



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

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΟΠΤΕΙΑ  
ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΤ ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ  
ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΑΥΡΟΓΕΝΟΥ ΚΥΡΙΑΚΗ**

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015





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

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΟΠΤΕΙΑ  
ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΤ ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ  
ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΑΥΡΟΓΕΝΟΥ ΚΥΡΙΑΚΗ**

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....

.....

Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Παπαθανασίου Σταύρος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Γεωργιάκης Παύλος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2015



.....  
Μαυρογένου Κυριακή

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

Copyright © Μαυρογένου Κυριακή, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή πιθανοτικών εργαλείων για την πρόβλεψη και την εποπτεία δικτύων διανομής και συγκεκριμένα του δικτύου στη Σπερχειάδα Φθιώτιδας.

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015 υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ν. Χατζηαργυρίου, τον οποίο ευχαριστώ ιδιαίτερος για τη βοήθεια που μου έδωσε, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και τις γνώσεις που μου μετέδωσε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τη Δέσποινα Κουκουλά, τον Άρη Δημέα και τον Παναγιώτη Μουτή για τη βοήθεια, την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχαν κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την εργασία αυτή στην οικογένειά μου, για τη στήριξη που μου έχει προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια.

Μαυρογένου Κυριακή,  
Ιούλιος 2015





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Στην εργασία αυτή προτείνεται ένας συνδυασμός πιθανοτικών εργαλείων για την πρόβλεψη και την εποπτεία γραμμών μέσης τάσης, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται το δίκτυο διανομής στη Σπερχειάδα Φθιώτιδας. Το δίκτυο αυτό είχε σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπόψη τρία βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου: την τροφοδοσία μεγάλων καταναλωτών μέσης τάσης, τη σύνδεση υδροηλεκτρικών σταθμών και την πρόβλεψη για σύνδεση με γραμμές των ήδη λειτουργικών υποσταθμών της Λαμίας και του Καρπενησίου. Όμως, τα χαρακτηριστικά αυτά άλλαξαν καθώς ένα μεγάλο βιομηχανικό φορτίο αποσυνδέθηκε και ταυτόχρονα, η διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής, κυρίως φωτοβολταϊκών, αυξήθηκε. Τα γεγονότα αυτά επέφεραν αλλαγές στο λειτουργικό σχεδιασμό, προκαλώντας συχνά αναστροφή της ροής, φαινόμενα υπερτάσεων σε ευαίσθητους κόμβους του δικτύου και υπερφορτίσεων σε γραμμές, λόγω της μεγάλης παραγωγής και της μικρής ζήτησης. Πέραν της επίλυσης των λειτουργικών αυτών προβλημάτων, μέσα από τη χρήση του εργαλείου δόθηκε στους διαχειριστές του δικτύου η δυνατότητα πρόβλεψης και πρόληψης δυσμενών καταστάσεων για το δίκτυο και υιοθέτησης νέων ορίων ασφαλείας, που επιτρέπουν τη διείσδυση νέων μονάδων, χωρίς να γίνουν νέες επενδύσεις. Οι λειτουργίες αυτές επιτεύχθηκαν με την αξιοποίηση μεθόδων για την πρόβλεψη της παραγωγής των φωτοβολταϊκών και της ζήτησης του φορτίου, με τη χρήση νευρωνικών δικτύων ML-RBFNN, παράγουν προβλέψεις για την επόμενη μέρα. Επιπλέον, μέσα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την απλή και την πιθανοτική ροή φορτίου, εκτιμήθηκε η πιθανότητα παραβίασης των λειτουργικών ορίων, γεγονός που επιτρέπει τη σύνδεση περισσότερων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Τέλος, η χρήση των δέντρων απόφασης, αξιοποιώντας τα δεδομένα μετρήσεων πραγματικού χρόνου αλλά και τα δεδομένα των προβλέψεων, οδήγησε στην έγκαιρη ανίχνευση αντίστροφων ροών, συμβάλλοντας στον καλύτερο προγραμματισμό λειτουργίας του δικτύου.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

---

Πρόβλεψη παραγωγής φωτοβολταϊκών, πιθανοτική ροή φορτίου, έλεγχος παραγωγής ΑΠΕ, διεσπαρμένη παραγωγή, SCADA/DMS, AMR



## **ABSTRACT**

---

In this thesis, a combination of probabilistic tools for the forecast and monitoring of medium voltage lines, which are characterized by increased penetration of distributed generation, is proposed. More specifically, the distribution network of Sperchiada in Fthiotida is tested. This network was designed taking into account three key characteristics: large medium voltage consumers, hydroelectric plants connected to the network and provision for connection to lines at substations of Lamia and Karpenisi. However, these features have changed as a large industrial load was disconnected while the penetration of distributed production, mainly photovoltaic, was increased. The new situation have led to changes in the planning of the network operation, often causing reverse power flows, over-voltages to sensitive nodes and overloads on lines, due to increased production and low load demand. Beyond these operational problems, the use of probabilistic tools give the grid operators' the ability to forecast and prevent abnormal situations in the grid and adopt new operational limits, increasing the hosting capacity. These new functions are achieved with PV and load forecasting by using ML-RBFNN neural networks, produce forecasts for the next day. Additionally, by comparing the results obtained from the simple and probabilistic load flow, the probability of violating the operating limits is estimated. This increases the penetration of distributed generation. Finally, the methodology of decision trees, by using historical and forecasted data, led to early detection of reverse power flows, contributing to the better functionality and planning of the network operation.

## **KEY WORDS**

---

PV forecasting, probabilistic control, RES production control, distributed generation, SCADA/DMS, AMR



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ - ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ .....	15
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	17
1. ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	19
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	19
1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	19
1.3 ΔΙΚΤΥΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ .....	20
1.4 ΥΠΟΣΤΑΘΟΜΟΙ ΜΤ.....	21
1.5 ΓΡΑΜΜΕΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	23
1.6 ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΑ ΚΕΝΤΡΑ ΕΠΟΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ (SCADA) ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ (DMS) .....	24
1.7 ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	34
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....	39
2.1. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	40
2.2. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΖΗΤΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	44
2.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	45
2.4. ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	54
2.5. ΔΕΝΤΡΑ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ .....	56
3. ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ .....	59
3.1.ΓΕΝΙΚΑ.....	59
3.2.ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ .....	62
3.3.ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΗΘΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ .....	63

<b>4.</b>	<b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥ ΤΗΣ ΣΠΕΡΧΕΙΑΔΑΣ .....</b>	<b>65</b>
<b>4.1.</b>	<b>ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ .....</b>	<b>65</b>
<b>4.2.</b>	<b>ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ (ΜΕΤΡΗΤΕΣ).....</b>	<b>67</b>
<b>4.3.</b>	<b>ΠΡΟΦΙΛ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΖΗΤΗΣΗΣ .....</b>	<b>67</b>
<b>5.</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΕΠΟΠΤΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ .....</b>	<b>71</b>
<b>5.1.</b>	<b>ΣΤΟΧΟΣ – ΣΚΟΠΟΣ (USE CASES).....</b>	<b>71</b>
<b>5.2.</b>	<b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ .....</b>	<b>74</b>
<b>5.3.</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>78</b>
<b>6.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>95</b>
<b>7.</b>	<b>ΠΗΓΕΣ .....</b>	<b>97</b>

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ - ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

---

AMI	Advanced Metering Infrastructure
AMR	Automatic Meter Reading
BAU	Business as Usual
BMS	Building Management System
CIS	Customer Information System
COSEM	Companion Specification for Energy Metering
DER	Distributed Energy Resources
DG	Distributed Generation
DLMS	Device Language Message Specification
DMS	Distribution Management System
GIS	Geographic Information System
GPRS	General Packet Radio Service
HC	Hosting Capacity
KB	Knowledge Base
KPIs	Key Performance Indicators
LF	Load Flow
MAE	Mean Absolute Error
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
ML-RBFNN	Multi Label Radial Base Function Neural Network
OLS	Orthogonal Least Squares
OLTC	On-Load Tap Changer
OMS	Outage Management System
OPs	Operating Points
PDF	Probability Density Function
PLF	Probabilistic Load Flow
RBF	Radial Base Function
RLS	Recursive Least Squares
RTU	Remote Telemetry Unit
SCADA	Supervision, Control, And Data Acquisition
VVC	Voltage and VAr Control
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΑΠΚ	Αριθμητικές Προβλέψεις Καιρού
ΔΕΔΔΗΕ	Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΕΚΕΕ	Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας
Η/Υ	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
Κ/Δ	Κέντρα Διανομής
ΚΥΤ	Κέντρα Υψηλής Τάσης
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
ΜΤ	Μέση Τάση
ΠΚΕΕ	Περιφερειακό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Υ/Σ	Υποσταθμός
ΥΗΣ	Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί
ΥΤ	Υψηλή Τάση
Φ/Β	Φωτοβολταϊκά
ΧΤ	Χαμηλή Τάση



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή για τα δίκτυα διανομής και τα βασικά χαρακτηριστικά των υποσταθμών και των γραμμών διανομής. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα συστήματα ελέγχου SCADA/DMS καθώς και τα μετρητικά συστήματα που συναντώνται στα δίκτυα διανομής.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη των εφαρμογών πρόβλεψης και ελέγχου, δηλαδή γίνεται ανάλυση της πρόβλεψης της παραγωγής και της ζήτησης, της απλής και της πιθανοτικής ροής φορτίου και των δέντρων απόφασης.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζεται η σημασία των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στη διαμόρφωση των σημερινών δικτύων καθώς και η επίδραση που έχει η διείδυσή τους στη λειτουργία των δικτύων μέχρι πρότινος.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του δικτύου της Σπερχειάδας και τα μετρητικά στοιχεία που είναι συνδεδεμένα καθώς και το προφίλ της παραγωγής και της ζήτησης στην περιοχή.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή των πιθανοτικών εργαλείων. Καταρχήν, αναλύονται οι στόχοι που εξυπηρετούν και ο τρόπος με τον οποίο συμβάλλουν στην καλύτερη πρόβλεψη και εποπτεία του δικτύου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή τους ενώ τέλος, αξιολογούνται και συγκρίνονται με τη συμβατική κατάσταση λειτουργίας μέσω δεικτών αξιολόγησης.

Στο τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν και κάποιες προτάσεις για μελλοντικές ενέργειες.



# 1. ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

---

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο Δίκτυα Διανομής εννοούμε τα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης τα οποία ξεκινούν από τις πύλες αναχωρήσεων ΜΤ στους Υ/Σ υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ και φτάνουν μέχρι τον μετρητή της παρεχόμενης ενέργειας στον καταναλωτή, είτε αυτός είναι καταναλωτής ΜΤ είτε είναι καταναλωτής ΧΤ.

Τα Δίκτυα Διανομής περιλαμβάνουν:

- Γραμμές διανομής (εναέριες, υπόγειες και υποβρύχια καλώδια ΜΤ) , που μεταφέρουν την ενέργεια από τη ΜΤ στη ΧΤ και τη διανέμουν στους καταναλωτές
- Υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης, που αλλάζουν το επίπεδο της τάσης της μεταφερόμενης ενέργειας
- Εξοπλισμό που αφορά στη λειτουργία, τον έλεγχο και τη ζεύξη του δικτύου (διακόπτες αυτόματης επαναφοράς, διακόπτες απομόνωσης, ασφαλειοαποζεύκτες, πυκνωτές ΜΤ, ρυθμιστές τάσης κλπ.).

## 1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ

Τα δίκτυα ΜΤ, ξεκινώντας από υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης των δικτύων μεταφοράς ή υπομεταφοράς ΥΤ σε ΜΤ, τροφοδοτούν τις γραμμές ΜΤ που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια τόσο σε υποσταθμούς καταναλωτών μεγάλων φορτίων (καταναλωτές ΜΤ) όσο και σε Υ/Σ υποβιβασμού της μέσης σε χαμηλή τάση.

Τα δίκτυα ΜΤ είναι είτε εναέρια είτε υπόγεια. Τα εναέρια είναι λιγότερο δαπανηρά από τα υπόγεια και είναι ευκολότερη η εκμετάλλευσή τους όμως, επειδή καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο, προτιμώνται στις αγροτικές περιοχές που έχουν μικρή πυκνότητα φορτίου και δεν υπάρχει δυσκολία στην τήρηση ελάχιστων αποστάσεων εγκατάστασης των αγωγών. Έχουν συνήθως ακτινική ή βροχοειδή μορφή. Ακτινικά δίκτυα συναντώνται κυρίως σε νησιά και δυσπρόσιτα σημεία και αποτελούνται από μια κεντρική γραμμή, τον «κορμό», με τις διακλαδώσεις του. Χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών είναι ότι όλες οι γραμμές τροφοδοτούνται από το ένα μόνο άκρο τους. Τα βροχοειδή δίκτυα είναι όμοια με τα ακτινικά με τη διαφορά ότι τροφοδοτούνται από δύο σημεία του ίδιου ή διαφορετικού μετασχηματιστή. Επιπλέον, στο αστικό δίκτυο της Αττικής υπάρχει η αραχνοειδής μορφή δικτύου, η οποία είναι στην ουσία βροχοειδής με τη

διαφορά ότι οι συνεργαζόμενες γραμμές είναι τρεις και υπάρχουν πλευρικές συνδέσεις οπότε σε περίπτωση βλάβης μίας εκ των γραμμών, οι άλλες δύο αναλαμβάνουν την κάλυψη των φορτίων.

Αντίθετα, τα υπόγεια δίκτυα προτιμώνται στα αστικά κέντρα τόσο για αισθητικούς όσο και για λόγους δυσκολίας διαθέσεως του απαραίτητου για την εγκατάσταση χώρου. Η συντήρηση και η αποκατάσταση μιας βλάβης είναι δυσκολότερη και για το λόγο αυτό η μορφή των υπόγειων δικτύων είναι κυρίως βροχοειδής ή ατρακτοειδής. Στο δίκτυο ατρακτοειδούς δομής, ομάδες γραμμών που αναχωρούν από τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ απολήγουν σε έναν Υ/Σ ζεύξης. Ο αριθμός των γραμμών δεν πρέπει να υπερβαίνει τις έξι, αλλιώς μειώνεται η αξιοπιστία του δικτύου. Σε πολλές περιπτώσεις περιλαμβάνονται σε κοινή αναχώρηση από τον υποσταθμό και εναέρια και υπόγεια τμήματα.

Η στάθμη τάσης λειτουργίας των δικτύων ΜΤ είναι συνήθως από 5 kV έως 40 kV με συνηθέστερες στάθμες τάσης από 12 kV έως 24 kV. Στην Ελλάδα το σύνολο των δικτύων ΜΤ της ηπειρωτικής χώρας λειτουργεί στα 20 kV, με μόνη εξαίρεση την Αττική όπου μαζί με το σύστημα των 20 kV εξακολουθεί να συνυπάρχει και το παλαιό σύστημα 22/6,6 kV, του οποίου προβλέπεται η σταδιακή κατάργηση. Στην περίπτωση των νησιών, αναλόγως αν είναι διασυνδεδεμένα ή μη, οι τιμές της ΜΤ είναι 15, 20 ή 6,6 kV .

### **1.3 ΔΙΚΤΥΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ**

Τα δίκτυα χαμηλής τάσης μεταφέρουν ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές χαμηλής τάσης Η στάθμη των δικτύων ΧΤ είναι 230 V / 400 V. Η λειτουργία (χειρισμοί) των δικτύων αυτών γίνεται συνήθως χειροκίνητα.

Τα δίκτυα χαμηλής τάσης μπορεί να είναι δικτυωτά (ή κλειστά), υπόγεια (ανοιχτά ή ακτινικά) ή εναέρια. Το δικτυωτό πλέγμα αποτελείται από υπόγεια καλώδια που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους ώστε να αποτελούν ένα κλειστό δικτυωτό πλέγμα (τετράγωνο). Κάθε τετράγωνο μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε ένα οικοδομικό τετράγωνο. Οι Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ περιλαμβάνουν στην πλευρά ΧΤ των Μ/Σ τους απαραίτητα ένα διακόπτη ισχύος με κατάλληλη διάταξη προστασιών ώστε να ανοίγει σε περίπτωση ροής ρεύματος αντίστροφης από την υπό κανονικές συνθήκες ροή, δηλαδή από την πλευρά του δικτύου ΧΤ προς την πλευρά ΜΤ του Μ/Σ . Η μορφή αυτή προσφέρει μεγάλο βαθμό εξυπηρέτησης στους καταναλωτές αφού για σφάλμα σε γραμμή ΜΤ θα ανοίξει ο Διακόπτης Ισχύος στην αναχώρηση του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ αλλά και των Διακοπτών Ισχύος ΧΤ στους Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ. Έτσι, η απώλεια μιας γραμμής ΜΤ δε θα προκαλέσει διακοπή τροφοδότησης στους καταναλωτές του δικτύου ΧΤ , εφόσον οι υπόλοιπες γραμμές ΜΤ επαρκούν για την τροφοδότησή του. Για σφάλμα στη ΧΤ, προκαλείται τήξη των ασφαλειών που βρίσκονται εκατέρωθεν του σφάλματος και απομονώνεται έτσι ένα μόνο οικοδομικό τετράγωνο και όχι ολόκληρη η περιοχή, εφόσον βέβαια υπάρχουν περισσότερα του ενός καλώδια. Λόγω των παραπάνω πλεονεκτημάτων δικτυωτά δίκτυα ΧΤ συναντάμε στα κέντρα μεγαλουπόλεων της Ευρώπης και των ΗΠΑ.

Στις αστικές περιοχές με μεγάλη πυκνότητα φορτίου, τα δίκτυα χαμηλής τάσης είναι συνήθως υπόγεια με δομή ανοιχτού βρόχου. Στη βροχοειδή δομή, η κεντρική γραμμή ξεκινά από τους ζυγούς XT ενός άλλου Μ/Σ ενώ στο ηλεκτρικό μέσο της γραμμής υπάρχει τομή.

Στις περιοχές με μικρότερη πυκνότητα φορτίου, όπως στις αγροτικές περιοχές, η δομή των δικτύων XT είναι συνήθως εναέρια ακτινική. Η ακτινική δομή αποτελείται από μία κεντρική γραμμή που αναχωρεί από τους ζυγούς XT των Μ/Σ και από την κεντρική αυτή γραμμή διακλαδίζονται άλλες γραμμές της ίδιας ή μικρότερης διατομής.

#### **1.4 ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ ΜΤ**

Το δίκτυο διανομής περιλαμβάνει τόσο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ όσο και Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ.

Οι Υποσταθμοί Διανομής ή υποσταθμοί Μ.Τ./Χ.Τ. περιλαμβάνουν μετασχηματιστές 20kV/0.4kV ή 20-15/0.4kV με μεγέθη ονομαστικής ισχύος: 50, 100, 160, 250, 400, 630, 1000 KVA. Η παρεχόμενη ισχύς είναι μικρή και κατασκευάζονται μέσα σε πόλεις σε σημεία που εξυπηρετούν καλύτερα τους καταναλωτές. Η κατασκευή τους μπορεί να είναι επίγεια, υπόγεια ή εναέρια. Οι επίγειοι υποσταθμοί κατασκευάζονται για την εξυπηρέτηση μεγάλων σχετικά ισχύων και είναι είτε ανοιχτοί είτε στεγασμένοι (κλειστοί). Εξυπηρετούν εναέριες αλλά και υπόγειες γραμμές. Οι στεγασμένοι επίγειοι υποσταθμοί τοποθετούνται σε ειδικά οικήματα ή σε κατάλληλα διαρρυθμισμένους χώρους οικοδομών. Οι χώροι που χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση των υποσταθμών χωρίζονται συνήθως με μεταλλικά πλέγματα σε κυψέλες μέσης και χαμηλής τάσης που σε αριθμό είναι διπλάσιες του αριθμού των μετασχηματιστών του υποσταθμού. Οι εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν, εκτός των Μ/Σ, όργανα μέτρησης, αλεξικέρανα, αυτόματους διακόπτες και ασφάλειες.

Οι υπόγειοι υποσταθμοί κατασκευάζονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, συνήθως στα κέντρα των πόλεων, κάτω από πλατείες ή πεζοδρόμια. Η σωστή ψύξη και η καλή στεγανότητα είναι απαραίτητες προϋποθέσεις για τη λειτουργία του Υ/Σ και για το λόγο αυτό, τα όργανα ελέγχου και χειρισμών τοποθετούνται σε μεταλλικό στεγανό κιβώτιο στην επιφάνεια του εδάφους, το οποίο φέρει και ανοίγματα εξαερισμού.

Οι εναέριοι υποσταθμοί ονομάζονται έτσι γιατί όλες οι εγκαταστάσεις τους (μετασχηματιστής, όργανα προστασίας) βρίσκονται τοποθετημένες πάνω σε στύλους. Οι εναέριοι υποσταθμοί αποτελούνται συνήθως από ένα μετασχηματιστή με ισχύ μέχρι 250KVA. Η κατασκευή στηρίζεται σε ένα, δύο ή τέσσερις στύλους ανάλογα με το βάρος της. Οι εναέριοι υποσταθμοί δε συναντώνται στα αστικά κέντρα και αποτελούν το οικονομικότερο είδος υποσταθμού.

Οι Υ/Σ Υποβιβασμού ΥΤ σε ΜΤ που χρησιμοποιούνται είναι 150 kV /ΜΤ. Αναλόγως την περιοχή έχουμε τις εξής ιδιαιτερότητες στη δομή των υποσταθμών:

i. Δομή Υ/Σ ΜΤ σε αγροτικές/ημιαστικές περιοχές

Οι Υ/Σ υποβιβασμού 150 kV/ΜΤ είναι κυρίως υπαίθριου τύπου. Η τροφοδότησή τους γίνεται από εναέριες πύλες ΥΤ και περιλαμβάνουν συνήθως 2 Μ/Σ ισχύος 40/50 ΜVA συνδεσμολογίας Dy1, όμως υπάρχουν και Υ/Σ με Μ/Σ ισχύος 20/25 ΜVA.

Η πλευρά ΜΤ των Μ/Σ ισχύος αποτελείται από μεταλλοεπενδυμένους (metalclad) πίνακες συρομένου φορείου, οι οποίοι εγκαθίστανται μέσα σε κτίριο. Το βασικό σχήμα περιλαμβάνει απλούς ζυγούς 1600 Α και ανά Μ/Σ ισχύος 1 κεντρικό διακόπτη, 8 αναχωρήσεις και 1 πύλη για σύνδεση πυκνωτή καθώς και μία διασύνδεση ζυγών ΜΤ. Ο εξοπλισμός ΜΤ σε παλαιότερης κατασκευής υποσταθμούς είναι υπαίθριος και υπάρχουν κύριοι και βοηθητικοί ζυγοί ΜΤ.

ii. Δομή Υ/Σ ΜΤ στην Αττική

Στην περιοχή της Αττικής σήμερα λειτουργούν συνολικά 33 Υ/Σ 150/20 kV. Οι υποσταθμοί υποβιβασμού κλειστού τύπου, οι οποίοι ονομάζονται Κέντρα Διανομής (Κ/Δ), έχουν εξοπλισμό ΥΤ μόνωσης αερίου SF<sub>6</sub> (Gas Insulated Substations - GIS) και υπόγεια τροφοδότηση. Υπάρχουν 14 τέτοιοι υποσταθμοί, δύο εκ των οποίων, βέβαια, είναι ημίκλειστου τύπου, δηλαδή έχουν εξοπλισμό μερικώς εγκεκλεισμένο σε κτίριο.

Τα Κ/Δ τροφοδοτούνται μέσω του καλωδιακού δικτύου 150 kV αρμοδιότητας διανομής, ακτινικά από τα σημεία έγχυσης ισχύος από το Σύστημα, δηλαδή τα 4 ΚΥΤ 400/150 kV του «πετάλου» 400 kV περιμετρικά της Αττικής, τη ζεύξη 150 kV Αργυρούπολης και τους Υ/Σ 150/22 kV Χαλκηδόνας, Ρουφ και ΑΗΣ Αγ. Γεωργίου. Στα περισσότερα Κ/Δ η ισχύς των εγκατεστημένων Μ/Σ είναι 100 ΜVA, ενώ στα νέα Κ/Δ Βριλησσιών, Φαληρικού Δέλτα, Ελληνικού είναι 50 ΜVA. Ο σχεδιασμός της ΜΤ στα Κ/Δ με Μ/Σ 100 ΜVA περιλαμβάνει δύο κεντρικούς διακόπτες ανά Μ/Σ και ημιζυγούς 1250 Α με εκατέρωθεν τομές ή διασυνδέσεις και εφαρμόστηκε και στα νέα Κ/Δ με Μ/Σ 50 ΜVA.

Από τους υποσταθμούς 150/20 kV που λειτουργούν με εναέρια τροφοδότηση από την υψηλή τάση, 12 είναι υπαίθριου και 6 είναι ημίκλειστου τύπου και βρίσκονται στην περιφέρεια του Λεκανοπεδίου και στην υπόλοιπη Αττική. Η δομή των Υ/Σ αυτών είναι ίδια με αυτή της υπόλοιπης επαρχιακής χώρας, με 1 κεντρικό διακόπτη, 8 αναχωρήσεις και 1 πύλη για σύνδεση πυκνωτή ανά Μ/Σ ισχύος, καθώς και μία διασύνδεση ζυγών ΜΤ.

### iii. Δομή Υ/Σ ΜΤ στη Θεσσαλονίκη

Στην περιοχή της Θεσσαλονίκης η πλειονότητα των Υ/Σ 150 kV/ΜΤ είναι υπαίθριου τύπου με την ίδια σύνθεση με τους Υ/Σ της υπόλοιπης επαρχιακής χώρας, εκτός από 4 Υ/Σ οι οποίοι είναι κλειστού τύπου (GIS) και έχουν δομή ίδια με αυτή των Κ/Δ της Αττικής. Οι Υ/Σ κλειστού τύπου βρίσκονται στις παρακάτω περιοχές:

- Θεσσαλονίκη IV (Ν. Ελβετία)
- Θεσσαλονίκη VIII (Μ. Μπότσαρης)
- Θεσσαλονίκη IX (Πολίχνη)
- Θεσσαλονίκη XI (Παύλος Μελάς)

### **1.5 ΓΡΑΜΜΕΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ**

Οι γραμμές διανομής εκκινούν από τα σημεία που βρίσκονται οι υποσταθμοί μεταφοράς και καταλήγουν είτε στους υποσταθμούς διανομής είτε σε άλλα φορτία ή μονάδες παραγωγής ανανεώσιμων πηγών. Στη μέση τάση, οι γραμμές διανομής είναι πάντοτε τριφασικές, ενώ οι γραμμές χαμηλής τάσης είναι συνήθως τριφασικές (400V), αλλά υπάρχουν και μονοφασικές γραμμές (240V). Οι γραμμές διανομής αποτελούνται από ηλεκτρικούς αγωγούς κατάλληλα προστατευμένους με μόνωση από τις διαρροές τάσης και τις ανεπιθύμητες γειώσεις. Κάθε ηλεκτρικός αγωγός έχει μια αντίδραση, δηλαδή αντίσταση στη ροή ρεύματος, που προκαλεί πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής και ηλεκτρικές απώλειες στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος.

Αναλόγως το επίπεδο τάσης και τη δομή του δικτύου, χρησιμοποιούνται και τα αντίστοιχα είδη καλωδίων. Στα εναέρια δίκτυα ΜΤ οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται είναι ACSR διατομής 95 mm<sup>2</sup> στους κορμούς και ACSR 35 mm<sup>2</sup> στις διακλαδώσεις. Στα υπόγεια δίκτυα ΜΤ χρησιμοποιούνται καλώδια XLPE αλουμινίου διατομής 3x240 mm<sup>2</sup>. Στα νέα εναέρια δίκτυα ΧΤ χρησιμοποιούνται συνεστραμμένα καλώδια 3 x 70 mm<sup>2</sup>Al + 54,6 mm<sup>2</sup>AAAC + 25 mm<sup>2</sup>Al και 4 x 120 mm<sup>2</sup> Al + 25 mm<sup>2</sup>Al ενώ στα υπόγεια δίκτυα ΧΤ χρησιμοποιείται καλώδιο 3 x 150 mm<sup>2</sup>Al + 50 mm<sup>2</sup> Cu XLPE.

Το ποσοστό συμμετοχής των δικτύων ΧΤ με συνεστραμμένα καλώδια αυξάνεται κατά 2% ετησίως και στο σύνολο του εναερίου δικτύου ΧΤ, το ποσοστό συμμετοχής των δικτύων με συνεστραμμένα καλώδια για το έτος 2008 ανερχόταν σε 44% του συνολικού δικτύου.

Τα υποβρύχια καλώδια ΜΤ χρησιμοποιούνται:

- για τη διασύνδεση νησιών με την ηπειρωτική χώρα,
- για τη διασύνδεση νησιών με άλλα νησιά που είναι διασυνδεδεμένα με την ηπειρωτική χώρα,
- μεταξύ μη διασυνδεδεμένων νησιών σε νησιωτικά συμπλέγματα,

- σε σημεία όπου μεσολαβούν κόλποι ή λιμνοθάλασσες, τόσο στην ηπειρωτική χώρα όσο και σε νησιά.

Αποτελούνται είτε από τέσσερα μονοπολικά καλώδια από τα οποία το ένα είναι εφεδρικό, είτε, στις νεότερες δομές, από δύο τριπολικά καλώδια.

Το συνολικό μήκος των γραμμών MT σε όλη την επικράτεια ήταν, στο τέλος του 2008, 102.503 km, συμπεριλαμβανομένου και 953 km υποβρυχίων γραμμών MT. Τα τελευταία έτη το δίκτυο αυτό αυξάνεται ετησίως κατά 1.800 km περίπου, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι αντικαταστάσεις υφιστάμενων δικτύων, λόγω ενισχύσεων ή επιδιορθώσεων. Το ποσοστό του υπογείου δικτύου MT, χωρίς να ληφθούν υπόψη τα υποβρύχια καλώδια, ανέρχεται σήμερα σε 8,4% πανελλαδικά, το 56% του οποίου βρίσκεται στην Αττική.

Σε ότι αφορά στο δίκτυο XT, το μήκος του δικτύου στο τέλος του 2008 ήταν 115.572 km, ενώ η αύξησή του είναι της τάξης των 2.400 km ετησίως, πάλι χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι αντικαταστάσεις. Το ποσοστό του υπογείου δικτύου XT ανέρχεται σε 10% πανελλαδικά, το 30% του οποίου βρίσκεται στην Αττική.

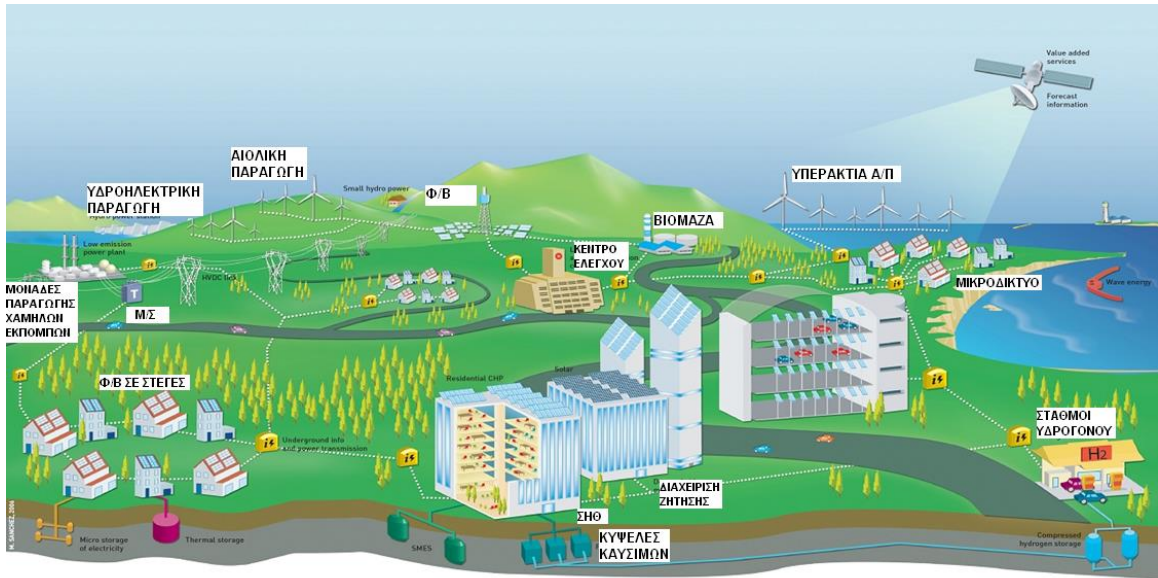
Το συνολικό μήκος των δικτύων MT & XT στο τέλος του 2008 ήταν 218.075 km και, αφαιρουμένων των υποβρυχίων γραμμών, το συνολικό ποσοστό του υπογείου δικτύου ανέρχεται πανελλαδικά σε 9,3%, το 38% του οποίου είναι στην Αττική. Τα νέα δίκτυα MT & XT σε αστικό περιβάλλον κατασκευάζονται πλέον εξαρχής υπόγεια. Το δίκτυο MT που κατασκευάστηκε με υπόγειο καλώδιο το 2008 ανέρχεται στο 30% του συνολικού δικτύου MT ενώ αντίστοιχα για τη XT το ποσοστό αυτό αντιστοιχεί στο 25% του συνολικού δικτύου XT. Η υπογειοποίηση υπαρχόντων δικτύων για λόγους αισθητικής γίνεται μόνο με την ένταξή τους στο πρόγραμμα αισθητικής αναβάθμισης.

