



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

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ  
ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΑ  
ΔΙΚΤΥΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ζαχαρίου Χριστόφορος

**Επίβλεψη:** Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Επόπτευση:** Ιάσωνας Αβραμίδης, Διδάκτορας Μηχανικός University of Louvain

Αθήνα, Ιούνιος 2024





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

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ  
ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΤΑ  
ΔΙΚΤΥΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ζαχαρίου Χριστόφορος

**Επίβλεψη:** Παύλος Σ. Γεωργιλιάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Επόπτευση:** Ιάσωνας Αβραμίδης, Διδάκτορας Μηχανικός University of Louvain

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25<sup>η</sup> Ιουνίου 2024

.....  
Παύλος Γεωργιλιάκης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Γκόνοσ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Κορρές  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2024

.....

Ζαχαρίου Χριστόφορος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Ε.Μ.Π.

Copyright © Ζαχαρίου Χριστόφορος, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (ΔΔΧΤ) είναι το τελευταίο στάδιο του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο συνδέεται απευθείας με τους τελικούς καταναλωτές και τροφοδοτεί πολλά διάσπαρτα φορτία μικρής κλίμακας. Το δίκτυο διανομής του μέλλοντος εξελίσσεται σε ένα έξυπνο δίκτυο που ενσωματώνει πολλαπλούς διανεμημένους ενεργειακούς πόρους (ΔΕΠ) εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα αξιόπιστη λειτουργία και αυξημένη ποιότητα ισχύος. Για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων, οι κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο προσπαθούν να αναπτύξουν βιώσιμες λύσεις για την αντιμετώπιση της έλλειψης ενέργειας από τις ολοένα και αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών. Οι κυριότερες από αυτές τις λύσεις είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και οι τεχνολογίες χαμηλού άνθρακα (ΤΧΑ). Στις ΑΠΕ και στις ΤΧΑ συμπεριλαμβάνονται οι μονάδες φωτοβολταϊκών (ΦΒ), ανεμογεννήτριες (ΑΓ), μονάδες υδροηλεκτρικής ενέργειας (ΥΗ), και αντλίες θερμότητας (ΑΘ). Ενώ στις ΤΧΑ συμπεριλαμβάνονται και τα ηλεκτρικά οχήματα (ΗΟ). Όμως, με την ραγδαία αύξηση και ενσωμάτωση των τεχνολογιών αυτών στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζονται ορισμένες προκλήσεις οι οποίες είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν. Τα ζητήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι διαχειριστές του δικτύου είναι κυρίως οι αποκλίσεις τάσης και γενικά η κακή ποιότητα ηλεκτρικής ενέργειας που φτάνει στους καταναλωτές. Υπάρχει η ανάγκη δηλαδή για την ανάπτυξη νέων καινοτομιών τόσο στον σχεδιασμό όσο και στη λειτουργία του ΔΔΧΤ.

Στόχος αυτής της Διπλωματικής Εργασίας είναι η ανασκόπηση των πιο σημαντικών εργασιών στον τομέα της βέλτιστης διαχείρισης των έξυπνων ΔΔΧΤ και επίσης η ταξινόμηση των μοντέλων και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των δικτύων. Ακόμη εξετάζονται οι προκλήσεις και τομείς για μελλοντική έρευνα στον τομέα των έξυπνων δικτύων διανομής.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης, φωτοβολταϊκά, ηλεκτρικά οχήματα, απόρριψη ενεργού ισχύος, έλεγχος άεργου ισχύος, μέθοδοι ελέγχου.



## **ABSTRACT**

The low voltage distribution network (LVDN) is the last step of the power grid network, which is connected directly to the customers and feeds many small loads. The distribution network of the future is developing into a smart network that integrates multiple distributed energy resources ensuring reliable operation and increased power quality. To achieve environmental goals, governments around the world are trying to develop sustainable solutions to address energy shortages from the ever-increasing energy needs of consumers. Most common of these solutions are renewable energy sources (RES) and low carbon technologies (LCTs). RES-LCTs include photovoltaic (PV) units, wind turbines, hydroelectric power units, heat pumps, etc. While the LCTs also include electric vehicles (EVs). With the rapid increase and integration of these technologies, however, certain challenges are presented in the electricity distribution network that must be addressed. The issues that network operators have to deal with are mainly voltage deviations and the overall poor quality of electricity delivered to the consumers. In other words, there is a need for the development of new innovations both in the design and operation of a network.

