη και πολυεπίπεδη ανάλυση, η οποία θα ενσωματώσει θεωρητικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί από την επιστημονική κοινότητα.

Προκειμένου να υπάρχουν πραγματικά δεδομένα στην μελέτη, έγινε ψηφιοποίηση ενός πραγματικού δικτύου, ειδικότερα μιας ροήφορου γραμμής στο δίκτυο του Νομού Ιωαννίνων που τροφοδοτείται από τον Υ/Σ Δολιανών. Με την μετατροπή των στοιχείων σε ψηφιακή μορφή, είναι δυνατή η ανάλυση και η μελέτη του δικτύου.

Στη συνέχεια, επικεντρωθήκαμε στην εξέταση τριών διαφορετικών σεναρίων στο ψηφιοποιημένο πραγματικό δίκτυο, με σκοπό τη σύγκριση της τρέχουσας μεθοδολογίας του ΔΕΔΔΗΕ με τη νέα στοχαστική προσέγγιση. Η στοχαστική μεθοδολογία εισάγει μια πρωτοποριακή οπτική στην ανάλυση των ενεργειακών δικτύων, παρέχοντας ενδείξεις για τη συμπεριφορά των δικτύων υπό διάφορες συνθήκες. Η μεθοδολογία αυτή, συνδυάζοντας στοιχεία από τη θεωρία πιθανοτήτων και τη στατιστική ανάλυση, επιτρέπει τη διεξαγωγή αναλύσεων και προσομοιώσεων στα ενεργειακά δίκτυα μέσα σε μια ποικιλία πιθανών σεναρίων, εξασφαλίζοντας την εγκυρότητα των προγνώσεων.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η περιγραφή και η ανάλυση της νέας μεθοδολογίας, καθώς και η συγκριτική μελέτη με την υπάρχουσα μεθοδολογία του ΔΕΔΔΗΕ. Η ανάλυση αυτών των σεναρίων θα επιτρέψει τη βαθύτερη κατανόηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας και θα δείξει την εφαρμοσιμότητα και τα πλεονεκτήματά της στη βελτίωση της λειτουργίας των ενεργειακών δικτύων. Διερευνάται λοιπόν ο τρόπος, με τον οποίο η ψηφιοποίηση και η στοχαστική ανάλυση μπορούν να συνδυαστούν για την επίτευξη μιας ολιστικής και προηγμένης προσέγγισης στην ενεργειακή μοντελοποίηση, προς όφελος τόσο των διαχειριστών των δικτύων όσο και των τελικών χρηστών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί επίσης στην μελέτη και ανάλυση των προκλήσεων του υφιστάμενου δικτύου, καθώς και στην πρόταση μιας βελτιωμένης μεθοδολογίας για την αύξηση της χωρητικότητας και την φιλοξενία περαιτέρω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στα δίκτυα χωρίς αλλαγές στην υποδομή τους. Η μεθοδολογία αυτή θα προσδιορίσει τους παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα του δικτύου να φιλοξενήσει περισσότερα φωτοβολταϊκά πάρκα και θα αναπτύξει κριτήρια για την αξιολόγηση των αιτήσεων βάσει των προηγμένων αναλύσεων και των δεδομένων που θα συλλέγονται.

Αναμένεται ότι η εφαρμογή μιας τέτοιας μεθοδολογίας θα συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της ενσωμάτωσης των ΑΠΕ και στη βιωσιμότητα των ενεργειακών συστημάτων.

1.1 Συνεισφορά

Η συνεισφορά της διπλωματικής συνοψίζεται ως εξής:

1. Ψηφιοποίηση του Λειτουργικού Διαγράμματος μιας Ροηφόρου Γραμμής του Δικτύου.
2. Μελέτη Δεδομένων Χρονοσειρών και κατάλληλη προσαρμογή στο Ψηφιοποιημένο Δίκτυο.
3. Εφαρμογή στοχαστικής μεθοδολογίας και αποδοχή παραβιάσεων των ορίων της τάσης για ένα συγκεκριμένο ποσοστό του χρόνου, υποθέτοντας πως ο διαχειριστής του δικτύου θα έχει την δυνατότητα αποκοπής των συγκεκριμένων παροχών όταν κρίνεται αναγκαίο για να αποφευχθούν αυτές οι παραβιάσεις.
4. Υλοποίηση τριών σεναρίων προσομοιώσεων που αξιολογούν την ενσωμάτωση ΑΠΕ με την τρέχουσα μεθοδολογία του ΔΕΔΔΗΕ και με την στοχαστική μεθοδολογία.
5. Αξιολόγηση της νέας στοχαστικής μεθοδολογίας.

1.2 Δομή Εργασίας

Η δομή της παρούσας εργασίας έχει ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στην μεθοδολογία που εκτελεί ο Διαχειριστής Δικτύου τη δεδομένη χρονική στιγμή και επεξηγούνται αναλυτικά τα τεχνικά κριτήρια και οι περιορισμοί για την σύνδεση φωτοβολταϊκών στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, για να αποφευχθούν διαταραχές στην ποιότητα τάσης ελέγχουμε σε κάθε σημείο του δικτύου τα όρια των τάσεων να είναι ενός των προβλεπόμενων ορίων. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η διαδικασία ψηφιοποίησης ενός πραγματικού δικτύου του Υ/Σ Δολιανών μέσω του λογισμικού Microsoft Visio. Κατά την ψηφιοποίηση, λάβαμε υπόψιν τα χαρακτηριστικά των γραμμών, τα φορτία και τα φωτοβολταϊκά. Δημιουργήθηκε ένα κατευθυνόμενο διάγραμμα που ξεκινά από τον Υποσταθμό και διαρρέει όλη τη ροηφόρο γραμμή. Στο Κεφάλαιο 4 αναπτύσσεται η νέα στοχαστική μεθοδολογία που προτείνεται και ο τρόπος εφαρμογής της στο υπάρχον δίκτυο. Αναλυτικότερα, η αριθμητική μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί είναι η μέθοδος Monte Carlo και ελέγχεται αν ικανοποιούνται οι περιορισμοί που έχουν οριστεί, ώστε να είναι αποδεκτή η ένταξη των ΑΠΕ στο δίκτυο. Στο Κεφάλαιο 5 επεξηγούνται οι παράμετροι των προ-

σομοιώσεων του πραγματικού δικτύου. Συνοπτικά κάποιοι εξ' αυτών είναι οι χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν, οι καμπύλες φορτίων και παραγωγών - οι συσχετίσεις μεταξύ παραγωγών και μεταξύ φορτίων, το πλήθος δείγματος για προσομοίωση Monte Carlo και οι παράμετροι που λαμβάνει ο ΔΕΔΔΗΕ για τις ακραίες καταστάσεις λειτουργίας του δικτύου. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τριών προσομοιώσεων με την υπάρχουσα μεθοδολογία του ΔΕΔΔΗΕ και την στοχαστική μεθοδολογία. Παρατηρούνται αιτήσεις που απορρίπτονται με την τρέχουσα μέθοδο, να είναι αποδεκτές με την στοχαστική μεθοδολογία. Στο Κεφάλαιο 7 εξάγονται τα συμπεράσματα της εργασίας και γίνεται αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας συγκριτικά με την μεθοδολογία που εφαρμόζεται τη δεδομένη χρονική στιγμή.

Κεφάλαιο 2

Σύνδεση Φωτοβολταϊκών Σταθμών στο Δίκτυο

Σ' αυτό το κεφάλαιο, θα μελετηθούν τα τεχνικά κριτήρια και οι προϋποθέσεις που εφαρμόζονται στην Ελλάδα για τη σύνδεση σταθμών παραγωγής και μεγάλων καταναλωτών στο υφιστάμενο δίκτυο. Θα αναλυθούν οι τεχνικές διατάξεις που αξιολογούνται από τον Διαχειριστή Δικτύου και διαμορφώνουν το πλαίσιο λειτουργίας των δικτύων. Ένας ιδιαίτερα σημαντικός άξονας αυτής της ανάλυσης είναι η διατήρηση της ποιότητας της τάσης εντός συγκεκριμένων ορίων. Αυτά τα όρια διαμορφώνονται από τα τεχνικά εγχειρίδια και εφαρμόζονται από τον ΔΕΔΔΗΕ. Η επισκόπηση αυτή αποσκοπεί σε μια ξεκάθαρη και εμπειροστατωμένη εικόνα των κριτηριών που καθορίζουν την ένταξη νέων παραγωγών στο δίκτυο χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα στη λειτουργία του δικτύου.

2.1 Κριτήρια και Προϋποθέσεις για την Σύνδεση Σταθμών Παραγωγής στο Δίκτυο

Ο τρόπος σύνδεσης των σταθμών παραγωγής στο δίκτυο αξιολογείται από τον Διαχειριστή του Δικτύου με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

1. Επάρκεια:

Η επάρκεια του δικτύου αποτελεί μία κρίσιμη παράμετρο στην περίπτωση ένταξης νέων φωτοβολταϊκών πάρκων στο δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς

διασφαλίζει ότι το σύστημα μπορεί να χειριστεί την μέγιστη προβλεπόμενη φόρτιση χωρίς να υπερβαίνεται η ονομαστική του ικανότητα και ταυτόχρονα να διατηρούνται οι προδιαγραφές ασφαλείας και αξιοπιστίας μετά την σύνδεση του σταθμού. Η ανάλυση της ικανότητας περιλαμβάνει την αξιολόγηση των γραμμών διανομής βάσει των φυσικών τους χαρακτηριστικών, την εκτίμηση της θερμικής τους ικανότητας, καθώς και την εκτίμηση της αντοχής των μετασχηματιστών σε θέματα θερμικής φόρτισης και μεταφοράς ισχύος. Αναλόγως τον τύπο των γραμμών, διαχωρίζονται τα όρια θερμοκρασίας τους, τα οποία αν ξεπεραστούν μπορούν να οδηγήσουν σε μόνιμη βλάβη λόγω υπερθέρμανσης ή ακόμη και σε διακοπές λόγω της αυξημένης αντίστασης που παρουσιάζεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Όσον αφορά τους μετασχηματιστές, η κύρια πρόκληση είναι να διαχειριστούν την ισχύ χωρίς υπερφόρτωση, κάτι που εξαρτάται από την ικανότητά τους να διατηρούν την απώλεια ισχύος (ζημιά) εντός των προδιαγραφών σχεδιασμού και την αποτελεσματική μετατροπή των επιπέδων τάσης. Η συνολική εκτίμηση της επάρκειας του δικτύου επιτυγχάνεται μέσω της συνδυαστικής ανάλυσης των ανωτέρω στοιχείων, λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά του συνόλου των χρηστών που εξυπηρετούνται από τα δίκτυα και τις συνθήκες λειτουργίας τόσο του δικτύου όσο και του σταθμού που εξετάζεται.

2. Συμβολή στη στάθμη βραχυκύκλωσης:

Η συνεισφορά ενός φωτοβολταϊκού σταθμού στην στάθμη βραχυκύκλωσης ενός δικτύου αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο για την αξιολόγηση και την ένταξη του φωτοβολταϊκού στο δίκτυο. Η στάθμη βραχυκύκλωσης του δικτύου, η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει τη στάθμη σχεδιασμού, διασφαλίζει τη μέγιστη αναμενόμενη ένταση βραχυκυκλώσεως για το δίκτυο Χαμηλής και Μέσης Τάσης. Διασφαλίζεται λοιπόν η ασφαλή λειτουργία του υφιστάμενου δικτύου και την αντοχή του εξοπλισμού σε περιπτώσεις ακραίων συνθηκών. Έτσι, ορίζονται οι παρακάτω τιμές σχεδιασμού:

(α') Στο Χαμηλής Τάσης Δίκτυο (XT):

- Υπόγειο Δίκτυο: Τυπικά 25 kA.
- Εναέριο Δίκτυο: Τυπικά 15 kA.

(β') Στο Μεσαίας Τάσης Δίκτυο (MT):

- Δίκτυο 20 kV: 7,2 kA.

- Δίκτυο 15 kV: 9,6 kA.
- Παλαιά Δίκτυα 6,6 kV και 22 kV: 14,0 kA και 13,0 kA αντίστοιχα.

Οι διαφορετικές τιμές αντανακλούν τις διαφορές στην ικανότητα διακοπής και την αντοχή των συστημάτων σε βραχυκυκλώσεις. Επιπλέον, οι διαφορετικές τιμές οφείλονται σε παλαιότερη τεχνολογία και στις διαφορετικές απαιτήσεις ασφαλείας της εποχής που σχεδιάστηκαν.

Ωστόσο, η πραγματική ένταση βραχυκυκλώσεως μπορεί να διαφέρει σε απομακρυσμένα σημεία του δικτύου, λόγω της μειωμένης δυνατότητας τροφοδοσίας από τους τοπικούς σταθμούς παραγωγής, ιδίως στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, όπου η ένταση βραχυκυκλώσεως είναι συνήθως χαμηλότερη από τις καθιερωμένες τιμές σχεδιασμού. Η μελέτη αυτής της συνεισφοράς είναι ουσιαστική για την εισαγωγή νέων στοιχείων διεσπαρμένων πόρων στο δίκτυο, έτσι ώστε να μπορούν να αντέξουν στις αλλαγές φορτίου και να διατηρήσουν την αξιοπιστία του συστήματος.

3. Ποιότητα Τάσης:

Η διατήρηση της ποιότητας της τάσης είναι κρίσιμη για την αξιοπιστία και την αποδοτική λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου. Όταν αναφερόμαστε στην ποιότητα της τάσης σε σχέση με τη σύνδεση ενός φωτοβολταϊκού σταθμού, εννοούμε τον βαθμό στον οποίο η τάση παραμένει σταθερή και εντός ενός ορισμένου εύρους τιμών που θεωρούνται αποδεκτές για τα συστήματα που τροφοδοτούνται από το δίκτυο. Είναι κρίσιμο να μειωθούν οι διαταραχές που επιφέρει, έτσι ώστε να μην ξεπεραστούν τα καθιερωμένα όρια σχεδιασμού. Αυτό εξασφαλίζει την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία όλων των συνδεδεμένων χρηστών και του δικτύου ευρύτερα. Οι διαταραχές που εξετάζονται περιλαμβάνουν:

- Τις **αργές μεταβολές της τάσης**, δηλαδή τις αλλαγές στα επίπεδα τάσης σε διάφορα σημεία του δικτύου, οι οποίες προκύπτουν από τη λειτουργία του σταθμού. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση των μέσων ρύθμισης της τάσης του δικτύου, όπως είναι οι μετασχηματιστές τάσης, τα συστήματα αυτόματης ρύθμισης τάσης (AVR) κ.ά.. Η επίδραση αυτών των αλλαγών αναλύεται με βάση τις μέσες τιμές της τάσης κατά τη διάρκεια ενός διαστήματος 10 λεπτών, καθώς αυτό επιτρέπει μια επαρκή αντιπροσώπευση των διαταραχών που παρατηρούνται υπό τυπικές συνθήκες λειτουργίας. Για την ανάλυση αυτή, είναι

αναγκαίο να ληφθούν υπόψη οι διαφορετικές συνθήκες φόρτισης του δικτύου και να καθοριστούν τα σενάρια που οδηγούν στις πιο ακραίες τιμές τάσης. Σε αυτό συμβάλλουν οι διαταραχές από το ανώτερο δίκτυο και οι ηλεκτρικές ανάγκες άλλων χρηστών που είναι συνδεδεμένοι στο ίδιο δίκτυο.

- Τις **ταχείες διακυμάνσεις της τάσης**, δηλαδή τις απότομες μεταβολές στην ενδεδειγμένη τιμή της τάσης σε χρονικά διαστήματα μικρότερα από 10 λεπτά. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορεί να οφείλονται σε χειρισμούς που πραγματοποιούνται εντός του σταθμού, όπως εναλλαγές φορτίων, αυτόματες ρυθμίσεις του δικτύου, ή σε απότομες αλλαγές στην παραγωγή του φωτοβολταϊκού σταθμού λόγω συννεφιάς ή άλλων παραγόντων. Η ανάλυση των ταχέων διακυμάνσεων απαιτεί την καταγραφή και την επεξεργασία των δεδομένων τάσης σε πραγματικό χρόνο για να καθοριστεί η συχνότητα, η διάρκεια και η ένταση των διαταραχών.
- Τις αναμενόμενες **εκπομπές flicker** που προέρχονται από τη λειτουργία του σταθμού. Ο όρος "flicker" αναφέρεται στην οπτική δυσφορία που προκαλείται από τις διακυμάνσεις της φωτεινότητας φωτιστικών σωμάτων, και είναι αποτέλεσμα των διακυμάνσεων της τάσης τροφοδοσίας. Επιπλέον, η μετρητική ποιότητα του flicker καθορίζεται με τη χρήση μετρήσεων όπως ο δείκτης στιγμιαίου flicker P_{st} και ο δείκτης μακροπρόθεσμου flicker P_{lt} . Αυτές οι μετρήσεις αντικατοπτρίζουν την αντίληψη του ανθρώπινου ματιού στις μεταβολές της φωτεινότητας και είναι κρίσιμες για τον σχεδιασμό συστημάτων που μειώνουν τις επιπτώσεις του flicker. Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών οι διακυμάνσεις μπορεί να είναι συχνότερες και πιο εντονες σε σύγκριση με αυτές των φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- Η **αρμονική παραμόρφωση** στα ηλεκτρικά δίκτυα, συνδεδεμένη με τις εκπομπές αρμονικών συχνοτήτων, προέρχεται από τις μονάδες μετατροπής ισχύος που εφαρμόζονται στους φωτοβολταϊκούς σταθμούς. Αυτές οι μονάδες μετατροπής ισχύος, χρησιμοποιούμενες στις εγκαταστάσεις του σταθμού, είναι η κύρια πηγή τέτοιων διαστρεβλώσεων. Οι αρμονικές είναι υψηλότερες συχνότητες, πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας του δικτύου (50 Hz). Η παρουσία τους δημιουργείται όταν μη γραμμικά φορτία, όπως οι μετατροπείς ισχύος, εισάγουν στο δίκτυο κυματομορφές που αποκλίνουν από την ιδανική ημιτονοειδή κυματομορφή. Αυτές οι αρμονικές παραμορφώσεις μπορεί να προκαλέσουν αρκετά

προβλήματα στο ηλεκτρικό δίκτυο, όπως υπερθέρμανση εξοπλισμού, ανεπιθύμητες τριβές σε μοτέρ, μείωση της αποδοτικότητας των μετασχηματιστών και άλλων στοιχείων του δικτύου.

- Την αναμενόμενη **ασυμμετρία στα επίπεδα τάσης** του Δικτύου, δηλαδή την παρουσία διαφορών στις τιμές τάσης μεταξύ των φάσεων σε ένα τριφασικό σύστημα. Η αναμενόμενη ασυμμετρία μπορεί να προκύψει από διάφορους παράγοντες, όπως μη ισορροπημένα φορτία, λανθασμένη σύνδεση των καλωδίων, ή από τη λειτουργία μετατροπέων ισχύος που δημιουργούν ανισορροπίες μεταξύ των φάσεων. Ασυμμετρία στα επίπεδα τάσης μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες μηχανικές τάσεις σε περιστροφικό εξοπλισμό και να επηρεάσει την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος διανομής.

4. Θέματα Προστασίας:

Η εξασφάλιση της απρόσκοπτης λειτουργίας των συστημάτων προστασίας ενός ηλεκτρικού δικτύου είναι ύψιστης σημασίας για την αποφυγή ανεπιθύμητων συμβάντων όπως οι αποζεύξεις διακοπών ισχύος και η νησιδοποίηση. Τα συστήματα προστασίας πρέπει να είναι σχεδιασμένα και διαμορφωμένα για να ανταποκρίνονται επαρκώς σε ανωμαλίες, διατηρώντας τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του δικτύου.

- Οι διακόπτες ισχύος πρέπει να λειτουργούν σωστά για να απομονώνουν ταχύτατα και ασφαλώς ένα τμήμα του δικτύου όταν ανιχνευθεί ένα σφάλμα. Η κακή λειτουργία ή η αποτυχία ενός διακόπτη μπορεί να οδηγήσει σε αποζεύξεις, δηλαδή απότομες διακοπές της ηλεκτρικής ροής που μπορούν να προκαλέσουν υλικές ζημιές και να επηρεάσουν την αξιοπιστία του συστήματος.
- Η νησιδοποίηση είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει όταν ένα τμήμα του δικτύου απομονώνεται από το υπόλοιπο δίκτυο ενώ συνεχίζει να λειτουργεί αυτόνομα. Σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας η ανεξέλεγκτη νησιδοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές ανισορροπίες φορτίου και παραγωγής, προκαλώντας αστάθεια και απώλεια παροχής.

5. Θέματα Λειτουργίας:

Η αποφυγή επιπτώσεων στη λειτουργία των συστημάτων τηλεχειρισμού ακουστικής συχνότητας (ΤΑΣ), καθώς και άλλων επικοινωνιακών συστημάτων του δικτύου, απαι-

τεί την προσοχή και διαχείριση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility, EMC) των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας. Συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν τα καλώδια του δικτύου για τη μετάδοση δεδομένων σε ακουστική συχνότητα, μπορεί να επηρεαστούν από ηλεκτρικές διαταραχές όπως αρμονικές, υπερβολικό θόρυβο ή σήματα ισχύος από νέους φωτοβολταϊκούς σταθμούς.

2.2 Όρια σχεδιασμού για διαταραχές της Ποιότητας Τάσης

Η ανάλυση των ορίων σχεδιασμού για τις διαταραχές της ποιότητας τάσης σε δίκτυα που ενσωματώνουν φωτοβολταϊκούς σταθμούς, απαιτεί κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την ηλεκτρική τάση και τις δυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστημάτων παραγωγής και του δικτύου διανομής. Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 50160 προσδιορίζει τις βασικές προδιαγραφές για την ποιότητα της τάσης στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, καθορίζοντας πρότυπα για την αποφυγή ή την ελαχιστοποίηση των διαταραχών που μπορεί να επιφέρουν οι αναγκαίες αλλαγές στην τάση. Οι προδιαγραφές αυτές έχουν σχεδιαστεί για να διασφαλίζουν τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του δικτύου, καθώς και την προστασία των τελικών χρηστών από απρόβλεπτες διακυμάνσεις της τάσης.

Ωστόσο, ο Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου εφαρμόζει πιο αυστηρά όρια σχεδιασμού από τα καθορισμένα στο EN 50160. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε μια σειρά από παράγοντες όπως η γεωγραφική ιδιαιτερότητα, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εγχώριας ηλεκτρικής ζήτησης, ή οι ειδικές ανάγκες για την ομαλή ένταξη της φωτοβολταϊκής παραγωγής στο δίκτυο. Τα συγκεκριμένα όρια για τις αργές μεταβολές της τάσης που αναφέρονται, όπως η μέση ετήσια τιμή της τάσης σε κάθε κόμβο του Δικτύου MT (μεσαίας τάσης) και η μέγιστη διακύμανση αυτής της τάσης, αποτελούν δείκτες ζωτικής σημασίας για την παρακολούθηση και τη διατήρηση της ποιότητας του δικτύου. Τα όρια για τις αργές μεταβολές της τάσης στο Δίκτυο MT υπολογίζονται βάσει των αναμενόμενων ακραίων τιμών της τάσης στους κόμβους του Δικτύου και είναι ως εξής:

- Η μέση ετήσια τιμή της τάσης σε κάθε σημείο (κόμβο) του Δικτύου δεν πρέπει να αποκλίνει περισσότερο από $\pm 5\%$ από την ονομαστική τιμή της τάσης. Αυτή η προδιαγραφή διασφαλίζει ότι σε ετήσια βάση, η τάση δεν θα είναι υπερβολικά υψηλή ή χαμηλή, πράγμα που θα μπορούσε να βλάψει τον εξοπλισμό ή να μειώσει την απόδοση

του δικτύου.

$$\bar{V} = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} \quad (2.1)$$

$$0.95 \times V_n \leq \bar{V} \leq 1.05 \times V_n \quad (2.2)$$

- Η **μέγιστη διακύμανση της τάσης** γύρω από τη μέση τιμή κατά τη διάρκεια ενός έτους δεν πρέπει να υπερβαίνει το **±3%** της ονομαστικής τιμής της τάσης. Αυτό σημαίνει ότι οι βραχυπρόθεσμες αλλαγές στην τάση δεν πρέπει να είναι δραματικές, προστατεύοντας τον εξοπλισμό από την έκθεση σε υψηλές διακυμάνσεις που θα μπορούσαν να τον καταστρέψουν ή να μειώσουν την απόδοσή του.

$$\Delta V = \frac{(V_{\max} - V_{\min})}{2} \quad (2.3)$$

$$\Delta V \leq 3\%V_n \quad (2.4)$$

Η διατήρηση της τάσης εντός των καθορισμένων ορίων είναι κρίσιμη για την πρόληψη της υπερφόρτωσης των εξαρτημάτων του δικτύου, της αποφυγής της πρόκλησης βλαβών στις συσκευές των καταναλωτών, και της εξασφάλισης συνεχούς και απρόσκοπτης λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος. Η εξέταση των ακραίων τιμών της τάσης που παρατηρούνται στους κόμβους είναι ένα αναγκαίο βήμα για την προσαρμογή και τη βελτίωση του σχεδιασμού του δικτύου υπό το πρίσμα των δυναμικά μεταβαλλόμενων συνθηκών λειτουργίας και των νέων προκλήσεων που επιφέρει η διεύθυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στο πλαίσιο της διαχείρισης ενεργειακών δικτύων, ο Διαχειριστής του Δικτύου αντιμετωπίζει την πρόκληση της επιβολής προδιαγραφών που θα διασφαλίζουν την αξιοπιστία και τη σταθερότητα της τροφοδοσίας. Ειδικά όταν οι χρήστες συνδέονται μέσω αποκλειστικών γραμμών, επιτρέπεται η υιοθέτηση διευρυμένων ορίων διαταραχών στο σημείο σύνδεσης μεταξύ Δικτύου και Χρήστη. Αυτή η ευελιξία είναι ουσιώδης για να ληφθούν υπόψη μοναδικές λειτουργικές συνθήκες, όπως η χαμηλή πυκνότητα φορτίου ή οι σπάνιες διαταραχές λόγω χειρισμών ζεύξεως σταθμών παραγωγής.