[1],[2],[4],[5],[15],[16],[20]

## **1.6 ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΑ ΚΕΝΤΡΑ ΕΠΟΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ (SCADA) ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ (DMS)**

Το τελευταίο διάστημα τα Έξυπνα ή Ευφυή Δίκτυα (Smart Grids) είναι στο επίκεντρο της στρατηγικής όλων των μεγάλων εταιρειών στην Ευρώπη αλλά και σε ολόκληρο τον κόσμο. Τα Έξυπνα Δίκτυα είναι ουσιαστικά ένα εκσυγχρονισμένο και πλήρες σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο παρακολουθεί και βελτιστοποιεί σε πραγματικό χρόνο τη λειτουργία όλων των διασυνδεδεμένων σε αυτό στοιχείων.





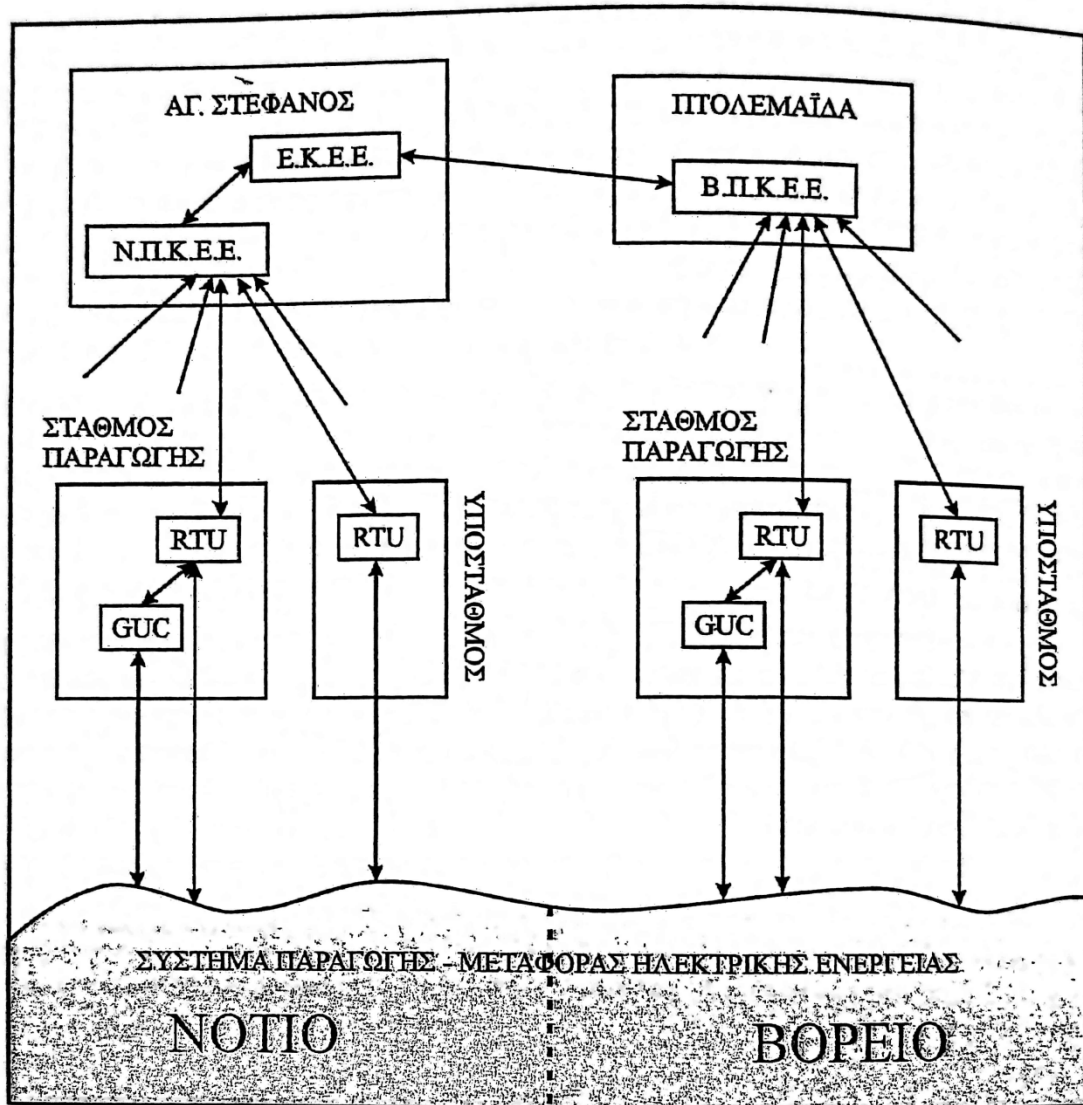
**Σχήμα 1: Έξυπνα δίκτυα**

Τέτοια στοιχεία είναι συσκευές που εξυπηρετούν παραγωγούς, καταναλωτές και προμηθευτές του δικτύου. Πρόκειται για μια υποδομή που αυτοματοποιεί τον έλεγχο με κατάλληλο λειτουργικό εξοπλισμό και σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες των τηλεπικοινωνιών παρέχει πάρα πολλά πλεονεκτήματα έναντι των υφιστάμενων υποδομών. Τα Έξυπνα Δίκτυα ελαχιστοποιούν την επιτόπου μετάβαση για επιτήρηση, δίνουν τη δυνατότητα για άμεσο εντοπισμό και απομόνωση των βλαβών και βελτιώνουν τους χρόνους ανταπόκρισης σε περιστατικά που επηρεάζουν αρνητικά την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, βελτιώνουν την αξιοπιστία και την ποιότητα της ενέργειας, ενισχύουν την ανθεκτικότητα του δικτύου ως προς τις βλάβες και τις διακοπές και οδηγούν στην πλήρη αυτοματοποίηση της συντήρησης και της λειτουργίας του. Ταυτόχρονα, τα Έξυπνα Δίκτυα επιτρέπουν την ομαλότερη ενσωμάτωση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο σύστημα, γεγονός που συνιστά στον καλύτερο έλεγχο του κόστους και στην εξοικονόμηση ενέργειας και συνεπάγεται περαιτέρω αναβάθμιση των παρεχόμενων υπηρεσιών. Η δομή των Έξυπνων Δικτύων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πλήρους διασυνδεδεμένου δικτύου μεταξύ των καταναλωτών και των παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο είναι πιο αποδοτικό, ασφαλές και αξιόπιστο από ότι στο παρελθόν. Η τηλεπαρακολούθηση και τηλεμέτρηση του δικτύου είναι εφικτή με την προσθήκη των κατάλληλων τεχνολογιών αισθητήρων και μετρητών. Τα κεντρικά συστήματα SCADA (Supervision, Control, And Data Acquisition- Σύστημα εποπτείας, ελέγχου και συλλογής πληροφοριών) δίνουν τη δυνατότητα εποπτείας και συγκέντρωσης όλων των απαραίτητων δεδομένων που αφορούν στη λειτουργία του δικτύου. Ταυτόχρονα, τα Έξυπνα Δίκτυα διαθέτουν προηγμένα συστήματα DMS (Distribution Management System- Σύστημα Διαχείρισης Δικτύου Διανομής), συστήματα δηλαδή διαχείρισης της διανομής ενέργειας τα οποία αποτελούν τη βασική παράμετρο για τη λήψη κρίσιμων αποφάσεων. Τα προηγμένα DMS δίνουν τη δυνατότητα τηλεδιαχείρισης μέσα από σύγχρονους

τηλεχειριζόμενους διακόπτες αλλά και συσκευές αμφίδρομης επικοινωνίας όπως οι έξυπνοι μετρητές. [14],[25],[30]

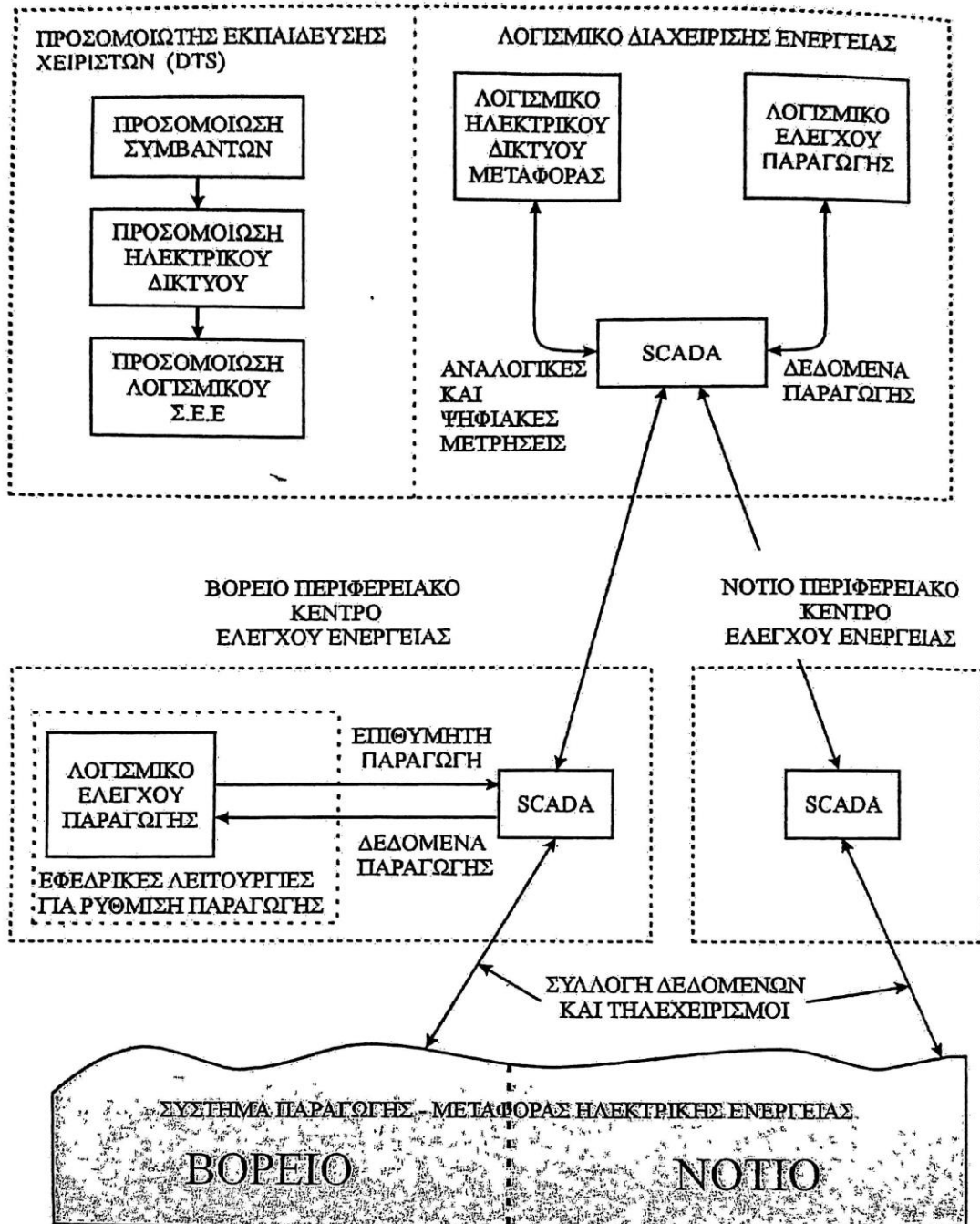
Το σύστημα ελέγχου ενέργειας του ΔΕΔΔΗΕ αποτελείται από τρία Κέντρα Ελέγχου, ένα Εθνικό και δύο Περιφερειακά. Τα Κέντρα Ελέγχου αυτά επικοινωνούν τόσο με τους σταθμούς παραγωγής μέσω Μονάδων Ελέγχου Παραγωγής (Generating Unit Controllers-GUC) και Απομακρυσμένων Τερματικών Μονάδων (Remote Telemetry Unit-RTU) όσο και με τους Υποσταθμούς Μεταφοράς μέσω Τερματικών Μονάδων.

Το Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας (ΕΚΕΕ) συστεγάζεται μαζί με το Νότιο Περιφερειακό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας (ΝΠΚΕΕ) στην περιοχή του Αγ. Στεφάνου Αττικής ενώ το Βόρειο Περιφερειακό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας (ΒΠΚΕΕ) βρίσκεται στην περιοχή της Πτολεμαΐδας. Η ενεργειακή διαχείριση του Ηλεκτρικού Συστήματος γίνεται από το ΕΚΕΕ, όμως σε περιπτώσεις βλάβης αναλαμβάνει ορισμένες από τις λειτουργίες του και το ΒΠΚΕΕ, ώστε το σύστημα να είναι συνεχώς υπό έλεγχο. Τα Περιφερειακά Κέντρα Ελέγχου έχουν την εποπτεία της περιοχής που ανήκει στην αρμοδιότητά τους. Τα προγράμματα που χρησιμοποιούνται επιτρέπουν την εποπτεία, την οικονομικότερη λειτουργία καθώς και την αύξηση της λειτουργικής ασφάλειας του Ηλεκτρικού Συστήματος. Το ΕΚΕΕ περιλαμβάνει τρία υποσυστήματα για τις λειτουργίες της Ενεργειακής Διαχείρισης: Το σύστημα SCADA, το σύστημα Παραγωγής και το σύστημα Μεταφοράς. Τα Περιφερειακά Κέντρα Ελέγχου έχουν μόνο το υποσύστημα SCADA, αλλά το ΒΠΚΕΕ διαθέτει επιπλέον το σύστημα Παραγωγής.



Σχήμα 2: Δομή Συστήματος Ελέγχου Ενέργειας

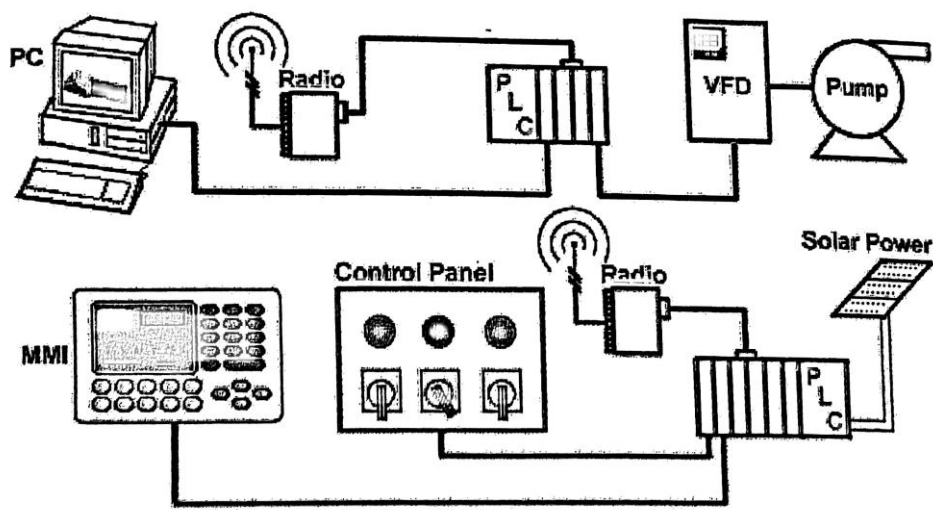
ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



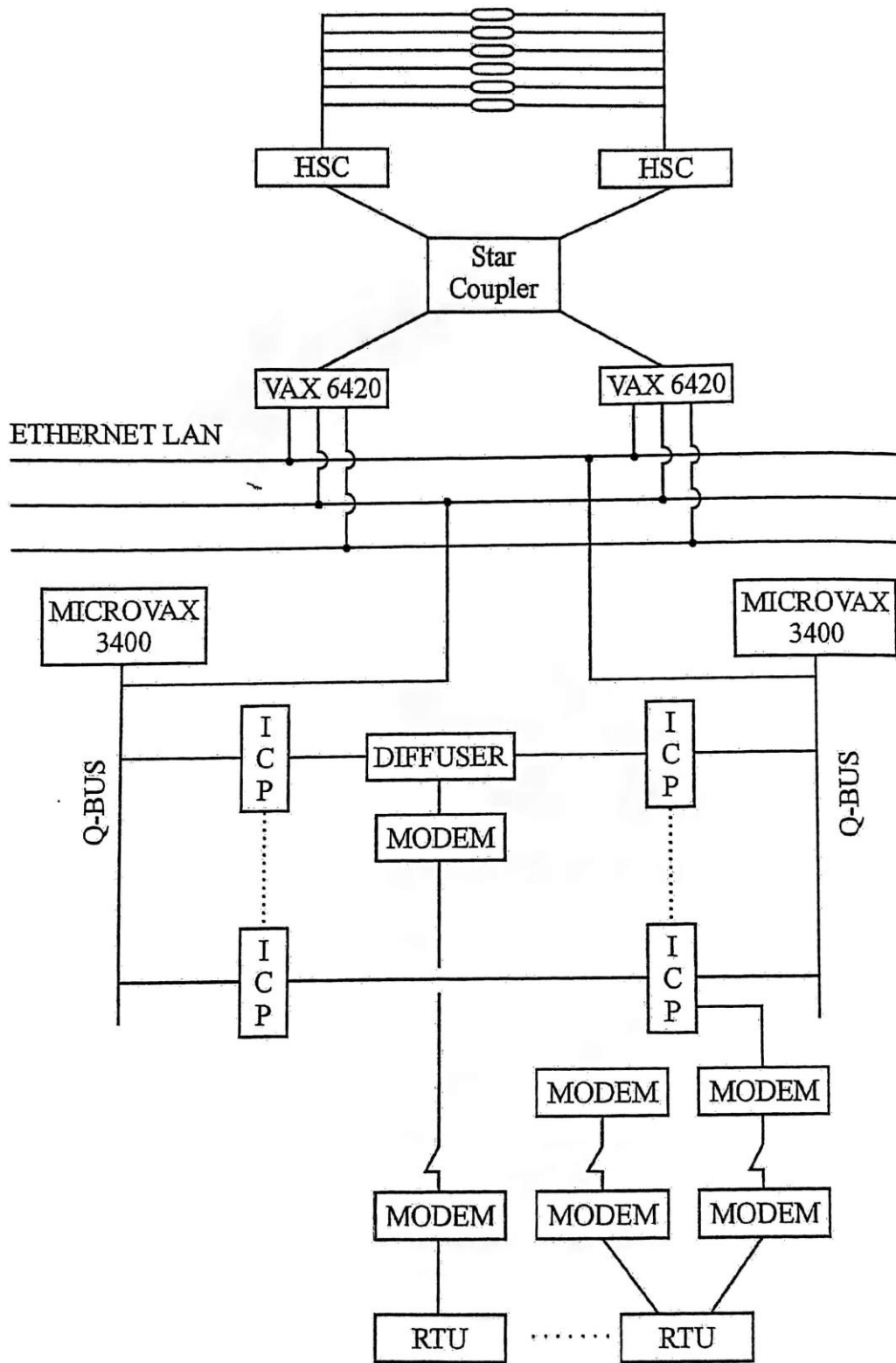
Σχήμα 3: Λογισμικό Εφαρμογής Συστήματος Ελέγχου Ενέργειας

Το υποσύστημα SCADA συλλέγει πληροφορίες από διάφορες διεργασίες και χρησιμοποιείται για τον εποπτικό έλεγχο αυτών. Μέσω του SCADA γίνεται η παρακολούθηση και ο έλεγχος των επιδόσεων του συστήματος, ο οποίος στη συνέχεια τροφοδοτεί αυτές τις πληροφορίες στα Κέντρα Ελέγχου για λόγους ασφάλειας και εύρυθμης λειτουργίας.

Τα δομικά στοιχεία ενός συστήματος SCADA είναι ένας κεντρικός υπολογιστικός σταθμός (Master Station Computer), οι γραμμές επικοινωνίας (radio, καλωδιακή, τηλεφωνική), RTUs που κωδικοποιούν και αποκωδικοποιούν σήματα και το ελεγχόμενο σύστημα (Field Instrumentation). Το υλικό Η/Υ των ΠΚΕΕ αποτελείται από δύο κεντρικούς Η/Υ με επεξεργαστές VAX 6410 που συνδέονται μέσα από ένα Star Coupler με τους περιφερειακούς δίσκους. Οι εμπρόσθιοι Η/Υ (Front End Processors) κάθε ΠΚΕΕ είναι ένα σύστημα δυο MicroVAX 3400 που επικοινωνούν με τα RTUs, ώστε να παίρνουν μετρήσεις από τα σημεία ενδιαφέροντος. Οι εμπρόσθιοι Η/Υ κάθε ΠΚΕΕ επικοινωνούν και με τους κεντρικούς Η/Υ μέσω δικτύου Ethernet. Οι γραμμές επικοινωνίας με τα RTUs είναι σχεδόν όλες διπλές και ελέγχονται από έξυπνους ελεγκτές επικοινωνίας που συνδέονται με τους εμπρόσθιους Η/Υ.



Σχήμα 4: Συνιστώσες Συστήματος SCADA



Σχήμα 5: κεντρικοί και Εμπρόσθιοι Η/Υ του ΠΚΕΕ

Οι βάσεις δεδομένων των Περιφερειακών Κέντρων Ελέγχου περιέχουν πληροφορίες και για τα RTUs, τους μορφοτροπείς και τους ηλεκτρονόμους, καθώς και για τους εμπρόσθιους υπολογιστές και τους διαύλους επικοινωνιών. Τα δεδομένα που λαμβάνει ένα σύστημα SCADA μπορεί να είναι αναλογικά, δηλαδή να αφορούν μετρήσεις τάσης, έντασης ρεύματος, ισχύος, κλπ., είτε ψηφιακά, δηλαδή αφορούν καταστάσεις διακοπών, αποζευκτών, γειωτών, κλπ. Τα δεδομένα αυτά μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα και συλλέγονται στο Κέντρο Ελέγχου με περιοδικές σαρώσεις κάθε 2 sec. Σε επίπεδο RTU, οι σημάνσεις από τα ψηφιακά σήματα σαρώνονται κάθε 5 ms. Μεταδίδονται στο Κέντρο Ελέγχου μόνο σε περίπτωση μεταβολής της κατάστασής τους (report by exception) ενώ ορισμένες μεταδίδονται ως ακολουθίες συμβάντων, οι οποίες περιλαμβάνουν επιπλέον και καταγραφή του χρόνου απόκτησης της πληροφορίας από το RTU. Στην περίπτωση αυτή το Κέντρο Ελέγχου καταχωρεί την πληροφορία με χρονολογική σειρά. Όσον αφορά στα αναλογικά σήματα, χρησιμοποιούνται τρεις ρυθμοί σάρωσης των 2, 4 και 10 sec. Ο γρηγορότερος ρυθμός των 2 sec χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τη μέτρηση μεγεθών που σχετίζονται με την ενεργό ισχύ εξόδου των μονάδων παραγωγής και τις ροές διεθνών διασυνδέσεων. Ο ρυθμός των 4 sec χρησιμοποιείται για τη μέτρηση ενεργών και άεργων ροών ισχύος στις γραμμές μεταφοράς και τη μέτρηση τάσεων των ζυγών. Τέλος, ο αργότερος ρυθμός των 10 sec χρησιμοποιείται για τη μέτρηση ενεργών και άεργων ροών ισχύος των φορτίων και για τη μέτρηση των ρευμάτων. Οι αναλογικές μετρήσεις μεταδίδονται στο Κέντρο Ελέγχου είτε περιοδικά είτε σε περίπτωση μεταβολής της κατάστασης τους, όταν η μεταβολή που θα διαπιστωθεί είναι μεγαλύτερη από το 0.1% της μέγιστης μετρούμενης τιμής. Όμως, στον Κεντρικό Υπολογιστή, οι μετρήσεις αντικαθίστανται στη βάση δεδομένων του SCADA όταν οι αλλαγές υπερβούν ένα κατώφλι μεταβολής, προκαθορισμένο από τον χρήστη.

Η λειτουργία του συστήματος SCADA εξασφαλίζει την επιτήρηση του ηλεκτρικού δικτύου και τους τηλεχειρισμούς. Το υποσύστημα SCADA πραγματοποιεί τις εντολές τηλεχειρισμού του Ηλεκτρικού Συστήματος χρησιμοποιώντας πρωτόκολλο επικοινωνίας υψηλής ασφαλείας από το Κέντρο Ελέγχου προς τα RTUs. Κάθε RTU που δέχεται εντολή τηλεχειρισμού αποστέλλει στο Κέντρο Ελέγχου απάντηση για την επιτυχή ή μη εκτέλεση της εντολής. Τέτοιοι τηλεχειρισμοί μπορεί να είναι η αλλαγή της κατάστασης διακοπών ή αποζευκτών ζυγών. Επιπλέον, μέσω του υποσυστήματος SCADA γίνεται η αποστολή των επιθυμητών τιμών παραγωγής (setpoints) στους σταθμούς παραγωγής. [6]

Το Σύστημα Διαχείρισης Διανομής (DMS) λειτουργεί παράλληλα με το κέντρο ελέγχου του SCADA ώστε να παρέχει επιπλέον πληροφορίες στο διαχειριστή. Το DMS είναι ένα σύστημα πληροφορικής, ικανό για τη συλλογή, την οργάνωση, την προβολή και την ανάλυση πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Αποτελείται από ένα πλήθος εφαρμογών παρακολούθησης και εποπτείας, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με την έκταση της περιοχής του δικτύου. Επιπλέον, το DMS συνεργάζεται και με ανεξάρτητα συστήματα πληροφοριών, όπως συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS), συστήματα διαχείρισης διακοπής (OMS) και συστήματα πληροφοριών των πελατών (CIS), προκειμένου να παρέχει μια καλύτερη εικόνα των λειτουργιών του δικτύου.

Οι πιο σημαντικές εφαρμογές αφορούν:

- Εκτίμηση της κατάστασης - State Estimation

Ο εκτιμητής κατάστασης αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των συνολικών συστημάτων παρακολούθησης και ελέγχου για ένα δίκτυο. Είναι ένας σύνθετος αλγόριθμος επεξεργασίας πληροφοριών που έχει ως κύριο στόχο την παροχή μιας αξιόπιστης εκτίμησης των τάσεων του συστήματος. Χρησιμοποιεί ως είσοδο μετρήσεις πραγματικού χρόνου, ψευδομετρήσεις (μοντέλα φορτίου που ορίζονται συνήθως ως κατανομές Gauss) και το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος. Οι εν λόγω πληροφορίες μεταφέρονται από τον εκτιμητή στα κέντρα ελέγχου και στις βάσεις δεδομένων σε όλο το δίκτυο. Οι εκτιμητές επιτρέπουν τον υπολογισμό αυτών των μεταβλητών με υψηλή ακρίβεια παρά το γεγονός ότι οι μετρήσεις μπορεί να είναι ανακριβείς ή ελλιπείς, καθώς έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας κακών δεδομένων και σφαλμάτων.

- Ανάλυση Ροής Φορτίου - Power Flow Analysis

Η διαδικασία της ανάλυσης ροής φορτίου γίνεται αυτόματα ανά τακτά χρονικά διαστήματα, είτε όταν ανιχνευτεί κάποια σημαντική αλλαγή στα δεδομένα του υποσταθμού στο SCADA, είτε όταν γίνει κάποια αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου, όπως το άνοιγμα ενός διακόπτη. Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής των αποτελεσμάτων από την ανάλυση ροής φορτίου που θα αποσταλούν στη βάση δεδομένων του SCADA, όπως τα μέτρα και οι γωνίες τάσεων και ρευμάτων, οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των μέτρων των τάσεων μεταξύ των κόμβων της γραμμής και της αναχώρησης και τιμές για την ενεργό και την άεργο ισχύ. Είναι σημαντικό το γεγονός ότι σε συνεργασία και με άλλα υποσυστήματα του DMS, η ανάλυση ροής φορτίου γίνεται σε πραγματικό χρόνο και καθίσταται αξιόπιστη αφού τα αποτελέσματά της μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για τη βραχυχρόνια πρόβλεψη ζήτησης φορτίου, για τη δημιουργία μελλοντικών σεναρίων λειτουργίας, για την εκτίμηση κατάστασης του δικτύου, κλπ.

- Βραχυχρόνια Πρόβλεψη Φορτίου - Short Term Load Forecasting (STLF)

Η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου κάνει εκτίμηση της αναμενόμενης ζήτησης φορτίου, βασισμένη σε αλγόριθμους που συσχετίζουν προσαρμοστικά πολλές μεταβλητές εισόδου. Τέτοιοι αλγόριθμοι είναι νευρωνικά δίκτυα, παλινδρομικές μέθοδοι αλλά και ιστορικά δεδομένα φορτίων ημερών με παρόμοια καιρικά χαρακτηριστικά, ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η πρόβλεψη γίνεται για μέγιστο διάστημα δέκα ημερών. Η διαδικασία STLF είναι καθοριστικής σημασίας καθώς τα αποτελέσματά της χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό της διαχείρισης των φορτίων και για τον προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης του δικτύου.

- Εντοπισμός, απομόνωση και αποκατάσταση σφαλμάτων – Fault Location, Isolation & System Restoration (FLISR)

Ο εντοπισμός των σφαλμάτων γίνεται με τη χρήση αισθητήρων που ανιχνεύουν τη θέση τους στο δίκτυο. Η απομόνωσή των σφαλμάτων γίνεται με τη λειτουργία διακοπών ισχύος που απομονώνουν μόνο το σημείο αυτό, ενώ μετά από χρήση αλγορίθμων για την επιλογή του βέλτιστου σεναρίου, ενεργοποιούνται και άλλοι διακόπτες ώστε το υπόλοιπο τμήμα του δικτύου



να τροφοδοτηθεί από κάποιον άλλο μετασχηματιστή ή κάποια άλλη αναχώρηση. Χάρη στη λειτουργία του συστήματος FLISR επιτυγχάνεται γρηγορότερη αποκατάσταση των σφαλμάτων και ενισχύεται η αξιοπιστία του δικτύου.

- Έλεγχος Τάσης και Αέργου Ισχύος - Voltage and VAr Control (VVC)

Ο VVC αναφέρεται στη διαδικασία της διαχείρισης των επιπέδων τάσης και αέργου ισχύος σε όλα τα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και είναι απαραίτητος για τη διατήρηση των επιπέδων τάσης εντός των επιθυμητών ορίων και για τη μείωση των απωλειών ενέργειας. Υπάρχουν τρία βασικά εργαλεία στους Υ/Σ του δικτύου για τη διαχείριση της τάσης: Τα συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (OLTCs), οι ρυθμιστές τάσης και οι πυκνωτές. Οι OLTCs και οι ρυθμιστές τάσης αφορούν μετασχηματιστές με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού, οι οποίοι προσαρμόζονται προκειμένου να αυξηθεί ή να μειωθεί η τάση, ανάλογα με τις ανάγκες. Οι πυκνωτές είναι συνδεδεμένοι παράλληλα στο δίκτυο με διακόπτες και συμβάλλουν στη ρύθμιση τάσης τροφοδοτώντας το δίκτυο με άεργο ισχύ, όταν κρίνεται απαραίτητο και ήταν μέχρι τώρα τα κύρια εργαλεία για τον έλεγχο Volt/VAR. Όμως, επειδή πολλές φορές ο έλεγχος πρέπει να γίνεται στα απομακρυσμένα σημεία του δικτύου, όπου συχνά συνδέονται μονάδες ανανεώσιμων πηγών, κρίνεται απαραίτητη η ρύθμιση της τάσης κοντά στα φορτία. Το ίδιο ισχύει και για την αντιστάθμιση της αέργου ισχύος που πρέπει και αυτή να πραγματοποιείται όσο το δυνατό πλησιέστερα στα φορτία, γεγονός που επιτυγχάνεται μέσω τοπικών συστημάτων όπως οι συστοιχίες πυκνωτών. Ο VVC βοηθά στην άμβλυση φαινομένων επικίνδυνα υψηλής ή χαμηλής τάσης, προτείνοντας αλλαγή του λόγω μετασχηματισμού ή μεταγωγή των πυκνωτών ώστε να εξασφαλιστεί ότι η τάση θα μείνει εντός των αποδεκτών ορίων. Στο μέλλον, περαιτέρω VVC θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με smart inverters αλλά και μέσω των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, οι οποίες μπορούν επίσης να εγχύσουν άεργο ισχύ σε ένα δίκτυο διανομής.

- Σύστημα Διαχείρισης Διεσπαρμένης Παραγωγής – Distributed Energy Resources Management System (DERMS)

Η συνεχής αύξηση της διείσδυσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής καθιστά επιτακτική την ανάγκη για ένα σύστημα διαχείρισης και εποπτείας τους. Προς την κατεύθυνση αυτή, τα συστήματα DERM, τα οποία θα αποτελούν υποσυστήματα των DMS, θα διαχειρίζονται τις πληροφορίες από τις μονάδες. Ένα σύστημα DERM είναι ένα λογισμικό βασισμένο σε αλγορίθμους που αυξάνουν την ικανότητα του διαχειριστή να γνωρίζει σε πραγματικό χρόνο την κατάσταση στο δίκτυο. Έτσι, υπάρχει ένα υψηλό επίπεδο ελέγχου και ευελιξίας για την πιο αποτελεσματική διαχείριση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής καθώς και για την περαιτέρω αύξηση της διείσδυσής τους.