The aim of this Diploma Thesis is to review the most important works in the field of optimal management of smart distribution networks and also to classify the models and methods that are used for network optimization. Challenges and areas for future research in the field of smart distribution networks are also discussed.

## **KEY WORDS**

Low voltage distribution network, photovoltaics, electric vehicles, active power curtailment, reactive power control, control methods.





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2023–2024 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, Καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και δημιουργικό θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον διδάκτορα μηχανικό κ. Ιάσωνα Αβραμίδα για την υπομονή και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη συνεχή στήριξή της και ιδιαίτερα τη μητέρα μου Αυγούστα η οποία αποτελεί πηγή έμπνευσης και δύναμης σε όλη τη διάρκεια της ζωής μου καθώς και τη Χαρά για την αγάπη και τη συμπαράστασή της όλα αυτά τα χρόνια. Επίσης, και τους συμφοιτητές, και πλέον φίλους, μου για τη βοήθεια και συμπαράστασή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας στο Ε.Μ.Π..



## ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

BFS	Backward - Forward Sweep
DG	Distributed Generator
HE	Hydroelectric Power
HTP	Heat Pumps
IVR	In-line Voltage Regulator
LCT	Low Carbon Technologies
LVDN	Low Voltage Distribution Network
MPC	Model Predictive Control
OID	Optimal Inverter Dispatch
OPF	Optimal Power Flow
PV	Photovoltaic
RES	Renewable Energy Sources
VVC	Volt-Var Control
WG	Wind Generator
ΑΓ	Ανεμογεννήτριες
ΑΕΙ	Απόρριψη Ενεργού Ισχύος
ΑΘ	Αντλίες Θερμότητας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΓΑ	Γενετικός Αλγόριθμος
ΓΠ	Γραμμικός Προγραμματισμός
ΔΔΔ	Διαχειριστής Δικτύου Διανομής
ΔΔΧΤ	Δίκτυο Διανομής Χαμηλής Τάσης
ΔΕΠ	Διανεμημένοι Ενεργειακοί Πόροι
ΕΑ	Πρακτικοί Ευρετικοί Αλγόριθμοι
ΕΑΙ	Έλεγχος Άεργου Ισχύος
ΗΟ	Ηλεκτρικά Οχήματα
ΜΑΕ	Μονάδες Αποθήκευσης Ενέργειας
ΜΑΜΓΠ	Μικτών Ακεραίων Μη Γραμμικός Προγραμματισμός
ΜΓΠ	Μη Γραμμικός Προγραμματισμός
ΜΣ	Μετασχηματιστής
ΜΤ	Μέση Τάση
ΜΤΥΦ	Μεταγωγέας Τάσης Υπό Φορτίο
ΡΤ	Ρυθμιστής Τάσης
ΣΙ	Συντελεστής Ισχύος

ΣΜ	Στοχαστικές Μέθοδοι
ΤΠ	Τετραγωνικός Προγραμματισμός
ΤΧΑ	Τεχνολογίες Χαμηλών Εκπομπών Άνθρακα
ΥΗ	Υδροηλεκτρική Ενέργεια
ΥΤ	Υψηλή Τάση
ΥΥΤ	Υπερύψηλη Τάση
ΦΒ	Φωτοβολταϊκά
ΧΤ	Χαμηλή Τάση