Η υιοθέτηση διευρυσμένων ορίων διαταραχών επιτρέπει στο δίκτυο να διατηρείται αποδοτικό και να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες χωρίς να θυσιάζεται η ασφάλεια. Η συνεχής ανάλυση και αξιολόγηση των λειτουργικών δεδομένων επιτρέπει στον Διαχειριστή να ρυθμίζει τις προδιαγραφές με τέτοιο τρόπο που να ισορροπεί ανάμεσα στην απαιτούμενη αξιοπιστία και τις πρακτικές ανάγκες της λειτουργίας των σταθμών παραγωγής και των χρηστών. [6]

2.3 Πρότυπο EN 50160

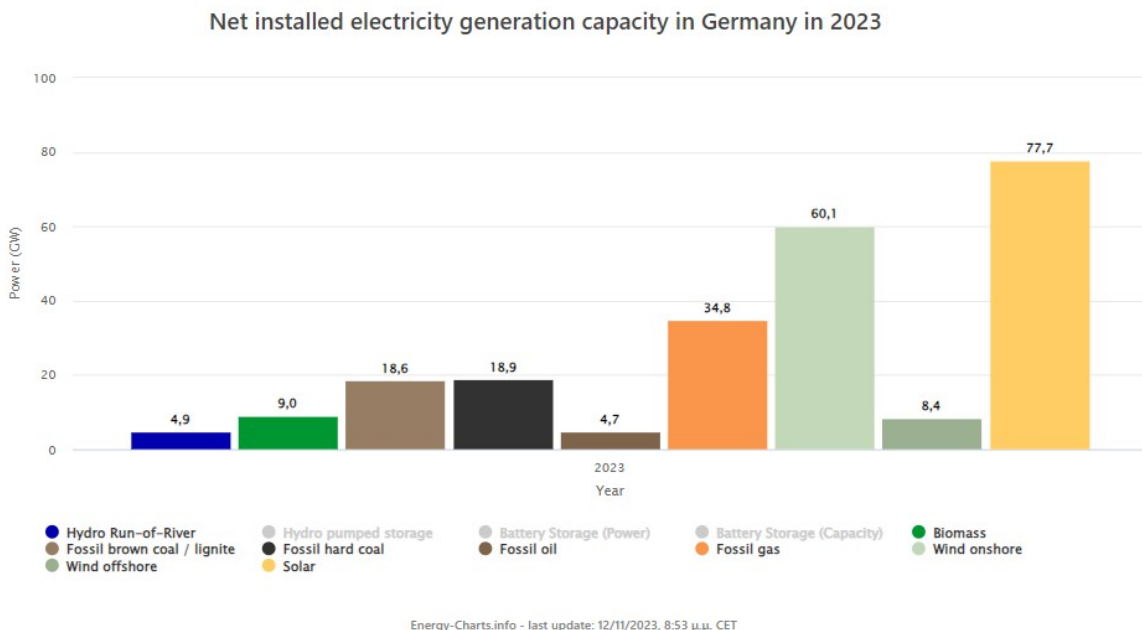
Η πρότυπη οδηγία EN 50160 αποτελεί έναν Ευρωπαϊκό κανονισμό που προδιαγράφει τις βασικές χαρακτηριστικές τάσεις στα τερματικά σημεία παροχής ενός χρήστη στα δημόσια δίκτυα ηλεκτροδότησης χαμηλής και μέσης τάσης κατά τις συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Αυτό το πρότυπο καθορίζει τις προδιαγραφές για την ποιότητα της τάσης στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και τις απαιτήσεις για την παρακολούθηση της ποιότητας της ενέργειας σε αυτά τα δίκτυα για την καλή λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών και των εγκαταστάσεων.

Βασική απαίτηση που ορίζεται από το EN 50160 είναι οι παράμετροι της τάσης τροφοδοσίας να βρίσκονται εντός του καθορισμένου εύρους κατά το 95% της περιόδου ελέγχου, ενώ οι επιτρεπόμενες αποκλίσεις στο υπόλοιπο 5% της περιόδου είναι πολύ μεγαλύτερες. Για παράδειγμα, η μέση τιμή κατά το 95% του χρόνου πρέπει να είναι μεταξύ του 90% και του 110% της ονομαστικής τάσης. Αυτό σημαίνει ότι, σε μια ακραία περίπτωση, οι καταναλωτές θα μπορούσαν να τροφοδοτούνται συνεχώς στο 90% της ονομαστικής τάσης ενώ, για το 5% του χρόνου, η τάση θα μπορούσε να είναι πολύ χαμηλότερη. Σε μια τέτοια περίπτωση στην οποία και άλλοι παράμετροι μπορεί να βρίσκονται στα άκρα που επιτρέπονται από το πρότυπο (πχ αρμονικές τάσεις ή ανισορροπία τάσης), τότε είναι πιθανό να παρατηρηθούν προβλήματα λειτουργίας εξοπλισμού.

Γι' αυτόν το λόγο, ο Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου έχει επιλέξει τα όρια των επιτρεπόμενων αποκλίσεων να είναι $\pm 5\%$ από την ονομαστική τιμή για την ετήσια μέση τιμή σε κάθε σημείο του δικτύου και για την μέγιστη διακύμανση της τάσης να μην υπερβαίνει το $\pm 3\%$ για να εγγυηθεί ότι η τάση τροφοδοσίας θα μπορούσε να διατηρηθεί στην χαμηλότερη ή υψηλότερη τιμή για παρατεταμένο χρονικό διάστημα. [7]

2.4 Διεσπαρμένη Παραγωγή στη Γερμανία

Στη Γερμανία, η εγκατεστημένη χωρητικότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων υπερβαίνει σημαντικά την χωρητικότητα οποιασδήποτε άλλης ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, καθώς και των συμβατικών πηγών ενέργειας, όπως αναδεικνύεται και στο Σχήμα 2.1. Αυτή η εξέλιξη έχει επιτευχθεί μέσω μιας σειράς πολιτικών ρυθμίσεων και κινήτρων που στοχεύουν στην προώθηση της ηλιακής ενέργειας. Αντιθέτως, στην Ελλάδα, όπου οι κλιματικές συνθήκες είναι εξίσου ευνοϊκές για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών είναι λιγότερο προχωρημένη. Τα κριτήρια και οι προϋποθέσεις για την ένταξη νέων παραγωγών στο δίκτυο είναι πιο αυστηρά. Η συγκριτική ανάλυση των κριτηρίων σύνδεσης, των διαδικασιών εγκατάστασης και των πολιτικών που εφαρμόζονται στις δύο χώρες αποκαλύπτει τις καίριες διαφορές που επηρεάζουν την ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής ενέργειας. Η επικεντρωμένη αυτή ανάλυση θα δώσει εικόνα για τις στρατηγικές που θα μπορούσε να υιοθετήσει η Ελλάδα, προκειμένου να βελτιστοποιήσει την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας και να αυξήσει την εγκατεστημένη χωρητικότητά της.



Σχήμα 2.1: Καθαρή εγκατεστημένη χωρητικότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Γερμανία το 2023 [11]

Η σημαντική αύξηση στην εγκατάσταση μικρών και μεσαίων φωτοβολταϊκών συστημάτων, με ισχύ λιγότερο από 30 kWp, έχουν οδηγήσει σε μια κατάσταση όπου περίπου το 70% της εγκατεστημένης χωρητικότητας συνδέεται με το δίκτυο χαμηλής τάσης. Τα φωτοβολ-

ταϊκά πάρκα, ειδικά κατά τις ηλιόλουστες ημέρες με χαμηλό φορτίο, έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν μια σημαντική ποσότητα του συνολικού ενεργειακού φορτίου. Ως αποτέλεσμα, τα δίκτυα διανομής αντιμετωπίζουν ειδικές προκλήσεις σχετικά με την ενσωμάτωση αυτών των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο δίκτυο [8].

Από το 2011, ο γερμανικός νόμος Feed-in Tariff, έχει θέσει συγκεκριμένες απαιτήσεις για τους ιδιοκτήτες φωτοβολταϊκών συστημάτων, με στόχο την βελτίωση της διαχείρισης του δικτύου ενέργειας. Αυτός ο νόμος αφορά κυρίως τα μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα, δηλαδή εκείνα με ισχύ κάτω των 30 kWp. Για αυτά τα συστήματα, ο νόμος επιβάλλει είτε τον περιορισμό της ενεργού ισχύος εξόδου στο 70% της εγκατεστημένης χωρητικότητας είτε την εγκατάσταση μιας απομακρυσμένης διασύνδεσης ελέγχου. Αυτή η δεύτερη επιλογή επιτρέπει στο Διαχειριστή Δικτύου να στέλνει προσωρινά σήματα μείωσης ισχύος, όταν κρίνεται απαραίτητο, για την καλύτερη διαχείριση του δικτύου.

Όσον αφορά τα μεγαλύτερα φωτοβολταϊκά πάρκα, με ισχύ άνω των 30 kWp, η απομακρυσμένη διαχείριση και ο έλεγχος είναι υποχρεωτικοί. Αυτό σημαίνει ότι τα μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα πρέπει να διαθέτουν την τεχνολογία και την υποδομή για να δέχονται και να εφαρμόζουν οδηγίες από τον Διαχειριστή Δικτύου για την ρύθμιση της ισχύος τους, βοηθώντας έτσι στην αποφυγή υπερφόρτωσης ή άλλων προβλημάτων στο δίκτυο ενέργειας.

Έτσι, μπορούν να διακριθούν τρία είδη προσεγγίσεων ελέγχου: τοπικές, αποκεντρωμένες και κεντρικές.

1. Τοπικές στρατηγικές ελέγχου:

Δεν απαιτούν συσκευές επικοινωνίας. Η ενεργειακή πηγή αντιδρά σε συγκεκριμένες καταστάσεις του δικτύου σύμφωνα με προκαθορισμένες παραμέτρους καθώς και μετρήσεις (π.χ. τάση ή συχνότητα) στο σημείο κοινής σύνδεσης.

2. Αποκεντρωμένες στρατηγικές ελέγχου:

Ο έλεγχος σε επίπεδο δικτύου Χαμηλής Τάσης γίνεται μέσω Συστημάτων Διαχείρισης Διανομής (Distribution Management System - DMS), επιτρέποντας τον έλεγχο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και την αποφυγή υπερφορτώσεων και προβλημάτων στο δίκτυο. Επιπλέον, μπορεί να αντιδράσει σε ενδεχόμενα προβλήματα και να ανιχνεύσει πιθανά σφάλματα στο δίκτυο, προειδοποιώντας για πιθανές διακυμάνσεις και προβλήματα ποιότητας της ενέργειας. Μ' αυτόν τον τρόπο υπάρχει ολοκληρωμένη διαχείριση των ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων στο δίκτυο.

3. Κεντρικές στρατηγικές ελέγχου:

Ο έλεγχος διαχείρισης της ενέργειας και του δικτύου γίνεται από ένα κεντρικό Κέντρο Διανομής, το οποίο λειτουργεί ως ο βασικός κόμβος για την παρακολούθηση, τον έλεγχο και την ρύθμιση της ενέργειας στο δίκτυο. Στις κεντρικές στρατηγικές, υπάρχει η δυνατότητα εκτεταμένης παρακολούθησης του δικτύου και των διανεμημένων πόρων. Το Κέντρο Διανομής μπορεί να αναλύσει τα δεδομένα από διάφορα σημεία του δικτύου και να λαμβάνει αποφάσεις βασισμένες σε περίπλοκους αλγόριθμους και μοντέλα προβλέψεων, επιτρέποντας μια πιο ευέλικτη και αποτελεσματική διαχείριση των πόρων. Επίσης, μέσω αυτής της κεντρικής προσέγγισης, είναι δυνατή η αποφυγή μεγάλων διαταραχών στο δίκτυο, όπως οι διακοπές ρεύματος ή οι υπερφορτώσεις, καθώς το Κέντρο Διανομής μπορεί να προβλέπει και να αντιμετωπίζει αυτά τα προβλήματα εκ των προτέρων. Τέλος, οι κεντρικές στρατηγικές επιτρέπουν μια στοχευμένη προσέγγιση στη διαχείριση της ενέργειας. Με την ενσωμάτωση τεχνολογιών επικοινωνίας, η κεντρική διαχείριση επιτρέπει την αποδοτική και βιώσιμη χρήση των ενεργειακών πόρων, ενισχύοντας την αξιοπιστία και την ποιότητα τάσης του δικτύου. [8]

Κεφάλαιο 3

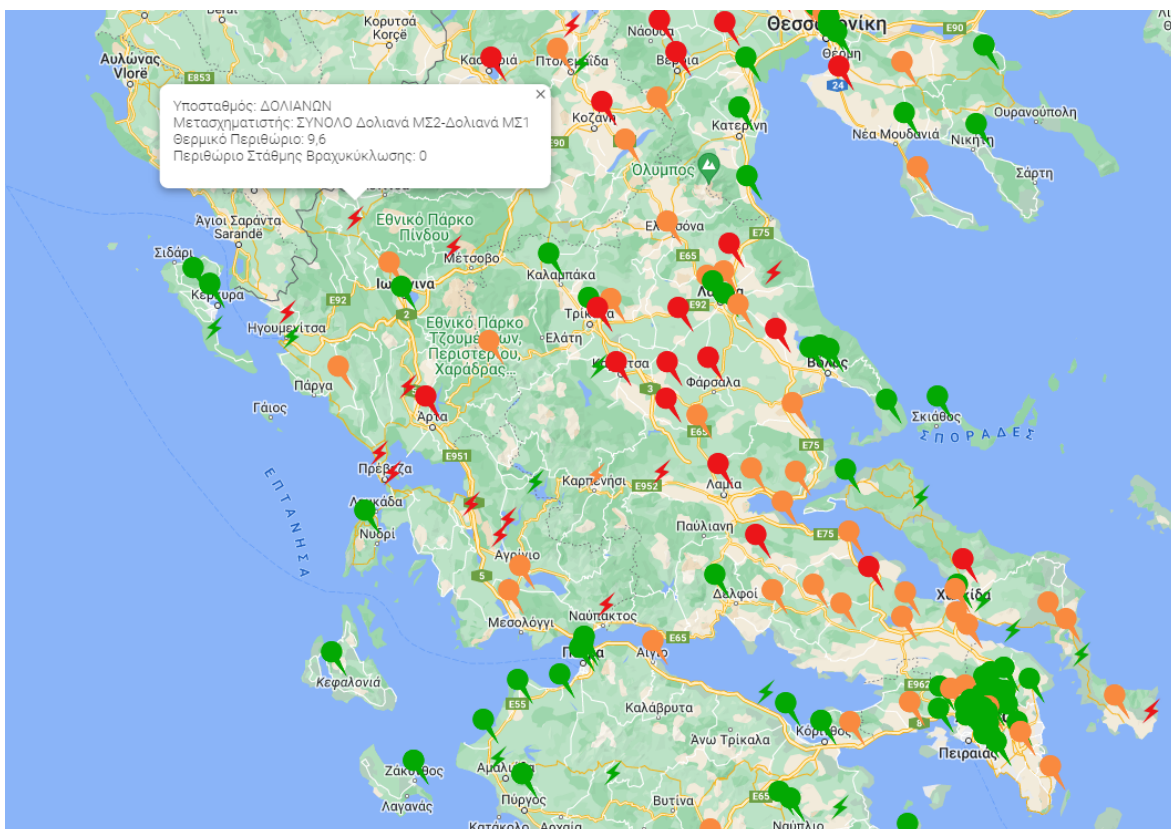
Ψηφιοποίηση πραγματικού Δικτύου

ΔΕΔΔΗΕ

3.1 Χαρακτηριστικά του Δικτύου που μελετήθηκε

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η δυνατότητα διασύνδεσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) σε Υφιστάμενο Υποσταθμό. Συγκεκριμένα, σε αυτήν την μελέτη έχει χρησιμοποιηθεί η ροηφόρος γραμμή R - 30 του Υποσταθμού Υψηλής Τάσης / Μέσης Τάσης των Δολιανών από το υφιστάμενο Δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ της Περιοχής Ιωαννίνων όπως φαίνεται και στο Σχήμα [3.1](#). Βασικά χαρακτηριστικά του προαναφερθέντα Υποσταθμού είναι τα εξής:

- Η ονομαστική ισχύς του Υποσταθμού είναι 50 MVA,
- Διαθέτει δύο Μετασχηματιστές των 25 KVA,
- Αποτελείται συνολικά από 193 ΑΠΕ,
- Η ονομαστική ισχύς των ΑΠΕ είναι 40,4 MVA,
- Το θερμικό περιθώριο είναι 9,6 MVA,
- Το περιθώριο της στάθμης βραχυκύκλωσης είναι 0 MVA.



Σχήμα 3.1: Συνολικός Χάρτης Περιθωρίων Διασυνδεδεμένου Συστήματος

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διπλωματική εργασία ήταν η δημιουργία ενός ψηφιακού σχεδίου του Δικτύου Διανομής για την καλύτερη διαχείριση των δεδομένων του δικτύου. Έτσι, στο νέο σχέδιο του Δικτύου Διανομής αποτυπώνονται όλα τα φωτοβολταϊκά, όλα τα φορτία και όλες οι διακλαδώσεις της συγκεκριμένης γραμμής χωρίς να αναγράφονται όλοι οι ζυγοί. Η ψηφιοποίηση του νέου δικτύου έγινε χρησιμοποιώντας την Εφαρμογή Microsoft Visio. Τα δεδομένα που χρειαζόταν για την κατασκευή του ήταν το μήκος κάθε γραμμής μεταξύ των ζυγών καθώς και ο τύπος της γραμμής με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του.

Οι σημαντικοί ζυγοί που υπάρχουν στο απλοποιημένο δίκτυο είναι αυτοί που παρεμβάλλεται κάποιο διακοπτικό μέσο ή διακλάδωση μεταξύ τους ή αλλάζει ο τύπος γραμμής μεταξύ των ζυγών. Η ανάλυση των γραμμών που συνδέουν τους ζυγούς στο δίκτυο διανομής έχει μελετηθεί και στόχος ήταν η κατανόηση των επιπτώσεων που έχουν τα διάφορα χαρακτηριστικά κάθε γραμμής στη συνολική λειτουργία του δικτύου.

Κάθε γραμμή έχει προσδιοριστεί με βάση τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που προκύπτουν από τον τύπο της όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1. Οι αγωγοί αναλόγως με τον τύπο τους ποικίλουν σε μεγέθη και υλικά, προσδιορίζοντας την αντοχή και την απόδοση της γραμμής. Η ωμική και η επαγωγική αντίσταση επηρεάζουν επίσης τη λειτουργία μιας γραμμής. Συγκεκριμένα, η ωμική αντίσταση κάθε γραμμής συνδέεται με τις απώλειες ισχύος που οφείλονται στην αντίσταση του υλικού και η επαγωγική αντίσταση που επηρεάζει τον τρόπο διάδοσης του ηλεκτρικού σήματος στη γραμμή. Επιπλέον, διαφέρει η επιτρεπόμενη ένταση σε κάθε γραμμή η οποία αντικατοπτρίζει τη μέγιστη ηλεκτρική ένταση που μπορεί να διαχειριστεί ο αγωγός με ασφάλεια.

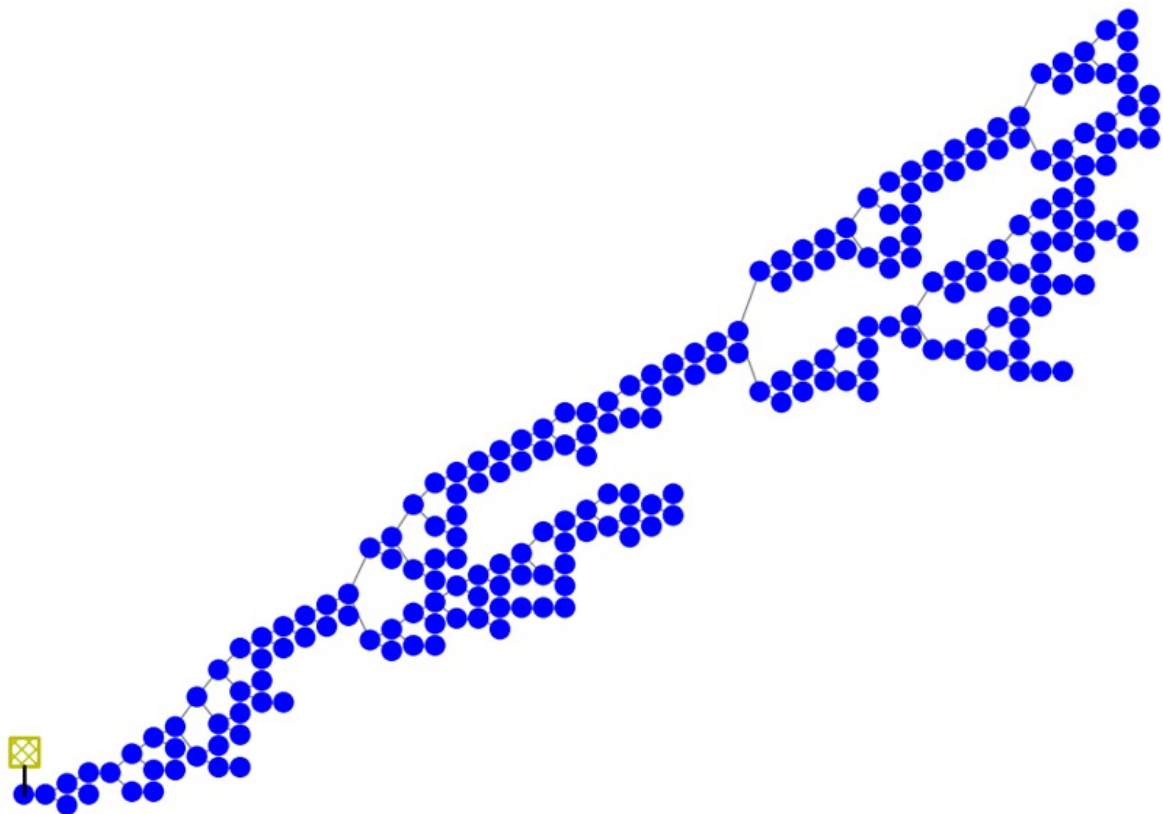
Πίνακας 3.1: Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Γραμμών MT

| Τύπος αγωγών | Ωμική Αντίσταση | Επαγωγική Αντίσταση | Επιτρεπόμενη Ένταση |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| ASCR | R (Ω/km) | X (Ω/km) | A |
| 95 mm ² | 0,215 | 0,336 | 400 |
| 50 mm ² | 0,404 | 0,358 | 266 |
| 35 mm ² | 0,574 | 0,369 | 197 |
| 16 mm ² | 1,260 | 0,394 | 127 |

Ο Πίνακας 3.1 που συνοδεύει αυτή την ανάλυση παρέχει μια λεπτομερή επισκόπηση των διάφορων τύπων αγωγών και των συναφών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, όπως ορίζονται για κάθε διαφορετική διάμετρο των αγωγών. Μ' αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται μια βαθύτερη κατανόηση των παραμέτρων που διαμορφώνουν την απόδοση και την ασφάλεια του δικτύου διανομής, καθώς και των απαιτήσεων για την κατάλληλη διαχείριση και συντήρησή του.