Εκτός από τις εφαρμογές αυτές, υπάρχουν και ανεξάρτητα συστήματα πληροφοριών που συνεργάζονται με το DMS όπως τα ακόλουθα:

- Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information System – GIS)

Τα GIS δίνουν τη δυνατότητα αποτύπωσης του δικτύου διανομής σε κεντρικό μηχανογραφικό σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών, καθιστώντας δυνατή τη συλλογή, την επεξεργασία και την οπτικοποίηση των δεδομένων χαρτογράφησης. Οι μηχανογραφικοί χάρτες θα συμβάλλουν στην παρακολούθηση νέων κατασκευών του δικτύου, στην υποστήριξη των βλαβοληπτικών κέντρων και των συστημάτων τηλελέγχου καθώς και στη βελτίωση της ποιότητας ενέργειας και της ποιότητας εξυπηρέτησης των χρηστών.

- Σύστημα Διαχείρισης Διακοπών (Outage Management System – OMS)

Το OMS είναι ένα λογισμικό η λειτουργία του οποίου έχει ως στόχο την άμεση αποκατάσταση βλαβών του δικτύου. Μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος από τις διακοπές, να βελτιώσει την ποιότητα των υπηρεσιών για τους καταναλωτές και να ενισχύσει την ασφάλεια για τους χρήστες του δικτύου. Σε συνεργασία και με τα υπόλοιπα συστήματα (CIS, GIS, FLISR, κλπ), καταγράφει το είδος, το μέγεθος και τη θέση της βλάβης, ώστε ο διαχειριστής να μπορεί να επέμβει άμεσα και αποτελεσματικά. Επιπλέον, παρέχει τη δυνατότητα πρόβλεψης διακοπής έτσι ώστε να υπάρχει ένα σχέδιο για την αντιμετώπισή της.

- Σύστημα Διαχείρισης Πληροφοριών των Πελατών (Customer Information System – CIS)

Το σύστημα διαχείρισης πληροφοριών των πελατών επεξεργάζεται πληροφορίες που σχετίζονται με τα προγράμματα τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας, το καταναλωτικό προφίλ των πελατών και την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών (βλάβες, διακοπές, χρόνοι αποκατάστασης). Οι μετρήσεις, οι πληροφορίες και τα στατιστικά δεδομένα που παρέχει, χρησιμοποιούνται ως είσοδοι για το DMS και για τα υπόλοιπα συστήματα.

[18],[21],[22],[23],[24],[26],[27],[28],[29],[31]

## 1.7 ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Βασικός εξοπλισμός ενός δικτύου είναι οι μετρητές, οι οποίοι συλλέγουν τις απαραίτητες μετρήσεις για όλα τα βασικά μεγέθη που χρειαζόμαστε για τη διαχείριση και την εποπτεία του, δηλαδή η τάση και το ρεύμα στην αρχή της κάθε αναχώρησης, χωρίς όμως να παρέχεται κάποια ένδειξη για τη φορά του.

Η πλειονότητα των κτιρίων είναι εξοπλισμένη με ηλεκτρομηχανικούς μετρητές, μονοφασικούς ή τριφασικούς. Ο ηλεκτρομηχανικός ή επαγωγικός μετρητής χρησιμοποιείται στη μέτρηση της πραγματικής ή άεργου κατανάλωσης μονοφασικών και τριφασικών παροχών. Ουσιαστικά αποτελείται από ένα πηνίο τάσης και ένα πηνίο έντασης που διεγείρονται από τη τάση του δικτύου και την ένταση του φορτίου του καταναλωτή αντίστοιχα. Διαθέτει επιπλέον έναν αλουμινένιο δίσκο-δρομέα, οι στροφές του οποίου μεταδίδονται μέσω ενός ελικοειδούς τροχού σε έναν αριθμητήρα, και ένα μαγνήτη πέδησης. Η λειτουργία του μηχανισμού μέτρησης βασίζεται στην

αλληλεπίδραση των μαγνητικών ροών των πηνίων τάσης και έντασης, οι οποίες δημιουργούν ένα κινούμενο πεδίο στο δίσκο. Το πεδίο αυτό προκαλεί μια ροπή στρέψης. Ο αριθμός των περιστροφών του δίσκου αποτελεί το μέτρο για την ποσότητα ηλεκτρισμού που χρησιμοποιείται. Η ένδειξη του οργάνου εμφανίζεται σε μια ψηφιακή οθόνη που λειτουργεί μηχανικά και απεικονίζει τις κιλοβατώρες (kWh) που καταναλώθηκαν.



**Σχήμα 6: Ηλεκτρομηχανικός Μετρητής**

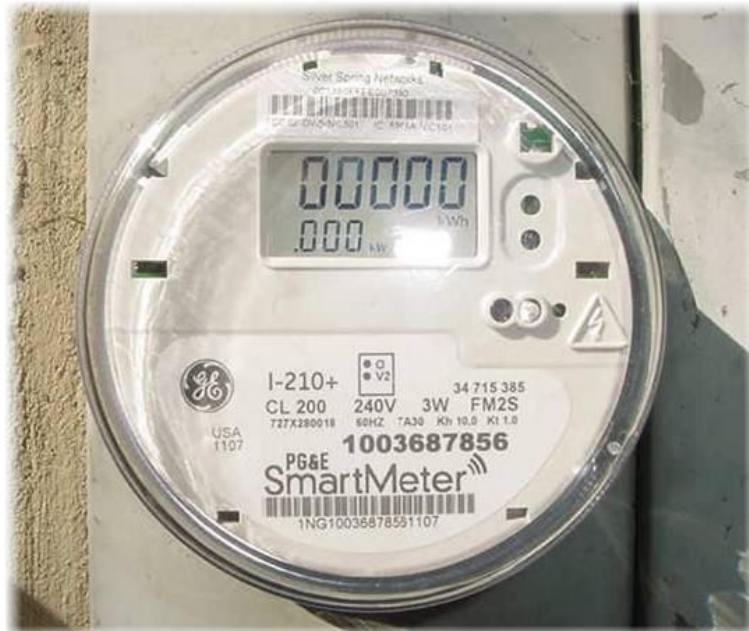
Ένας ακόμη τύπος ηλεκτρομηχανικού μετρητή που μπορεί να υπάρχει είναι ο μετρητής μέγιστης ζήτησης. Αυτού του είδους οι μετρητές μοιάζουν στην εμφάνιση με το όργανο ταχύτητας (κοντέρ) των αυτοκινήτων και μετράνε την πραγματική ισχύ που παράγεται ανά 15 λεπτά. Αυτή μπορεί να μετρηθεί σε kW ή kVA.

Οι μετρητές ηλεκτρομηχανικού τύπου αντικαθίστανται τα τελευταία χρόνια από νέους ηλεκτρονικούς μετρητές, οι οποίοι έχουν περισσότερες μετρητικές και καταγραφικές δυνατότητες ενός μεγάλου αριθμού μεγεθών. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν την κατανάλωση ή παραγωγή ενέργειας, την μέγιστη ζήτηση ισχύος σε kW ή kVA, τον συντελεστή ισχύος, την ηλεκτρική τάση, το ηλεκτρικό ρεύμα, τη διαταραχή λόγω αρμονικών, την άεργο ισχύ, κτλ. Οι ηλεκτρονικοί μετρητές είναι ικανοί να παρέχουν ένα παλλόμενο σήμα εξόδου το οποίο μπορεί να ενεργοποιήσει κάποιες συσκευές ελέγχου ή να ενσωματωθεί σε κάποιο δίκτυο ή να χρησιμοποιηθεί από κάποιο ειδικό όργανο καταγραφής δεδομένων, ως μέρος ενός συστήματος διαχείρισης κτιρίων (building management system – BMS) ή ενός αυτόματου συστήματος ενδείξεων μετρητών (automatic meter reading system – AMR).



**Σχήμα 7: Ηλεκτρονικός Μετρητής**

Ακόμα νεότερης τεχνολογίας είναι οι έξυπνοι μετρητές. Πρόκειται για ασύρματες φορητές συσκευές, οι οποίες παρακολουθούν και ελέγχουν την ηλεκτρική ενέργεια και υπολογίζουν το κόστος λειτουργίας των ηλεκτρικών συσκευών σε πραγματικό χρόνο. Αποτελούνται από αισθητήρες, που μεταδίδουν μέσω ενός ειδικού πομπού ράγας, τις πληροφορίες σχετικά με την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται, απεικονίζοντας τα δεδομένα σε μια ασύρματη φορητή οθόνη προβολής. Οι αισθητήρες κουμπώνουν γύρω από τα καλώδια τροφοδοσίας ρεύματος του κεντρικού ηλεκτρικού πίνακα του χώρου και συνδέονται με τον πομπό, ο οποίος συνήθως τοποθετείται εκτός του ηλεκτρολογικού πίνακα. Οι έξυπνοι μετρητές θα συμβάλλουν στην ορθότερη χρήση και διαχείριση των ηλεκτρικών συσκευών και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.



**Σχήμα 8: Έξυπνος Μετρητής**

Στα Έξυπνα Δίκτυα καθοριστικής σημασίας είναι το τηλεπικοινωνιακό επίπεδο, που αντιπροσωπεύει το κέντρο του συστήματος, παρέχοντας συνδέσεις μεταξύ όλων των συστημάτων και των συσκευών. Η τεχνολογία των τηλεπικοινωνιών χρησιμοποιείται για να καταστήσει δυνατή τη μεταφορά των δεδομένων και την έξυπνη εποπτεία κάθε στοιχείου του δικτύου, ενισχύοντας την αξιοπιστία του συστήματος.

Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας καλούνται να αντιμετωπίσουν τόσο το χαμηλό εύρος ζώνης για την επικοινωνία μεταξύ των μετρητών αλλά και την απουσία κοινών προτύπων για τη συνεργασία μεταξύ των στοιχείων του συστήματος, γεγονός που συνεπάγεται αδυναμία χειρισμού των συνεχώς αυξανόμενων πληροφοριών από τις έξυπνες συσκευές.

Στο επίπεδο μεταφοράς των δεδομένων υπάρχουν τριών ειδών κατηγορίες δικτύων: WAN (Wide-Area Network), FAN (Field-Area Network) και τα HAN (Home-Area Network).

- WAN (Wide-Area Network)

Το WAN παρέχει επικοινωνία μεταξύ του διαχειριστή του δικτύου και των υποσταθμών. Για το σκοπό αυτό, το δίκτυο WAN καλύπτει μια μεγάλη γεωγραφική έκταση (π.χ. μια πόλη) και περιλαμβάνει στοιχεία του δικτύου όπως μετασχηματιστές, πυκνωτές, κλπ. ώστε να είναι αποτελεσματικό και επεκτάσιμο. Είναι ένα δίκτυο επικοινωνίας υψηλού εύρους ζώνης, το οποίο χειρίζεται τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις με εφαρμογές παρακολούθησης και ανίχνευσης. Το WAN παρέχει αμφίδρομο δίκτυο για τις αιτήσεις που αφορούν την επικοινωνία, τον αυτοματισμό και τον έλεγχο. Κάθε αίτηση στο WAN έχει μοναδική επικοινωνία και πληροί τις απαιτήσεις QoS (Quality Of System). Ορισμένες εφαρμογές απαιτούν πραγματικό χρόνο ή απαντήσεις κοντά σε πραγματικό χρόνο, όπως αυτή της κατάστασης συστημάτων εποπτείας ευρείας περιοχής, κάποιες απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης και ταχεία απόκριση, όπως οι εφαρμογές αυτοματισμού ενός υποσταθμού ενώ άλλες χρειάζονται υψηλό ρυθμό μετάδοσης και ρυθμούς ευρυζωνικών δεδομένων. Η εξ αποστάσεως επικοινωνία μεταξύ του διαχειριστή του δικτύου και των μετρητών είναι απαραίτητη για την ανταλλαγή χρήσιμων πληροφοριών. Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, WiMAX και δίκτυα ενσύρματων επικοινωνιών θεωρούνται οι καλύτερες τεχνολογίες για να εκπληρώσει ένα δίκτυο WAN τους παραπάνω σκοπούς.

- FAN (Field-Area Network)

Το FAN μπορεί να περιγραφεί ως το δίκτυο επικοινωνίας για περιοχές αποθήκευσης και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και περιλαμβάνει την αυτοματοποίηση της διανομής και των συσκευών ελέγχου που επικοινωνούν μέσω δικτύων μεταξύ μεμονωμένων υπηρεσιών συνδέσεων. Λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ των εγκαταστάσεων του πελάτη και των υποσταθμών καθώς αναπτύσσονται ευφυείς κόμβοι μεταξύ τους ώστε να συλλέγουν και να ελέγχουν τα δεδομένα από γειτονικούς συλλέκτες δεδομένων (π.χ. μετρητές). Αυτοί οι κόμβοι συνδέονται σε μια κεντρική πύλη, η οποία έχει τα κατάλληλα προγράμματα για τη μετάδοση των συλλεχθέντων δεδομένων. Κανάλια FAN χαμηλού εύρους ζώνης είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα και ανθεκτικά για την επικοινωνία

αυτού του είδους. Η κάλυψη των δικτύων αυτών περιλαμβάνει αστικές, ημιαστικές και αγροτικές περιοχές. Το FAN υποστηρίζεται από τις υποδομές AMI (Advanced Metering Infrastructure) και αναπτύσσει με ταχείς ρυθμούς εφαρμογές όπως για παράδειγμα η αυτοματοποίηση της λειτουργίας των δικτύων διανομής. Η επιλογή της επικοινωνιακής τεχνολογίας FAN διαφέρει ανάλογα με τις ανάγκες των διαφορετικών εφαρμογών των έξυπνων δικτύων. Νέες τηλεπικοινωνιακές τεχνικές χρησιμοποιούν το IEC 61850 (International Electrotechnical Commission) το οποίο προβλέπει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ ευφυών ηλεκτρονικών συσκευών και καλύτερη επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή.

- HAN ( Home-Area Network)

Το HAN προσφέρει διασύνδεση σε ευφυείς μετρητές, έξυπνες συσκευές, αισθητήρες, συσκευές κατανάλωσης ενέργειας και συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας, συμβάλλοντας στη διαχείριση της ενέργειας και του κόστους από τον ίδιο τον καταναλωτή. Τα HAN υποστηρίζουν επικοινωνία χαμηλού εύρους ζώνης μεταξύ οικιακών συσκευών και έξυπνων μετρητών. Η βασική τους λειτουργία είναι να ενημερώνουν καθημερινά τους πελάτες σχετικά με τις καταναλωτικές συμπεριφορές μέσα από οθόνες εγκατεστημένες στο σπίτι ή μέσω ενός web interface. Έτσι, οι ανάγκες για το εύρος ζώνης είναι μεταξύ 10 και 100 Kbps ανά συσκευή. Για το λόγο αυτό, στα HAN προτιμώνται συνδέσεις μικρού εύρους ζώνης, αργής ταχύτητας, ευέλικτες και οικονομικά αποδοτικές. Μερικές από τις τεχνολογίες επικοινωνίας που ανταποκρίνονται καλύτερα στα HAN είναι οι ZigBee, Wi-Fi, HomePlug, Z-wave και M-Bus.

[7],[8],[17],[32],[33],[34],[35]

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η ανάπτυξη των πιθανοτικών εργαλείων βασίστηκε στη χρήση μεθοδολογιών για την πρόβλεψη της παραγωγής και της ζήτησης και την εκτίμηση πιθανών καταστάσεων, όπως την εμφάνιση υπερτάσεων σε ευαίσθητους κόμβους και υπερφορτίσεων των γραμμών, καθώς και στη λήψη αποφάσεων για την ύπαρξη ή μη ανάστροφης ροής. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζεται ο τρόπος με τον οποίο οι παρακάτω μεθοδολογίες αξιοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των εφαρμογών του εργαλείου και συνέβαλαν στην επίλυση προβλημάτων του δικτύου διανομής.

		ΣΤΟΧΟΙ			
		Βελτίωση αποτείας της λειτουργίας του δικτύου	Διαχείριση υπερτάσεων και υπερφορτίσεων των γραμμών	Προσδιορισμός της αύξησης της διείσδυσης	Έλεγχος αέργου ισχύος- τάσης - Καθορισμός των σημείων λειτουργίας των μονάδων διεπαρμμένης παραγωγής
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΖΗΤΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	X	X	X	X
	ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	X	X	X	
	ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ		X	X	X
	ΔΕΝΤΡΑ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ	X			

**Πίνακας 1: Εφαρμογή της μεθοδολογίας για την επίτευξη των στόχων των πιθανοτικών εργαλείων**

Πιο αναλυτικά, η πρόβλεψη της παραγωγής και της ζήτησης φορτίου αποτέλεσε ένα σημαντικό εργαλείο για την εκτίμηση πιθανών μελλοντικών καταστάσεων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν αξιοποιήθηκαν ως είσοδοι για την αξιολόγηση των μελλοντικών καταστάσεων. Η ανάλυση ροής φορτίου αποτέλεσε τη βάση για τον εντοπισμό υπερτάσεων στους κόμβους και συμφορήσεων στις γραμμές και τα δεδομένα που προέκυψαν από τη χρήση της ήταν απαραίτητα για τη σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πιθανοτική ροή φορτίου. Η πιθανοτική ροή φορτίου συνέβαλε καθοριστικά στην εκτίμηση της πιθανότητας για εμφάνιση υπερτάσεων και υπερφορτίσεων, ενώ οδήγησε και στην υιοθέτηση πιο ευέλικτων ορίων για την αύξηση της εγκατάστασης ΑΠΕ. Τέλος, η μεθοδολογία των δέντρων αποφάσεων

χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό της ανάστροφης ροής, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση εποπτείας της λειτουργίας του δικτύου και στη διαχείριση ανεπιθύμητων καταστάσεων, όπως οι υπερτάσεις.

[13]

## 2.1.ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η δυνατότητα πρόβλεψης της παραγωγής Φ/Β και ΥΗΣ αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον προγραμματισμό των χειρισμών από το διαχειριστή του δικτύου. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα νέο νευρωνικό δίκτυο που είναι σε θέση να αναλύει ένα σύνθετο πρόβλημα με ιδιαίτερη λεπτομέρεια, όπως η πρόβλεψη παραγωγής των φωτοβολταϊκών, χρησιμοποιώντας ως εισόδους μόνο τα δεδομένα που χρειάζεται για να παρέχει ακριβείς προβλέψεις. Το νευρωνικό δίκτυο του μοντέλου ονομάζεται ML-RBFNN (Multi Label Radial Base Function Neural Network). Είναι κατάλληλα σχεδιασμένο για να λαμβάνει μεταβλητές εισόδου με μεγάλη αβεβαιότητα, όπως τις Αριθμητικές Προβλέψεις Καιρού (ΑΠΚ). Αποτελείται από τέσσερα επίπεδα: δύο μη-γραμμικά επίπεδα RBF (Radial Base Function) με διαφορετική παραμετροποίηση και δύο γραμμικά. Τα μη γραμμικά επίπεδα ομαδοποιούν τα δεδομένα εισόδου με βάση τις μεταβλητές με τη μεγαλύτερη συσχέτιση με την έξοδο. Τα γραμμικά επίπεδα αναλύουν την επίδραση κάθε μεταβλητής στην έξοδο και δημιουργούν νευρώνες RBF με διαφορετικό εύρος (multi width) που καταγράφουν σε τοπικό επίπεδο το πρόβλημα. Κατά αυτόν τον τρόπο η αβεβαιότητα από τις ΑΠΚ ελαχιστοποιείται. Το MLRBFNN δημιουργείται από μόνο του και εκπαιδεύεται σε πραγματικό χρόνο όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, προσαρμόζοντας εκ νέου τις παραμέτρους.

Το μοντέλο πρόβλεψης για την εκτίμηση της παραγωγή των φωτοβολταϊκών καθώς και των διαστημάτων εμπιστοσύνης, λαμβάνει ως εισόδους τις χρονοσειρές της ηλιακής ισχύος, τις ΑΠΚ και στατικά δεδομένα, όπως η εγκατεστημένη ισχύς μιας φωτοβολταϊκής μονάδας. Τα αποτελέσματα από αυτή τη διαδικασία μπορούν να μετατραπούν σε μη παραμετρικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας και να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι για την πιθανοτική ροή φορτίου. Επιπλέον μπορούν να αξιοποιηθούν για τη βελτίωση της εποπτείας των δικτύων, για τη διαχείριση συμφόρησης της γραμμής και την πρόβλεψη παραβιάσεων στα όρια τάσης, για τον υπολογισμό των μονάδων ανανεώσιμων πηγών που μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο, καθώς και για τον σχεδιασμό στρατηγικών ελέγχου των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (π.χ. κατάλληλα set-points). Τα τέσσερα επίπεδα του ML-RBFNN περιγράφονται παρακάτω:

- Ομαδοποίηση των δεδομένων εισόδου σε συστάδες (clusters)

Το ML-RBFNN εκπαιδεύεται συνεχώς σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας κάθε στάδιο εκπαίδευσης ένα ζεύγος διανυσμάτων  $\{x_m, y\}$ . Το διάνυσμα  $x_m$  αποτελείται από  $m$  το πλήθος μεταβλητές εισόδου ενώ το  $y$  είναι η παραγωγή των φωτοβολταϊκών. Το πρώτο επίπεδο του ML-RBFNN χωρίζει τα δεδομένα εισόδου σε πολλαπλές συστάδες. Οι συστάδες σχηματίζονται με



βάση τις πιο σημαντικές μεταβλητές του προβλήματος, όπως για παράδειγμα η ώρα της μέρας και ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης. Οι RBF έχουν τη μορφή

$$f_1 = e^{-\sum(|c_m - x_m|^2 / r_m^2)} \quad (1)$$

όπου  $C_m$  και  $r_m$  είναι το κέντρο και η ακτίνα των RBF που αντιστοιχούν σε μια συστάδα. Η τιμή της συνάρτησης  $f_1$  πρέπει να εξαρτάται μόνο από τις σημαντικές μεταβλητές. Για το λόγο αυτό, οι ακτίνες  $r_m$  των μεταβλητών που μας ενδιαφέρουν ρυθμίζονται με ένα κατάλληλο κλάσμα του εύρους των τιμών της σημαντικής μεταβλητής ενώ οι ακτίνες των λιγότερων σημαντικών μεταβλητών θα πρέπει να έχουν τουλάχιστον διπλάσιο του εύρους τιμών. Έτσι, ο αριθμός των συστάδων που επηρεάζονται από τις επιλεγμένες μεταβλητές μπορεί να ελεγχθεί, δίνοντας την κατάλληλη τιμή στην ακτίνα τους.

Κάθε συστάδα του πρώτου επιπέδου συνδέεται με μια ομάδα από RBFs του δευτέρου επιπέδου. Ένα καινούργιο διάνυσμα εισόδου που εισάγεται μπορεί να ενεργοποιήσει πολλές συστάδες. Μόλις ενεργοποιηθεί μια συστάδα στο πρώτο επίπεδο, η ακόλουθη διαδικασία εκπαίδευσης εκτελείται στην αντίστοιχη ομάδα RBF του δευτέρου επιπέδου.

- Η μνήμη του ML-RBFNN

Το δεύτερο επίπεδο ML-RBFNN αποτελείται από ομάδες RBF, που κάθε μια αντιστοιχεί σε μια συστάδα του πρώτου επιπέδου. Οι μεταβλητές εισόδου κανονικοποιούνται στο διάστημα  $[0,1]$ . Στη συνέχεια υπολογίζεται το συμπληρωματικό μέρος των μεταβλητών και προστίθενται στο διάνυσμα εισόδου  $x_m$ . Άρα το διάνυσμα εισόδου του δεύτερου επιπέδου είναι της μορφής

$$X_M = [x_m, x_m^c] \quad (2)$$

Μέσα από αυτή την κωδικοποίηση, επιτυγχάνεται μια καλύτερη ανάλυση των μεταβλητών εισόδου απαλείφοντας την συμμετρία των RBF. Οι RBF που χρησιμοποιούνται στο δεύτερο επίπεδο είναι της μορφής:

$$f_2 = e^{-\sum(\|c_{j,M} - \min(X_M, c_{j,M})\| / r_{j,M})} \quad (3)$$

όπου  $c_{i,M}$  και  $r_{i,M}$  είναι το κέντρο και η ακτίνα του j-οστού RBF και M είναι ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου του δευτέρου επιπέδου και ισούται με 2m.

Στο δεύτερο (κρυμμένο) επίπεδο RBF, εισάγεται μια μεταβλητή  $v_j$  που λειτουργεί ως κατώτατο όριο ενεργοποίησης του νευρώνα, καθώς καθορίζει αν ο νευρώνας θα συμμετέχει στη διαδικασία πρόβλεψης. Εάν η τιμή της  $f_2$  είναι μικρότερη από  $v_j$ , τότε ο νευρώνας απενεργοποιείται. Οι πληροφορίες εισόδου αποθηκεύονται σε διαφορετικά σύνολα στοιχείων, που αντιστοιχούν στις ενεργοποιημένες συστάδες.

Κάθε ενεργοποιημένη συστάδα δημιουργεί μία πρόβλεψη και υπολογίζεται το σφάλμα  $e$ . Εάν το γινόμενο του λάθους  $e$  με την ενεργοποίηση των συστάδων  $f_1$  είναι μεγαλύτερο από μια σταθερά  $e_i$ , αρχίζει η διαδικασία εκπαίδευσης των συστάδων. Η σταθερά  $e_i$  τίθεται ίση με το μισό του μέσου απόλυτου σφάλματος που αναμένεται στο πρώτο βήμα της πρόβλεψης. Όλες οι ενεργοποιημένες συστάδες του πρώτου επιπέδου εκτελούν τον παραπάνω έλεγχο. Επομένως, αν η ακόλουθη δήλωση είναι αληθής

$$f_1 * e \geq e_i \quad (4)$$

τότε ένας γενετικός αλγόριθμος εκτελείται προκειμένου να καθοριστεί η βέλτιστη ακτίνα  $r_{j,m}$  του RBF. Ο εφαρμοζόμενος γενετικός αλγόριθμος έχει σκοπό την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης

$$E = \sum_{n=1}^{N_k} W_n * f_{1,n} * e_n^2 \quad (5)$$

όπου  $N_k$  ο αριθμός των δειγμάτων που έχουν ενεργοποιήσει τη συστάδα  $n$ ,  $f_{1,n}$  η ενεργοποίηση συστάδων για κάθε δείγμα στο σύνολο δεδομένων,  $e_n$  είναι το προβλεπόμενο σφάλμα της ενεργοποιημένης συστάδας και  $W_n$  είναι η μήτρα βάρους που υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$W_n = \lambda^{n-1} \quad (6)$$

Όπου  $\lambda$  είναι ο παράγοντας λήθης και τίθεται ίσος με 0,99.

Η ακτίνα  $r_{j,m}$  που λαμβάνεται από το γενετικό αλγόριθμο διαφέρει για κάθε νευρώνα και για κάθε μεταβλητή εισόδου. Η πληροφορία κρατείται από τον ML-RBFNN όταν η ακτίνα  $r_{j,m}$  είναι μικρή, αλλιώς απορρίπτεται. Εάν εξακολουθεί να ισχύει η σχέση (4), ένας νέος νευρώνας προστίθεται στην ενεργοποιημένη συστάδα και αρχίζει μια νέα διαδικασία βελτιστοποίησης.

Η γενίκευση του ML-RBFNN εξασφαλίζεται από την ορθογώνια μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (Orthogonal Least Squares – OLS) που εφαρμόζεται μαζί με το Μπεϋσιανό κριτήριο πληροφορίας (Bayesian Information Criterion - BIC) και τη γενικευμένη αντί-επικύρωση (generalized Cross Validation).

- Υπολογισμός πρόβλεψης κάθε συστάδας

Στο τρίτο επίπεδο του ML-RBFNN, οι πληροφορίες που εξάγονται από τις RBF μιας συστάδας για το δεύτερο επίπεδο, συνδυάζονται σε μια γραμμική συνάρτηση της μορφής

$$P_k = A_{k,j} * f_{2,j} \quad (7)$$

όπου  $f_{2,j}$  είναι οι ενεργοποιήσεις των RBF νευρώνων που αντιστοιχούν στη συστάδα  $k$  και  $P_k$  η πρόβλεψη για τη συστάδα αυτή. Οι παράμετροι  $A_{k,j}$  υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τα ελάχιστα τετραγωνικά βάρη (Weighted Least Squares – WLS) που περιγράφονται από την εξίσωση

$$A_{k,j} = (f_{2,j,n} * W_n * f_{1,n} * f_{2,j,n})^{-1} * f_{2,j,n} * W_n * f_{1,n} * y_n \quad \forall n \in \{1..N_k\} \quad (8)$$

- Υπολογισμός τελικής πρόβλεψης κάθε συστάδας του ML-RBFNN

Η τελική πρόβλεψη του ML-RBFNN επιτυγχάνεται μέσα από μια γραμμική εξίσωση που είναι της μορφής

$$P = B_k * P_k \quad (9)$$

όπου  $B_k$  οι συντελεστές που υπολογίστηκαν από την μέθοδο των αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων (Recursive Least Squares – RLS), λόγω της ευαισθησίας που εμφανίζει η συγκεκριμένη μέθοδος στις γρήγορες αλλαγές ενός μη γραμμικού συστήματος.

Οι συντελεστές  $B_k$  υπολογίστηκαν ως εξής:

$$C_n = \frac{1}{\lambda} \left( C_{n-1} - \frac{C_{n-1} P_{k,n}^T P_{k,n} C_{n-1}}{\lambda_n + P_{k,n} C_{n-1} P_{k,n}^T} \right) \quad (10)$$

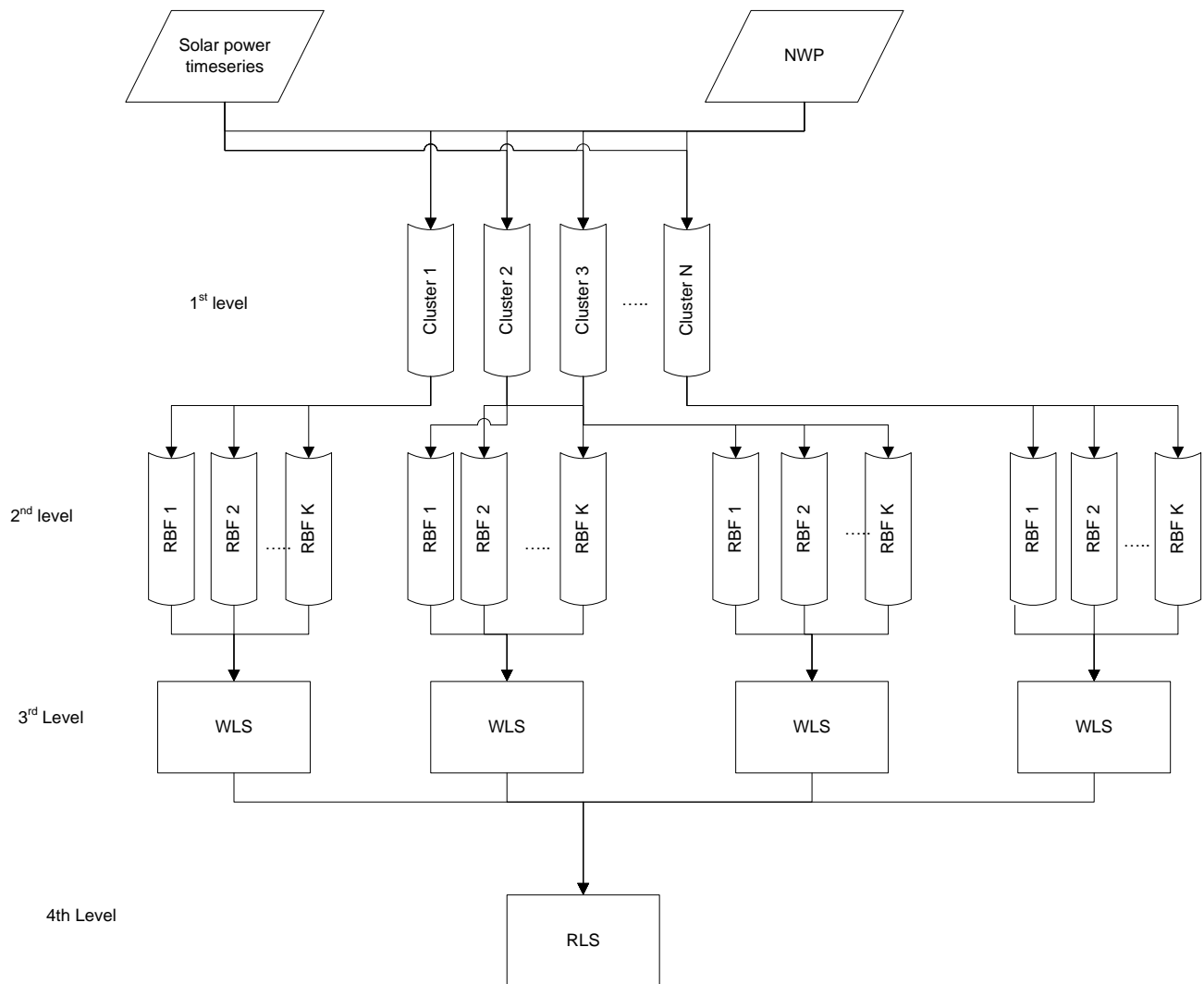
$$e_n = y_n - B_{k,n-1} P_{k,n} \quad (11)$$

$$B_{k,n} = B_{k,n-1} + C_n P_{k,n}^T e_n \quad (12)$$

όπου  $C_n$  είναι η μήτρα συνδιακύμανσης.