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>15</b>
1.1 Αντικείμενο εργασίας	15
1.2 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας και καινοτομία	16
1.3 Δομή της εργασίας	20
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ</b>	<b>21</b>
2.1 Γενικά	21
2.2 Εξοπλισμός ΔΔΧΤ	22
2.3 Κύρια χαρακτηριστικά ΔΔΧΤ	22
2.4 Τοπολογία – Λειτουργία ΔΔΧΤ	25
2.4.1 Ακτινωτή σύνδεση	26
2.4.2 Σύνδεση πλέγματος δακτυλίου	26
2.4.3 Σύνδεση πλέγματος ανοικτού δακτυλίου	26
2.4.4 Παράλληλη σύνδεση	27
2.5 Προβλήματα στα ΔΔΧΤ	27
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΞΥΠΝΩΝ ΔΙΑΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	<b>29</b>
3.1 Διατύπωση προβλήματος	29
3.2 Περιγραφή μεθόδων	29
3.3 Αντικειμενική συνάρτηση	30
3.4 Μέθοδος ελέγχου	32
3.4.1 Τοπικός έλεγχος	33
3.4.2 Κεντρικός έλεγχος	33
3.4.3 Κατανεμημένος έλεγχος	33
3.4.4 Αποκεντρωμένος έλεγχος	34
3.4.5 Ιεραρχικός έλεγχος	34
3.5 Μοντέλα φορτίου	35
3.5.1 Μοντελοποίηση φορτίων στη βέλτιστη ροή ισχύος	35
3.5.2 Μοντελοποίηση φορτίων για λειτουργία σε πραγματικό χρόνο	35
3.5.3 Μοντέλο φορτίου zip	35
3.6 Μεταβλητές ελέγχου	36
3.7 Τύποι διανεμημένων ενεργειακών πόρων	37
3.7.1 Διανεμημένη παραγωγή	37

3.7.2	Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	38
3.7.3	Απόκριση ζήτησης	38
3.8	Ταξινόμηση εργασιών της βιβλιογραφίας	38

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ** **47**

4.1	Αριθμητικές μέθοδοι	47
4.1.1	Γραμμικός προγραμματισμός	47
4.1.2	Μη γραμμικός προγραμματισμός	47
4.1.3	Τετραγωνικός προγραμματισμός	48
4.2	Ευρετικές μέθοδοι	49
4.2.1	Γενετικός αλγόριθμος	49
4.2.2	Πρακτικοί ευρετικοί αλγόριθμοι	49
4.3	Στοχαστικές μέθοδοι	49
4.4	Σύνοψη αποτελεσμάτων	54
4.5	Συνεισφορά εργασιών της βιβλιογραφίας	60

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ** **63**

5.1	Μοντελοποίηση δικτύου	63
5.1.1	Απλοποιήσεις	63
5.1.2	Προσεγγίσεις	64
5.1.3	Χαλαρώσεις	64
5.2	Θεμελιώδεις υποθέσεις	65
5.2.1	Ελεγκσιμότητα	65
5.2.2	Παρατηρησιμότητα	66
5.2.3	Προβλεψιμότητα	66

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ** **69**

6.1	Συμπεράσματα	69
6.2	Μελλοντική έρευνα	70

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ** **73**

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ & ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ

Το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (ΔΔΧΤ) είναι το τελευταίο στάδιο του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο συνδέεται απευθείας με τους τελικούς καταναλωτές και τροφοδοτεί πολλά διάσπαρτα φορτία μικρής κλίμακας. Το δίκτυο διανομής του μέλλοντος εξελίσσεται σε ένα έξυπνο δίκτυο που ενσωματώνει πολλαπλούς ΔΕΠ εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα αξιόπιστη λειτουργία και αυξημένη ποιότητα ισχύος. Για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων, οι κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο προσπαθούν να αναπτύξουν βιώσιμες λύσεις για την αντιμετώπιση της έλλειψης ενέργειας από τις ολοένα και αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών. Οι κυριότερες από αυτές τις λύσεις είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και οι τεχνολογίες χαμηλού άνθρακα (ΤΧΑ). Στις ΑΠΕ-ΤΧΑ συμπεριλαμβάνονται οι μονάδες φωτοβολταϊκών (ΦΒ), ανεμογεννήτριες (ΑΓ), μονάδες υδροηλεκτρικής ενέργειας (ΥΗ) και αντλίες θερμότητας (ΑΘ). Ενώ στις ΤΧΑ συμπεριλαμβάνονται και τα ηλεκτρικά οχήματα (ΗΟ).