Η απλοποίηση του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας δημιούργησε ένα νέο ισόδυναμο δίκτυο το οποίο περιέχει τις ίδιες πληροφορίες χωρίς περιττές αναφορές όλων των ζυγών της γραμμής διανομής, διατηρώντας όμως παράλληλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά του δικτύου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2. Με την ολοκλήρωση όλων των διακλαδώσεων του κορμού του δικτύου σε ψηφιακή μορφή υπάρχει πλέον διαθέσιμη η γραμμή R-30 Δολιανών σε μια ακτινική τοπολογία.

Επιπλέον μπορούν να υπολογιστούν αποτελέσματα για τις εξισώσεις ροής ισχύος οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της τάσης και της ροής ισχύος σε σταθερή κατάσταση σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, με την χρήση ενός πακέτου ανάλυσης. Αυτές οι εξισώσεις είναι κρίσιμες για τον προγραμματισμό και τη λειτουργία συστημάτων ισχύος, μιας και συμβάλλουν στη διασφάλιση ότι το σύστημα λειτουργεί εντός αποδεκτών ορίων τάσης και ισχύος. Η διαδικασία μετατροπής ενός λειτουργικού διαγράμματος ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, που περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά φορτία και άλλα στοιχεία, σε ψηφιακή μορφή μέσω της εφαρμογής Microsoft Visio είναι μια διαδικασία που απαιτεί προσοχή και ακρίβεια.

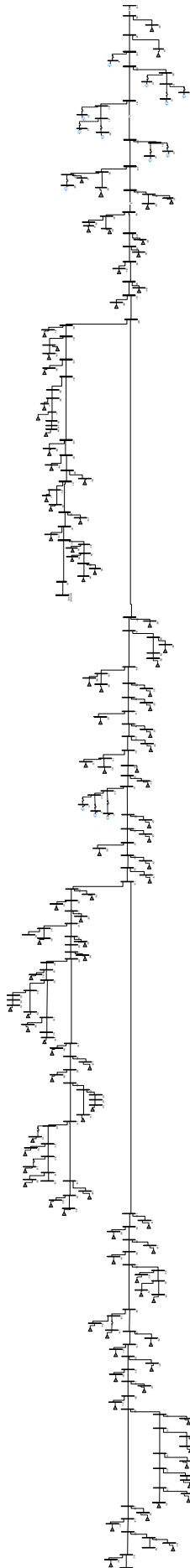


Σχήμα 3.2: Ακτινική Τοπολογία Δικτύου

Για τη δημιουργία του διαγράμματος προσθέσαμε τα διάφορα στοιχεία του δικτύου. Για παράδειγμα, μπορούμε να επιλέξουμε σύμβολα για φωτοβολταϊκά στοιχεία, καλώδια, διακόπτες, φορτία και άλλα συνδετικά στοιχεία. Αφού προσθέσουμε όλα τα απαραίτητα στοιχεία, τα συνδέουμε μεταξύ τους για να απεικονίσουμε τις σχέσεις και τις συνδέσεις που υπάρχουν στο πραγματικό δίκτυο.

Στα Σχήματα 3.2 και 3.3 απεικονίζεται το πλήθος των ζυγών του δικτύου (227 ζυγοί), τα φορτία (99 καταναλωτές) καθώς και τα φωτοβολταϊκά (9 παραγωγοί).

Τέλος, μόλις ολοκληρώσουμε το διάγραμμα, μπορούμε να το αποθηκεύσουμε σε μορφή αρχείου που επιθυμούμε, είτε ως έγγραφο Visio, είτε σε μορφή εικόνας ή PDF όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Αυτή η ψηφιακή μορφή του διαγράμματος επιτρέπει την εύκολη χρήση και την εκτέλεση προσμοιώσεων στο υπάρχον δίκτυο.



Σχήμα 3.3: Ψηφιοποιημένο Δίκτυο μέσω Microsoft Visio

Κεφάλαιο 4

Στοχαστική Μεθοδολογία

Η σχεδίαση και επέκταση των δικτύων ενέργειας παρουσιάζει σύνθετες προκλήσεις, ειδικά με την ενσωμάτωση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Οι διαχειριστές δικτύων αντιμετωπίζουν αυξημένη αβεβαιότητα λόγω των ΑΠΕ και ο σχεδιασμός του δικτύου προσανατολίζεται σε μακροπρόθεσμη και προγραμματισμένη επέκταση. Στην προσομοίωση, λαμβάνουμε υπόψη τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με την φύση των ΑΠΕ και συγκεκριμένα με τα φωτοβολταϊκά πάρκα, και επιχειρούμε την ενσωμάτωση αυτών στο υπάρχον δίκτυο [9].

Η αβεβαιότητα αποτελεί ένα βασικό στοιχείο που πρέπει να αντιμετωπιστεί κατά την ανάλυση των ενεργειακών συστημάτων και αυτό συμβαίνει επειδή μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την συμπεριφορά του συστήματος. Οι δύο κύριες πηγές αβεβαιότητας είναι:

- **Αβεβαιότητα των εισόδων:** Η αβεβαιότητα των εισόδων περιλαμβάνει τη μεταβλητότητα στη ζήτηση και στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Οι διακυμάνσεις στη ζήτηση μπορεί να οφείλονται σε ποικίλους παράγοντες, όπως μεταβαλλόμενα μοτίβα κατανάλωσης, εποχικές μεταβολές και καιρικές συνθήκες. Όσον αφορά την παραγωγή από ηλιακή ενέργεια, η αβεβαιότητα μπορεί να είναι ακόμη μεγαλύτερη λόγω των απρόβλεπτων συνθηκών, όπως είναι η συννεφιά ή η μεταβλητότητα των ανέμων. Στις προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής λαμβάνουμε υπόψιν αυτές τις αβεβαιότητες.
- **Αβεβαιότητα διαμόρφωσης:** Αυτή η αβεβαιότητα συνδέεται με την αξιοπιστία των στοιχείων του δικτύου, όπως των γραμμών διανομής και των μονάδων παραγωγής.

Απρόβλεπτα γεγονότα, όπως βλάβες στον εξοπλισμό, προγραμματισμένες ή απρόβλεπτες διακοπές για συντήρηση, μπορούν να προκαλέσουν μεταβολές στο δίκτυο και να δημιουργήσουν σημαντικές προκλήσεις στην προβλεψιμότητα και τη διαχείρισή του.

Η διαχείριση των αβεβαιοτήτων απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και προηγμένες τεχνικές ανάλυσης, όπως στοχαστική προσομοίωση και χρήση πιθανοτικών μοντέλων, προκειμένου να εκτιμηθούν και να ενισχυθεί η χωρητικότητα του δικτύου έτσι ώστε να δέχεται μεγαλύτερο αριθμό φωτοβολταϊκών συνδέσεων [10].

4.1 Μέθοδοι υπολογισμού της Πιθανοτικής Ροής Φορτίου

Οι μέθοδοι υπολογισμού της Πιθανοτικής Ροής Φορτίου (Probabilistic Load Flow - PLF), εστιάζουν στην παραγωγή ενός αξιόπιστου μοντέλου για την πρόβλεψη της διακύμανσης των μεταβλητών κατάστασης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι οι ισχείς και οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς και τα ρεύματα στις γραμμές διανομής. Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα που αφορούν τις μεταβλητές που εισάγονται στο σύστημα και τις συσχετίσεις ανάμεσά τους, προκύπτει η εκτίμηση της κατανομής πιθανότητας.

Οι μέθοδοι πιθανοτικής ροής φορτίου PLF διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- αριθμητικές,
- αναλυτικές,
- προσεγγιστικές,

όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1. Κάθε κατηγορία αναλύεται και αξιολογείται με βάση τα ειδικά χαρακτηριστικά της, δίνοντας έμφαση στις διαφορετικές τεχνικές και προσεγγίσεις που ακολουθούνται. Επιπλέον, αναλύεται η σημασία της ακρίβειας και της αξιοπιστίας στις πιθανοτικές μεθόδους PLF και ο ρόλος της ανάλυσης ροής φορτίου ως ενδιάμεσο βήμα [11].

4.1.1 Στόχος Υπολογισμού της Πιθανοτικής Ροής Φορτίου

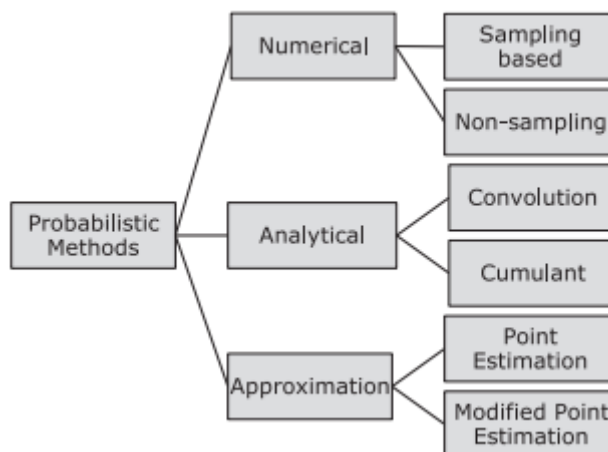
- Ο υπολογισμός της Πιθανοτικής Ροής Φορτίου (Probabilistic Load Flow - PLF) είναι μια κρίσιμη διαδικασία στην ανάλυση και τον σχεδιασμό δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Το βασικό αντικείμενο του PLF είναι να προβλέψει τον τρόπο με τον οποίο

οι αβεβαιότητες σχετικά με τις εισερχόμενες μεταβλητές - όπως η ζήτηση ενέργειας, οι δυνατότητες παραγωγής και οι ηλεκτρικές αντιστάσεις του συστήματος - επιδρούν στις μεταβλητές εξόδου, δηλαδή στις τάσεις και τα ρεύματα στο δίκτυο του ηλεκτρικού συστήματος.

- Αντί για την παραδοσιακή προσέγγιση, όπου μια σταθερή τιμή χρησιμοποιείται για κάθε μεταβλητή, ο υπολογισμός PLF επιχειρεί να παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα μέσω της κατανομής πιθανότητας. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μια περισσότερο διεξοδική απεικόνιση της αβεβαιότητας που διατρέχει τα δίκτυα ενέργειας [12].

4.1.2 Ταξινόμηση των Μεθόδων Πιθανοτικής Ροής Φορτίου

Στον τομέα της Πιθανοτικής Ροής Φορτίου (PLF), η ταξινόμηση των μεθόδων υπολογισμού αποτελεί ένα κρίσιμο στάδιο για την κατανόηση και την εφαρμογή της πλέον κατάλληλης τεχνικής στο υπό εξέταση ηλεκτρικό δίκτυο. Οι μέθοδοι PLF μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: αριθμητικές, αναλυτικές και προσεγγιστικές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Κατηγοριοποίηση υπολογιστικών μεθόδων (Probabilistic Load Flow - PLF) [2]

- Οι **αριθμητικές μέθοδοι** αποτελούν κρίσιμα εργαλεία για τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση περίπλοκων συστημάτων, καθώς επιτρέπουν την εξέταση πολλαπλών σεναρίων μέσω της εισαγωγής διαφορετικών μεταβλητών και τον υπολογισμό των αντίστοιχων αποτελεσμάτων. Η μεθοδολογία αυτή είναι ιδιαίτερος χρήσιμη στην ανάλυση σύνθετων δικτύων, όπου οι αβεβαιότητες και οι διακυμάνσεις των μεταβλητών

είναι αυξημένες. Μέσω αυτής της προσέγγισης, μπορεί να διατυπωθεί ένα σαφές σύνολο δεδομένων που αποτυπώνουν την περιπλοκότητα και τη δυναμική του πραγματικού κόσμου, παρέχοντας τη δυνατότητα να κατανοήσουν καλύτερα και να προβλέψουν τη συμπεριφορά των δικτύων αυτών.

- Οι **αναλυτικές μέθοδοι** στηρίζονται σε μαθηματική ανάλυση για την κατασκευή εκφράσεων και μαθηματικών μοντέλων που αποκαλύπτουν τις σχέσεις μεταξύ των εισερχόμενων και εξερχόμενων μεταβλητών ενός συστήματος. Μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας και άλλων αναλυτικών τεχνικών, είναι εφικτό να καθοριστεί η ακριβής επίδραση που έχει η διακύμανση ενός συγκεκριμένου παράγοντα σε επιμέρους μεταβλητές που μπορεί να επηρεάσουν τις αποδόσεις και τις λειτουργίες ενός δικτύου, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για πιο ουσιαστικές και θεμελιωμένες προβλέψεις.
- Οι **προσεγγιστικές μέθοδοι** παρέχουν μια εναλλακτική στρατηγική υπολογισμού, επιλέγοντας να χρησιμοποιήσουν διαφορετικές τεχνικές προσέγγισης για να εκτιμήσουν στατιστικά μεγέθη όπως η μέση τιμή και η διακύμανση των εξόδων ενός συστήματος. Αυτή η μεθοδολογία επιτρέπει να αποκτήσουμε γρήγορα μια προσεγγιστική αλλά συχνά όχι τόσο ακριβή εικόνα των αποτελεσμάτων. Αυτό γίνεται χωρίς την απαίτηση για πολυάριθμες προσομοιώσεις ή εκτενείς αναλυτικές διαδικασίες, κάτι που συνιστά σημαντική εξοικονόμηση χρόνου και πόρων στην ανάλυση συστημάτων.

Στον ραγδαία εξελισσόμενο χώρο της τεχνολογίας και της αναλυτικής επεξεργασίας, η επιλογή της πιο αποδοτικής μεθόδου για Probabilistic Load Flow (PLF) είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί βαθιά κατανόηση των προτερημάτων και των περιορισμών που συνδέονται με κάθε διαθέσιμη προσέγγιση [13, 2].

4.1.3 Monte Carlo

Η μέθοδος Monte Carlo είναι μια αριθμητική μέθοδος η οποία αναγνωρίζεται ευρέως στον τομέα των προβλέψεων και της ανάλυσης ροής φορτίου, καθώς διαθέτει την ικανότητα να μοντελοποιεί πολύπλοκα συστήματα και διαδικασίες που υπόκεινται σε αβεβαιότητα [14]. Η βασική αρχή της μεθόδου βασίζεται στην επαναληπτική τυχαία δειγματοληψία για την προσομοίωση των πιθανών εκβάσεων μιας διαδικασίας, οδηγώντας σε μια στατιστικά ορθή εκτίμηση του αποτελέσματος. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου Monte

Carlo είναι η ευελιξία της στον χειρισμό της αβεβαιότητας και την ικανότητα να προσομοιώνει πολυδιάστατες και μη γραμμικές συναρτήσεις που είναι δύσκολο να αναλυθούν με πιο παραδοσιακές μεθόδους. Επιπλέον, η Monte Carlo επιτρέπει την ανάλυση της επίδρασης πολλαπλών παραμέτρων ταυτόχρονα, παρέχοντας μια συνολική εκτίμηση της αβεβαιότητας. Η μεθοδολογία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιβάλλοντα όπου τα μοντέλα βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα και παρατηρήσεις, καθώς επιτρέπει την προσαρμογή και τη βελτίωση των προβλέψεων με βάση τη συλλογή νέων δεδομένων. Το αποτέλεσμα είναι ένα πιο δυναμικό και προσαρμοστικό μοντέλο που μπορεί να αναβαθμιστεί καθώς εξελίσσεται η κατανόηση του συστήματος.

Η μέθοδος Monte Carlo αποτελεί μία κεντρική στοχαστική τεχνική που εντάσσεται στο πλαίσιο της πιθανοτικής μοντελοποίησης και επιτρέπει την εκτίμηση των ροπών μιας κατανομής πιθανοτήτων.

Αναλύοντας τα δεδομένα από πιθανοτικές προσομοιώσεις, μπορεί να κατασκευαστεί ένα ιστόγραμμα το οποίο δίνει ένα οπτικό αποτύπωμα της εμπειρικής κατανομής των τάσεων στο δίκτυο. Η ανάλυση του ιστογράμματος επιτρέπει την εκτίμηση παραμέτρων, όπως η μέση τιμή, η διακύμανση, και η τυπική απόκλιση, παρέχοντας μια βαθύτερη κατανόηση της αβεβαιότητας που συνδέεται με τις μεταβολές της τάσης. Αυτή η πληροφορία είναι κρίσιμη για τη λήψη αποφάσεων στον σχεδιασμό και την εκτίμηση του αντίκτυπου της ένταξης φωτοβολταϊκών στο δίκτυο.

Συνοψίζοντας, η προσομοίωση Monte Carlo αναδεικνύεται ως μία αγνωστικιστική μέθοδος που εξασφαλίζει την προσέγγιση των πιθανοτικών χαρακτηριστικών μιας κατανομής με μεγάλη ακρίβεια, ακόμη και όταν η υποκείμενη κατανομή παραμένει απροσδιόριστη [2].

4.2 Εύρεση Κατανομής Δειγματοληψίας

4.2.1 Εκτίμηση σε Οριακές Κατανομές

Η διαδικασία της εκτίμησης σε οριακές κατανομές στοχεύει στον προσδιορισμό μιας θεωρητικής κατανομής που θα αντιστοιχεί καλύτερα στα δεδομένα μιας μεταβλητής. Για να επιτευχθεί αυτό, υπολογίζουμε τις παραμέτρους της επιλεγμένης θεωρητικής κατανομής με τρόπο έτσι ώστε η κατανομή αυτή εφαρμόζεται με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια πάνω στα δεδομένα. Αυτό γίνεται με τη χρήση μεθόδων όπως η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων, η μέθοδος των ροπών κ.ά..

Από τις πιο βοηθητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται είναι η μέθοδος των ροπών η οποία είναι μια πιο άμεση τεχνική και χρησιμοποιεί τις εμπειρικές ροπές των δεδομένων (π.χ., τη μέση τιμή, η διακύμανση) για να εκτιμήσει τις αντίστοιχες παραμέτρους της θεωρητικής κατανομής. Για παράδειγμα, αν μ είναι η μέση τιμή και v^2 η διακύμανση, και η θεωρητική κατανομή έχει αντίστοιχες θεωρητικές ροπές $m_1(\beta)$ και $m_2(\beta)$, τότε οι εκτιμήσεις των παραμέτρων θα προκύπτουν από τις εξισώσεις:

$$m_1(\beta) = \mu \quad (4.1)$$

$$m_2(\beta) = v^2 \quad (4.2)$$

Η αριθμητική προσέγγιση της κατανομής μιας τυχαίας μεταβλητής με τη χρήση Gaussian συναρτήσεων βάσης αποτελεί μια εξαιρετικά χρήσιμη μέθοδο για την ανάλυση δεδομένων με σκοπό την εκτίμηση της πιθανοτικής κατανομής και την προσαρμογή σε οριακές κατανομές. Οι συναρτήσεις βάσης (basis functions) είναι ένα σύνολο συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση ενός πιο πολύπλοκου μοντέλου ή σήματος. Στην προσέγγιση με συναρτήσεις βάσης, η κατανομή πιθανότητας μιας τυχαίας μεταβλητής X μπορεί να προσεγγιστεί ως ένα άθροισμα Gaussian συναρτήσεων, όπως:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot G(x; \mu_i, v_i) \quad (4.3)$$

όπου, $f(x)$: η εκτιμώμενη Kernel Density Distribution, $G(x; \mu_i, v_i)$: μια Gaussian συνάρτηση με μέση τιμή μ_i , τυπική απόκλιση v_i , και α_i είναι οι συντελεστές που προσδιορίζουν το βάρος κάθε Gaussian στη συνολική προσέγγιση.

Η προσέγγιση κατανομής με συναρτήσεις βάσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν τα δεδομένα δεν ακολουθούν μια τυπική παραμετρική κατανομή και είναι κατάλληλη για πολύπλοκες και μη γραμμικές κατανομές. Η Kernel Density Distribution επιτρέπει την ομαλή εκτίμηση της συνάρτησης μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής. Αντί να προϋποθέτει συγκεκριμένες κατανομές, χρησιμοποιεί μια σειρά από συναρτήσεις βάσης, κυρίως Gaussian, για να παράγει μια ομαλή καμπύλη που αντικατοπτρίζει τη δομή των δεδομένων. Η διαδικασία ξεκινά με την επιλογή μιας συνάρτησης βάσης και του αντίστοιχου bandwidth, το οποίο καθορίζει το πλάτος της κάθε συνάρτησης βάσης. Το άθροισμα των συναρτήσεων βάσης από

όλα τα δείγματα μας δίνει μια συνολική εικόνα της εκτιμώμενης κατανομής. Αυτή η εκτίμηση στη συνέχεια κανονικοποιείται ώστε το συνολικό εμβαδόν κάτω από την καμπύλη να είναι ίσο με ένα, επιτρέποντας την να λειτουργεί ως μια έγκυρη συνάρτηση Probability density function (PDF) [15, 16].

4.2.2 Συντελεστές Συσχέτισης

Η κατανόηση των συσχετίσεων μεταξύ των διαφόρων φορτίων και της παραγωγής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά είναι κρίσιμη για την αποδοτική λειτουργία και τον σχεδιασμό του δικτύου. Αυτές οι συσχετίσεις είναι επηρεασμένες από παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες, η τοπολογία του δικτύου, οι ώρες της ημέρας, οι συνήθειες καταναλώσεις, καθώς και από την αμοιβαία επίδραση των φορτίων όταν αυτά είναι συνδεδεμένα στην ίδια γραμμή διανομής. Η δυναμική αυτή αλληλεπίδραση δημιουργεί ένα πλέγμα από δεδομένα που πρέπει να αναλυθούν με προσεκτικό και επιστημονικό τρόπο για την εξασφάλιση της σταθερότητας και της αποδοτικότητας του ηλεκτρικού συστήματος. Ο προσδιορισμός της συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών αυτών είναι κρίσιμος για την αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου και τη βελτιστοποίηση της παραγωγής και της κατανάλωσης.

Η συσχέτιση μεταξύ της ενεργού και αέργου ισχύος στα φορτία μπορεί να εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το είδος του φορτίου (βιομηχανικό, αγροτικό, αστικό) και τις κοινές καταναλωτικές συνήθειες. Επίσης, οι κοινές καιρικές συνθήκες μπορεί να επηρεάσουν τόσο την παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα όσο και την κατανάλωση ενέργειας από τα φορτία, προκαλώντας συσχετίσεις που πρέπει να αναλυθούν.

Οι συσχετίσεις μοντελοποιούνται μέσω ενός πίνακα συσχέτισης και οι συντελεστές συσχέτισης ρ_{ij} μπορούν να εκτιμηθούν αριθμητικά από πραγματικά δεδομένα μέσω χρονοσειρών μετρήσεων για τις συγκεκριμένες τυχαίες μεταβλητές. Επιπλέον, ο πίνακας συσχέτισης μπορεί να εκτιμηθεί απευθείας από αυτές τις μετρήσεις, αν είναι διαθέσιμες. Ένας υψηλός συντελεστής συσχέτισης υποδηλώνει μια ισχυρή γραμμική σχέση, ενώ ένας χαμηλός συντελεστής υποδηλώνει ασθενή ή καθόλου σχέση [17].

4.2.3 Μέθοδος των Copulas

Η θεωρία των Copulas βασίζεται σε ένα μαθηματικό εργαλείο που χρησιμοποιείται στη στατιστική για να μοντελοποιήσει και να αναλύσει τις σχέσεις εξάρτησης κατανομών πολλών μεταβλητών. Πρόκειται για στατιστικά μοντέλα που περιγράφουν πώς συνδέονται τυχαίες

μεταβλητές μεταξύ τους. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις πολλών μεταβλητών που απαιτούν μια υπόθεση κανονικότητας (κανονικές κατανομές), τα copulas επιτρέπουν μεγαλύτερη ευελιξία επειδή μπορούν να μοντελοποιήσουν σχέσεις μεταξύ πολλών μεταβλητών, ακόμα και όταν οι μεταβλητές δεν ακολουθούν μια κανονική κατανομή [18].

Το αρχικό στοιχείο της μεθόδου των Copulas παρέχει έναν τρόπο για να κατασκευάσουμε μια συνάρτηση κατανομής πολλών μεταβλητών, συνδυάζοντας μονοδιάστατες συναρτήσεις κατανομής. Η μέθοδος αυτή, μας διαβεβαιώνει ότι για οποιαδήποτε συνάρτηση κατανομής πολλών μεταβλητών, υπάρχουν αντίστοιχες οριακές κατανομές κάθε μεταβλητής που εξετάζονται μεμονωμένα. Με την μέθοδο των Copulas μπορούν να συγχωνευτούν αυτές οι οριακές κατανομές και να δημιουργήσει κοινή κατανομή πολλών συσχετισμένων μεταβλητών [10].