Συμπερασματικά λοιπόν, το νευρωνικό δίκτυο ML-RBFNN αυτό-προσαρμόζεται κάθε φορά που είναι διαθέσιμα νέα δεδομένα. Αρχικά, δημιουργεί πολλαπλές συστάδες δεδομένων εισόδου. Κάθε διάνυσμα εισόδου ενεργοποιεί περισσότερες από μια συστάδες, έτσι ώστε οι πληροφορίες που περιέχονται να αποθηκεύονται σε διαφορετικά τμήματα του δικτύου, προκειμένου να αντιμετωπίζονται διαφορετικά σε μελλοντικές καταστάσεις. Για κάθε συστάδα, δημιουργούνται πολλαπλοί νευρώνες στο κρυμμένο επίπεδο. Το κέντρο των RBF είναι ένα διάνυσμα εισόδου που αντιστοιχεί σε μια τυπική κατάσταση του προβλήματος. Επειδή δεν είναι χρήσιμες όλες οι συλλεγόμενες πληροφορίες, σ' αυτές που δεν χρειάζονται τίθεται μια μεγάλη ακτίνα προκειμένου να μην επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα. Για να καθοριστεί ποιες πληροφορίες πρέπει να αξιοποιηθούν, εφαρμόζεται ένας γενετικός αλγόριθμος και ένα κατώφλι ενεργοποίησης στους RBF νευρώνες ώστε να βελτιωθεί η απόδοσή τους. Τέλος, η γενίκευση του δικτύου ελέγχεται μέσω των OLS.

Παρακάτω φαίνεται η δομή του παραπάνω μοντέλου:



**Σχήμα 9: Δομή προτεινόμενου μοντέλου**

## 2.2.ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΖΗΤΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Το μοντέλο πρόβλεψης της ζήτησης φορτίου περιλαμβάνει τέσσερις μονάδες πρόβλεψης που δέχονται ως εισόδους χρονοσειρές της ζήτησης φορτίου και των μέγιστων ημερήσιων τιμών της θερμοκρασίας. Οι τέσσερις μονάδες εκπαιδεύονται με διαφορετικά δεδομένα και παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα για κάθε ώρα. Οι δυο πρώτες μονάδες είναι σχεδιασμένες για να παρέχουν προβλέψεις για την επόμενη μέρα, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της προηγούμενης μέρας. Οι άλλες δύο μονάδες πρόβλεψης εκτελούνται επαναληπτικά και παράγουν ωριαία

αποτελέσματα προβλέψεων για την επόμενη μέρα, χρησιμοποιώντας τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα δεδομένα. Έτσι, οι δυο πρώτες μονάδες αποδίδουν καλύτερα στις μακροπρόθεσμες προβλέψεις και οι δύο τελευταίες αποδίδουν καλύτερα σε βραχυπρόθεσμους ορίζοντες πρόβλεψης. Οι προβλέψεις των τεσσάρων μονάδων συνδυάζονται με τον αναδρομικό αλγόριθμο των ελαχίστων τετραγώνων, παράγοντας την τελική πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου. Όπως με την πρόβλεψη ΑΠΕ, έτσι και σε αυτή την περίπτωση, οι προβλέψεις της ζήτησης φορτίου μετασχηματίζονται σε συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας.

[9],[11]

### 2.3.ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

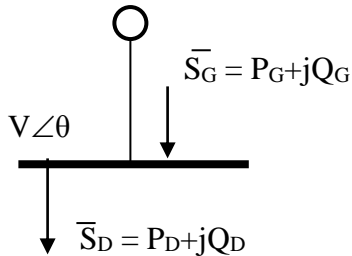
Ένα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) έχει σκοπό να προμηθεύει τα διασυνδεδεμένα φορτία με πραγματική και άεργο ισχύ. Η ροή της ισχύος ή φορτίου στο δίκτυο για την τροφοδότηση της ζήτησεως, αποτελεί την χαρακτηριστικότερη εκδήλωση της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας για ένα ΣΗΕ. Επιπλέον, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η συχνότητα και η τάση στους διαφόρους ζυγούς θα βρίσκονται μέσα σε προδιαγεγραμμένα όρια παρά το γεγονός ότι τα φορτία συχνά μεταβάλλονται απρόβλεπτα. Στα δίκτυα που λειτουργούν ακτινικά, η ροή της ισχύος είναι καθορισμένη και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα προβλήματα. Όμως στα διασυνδεδεμένα δίκτυα μεταφοράς και σε περιπτώσεις όπου η διείδυση διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής είναι μεγάλη, η κατανομή των ροών ισχύος έχει πολύ μεγάλη τεχνική και οικονομική σημασία. Έτσι, η μελέτη της ροής φορτίου σε ένα σύστημα είναι απαραίτητη για την καθημερινή λειτουργία του, την επέκτασή του, την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής καθώς και για τη διασύνδεσή του με άλλα συστήματα.

Προς την κατεύθυνση αυτή, το πρόβλημα των ροών φορτίου συνίσταται στον προσδιορισμό των μεταβλητών του συστήματος (ισχύων, ρευμάτων, τάσεων), σε μια δεδομένη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια ορισμένη εικόνα φορτίων, μια αντίστοιχη εικόνα παραγόμενης ισχύος και αντίστοιχη εικόνα τάσεων και ροών στο δίκτυο. Κάθε διαφορετική εικόνα φορτίων ή ροών, συνιστά μια άλλη κατάσταση λειτουργίας και περιγράφεται από άλλες τιμές μεταβλητών.

Πλέον, η ανάλυση ροών φορτίου γίνεται με τη χρήση υπολογιστών που επιτρέπουν την ανάλυση δικτύων με πολυάριθμους κόμβους και διασυνδέσεις, επιλέγοντας και την επιθυμητή μέθοδο ανάλυσης. Ο στόχος κάθε προγράμματος ανάλυσης ροής φορτίου είναι να παράγει σε μια δεδομένη κατάσταση λειτουργίας τις παρακάτω πληροφορίες:

- Το μέτρο της τάσης και τη φασική γωνία σε κάθε ζυγό.
- Την ενεργό και άεργο ισχύ που ρέει σε κάθε στοιχείο.
- Την άεργο ισχύ φόρτισης κάθε γεννήτριας

Θεωρώντας τη γενική περίπτωση ενός ζυγού του συστήματος, με παραγωγή και φορτίο, που εκφράζονται ως ισχύεις, διακρίνουμε τα ακόλουθα μεγέθη, όπως φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



$P_G$  : Παραγόμενη ενεργός ισχύς

$Q_G$  : Παραγόμενη άεργος ισχύς

$P_D$  : Ενεργός ισχύς φορτίου

$Q_D$  : Άεργος ισχύς φορτίου

$V$  : Τάση ζυγού (μέτρο)

$\delta$  : Γωνία (τάσεως) ζυγού

### Σχήμα 10: Χαρακτηριστικά ηλεκτρικά μεγέθη ζυγού

Τα ηλεκτρικά αυτά μεγέθη αποτελούν τις μεταβλητές του προβλήματος και είναι έξι ανά ζυγό. Σε ένα σύστημα με  $N$  ζυγούς υπάρχουν συνολικά  $6N$  μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες. Τα φορτία, ή μεταβλητές ζήτησεως ( $P_D$ ,  $Q_D$  είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος και χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές διαταραχής. Οι ισχύεις παραγωγής ( $P_G$ ,  $Q_G$ ) χαρακτηρίζονται σαν μεταβλητές ελέγχου και οι τάσεις και οι γωνίες των ζυγών, οι οποίες είναι οι εξαρτημένες μεταβλητές, χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές καταστάσεως.

Η συνισταμένη ισχύς του ζυγού δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{S} = \bar{S}_G - \bar{S}_D = P_G - P_D + j(Q_G - Q_D) \quad (13)$$

Αντίστοιχα, ορίζεται το ρεύμα ζυγού:

$$\bar{J} = \frac{\bar{S}^*}{\bar{V}^*} = \frac{\bar{S}_G^* - \bar{S}_D^*}{\bar{V}^*} = \bar{J}_G - \bar{J}_D = \frac{P_G - P_D - j(Q_G - Q_D)}{\bar{V}^*} = \frac{P - jQ}{\bar{V}^*} \quad (14)$$

Για την πραγματοποίηση της μελέτης ροής φορτίου ορίζουμε τρεις τύπους ζυγών:

- Ζυγοί φορτίου (PQ), στους οποίους είναι γνωστές οι ισχύεις ζήτησεως ή φορτίου και άγνωστη είναι η τάση (κατά μέγεθος και γωνία).

- Ζυγοί παραγωγής (PV), στους οποίους είναι γνωστά, η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσεως και προσδιορίζονται η άεργος ισχύς και η γωνία της τάσεως
- Ζυγός ταλαντώσεως ή ζυγός αναφοράς, ο οποίος είναι ζυγός παραγωγής και επιβάλλεται σε αυτόν σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία ενώ προσδιορίζονται οι ισχύεις παραγωγής. Ο ζυγός αναφοράς χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει τις απώλειες του δικτύου, που δεν είναι γνωστές εξ' αρχής και γενικά για άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος.

Η μαθηματική ανάλυση καταλήγει στη διαμόρφωση ενός συστήματος  $2N$  μη γραμμικών εξισώσεων, όπου  $N$  ο αριθμός των κόμβων (ζυγών) του δικτύου. Θεωρούμε ένα αντιπροσωπευτικό ζυγό του συστήματος, με ισχύ ζυγού και συμβολές γραμμών μεταφοράς. Οι γραμμές μεταφοράς παριστάνονται με το ισοδύναμο  $\Pi$  με ανηγμένες παραμέτρους και τα φορτία θεωρούνται συμμετρικά. Οι εγκάρσιες αγωγιμότητες προς τη γη των γραμμών μεταφοράς συγκεντρώνονται στους ζυγούς, οπότε για το θεωρούμενο ζυγό θα είναι:

$$Y_{io} = \sum_{j=1}^N Y_{ij} \quad (15)$$

Εάν  $Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{iN}$ , είναι οι αγωγιμότητες σειράς των γραμμών οι οποίες συνδέονται στο ζυγό  $i$  και  $V_1, V_2, \dots, V_N$ , οι τάσεις προς τη γη των ζυγών του δικτύου, τότε:

$$y_{ii} = Y_{io} + \sum_{j \neq i}^N Y_{ij} \quad (16)$$

και  $y_{ij} = -Y_{ij} = -Y_{ji} \quad (17)$

Επομένως, η εξίσωση των ρευμάτων στο ζυγό γράφεται:

$$\bar{J}_i = y_{i1} \bar{V}_1 + y_{i2} \bar{V}_2 + \dots + y_{ii} \bar{V}_i + \dots + y_{iN} \bar{V}_N = \sum_{j=1}^N y_{ij} \bar{V}_j \quad (18)$$

Ή σε μορφή μήτρας :

$$\begin{bmatrix} \bar{J}_1 \\ \bar{J}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{J}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1N} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ y_{N1} & y_{N2} & \dots & y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{V}_N \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\text{ή} \quad [Jz] = [Yz] [Vz] \quad (20)$$

όπου  $[Jz]$ ,  $[Vz]$ , τα διανύσματα ρευμάτων και τάσεων ζυγών, διαστάσεων  $N$ ,  $[Yz]$ , η μήτρα αγωγιμοτήτων ζυγών του συστήματος, διαστάσεων  $N \times N$ , με μιγαδικά στοιχεία.

Όμως ισχύει ότι:

$$\bar{J}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{V}_i^*} \quad (21)$$

Οπότε η εξίσωση ροών φορτίου γίνεται:

$$P_i - jQ_i = y_{i1} \bar{V}_1 \bar{V}_i^* + y_{i2} \bar{V}_2 \bar{V}_i^* + \dots + y_{ii} \bar{V}_i \bar{V}_i^* + \dots + y_{iN} \bar{V}_N \bar{V}_i^* = \bar{V}_i^* \sum_{j=1}^N y_{ij} \bar{V}_j \quad (22)$$

Χωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, προκύπτουν δύο εξισώσεις της μορφής:

$$P_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^N |V_j| \cdot [g_{ji} \cdot \cos(\delta_j - \delta_i) - b_{ji} \cdot \sin(\delta_j - \delta_i)] \quad (23)$$

$$-Q_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^N |V_j| \cdot [g_{ji} \cdot \sin(\delta_j - \delta_i) + b_{ji} \cdot \cos(\delta_j - \delta_i)] \quad (24)$$



όπου  $y_{ji} = g_{ji} + jb_{ji}$ .

Η αντιστροφή της εξίσωσης (20) δίνει την εξίσωση:

$$[Vz] = [Zz] [Jz] \quad (25)$$

όπου

$$[Zz] = [Yz]^{-1} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1N} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{N1} & \dots & \dots & z_{NN} \end{bmatrix} \quad (26)$$

η μήτρα σύνθετων αντιστάσεων ζυγών, επίσης με μιγαδικά στοιχεία.

Συνεπώς, για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας  $N$  ζυγών, έχουμε  $2N$  εξισώσεις ροών φορτίου. Οι εξισώσεις είναι αλγεβρικές, εφ' όσον αναφέρονται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και μη γραμμικές, γεγονός που κάνει προτιμότερη την αριθμητική επίλυση με ψηφιακό υπολογιστή.

Μια από τις ψηφιακές μεθόδους για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου είναι η μέθοδος Newton – Raphson. Η μέθοδος αυτή απαιτεί στην επίλυση την κατάστρωση των εξισώσεων που περιγράφουν το πρόβλημα σαν σύστημα  $F(x) = 0$ . Έστω λοιπόν το προς επίλυση σύστημα :

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \quad (27)$$

και  $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$  η αρχική λύση. Υποθέτουμε ότι  $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$  είναι οι διαφορές, οι οποίες προστιθέμενες στην αρχική λύση δίνουν την τελική λύση, της μορφής

$$x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)} \quad (28)$$

Παίρνοντας το ανάπτυγμα Taylor των εξισώσεων γύρω από τα σημεία  $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$  έχουμε:

$$f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) = f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} + \dots + \Delta x_n^{(0)} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \quad (29)$$

και καταστρώνουμε το γενικό σύστημα εξισώσεων

$$[\Delta f] = [J] [\Delta x] \quad (30)$$

όπου το διάνυσμα των διαφορών των συναρτήσεων είναι:

$$[\Delta f] = \begin{bmatrix} f_1(x_1(0) + \Delta x_1(0), x_2(0) + \Delta x_2(0), \dots, x_n(0) + \Delta x_n(0)) - f_1(x_1(0), x_2(0), \dots, x_n(0)) \\ \vdots \\ f_n(x_1(0) + \Delta x_1(0), x_2(0) + \Delta x_2(0), \dots, x_n(0) + \Delta x_n(0)) - f_n(x_1(0), x_2(0), \dots, x_n(0)) \end{bmatrix} \quad (31)$$

και το διάνυσμα διαφορών είναι

$$[\Delta x] = \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Η Ιακωβιανή μήτρα του συστήματος είναι:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Στην περίπτωση των ροών φορτίου οι μεταβλητές  $x$  και  $f$  παριστάνουν τα ακόλουθα μεγέθη:

$$[x] = \begin{bmatrix} -\frac{\delta_i}{|V_i|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_n \\ -\frac{\delta_n}{|V_1|} \\ \vdots \\ -\frac{\delta_1}{|V_n|} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\text{και } [x_0] = \begin{bmatrix} -\frac{\delta_{0,i}}{|V_{0,i}|} \end{bmatrix} \quad (35)$$

όπου  $[x]$  το διάνυσμα τελικής καταστάσεως και  $[x_0]$  το διάνυσμα αρχικών τιμών.

Οπότε, το διάνυσμα που περιέχει τις προσδιορισμένες τιμές των ισχύων  $P_S$  και  $Q_S$  είναι:

$$[f(x)] = \begin{bmatrix} -\frac{P_{Si}}{Q_{Si}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{S1} \\ \vdots \\ P_{Sn} \\ -\frac{P_{Sn}}{Q_{S1}} \\ \vdots \\ -\frac{P_{S1}}{Q_{Sn}} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\text{και } [f(x_0)] = \begin{bmatrix} -\frac{P_i}{Q_i} \end{bmatrix} \quad (37)$$

το διάνυσμα των κάθε φορά προσεγγίσεων.

Τα  $P$ ,  $Q$  υπολογίζονται κάθε φορά από τις προσεγγίσεις  $\delta_0$ ,  $|V_0|$  ενώ τα  $P_S$ ,  $Q_S$  είναι δεδομένα του προβλήματος ροής φορτίου.

Οι διορθώσεις των ζυγών κατάστασης είναι:

$$[\Delta x] = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta \delta_i}{|\Delta V_i|} \end{bmatrix} \quad (38)$$

ενώ τα σφάλματα των ζυγών:

$$[\Delta f(x)] = \begin{bmatrix} -\frac{P_{Si} - P_i}{Q_{Si} - Q_i} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Οπότε η ιακωβιανή μήτρα έχει τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \vdots & \frac{\partial P}{|\partial V|} \\ -\frac{\partial Q}{\partial \delta} & \vdots & -\frac{\partial Q}{|\partial V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & \vdots & J_2 \\ J_3 & \vdots & J_4 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Οι ισχύεις των ζυγών δίνονται συναρτήσει των μεταβλητών κατάστασης από τις σχέσεις:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^N y_{ij} V_j = |V_i^2| y_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^N V_i^* y_{ij} V_j \quad (41)$$

Και θεωρώντας ότι  $V_i = |V_i| \angle \delta_i$  και  $y_{i,j} = |y_{i,j}| \angle -\theta_{ij}$ , έχουμε:

$$P_i = |V_i^2 y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N |V_i y_{ij} V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (42)$$

$$Q_i = |V_i^2 y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N |V_i y_{ij} V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (43)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τις μερικές παραγώγους που αποτελούν τα στοιχεία της Ιακωβιανής. Για κάθε υπομήτρα ( $J_1 - J_4$ ) υπολογίζουμε χωριστά τα διαγώνια και τα μη διαγώνια στοιχεία, λόγω των σχέσεων (42), (43).

$$J1_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_i V_j y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (44)$$

$$J1_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -\sum_{j \neq i} |V_i V_j y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = -Q_i + |V_i^2 y_{ii}| \sin \theta_{ii}, j \neq i \quad (45)$$

$$J2_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = |V_i y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (46)$$

$$J2_{ii} = \frac{\partial P_i}{|\partial V_i|} = 2|V_i y_{ii}| \cos \delta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_i y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = |V_i y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \frac{P_i}{|V_i|}, j \neq i \quad (47)$$

$$J3_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (48)$$

$$J3_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i V_j y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = P_i - |V_i^2 y_{ii}| \cos \theta_{ii}, j \neq i \quad (49)$$

$$J_{4ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = |V_i y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (50)$$

$$J_{4ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = 2|V_i y_{ii}| \sin \delta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = |V_i y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \frac{Q_i}{|V_i|}, j \neq i \quad (51)$$

Οι πλήρεις διαστάσεις της Ιακωβιανής μήτρας για ένα σύστημα N ζυγών είναι (2N)x(2N). δε χρειάζεται όμως να υπολογιστούν όλες οι παράμετροι γιατί στο ζυγό αναφοράς το μέτρο και η γωνία της τάσης είναι γνωστά και στους ζυγούς παραγωγής είναι γνωστά τα μέτρα των τάσεων και άγνωστα τα Q<sub>s</sub>.

Έτσι, αριθμώντας τους ζυγούς ώστε ο ζυγός 1 να είναι ζυγός ταλάντωσης, οι ζυγοί 2 έως m ζυγοί παραγωγής και οι ζυγοί m+1 έως N ζυγοί φορτίου, η Ιακωβιανή που χρειάζεται είναι:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] & \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right] \\ \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] & \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$\Delta P = \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \cdot \Delta \delta + \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right] \cdot \Delta V \quad (53)$$

$$\Delta Q = \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \cdot \Delta \delta + \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right] \cdot \Delta V \quad (54)$$

$$\Delta \delta = (\Delta P - \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right] \cdot \Delta V) \cdot \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right]^{-1} \quad (55)$$

$$\Delta V = \left( \Delta Q - \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \cdot \Delta \delta \right) \cdot \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right]^{-1} \quad (56)$$

Από τη σχέση (55) βρίσκονται όλες οι γωνίες των ζυγών Δδ , ενώ από τη σχέση (56) βρίσκεται το ΔV για ζυγούς με P, Q γνωστά.

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου Newton – Raphson είναι ο τετραγωνικός ρυθμός σύγκλισης, ο οποίος είναι ταχύτερος κάθε άλλης μεθόδου. Επίσης είναι μια πολύ αξιόπιστη μέθοδος που δεν επηρεάζεται από παράγοντες όπως η επιλογή του ζυγού ταλαντώσεως ή μικρές επαγωγικές αντιδράσεις μεταξύ των ζυγών. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αναγκαιότητα διαμόρφωσης και αντιστροφής της Ιακωβιανής μήτρας σε κάθε ανακύκλωση. Ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εφαρμόζεται μόνο σε κοίλες συναρτήσεις και ότι συγκλίνει στη

λύση που βρίσκεται πλησιέστερα στην αρχική τιμή. Αποδεικνύεται θεωρητικά ότι το πρόβλημα της ροής φορτίου έχει διπλάσιο αριθμό πιθανών λύσεων από τον αριθμό των κόμβων του δικτύου. Στην πράξη όμως η σωστή λύση είναι διακριτή και επιτυγχάνεται πάντοτε ή η λύση αποκλίνει.

Ένας συνοπτικός αλγόριθμος της μεθόδου Newton – Raphson που μπορεί να δοθεί είναι ο ακόλουθος:

1. Δίνονται οι αρχικές τιμές στα  $|V|$  και  $\delta$ , όπου αυτά δεν είναι καθορισμένα.
2. Υπολογίζονται οι ισχύεις των ζυγών από τις εξισώσεις (42),(43). Είναι γνωστά τα  $P$  για όλους τους ζυγούς (πλην του ζυγού αναφοράς) και τα  $Q$  για τους ζυγούς φορτίου. Συνεπώς χρειάζεται ο υπολογισμός των  $P_2, \dots, P_N$  και μόνο των  $Q_{m+1}, \dots, Q_N$  που θα δώσουν τις αποκλίσεις  $[\Delta P]$  και  $[\Delta Q]$  που χρειάζεται η (52).
3. Υπολογίζεται η Ιακωβιανή από τις σχέσεις (44)– (51).
4. Επιλύεται το σύστημα (52) και υπολογίζονται οι αποκλίσεις  $[\Delta V]$  και  $[\Delta \delta]$ .
5. Αν οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες από τα όρια ανοχής, επανερχόμαστε στο βήμα (2).
6. Μετά την σύγκλιση των αποτελεσμάτων υπολογίζονται τα  $P$  και  $Q$  του ζυγού αναφοράς και κατόπιν οι ροές φορτίου στις γραμμές. [3]

## 2.4.ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η πιθανοτική ροή φορτίου είναι μία μέθοδος επίλυσης προβλημάτων ροής φορτίου που λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα και τη στατιστική φύση των δεδομένων μεγεθών, δηλαδή των φορτίων και της παραγωγής, και υπολογίζει τα άγνωστα μεγέθη ως τυχαίες μεταβλητές με μία μέση τιμή, τυπική απόκλιση και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Είναι ένας τρόπος υπολογισμού όλων των πιθανών καταστάσεων του συστήματος, που αντιστοιχούν σε όλες τις δυνατές στατιστικές μεταβολές των φορτίων και της παραγωγής μέσω μίας μόνο ανάλυσης ροής φορτίου. Σκοπός της πιθανοτικής ροής φορτίου είναι ο υπολογισμός των τάσεων και της ροής ισχύος λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές τιμές της ζήτησης φορτίου και της παραγωγής φωτοβολταϊκών με τις αντίστοιχες πιθανότητες.

Οι είσοδοι που απαιτούνται είναι η τοπολογία του δικτύου, η καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας της ζήτησης φορτίου ανά ώρα και η καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας των στοχαστικών πηγών (π.χ. φωτοβολταϊκών) ανά ώρα για όλο το διάστημα πρόβλεψης (24 ή 48 ώρες). Στην περίπτωση που οι καμπύλες ακολουθούν κάποια γνωστή κατανομή ως είσοδοι απαιτούνται τα χαρακτηριστικά μεγέθη της συγκεκριμένης κατανομής. Για παράδειγμα στην περίπτωση που η παραγωγή των φωτοβολταϊκών ακολουθεί την κανονική κατανομή ως είσοδοι απαιτούνται η μέση τιμή και η διακύμανση της κανονικής κατανομής. Η διακύμανση μπορεί να δίνεται ως απόλυτη τιμή ή ως ποσοστό επί τοις εκατό της μέσης τιμής.

Οι έξοδοι που προκύπτουν από την εκτέλεση της πιθανοτικής ροής φορτίου είναι η πιθανοτική κατανομή των τάσεων όλων των ζυγών και της ροής ισχύος όλων των γραμμών ανά ώρα. Οι τάσεις δίνονται στο ανά μονάδα σύστημα, ενώ η φόρτιση των γραμμών δίνεται σε ποσοστό επί τοις εκατό της ονομαστικής τους χωρητικότητας. Ανάλογα με το πόσες ώρες μπροστά γίνεται η πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου και της παραγωγής των πηγών (24 ή 48 ώρες) θα υπολογίζεται και η πιθανοτική κατανομή των τάσεων όλων των ζυγών και της ροής ισχύος όλων των γραμμών που θα αντιπροσωπεύει την πιθανή κατάσταση τους για όλο το διάστημα πρόβλεψης.

Το πρόβλημα της ροής φορτίου μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από δύο μη γραμμικές εξισώσεις:

$$Y = g(X) \quad (57)$$

$$Z = h(X) \quad (58)$$

όπου το  $Y$  αντιστοιχεί στο διάνυσμα εισόδου, που έχει τις τιμές της εγχεόμενης ενεργού και αέργου ισχύος σε κάθε κόμβο, το  $X$  αντιστοιχεί στο διάνυσμα κατάστασης, το οποίο δίνει τα πλάτη και τις γωνίες των τάσεων, και το  $Z$  αντιστοιχεί στο διάνυσμα εξόδου, που δίνει τις τιμές ενεργού και αέργου ισχύος, τις απώλειες ισχύος, κλπ.

Έστω  $Y_0$  η αναμενόμενη τιμή της τυχαίας μεταβλητής εισόδου  $Y$  και  $X_0$  τέτοιο ώστε να ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση

$$Y_0 = g(X_0) \quad (59)$$

Ομοίως και για το  $Z_0$  :

$$Z_0 = h(X_0) \quad (60)$$

Η γραμμικοποίηση των εξισώσεων (59) και (60) σε ανάπτυγμα σειράς Taylor γύρω από τα σημεία  $(Y_0, X_0)$  και  $(Z_0, X_0)$  δίνει:

$$Y \approx Y_0 + J(X - X_0) \quad (61)$$

$$Z \approx Z_0 + K(X - X_0) \quad (62)$$

όπου  $J$  και  $K$  οι ιακωβιανές μήτρες.

Οι σχέσεις (61) και (62) εκφράζουν την κατάσταση και τα διανύσματα εξόδου ως γραμμικούς συνδυασμούς των μεταβλητών εισόδου όταν δίνεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Θεωρώντας ότι οι μεταβλητές εισόδου είναι ανεξάρτητες, μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές συνέλιξης. Στη συνήθη περίπτωση που αφορά παραγωγή φωτοβολταϊκών από την ίδια τροφοδότηση, οι μεταβλητές εισόδου είναι εξαρτημένες, οπότε πρέπει να μετατραπούν σε εκφράσεις ισοδύναμων ανεξάρτητων μεταβλητών. [10],[11]

## 2.5.ΔΕΝΤΡΑ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Τα δέντρα αποφάσεων αποτελούν μια μη παραμετρική τεχνική εκμάθησης, που παράγει κανόνες κατηγοριοποίησης για μια γνωστή κατάσταση προκειμένου να παρέχει πληροφορίες για μη μελετημένες ή άγνωστες καταστάσεις. Το δέντρο απόφασης έχει τη δομή ενός ανάποδα κατασκευασμένου δέντρου. Η κατασκευή του στηρίζεται σε μια βάση δεδομένων (Knowledge Base – KB) που αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό λειτουργικών καταστάσεων (Operating Points – OPs) , καλύπτοντας έτσι όλες τις πιθανές περιπτώσεις του υπό μελέτη συστήματος ώστε να εξασφαλιστεί η αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος. Κάθε λειτουργική κατάσταση χαρακτηρίζεται από ένα χαρακτηριστικό διάνυσμα, που καλείται attribute, το οποίο περιέχει τις μεταβλητές της κατάστασης πριν τη διαταραχή. Η βάση δεδομένων χωρίζεται σε ένα σύνολο εκμάθησης, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των κατηγοριοποιητών και σε ένα σύνολο δοκιμής, το οποίο χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της επίδοσης των κατηγοριοποιητών αυτών σε νέες, μη μελετημένες καταστάσεις. Η δομή ενός δέντρου απόφασης ξεκινά από τη ρίζα με όλες τις λειτουργικές καταστάσεις του συνόλου εκπαίδευσης. Αυτές οι λειτουργικές καταστάσεις αναλύονται ώστε να επιλεγθεί το κριτήριο διχοτόμησης  $T$ , το οποίο τις χωρίζει βέλτιστα σε δυο πιο «καθαρά» , αμοιβαία αποκλειόμενα υποσύνολα. Για ένα διαχωρισμό δύο κλάσεων (ασφαλής και μη ασφαλής κλάση), το κριτήριο διαχωρισμού ορίζεται ως

$$T: A_i < t \quad (63)$$

όπου  $t$  είναι το βέλτιστο κατώφλι διαχωρισμού του επιλεγμένου χαρακτηριστικού διανύσματος  $A_i$ . Η επιλογή του βέλτιστου κριτηρίου βασίζεται στη μεγιστοποίηση της επιπλέον πληροφορίας που απορρέει από το κριτήριο. Το κέρδος πληροφορίας βασίζεται στην εντροπία κάθε υποσυνόλου  $E_n$  και ορίζεται ως:

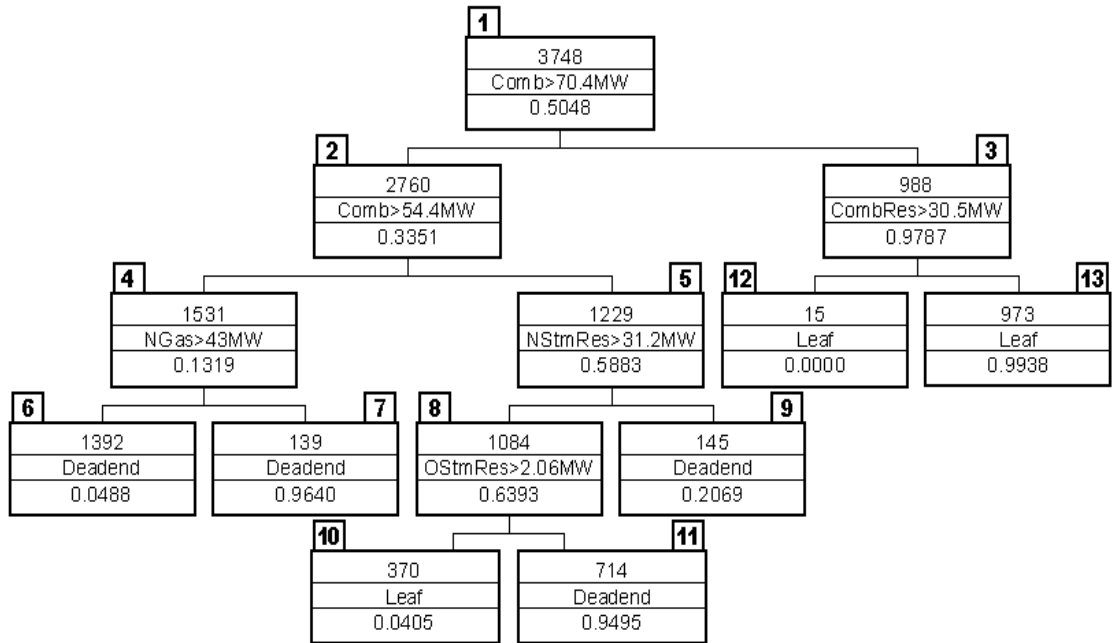
$$H_c(E_n) = -(f_s \log f_s + f_i \log f_i) \quad (64)$$

όπου  $f_s$  και  $f_i$  οι σχετικές συχνότητες εμφάνισης των αντίθετων λειτουργικών καταστάσεων, αντίστοιχα, όπως για παράδειγμα της ύπαρξης και της απουσίας ανάστροφης ροής.