Όμως, με την ραγδαία αύξηση και ενσωμάτωση των τεχνολογιών αυτών στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζονται ορισμένες προκλήσεις οι οποίες είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν [1]. Τα ζητήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι διαχειριστές του δικτύου είναι κυρίως οι αποκλίσεις τάσης και γενικά η κακή ποιότητα ηλεκτρικής ενέργειας που φτάνει στους καταναλωτές. Υπάρχει η ανάγκη δηλαδή για την ανάπτυξη νέων καινοτομιών τόσο στον σχεδιασμό όσο και στη λειτουργία ενός δικτύου. Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ανασκόπηση των πιο σημαντικών εργασιών στον τομέα της βέλτιστης διαχείρισης των έξυπνων δικτύων διανομής και επίσης η ταξινόμηση των μοντέλων και των μεθόδων των οποίων χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των δικτύων. Ακόμη εξετάζονται οι προκλήσεις και τομείς για μελλοντική έρευνα στον τομέα των έξυπνων δικτύων διανομής.

Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται το πλήθος των άρθρων που έχουν δημοσιευτεί σε διαστήματα τετραετίας, στο επιστημονικό αντικείμενο στο οποίο κάνει κριτική αξιολόγηση αυτή η Διπλωματική Εργασία. Είναι φανερό ότι τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για αντιμετώπιση προβλημάτων που προκαλούνται από τεχνολογίες χαμηλού άνθρακα έχει αυξηθεί σημαντικά. Ο λόγος είναι τόσο η σταδιακή μείωση των ορυκτών καυσίμων όσο και οι στόχοι που θέτουν οι κυβερνήσεις παγκόσμια για την ενσωμάτωση των ΑΠΕ και της ηλεκτροκίνησης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι, λοιπόν, χρήσιμο να δημιουργηθεί μια συγκεντρωτική ανασκόπηση των σημαντικότερων μεθόδων τελευταίας τεχνολογίας που υλοποιήθηκαν για να επιλύσουν αυτά τα ζητήματα.

## 1.2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Τα σύγχρονα ΔΔΧΤ βρίσκονται σε μια μεταβατική περίοδο όπου σταδιακά από παθητικά μετατρέπονται σε ενεργά. Η αυξανόμενη τάση για την ενσωμάτωση ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο αναγκάζει τους διαχειριστές των δικτύων να αναπτύξουν νέες μεθόδους για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της παραγωγής, μεταφοράς, διανομής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο λόγος είναι η αναγκαία μείωση, και τελικά εξάλειψη, της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και άλλους φυσικούς πόρους που δεν ανανεώνονται και προκαλούν τεράστιες καταστροφές στο φυσικό περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι τα δίκτυα πλέον γίνονται έξυπνα, με υποδομές οι οποίες εξελίσσονται με νέες τεχνολογίες επικοινωνίας και πληροφοριών και με υποδομές έξυπνης μέτρησης ενέργειας. Ακόμη, η τοπολογία και η διάταξη ενός ΔΔΧΤ μπορεί να αλλάξει για να ικανοποιήσει τις ανάγκες που θέτει ο εκάστοτε διαχειριστής δικτύου διανομής (ΔΔΔ), οι οποίες συνήθως αφορούν τη μείωση κόστους και απωλειών.

Αυτό που παρατηρείται έντονα είναι η αύξηση των εγκαταστάσεων ΑΠΕ, κυρίως ΦΒ μονάδων, αλλά και η σημαντική αύξηση των ΗΟ στο οδικό δίκτυο. Αυτό φυσικά με τη σειρά του μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που φτάνει στους καταναλωτές. Για τον μετριασμό, λοιπόν, αυτών των επιπτώσεων είναι απαραίτητο στο δίκτυο να γίνονται αναβαθμίσεις σε όλες τις βαθμίδες και όπου και εφόσον χρειάζεται. Η παρούσα Διπλωματική Εργασία επικεντρώνεται μόνο στην αντιμετώπιση των προβλημάτων του ΔΔΧΤ.