Στην μέθοδο των copulas χρησιμοποιείται ο συντελεστής συσχέτισης Kendall, γνωστός και ως Kendall's τ , για την συσχέτιση δύο ποσοτήτων. Ο συντελεστής αυτός αξιοποιεί την τάξη των δειγμάτων και όχι τις πραγματικές τιμές τους όπως εξετάζει ο συντελεστής Pearson. Εκτιμάται λοιπόν η συνάρτηση πιθανότητας (PDF) μιας τυχαίας μεταβλητής με μη παραμετρικό τρόπο. Αντί να υποθέτει μια συγκεκριμένη κατανομή (όπως κανονική, εκθετική κ.ά.), μέσω του συντελεστή συσχέτισης, εκτιμάται η κατανομή βασισμένη στα ίδια τα δεδομένα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν δεν γνωρίζουμε την υποκείμενη κατανομή ή όταν τα δεδομένα δεν ταιριάζουν καλά με τις τυπικές κατανομές [19].

4.2.4 Εφαρμογή της Στοχαστικής Μεθοδολογίας

Η στοχαστική προσέγγιση μέσω της προσομοίωσης Monte Carlo (MC) επιτρέπει την εκτίμηση και τη μοντελοποίηση της αβεβαιότητας και της εξάρτησης μεταξύ διαφόρων μεταβλητών σε συστήματα. Η προσομοίωση MC βασίζεται στην επαναληπτική δειγματοληψία και την ανάλυση των αποτελεσμάτων για την απόκτηση προβλέψεων σχετικά με τη συμπεριφορά του συστήματος. Ακολουθεί μια λεπτομερής περιγραφή της εφαρμογής των κρίσιμων στοιχείων της μεθοδολογίας στον σχεδιασμό της στοχαστικής μας MC προσομοίωσης:

1. **Προσέγγιση Κατανομών:** Προσεγγίζουμε αριθμητικά την κατανομή της τυχαίας μεταβλητής μέσω συναρτήσεων βάσης (Gaussian). Αυτή η μέθοδος μας επιτρέπει να

προσαρμόσουμε τις κατανομές στα δεδομένα, χωρίς την ανάγκη να προσδιορίσουμε αυστηρά τη μορφή τους.

2. **Εύρεση Συντελεστών Συσχέτισης:** Υπολογίζουμε τους συντελεστές συσχέτισης για να κατανοήσουμε την εξάρτηση μεταξύ των φυσικών παραμέτρων και των φορτίων / φωτοβολταϊκών, μέσω της μέθοδου των τυπικών συσχετίσεων του Kendall. Αυτοί οι συντελεστές μας βοηθούν να αναλύσουμε την αλληλεπίδραση μεταξύ των μεταβλητών και να διαμορφώσουμε τις από κοινού κατανομές πιθανότητας.
3. **Εφαρμογή της Μεθόδου Copulas:** Χρησιμοποιούμε τη μέθοδο copulas για να ενώσουμε τις οριακές κατανομές σε μια από κοινού κατανομή πιθανότητας. Η μέθοδος copulas επιτρέπει την απεικόνιση των πολυδιάστατων συσχετίσεων και εξαρτήσεων που δεν μπορούν να αποτυπωθούν μέσω των παραδοσιακών μεθόδων.
4. **Ανάλυση Στοχαστικής Εξάρτησης:** Ανάλυση των εξαρτήσεων μεταξύ των δειγμάτων εισόδου και εξαγωγή μιας μήτρας συσχέτισης που αποτυπώνει αυτές τις εξαρτήσεις.
5. **Δημιουργία συσχετισμένων δειγμάτων:** Δημιουργία συσχετισμένων δειγμάτων U_i από την τυπική ομοιόμορφη κατανομή και χρήση μοντέλου copulas λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές συσχέτισης για τη διατήρηση της σωστής δομής εξάρτησης.
6. **Μετατροπή στον χώρο δειγμάτων:** Μετατροπή των συσχετισμένων δειγμάτων U_i στον αρχικό χώρο της δειγματοληψίας, εφαρμόζοντας τις αντίστροφες συναρτήσεις αθροιστικών κατανομών $F_{X_i}^{-1}$ σε κάθε U_i . Μαθηματικά, αυτό το βήμα εκφράζεται ως:

$$X_i = F_{X_i}^{-1}(U_i) \quad (4.4)$$

Εδώ, U_i είναι τα συσχετισμένα δείγματα που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στο διάστημα $[0,1]$ που λαμβάνονται από το μοντέλο copulas, και $F_{X_i}^{-1}$ είναι η αντίστροφη αθροιστική συνάρτηση για την i -οστή μεταβλητή, η οποία αντιστοιχίζει τα δείγματα πίσω στην αρχική κλίμακα των δεδομένων. [10]

Μέσω αυτής της διαδικασίας, μπορούμε να προσομοιώσουμε στοχαστικά σενάρια που αντικατοπτρίζουν πιστά την αβεβαιότητα και τις εξαρτήσεις των πραγματικών συστημάτων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει μια βαθύτερη κατανόηση των δυναμικών του συστήματος και την αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων διαφόρων λειτουργικών στρατηγικών.

4.3 Ανάλυσης Ροής Ισχύος και Δειγματοληψία

4.3.1 Εξισώσεις ροής ισχύος για δίκτυα διανομής

Η ανάλυση ροής φορτίου αποτελεί ένα κρίσιμο κριτήριο για τα δίκτυα διανομής. Η διαδικασία αυτή επικεντρώνεται στην ακριβή πρόβλεψη των ρευμάτων και των τάσεων στα διάφορα σημεία του δικτύου, βασιζόμενη στη δομή του συστήματος και τα προφίλ παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος. Οι κλασικές ντετερμινιστικές μέθοδοι είχαν κυριαρχήσει στο παρελθόν λόγω της απλότητάς τους, ωστόσο, αυτές υποθέτουν στατικές συνθήκες φορτίου ή παραγωγής, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα που εισάγεται από τη στοχαστική φύση κάποιων φορτίων και πηγών παραγωγής. Η ενεργειακή κατάσταση η οποία χαρακτηρίζεται από την αυξανόμενη ένταξη των ΑΠΕ, προσδίδει μια παράδοση αύξηση των αβεβαιοτήτων στο δίκτυο. Η ένταξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων εισάγει νέες προκλήσεις, λόγω της αυξημένης μεταβλητότητας της παραγωγής και των προτύπων κατανάλωσης. Τέτοιες τεχνικές προκλήσεις που μπορεί να επιφέρει είναι η αύξηση της τάσης, η εξασθένηση της ποιότητας ισχύος, η φθορά εξοπλισμού, προβλήματα αξιοπιστίας και διακοπές ρεύματος [20].

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή ισχύος σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο διανομής είναι ένα σύνολο μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων οι DistFlow. Αποτελούν μια απλοποίηση των βασικών εξισώσεων ροής ισχύος και λαμβάνουν υπόψη τις απώλειες ισχύος λόγω της αντίστασης στις γραμμές. Οι εξισώσεις αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την ανάλυση ακτινικών δικτύων, όπως είναι χαρακτηριστικά τα συστήματα διανομής. Έτσι, θεωρούμε τις εξής εξισώσεις DistFlow, για την ανάλυση ροής ισχύος [21, 22]:

$$\sum_{k:i \rightarrow k} P_k = P_i - p_i - r_i l_i \quad (4.5)$$

$$\sum_{k:i \rightarrow k} Q_k = Q_i - q_i - x_i l_i \quad (4.6)$$

$$v_i = v_{\pi_i}^2 - 2r_i P_i - 2x_i Q_i - (r_i^2 + x_i^2) l_i \quad (4.7)$$

$$l_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_{\pi_i}} \quad (4.8)$$

Στη μελέτη ηλεκτρικών δικτύων, η ανάγκη για ακριβείς και ταυτόχρονα απλοποιημένες μεθοδολογίες ανάλυσης είναι εξέχουσας σημασίας. Οι μεθοδολογίες πρέπει να συνδυάζουν

την ακρίβεια με την ευκολία στην εφαρμογή τους, ειδικά σε σύνθετα συστήματα όπως είναι τα ηλεκτρικά δίκτυα διανομής. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι και οι εξισώσεις LinDistFlow, οι οποίες προσφέρουν μία συνοπτική και εντούτοις αποδοτική προσέγγιση για την ανάλυση των ροών ισχύος στα δίκτυα διανομής.

Οι εξισώσεις LinDistFlow είναι μια γραμμικοποιημένη έκδοση των αρχικών εξισώσεων DistFlow, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της ροής ισχύος σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, παρέχουν έναν σημαντικό μηχανισμό απλοποίησης, βασιζόμενες στην παραδοχή ότι η πτώση τάσης σε μια γραμμή αποδίδεται κατά κύριο λόγο στις απώλειες ενεργού ισχύος, παραβλέποντας τις απώλειες άεργου ισχύος, και ότι οι γωνιακές διαφορές τάσης παραμένουν ελάχιστες, επιτρέποντας έτσι τη χρήση γραμμικών προσεγγίσεων. Αυτές οι υποθέσεις καθίστανται λογικές υπό το πρίσμα ότι τα δίκτυα διανομής οι γραμμές διανομής είναι συνήθως σχετικά μικρά και οι διακυμάνσεις τάσης περιορισμένες.

Η εφαρμογή του γραμμικού μοντέλου διευκολύνει τον υπολογισμό των ροών ισχύος και επιτρέπει την αποτελεσματική επίλυσή τους, ακόμα και σε περιπτώσεις περίπλοκων και μεγάλων δικτύων. Αυτή η μέθοδος αποδεικνύεται ιδιαίτερα ωφέλιμη για τους σκοπούς της βελτιστοποίησης και του σχεδιασμού, όπου ενδέχεται να απαιτούνται πολλαπλές επαναλήψεις υπολογισμών ροής ισχύος. Οι εξισώσεις LinDistFlow είναι οι εξής: [21], [22].

$$\sum_{k:i \rightarrow k} P_k = P_i - p_i \quad (4.9)$$

$$\sum_{k:i \rightarrow k} Q_k = Q_i - q_i \quad (4.10)$$

$$v_i^2 = v_{\pi_i}^2 - 2r_i P_i - 2x_i Q_i \quad (4.11)$$

Οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν την κατανομή της ενεργής και άεργης ισχύος μέσα σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και τις μεταβολές στην τάση που προκύπτουν λόγω των φορτίων και των απωλειών στις γραμμές. Οι εξισώσεις αυτές προσφέρουν μια γραμμική προσέγγιση που διευκολύνει τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτών σε σύνθετα δίκτυα, επιτρέποντας την ανάλυση και τον σχεδιασμό τους με πιο

απλοποιημένο τρόπο. Αυτές οι εξισώσεις είναι ιδιαίτερα χρήσιμες όταν θέλουμε να προσδιορίσουμε τις επιπτώσεις διαφόρων σεναρίων ενσωμάτωσης ΑΠΕ στο δίκτυο.

$$P_i = p_i + \sum_{k \in Des(i)} p_k \quad (4.12)$$

$$Q_i = q_i + \sum_{k \in Des(i)} q_k \quad (4.13)$$

$$p_i = p_i^{\text{load}} - p_i^{\text{gen}} \quad (4.14)$$

$$q_i = q_i^{\text{load}} \quad (4.15)$$

Η προσέγγιση είναι αποτελεσματική και ιδιαίτερα κατάλληλη για ακτινικά δίκτυα, τα οποία είναι δενδροειδή με σαφή κατεύθυνση από τον υποσταθμό προς τα τελικά σημεία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελέτες σε κάθε τμήμα του δικτύου για να εξασφαλιστεί αξιόπιστη λειτουργία υπό διάφορες συνθήκες φορτίου.

4.3.2 Δειγματοληψία από κατανομή

Η μέθοδος δειγματοληψίας από μια κατανομή θεωρείται μια πιθανή προσέγγιση για την εκτέλεση προσομοιώσεων ροής φορτίου σε ακτινικά δίκτυα διανομής, λόγω της μεταβλητότητας και της αβεβαιότητας που ενδέχεται να παρουσιάζουν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Η προσομοίωση Monte Carlo (MC) είναι μια τεχνική επιλογή η οποία λόγω της ικανότητάς της να διαχειρίζεται μη γραμμικές και μεγάλες διακυμάνσεις στις παραμέτρους του συστήματος, καθίσταται ιδιαίτερα προσαρμόσιμη και κατάλληλη για γενικές προσομοιώσεις. Η διαδικασία ξεκινά με τη συλλογή ενός μεγάλου αριθμού δειγμάτων, για να εκτιμηθεί πώς θα συμπεριφερθεί το δίκτυο σε διάφορες συνθήκες. Αυτά τα δείγματα μπορεί να αντιστοιχούν σε τιμές φορτίου, παραγωγής ή άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν το δίκτυο. [23, 24, 25]

Κάθε δείγμα αποτελεί ένα σενάριο όπου οι τυχαίες μεταβλητές του φορτίου και της παραγωγής έχουν λάβει συγκεκριμένες τιμές βάσει της κατανομής πιθανοτήτων. Στη συνέχεια, για κάθε ένα από αυτά τα δείγματα εκτελούνται οι γραμμικοποιημένες εξισώσεις ροής ισχύος, οι οποίες είναι προσαρμοσμένες για ακτινικά δίκτυα διανομής.

Το ακτινικό δίκτυο είναι μια διαδεδομένη δομή σε συστήματα διανομής, όπου υπάρχει ένας κεντρικός κόμβος (συνήθως ένας υποσταθμός) από τον οποίο προέρχεται η ηλεκτρική

ενέργεια και από αυτόν διακλαδίζονται οι γραμμές προς τους τελικούς χρήστες. Η γραμμικοποίηση των εξισώσεων είναι μια κατάλληλη τεχνική για τέτοιου είδους δίκτυα λόγω της απλούστερης δομής τους συγκριτικά με πιο πολύπλοκα δίκτυα, όπως τα δικτυακά δίκτυα. Αυτό επιτρέπει την αποφυγή της μεγάλης πολυπλοκότητας που έχουν οι πλήρεις μη γραμμικές εξισώσεις ροής φορτίου.

Τέλος, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προβλέψεις και βελτιστοποιήσεις τόσο στο σχεδιασμό όσο και στη λειτουργία του δικτύου. Ειδικά σε περιπτώσεις που το δίκτυο ενσωματώνει ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι προσομοιώσεις είναι κρίσιμες για τον χειρισμό της μεταβλητότητας και της αβεβαιότητας που αυτές εισάγουν στο σύστημα [26, 27, 28].

4.4 Εύρεση Πιθανότητας Παραβίασης Περιορισμών

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην χαλάρωση του περιορισμού μη παραβιάσεων τάσης, που είναι ένα βασικό κριτήριο αναφορικά με την ένταξη ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής. Στα πρότυπα του δικτύου, υπάρχει η απαίτηση οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς να παραμένουν εντός ενός επιθυμητού εύρους και η απόκλιση από αυτό το εύρος θεωρείται παραβίαση τάσης και πρέπει να αποφεύγεται. Συγκεκριμένα, η πιθανότητα οι τάσεις στους ζυγούς να διατηρούνται εντός των καθορισμένων ορίων $[0.9, 1.1]$ θεωρούνται αποδεκτές.

$$V_{\text{acc}} = [0.9, 1.1]^N \quad (4.16)$$

Ωστόσο, αντί να διατηρούμε αυστηρά τις τάσεις εντός αυτού του εύρους, η εργασία προτείνει τη χρήση ενός αποδεκτού ποσοστού παραβιάσεων. Δηλαδή, επιτρέπεται ένα μικρό ποσοστό του χρόνου (για παράδειγμα, μικρότερο ή ίσο με 5%) κατά το οποίο οι τάσεις μπορεί να βρίσκονται εκτός του επιθυμητού εύρους. Η μαθηματική αποτύπωση αυτής της προσέγγισης αποτυπώνεται στην Σχέση 4.17. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι υπολογίζουμε την πιθανότητα P οι τάσεις v_i να παραμείνουν εντός των αποδεκτών ορίων για το 95% του χρόνου, δηλαδή:

$$P(0.9 \leq v_i \leq 1.1, \forall i) = \int_{V_{\text{acc}}} f_v(v) dv \geq 0.95 \quad (4.17)$$

Με τη μέθοδο που χρησιμοποιούμε στις προσομοιώσεις λαμβάνουμε ως δεδομένα τυχαία δείγματα από την εμπειρική κατανομή που έχουμε προσδιορίσει για να προσεγγίσουμε την τιμή του ολοκληρώματος [29, 30].

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας παραβίασης των περιορισμών σε ένα δίκτυο με N ζυγούς, βρίσκουμε μέσω των ιστογραμμάτων τάσης το εμβαδόν της ουράς κάθε κυματομορφής το οποίο βρίσκεται εκτός των αποδεκτών ορίων.

Η μελέτη που περιγράφεται σε όλο το κεφάλαιο αποτελεί μία πιθανή πρόταση διαχείρισης των δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας όπου ενσωματώνονται ΑΠΕ, όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Η ανάπτυξη της πρότασης συνοπτικά εξετάζει τα εξής σημεία αναφορικά με τις παραβιάσεις τάσεων:

- Παραβιάσεις: Αναφέρεται σε περιπτώσεις όπου το δίκτυο υποστεί φορτία πέραν των προδιαγραφών ή των ορίων ασφάλειας του όπως ορίζονται στην Σχέση 4.16. Μια παραβίαση μπορεί να είναι υπερφόρτωση στις γραμμές, υπερβολική παραγωγή ή άλλες συνθήκες που ξεπερνούν τις τεχνικές δυνατότητες του δικτύου.
- Ποσοστό Παραβιάσεων: Το μέγιστο επιτρεπτό ποσοστό παραβιάσεων τάσης ορίζεται στο 5% . Αν στο δίκτυο εμφανίζονται παραβιάσεις που υπερβαίνουν το ανεκτό όριο, τότε ενεργοποιούνται συγκεκριμένα μέτρα διαχείρισης.
- Αποκοπή της Παραγωγής: Ο Διαχειριστής Δικτύου είναι υπεύθυνος για την απόρριψη παραγωγής ΑΠΕ σε περίπτωση που το ποσοστό παραβιάσεων των περιορισμών ξεπερνάει το όρι 5% και το δίκτυο βρίσκεται σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης για την ευστάθειά του.
- Αποζημίωση: Στην μεθοδολογία που περιγράφεται αποκλείει την δυνατότητα παροχής αποζημίωσης προς τους παραγωγούς που επηρεάζονται από την αποσύνδεση της παραγωγής τους.

Κεφάλαιο 5

5. Παράμετροι Προσομοιώσεων σε Πραγματικό Δίκτυο Διανομής

5.1 Χρονοσειρές

Στην προσομοίωση φορτίων και παραγωγής ενέργειας, η χρήση εμπειρικής κατανομής αντί για κανονικής βοηθά στην κατανόηση της πραγματικής συμπεριφοράς των συστημάτων στις συγκεκριμένες τοποθεσίες. Έτσι, ελλείπει δεδομένων χρονοσειρών για το Δίκτυο της προσομοίωσης επιλέχθηκε ως εναλλακτική λύση η χρήση εμπειρικών κατανομών δεδομένων χρονοσειρών από πραγματικά δίκτυα άλλων περιοχών, προσαρμοσμένα στις συνθήκες των Ιωαννίνων.

Τα δεδομένα χρονοσειρών περιείχαν τιμές για ένα έτος με δειγματοληπτική συχνότητα 15 λεπτών. Η επεξεργασία τους περιελάμβανε την αναδιοργάνωση των χρονοσειρών ανά ώρα για να διευκολυνθεί η ανάλυση και η μοντελοποίηση των φορτίων και των παραγωγών στο δίκτυο της προσομοίωσης.

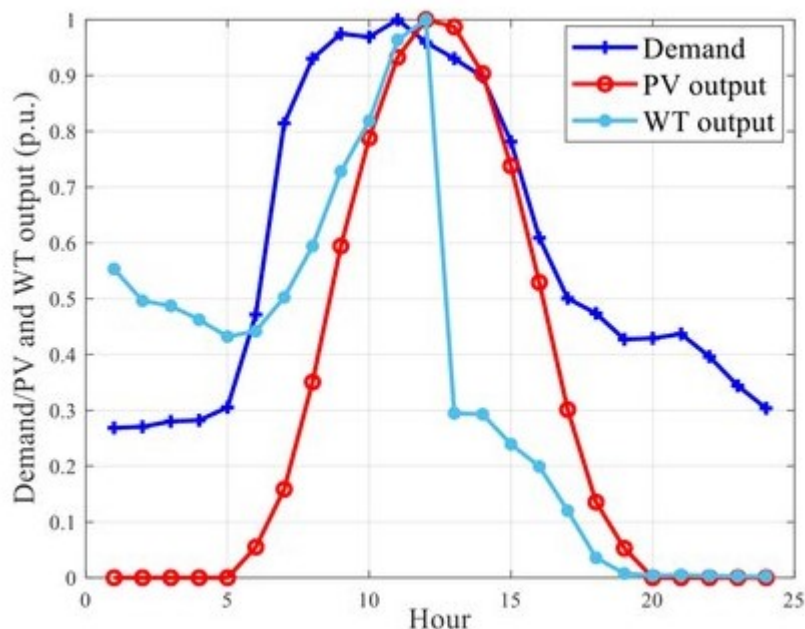
Η επιλογή χρήσης δεδομένων χρονοσειρών από αντίστοιχες χρήσεις (όπως αγροτικά φορτία) αντανακλά την πραγματική κατανάλωση και παραγωγή ενέργειας στις εν λόγω ώρες και συνθήκες.

5.2 Καμπύλες Φορτίου και Παραγωγής

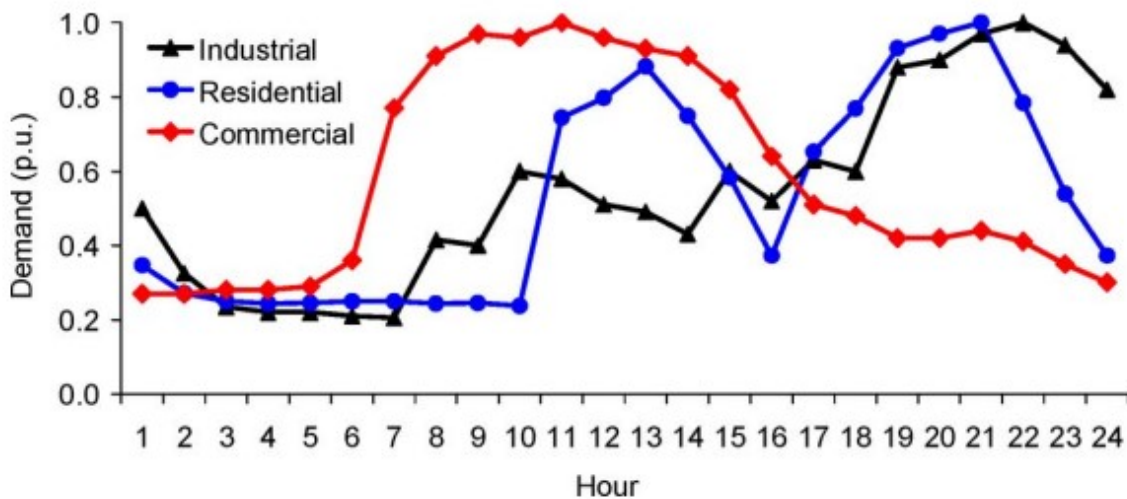
Η κανονικοποίηση της καμπύλης παραγωγής φωτοβολταϊκών [5.1] απεικονίζει την ενεργειακή παραγωγή βασισμένη σε παράμετρους όπως η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία, καθιστώντας δυνατή την αξιολόγηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε διάφορα σενάρια.

Αντίστοιχα, η καμπύλη φορτίου [5.2] αποσκοπεί στην ανάλυση και σύγκριση της καταναλωτικής συμπεριφοράς διαφόρων ενεργειακών συστημάτων, ανεξάρτητα από τις απόλυτες τιμές φορτίου. Αυτό περιλαμβάνει τη μετατροπή των δεδομένων φορτίου σε ποσοστιαία μορφή σε σχέση με τη μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή, επιτρέποντας την ευκολότερη οπτικοποίηση και κατανόηση των μοντέλων κατανάλωσης.

Η συνδυασμένη ανάλυση των δύο κανονικοποιημένων καμπυλών είναι καθοριστική για τον σχεδιασμό και την αποδοτική λειτουργία των δικτύων, καθώς δίνει τη δυνατότητα στους μηχανικούς να προβλέπουν και να διαχειρίζονται τις ενεργειακές ανάγκες και την απόδοση του συστήματος.