Το επιλεγμένο κριτήριο εφαρμόζεται στο σύνολο εκπαίδευσης και το χωρίζει σε δύο υποσύνολα, που είναι τα παιδιά - διάδοχοι του παραπάνω κόμβου. Κάθε παιδί χαρακτηρίζεται από ένα δείκτη, ο οποίος δείχνει το ποσοστό ασφαλείας στην εκτίμηση των λειτουργικών καταστάσεων που ανήκουν στο νέο αυτό υποσύνολο. Κατά αυτόν τον τρόπο και εφαρμόζοντας επαναληπτικά τον βέλτιστο κάθε φορά κριτήριο διαχωρισμού, δημιουργούνται τα υπόδεντρα. Προκειμένου να διαπιστωθεί αν ένα υποσύνολο είναι «καθαρό» και δεν απαιτείται άλλος διαχωρισμός εξετάζεται αν η εντροπία του είναι μικρότερη από μια προκαθορισμένη ελάχιστη τιμή. Στην περίπτωση που ισχύει αυτό το κριτήριο, δηλαδή το υποσύνολο είναι «καθαρό», τότε είναι φύλλο, αλλιώς συνεχίζεται ο διαχωρισμός. Αν ένα σύνολο δε μπορεί να διαιρεθεί περαιτέρω, γιατί δε θα δώσει σημαντικά στατιστικά αποτελέσματα, χαρακτηρίζεται ως αδιέξοδο.



Στο παρακάτω σχήμα, στον πρώτο κόμβο απεικονίζεται το αρχικό σύνολο εκπαίδευσης για το διαχωρισμό κάποιων μονάδων παραγωγής. Στην πρώτη γραμμή φαίνεται το πλήθος των δεδομένων εκπαίδευσης, στη δεύτερη γραμμή είναι ο βέλτιστος κανόνας διαχωρισμού και στην τρίτη γραμμή το ποσοστό καθαρότητας του κόμβου αυτού. Παρατηρούμε ότι ο διαχωρισμός σταματά όταν ένα υποσύνολο χαρακτηριστεί ως φύλλο ή ως αδιέξοδο. [11],[12]



**Σχήμα 11: Παράδειγμα παραγωγής κανόνων από δέντρα αποφάσεων**



### 3. ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

---

#### 3.1.ΓΕΝΙΚΑ

Η απελευθέρωση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τις συνεχείς εξελίξεις στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών οδήγησε στην ανάπτυξη της διεσπαρμένης παραγωγής (distributed generation – DG ή distributed energy resources - DER), δηλαδή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα σημεία του δικτύου. Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι δεν είναι τοποθετημένες σε ένα συγκεκριμένο, κεντρικό, σημείο, αλλά βρίσκονται διασκορπισμένες στο σύστημα. Συνήθως τοποθετούνται στο δίκτυο διανομής και κοντά στο σημείο κατανάλωσης, ενώ κατά κανόνα οι δυνατότητες παραγωγής τους είναι από μερικά kW μέχρι περίπου 10MW. Υπάρχουν διάφοροι τύποι τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής:

- Μικροτουρμπίνες:

Είναι μικρές τουρμπίνες που παράγουν ισχύ μεταξύ 25 και 500 kW. Προήλθαν από τεχνολογίες που υπήρχαν σε μεγάλα φορτηγά ή στις τουρμπίνες αεροσκαφών.

- Τουρμπίνες εσωτερικής καύσης:

Παράγουν ισχύ μεταξύ 500 kW και 25 MW για DER, και χρησιμοποιούν φυσικό αέριο, πετρέλαιο ή συνδυασμό καυσίμων. Οι σύγχρονες τουρμπίνες έχουν αποδόσεις 20 έως 45% σε πλήρες φορτίο.

- Μηχανές εσωτερικής καύσης:

Μια μηχανή εσωτερικής καύσης μετατρέπει την ενέργεια που περιέχεται σε κάποιο καύσιμο σε μηχανική ενέργεια. Αυτή η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την περιστροφή ενός άξονα μέσα στη μηχανή. Μια γεννήτρια συνδέεται με τη μηχανή εσωτερικής καύσης για τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι διαθέσιμες από μικρά μεγέθη (5kW για εφεδρική γεννήτρια σε κατοικίες) μέχρι μεγάλες γεννήτριες (7 MW). Οι μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν διαθέσιμα καύσιμα όπως βενζίνη, φυσικό αέριο και diesel.

- Μηχανές Stirling:

Οι μηχανές Stirling έχουν κατηγοριοποιηθεί ως μηχανές εξωτερικής καύσης. Είναι σφραγισμένα συστήματα με ένα αδρανές αέριο που θέτει σε λειτουργία τη μηχανή, συνήθως ήλιο ή υδρογόνο. Συνήθως είναι διαθέσιμες σε μικρά μεγέθη (1-25 kW) και χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες εφαρμογές στη διαστημική και τη θαλάσσια βιομηχανία.

- **Κυψέλες καυσίμου:**

Τα συστήματα ισχύος με κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβα, καθαρά και αποδοτικά τοπικά συστήματα παραγωγής που χρησιμοποιούν μια ηλεκτροχημική διεργασία (όχι καύση) για τη μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρισμό. Είναι δυνατό να προσφέρουν, εκτός από την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, και θερμική ενέργεια για τη θέρμανση του χώρου και του νερού ή για ψύξη.

- **Αποθήκευση ενέργειας / Συστήματα UPS:**

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας δεν παράγουν καθαρή ενέργεια αλλά μπορούν να προμηθεύουν ηλεκτρική ενέργεια για μικρά χρονικά διαστήματα. Χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση πτώσεων τάσης, flicker και έντονης κυμάτωσης που συμβαίνουν όταν η εταιρία παροχής ή οι πελάτες αλλάζουν προμηθευτές ή φορτία. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως Συστήματα Αδιαλείπτου Τροφοδοσίας (UPS). Σαν τέτοια, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας θεωρούνται τεχνολογίες διασπαρμένης παραγωγής.

- **Φωτοβολταϊκά Συστήματα:**

Τα φωτοβολταϊκά, ή ηλιακά, κελιά (PV) μετατρέπουν απευθείας το φως του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεντρώνονται σε επίπεδα πάνελ τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν σε ταράτσες ή άλλες ηλιόλουστες περιοχές. Παράγουν ηλεκτρισμό και λειτουργούν αθόρυβα και χωρίς εκπομπές.

- **Αιολικά συστήματα:**

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν τον άνεμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μια τουρμπίνα με πτερωτές τοποθετείται στην κορυφή ενός ψηλού πύργου. Ο πύργος είναι ψηλός ώστε να εκμεταλλευόμαστε τη μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου, απαλλαγμένη από τις αναταράξεις που προέρχονται από τη μεσολάβηση εμποδίων όπως δέντρα, λόφοι και κτίρια. Όπως περιστρέφεται η τουρμπίνα με τον άνεμο, μια γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να ποικίλλει σε μέγεθος από λίγα kW σε οικιακές εφαρμογές έως πάνω από 5 MW.

- **Υβριδικά συστήματα:**

Παραγωγοί και κατασκευαστές τεχνολογιών διασπαρμένης παραγωγής αναζητούν τρόπους να συνδυάσουν τεχνολογίες για να βελτιώσουν τις επιδόσεις και την απόδοση του εξοπλισμού διασπαρμένης παραγωγής. Κάποια παραδείγματα υβριδικών συστημάτων είναι: Μηχανή Stirling συνδυασμένη με ένα ηλιακό πιάτο, κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου συνδυασμένη με μια τουρμπίνα αερίου ή μικροτουρμπίνα, ανεμογεννήτριες με μπαταρία αποθήκευσης και εφεδρικές γεννήτριες diesel. [19],[36]

Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής δεν υπόκεινται σε έλεγχο της παραγωγής τους σε κανένα επίπεδο τάσης στη διανομή, καθώς ο κανονισμός δεν παρέχει τέτοια δυνατότητα. Ωστόσο, ηλεκτρονικοί μετρητές έχουν εγκατασταθεί στο 100% των συνδεδεμένων μονάδων στη ΜΤ και στο 50% των συνδεδεμένων μονάδων στη ΧΤ για τη μέτρηση της παραγωγής τους, προσφέροντας μελλοντικά και τη δυνατότητα παρακολούθησης της παραγωγής σε πραγματικό χρόνο. Δεδομένα για κάθε τέταρτο σχετικά με την ενεργό και άεργο ισχύ, καθώς και πληροφορίες σχετικά με τις παραβιάσεις των ορίων, αποστέλλονται στο Κέντρο Τηλεμέτρησης του ΔΕΔΔΗΕ στο τέλος της κάθε ημέρας.

Οι κανόνες που εφαρμόζει ο ΔΕΔΔΗΕ για τη διασύνδεση των ΑΠΕ στη χαμηλή και μέση και ο ΑΔΜΗΕ για τη σύνδεση στην υψηλή τάση παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ονομαστική Ισχύς (MW)	Σχήμα Διασύνδεσης
<0.05	ΧΤ, μονοφασική
≤0.1	ΧΤ, τριφασική, σε υπάρχουσα ή νέα τροφοδότηση
<5	ΜΤ, σε υπάρχουσα τροφοδότηση(με πιθανή ενίσχυση)
<6	ΜΤ, ειδική τροφοδότηση (μονή αναχώρηση 20 kV)
<20	ΜΤ, ειδική τροφοδότηση (διπλή αναχώρηση 20 kV)
>20	ΥΤ, ειδικός υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ

## Πίνακας 2: Σχήμα διασύνδεσης αναλόγως την ονομαστική ισχύ προς εγκατάσταση

Όσον αφορά τη ρύθμιση της τάσης σε δίκτυα ΜΤ, υπάρχουν δύο κριτήρια:

- Η ετήσια μέση τιμή της τάσης σε κάθε κόμβο δεν πρέπει να αποκλίνει περισσότερο από 5% από την ονομαστική (π.χ. 20 kV),
- Η διακύμανση της τάσης γύρω από την μέση τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το  $\pm 3\%$ , για να εξασφαλιστεί ότι η τελική τάση στους χρήστες ΧΤ θα παραμένει εντός των προβλεπόμενων ορίων.

Για να αξιολογηθούν τα κριτήρια αυτά, οι μελέτες ροής φορτίου πραγματοποιούνται για τις ακόλουθες συνθήκες:

- Μέγιστο φορτίο – Ελάχιστη παραγωγή
- Μέγιστο φορτίο - Μέγιστη παραγωγή
- Ελάχιστη Φορτίου – Ελάχιστη παραγωγή
- Μέγιστο φορτίο - Μέγιστη παραγωγή

Στην περίπτωση που οι μονάδες διασυνδέονται μέσω ειδικών τροφοδοτήσεων στους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ, εφαρμόζεται ένα όριο απόκλισης τάσης  $\pm 8\%$ .

Σε ό, τι αφορά το επίπεδο σφάλματος, ο ΔΕΔΔΗΕ εξασφαλίζει ότι δε γίνεται υπέρβαση του προκαθορισμένου επιπέδου σφάλματος (250 MVA - 7,5 kA στα 20 kV) εξαιτίας της διασύνδεσης ΑΠΕ. Το επίπεδο βραχυκυκλώσεως είναι συνήθως μέγιστο στους ζυγούς των υποσταθμών ΥΤ / ΜΤ.

Ακόμη ένας περιορισμός για την αύξηση της εγκατάστασης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σχετίζεται με το συντελεστή ισχύος του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ, ο οποίος δεν μπορεί να μειωθεί σε πολύ χαμηλές τιμές. Σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς, οι υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ πρέπει να λειτουργούν με συντελεστή ισχύος, έτσι ώστε ο ετήσιος μέσος όρος να κυμαίνεται μεταξύ 0,95 χωρητικού και 0,98 επαγωγικού, όταν το φορτίο του υποσταθμού είναι μεγαλύτερο από 50% του ονομαστικού.

Όσον αφορά τη διασύνδεση των ΑΠΕ σε δίκτυα ΧΤ, υπάρχει ένα σύνολο τεχνικών κριτηρίων που χρησιμοποιούνται από τον ΔΕΔΔΗΕ, για την αξιολόγηση των αιτήσεων διασύνδεσης. Κατά κανόνα, η μέγιστη επιτρεπόμενη ονομαστική ισχύς των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που πρόκειται να συνδεθεί στη ΧΤ είναι 100 kW. Η σχετική μελέτη διασύνδεσης, η οποία διενεργείται από τον ΔΕΔΔΗΕ, επικεντρώνεται κυρίως σε θέματα θερμικής αντοχής και ρύθμισης της τάσης. [13]

### **3.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

Ο φόβος για μια παγκόσμια κλιματική αλλαγή οδήγησε στην ευαισθητοποίηση των πολιτών και κατέστησε αναγκαία τη μείωση της χρήσης συμβατικών μονάδων παραγωγής και τη συμμετοχή εναλλακτικών, καθαρότερων μορφών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού, γεγονός που επέφερε αύξηση της διείδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής. Οι ανανεώσιμες πηγές παράγουν μηδενικούς ή ελάχιστους ρύπους, βοηθώντας στη μείωση των εκπομπών αερίων, υπευθύνων για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως είναι το διοξείδιο του άνθρακα. Κατά αυτόν τον τρόπο, χώρες που έχουν αναλάβει υποχρεώσεις για μείωση των εκπομπών ρύπων (Πρωτόκολλο του Κιότο), μπορούν να εκπληρώσουν τις υποχρεώσεις τους, περιορίζοντας τη χρήση καυσίμων που υπάρχουν σε πεπερασμένες ποσότητες, όπως είναι ο λιγνίτης, το πετρέλαιο, κλπ, εκμεταλλευόμενες τεχνολογίες όπως η ηλιακή ενέργεια, ο άνεμος και οι κυψέλες καυσίμου.

Εκτός από τα περιβαλλοντικά οφέλη, σημαντικό είναι και το κέρδος σε λειτουργικό επίπεδο. Καταρχήν, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής συμβάλλουν στη μείωση των απωλειών του συστήματος, διότι, αφού μέρος της ισχύος στο δίκτυο θα καλύπτεται από τις διεσπαρμένες μονάδες, δε θα χρειάζεται να παράγεται τόσο μεγάλη ποσότητα ισχύος από τις κεντρικές μονάδες και να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις, κάτι που θα εισήγαγε μεγάλες απώλειες ισχύος στο σύστημα. Η παρουσία DER αυξάνει την τάση στην περιοχή που εγκαθίσταται, οπότε σε περιοχές όπου υπάρχει πρόβλημα με το επίπεδο της τάσης, μπορεί να συνεισφέρει θετικά. Επιπλέον, οι

DER ενισχύουν την αξιοπιστία του συστήματος, καθώς προσφέρουν ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η επιλογή των παραδοσιακών γραμμών διανομής δεν είναι δυνατή. Προς την κατεύθυνση της αξιόπιστης τροφοδότησης, προσφέρουν σταθερότητα αφού έχουν τη δυνατότητα «black start», δηλαδή τη δυνατότητα να μεταβούν από μια απενεργοποιημένη κατάσταση σε κατάσταση λειτουργίας άμεσα και να αρχίσουν να παράγουν ενέργεια χωρίς να υποβοηθηθούν από το ηλεκτρικό σύστημα. Το γεγονός αυτό συμβάλλει και στην ασφάλεια της τροφοδοσίας, αφού η παραγωγή ηλεκτρισμού δεν εξαρτάται μόνο από συγκεκριμένες συμβατικές πηγές, αλλά υπάρχει η δυνατότητα προσωρινής κάλυψης σε περίπτωση απώλειας κάποιας μονάδας, προστατεύοντας το σύστημα από πιθανή κατάρρευση. Άλλο ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι οι αυξομειώσεις στην εγκατεστημένη ισχύ μπορούν να γίνουν εύκολα με μικρές προσαυξήσεις και σε πλήρη συμφωνία με τη ζήτηση, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα ευέλικτες και οικονομικά συμφέρουσες.

Ως προς τα οικονομικά οφέλη, η λειτουργία των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής συνεπάγεται μείωση της χρήσης των συμβατικών πηγών παραγωγής και συνεπώς μείωση του κόστους λειτουργίας τους. Επιπλέον, η τοποθέτηση διεσπαρμένης παραγωγής δίνει τη δυνατότητα για αναβολή σε επενδύσεις του δικτύου. Συγκεκριμένα, η τοποθέτηση μιας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής μειώνει την υπερφόρτιση των γραμμών διανομής και των υποσταθμών με αποτέλεσμα να αναβληθεί η επένδυση σε κάποιο μετασχηματιστή ή στην αναβάθμιση καλωδίων που βρίσκονται κοντά στο όριο τους.

### **3.3.ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΗΘΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ**

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, υπάρχουν και αρκετά μειονεκτήματα. Καταρχάς, η σύνδεση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην ποιότητα ισχύος του δικτύου, καθώς μπορούν να προκληθούν μεταβολές και διακυμάνσεις στην τάση του δικτύου αλλά και γρήγορες μεταβολές της τάσης που έχουν ως συνέπεια τη διακύμανση της φωτεινότητας των λαμπτήρων πυρακτώσεως και την οπτική ενόχληση από αυτή (flicker). Επίσης, μπορεί να υπάρξει και αρμονική παραμόρφωση στο δίκτυο εξαιτίας των ηλεκτρονικών ισχύος των εγκαταστάσεων παραγωγής. Για να μην υπάρχουν σημαντικές επιπτώσεις από τα παραπάνω, έχουν θεσπιστεί κανόνες και όρια στις διακυμάνσεις της τάσης και την αρμονική παραμόρφωση που πρέπει να τηρούνται ώστε να δίνεται η δυνατότητα στις μονάδες να συνδέονται στο δίκτυο. Ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα για την ποιότητα ισχύος είναι οι βυθίσεις της τάσης που ορίζονται ως ξαφνικές μειώσεις της τάσης από 10% έως και το 90% της ονομαστικής τιμής σε χρονικά διαστήματα μεταξύ μισού κύκλου μέχρι και αρκετών λεπτών. Παράλληλα, εάν κατά τη ζεύξη/απόζευξη των γεννητριών επιτρέπεται η ανταλλαγή μεγάλων ρευμάτων με το δίκτυο, τότε μπορεί να εμφανιστούν μεταβατικές διαταραχές στην τάση του δικτύου. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να περιοριστούν με τη χρήση κατάλληλων

ηλεκτρονικών διατάξεων και το σωστό συγχρονισμό των σύγχρονων γεννητριών κατά τη ζεύξη τους με το σύστημα.

Η ισχύς στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με κεντρική παραγωγή ρέει από την υψηλή προς την χαμηλή τάση. Με τη διείσδυση όμως της διασπαρμένης παραγωγής, η ροή της ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να αντιστραφεί, αν η διείσδυση αυτή είναι αρκετά σημαντική. Ακόμη, μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να έχουμε αντίστροφη πορεία του ρεύματος, αν υπερκαλύπτεται το φορτίο ενός ζυγού και των φορτίων στα κατάντη αυτού από την παραγωγή της διασπαρμένης μονάδας που βρίσκεται στο ζυγό αυτό. Έτσι, οι τάσεις και οι ροές ισχύος μεταβάλλονται και καθορίζονται πλέον από τις μονάδες παραγωγής που υπάρχουν διασπαρμένες στο δίκτυο και τα φορτία. Σε πολλά δίκτυα χρησιμοποιούνται εξελιγμένες τεχνικές ελέγχου της τάσης μέσω ρύθμισης των λήψεων του αυτομετασχηματιστή σύμφωνα με την εκτίμηση της πτώσης τάσης από μετρήσεις ρεύματος.

Ένας περιορισμός για τη μεγαλύτερη διείσδυσή των ΑΠΕ είναι το γεγονός ότι δε μπορεί να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη για την ικανότητα παραγωγής τους, με αποτέλεσμα σε μικρά χρονικά διαστήματα να υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στη δυνατότητα παραγωγής ή ακόμα και απώλεια της παραγωγής εξαιτίας της φύσης ορισμένων πηγών όπως είναι για παράδειγμα ο άνεμος. Έτσι, υπάρχει συγκεκριμένο ποσοστό της ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές και πάντα πρέπει να υπάρχει εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα αφορά κυρίως τα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, πάλι λόγω της φύσης των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, η διασπαρμένη παραγωγή έχει μικρή σχετικά δυνατότητα παραγωγής, ενώ θα πρέπει να βρίσκεται σε συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο, όπου για παράδειγμα υπάρχει άνεμος, ήλιος, ή οτιδήποτε απαιτείται για την εκάστοτε μορφή ενέργειας, θέτοντας επιπλέον περιορισμό στη διείσδυσή τους.

Ακόμη ένα μειονέκτημα αποτελεί η συνεισφορά των DER στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, γεγονός που θα μπορούσε να προκαλέσει την αποσύνδεση υγιών γραμμών στις οποίες συνδέονται διασπαρμένες γεννήτριες λόγω λανθασμένης αντίδρασης των προστασιών του δικτύου. [19],[36]

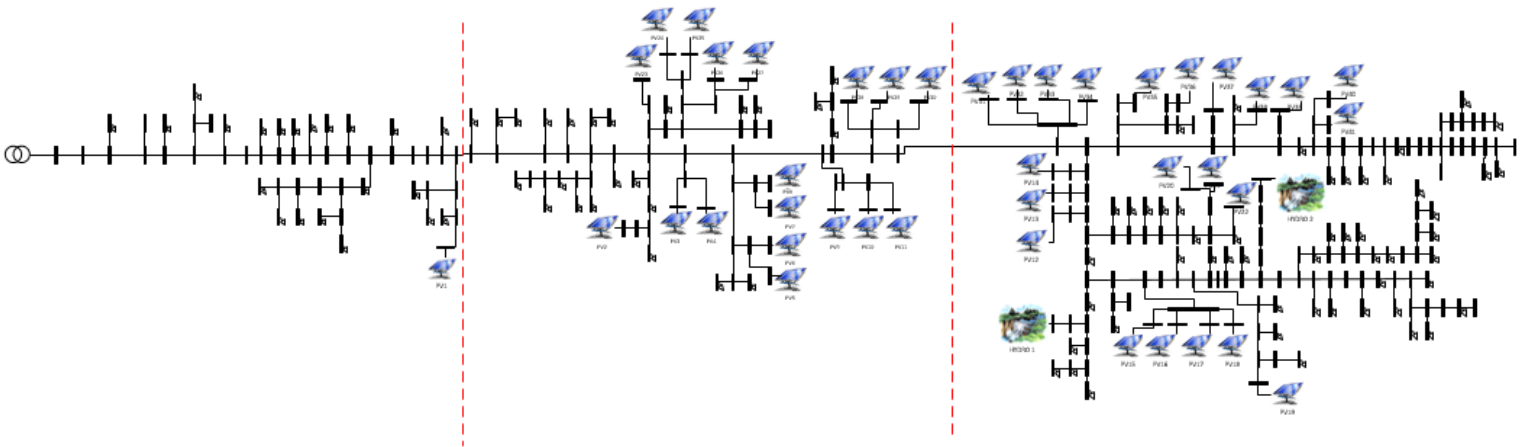


## 4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥ ΤΗΣ ΣΠΕΡΧΕΙΑΔΑΣ

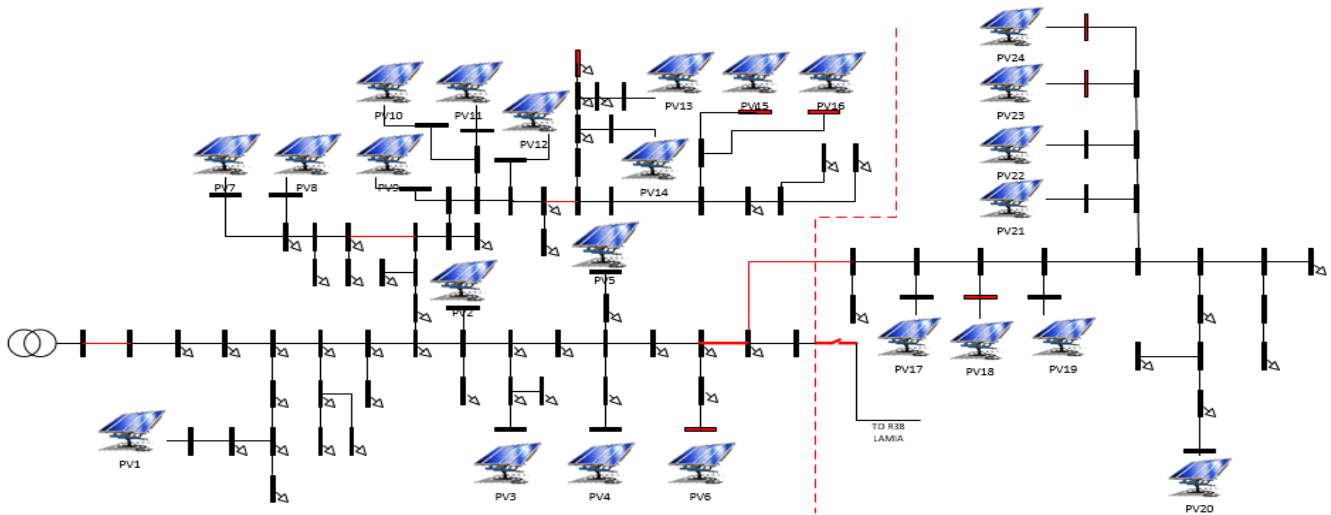
### 4.1.ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το δίκτυο μέσης τάσης όπου έγινε η εφαρμογή βρίσκεται στη Σπερχειάδα, μια κωμόπολη του νομού Φθιώτιδας στη Στερεά Ελλάδα. Περιλαμβάνει ένα ακτινικό δίκτυο διανομής, συμπεριλαμβανομένου και του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ και των αντίστοιχων αναχωρήσεων P21, P22, P23, P24, P25, P26. Ο αρχικός υποσταθμός στη Σπερχειάδα είχε σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπόψη τρία βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου: την τροφοδοσία μεγάλων καταναλωτών μέσης τάσης (βιομηχανικό φορτίο), τη σύνδεση υδροηλεκτρικών σταθμών και την πρόβλεψη για σύνδεση με γραμμές των ήδη λειτουργικών υποσταθμών της Λαμίας και του Καρπενησίου. Όμως, τα χαρακτηριστικά αυτά άλλαξαν καθώς ένα μεγάλο βιομηχανικό φορτίο αποσυνδέθηκε και ταυτόχρονα, η διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής αυξήθηκε. Τα γεγονότα αυτά οδήγησαν σε αλλαγές στο λειτουργικό σχεδιασμό που υπήρχε μέχρι τότε, προκαλώντας συχνά αναστροφή της ροής, λόγω της αυξημένης παραγωγής και της μικρής ζήτησης.

Αρχικά, δεδομένα από τον ΔΕΔΔΗΕ, όπως η τοπολογία του δικτύου, το μήκος και το είδος των καλωδίων, καθώς και το πλήθος και η ισχύς των εγκατεστημένων μονάδων παραγωγής και των φορτίων αξιοποιήθηκαν, προκειμένου να σχεδιαστεί το μονογραμμικό σχέδιο κάθε αναχώρησης. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται δύο από τις τροφοδοτήσεις της Σπερχειάδας.



Σχήμα 12: Μονογραμμική απεικόνιση της αναχώρησης P24



**Σχήμα 13: Μονογραμμική απεικόνιση της αναχώρησης P25**

Στους κύριους υποσταθμούς YT/MT 150/20 kV, υπάρχουν μετασχηματιστές τοποθετημένοι μεταξύ της μεταφοράς και της YT και μεταξύ της YT και της διανομής MT. Επίσης, είναι συνδεδεμένοι OLTC (On-Load Tap Changers) που ελέγχονται από τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης. Η τάση στην πλευρά της YT θεωρείται σταθερή ενώ η ρύθμιση γίνεται από τη μεριά της MT. Ο ψηφιακός ρυθμιστής τάσης παίρνει ως είσοδο την τάση και το ρεύμα στο επίπεδο της MT. Το επιθυμητό επίπεδο τάσης ρυθμίζεται μέσα στα όρια 90-110% της ονομαστικής τάσης των 20 kV. Για να αποφευχθούν πολλές και πιθανόν ανούσιες αλλαγές στον OLTC, διαθέτει σύστημα χρονικής καθυστέρησης 10-100sec. Σε περιπτώσεις μεγάλης απόκλισης τάσης, η χρονική καθυστέρηση αγνοείται. Υπάρχουν βήματα των 1875 V το καθένα, με την τάση να ρυθμίζεται το πολύ στο +7,5% της ονομαστικής. Στους υποσταθμούς αυτούς, είναι τοποθετημένοι RTUs, που αποστέλλουν μετρήσεις πραγματικού χρόνου κάθε 30 λεπτά και επιτρέπουν τον έλεγχο της κατάστασης των διακοπών. Οι μετρήσεις αυτές αφορούν τάση και ρεύμα στην αρχή κάθε αναχώρησης. Όσον αφορά στην προστασία, οι διακόπτες στην αρχή κάθε τροφοδότησης είναι εξοπλισμένοι με ηλεκτρονόμους στιγμιαίας λειτουργίας και χρονικής καθυστέρησης που παρέχεται από τους μετασχηματιστές. Μετά το άνοιγμα, έχουν δυνατότητα να ξανακλείσουν. Οι ηλεκτρονόμοι, με τη βοήθεια των μετασχηματιστών έντασης, ανιχνεύουν τις υπερεντάσεις και στέλνουν σήματα για να ανοίξουν τους διακόπτες.

Το δίκτυο MT απαρτίζεται από 6 εναέριες τροφοδοτήσεις, μέσω μήκους 7 km, με ακτινικής λειτουργίας. Οι γραμμές διανομής P21, P22, P23, P24, P25, P26 που τροφοδοτούν τα αγροτικά φορτία, χαρακτηρίζονται από μεγάλη διείδυση φωτοβολταϊκών και υδροηλεκτρικών σταθμών.

Στους υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ, δεν έχουν εγκατασταθεί ΟΛΤСs. Υπάρχουν ηλεκτρονικοί μετρητές που εγκαθίστανται σε ζυγούς με παραγωγή φωτοβολταϊκών ή σε ζυγούς με φορτία, οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα κάθε 15 λεπτά και αποστέλλουν κάθε 24 ώρες τα δεδομένα της προηγούμενης μέρας στο Κέντρο Τηλεμέτρησης μέσω του ΑΜR. Συνδυασμός αυτών των μετρήσεων θα χρησιμοποιηθεί ως είσοδος για τις διεργασίες έλεγχου. Για την προστασία των υποσταθμών, υπάρχουν ασφάλειες στις τροφοδοτήσεις μέσης και χαμηλής τάσης, ενώ αυτόματοι διακόπτες έχουν τοποθετηθεί στις τροφοδοτήσεις των υποσταθμών ΜΤ των καταναλωτών.

#### **4.2.ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ (ΜΕΤΡΗΤΕΣ)**

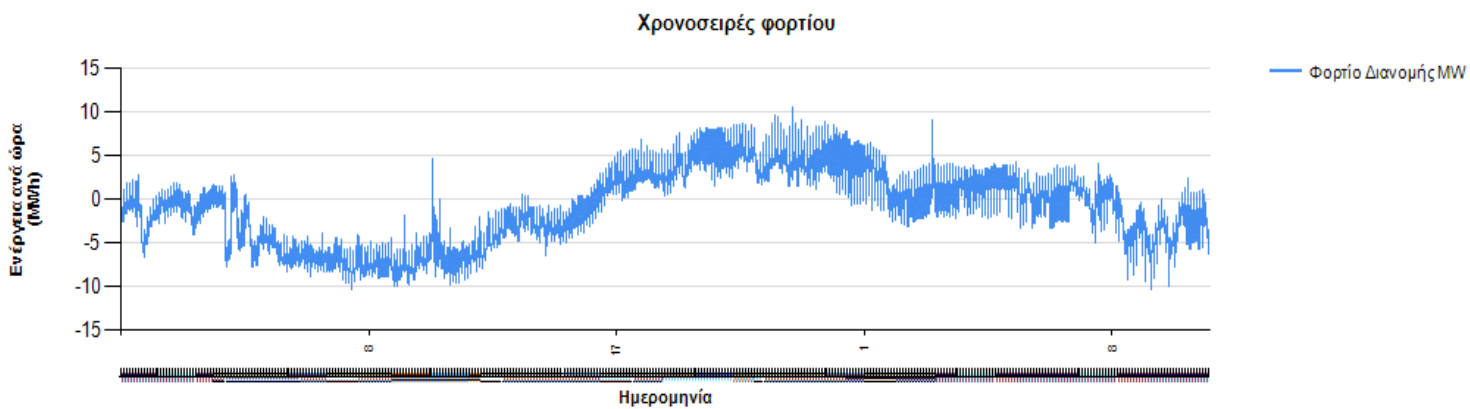
Στη Σπερχειάδα έγινε η προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν οι μέχρι σήμερα διαθέσιμες δυνατότητες που προσφέρονται από τους ηλεκτρονικούς μετρητές ΜΤ προκειμένου να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες στους διαχειριστές του δικτύου για τον καλύτερο προγραμματισμό της δράσης τους. Συγκεκριμένα, οι ηλεκτρονικοί μετρητές που εγκαθίστανται σε κάθε ζυγό ΜΤ με φορτίο ή με παραγωγή, αποστέλλουν κάθε 24 ώρες στο Κέντρο Τηλεμέτρησης του ΔΕΔΔΗΕ τα δεδομένα της προηγούμενης μέρας, που συλλέγονται κάθε 15 λεπτά. Οι ηλεκτρονικοί μετρητές είναι DLMS/COSEM, συμβατοί με τεχνολογία GPRS. Η εγκατεστημένη υποδομή ΑΜR περιλαμβάνει μια βάση δεδομένων και υπολογιστές κεντρικά τοποθετημένους. Οι ηλεκτρονικές πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί από τους μετρητές διαβιβάζονται καθημερινά μέσω της GPRS τεχνολογίας και διαχειρίζονται από τη βάση δεδομένων του ΔΕΔΔΗΕ. Επιπλέον, οι μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος στην αρχή κάθε αναχώρησης είναι διαθέσιμες από τα SCADA και DMS, σε πραγματικό χρόνο. Ο συνδυασμός των μετρήσεων πραγματικού χρόνου και των προβλεπόμενων τιμών για το φορτίο και την παραγωγή, που λαμβάνονται από τις ηλεκτρονικές μετρήσεις της προηγούμενης μέρας, παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την ανάλυση και την πρόβλεψη ανεπιθύμητων καταστάσεων. Προς την κατεύθυνση αυτή, είναι δυνατή η έγκαιρη προειδοποίηση για δυσμενή σενάρια, προκειμένου να ληφθούν προληπτικά μέτρα. Έτσι, ο προγραμματισμός δε στηρίζεται τόσο στις στατικές αξιολογήσεις, όσο στις πιθανότητες παραβίασης των λειτουργικών περιορισμών.