Με το ίδιο θέμα ασχολούνται και αρκετές άλλες βιβλιογραφικές εργασίες, οι οποίες όμως επικεντρώνονται μόνο σε ορισμένα από τα ζητήματα τα οποία περιλαμβάνει αυτή η Διπλωματική Εργασία.

Το άρθρο ανασκόπησης [2] συζητά τη σταδιακή ανάπτυξη ενός ΔΔΧΤ με πλήρη υποδομή επικοινωνίας. Επισημαίνει την ανάγκη συνεχούς προσαρμογής και βελτιστοποίησης του σχεδίου προστασίας στα δίκτυα διανομής για να ανταποκρίνεται στις εξελισσόμενες απαιτήσεις προστασίας και κόστους. Κάνει μια αναθεώρηση στις υπάρχουσες πρακτικές και έρευνες σχετικά με τον σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού, προσαρμοστικού και οικονομικού σχήματος προστασίας δικτύου διανομής. Παρουσιάζει το υπόβαθρο του θέματος, περιγράφει πιθανά προβλήματα που προκύπτουν από τις συμβατικές θεωρίες προστασίας και τις νέες τεχνολογίες έξυπνου δικτύου. Εντοπίζει προκλήσεις και ορίζει δυνητικές λύσεις ως μια πορεία προς τα ευέλικτα και αξιόπιστα συστήματα προστασίας ΧΤ.

Στην εργασία ανασκόπησης [3] εξετάζονται αναλυτικά οι λόγοι, οι επιπτώσεις και οι στρατηγικές αντιμετώπισης της ανισορροπίας τάσης και ρεύματος στα ΔΔΧΤ, καθώς και τις κύριες τεχνικές τριών φάσεων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυσή τους. Οι τεχνικές τριών φάσεων είναι απαραίτητες επειδή υπάρχει ασύμμετρη φόρτιση στις τρεις φάσεις του ΔΔΧΤ. Αυτή η μελέτη παρέχει μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση του σχεδιασμού, της λειτουργίας και της διαχείρισης των ΔΔΧΤ, εξετάζοντας χαρακτηριστικά, τύπους, τοπολογίες και διάφορες πτυχές λειτουργίας και σχεδιασμού.



Στη μελέτη ανασκόπησης [4] παρουσιάζονται τα προβλήματα τάσης που προκαλούνται από τα ΦΒ που είναι συνδεδεμένα στο ΔΔΧΤ, και εξετάζονται οι αιτίες τους. Επίσης, συνοψίζονται οι μέθοδοι ελέγχου τάσης για υψηλή διείσδυση ΦΒ σε ΔΔΧΤ, βασισμένες σε ευαισθησία τάσης, ενεργό ισχύ, άεργο ισχύ και ρύθμιση μεταγωγέα τάσης. Τέλος, κάνει μια πρόβλεψη για τις νέες μεθόδους ελέγχου τάσης λαμβάνοντας υπόψη τις κατευθύνσεις ανάπτυξης των στρατηγικών ελέγχου και των νέων τεχνολογιών.

Το άρθρο ανασκόπησης [5] εξερευνά τη μετάβαση από παθητικά σε ενεργά δίκτυα διανομής, που προκαλείται από την αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ. Εξετάζει ακόμη μεθόδους μοντελοποίησης τέτοιων συστημάτων και χρηστών, τα αριθμητικά εργαλεία που απαιτούνται για την ανάλυση του συστήματος, καθώς και διάφορα σχέδια διαχείρισης ενεργού δικτύου που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των απωλειών και στην ισότιμη κατανομή τους σε παθητικούς και ενεργούς καταναλωτές.

Το άρθρο ανασκόπησης [6] ασχολείται με την αντοχή του δικτύου σε ΑΠΕ επισημαίνοντας τα πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκαλέσει η υπερδιείσδυση. Γίνεται μια συνολική επισκόπηση της έρευνας για την αντοχή των δικτύων, των εξελίξεων, των τεχνικών αξιολόγησης και των τεχνολογιών βελτίωσης, δομημένη σε τέσσερις κύριες ενότητες: ιστορικές εξελίξεις, όρια απόδοσης, αντιλήψεις και τεχνικές βελτίωσης.