Σχήμα 5.1: Καμπύλες παραγωγών [3]



Σχήμα 5.2: Καμπύλες φορτίων διαφορετικών τύπων[4]

5.3 Συσχετίσεις μεταξύ ΦΒ και Παραγωγών

Στο πλαίσιο της μοντελοποίησης του δικτύου, η συσχέτιση μεταξύ φωτοβολταϊκών και φορτίων είναι ένα κρίσιμο στοιχείο για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του δικτύου. Έχει παρατηρηθεί ότι η συσχέτιση μεταξύ των φωτοβολταϊκών είναι ιδιαίτερα υψηλή, φτάνοντας το 0.8, αντανακλώντας μια ισχυρή γεωγραφική και καιρική εξάρτηση μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι οι μεταβολές στην παραγωγή των φωτοβολταϊκών, λόγω παραγόντων όπως η ηλιοφάνεια ή η συννεφιά, είναι συνήθως παρόμοιες λόγω της κοινής τους εκτεθειμένης θέσης σε αυτούς τους παράγοντες. Αντίθετα, η συσχέτιση μεταξύ των φορτίων είναι χαμηλότερη, με τιμή 0.6, καθώς τα φορτία μπορεί να επηρεάζονται από ποικίλες και διαφοροποιημένες δραστηριότητες και συμπεριφορές των καταναλωτών. Η μειωμένη αυτή συσχέτιση υποδηλώνει ότι οι διακυμάνσεις στη ζήτηση των φορτίων δεν είναι τόσο ομοιόμορφες όσο οι διακυμάνσεις στην παραγωγή των φωτοβολταϊκών.

Οι διαφορές σε αυτές τις τιμές συσχέτισης έχουν ιδιαίτερη σημασία στον σχεδιασμό και τη λειτουργία του δικτύου, καθώς οι διαχειριστές πρέπει να λαμβάνουν υπόψη όλες τις συσχέτισεις μεταξύ των στοιχείων τους. Μια υψηλή συσχέτιση μεταξύ των φωτοβολταϊκών απαιτεί από τους διαχειριστές να είναι πιο προσεκτικοί στην αξιολόγηση των κινδύνων που σχετίζονται με την καιρική εξάρτηση, ενώ μια χαμηλότερη συσχέτιση μεταξύ των φορτίων επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία.

5.4 Πλήθος Δειγμάτων Monte Carlo

Η παράμετρος του αριθμού δειγμάτων που χρησιμοποιεί τη μέθοδο Monte Carlo είναι κρίσιμη για την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος Monte Carlo είναι μια στοχαστική τεχνική, η οποία χρησιμοποιεί τυχαία δειγματοληψία για να προσεγγίσει τις λύσεις ενός προβλήματος που είναι δύσκολο ή αδύνατο να λυθεί με αναλυτικές μεθόδους. Στις προσομοιώσεις με τη μέθοδο Monte Carlo, υπάρχει ένα σημαντικό όριο μεταξύ ακρίβειας και χρόνου υπολογισμών. Αυξάνοντας τον αριθμό των δειγματοληψιών, αυξάνεται η ακρίβεια της προσομοίωσης, καθώς μειώνεται η τυχειότητα και η αστάθεια των εκτιμήσεων. Ωστόσο, αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο υπολογισμών, ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις περιορισμένων υπολογιστικών πόρων. Αντίθετα, μειώνοντας τον αριθμό των επαναλήψεων για ταχύτερους υπολογισμούς, μειώνεται η ακρίβεια. Η εύρεση της κατάλληλης ισορροπίας εξαρτάται από τις απαιτήσεις του κάθε προγράμματος και τις διαθέσιμες πόρους. Στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις επιλέχθηκαν 5000 δείγματα για την προσομοίωση, αριθμός που φαίνεται να προσδίδει ισορροπία μεταξύ χρόνου εκτέλεσης και ακρίβειας για την συγκεκριμένη μελέτη.

5.5 Παράμετροι ΔΕΔΔΗΕ

Η ανάπτυξη σεναρίων λειτουργίας για μια γραμμή διανομής είναι κρίσιμη για την δυνατότητα του δικτύου να εντάξει περισσότερα ΦΒ. Τα τέσσερα βασικά σενάρια που προτείνονται είναι:

- Μέγιστο Φορτίο με Διασυνδεδεμένους Παραγωγούς (MAX LOAD – DG IN)
- Ελάχιστο Φορτίο με Διασυνδεδεμένους Παραγωγούς (MIN LOAD – DG IN)
- Μέγιστο Φορτίο χωρίς Διασυνδεδεμένους Παραγωγούς (MAX LOAD – DG OUT)
- Ελάχιστο Φορτίο χωρίς Διασυνδεδεμένους Παραγωγούς (MIN LOAD – DG OUT)

Σε αυτά τα σενάρια έχει ληφθεί υπόψιν Ελάχιστος και ο Μέγιστος Συντελεστής Φόρτισης (0,1642) όπως ορίζονται από τον ΔΕΔΔΗΕ. Επίσης ορίστηκε ότι και η Ελάχιστη Μετρούμενη Τάση στον Υ/Σ (20,5 kV ή 1,025 pu) και η Μέγιστη Μετρούμενη Τάση στον Υ/Σ (21,2 kV ή 1,06 pu) παρέχουν τα όρια μέσα στα οποία θα πρέπει να παραμείνει η τάση για την

ασφαλή λειτουργία του δικτύου.

Η δημιουργία και ανάλυση αυτών των σεναρίων είναι κρίσιμη για την εκτίμηση της αξιοπιστίας και της ανθεκτικότητας του δικτύου σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας και για τον προσδιορισμό τυχόν αναγκαίων αναβαθμίσεων ή βελτιώσεων στην υποδομή του δικτύου. Αυτές οι παράμετροι προσομοίωσης βοηθούν στην δημιουργία ενός ακριβούς μοντέλου για την ανάλυση των επιπτώσεων των ανανεώσιμων πηγών στα δίκτυα διανομής ενέργειας και στην κατανόηση της δυναμικής της ζήτησης και της προσφοράς σε διάφορες ώρες και συνθήκες.

Κεφάλαιο 6

Προσομοιώσεις

6.1 Σενάριο 1

Στο Σενάριο 1, πραγματοποιείται προσομοίωση για την τοποθέτηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ισχύος 0.4 MW στον ζυγό με αριθμό 10. Η ανάλυση αυτή διεξάγεται σε ώρα αιχμής, δηλαδή στις 15:00. Εκείνη την χρονική στιγμή στο δίκτυο εμφανίζονται κατά κύριο λόγο αυξημένες απαιτήσεις κατανάλωσης φορτίων σε συνδυασμό με αυξημένη παραγωγή.

Η διαδικασία εξέτασης της ενσωμάτωσης του φωτοβολταϊκού συστήματος πραγματοποιείται με δύο μεθόδους:

- **Μεθοδολογία ΔΕΔΔΗΕ:**

Σύμφωνα με την προσέγγιση του Διαχειριστή του Δικτύου, ελέγχεται αν η τοποθέτηση του ΦΒ συστήματος ικανοποιεί τους περιορισμούς του δικτύου, όπως περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2 στις εξισώσεις 2.2 και 2.4

- **Στοχαστική Μεθοδολογία:**

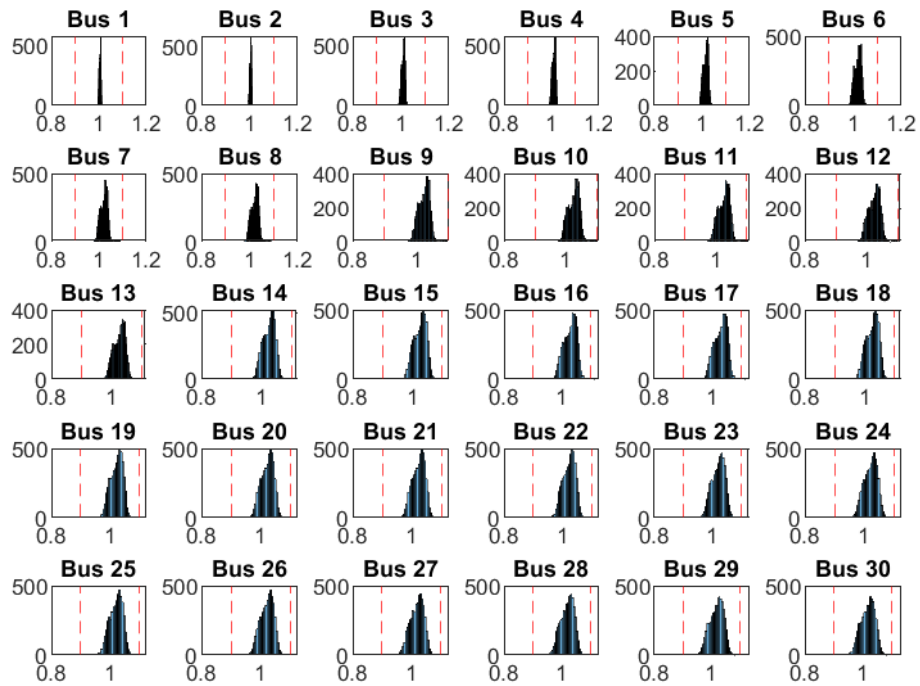
Αυτή η προσέγγιση λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων, χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως η μέθοδος Monte Carlo για την προσομοίωση πολλαπλών δυνατών αποτελεσμάτων και την αξιολόγηση της απόδοσής τους σε διάφορα σενάρια. Έχει οριστεί ως αποδεκτό ποσοστό παραβίασης της τάσης το 5% και προχωρήσαμε στην εκτέλεση πολλαπλών σεναρίων μέσω Monte Carlo για να κατασκευάσουμε ιστογράμματα τάσεων

Η ένταξη του φωτοβολταϊκού συστήματος 0.4 MW στον ζυγό 10 είναι επιτυχής σύμφωνα και με τις δύο μεθοδολογίες. Αυτό σημαίνει ότι η τοποθέτηση του φωτοβολταϊκού δεν προκαλεί απαγορευτικές διακυμάνσεις στις τάσεις των ζυγών του δικτύου, ούτε άλλους τεχνικούς παράγοντες που θα ήταν ανεπιθύμητοι για την σταθερότητα του δικτύου. Επιπρόσθετα, η απουσία παραβιάσεων κατά την ώρα αιχμής υποδεικνύει ότι το δίκτυο μπορεί να διαχειριστεί την επιπρόσθετη εισαγωγή ισχύος χωρίς να επιβαρυνθεί η λειτουργικότητά του. Τις υπόλοιπες ώρες αναμένεται οι παραβιάσεις των περιορισμών να είναι μικρότερες, διότι η παραγωγή των φωτοβολταϊκών του δικτύου γενικά θα είναι μικρότερη.

Στα παρακάτω σχήματα επιβεβαιώνεται ότι δεν υπάρχουν παραβιάσεις τάσεων μιάς και οι κυματομορφές δεν ξεπερνούν σε κανένα ζυγό τα όρια ασφαλείας κατά την ώρα αιχμής. Τα ιστογράμματα τάσεων στα ηλεκτρικά δίκτυα περιορίζονται μεταξύ 0.9 και 1.1 ($\pm 10\%$ της ονομαστικής τιμής) επειδή αυτό το εύρος αντανακλά τα συνήθη πρότυπα ποιότητας τροφοδοσίας [7]. Οι τιμές της τάσης εντός αυτού του εύρους διασφαλίζουν καλή λειτουργία του δικτύου και την αποφυγή βλαβών. Τα συστήματα που λειτουργούν εκτός αυτών των ορίων μπορεί να υποστούν προβλήματα όπως υπερβολική φόρτιση, ανεπαρκής τροφοδοσία στα άκρα του δικτύου, ή ακόμα και ζημιά σε συσκευές.

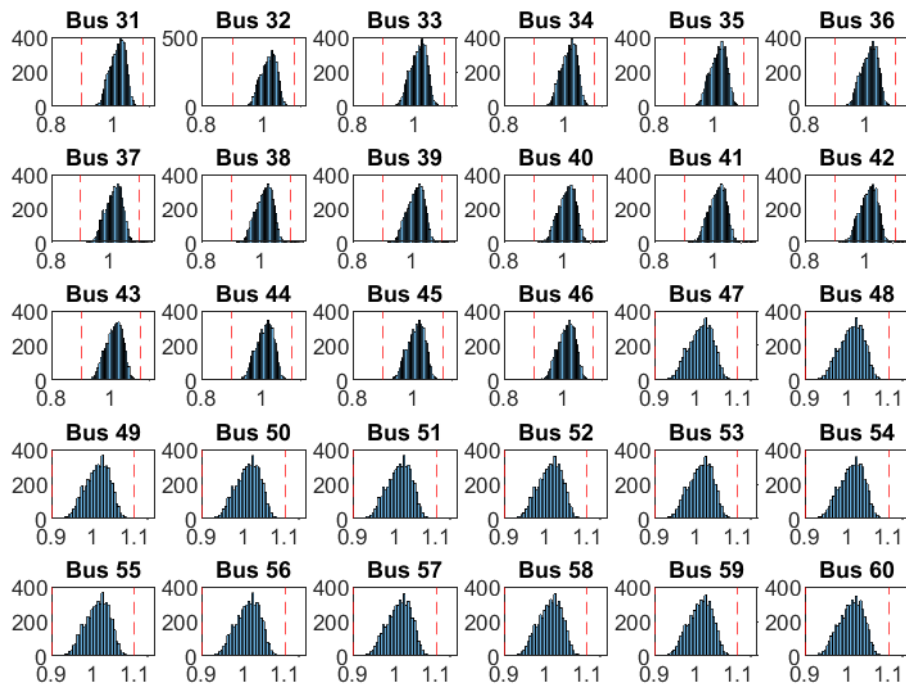
Στα Σχήματα από 6.1 έως 6.8 παρουσιάζονται αναλυτικά τα ιστογράμματα των τάσεων για όλους τους ζυγούς (227 ζυγοί) που προκύπτουν για το συγκεκριμένο δίκτυο στις 15:00.

PV installed in bus 10



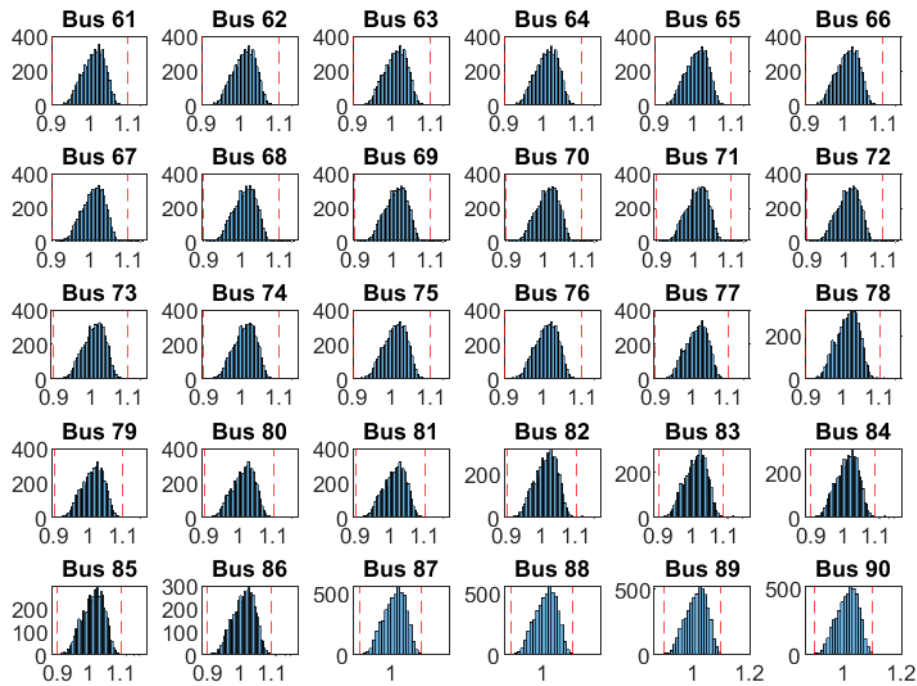
Σχήμα 6.1: Ζυγοί 1-30 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00

PV installed in bus 10



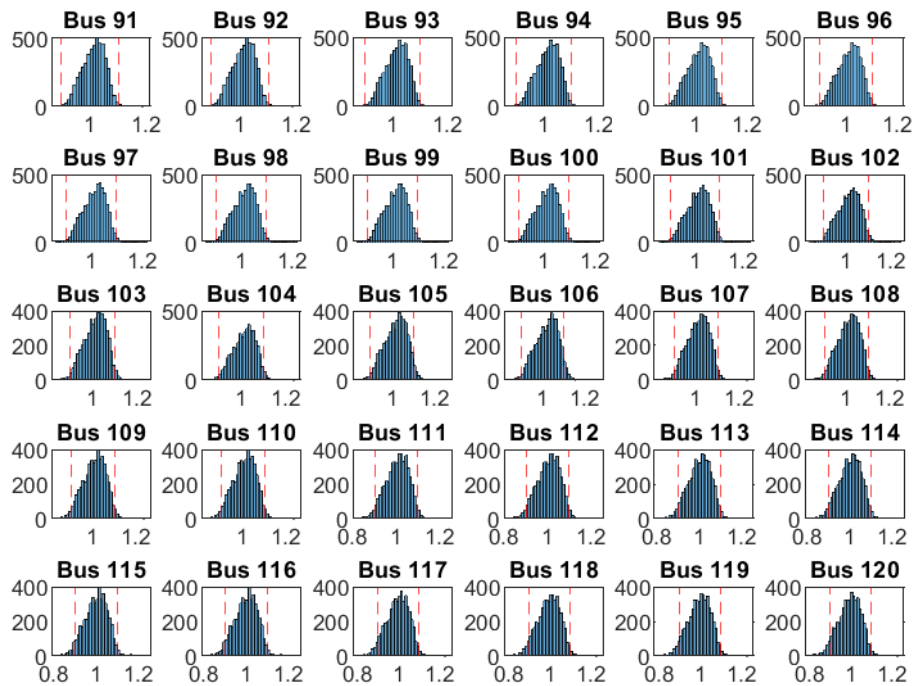
Σχήμα 6.2: Ζυγοί 31-60 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00

PV installed in bus 10



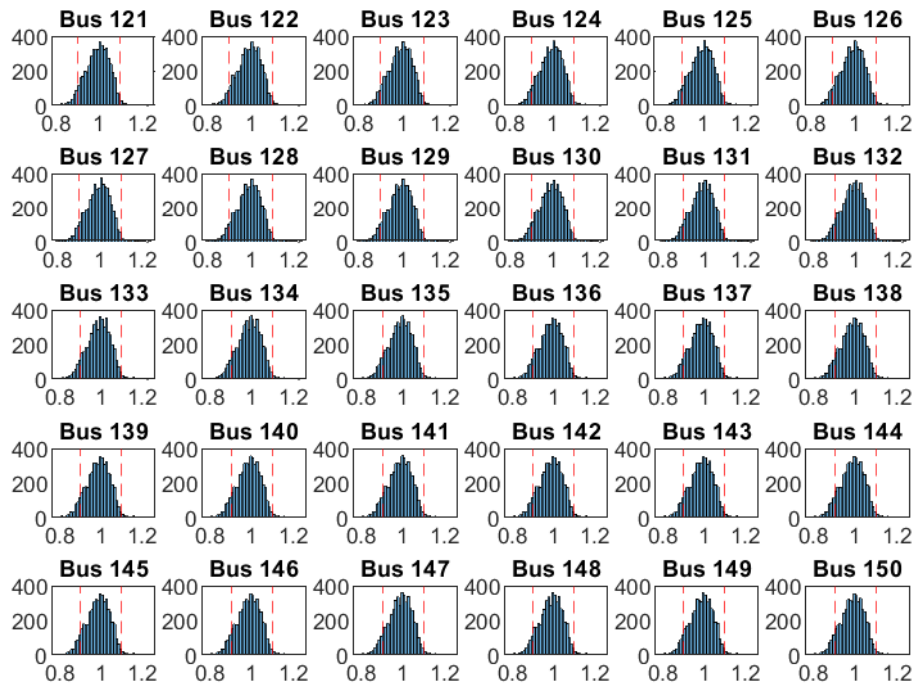
Σχήμα 6.3: Ζυγοί 61-90 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00

PV installed in bus 10



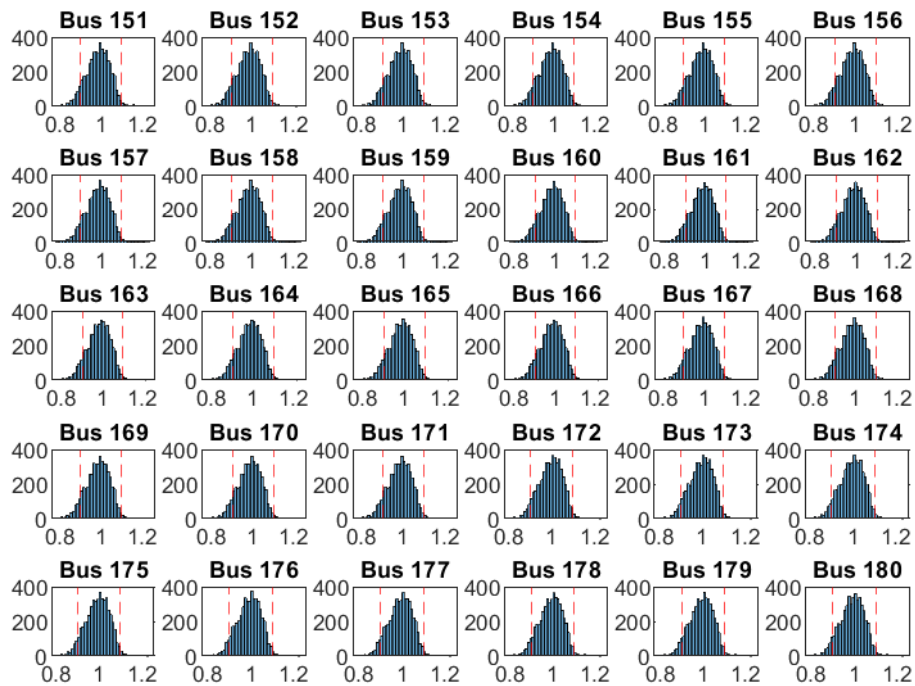
Σχήμα 6.4: Ζυγοί 91-120 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00

PV installed in bus 10



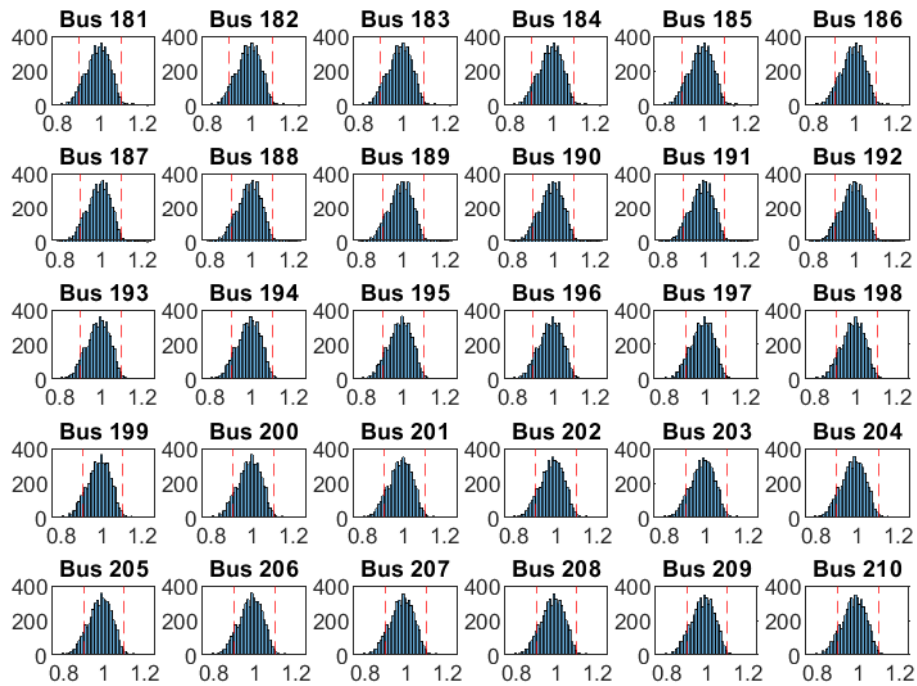
Σχήμα 6.5: Ζυγοί 121-150 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00

PV installed in bus 10



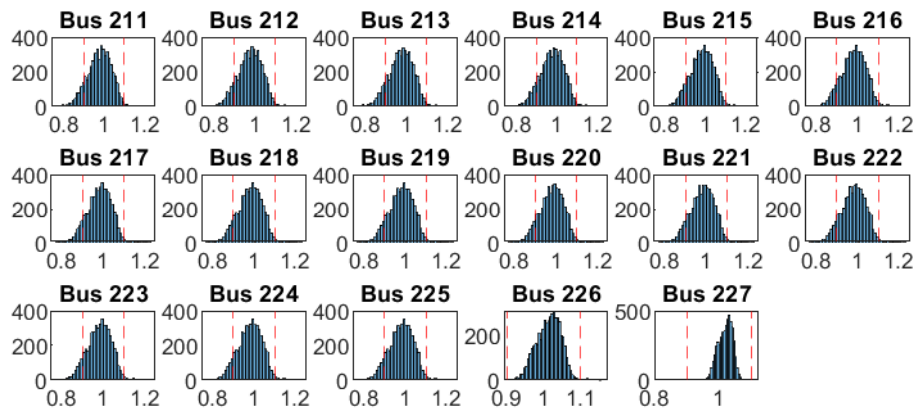
Σχήμα 6.6: Ζυγοί 151-180 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00

PV installed in bus 10



Σχήμα 6.7: Ζυγοί 181-210 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00

PV installed in bus 10



Σχήμα 6.8: Ζυγοί 211-227 μετά την τοποθέτηση 0.4 MW στον ζυγό 10 στις 15:00

6.2 Σενάριο 2

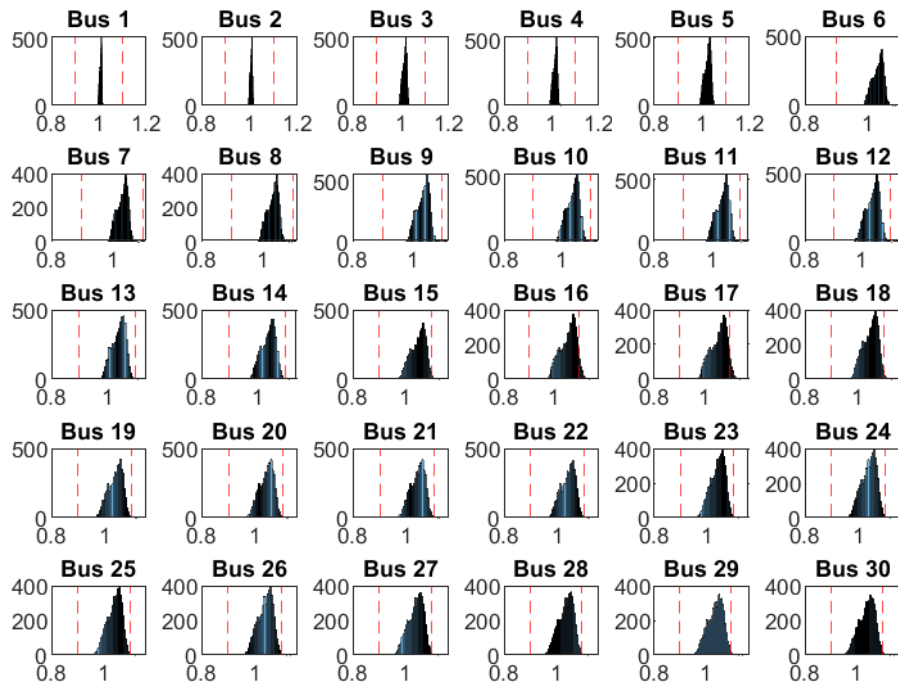
Στο Σενάριο 2, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για την ένταξη ενός φωτοβολταϊκού πάρκου ισχύος 0.9 MW στον ζυγό με αριθμό 150. Με βάση τη μεθοδολογία του ΔΕΔΔΗΕ, εκτιμήθηκαν οι περιορισμοί [2.2](#), [2.4](#), σε κρίσιμες συνθήκες.