#### **4.3. ΠΡΟΦΙΛ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΖΗΤΗΣΗΣ**

Στην περιοχή της Σπερχειάδας, το δίκτυο είχε κατασκευαστεί αρχικά με γνώμονα την ύπαρξη ενός μεγάλου βιομηχανικού φορτίου, την ύπαρξη υδροηλεκτρικών σταθμών και τη μελλοντική διασύνδεση με τις αναχωρήσεις των υποσταθμών της Λαμίας και του Καρπενησίου. Έτσι, αρκετά φωτοβολταϊκά συστήματα συνδέθηκαν στο δίκτυο της περιοχής. Όμως, η αποσύνδεση του μεγάλου βιομηχανικού φορτίου, οδήγησε σε ένα διαφορετικό προφίλ ζήτησης, αφού πλέον η παραγωγή ήταν αρκετά μεγάλη, ενώ η ζήτηση μικρή. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα την

εμφάνιση ανάστροφων ροών ισχύος και έθετε περιορισμό στην περαιτέρω διείσδυση φωτοβολταϊκών μονάδων ή άλλων ΑΠΕ.

Τα φορτία ποικίλουν ανάλογα με το είδος, την ώρα, τη μέρα και την εποχή. Σε περιοχές με βιομηχανικό φορτίο εμφανίζεται αιχμή τις εργάσιμες ώρες και μέρες, ενώ σε περιοχές με αστικό φορτίο παρουσιάζεται μέγιστο εκτός των εργάσιμων ωρών. Στην περιοχή της Σπερχειάδας το φορτίο χαρακτηρίζεται ως ημιαστικό. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως και εδώ, το καλοκαίρι παρατηρείται μια αύξηση στη ζήτηση, γεγονός που συχνά έχει να κάνει και με τη λειτουργία κλιματιστικών και την αύξηση των καταναλωτών λόγω τουρισμού. Η καμπύλη που παρουσιάζει το προφίλ ζήτησης όπως έχει πλέον διαμορφωθεί φαίνεται παρακάτω:



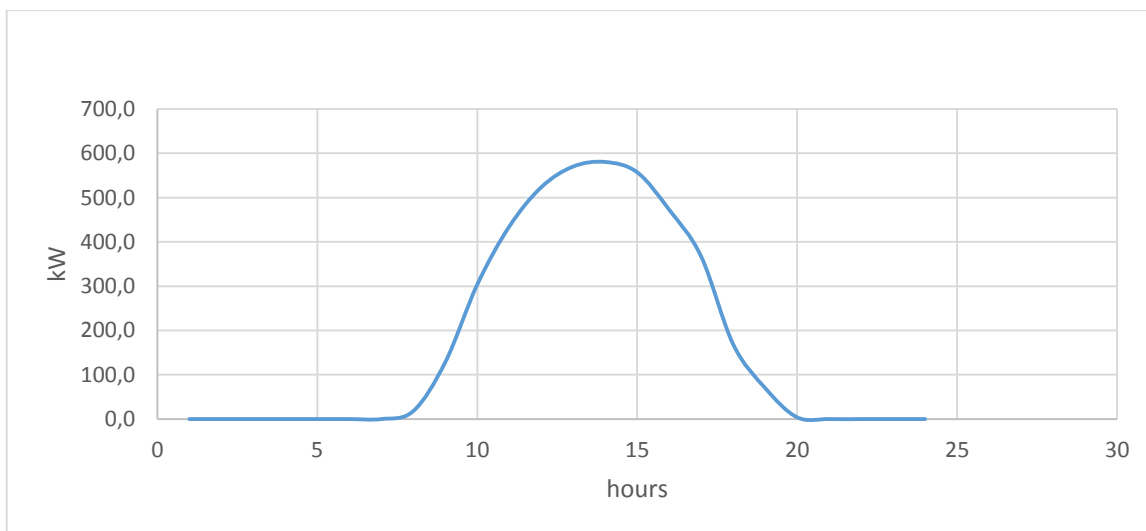
**Σχήμα 14: Προφίλ Ζήτησης**

Όσον αφορά την διεσπαρμένη παραγωγή της περιοχής, αποτελείται από μονάδες φωτοβολταϊκών και υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Τα φωτοβολταϊκά είναι διασυνδεδεμένα στο δίκτυο μέσης και χαμηλής τάσης. Η παραγόμενη ενέργεια εγχέεται στο δίκτυο, καθώς δεν υπάρχουν μηχανισμοί αποθήκευσης της. Η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών στο δίκτυο MT της Σπερχειάδας είναι κυρίως των 100 kW, των 300 kW, των 400 kW και των 500 kW και φτάνουν μέχρι και μερικά MW. Η σύνδεσή τους στο δίκτυο γίνεται μέσω ενός αντιστροφέα, όπως φαίνεται παρακάτω:



**Σχήμα 15: Σύνδεση Φωτοβολταϊκών στο Δίκτυο [37]**

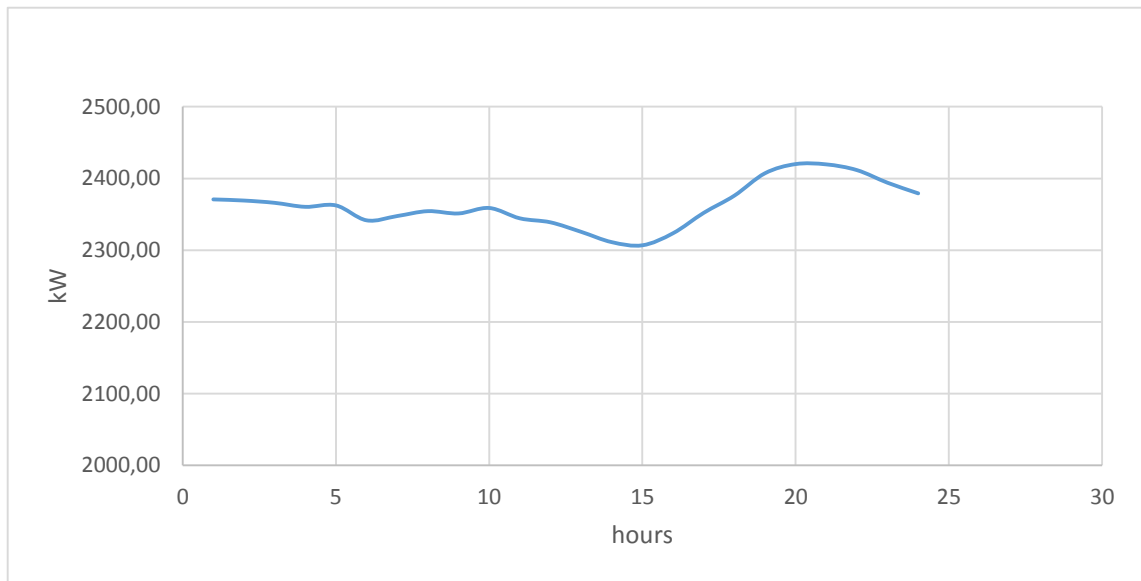
Η ημερήσια καμπύλη παραγωγής ενός φωτοβολταϊκού ισχύος 700 kW που βρίσκεται συνδεδεμένο στην αναχώρηση P25 παρουσιάζεται στο κάτωθι σχήμα:



**Σχήμα 16: Καμπύλη Παραγωγής Φωτοβολταϊκού 700kW στην αναχώρηση P25**

Σε τέσσερις εκ των έξι αναχωρήσεων του υποσταθμού της Σπερχειάδας είναι συνδεδεμένοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, οι οποίοι τροφοδοτούνται από τον ποταμό Σπερχειό. Οι ΥΗΣ έχουν μηδενικό

κόστος καυσίμου και μικρότερο κόστος συντήρησης από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς αντίστοιχου μεγέθους αλλά έχουν μεγαλύτερες ετήσιες δαπάνες λόγω δομικών έργων. Καθώς η παροχή ύδατος δεν είναι συνεχής, το νερό αποθηκεύεται σε τεχνητές λίμνες (ταμιευτήρες) για να χρησιμοποιηθεί κατά βούληση. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι έχουν δυνατότητα άμεσης σύνδεσης και απόζευξης αμέσως μόλις ζητηθεί και λειτουργούν συμπληρωματικά με άλλες πηγές ενέργειας σε ώρες αιχμής, ανακουφίζοντας τις συμβατικές μονάδες. Επιπλέον, συμβάλλουν στη βελτίωση του συντελεστή του φορτίου καθώς παράγουν καλής ποιότητας ηλεκτρική ενέργεια. Στο δίκτυο ΜΤ της Σπερχειάδας είναι σε λειτουργία έξι ΥΗΣ με ισχύ από 850 έως και 4500 kW. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η παραγωγή του ΥΗΣ 3500 kW για μια τυπική μέρα άνοιξης που βρίσκεται στη γραμμή P23.



**Σχήμα 17: Ημερήσια Καμπύλη Παραγωγής ΥΗΣ 3500kW στην αναχώρηση P23**

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ στην περιοχή της Σπερχειάδας παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς υδροηλεκτρικών (MW)	Εγκατεστημένη ισχύς υποσταθμών ΜΤ/ΧΤ (MW)
P-21		4,500	
P-22	3,098		9,050
P-23	0,840	3,500	10,780
P-24	3,240	2,935	9,125
P-25	6,927		12,195
P-26	0,500	2,100	7,350

**Πίνακας 3: Εγκατεστημένη ισχύς σε κάθε αναχώρηση**

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΕΠΟΠΤΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

---

### 5.1.ΣΤΟΧΟΣ – ΣΚΟΠΟΣ (USE CASES)

Οι στόχοι του εργαλείου εποπτείας και πρόβλεψης περιλαμβάνουν τη δοκιμή, την επίδειξη και την αξιολόγηση των προηγμένων εργαλείων διαχείρισης και των εφαρμογών ελέγχου των ΑΠΕ που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο ΜΤ της Σπερχειάδας, αξιοποιώντας την υποδομή των έξυπνων μετρητών (AMI – Automatic Meter Infrastructure) μαζί με το σύστημα AMR (Automatic Meter Reading), που βρίσκονται στο Κέντρο Τηλεμέτρησης του ΔΕΔΔΗΕ. Βασικός σκοπός του εργαλείου να χρησιμοποιήσει τα στοιχεία που είναι διαθέσιμα από δύο διαφορετικά συστήματα, το DMS και το AMR. Το εργαλείο εκμεταλλεύεται τα στοιχεία που συλλέγονται από τους ηλεκτρονικούς μετρητές που εγκαθίστανται στους καταναλωτές ΜΤ και στις ΑΠΕ των έξι αναχωρήσεων της Σπερχειάδας. Ως αποτέλεσμα, έχουμε ένα σύνολο εφαρμογών διαχείρισης της διανομής, οι οποίες βασίζονται στην υποδομή AMR για την απόκτηση δεδομένων και οδηγούν σε προηγμένες λειτουργίες, εκμεταλλεζόμενες τη δυνατότητα πρόβλεψης της ζήτησης φορτίου, της παραγωγής και της ανάστροφης ροής καθώς και τα αποτελέσματα της πιθανοτικής ροής φορτίου.

Συγκεκριμένα, μια βασική λειτουργία του εργαλείου είναι η πρόβλεψη της παραβίασης των λειτουργικών ορίων, που οφείλεται κυρίως στη μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής, για την επόμενη μέρα (24 ώρες μπροστά) που βασίζεται στα αποτελέσματα της πιθανοτικής ροής φορτίου. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα στο διαχειριστή να προειδοποιηθεί για ανεπιθύμητες καταστάσεις, προκειμένου να επαναπρογραμματίσει εγκαίρως τη λειτουργία του δικτύου, αλλάζοντας τη λειτουργική κατάσταση των διακοπών διαχωρισμού, συμβάλλοντας στον βελτιωμένο και εκ των προτέρων προσδιορισμό της κατάστασης λειτουργίας. Επιπλέον, μια καινοτόμος λειτουργία του εργαλείου είναι ο προσδιορισμός των ανάστροφων ροών ισχύος, ο οποίος δεν ήταν δυνατός παλαιότερα, αφού οι μόνες διαθέσιμες μετρήσεις ήταν οι καθαρές ροές, χωρίς την ένδειξη της κατεύθυνσης. Για να επιτευχθεί αυτό, τα στοιχεία της AMR της προηγούμενης μέρας συνδυάζονται δημιουργικά με τις μετρήσεις πραγματικού χρόνου που γίνονται στους υποσταθμούς προκειμένου, με τη χρήση των δέντρων απόφασης, να συμβάλλουν στον προσδιορισμό της κατεύθυνσης της ροής. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα αξιοποίησης του ελέγχου Q-V για τον ορισμό βέλτιστων σημείων λειτουργίας (set-points), που σε συνδιασμό με τη δυνατότητα πρόβλεψης της παραγωγής των ΑΠΕ και την πιθανοτική ροή φορτίου συνεισφέρουν στη μελέτη για την αύξηση της διεσπαρμένης παραγωγής (HC - Hosting Capacity). Χάρη στις λειτουργίες αυτές, προσφέρεται στο διαχειριστή η δυνατότητα να αυξήσει τη διείσδυση ΑΠΕ, γνωρίζοντας τα ασφαλή όρια λειτουργίας.

Πιο αναλυτικά, οι στόχοι του εργαλείου (Use Cases), κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- **Βελτίωση εποπτείας της λειτουργίας του δικτύου (Improved Network Conditions Monitoring)**

Τα πραγματικά δεδομένα συγκρίνονται με τα προβλεπόμενα για την προηγούμενη μέρα, παρέχοντας βελτιωμένο έλεγχο των ροών. Οι μετρήσεις πραγματικού χρόνου, οι οποίες δεν παρέχουν ένδειξη για την κατεύθυνση της ροής, και τα δεδομένα από τις προβλέψεις συνδυάζονται με την τεχνική των δέντρων απόφασης, προκειμένου να ανιχνευτεί πιθανή αναστροφή της ροής στην αρχή της αναχώρησης. Η εκμετάλλευση αυτής της λειτουργίας συμβάλλει στη βελτίωση της παρεχόμενης ποιότητας ισχύος, καθώς ο διαχειριστής προειδοποιείται για την εμφάνιση αντίστροφων ροών και συνεπώς για την εμφάνιση υπερτάσεων.

- **Διαχείριση υπερτάσεων και υπερφορτίσεων των γραμμών (Congestion/Overvoltage Management)**

Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται οι προβλέψεις για την παραγωγή και το φορτίο 24 ώρες μπροστά για να υπολογιστούν οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας PDF της τάσης και του ρεύματος, ενημερώνοντας το διαχειριστή για πιθανές παραβιάσεις των ορίων λειτουργίας στους ευαίσθητους κόμβους. Έτσι, μπορεί να επαναπρογραμματιστεί ο σχεδιασμός της λειτουργίας του δικτύου και να αποφευχθούν ανεπιθύμητες καταστάσεις. Οι αλλαγές στη διασύνδεση των γραμμών μπορούν να προγραμματιστούν και να εκτελεστούν χειροκίνητα, εκ των προτέρων. Κατά αυτόν τον τρόπο, καθίσταται εφικτή η σύνδεση περισσότερων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και περιορίζεται η αποσύνδεση τμημάτων του δικτύου λόγω παραβίασης των ορίων.

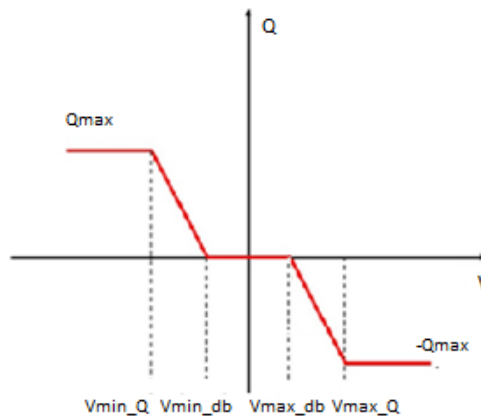
- **Προσδιορισμός της αύξησης της διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής (Planning of RES Hosting Capacity)**

Η συνηθισμένη τακτική προσδιορισμού της μέγιστης διείσδυσης ΑΠΕ, η οποία στηρίζεται στα όρια που προκύπτουν από τη μελέτη του ακραίου σεναρίου μέγιστης παραγωγής – ελάχιστης ζήτησης, περιορίζει τη σύνδεση περισσότερων μονάδων παραγωγής. Μέσα από τη χρήση των πιθανοτικών εργαλείων επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός ορίων ασφαλείας, που επιτρέπουν τη διείσδυση νέων μονάδων, χωρίς να γίνουν νέες επενδύσεις. Η πιθανοτική ροή φορτίου παρέχει τις PDF και τα διαστήματα εμπιστοσύνης, επιτρέποντας έτσι τον υπολογισμό της πιθανότητας παραβίασης των λειτουργικών ορίων σε κάθε κόμβο. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την καλύτερη και πιο ρεαλιστική εκτίμηση της δυνατότητας σύνδεσης νέων μονάδων, καθώς στηρίζεται σε πιθανοτικά δεδομένα βασισμένα σε πραγματικές μετρήσεις και όχι στη χειρότερη δυνατή κατάσταση λειτουργίας.



- Έλεγχος αέργου ισχύος-τάσης - Καθορισμός των σημείων λειτουργίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (Planning of P-V control strategies – Set-points for DERs)

Μέσα από τον έλεγχο ισχύος-τάσης και τον καθορισμό των σημείων λειτουργίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, προτείνονται στο διαχειριστή τα βέλτιστα σενάρια λειτουργίας που καθιστούν δυνατή την εγκατάσταση περισσότερων ΑΠΕ. Οι προτάσεις αυτές είναι αποτέλεσμα των PLF και περιλαμβάνουν έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος των φωτοβολταϊκών. Η εμφάνιση υπερτάσεων είναι σημαντικό ζήτημα σε γραμμές με μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ. Με τον έλεγχο αέργου ισχύος-τάσης (Q-V έλεγχος), τα φωτοβολταϊκά μπορούν να επηρεάσουν το προφίλ της τάσης, όταν είναι έξω από ένα όριο. Όταν η τάση υπερβεί συγκεκριμένα όρια, τα φωτοβολταϊκά απορροφούν άεργο ισχύ και έτσι η τάση μειώνεται, όπως φαίνεται στο δεξί τμήμα του παρακάτω σχήματος. Αυτό εκφράζεται πιθανοτικά χρησιμοποιώντας το θεμελιώδες θεώρημα των εξαρτημένων μεταβλητών. Επιπλέον, η αλλαγή του OLTC για την καλύτερη λειτουργία μπορεί να δοκιμαστεί.

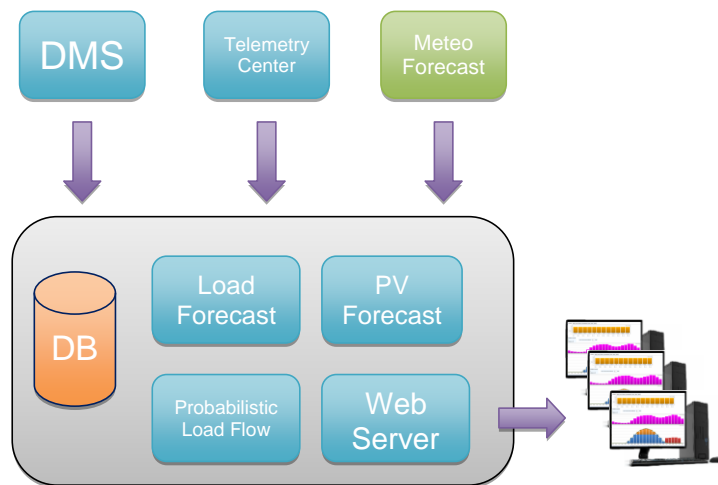


**Σχήμα 18: Q-V Έλεγχος σε Φωτοβολταϊκά**

Η αξιολόγηση του εργαλείου και η συνεισφορά του στη βελτίωση της εποπτείας και του ελέγχου γίνεται μέσα από την εξαγωγή κάποιων βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs – Key Performance Indicators). Το σύστημα των έξυπνων μετρητών και οι μετρήσεις από το SCADA στους κύριους υποσταθμούς, αποτελούν τη βάση για την απόκτηση δεδομένων. Χρησιμοποιώντας τις λειτουργίες διαχείρισης των υπερτάσεων και της υπερφόρτισης των γραμμών, που βασίζονται στην πρόβλεψη παραγωγής των ΑΠΕ και στην ανάλυση πιθανοτικών ροών φορτίου, ο διαχειριστής προειδοποιείται, γνωρίζοντας τις αθροιστικές πιθανότητες, για τις αναμενόμενες υπερτάσεις, τη συμφόρηση των γραμμών και τις ανάστροφες ροές και μπορεί να προγραμματίσει λειτουργικές καταστάσεις, ώστε να αποφεύγονται τα προαναφερθέντα προβλήματα και η περικοπή ΑΠΕ.

## 5.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Το εργαλείο αναπτύχθηκε έτσι ώστε να συμβάλει στην καλύτερη διαχείριση και εποπτεία του δικτύου διανομής, με εφαρμογές που αφορούν την εγκατάσταση ΑΠΕ σε γραμμές ΜΤ, χρησιμοποιώντας έξυπνα μετρητικά συστήματα αλλά και μετρήσεις που παρέχονται από το SCADA DMS. Τα ηλεκτρονικά δεδομένα των μετρητών αποστέλλονται καθημερινά, μέσω του GPRS, στη βάση δεδομένων του Κέντρου Τηλεμέτρησης του ΔΕΔΔΗΕ. Από το σύστημα SCADA DMS είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, που αφορούν την τάση και το ρεύμα στην αρχή κάθε αναχώρησης. Ο συνδυασμός των μετρήσεων αυτών με τις προβλέψεις για την παραγωγή και τη ζήτηση, οι οποίες εξάγονται από τους αλγόριθμους πρόβλεψης, που έχουν ως εισόδους τις ψηφιακές μετρήσεις της προηγούμενης μέρας, παρέχουν τις πληροφορίες για την ανάλυση και την πρόβλεψη ανεπιθύμητων καταστάσεων, προκειμένου να γίνουν προληπτικές δράσεις που θα βασίζονται περισσότερο σε πιθανοτικές παραβιάσεις ορίων, παρά σε στατικά δεδομένα.



**Σχήμα 19: Σχηματική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής του εργαλείου**

Το υπό μελέτη σύστημα έχει βασιστεί στην σε μια προηγμένη υποδομή μέτρησης που έχει αναπτυχθεί στο δίκτυο διανομής ΜΤ της Σπερχειάδας. Σε κάθε κόμβο με παραγωγή ή φορτίο, έχει τοποθετηθεί ένας έξυπνος μετρητής DMLS/COSEM που επικοινωνεί μέσω GPRS με το Κέντρο Τηλεμέτρησης του ΔΕΔΔΗΕ. Ο κεντρικός υπολογιστής έχει τη βάση δεδομένων, τρέχει τις εφαρμογές και διαθέτει έναν Web Server, που κάνει τη διαχείριση από τον χειριστή πιο εύκολη. Εκτός από τα στοιχεία που παρέχονται από τους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ και το Κέντρο Τηλεμέτρησης, αποθηκεύονται καθημερινά και μετεωρολογικές προβλέψεις. Οι αλγόριθμοι για τις προβλέψεις παραγωγής και ζήτησης φορτίου και για την πιθανοτική ροή εκτελούνται περιοδικά και τα αποτελέσματά τους αποθηκεύονται και αυτά στη βάση δεδομένων. Τελικά, ο Web Server

παρουσιάζει τα αποτελέσματα με κατανοητό και εύχρηστο τρόπο για τους διαχειριστές σε μια ιστοσελίδα. [13]

Πιο συγκεκριμένα, στο εργαλείο χρησιμοποιείται μια απλοποιημένη μορφή της πρόβλεψης της παραγωγής που αναφέρθηκε παραπάνω. Η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της παραγωγής των φωτοβολταϊκών γίνεται με τη χρήση ενός νευρωνικού δίκτυου ακτινωτής συνάρτησης βάσης RBFNN για κάθε φωτοβολταϊκή μονάδα. Ένα RBFNN έχει δύο επίπεδα. Στο πρώτο επίπεδο, χρησιμοποιούνται οι γκαουσιανές συναρτήσεις βάσης και τα κέντρα τους  $c_{i,j}$  υπολογίζονται από την εφαρμογή της OLS. Ο αριθμός  $j$  και το εύρος  $b$  αυτών των συναρτήσεων προσδιορίζεται εφαρμόζοντας κριτήρια όπως κριτήρια αντί-επικύρωσης (cross-validation), τη Μπεϋσιανή παρεμβολή (Bayesian interpolation) και τον αμερόληπτο εκτιμητή κινδύνου του Stein (Stein unbiased risk estimator). Οι μεταβλητές εισόδου του RBFNN περιλαμβάνουν δεδομένα από τις ΑΠΚ τεσσάρων σημείων γύρω από κάθε φωτοβολταϊκό και ημερολογιακά δεδομένα. Τα στοιχεία από τις ΑΠΚ στην περίπτωση μας, περιλαμβάνουν τη νέφωση, την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία. Όταν ένα διάνυσμα  $x_i$  εισάγεται στο RBFNN, οι έξοδοι  $o_j$  είναι της μορφής:

$$o_j = \exp\left(-\frac{\|c_{i,j}-x_i\|}{b^2}\right) \quad (65)$$

Σε καθένα από τα τέσσερα σημεία γύρω από κάθε φωτοβολταϊκό, πρέπει να δοθεί διαφορετικό βάρος για τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, αφού τα φωτοβολταϊκά είναι τοποθετημένα σε διαφορετικές θέσεις ανάμεσα στα σημεία αυτά.

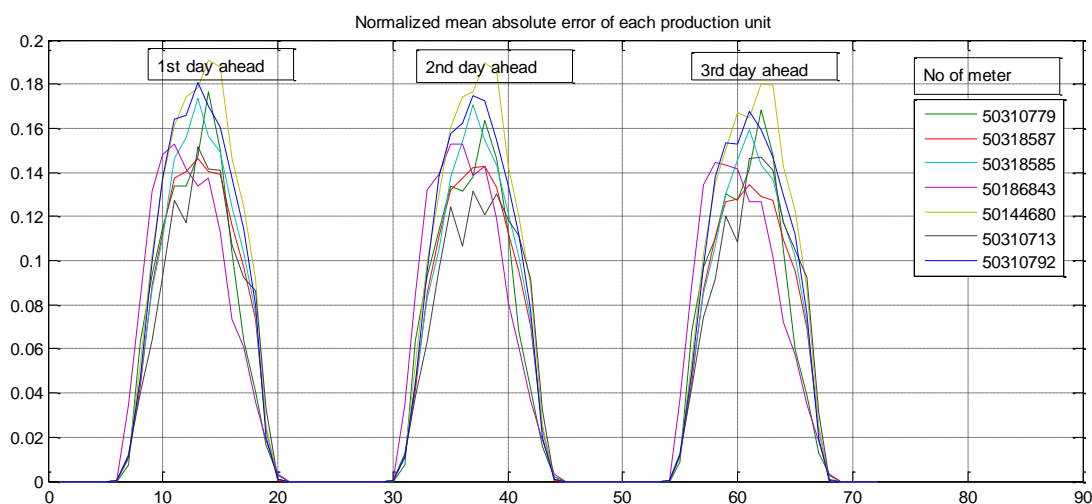
Στις περισσότερες εφαρμογές νευρωνικών δικτύων είναι χρήσιμο να γίνεται μια προεπεξεργασία των δεδομένων εισόδου, με την κανονικοποίηση όλων των μεταβλητών στο διάστημα  $[-1, 1]$  ή το  $[0, 1]$ . Αυτό συμβαίνει γιατί όλες οι μεταβλητές πρέπει να συμβάλλουν εξίσου στην απόδοση του RBFNN. Η ώρα της πρόβλεψης περιορίζει το εύρος της πιθανής παραγωγής και έχει μεγάλη σημασία, ενώ μερικές άλλες μεταβλητές χρησιμοποιούνται ως βοηθητικές και δεν έχουν άμεση σχέση με την παραγωγή. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ένα διάνυσμα βάρους  $w_i$ , που προσδιορίζει τις σημαντικές για την πρόβλεψη μεταβλητές, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του RBFNN. Οπότε, η σχέση (65) γίνεται:

$$o_j = \exp\left(-\frac{\|w_i(c_{i,j}-x_i)\|}{b^2}\right) \quad (66)$$

Το βέλτιστο διάνυσμα βάρους και το εύρος  $b$ , υπολογίζονται από τον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων ( PSO - Particle Swarm Optimization). Για να επιτευχθεί η καλύτερη εφαρμογή των RBFNN, η συνάρτηση κόστους  $f_c$  που επιλέχθηκε για τον PSO περιλαμβάνει αποτελέσματα από τη Μπεϋσιανή παρεμβολή (BI), τον αμερόληπτο εκτιμητή κινδύνου του Stein (SURE) και το μέσο απόλυτο σφάλμα MAE.

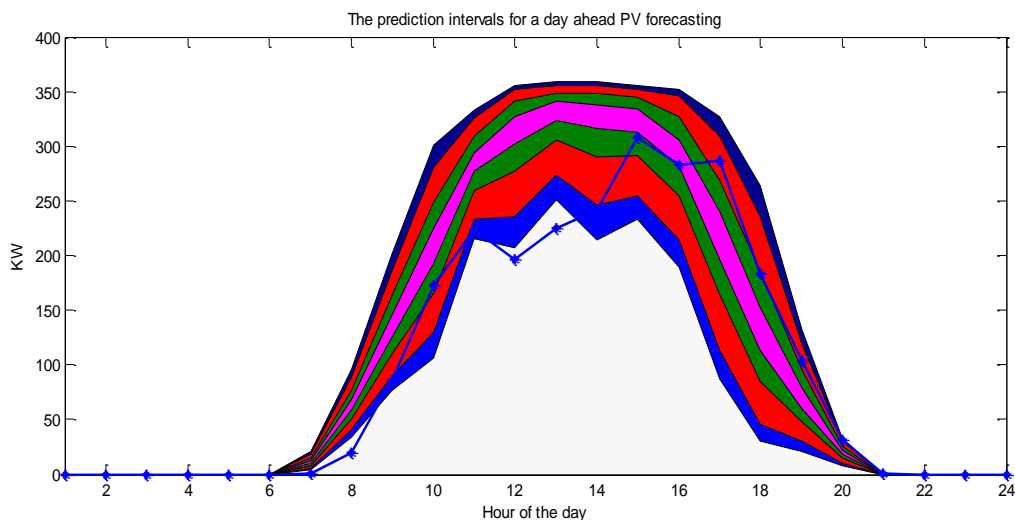
$$f_c = a_1 BI + a_2 SURE + a_3 MAE \quad (67)$$

όπου τα  $a_1$ ,  $a_2$  και  $a_3$  είναι συντελεστές για το βάρος κάθε κριτηρίου. Τα κριτήρια αυτά, υπολογίζονται αφού έχει καθοριστεί ο αριθμός των νευρώνων RBFNN και εξασφαλίζουν τη δυνατότητα γενίκευσης των νευρωνικών δικτύων. Το γενικευμένο κριτήριο αντί-επικύρωσης χρησιμοποιείται για την επιλογή του βέλτιστου αριθμού των νευρώνων του κρυμμένου στρώματος. Το σχήμα που ακολουθεί απεικονίζει το κανονικοποιημένο μέσο σφάλμα του προτεινόμενου μοντέλου για 7 φωτοβολταϊκά, με χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης 3 ημερών:



**Σχήμα 20: Κανονικοποιημένο MAE της πρόβλεψης παραγωγής για 7 φωτοβολταϊκά σε ορίζοντα πρόβλεψης 3 ημερών**

Το μοντέλο πρόβλεψης της παραγωγής τρέχει μια φορά κάθε μέρα και παρέχει προβλέψεις για τις τρεις επόμενες μέρες. Αρχικά, λαμβάνει στοιχεία από τις ΑΠΚ και επιλέγει τις καιρικές προβλέψεις που αντιστοιχούν στις συντεταγμένες των εγκαταστάσεων των φωτοβολταϊκών. Αυτές οι προβλέψεις μαζί με τα ημερολογιακά στοιχεία χρησιμοποιούνται ως είσοδος για το RBFNN. Τα δεδομένα εισόδου ενεργοποιούν τους νευρώνες RBFNN που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πυκνότητας πρόβλεψης με τη μέθοδο Bootstrap. Έτσι, για την πιθανοτική ροή φορτίου, οι ενεργοποιημένοι νευρώνες παράγουν ένα πλήθος αντιγράφων εισόδου. Τα αντίγραφα αυτά αξιολογούνται και η κατανομή των μοντέλων εξόδου σχηματίζει την προβλεπόμενη πυκνότητα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα διαστήματα των προβλεπόμενων πυκνοτήτων για πρόβλεψη της παραγωγής της επόμενης μέρας 7 φωτοβολταϊκών.