Στο [7] γίνεται εισήγηση για εισαγωγή μονάδων αποθήκευσης ενέργειας (ΜΑΕ) στο ΔΔΧΤ για μετριασμό των προβλημάτων από την υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ.

Στη μελέτη [8] προσφέρει μια κριτική ανασκόπηση για τις διάφορες στρατηγικές και μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για την ενσωμάτωση και τον σχεδιασμό των μονάδων διανεμημένης παραγωγής. Ακόμη, επισημαίνει τα εμπόδια για την εφαρμογή των μεθόδων αυτών καθώς και τις προκλήσεις που έρχονται στην επιφάνεια, και ακόμη δεν έχουν αντιμετωπιστεί, στην προσπάθεια για ένα πιο έξυπνο δίκτυο.

Μια σημαντική ταξινόμηση παρουσιάζεται στο άρθρο [9] [10] στην οποία κατηγοριοποιούνται τα σημαντικότερα μοντέλα και μέθοδοι βελτιστοποίησης που εφαρμόζονται για τη βέλτιστη λειτουργία των έξυπνων δικτύων διανομής. Επιπλέον, παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά μοντέλα για την ενεργό διαχείριση του δικτύου, ενώ συζητούνται προκλήσεις και πεδία για μελλοντικές έρευνες.

Στο [11] γίνεται μια ανάλυση της επίδρασης της υψηλής διείσδυσης των ΑΠΕ στο ΔΔΧΤ, μια ανασκόπηση στις βασικές στρατηγικές ελέγχου, και μία συζήτηση των προκλήσεων για τον τοπικό έλεγχο τάσης με αντιστροφείς. Επιπλέον, το άρθρο εξετάζει εκτενώς το κίνητρο, την τρέχουσα κατάσταση της τελευταίας τεχνολογίας και τις μελλοντικές κατευθύνσεις του συντονισμού μεταξύ του διαχειριστή του δικτύου μεταφοράς και διανομής.

Στο άρθρο [12] γίνεται μια μελέτη για να εξεταστούν τα όρια αντοχής του δικτύου σε ΦΒ συστήματα. Η ανασκόπηση υπογραμμίζει την ανάγκη για μια πιο λογική και ενοποιημένη προσέγγιση στον υπολογισμό των επιπέδων διείσδυσης.

Το άρθρο [13] παρέχει μια ανασκόπηση των μεθόδων διαχείρισης συμφόρησης σε δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση κατανεμημένων ενεργειακών πόρων. Οι μέθοδοι διαχείρισης συμφόρησης για τα δίκτυα διανομής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: μεθόδους αγοράς και μεθόδους άμεσου ελέγχου και οι συγγραφείς προτείνουν μια λίστα προτεραιότητας για τις υπάρχουσες μεθόδους.