Συγκεκριμένα, τα στιγμιότυπα που ακολουθούν είναι την ώρα αιχμής στις 15:00 (μεγάλη παραγωγή από φωτοβολταϊκά και μεγάλη κατανάλωση φορτίων). Ανιχνεύθηκαν συνολικά 128 περιπτώσεις παραβίασης των περιορισμών των τάσεων σε ζυγούς του δικτύου με την μέθοδο του ΔΕΔΔΗΕ. Μ' αυτήν την μεθοδολογία η αίτηση απορρίπτεται και δεν γίνεται δεκτή.

Στη συνέχεια, έγινε μελέτη χωρίς να εφαρμόσουμε αυστηρά τους περιορισμούς αναφορικά με τη μέση τιμή και τη διακύμανση, αλλά υιοθετώντας μία στοχαστική προσέγγιση. Ορίσαμε ως αποδεκτό ένα ποσοστό παραβίασης της τάσης της τάξης του 5% και προχωρήσαμε στην εκτέλεση πολλαπλών σεναρίων μέσω της μεθόδου Monte Carlo για να κατασκευάσουμε ιστογράμματα τάσεων. Από τα δεδομένα αυτά, το ποσοστό παραβίασης που προκύπτει είναι 4,76% (<5%), το οποίο υπολογίστηκε με βάση τις ουρές των κατανομών. Έτσι, με την στοχαστική μεθοδολογία είναι επιτρεπτή η ένταξη του φωτοβολταϊκού στον συγκεκριμένο ζυγό.

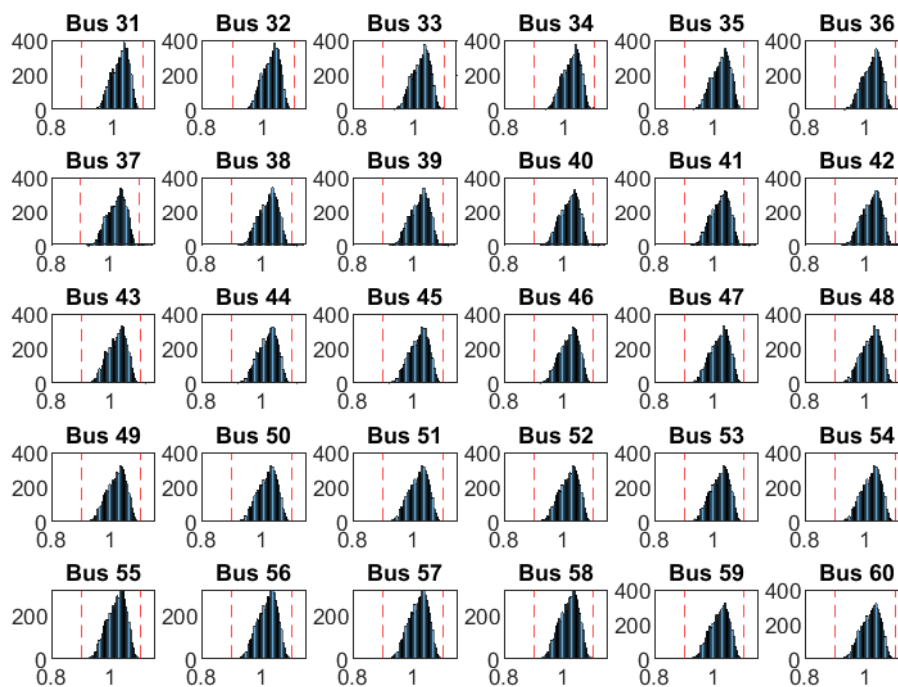
Αυτή η προσέγγιση μας επιτρέπει να διαχειριστούμε με μεγαλύτερη ευελιξία την αβεβαιότητα και την ποικιλομορφία της παραγωγής από τις ανανεώσιμες πηγές, ενσωματώνοντας τη στοχαστική φύση τους στην ανάλυση του δικτύου. Στα Σχήματα [6.9](#) έως [6.16](#) ακολουθούν τα ιστογράμματα των ζυγών.

PV installed in bus 150



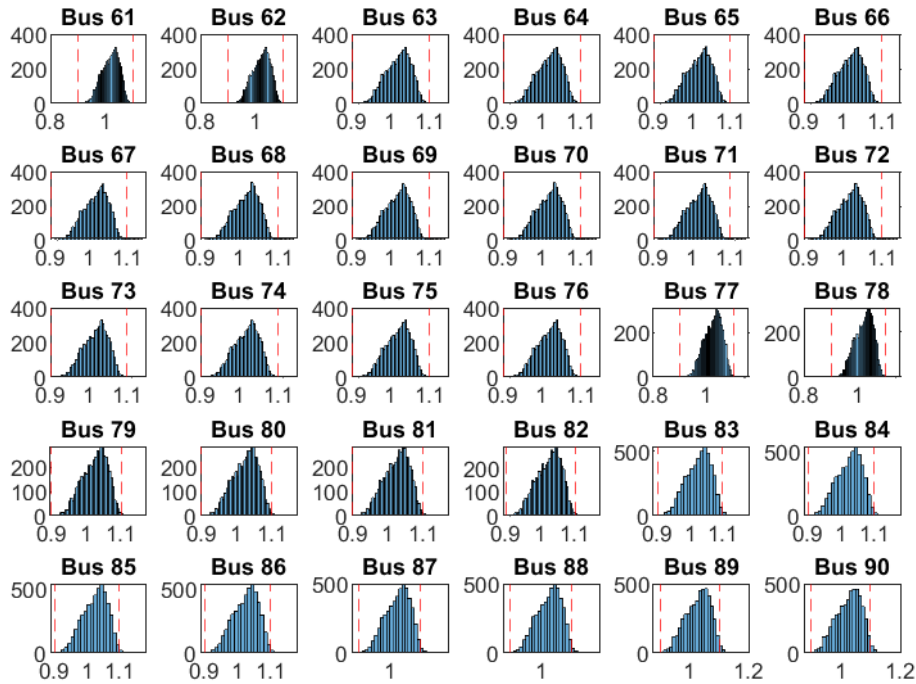
Σχήμα 6.9: Ζυγοί 1-30 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00

PV installed in bus 150



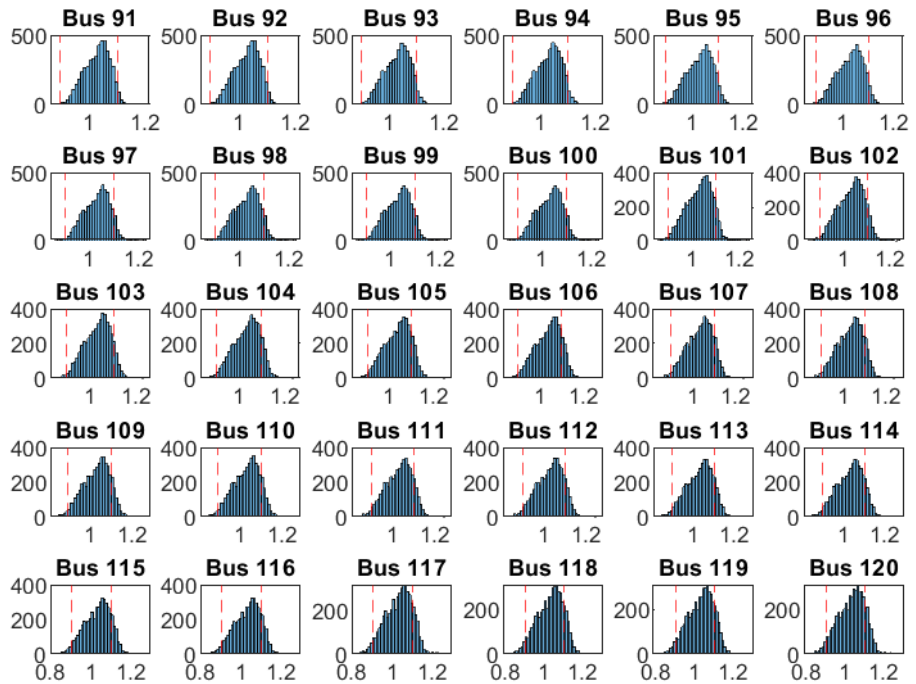
Σχήμα 6.10: Ζυγοί 31-60 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00

PV installed in bus 150



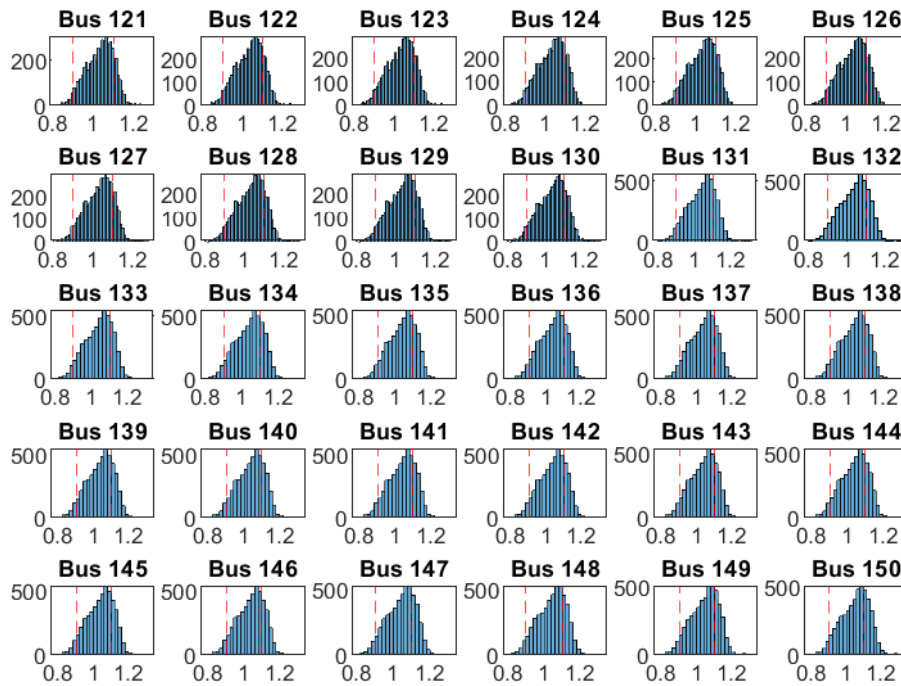
Σχήμα 6.11: Ζυγοί 61-90 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00

PV installed in bus 150



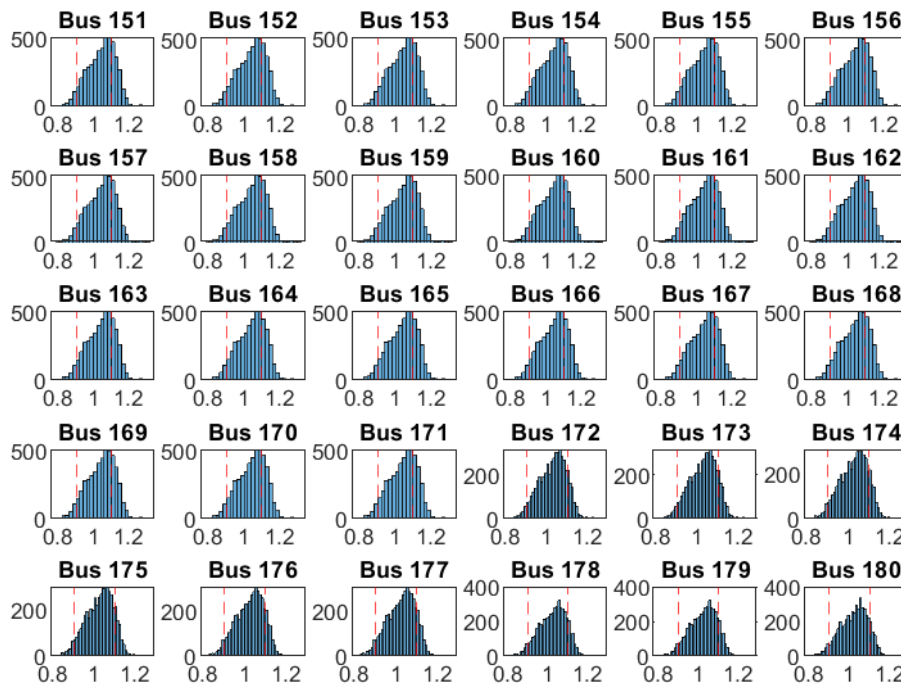
Σχήμα 6.12: Ζυγοί 91-120 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00

PV installed in bus 150



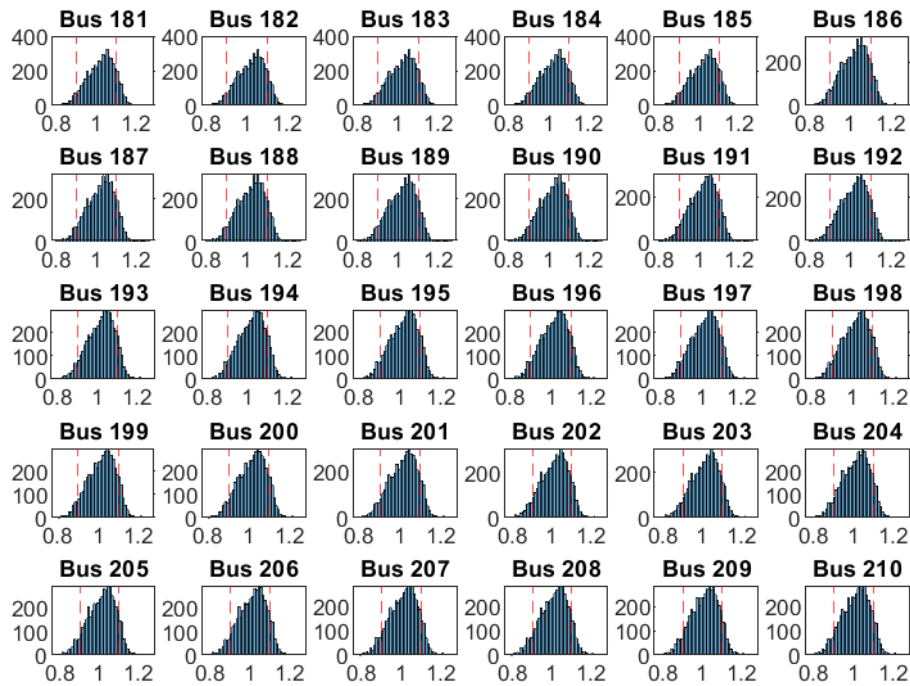
Σχήμα 6.13: Ζυγοί 121-150 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00

PV installed in bus 150



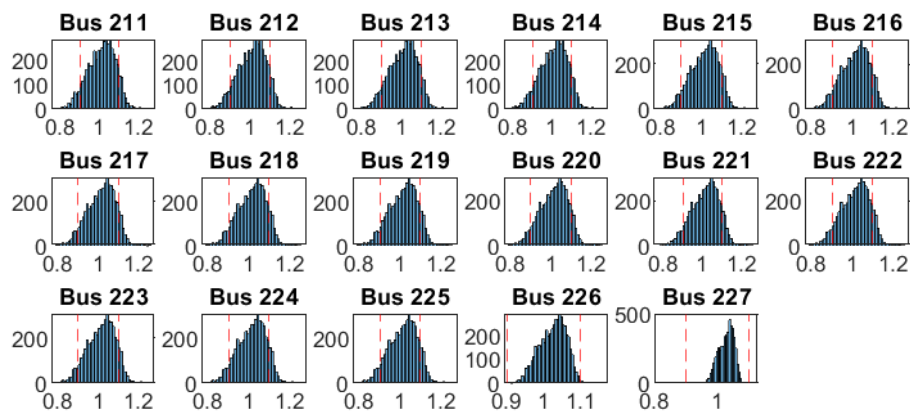
Σχήμα 6.14: Ζυγοί 151-180 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00

PV installed in bus 150



Σχήμα 6.15: Ζυγοί 181-210 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00

PV installed in bus 150

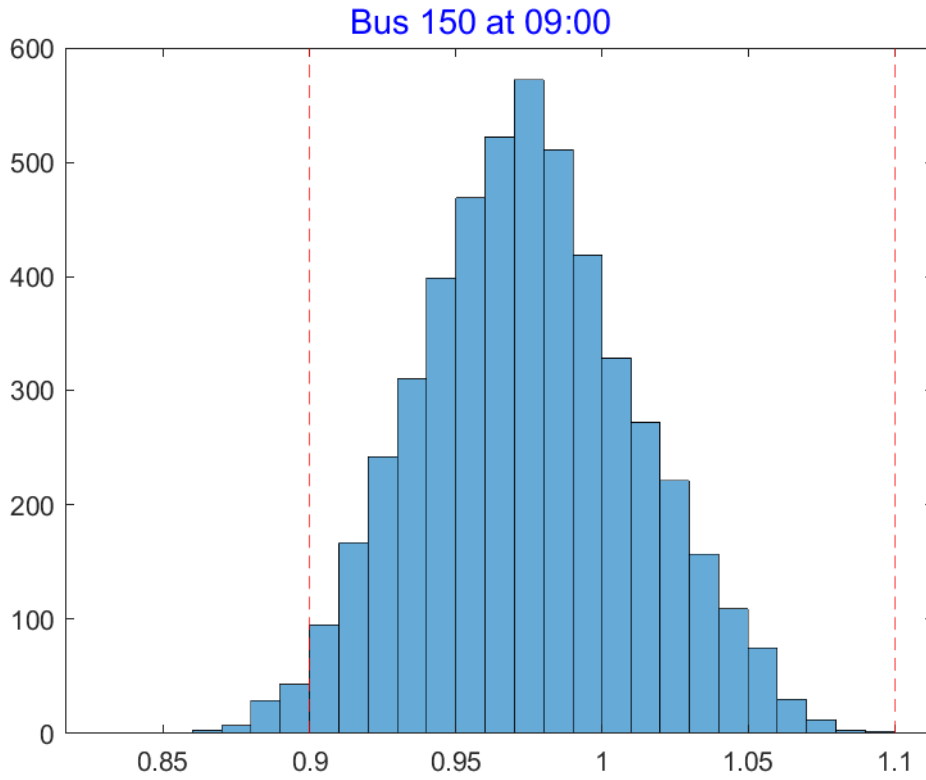


Σχήμα 6.16: Ζυγοί 211-227 μετά την τοποθέτηση 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00

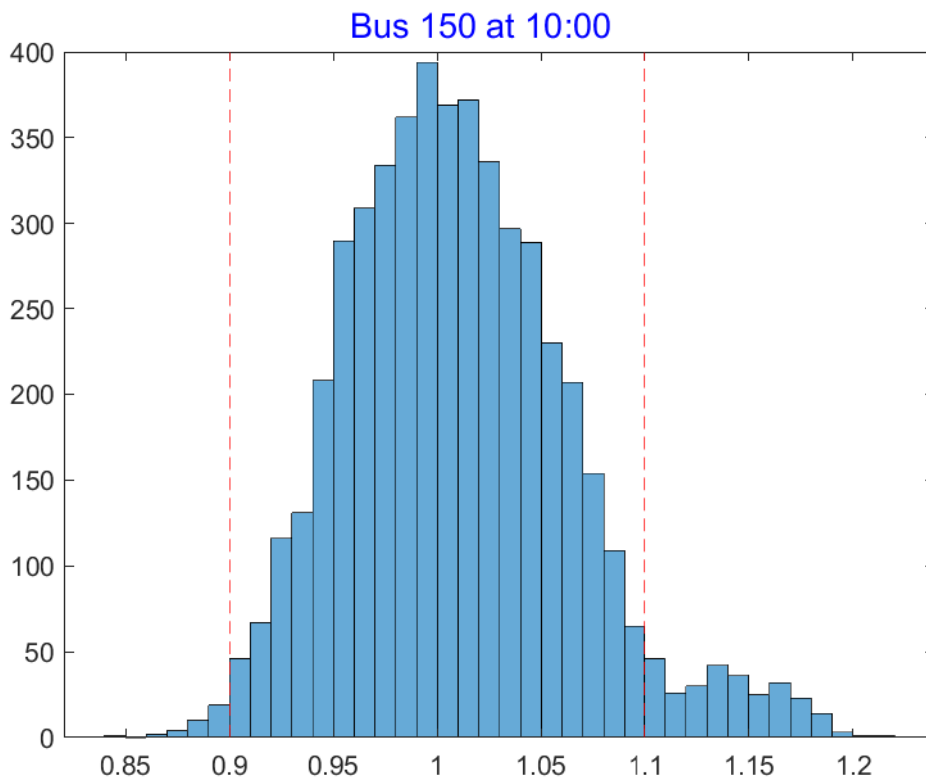
Επιπλέον, για την μελέτη παραθέτονται ακολούθως και τα παρακάτω ιστογράμματα που απεικονίζουν το ποσοστό παραβιάσεων των τάσεων ανά ώρα, κατά τη διάρκεια των πρωινών ωρών, από τις 09:00 έως τις 18:00. Η επιλογή αυτού του χρονικού πλαισίου είναι κρίσιμη, καθώς συμπίπτει με τις ώρες παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάρκου, και έτσι μας επιτρέπει να παρατηρήσουμε την επίδραση της παραγωγής στην τάση του δικτύου. Κατά τις ώρες αυτές, παρατηρήθηκαν ποσοστά παραβίασης των ορίων στις τάσεις, τα οποία όμως διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, κάτω από το 5%. Αυτό συνεπάγεται ότι, παρά την εισαγωγή του φωτοβολταϊκού πάρκου, το δίκτυο παραμένει σταθερό και λειτουργικό, χωρίς σημαντικές διαταραχές στην τάση. Οι παρατηρήσεις αυτές επιβεβαιώνονται τόσο από τον Πίνακα 6.1 που παρουσιάζει τα ποσοστά παραβίασης όσο και από τα Σχήματα 6.17 έως και 6.26 που παρέχουν μια οπτική αναπαράσταση των δεδομένων για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου. Τέλος, η ανάλυση επεκτάθηκε και στις ώρες εκτός παραγωγής, όπου διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρξαν ανησυχητικές διακυμάνσεις της τάσης, επιβεβαιώνοντας την ομαλή ένταξη του φωτοβολταϊκού πάρκου στο δίκτυο.