**Σχήμα 21: Πρόβλεψη πυκνότητας παραγωγής για 7 φωτοβολταϊκά για την επόμενη μέρα**

Η αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ δημιουργεί προβλήματα στη λειτουργία του συστήματος. Τα ντετερμινιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνταν παραδοσιακά για να αξιολογήσουν την επίδραση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στις τάσεις και τις ροές του δικτύου, δε μπορούν να δώσουν ρεαλιστική εικόνα για το που και πότε θα προκύψουν ανεπιθύμητες καταστάσεις. Η εφαρμογή των τεχνικών πιθανοτικής ροής φορτίου (PLF – Probabilistic Load Flow) ή προσομοιώσεων Monte Carlo, όπου οι μεταβολές παραγωγής και φορτίου θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές, είναι εξαιρετικά χρήσιμη, αφού μπορεί να δώσει ως αποτέλεσμα το πλήρες φάσμα όλων των πιθανών τιμών τάσεων στους ζυγούς και των ροών ισχύος, μαζί με τις αντίστοιχες πιθανότητες. Συνεπώς, οι τεχνικές PLF παρέχουν τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας ( PDF – Probability Density Functions) της ροής ισχύος στους κλάδους και των τάσεων στους κόμβους, εξετάζοντας τις πιθανές παραλλαγές της παραγωγής και της ζήτησης. Ειδικότερα, το πρόβλημα της ροής φορτίου μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από τις εξισώσεις (57) έως (62) που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επιπλέον, για τον προσδιορισμό των PDFs της παραγωγής των φωτοβολταϊκών εφαρμόζεται η μέθοδος Cornish- Fisher. [11]

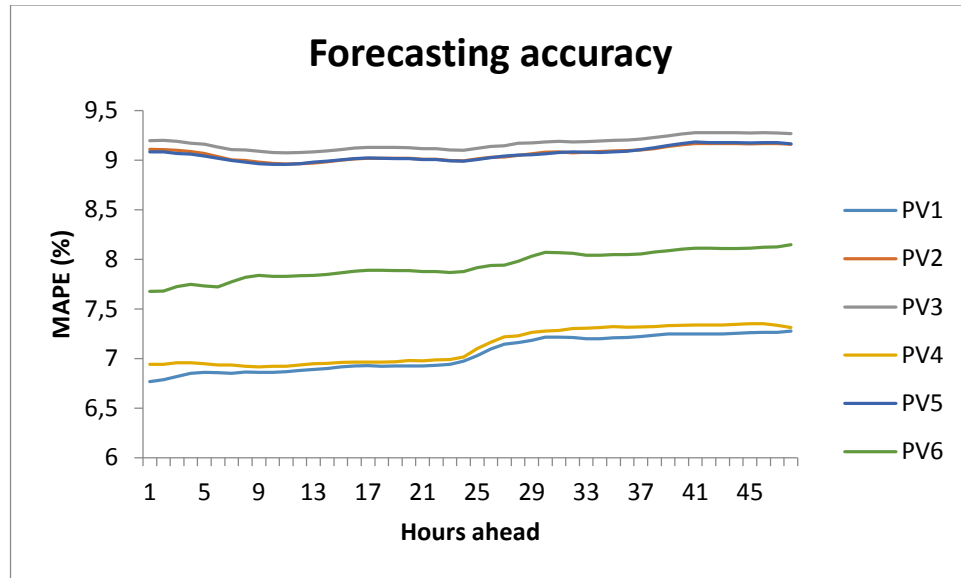
Η χρήση των δέντρων αποφάσεων ήταν καθοριστικής σημασίας για τον προσδιορισμό των ανάστροφων ροών. Ιστορικά δεδομένα από την παραγωγή των φωτοβολταϊκών μαζί με ένα δείκτη 0 ή 1 που έδειχνε την ύπαρξη ή μη ανάστροφης ροής, αποτέλεσαν το σύνολο μάθησης για την εκπαίδευση του δέντρου και την παραγωγή κανόνων. Οι κανόνες αυτοί αξιολογήθηκαν με την εφαρμογή τους στο σύνολο δοκιμής, όπου προσδιορίστηκε το ποσοστό εσφαλμένης ταξινόμησης (misclassification rate), και με τη μέθοδο της αντι-επικύρωσης (Cross Validation). Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν στα δεδομένα από την πρόβλεψη παραγωγής, έτσι ώστε να αποφανθούμε, αν με τη δεδομένη παραγωγή θα έχουμε αναστροφή ροής και ο διαχειριστής να ενημερωθεί εγκαίρως για να πραγματοποιήσει τον κατάλληλο σχεδιασμό λειτουργίας του δικτύου.

Επιπλέον, αναπτύχθηκε ένα πλήθος χρήσιμων λειτουργιών, όπως η δυνατότητα εκτίμησης της αύξησης της διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής. Η συνηθισμένη πρακτική είναι να εφαρμόζεται μια διαδικασία που ελέγχει αν παραβιάζονται τα λειτουργικά όρια σε ακραίες συνθήκες. Για παράδειγμα, ελέγχεται αν τα όρια τάσης παραβιάζονται στο σενάριο ελάχιστης ζήτησης – μέγιστης παραγωγής. Αυτό περιορίζει την σύνδεση νέων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Με τη χρήση του προτεινόμενου εργαλείου, συνδυάζονται οι πληροφορίες από τις πραγματικές με τις πιθανές λειτουργικές καταστάσεις, ώστε να καθοριστούν ασφαλέστερα ανώτερα όρια που θα επιτρέπουν τη σύνδεση περισσότερων μονάδων ΑΠΕ, χωρίς την ανάγκη νέων επενδύσεων προστασίας. Η συνάρτηση αυτή παίρνει ως είσοδο τις μακροπρόθεσμες προβλέψεις για την παραγωγή και το φορτίο και χρησιμοποιεί την πιθανοτική ροή φορτίου για να παρέχει τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας και τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης για τις μεταβλητές εξόδου. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την εκτίμηση της αύξησης της διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής. Επιπλέον, ο προγραμματισμός του Q-V ελέγχου, που προσδιορίζει τα σημεία λειτουργίας των ΑΠΕ καθώς και της περικοπής της παραγωγής των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής ενισχύει τον μηχανισμό εποπτείας και συμβάλλει στην αύξηση της διείσδυσης τους.

Με βάση τη σημερινή λειτουργία του δικτύου, ο διαχειριστής δε γνωρίζει τις συμφορήσεις και τις υπερτάσεις που εμφανίζονται. Με το προτεινόμενο εργαλείο δίνεται η δυνατότητα διαχείρισης της υπερφόρτισης των γραμμών και των υπερτάσεων, με την αξιοποίηση των βραχυπρόθεσμων πιθανοτικών προβλέψεων (12-24 ώρες μπροστά) για την παραγωγή και τη ζήτηση. Έτσι, παρέχονται πληροφορίες για την επόμενη μέρα για τους ευαίσθητους κόμβους και για τις μονάδες και τα φορτία όπου οι παραβιάσεις ορίου εμφανίζουν υψηλή αθροιστική πιθανότητα. Για το σκοπό αυτό, με την αναδιαμόρφωση των συνδέσεων του δικτύου με τους κατάλληλους διακόπτες, οι παραβιάσεις των ορίων μπορούν να αποφευχθούν.

### **5.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

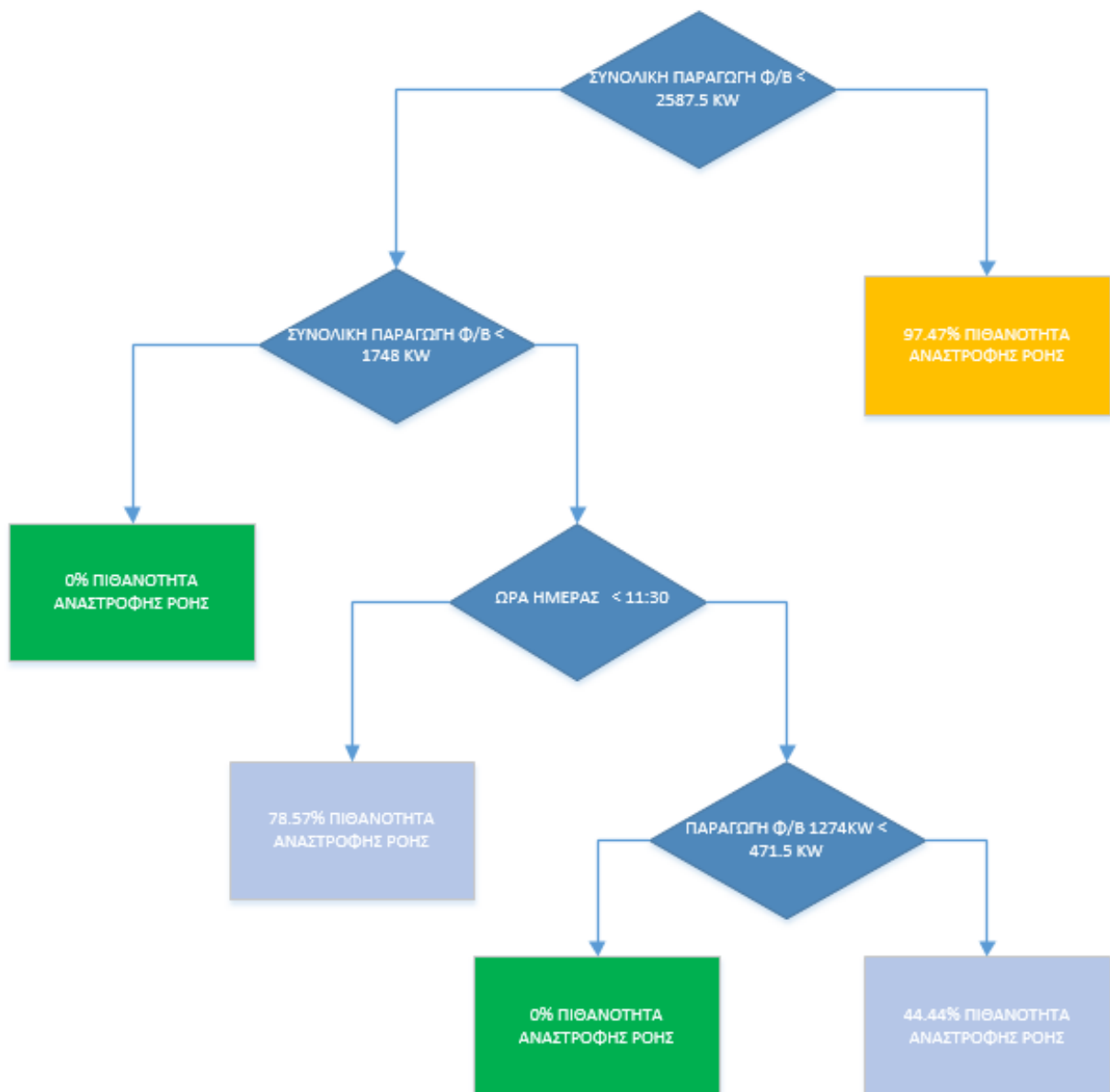
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται κάποια επιλεγμένα αποτελέσματα από την εφαρμογή των πιθανοτικών εργαλείων και συγκεκριμένα αποτελέσματα της αναχώρησης P25, που προέκυψαν μέσα από τις προσομοιώσεις στο Matlab, καθώς είναι αυτή με τη μεγαλύτερη διείσδυση φωτοβολταϊκών. Η πρόβλεψη της παραγωγής γίνεται κάθε ώρα για 48 ώρες μπροστά. Για κάθε φωτοβολταϊκή μονάδα, υπολογίζεται το σφάλμα MAPE, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο προβλέψεων για 6 μήνες (Ιανουάριος- Ιούνιος 2014).



**Σχήμα 22: Σφάλμα πρόβλεψης παραγωγής των 6 μεγάλων φωτοβολταϊκών της P25 για χρονικό ορίζοντα 48 ωρών**

Το MAPE κυμαίνεται από 6.7- 9.3 % . Είναι αξιοσημείωτο ότι η πρόβλεψη για λιγότερο από 24 ώρες μπροστά είναι ελαφρώς ακριβέστερη, αλλά το σφάλμα για τον ορίζοντα των 48 ωρών παραμένει μικρό.

Όσον αφορά τον εντοπισμό αναστροφής της ροής, γνωρίζοντας την ύπαρξη ή μη αναστροφής σε προηγούμενες καταστάσεις, εφαρμόζουμε τους κανόνες που προέκυψαν σε νέες, μη μελετημένες. Ενδεικτικά, παρατίθενται οι κανόνες που προέκυψαν από την εφαρμογή των δέντρων απόφασης για τη γραμμή P25 και τα αποτελέσματα που βγήκαν για το μήνα Ιούνιο:



**Σχήμα 23: Κανόνες από τα δέντρα απόφασης για την πρόβλεψη ανάστροφης ροής στη γραμμή P25**



timest	KW						Παραγωγή Φ/Β	Αναστροφή
	700,0	470,0	1274,0	1815,0	500,0	500,0		
1/6/2014 0:00	0	0	0	0	0	0	0,0	0
1/6/2014 1:00	0	0	0	0	0	0	0,0	0
1/6/2014 2:00	0	0	0	0	0	0	0,0	0
1/6/2014 3:00	0	0	0	0	0	0	0,0	0
1/6/2014 4:00	31	26	40	12	24	22	205,7	0
1/6/2014 5:00	110	159,0	232	372	82	78	1370,9	0
1/6/2014 6:00	220	212,0	470,0	711	167,0	161,0	2575,8	1
1/6/2014 7:00	329,0	289,0	608,0	965,0	251,0	243,0	3563,2	1
1/6/2014 8:00	412,0	322,0	695	1141	306	302	4217,4	1
1/6/2014 9:00	455	343,0	811	1246	329	330	4663,3	1
1/6/2014 10:00	462	328	803,0	1264	330	335	4673,9	1
1/6/2014 11:00	438	295	816	1186	318	322	4478,8	1
1/6/2014 12:00	383	259	815	1014	286	287	4039,6	1
1/6/2014 13:00	298	220,0	783	776	226,0	226,0	3356,1	1
1/6/2014 14:00	195	101,0	594	514	146,0	148,0	2253,3	0
1/6/2014 15:00	97,0	39,0	299	269	70,0	72,0	1122,7	0
1/6/2014 16:00	28,0	0,0	116	79,0	20,0	20,0	349,0	0
1/6/2014 17:00	0,0	0,0	21,0	0,0	0,0	0,0	27,9	0
1/6/2014 18:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
1/6/2014 19:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
1/6/2014 20:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
1/6/2014 21:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
1/6/2014 22:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
1/6/2014 23:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0

**Σχήμα 24: Εφαρμογή κανόνων στα δεδομένα των προβλέψεων Ιουνίου για τη γραμμή P25**

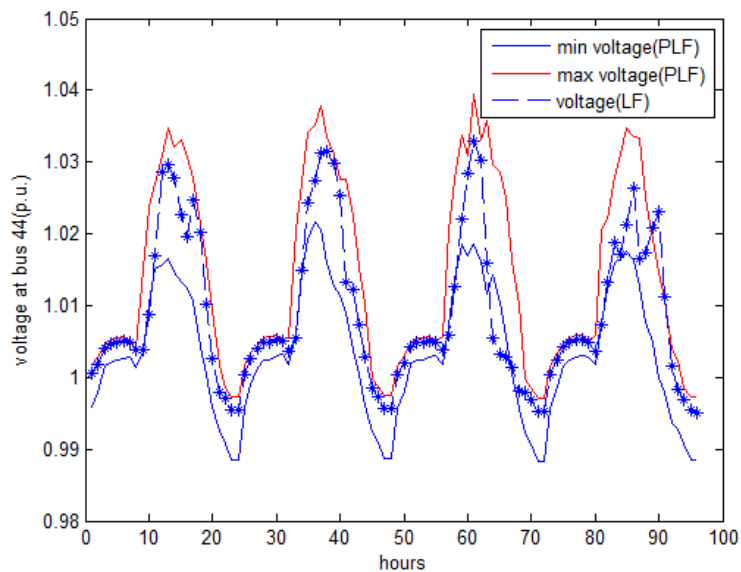
Στο DMS, η συμβολή των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στην εμφάνιση υπερτάσεων και στη συμφόρηση των γραμμών δε λαμβανόταν υπόψη. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις λειτουργίες πρόβλεψης των υπερτάσεων και της υπερφόρτισης των γραμμών, που προέκυψαν χρησιμοποιώντας την πρόβλεψη παραγωγής και ζήτησης και την πιθανοτική ροή φορτίου, προκειμένου να παρέχουν πληροφορίες για τους πιο ευαίσθητους κόμβους και γραμμές για τις επόμενες 24 ώρες. Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν 4 μέρες του Απριλίου, του Μαΐου και του Ιουνίου στον κόμβο 44 της αναχώρησης P25, καθώς σε αυτόν τον κόμβο συνδέεται το μεγαλύτερο φωτοβολταϊκό (1815 kW) της γραμμής, γι' αυτό και αντιμετωπίζει τα μεγαλύτερα προβλήματα υπερτάσεων.

Στον παρακάτω πίνακα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των PLF που δίνουν τις PDF για κάθε ώρα της επόμενης μέρας με τα αποτελέσματα της απλής ροής φορτίου (LF - Load Flow), τα οποία βασίζονται στις μετρήσεις των έξυπνων μετρητών στην αρχή των αναχωρήσεων του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ, για τις ίδιες μέρες.

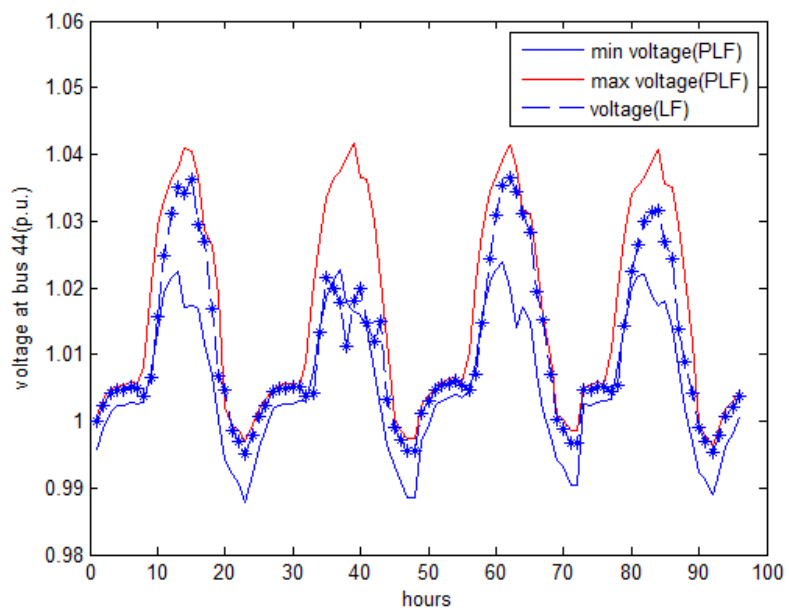
	<b>April</b>	<b>May</b>	<b>June</b>
Μη ανίχνευση (Missed Alarm) - Η μετρούμενη τάση είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη τιμή της PDF τάσης	2.08%	1.04%	7.29%
Λανθασμένη ειδοποίηση (False Alarm) - Η μετρούμενη τάση είναι μικρότερη από την ελάχιστη τιμή της PDF τάσης	8.33%	9.37%	7.29%
Οι μετρούμενες τιμές είναι εκτός ελάχιστων και μέγιστων ορίων της PDF τάσης	11.46%	10.42%	15.58%
<b>Συνολικό ποσοστό σφαλμάτων για τη περίοδο</b>	<b>12.15%</b>		

**Πίνακας 4 : Συγκριτικός πίνακας των PLF και LF για την τάση στον κόμβο 44**

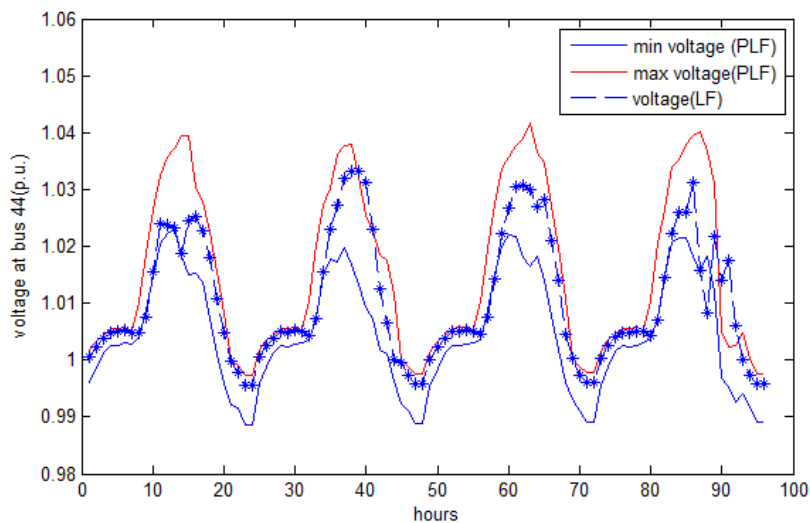
Τα αποτελέσματα είναι γενικά πολύ ικανοποιητικά. Φυσικά, υπάρχουν και εσφαλμένες εκτιμήσεις για υπερτάσεις που ενδέχεται να μη συμβούν, αλλά αυτό δεν επηρεάζει τον προσδιορισμό των ορίων τάσης λειτουργίας, γεγονός που συνέβη μια μόνο φορά στη μελέτη για την αξιολόγηση του εργαλείου. Τα παρακάτω γραφήματα απεικονίζουν τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την απλή ροή φορτίου για την τάση στο ζυγό 44 σε σχέση με την τάση που υπολογίστηκε από την PLF για τον ίδιο ζυγό, για τέσσερις συγκεκριμένες μέρες.



**Σχήμα 25: Σύγκριση της τάσης από την LF και της τάσης από την PLF για το μήνα Απρίλιο (4 μέρες – Κόμβος 44)**

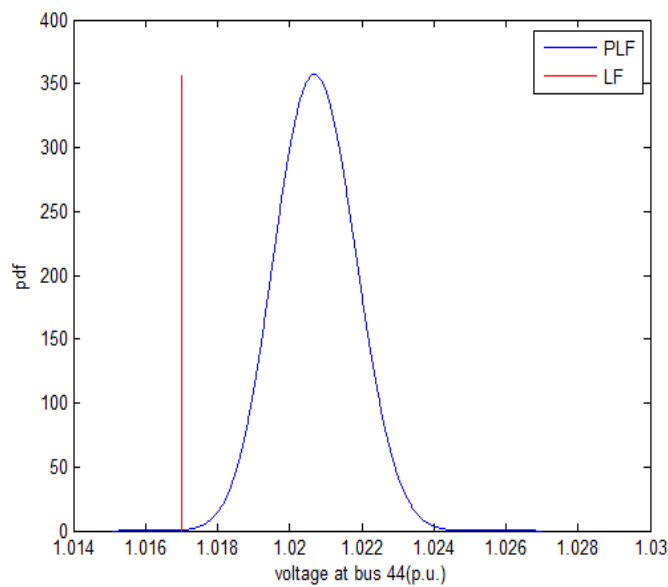


**Σχήμα 26: Σύγκριση της τάσης από την LF και της τάσης από την PLF για το μήνα Μάιο (4 μέρες – Κόμβος 44)**

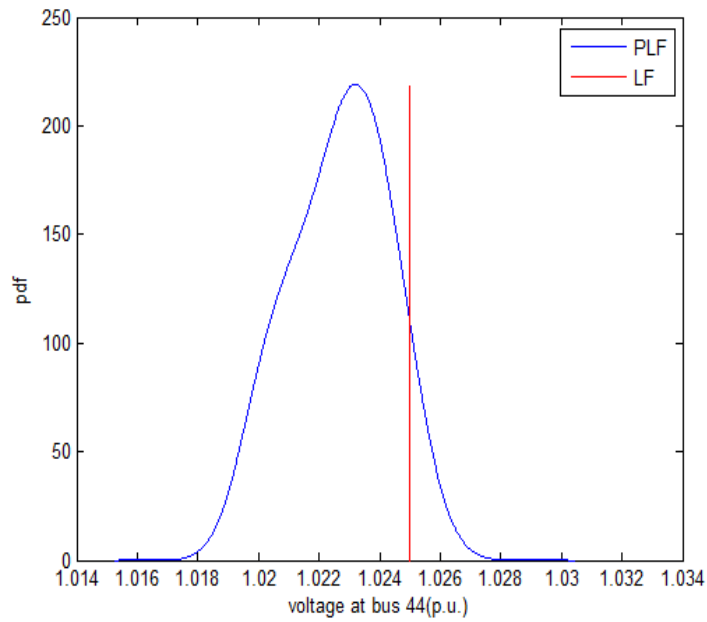


**Σχήμα 27: Σύγκριση της τάσης από την LF και της τάσης από την PLF για το μήνα Ιούνιο (4 μέρες – Κόμβος 44)**

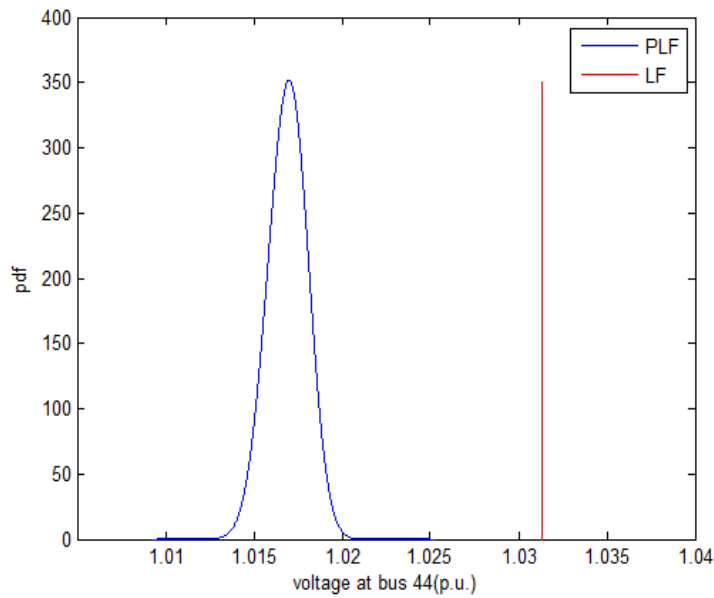
Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται η τάση από την LF σε σχέση με την τάση που προέκυψε από την PLF για κάποια συγκεκριμένη ώρα και μέρα, από αυτές που εξετάσαμε προηγουμένως. Παρατίθενται, μια κατάσταση όπου η μετρούμενη τιμή βρίσκεται μέσα στο εύρος ζώνης της PLF αλλά κοντά στο ελάχιστο όριο, μια κατάσταση όπου η μετρούμενη τιμή βρίσκεται μέσα στο εύρος ζώνης της PLF χωρίς να είναι κοντά στα όρια και μια κατάσταση όπου η μέτρηση είναι μεγαλύτερη από το άνω όριο του εύρους ζώνης της PLF. Η τελευταία περίπτωση είναι το παράδειγμα μιας μη ανιχνευμένης υπέρτασης (missed alarm) και αντιστοιχεί στη μόνη περίπτωση που ανιχνεύεται παραβίαση του ορίου τάσης.



**Σχήμα 28: Τάση από PLF και LF 04/04/2014 στις 10:00 π.μ στον κόμβο 44**



**Σχήμα 29: Τάση από PLF και LF 02/06/2014 στις 15:00 π.μ στον κόμβο 44**



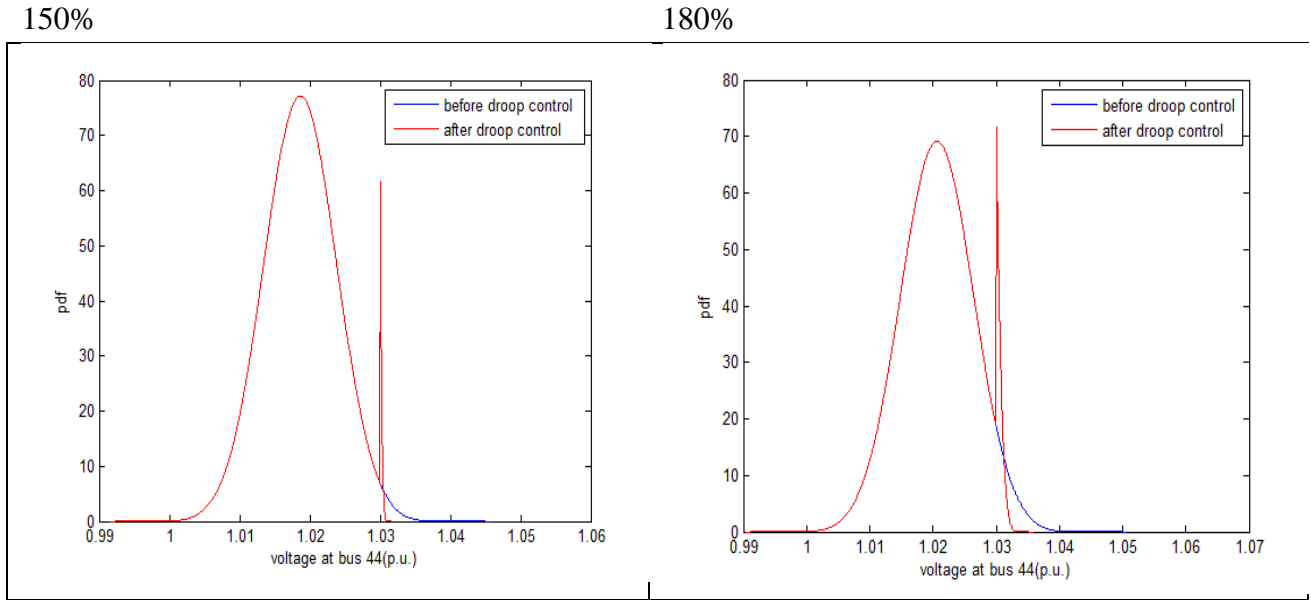
**Σχήμα 30: Τάση από PLF και LF 05/06/2014 στις 15:00 π.μ στον κόμβο 44**

Στους παρακάτω πίνακες φαίνεται η επίδραση της αύξησης της διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής στην τάση του κόμβου 44. Με βάση τα αποτελέσματα της PLF, υπολογίζεται η αθροιστική πιθανότητα για παραβίαση των ορίων τάσης. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως η ετήσια πιθανότητα περικοπής της παραγωγής, προκειμένου να αποφευχθούν οι υπερτάσεις. Επίσης, μελετήθηκε η επίδραση του ελέγχου αέργου ισχύος ενός φωτοβολταϊκού. Οι PDFs της τάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της αθροιστικής πιθανότητας των ορίων παραβίασης σε ένα φωτοβολταϊκό με εγκατεστημένο έλεγχο Q-V (droop control). Η εγκατεστημένη ισχύς όλων των φωτοβολταϊκών, που βρίσκονται συνδεδεμένα στη MT, πολλαπλασιάζεται και εκφράζεται ως ποσοστό της ονομαστικής τους ισχύος, προκειμένου να ελεγχθούν οι επιπτώσεις μιας πιθανής αύξησης της διείσδυσης. Ως άνω όριο για την τάση τέθηκε το 1,03 α.μ. Τα παρακάτω αποτελέσματα αναφέρονται στις 12:00 (μεσημβρία), διότι πιθανότερα εκείνη την ώρα θα έχουμε την μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία, άρα και τη μεγαλύτερη πιθανότητα να εμφανιστούν προβλήματα υπερτάσεων. Οι ωριαίες τιμές στις 12:00, διαιρούνται στις 4 εποχές του έτους. Για κάθε εποχή, υπολογίζονται οι ωριαίες PDFs για την παραγωγή και τη ζήτηση. Παρακάτω, απεικονίζονται οι αθροιστικές πιθανότητες για τις παραβιάσεις σε όλες τις ώρες της μέρας για κάθε εποχή.