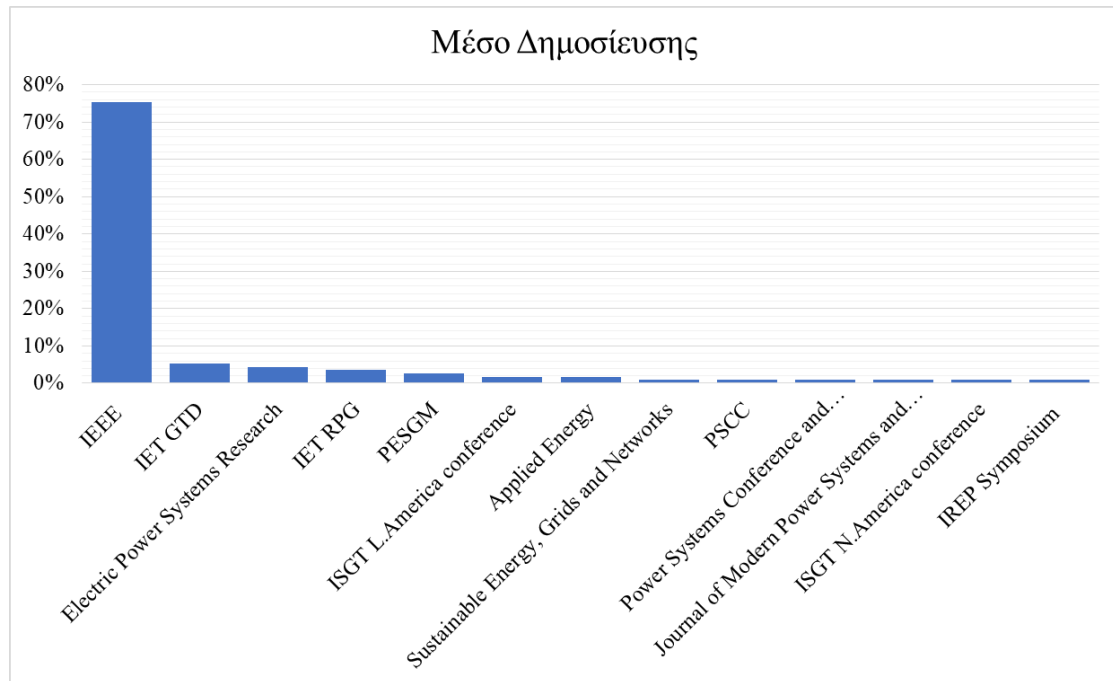
Το άρθρο [14] εξετάζει στρατηγικές και μεθόδους που προτείνονται για την πρόληψη υπερτάσεων στα ΔΔΧΤ με ΦΒ αναλύοντας την αποτελεσματικότητά τους. Ορισμένες από τις λύσεις περιλαμβάνουν ενίσχυση δικτύου, ΜΑΕ, έλεγχο άεργου ισχύος (EAI) από τους αντιστροφείς, απόρριψη ενεργού ισχύος (AEI) και ανταπόκριση ζήτησης. Η σύγκριση των

μεθόδων ελέγχου τάσης, συμπεριλαμβανομένων των τοπικών, κατανεμημένων και κεντρικών προσεγγίσεων, πραγματοποιείται με χρήση ανάλυσης ευαισθησίας της τάσης.

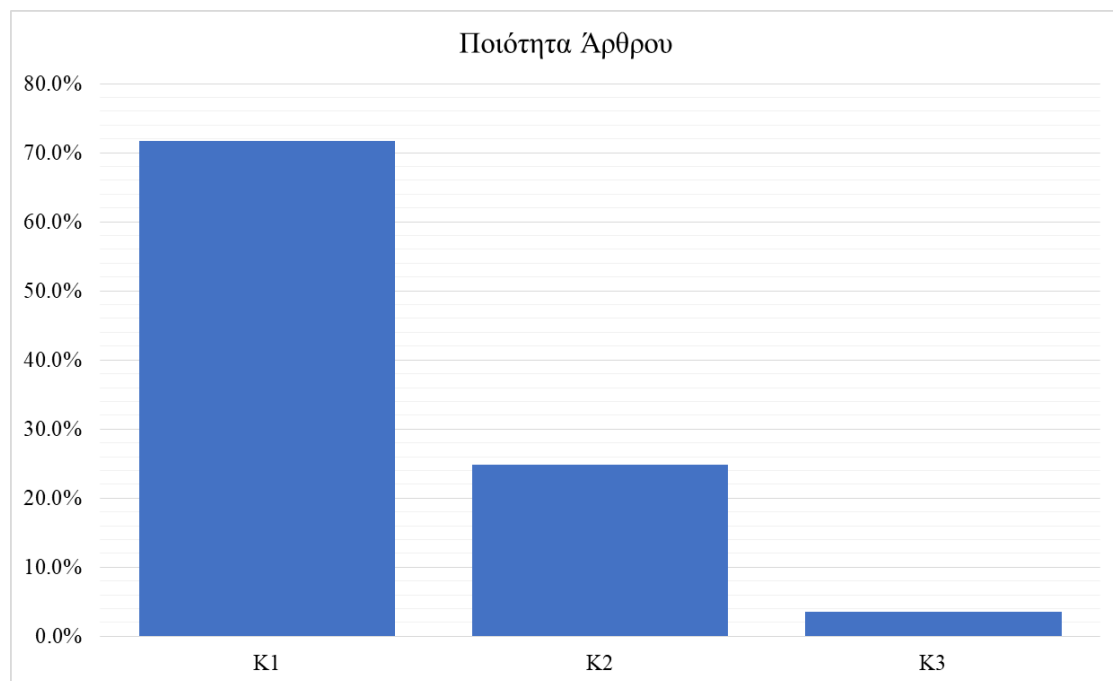
Αυτό που παρατηρείται σε όλα τα άρθρα ανασκόπησης, όπως και στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, είναι η αναγκαιότητα εύρεσης λύσεων σε ένα γοργά εξελισσόμενο έξυπνο ΔΔΧΤ στο οποίο ενσωματώνεται ολοένα και περισσότερος όγκος τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα. Επίσης, αυτό που παρατηρείται από την υπάρχουσα βιβλιογραφία είναι πως οι μέχρι τώρα έρευνες επικεντρώνονται αποκλειστικά σε συγκεκριμένους ενεργειακούς πόρους ή συγκεκριμένα προβλήματα. Σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία γίνεται προσπάθεια για ολοκληρωμένη και κριτική παρουσίαση των προβλημάτων που παρουσιάζονται στα ΔΔΧΤ, στη δομή τους, στις μεθόδους ελέγχου αλλά και στις μεθόδους επίλυσης των προβλημάτων.