| Ωρα | % παραβιάσεων |
|-----|---------------|
| 9 | 0 |
| 10 | 0.06 |
| 11 | 0.10 |
| 12 | 0.18 |
| 13 | 0.38 |
| 14 | 3.16 |
| 15 | 4.76 |
| 16 | 4.06 |
| 17 | 0.32 |
| 18 | 0 |

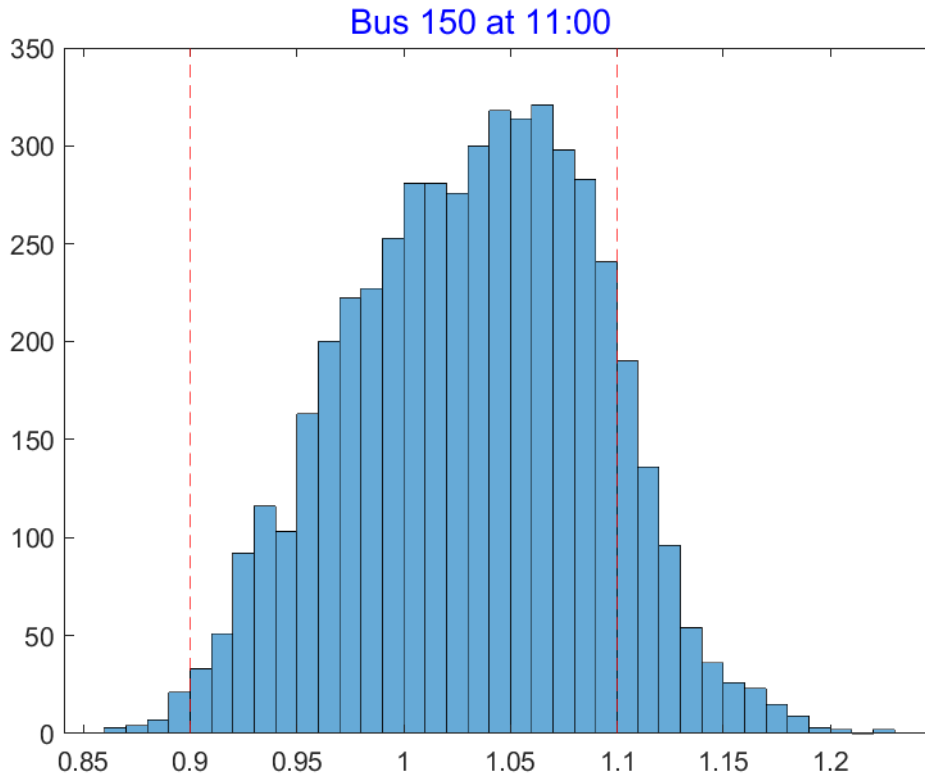
Πίνακας 6.1: Ποσοστά παραβιάσεων



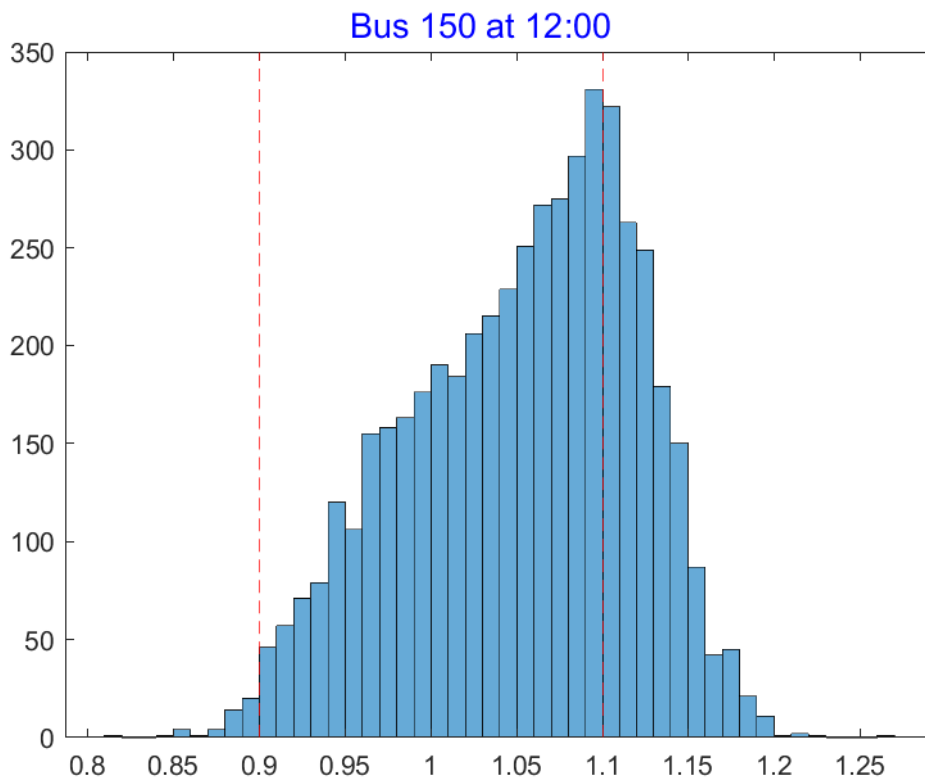
Σχήμα 6.17: Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 09:00



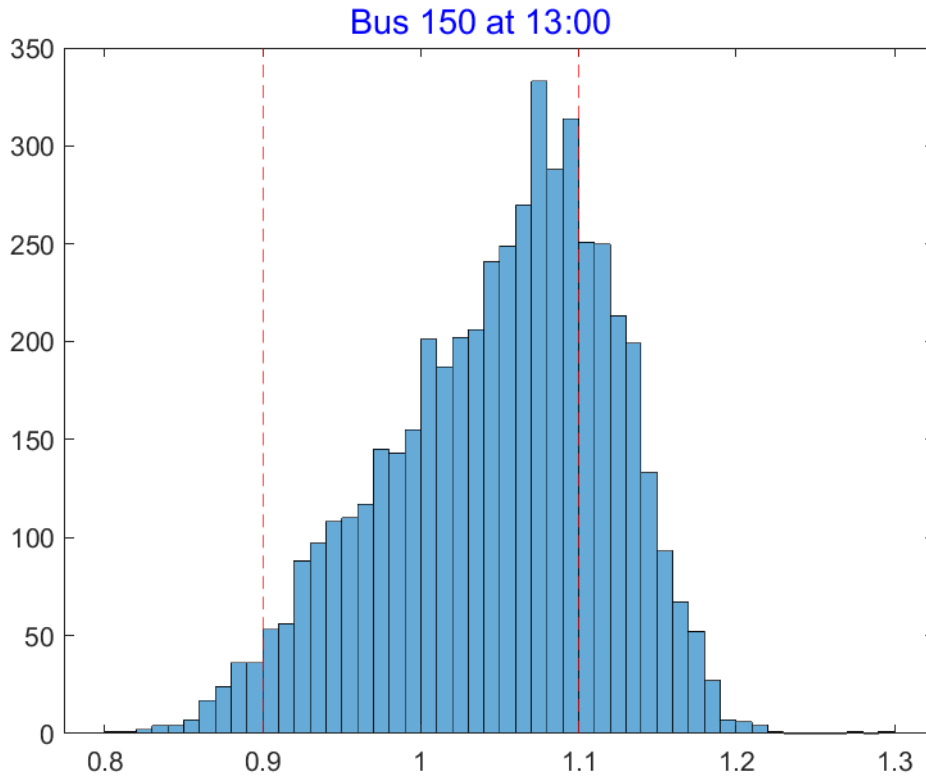
Σχήμα 6.18: Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 10:00



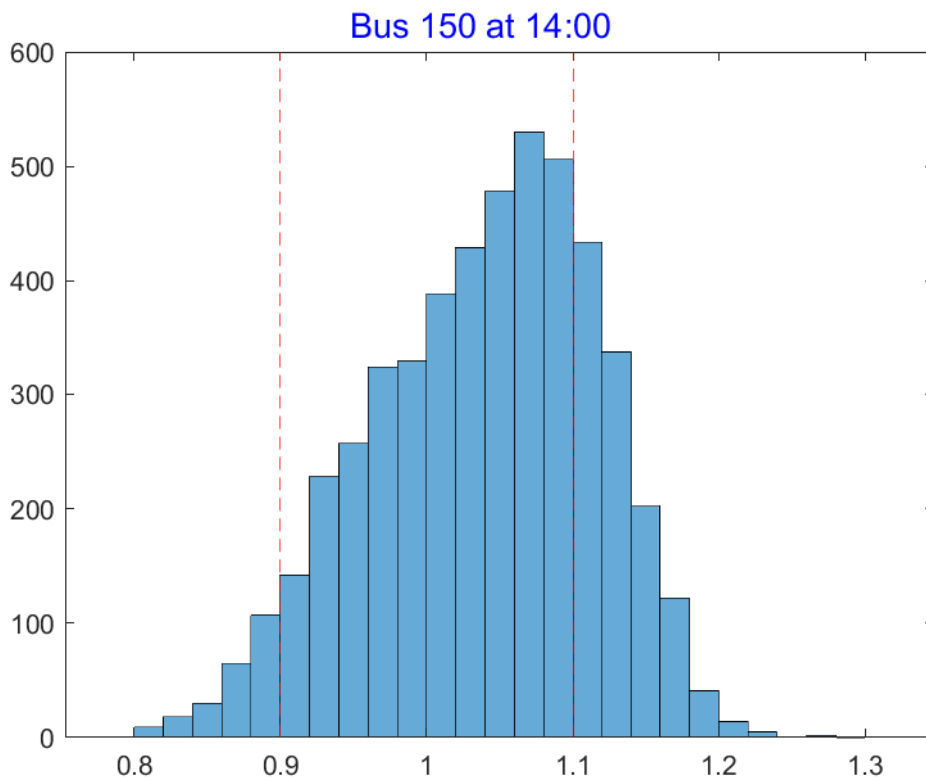
Σχήμα 6.19: Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 11:00



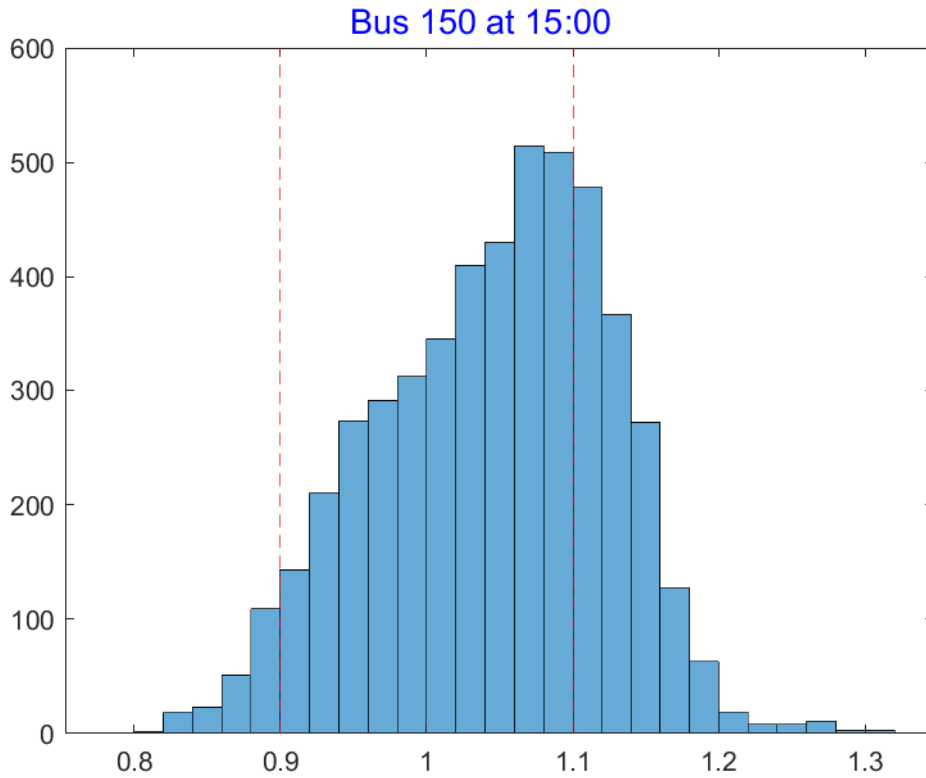
Σχήμα 6.20: Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 12:00



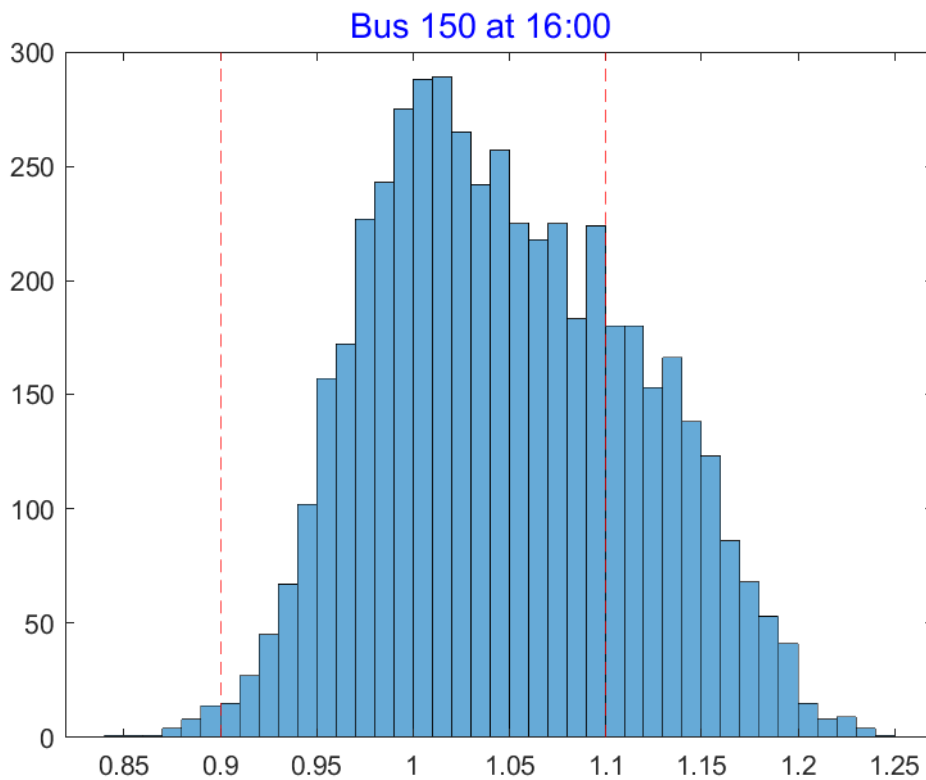
Σχήμα 6.21: Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 13:00



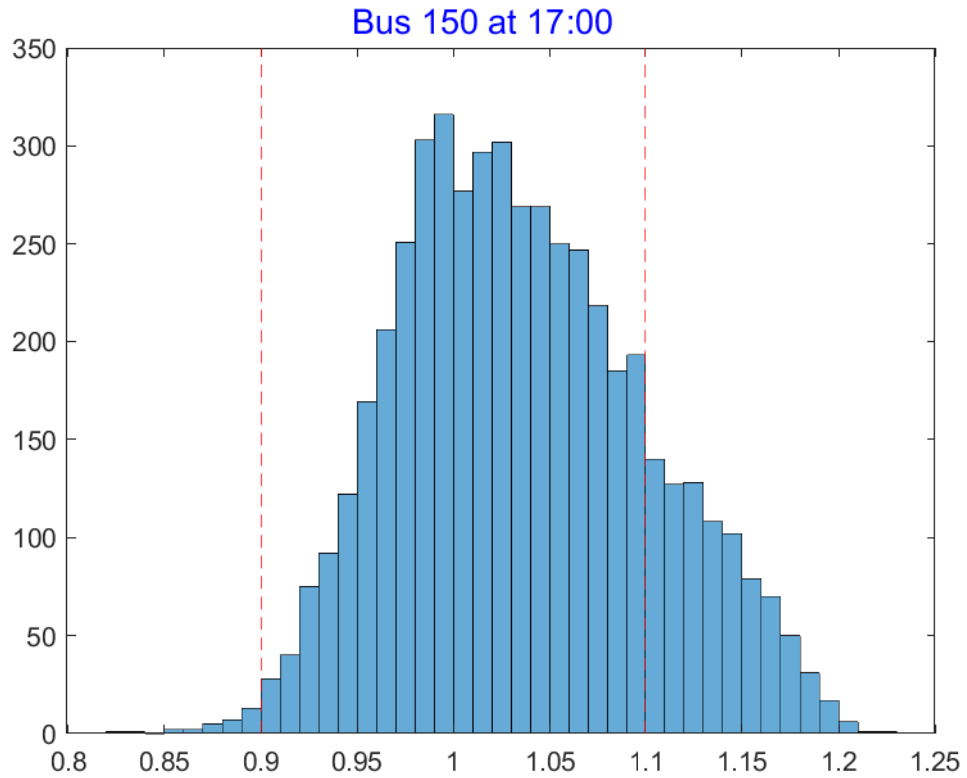
Σχήμα 6.22: Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 14:00



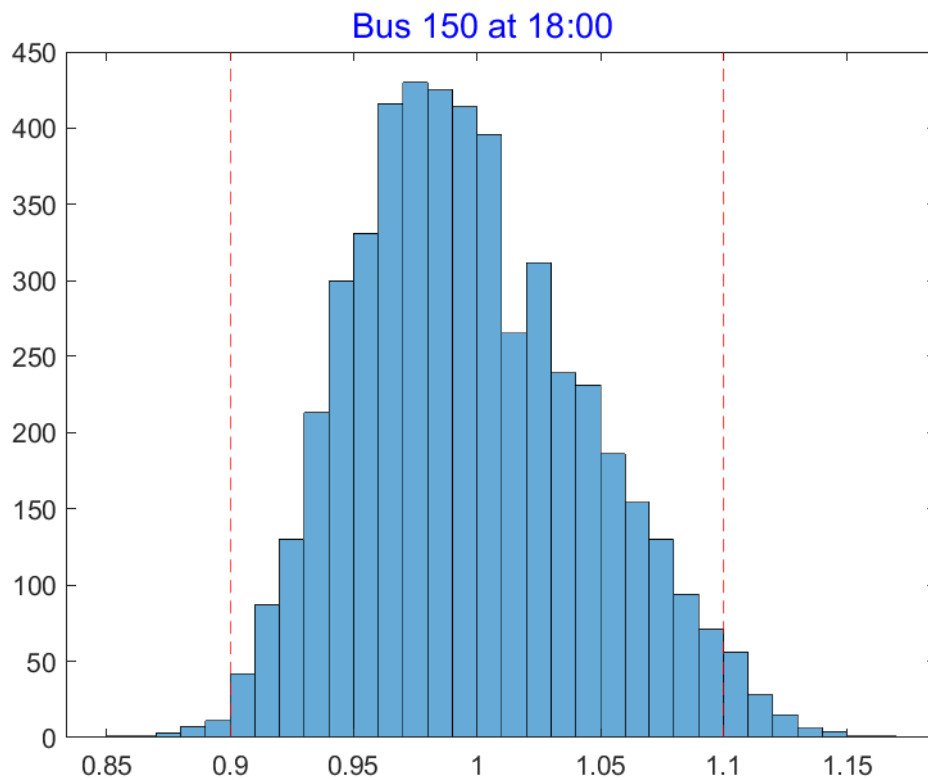
Σχήμα 6.23: Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 15:00



Σχήμα 6.24: Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 16:00



Σχήμα 6.25: Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 17:00



Σχήμα 6.26: Στιγμιότυπο από την ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό 150 στις 18:00

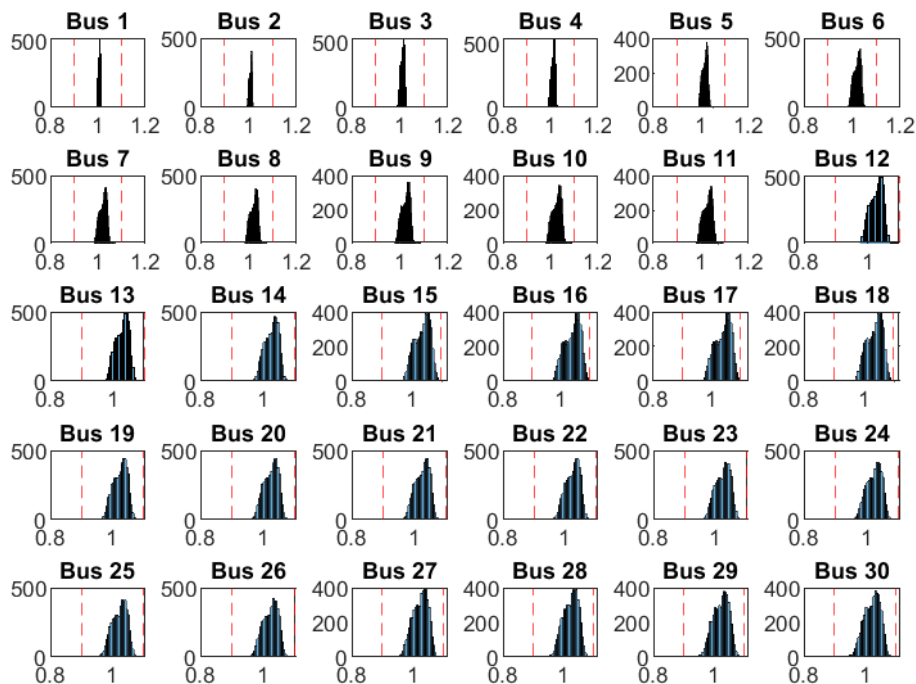
6.3 Σενάριο 3

Στο Σενάριο 3, η ανάλυση επικεντρώνεται στη δοκιμή της ταυτόχρονης εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε πολλαπλούς ζυγούς του δικτύου. Ειδικότερα, εξετάζεται η τοποθέτηση ΦΒ συστημάτων ισχύος 0.45 MW, 0.4 MW, και 0.2 MW στους ζυγούς 2, 10, και 15 αντίστοιχα. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται κατά την ώρα όπου η ζήτηση και η παραγωγή ενέργειας στο δίκτυο βρίσκονται στο αποκορύφωμά τους.

Με την παραδοσιακή μεθοδολογία του ΔΕΔΔΗΕ, παρατηρούνται 17 περιπτώσεις παραβίασης των περιορισμών, οδηγώντας στην απόρριψη της αίτησης εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αντιθέτως, μέσω της στοχαστικής μεθοδολογίας, αυτό το σενάριο είναι αποδεκτό καθώς το ποσοστό παραβιάσεων των τάσεων είναι μόλις 0.3%.

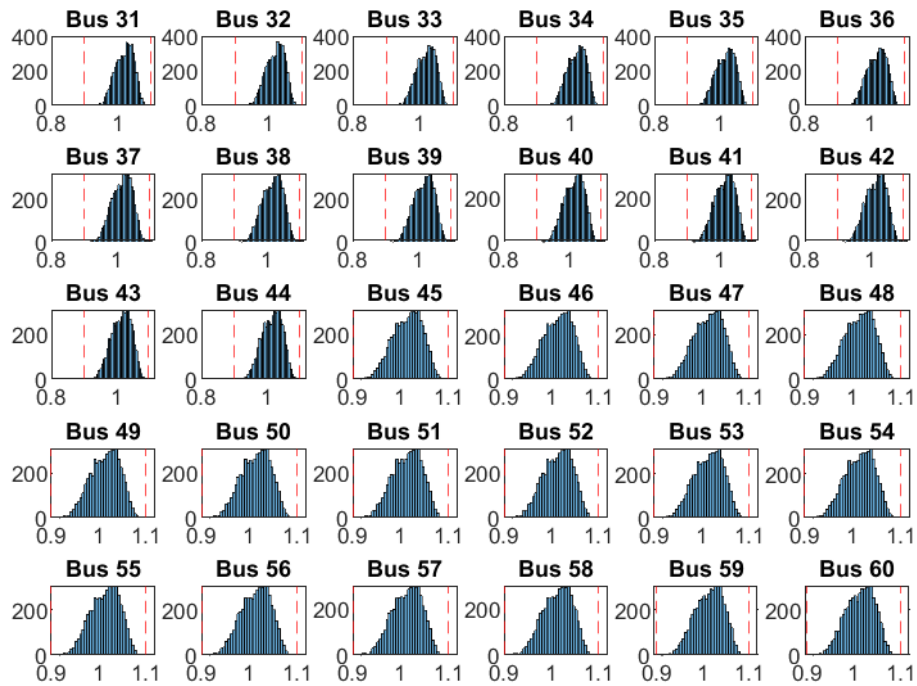
Τα ιστογράμματα των τάσεων που συνοδεύουν την ανάλυση στα Σχήματα 6.27 έως και 6.34 παρέχουν οπτική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων και επιτρέπουν την πιο λεπτομερή κατανόηση των δυνατών διακυμάνσεων της τάσης στο δίκτυο.