1<sup>η</sup> Εποχή:

Κόμβος 44			
Εγκατεστημένη ισχύς (ως ποσοστό της αρχικά εγκατεστημένης)	100%	150%	180%
Πιθανότητα παραβίασης των ορίων τάσης (%)			
Χωρίς Q-V έλεγχο	0.00(%)	0.92 (%)	5.73 (%)
Με Q-V έλεγχο	0.00(%)	0.56 (%)	3.99 (%)

**Πίνακας 5: Μέση τιμή των PDFs για την 1<sup>η</sup> εποχή στον κόμβο 44**



**Σχήμα 31: PDF για την 1<sup>η</sup> εποχή στις 12:00 με και χωρίς droop control για αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος στο 150% και 180% αντίστοιχα**

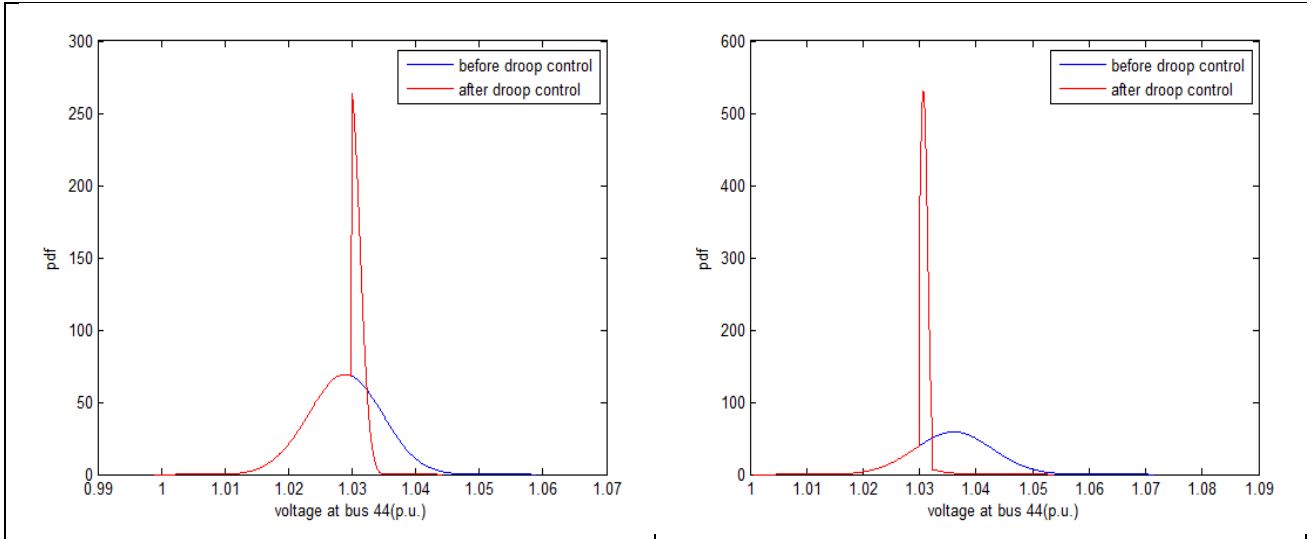
2<sup>η</sup> Εποχή:

Κόμβος 44			
Εγκατεστημένη ισχύς (ως ποσοστό της αρχικά εγκατεστημένης)	100%	150%	180%
Πιθανότητα παραβίασης των ορίων τάσης (%)			
Χωρίς Q-V έλεγχο	0.00 (%)	7.78 (%)	21.68 (%)
Με Q-V έλεγχο	0.00 (%)	6.93 (%)	18.11 (%)

**Πίνακας 6: Μέση τιμή των PDFs για την 2<sup>η</sup> εποχή στον κόμβο 44**

150%

180%



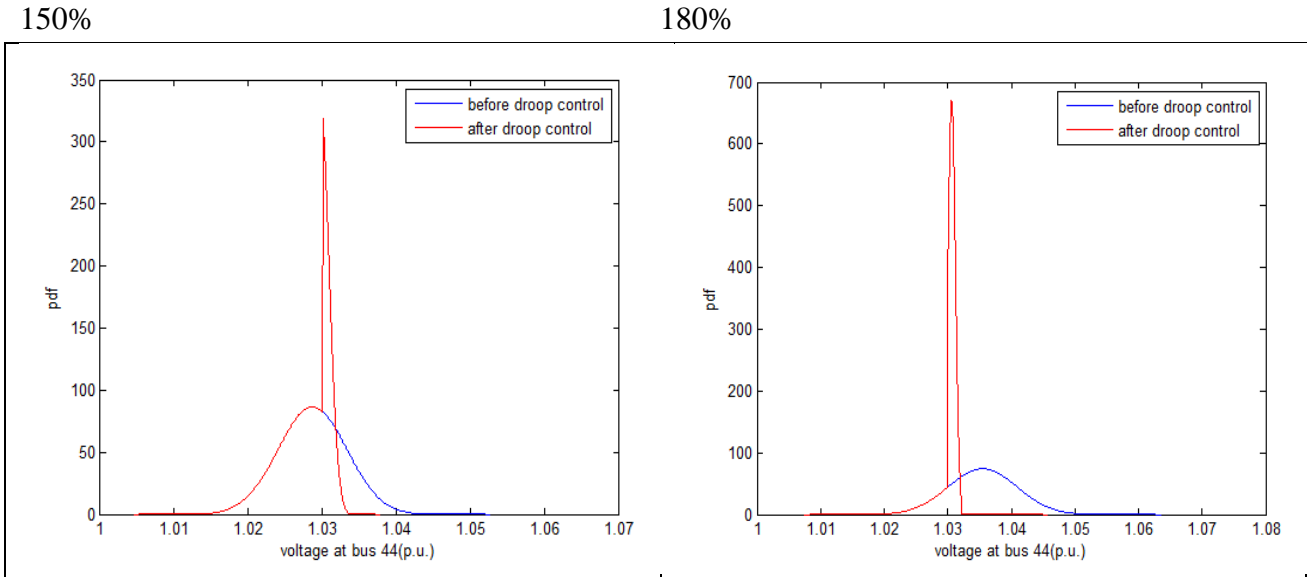
**Σχήμα 32: PDF για την 2<sup>η</sup> εποχή στις 12:00 με και χωρίς droop control για αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος στο 150% και 180% αντίστοιχα**

3<sup>η</sup> Εποχή:

Κόμβος 44			
Εγκατεστημένη ισχύς (ως ποσοστό της αρχικά εγκατεστημένης)	100%	150%	180%
Πιθανότητα παραβίασης των ορίων τάσης (%)			
Χωρίς Q-V έλεγχο	0.00 (%)	7.24 (%)	24.30 (%)
Με Q-V έλεγχο	0.00 (%)	6.57 (%)	20.31 (%)

**Πίνακας 7: Μέση τιμή των PDFs για την 3<sup>η</sup> εποχή στον κόμβο 44**



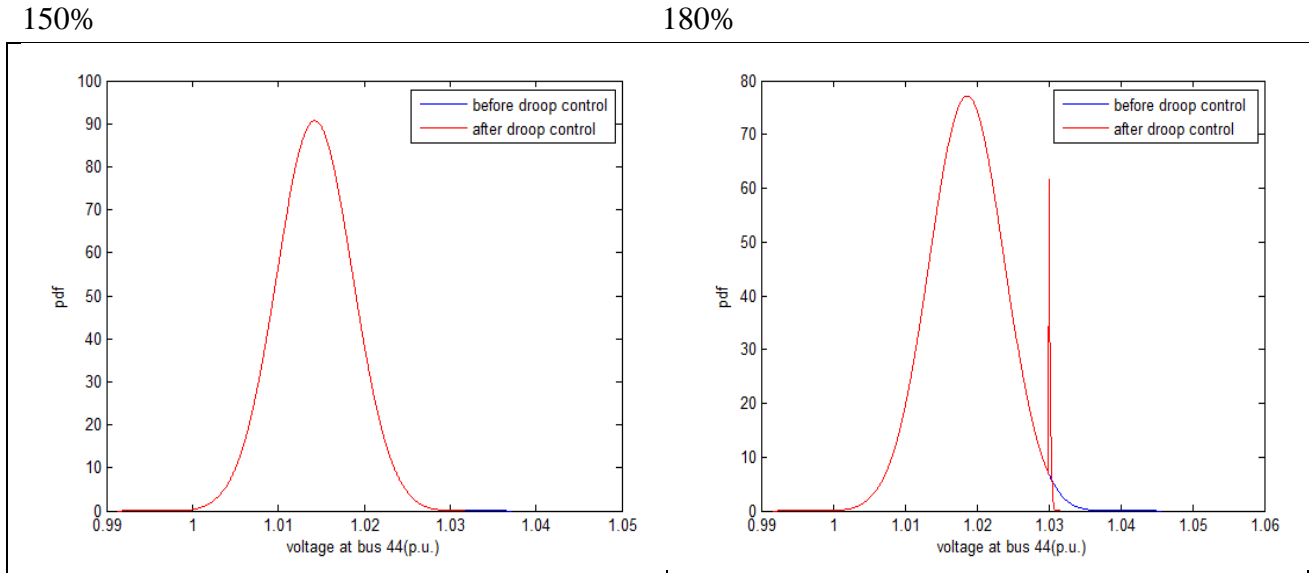


**Σχήμα 33: PDF για την 3<sup>η</sup> εποχή στις 12:00 με και χωρίς droop control για αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος στο 150% και 180% αντίστοιχα**

4<sup>η</sup> Εποχή:

Κόμβος 44			
Εγκατεστημένη ισχύς (ως ποσοστό της αρχικά εγκατεστημένης)	100%	150%	180%
Πιθανότητα παραβίασης των ορίων τάσης (%)			
Χωρίς Q-V έλεγχο	0.00 (%)	0.00 (%)	0.21 (%)
Με Q-V έλεγχο	0.00 (%)	0.00 (%)	0.09 (%)

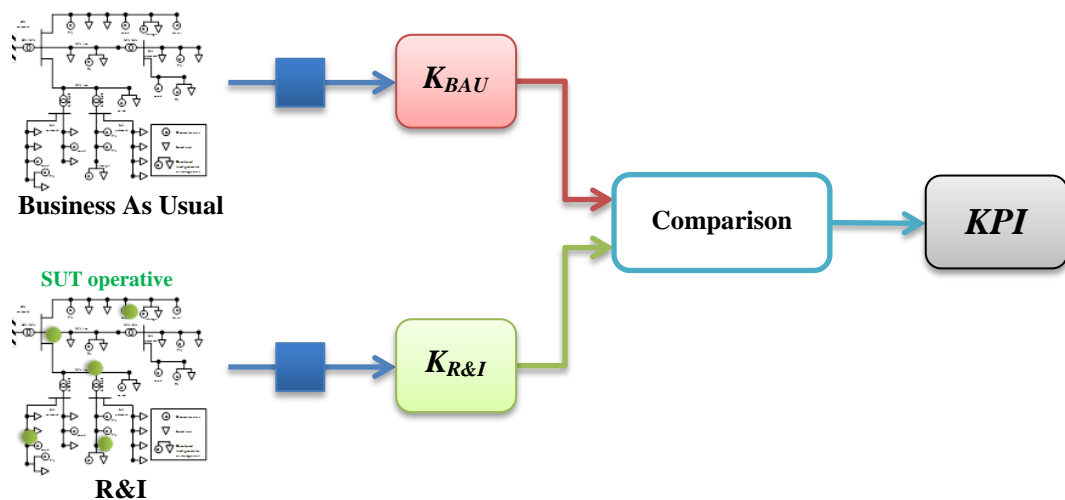
**Πίνακας 8: Μέση τιμή των PDFs για την 4<sup>η</sup> εποχή στον κόμβο 44**



**Σχήμα 34: PDF για την 4<sup>η</sup> εποχή στις 12:00 με και χωρίς droop control για αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος στο 150% και 180% αντίστοιχα**

#### 5.4. KPIs

Η συμβολή των πιθανοτικών εργαλείων στην εποπτεία και πρόβλεψη αξιολογείται μέσα από την υιοθέτηση κάποιων δεικτών (KPIs – Key Performance Indicators), οι οποίοι συγκρίνουν δύο σενάρια: εκείνο της υπάρχουσας λειτουργικής κατάστασης (BAU – Business as Usual), όπου δε χρησιμοποιούνται τα προτεινόμενα εργαλεία, και το σενάριο έρευνας και καινοτομίας (R&I – Research & Innovation), στο οποίο χρησιμοποιούνται. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει σχηματικά την αρχιτεκτονική υπολογισμού των KPIs, όπου K είναι ο δείκτης οφέλους.



**Σχήμα 35: Αρχιτεκτονική υπολογισμού των KPIs**

- **Ακρίβεια πρόβλεψης της παραγωγής των ΑΠΕ**

Η τεχνική πρόβλεψης παραγωγής και ζήτησης βασίζεται στη χρήση νευρωνικών δικτύων που χρησιμοποιούν καιρικά δεδομένα και δεδομένα της προηγούμενης μέρας που έχουν συλλεχθεί από τους έξυπνους μετρητές. Με την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής, ο διαχειριστής ενημερώνεται προκειμένου να πραγματοποιήσει τον κατάλληλο σχεδιασμό λειτουργίας του δικτύου. Ο ΚΡΙ που χρησιμοποιείται εδώ, συγκρίνει τη συνολική ενέργεια που παρέχεται από τα φωτοβολταϊκά σύμφωνα με τις μετρήσεις που συλλέγονται στο Κέντρο Τηλεμέτρησης και τις συγκρίνει με τις τιμές που έχουν προκύψει από την πρόβλεψη της παραγωγής. Υπολογίζεται το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα MAPE μεταξύ της πραγματικής πρόβλεψης και της προβλεπόμενης τιμής του φωτοβολταϊκού  $m$  που είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο MT.

$$MAPE = \left( \frac{\sum_{t=1}^{N_m} |E_{t-m}|}{N_m} \cdot 100\% \right) / S_{nom} \quad (68)$$

$$E_{t-m} = A_{t-m} - F_{t-m} \quad (69)$$

όπου:

$E_{t-m}$ : το σφάλμα πρόβλεψης τη μέτρηση  $t$  για το φωτοβολταϊκό  $m$

$A_{t-m}$ : η πραγματική παραγωγή

$F_{t-m}$ : η προβλεπόμενη παραγωγή

$N_m$ : ο αριθμός των διαθέσιμων μετρήσεων για το φωτοβολταϊκό  $m$

$S_{nom}$ : η εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού  $m$

Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των δύο πρώτων στόχων των πιθανοτικών εργαλείων όπως αναφέρθηκαν, δηλαδή για τη βελτίωση εποπτείας της λειτουργίας του δικτύου και τη διαχείριση υπερτάσεων και υπερφορτίσεων των γραμμών.

	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5	PV6
KPI (%)	6.88	9.02	9.12	6.95	9.01	7.82

**Πίνακας 9: Αποτελέσματα ΚΡΙ (MAPE) των 6 μεγάλων φωτοβολταϊκών της γραμμής P25**

- **Ακρίβεια στην ανίχνευση συμφόρησης των γραμμών και υπερτάσεων στους κόμβους**

Η ακρίβεια εκτίμησης της τεχνικής ανίχνευσης των υπερτάσεων και της υπερφόρτισης των γραμμών βασίζεται στην πρόβλεψη παραγωγής και ζήτησης φορτίου και στην PLF, προκειμένου να καθοριστούν τα όρια λειτουργίας για τις επόμενες 24 ώρες. Έτσι, παρέχονται πληροφορίες για τους πιο ευαίσθητους κόμβους και γραμμές, καθιστώντας αναγκαίο τον επανασχεδιασμό της λειτουργίας του δικτύου. Αυτός ο KPI συγκρίνει τα αποτελέσματα των υπολογισμών PLF που εκτελούνται την προηγούμενη μέρα με τους υπολογισμούς της ροής φορτίου για τα πραγματικά δεδομένα, που συλλέγονται από τους έξυπνους μετρητές και τις μετρήσεις ροής στον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ. Οι αποκλίσεις στις τιμές τάσης και ρεύματος συγκρίνονται χρησιμοποιώντας το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα:

$$MAPE = \left( \frac{\sum_{t=1}^{N_m} |E_{t-m}|}{N_m \cdot |A_{t-m}|} \cdot 100\% \right)_m \quad (70)$$

$$E_{t-m} = A_{t-m} - F_{t-m} \quad (71)$$

όπου:

$E_{t-m}$ : το σφάλμα της μέτρησης  $t$  για την τάση στον κόμβο  $m$  ή το ρεύμα στον κλάδο  $m$

$A_{t-m}$ : η πραγματική τιμή που υπολογίστηκε από την LF για την τάση στον κόμβο  $m$  ή τη ροή στον κλάδο  $m$

$F_{t-m}$ : η μέση τιμή της PDF για την τάση στον κόμβο  $m$  ή τη ροή στον κλάδο  $m$

$N_m$ : ο αριθμός των διαθέσιμων μετρήσεων  $m$

Ένας πιο αντιπροσωπευτικός δείκτης βασίζεται στα διαστήματα εμπιστοσύνης της PDF της τάσης ή του ρεύματος. Προς τη κατεύθυνση αυτή, εξετάζεται αν τα αποτελέσματα της LF εμπίπτουν μέσα στα διαστήματα εμπιστοσύνης που καθορίζονται από σταθερές αποκλίσεις  $\sigma$ ,  $2\sigma$  και  $3\sigma$ . οπότε, ο υπολογισμός του MAPE γίνεται ως εξής:

$$E_{t-m} = \begin{cases} |A_{t-m} - F_{t-m,+x\sigma}|, & \text{αν } A_{t-m} > F_{t-m,+x\sigma} \\ 0, & \text{αν } F_{t-m,-x\sigma} < A_{t-m} < F_{t-m,+x\sigma} \\ |A_{t-m} - F_{t-m,-x\sigma}|, & \text{αν } A_{t-m} < F_{t-m,-x\sigma} \end{cases} \quad (72)$$

Όπου  $F_{t-m,+x\sigma}$  τα όρια  $\sigma$ ,  $2\sigma$  και  $3\sigma$  των διαστημάτων εμπιστοσύνης της PDF. Τυπικά επιλέγεται η  $3\sigma$ .

Ο KPI υπολογίζεται τις ώρες της μέρας που έχουμε παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Δεδομένου ότι μετράμε τη διαφορά μεταξύ της μετρούμενης τιμής και των άνω και κάτω ορίων

της PDF, ο KPI λαμβάνει μικρές τιμές, γεγονός που δείχνει ότι οι διαφορές είναι μικρές. Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των του πρώτου στόχου των πιθανοτικών εργαλείων, δηλαδή για τη βελτίωση εποπτείας της λειτουργίας του δικτύου.

KPI (%)	0.1130 %
---------	----------

**Πίνακας 10: Αποτελέσματα KPI για την τάση στον κόμβο 44 της γραμμής P25**

- **Αύξηση της διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής ( Hosting Capacity Increase)**

Ο δείκτης αυτός αξιολογεί τη συμβολή των πιθανοτικών εργαλείων στην εγκατάσταση περισσότερων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Τα πιθανοτικά εργαλεία χρησιμοποιούν έξυπνους ελέγχους που θέτουν νέα όρια λειτουργίας, που σε αντίθεση με τα όρια που τίθενται από τους συμβατικούς ελέγχους, επιτρέπουν σε περισσότερες ΑΠΕ να συνδέονται, χωρίς να υποβαθμίζεται η ασφάλεια λειτουργίας του. Για το σκοπό αυτό, προσδιορίζεται το ανώτερο όριο σύνδεσης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο υπάρχον δίκτυο, χωρίς την ανάγκη νέων επενδύσεων. Η πιθανοτική ροή φορτίου παρέχει τις PDF και τα διαστήματα εμπιστοσύνης, επιτρέποντας έτσι τον υπολογισμό της πιθανότητας παραβίασης των λειτουργικών ορίων. Έτσι, ο ιδιοκτήτης κάθε μονάδας παραγωγής θα γνωρίζει την πιθανότητα αποσύνδεσης της μονάδας του από το δίκτυο. Επιπλέον, μέσα από τον έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος που καθορίζουν τα βέλτιστα σημεία λειτουργίας για κάθε ΑΠΕ, αυξάνεται η δυνατότητα εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής. Ο δείκτης υπολογίζεται ως εξής:

$$HC_{\%} = \frac{HC_{SG} - HC_{BL}}{HC_{BL}} \cdot 100\% \quad (73)$$

όπου

$HC_{BL}$ : η αρχική εγκατεστημένη ισχύς

$HC_{SG}$ : η εγκατεστημένη ισχύς με την εφαρμογή των πιθανοτικών εργαλείων

Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των δύο τελευταίων στόχων των πιθανοτικών εργαλείων όπως αναφέρθηκαν, δηλαδή για τον προσδιορισμό της αύξησης της διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής και για τη συμβολή του καθορισμού των σημείων λειτουργίας (set-points) στην εποπτεία και πρόβλεψη. Στα παρακάτω αποτελέσματα παρουσιάζεται η τιμή του KPI μαζί με την ετήσια πιθανότητα για παραβίαση των ορίων τάσης στον κόμβο 44 της γραμμής P25.

Use Case: Προσδιορισμός της αύξησης της διείδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής		Use Case: Ελέγχος αέργου ισχύος-τάσης - Καθορισμός των σημείων λειτουργίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής	
KPI	Πιθανότητα παραβίασης των ορίων τάσης (%)	KPI	Πιθανότητα παραβίασης των ορίων τάσης (%)
50%	3.99	50%	3.51
80%	12.98	80%	10.62

**Πίνακας 11: Αποτελέσματα KPI για τον κόμβο 44 της γραμμής P25**

- **Ποιότητα ισχύος**

Στόχος αυτού του δείκτη αξιολόγησης είναι να ποσοτικοποιήσει την επίδραση της μεγάλης διείδυσης διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής στην ποιότητα της ισχύος πριν και μετά την ανάπτυξη των πιθανοτικών εργαλείων. Έτσι, η αύξηση της τάσης στους πιο αδύναμους κόμβους μπορεί να αποφευχθεί με επαναπρογραμματισμό των διασυνδέσεων μεταξύ των γραμμών του δικτύου. Η βελτίωση της ποιότητας ισχύος αξιολογείται συγκρίνοντας την αθροιστική πιθανότητα για παραβίαση των ορίων τάσης και υπερφόρτισης των γραμμών με και χωρίς τη χρήση των πιθανοτικών εργαλείων:

$$Violation Prob = P(V_k > V_{lim})_{BAU} - P(V_k > V_{lim})_{REC} \quad (74)$$

όπου:

$P(V_k > V_{lim})$ : η αθροιστική πιθανότητα η τάση V στον κόμβο k ( $V_k$ ) να υπερβεί το όριο  $V_{lim}$

BAU: Business as Usual, δηλαδή το υπάρχον σενάριο λειτουργίας

REC: Reconfiguration, δηλαδή το σενάριο λειτουργίας μετά τις αλλαγές στη διασύνδεση των γραμμών

Θεωρώντας ότι με τις προτεινόμενες αλλαγές δεν υπάρχει παραβίαση των ορίων λειτουργίας, ο KPI υπολογίζεται ως:

$$P(V_k > V_{lim})_{BAU} \quad (75)$$

Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση του δεύτερου στόχου των πιθανοτικών εργαλείων, δηλαδή για τη διαχείριση υπερτάσεων και υπερφορτίσεων των γραμμών. Τα αποτελέσματα για την αναχώρηση P25 παρουσιάζονται παρακάτω:

KPI (%)	5.46 %
---------	--------

**Πίνακας 12: Αποτελέσματα KPI για τη γραμμή P25**

## **6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ**

---

Η αξιοποίηση των πιθανοτικών εργαλείων για την πρόβλεψη και την εποπτεία γραμμών ΜΤ με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής στην περιοχή της Σπερχειάδας συνέβαλε θετικά στον καλύτερο προγραμματισμό λειτουργίας του δικτύου και στην αποφυγή ανεπιθύμητων καταστάσεων που δε θα είχαν αποφευχθεί διαφορετικά. Ο καλύτερος έλεγχος λειτουργίας του δικτύου επιτεύχθηκε με τη δυνατότητα πρόβλεψης της παραγωγής των ΑΠΕ και την ανίχνευση υπερτάσεων στους κόμβους και συμφορήσεων στις γραμμές, προτείνοντας μια εναλλακτική διασύνδεση μεταξύ των γραμμών, όπου κρίθηκε αναγκαίο. Η διαχείριση και η αποφυγή υπερτάσεων και υπερφορτίσεων των γραμμών έγινε χάρη στην έγκαιρη πρόβλεψη της παραγωγής και της ζήτησης και στη βελτίωση της παρεχόμενης ποιότητας ισχύος. Τέλος, ο σχεδιασμός για την αύξηση της διείσδυσης της διεσπαρμένης παραγωγής και για τον καθορισμό των σημείων λειτουργίας των ΑΠΕ πραγματοποιήθηκε με τους πιθανοτικούς ελέγχους που έθεσαν νέα όρια για την περαιτέρω εγκατάσταση μονάδων παραγωγής.

Η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής καθιστά αναγκαίο τον καλύτερο έλεγχο και την εποπτεία του δικτύου. Προς την κατεύθυνση αυτή, η εφαρμογή των εργαλείων αυτών σε περισσότερες αναχωρήσεις και σε άλλες περιοχές του δικτύου διανομής θα μπορούσε να αναβαθμίσει σημαντικά την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών από το ΔΕΔΔΗΕ και να συμβάλει στην οικονομικότερη διαχείριση των ενεργειακών πόρων.

Στο δίκτυο μας, μελετήθηκαν η αναστροφή της ροής ισχύος, η ύπαρξη υπερτάσεων, η συμφόρηση των γραμμών και η δυνατότητα εγκατάστασης περισσότερων μονάδων ΑΠΕ. Σε επόμενες εργασίες θα μπορούσε να εξεταστεί η πρόβλεψη παραγωγής από ανεμογεννήτριες ή μονάδες από κυψέλες καυσίμου και βιομάζας, καθώς στην περίπτωσή μας εξετάστηκε μόνο η παραγωγή από φωτοβολταϊκά. Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμο να εξεταστούν και άλλα ζητήματα που υπάρχουν στα δίκτυα διανομής, όπως συνεργασία των πιθανοτικών εργαλείων με τα μέσα προστασίας, ανάπτυξη εφαρμογών για την ανίχνευση αρμονικών και τη διαχείριση της αύξησης του επιπέδου σφάλματος.





## 7. ΠΗΓΕΣ

---

- [1]. Μ.Π Παπαδόπουλος – Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας – Τόμος 1
- [2]. Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής - Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας
- [3]. Β.Κ. Παπαδιάς – Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας - Τόμος 1
- [4]. Ειρήνη Λεωνιδάκη – Ανάπτυξη και δομή δικτύου – Απρίλιος 2010
- [5]. Ειρήνη Λεωνιδάκη – Δομή δικτύου – 19-5-2011
- [6]. Γ. Κορρές - Εποπτεία και διαχείριση ενεργειακών συστημάτων
- [7]. Διαμαντής Ξυδάς- Εφαρμογή τεχνολογιών έξυπνης μέτρησης στο δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ
- [8]. V. Cagri Gungor, Dilan Sahin, Taskin Kocak, Salih Ergut, Concettina Buccella, Carlo Cecati - A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements
- [9]. Γιώργος Σιδεράτος - ICCS Sustainable contribution on solar power forecasting
- [10]. Δημήτρης Τράκας - Πιθανοτική ροή φορτίου
- [11]. Ο. Vlachokyriakou, Κ. Mavrogenou, D. Trakas, D. Koukoula, G. Sideratos, A. Dimeas, N. Hatziargyriou - Probabilistic tools on DMS
- [12]. Online Preventive Dynamic Security of Isolated Power Systems Using Decision Trees ,E. S. Karapidakis and N. D. Hatziargyriou
- [13]. FP7 EU Project IGREENGrid , Deliverable 3.1 “ Greek Pilot report”
- [14]. Γεωργιος Α. Κόλλιας, «Ο ρόλος των δικτύων στον εξηλεκτρισμό της Ελλάδας και η μελλοντική τους εξέλιξη»
- [15]. Η. Lee Willis, «Power Distribution Planning Reference Book», New York 1997
- [16]. Σοφία Μαράκα- Αξιολόγηση των μεθόδων γείωσης του ουδετέρου στα δίκτυα διανομής μέσης τάσης – Γείωση αντισταθμικού πηνίου – Οκτώβριος 2006

- [17]. Πιλιόγκος Αντώνιος – Μελέτη συστήματος ευφυών μετρήσεων σε αστικές και ημιαστικές περιοχές – Μάρτιος 2015
- [18]. Αντώνιος Καρακούσης - Μετάβαση στο Ευφυές Ηλεκτρικό Δίκτυο και Ανάπτυξη του Ευφυούς Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας – Ιανουάριος 2015
- [19]. Μπιτίρνας Ν.Αντώνιος - Ανάλυση δικτύου μεταφοράς του ΚΥΤ Λάρισας και προσδιορισμός των οφελών από την είσοδο της διεσπαρμένης παραγωγής – Απρίλιος 2009
- [20]. [www.rae.gr](http://www.rae.gr)
- [21]. DMS -“Breakthrough” Technology for the Smart Grid , Jim Weikert , Power System Engineering, Inc. (PSE) ([www.powersystem.org/docs/publications/breakthrough-technology-for-the-smart-grid.pdf](http://www.powersystem.org/docs/publications/breakthrough-technology-for-the-smart-grid.pdf))
- [22]. How the distribution management system (DMS) is becoming a core function of the Smart Grid , Thierry Godart, Ken Geisler, Jeff Walz , The Siemens Smart Grid Division ([w3.usa.siemens.com/smartgrid/us/en/webinars/leadthecharge/Documents/DistributionMgmtSystem\\_Whitepaper.pdf](http://w3.usa.siemens.com/smartgrid/us/en/webinars/leadthecharge/Documents/DistributionMgmtSystem_Whitepaper.pdf))
- [23]. DIGITAL MODEL OF A DISTRIBUTION MANAGEMENT SYSTEM FOR THE OPTIMAL OPERATION OF ACTIVE DISTRIBUTION SYSTEMS , Fabrizio PILO, Giuditta PISANO , Gian Giuseppe SOMA , University of Cagliari ([www.cired.net/publications/cired2009/pdfs/CIRED2009\\_0035\\_Paper.pdf](http://www.cired.net/publications/cired2009/pdfs/CIRED2009_0035_Paper.pdf))
- [24]. A SMART GRID APPROACH TO DISTRIBUTION MANAGEMENT SYSTEMS (DMS) FOR ELECTRIC NETWORKS , Samuele GRILLO, Stefano MASSUCCO, Federico SILVESTRO , University of Genova , Antonio DE BELLIS, Paolo SCALERA, ABB, Sandra SCALARI, Enel Ingegneria e Innovazione ([www.cired.net/publications/workshop2010/pdfs/0095.pdf](http://www.cired.net/publications/workshop2010/pdfs/0095.pdf))
- [25]. [www.smartgrid.gov/the\\_smart\\_grid/index.html](http://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/index.html)
- [26]. Distribution Management System, ETAP, ([www.etap.ca/wp-content/uploads/ETAP-Distribution-Management-System.pdf](http://www.etap.ca/wp-content/uploads/ETAP-Distribution-Management-System.pdf))

- [27]. [en.wikipedia.org/wiki/Distribution\\_management\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Distribution_management_system)
- [28]. [survalent.com/solutions/adms/dms](http://survalent.com/solutions/adms/dms)
- [29]. [www.spirae.com/products/blue-fin-platform/renewable-and-distributed-energy-integration/](http://www.spirae.com/products/blue-fin-platform/renewable-and-distributed-energy-integration/)
- [30]. Τα σχέδια του ΔΕΔΔΗΕ για έξυπνα δίκτυα και ΜΔΝ, Γ.Κόλλιας  
([energypress.gr/news/gkollias-ta-shedia-toy-deddie-gia-exypna-diktya-kai-mdn](http://energypress.gr/news/gkollias-ta-shedia-toy-deddie-gia-exypna-diktya-kai-mdn))
- [31]. Enhancing Utility Outage Management System (OMS) Performance, John Dirkman, P.E. Schneider Electric ([www.schneider-electric.com/solutions/ca/en/med/616623636/application/pdf/2358\\_files.pdf](http://www.schneider-electric.com/solutions/ca/en/med/616623636/application/pdf/2358_files.pdf))
- [32]. Μετρητές χρήσης ηλεκτρισμού, Δημήτρης Καρέλης  
([hlektrologia.gr/%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%B7%CF%84%CE%AD%CF%82-%CF%87%CF%81%CE%AE%CF%83%CE%B7%CF%82-%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CF%8D/](http://hlektrologia.gr/%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%B7%CF%84%CE%AD%CF%82-%CF%87%CF%81%CE%AE%CF%83%CE%B7%CF%82-%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CF%8D/))
- [33]. <http://www.energylab.gr/products/energy-monitoring/>
- [34]. Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status, Soma Shekara Sreenadh Reddy Depuru, Lingfeng Wang , Vijay Devabhaktuni, University of Toledo  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000876>)
- [35]. [http://www.wired.com/images\\_blogs/threatlevel/2010/03/pge-smart-meter.jpg](http://www.wired.com/images_blogs/threatlevel/2010/03/pge-smart-meter.jpg)
- [36]. Εισαγωγή στη Διεσπαρμένη Παραγωγή, University of Cyprus, Department of Electrical & Computer Engineering  
(<http://www.eng.ucy.ac.cy/elias/Courses/ECE445/presentations/Lectures2010/Distributed%20Generation1.pdf>)
- [37]. <http://www.petrolinasolar.com.cy/EL/PhotovoltaicSystems.html>