PVs installed in buses 2, 10, 15



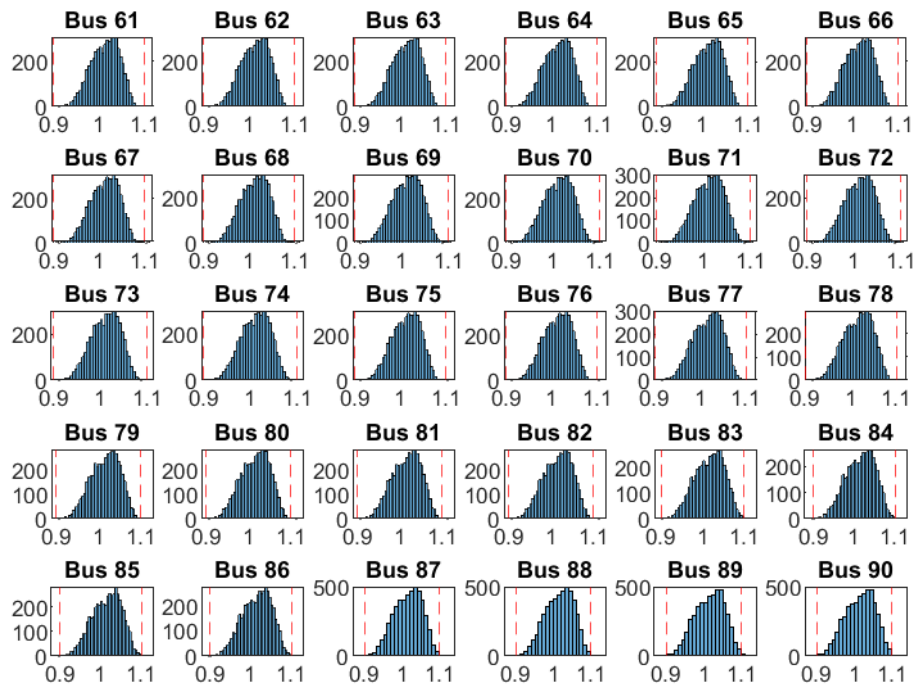
Σχήμα 6.27: Ζυγοί 1-30 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00

PVs installed in buses 2, 10, 15



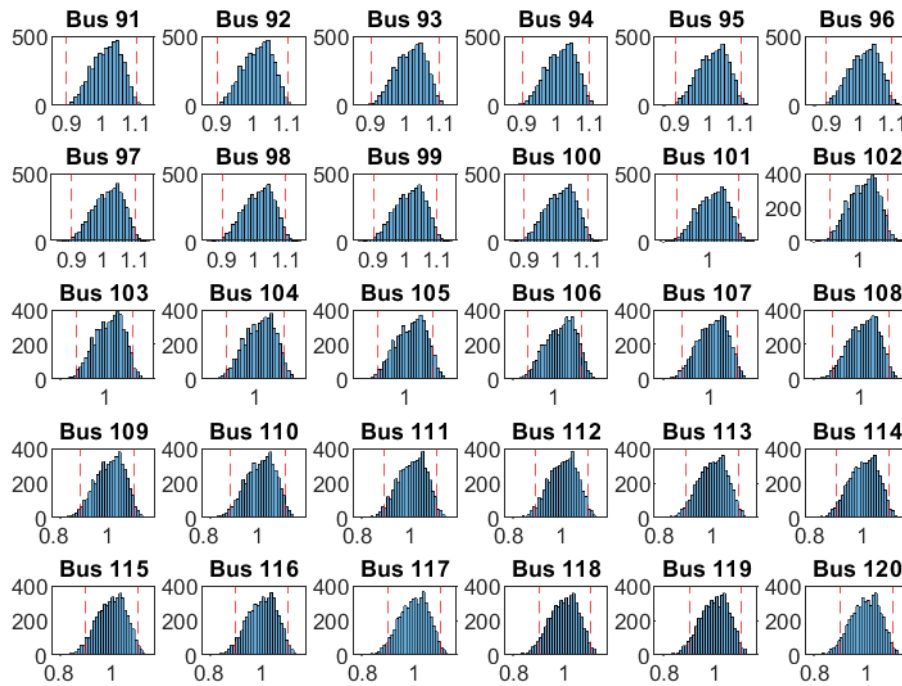
Σχήμα 6.28: Ζυγοί 31-60 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00

PVs installed in buses 2, 10, 15



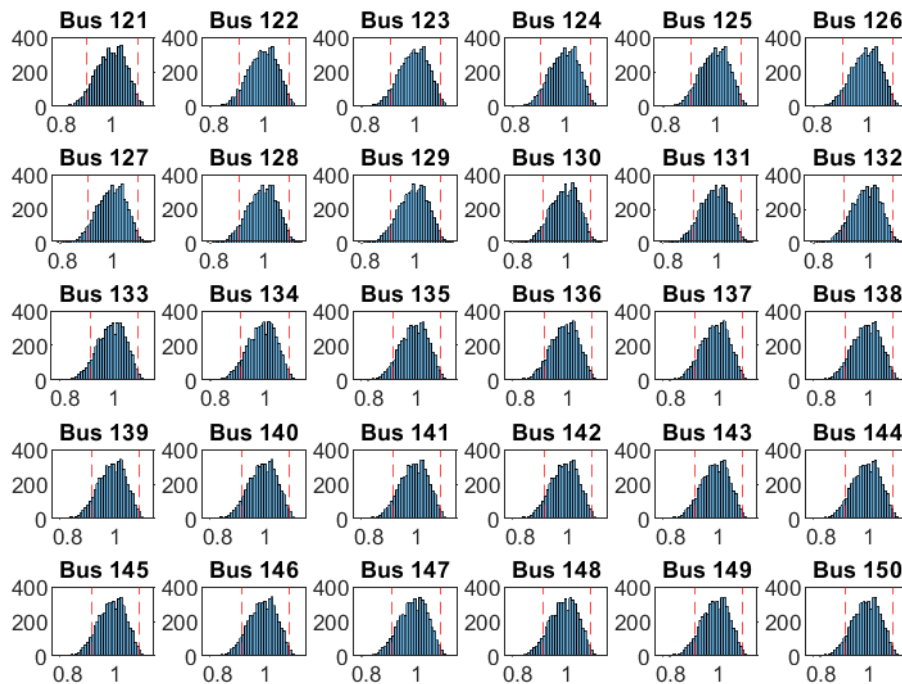
Σχήμα 6.29: Ζυγοί 61-90 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00

PVs installed in buses 2, 10, 15



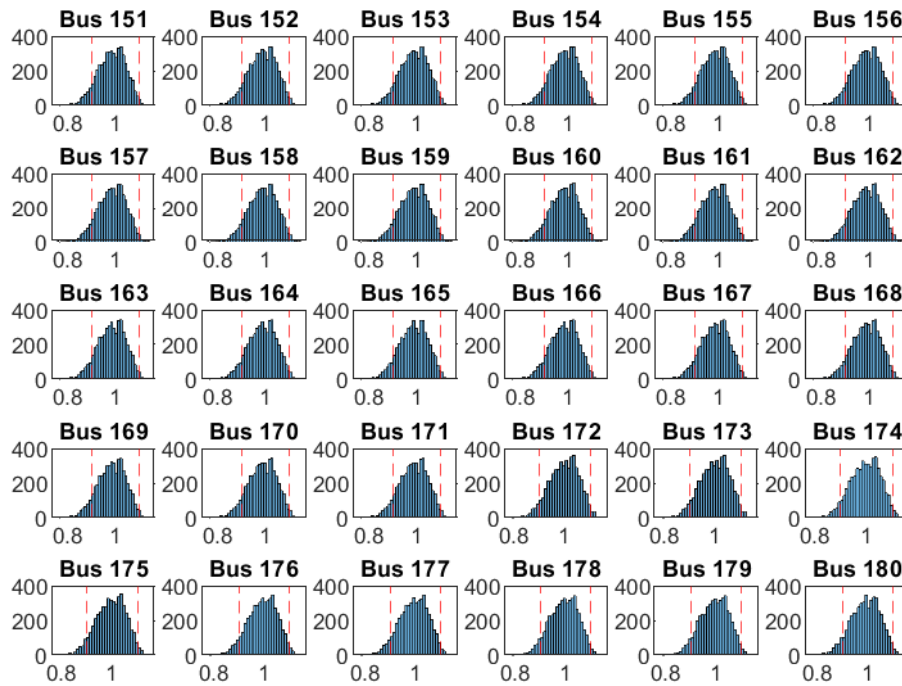
Σχήμα 6.30: Ζυγοί 91-120 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00

PVs installed in buses 2, 10, 15



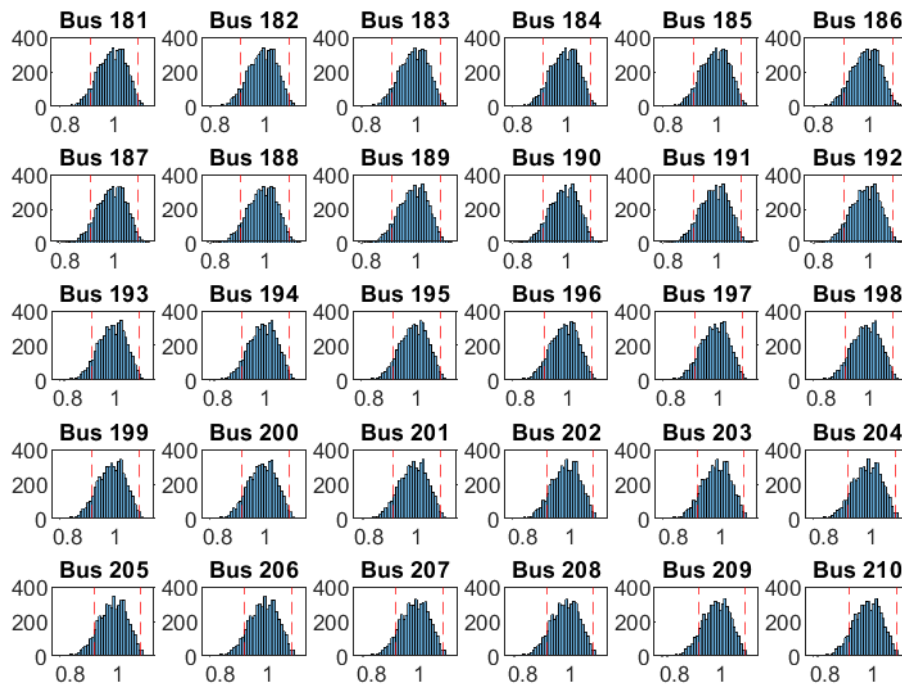
Σχήμα 6.31: Ζυγοί 121-150 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00

PVs installed in buses 2, 10, 15



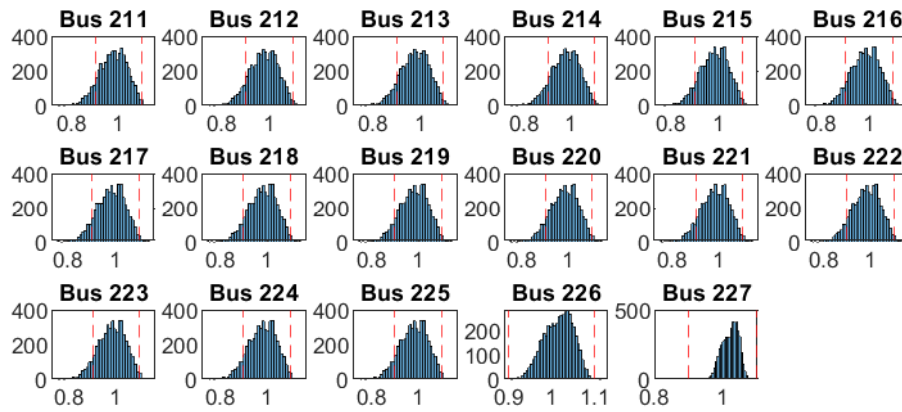
Σχήμα 6.32: Ζυγοί 151-180 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00

PVs installed in buses 2, 10, 15



Σχήμα 6.33: Ζυγοί 181-210 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00

PVs installed in buses 2, 10 , 15



Σχήμα 6.34: Ζυγοί 211-227 μετά την τοποθέτηση Φ/Β στους ζυγούς 2, 10, 15 στις 15:00

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η δυνατότητα ένταξης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) σε δίκτυο Μέσης Τάσης, εστιάζοντας στην προσθήκη φωτοβολταϊκών (ΦΒ) συστημάτων. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο Κεφάλαιο φαίνεται πως η σύνδεση νέων φωτοβολταϊκών σταθμών σε κορεσμένα δίκτυα δύναται να επιτευχθεί, εφαρμόζοντας τη νέα στοχαστική μεθοδολογία που περιγράφηκε. Συγκεκριμένα μέσω τριών διακριτών σεναρίων προσομοίωσης, εξετάστηκε η ένταξη νέων ΦΒ σε τυχαίους ζυγούς και η πιθανότητα παραβίασης ορίων των τάσεων μετά από αυτήν την προσθήκη. Σε κάθε περίπτωση γίνεται σύγκριση με την μεθοδολογία που εφαρμόζεται στον ΔΕΔΔΗΕ τη δεδομένη στιγμή.

7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

1. **Σενάριο 1:** Ένταξη φωτοβολταϊκού με ισχύ 0.4 MW στον ζυγό Νο. 10.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στις 15:00, μια ώρα όπου υπάρχει αυξημένη κατανάλωση και φωτοβολταϊκή παραγωγή.

- Μέθοδος ΔΕΔΔΗΕ: Αποδεκτό Σενάριο, δεν υπάρχει κανένας περιορισμός αναφορικά με τις τάσεις των ζυγών που να παραβιάζεται σε όλο το δίκτυο.
- Στοχαστική Μέθοδος: Αποδεκτό Σενάριο, σε κάθε περίπτωση το ΦΒ βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων.

2. Σενάριο 2: Ένταξη ΦΒ 0.9 MW στον ζυγό Νο. 150

- Μέθοδος ΔΕΔΔΗΕ: Μη Αποδεκτό Σενάριο, παραβιάζονται 128 περιορισμοί σχετικά με την μέση τιμή των τάσεων και την διακύμανση σε όλο το δίκτυο.
- Στοχαστική Μέθοδος: Αποδεκτό Σενάριο. Την πιο κρίσιμη ώρα που ορίζεται στις 15:00 κα εμφανίζεται το μέγιστο ποσοστό παραβίασης 4.76%, είναι εντός των αποδεκτών ορίων ($< 5\%$). Επιπλέον, επιβεβαιώνεται για τις υπόλοιπες ώρες ότι οι περιορισμοί είναι εντός των ορίων, όπως εμφανίζεται στον πίνακα [6.1](#).
- Η συγκεκριμένη περίπτωση επιβεβαιώνει την σπουδαιότητα της στοχαστικής ανάλυσης η οποία επιτρέπει την ένταξη φωτοβολταϊκού πάρκου 0.9 MW και σε περιπτώσεις που παραβιάζονται τα επιθυμητά όρια των τάσεων, ο Διαχειριστής Δικτύου έχει την δυνατότητα να περικόψει την παραγωγή για να διατηρηθεί η ευστάθεια του συστήματος.

3. Σενάριο 3: Ένταξη 3 ΦΒ στους ζυγούς Νο. 2, 10, 15

- Μέθοδος ΔΕΔΔΗΕ: Μη Αποδεκτό Σενάριο, παραβιάζονται 17 περιορισμοί σχετικά με την μέση τιμή των τάσεων και την διακύμανση σε όλο το δίκτυο.
- Στοχαστική Μέθοδος: Αποδεκτό Σενάριο. Την πιο κρίσιμη ώρα που ορίζεται στις 15:00 και εμφανίζεται το μέγιστο ποσοστό παραβίασης 4.1%, είναι εντός των αποδεκτών ορίων ($< 5\%$).
- Με την στοχαστική μεθοδολογία στο σενάριο αυτό μπορούν να συνδεθούν 3 νέα φωτοβολταϊκά σε διαφορετικούς ζυγούς, ενώ με την μέθοδο του ΔΕΔΔΗΕ απορρίπτονται. Η ευκολία στην μελέτη ένταξης πολλαπλών ΦΒ συστημάτων σε διάφορους ζυγούς υπογραμμίζει την αναγκαιότητα της στοχαστικής μεθοδολογίας.

7.2 Συγκρίσεις μεθοδολογιών και επιπτώσεις

- Η στοχαστική μεθοδολογία επιτρέπει μια συνολική αντίληψη της αβεβαιότητας που προκύπτει από την ένταξη των ΑΠΕ στο δίκτυο. Αντιθέτως, με την προσέγγιση του ΔΕΔΔΗΕ φαίνεται να μελετάει την συμπεριφορά του δικτύου κατά την εμφάνιση των τεσσάρων ακραίων σεναρίων, που δεν αντικατοπτρίζουν πλήρως τη δυναμική φύση της λειτουργίας του δικτύου.
- Ο υπολογισμός του ποσοστού παραβίασης των αποδεκτών ορίων της τάσης παρέχει έναν πολύτιμο δείκτη για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του δικτύου κυρίως σε αυξημένη παραγωγή, και επιτρέπει ή απορρίπτει την ένταξη νέων φωτοβολταϊκών στον δίκτυο.
- Τα σενάρια που εξετάστηκαν είναι μη αποδεκτά με την τρέχουσα μεθοδολογία αξιολόγησης. Παρόλες τις παραβιάσεις στις τάσεις - 128 και 17 αντίστοιχα - βάσει της μεθοδολογίας του ΔΕΔΔΗΕ, για την στοχαστική προσέγγιση τα σενάρια αυτά είναι αποδεκτά. Αυτό καταδεικνύει την ικανότητά της να επιτρέπει επιπλέον ένταξη ΑΠΕ στο δίκτυο.
- Με την στοχαστική μέθοδο και τον έλεγχο του ποσοστού παραβιάσεων τάσης να βρίσκεται έως και 5% προσφέρεται ένα αξιοσημείωτο πρόσθετο περιθώριο για ένταξη νέων φωτοβολταϊκών στο δίκτυο διανομής. Παρολ' αυτά, αυτό το ποσοστό μπορεί και να αλλάξει από τον Διαχειριστή και να αυξηθεί περαιτέρω. Για να συμβεί αυτό, θα χρειαστούν νέες τεχνοοικονομικές μελέτες, για να εξετασθεί προσεκτικά η βιωσιμότητα της υπερφόρτισης των δικτύων και οι συνέπειες της πιθανής αποκοπής της παραγωγής ΦΒ για μεγάλο ποσοστό του χρόνου (πχ 20%).

Βιβλιογραφία

- [1] Energy charts net installed electricity generation capacity in germany in 2023, url: [https://www.energy-charts.info/charts/installed power/chart](https://www.energy-charts.info/charts/installed%20power/chart).
- [2] Umar Hanif Ramadhani, Mahmoud Shepero, Joakim Munkhammar, Joakim Widén, and Nicholas Etherden. Review of probabilistic load flow approaches for power distribution systems with photovoltaic generation and electric vehicle charging. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 120:106003, 2020.
- [3] Khasanov Mansur. Optimal distributed generation and battery energy storage units integration in distribution systems considering power generation uncertainty. 2021.
- [4] Junainah Sardi, Mithulananthan Nadarajah, Duong Hung, and Krischonme Bhumkittipich. Load levelling and loss reduction by ces in primary distribution system with pv units. 11 2015.
- [5] Meeting the challenges (and exploring the solutions) of grid saturation, url: <https://ratedpower.com/blog/grid-saturation/>.
- [6] Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας ΑΕ. *Κώδικας Διαχείρισης του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΔΔΗΕ)*. Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, 2021.
- [7] Carlo Masetti. Revision of european standard en 50160 on power quality: Reasons and solutions. In *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010*, pages 1–7, 2010.

-
- [8] Jan von Appen, Martin Braun, Thomas Stetz, Konrad Diwold, and Dominik Geibel. Time in the sun: The challenge of high pv penetration in the german electric grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 11(2):55–64, 2013.
- [9] Miao Fan, Zhengshuo Li, Tao Ding, Lengcheng Huang, Feng Dong, Zhouyang Ren, and Chengxi Liu. Uncertainty evaluation algorithm in power system dynamic analysis with correlated renewable energy sources. In *2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pages 1–1, 2022.
- [10] Martijn de Jong, George Papaefthymiou, Domenico Lahaye, Kees Vuik, and Lou van der Sluis. Impact of correlated infeeds on risk-based power system security assessment. In *2014 Power Systems Computation Conference*, pages 1–7, 2014.
- [11] Chenxu Wang, Chengxi Liu, Fei Tang, Dichen Liu, and Yixi Zhou. A scenario-based analytical method for probabilistic load flow analysis. *Electric Power Systems Research*, 181:106193, 2020.
- [12] Mengshuo Jia, Qianni Cao, Chen Shen, and Gabriela Hug. Control-aware probabilistic load flow for transmission systems: An analytical method, 2022.
- [13] Filip Mišurović and Saša Mujović. Numerical probabilistic load flow analysis in modern power systems with intermittent energy sources. *Energies*, 15(6), 2022.
- [14] Raheel Muzzammel and Haroon Ali. Monte carlo simulation of load flow analysis of power system. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 8:534–537, 03 2017.
- [15] David Vose. Fitting distributions to data stat 241. pages 1–16, 02 2020.
- [16] Randall Pruim. Distributions and fitting. 2017.
- [17] He Li, Huijun Li, Weihua Lu, Zhenhao Wang, and Jing Bian. Optimal power flow calculation considering large-scale photovoltaic generation correlation. *Frontiers in Energy Research*, 8, 2020.
- [18] Joakim Widén, Mahmoud Shepero, and Joakim Munkhammar. Probabilistic load flow for power grids with high pv penetrations using copula-based modeling of spatially correlated solar irradiance. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(6):1740–1745, 2017.

- [19] Peter X.-K. Song, Mingyao Li, and Ying Yuan. Joint regression analysis of correlated data using gaussian copulas. *Biometrics*, 65(1):60–68, 2009.
- [20] Hanyang Lin, Xinwei Shen, Ye Guo, Tao Ding, and Hongbin Sun. A linear distflow model considering line shunts. TechRxiv. Preprint, 2023. Available at ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/368769384_A_Linear_Distflow_Model_Considering_Line_Shunts.
- [21] M. Baran and F.F. Wu. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(1):735–743, 1989.
- [22] M.E. Baran and F.F. Wu. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2):1401–1407, 1989.
- [23] Giambattista Gruosso, Paolo Maffezzoni, Zheng Zhang, and Luca Daniel. Probabilistic load flow methodology for distribution networks including loads uncertainty. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 106:392–400, 2019.
- [24] Tao Cui and Franz Franchetti. A quasi-monte carlo approach for radial distribution system probabilistic load flow. In *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, pages 1–6, 2013.
- [25] Roma Raina. Load flow solution for unbalanced radial power distribution using monte-carlo simulation. 2019.
- [26] Guido Carpinelli, Pierluigi Caramia, and Pietro Varilone. Multi-linear monte carlo simulation method for probabilistic load flow of distribution systems with wind and photovoltaic generation systems. *Renewable Energy*, 76:283–295, 2015.
- [27] S. Conti and S. Raiti. Probabilistic load flow using monte carlo techniques for distribution networks with photovoltaic generators. *Solar Energy*, 81(12):1473–1481, 2007.
- [28] Caio César de Moraes, Thales Sousa, and Douglas Alves Cassiano. Probabilistic load flow by monte carlo simulation to determine the amount of use of the transmission system. 74:212–231, Nov. 2020.

- [29] Jean-François Toubeau, Vasiliki Klonari, Jacques Lobry, Zacharie De Grève, and François Vallée. Planning tools for the integration of renewable energy sources into low- and medium-voltage distribution grids. In Wenping Cao and Yihua Hu, editors, *Renewable Energy*, chapter 10. IntechOpen, Rijeka, 2016.
- [30] M.Domagk. Influence of aggregation intervals on power quality assessment according to en 50160. *IET Conference Proceedings*, pages 1174–1174(1), January 2013.