**Σχήμα 1.1:** : Ποσοστό των άρθρων της βιβλιογραφίας που έχει δημοσιευτεί σε κάθε διάστημα στο επιστημονικό αντικείμενο στο οποίο κάνει κριτική αξιολόγηση αυτή η Διπλωματική Εργασία.



**Σχήμα 1.2:** Τα μέσα όπου δημοσιεύθηκαν τα άρθρα της βιβλιογραφίας και το ποσοστό αυτών.



**Σχήμα 1.3:** Οι τρεις κατηγορίες ποιότητας που έχουν χωριστεί τα άρθρα του Σχήματος 1.2 ανάλογα με την ποιότητα του μέσου στο οποίο δημοσιεύτηκαν. K1 είναι η κατηγορία με την καλύτερη ποιότητα

### 1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η διπλωματική εργασία οργανώθηκε σε επτά κεφάλαια:

- ✓ Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των ΔΔΧΤ, οι βασικότερες τοπολογίες διασύνδεσης και ορισμένα από τα προβλήματα τα οποία συναντάει κανείς σε ένα σύγχρονο δίκτυο διανομής.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται περιγραφή του προβλήματος που αντιμετωπίζεται στα έξυπνα δίκτυα διανομής και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπισή του. Ακολούθως γίνεται αναφορά στο αντικείμενο των εξεταζόμενων άρθρων, στις μεθόδους ελέγχου όπως και στα μοντέλα φορτίου. Τέλος αναφέρονται οι κυριότερες μεταβλητές ελέγχου και οι τύποι κατανεμημένων ενεργειακών πόρων.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται πίνακες με την συμβολή του κάθε άρθρου και με τις καινοτομίες τις οποίες εισάγει στο θέμα της διαχείρισης των έξυπνων ΔΔΧΤ. Επίσης, γίνεται αναφορά στις συχνότερες μεθόδους επίλυσης του προβλήματος που χρησιμοποιούνται από τα άρθρα της βιβλιογραφίας και επίσης ταξινομούνται ανάλογα με τη μέθοδο ενσωμάτωσής τους στο δίκτυο.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται αναφορά στις διάφορες μεθόδους μοντελοποίησης των δικτύων που εξετάζονται και στις τεχνικές που αξιοποιούνται αλλά και στις θεμελιώδεις υποθέσεις οι οποίες λαμβάνονται υπόψη.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας μετά τη μελέτη της βιβλιογραφίας και περιγράφονται οι περιοχές μελλοντικής έρευνας.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 7** βρίσκεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση και συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.

## **ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ (ΔΔΧΤ)**

### **2.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως σκοπό την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Στο διάστημα από την παραγωγή έως την κατανάλωση μεσολαβούν υποσταθμοί μετασχηματιστών ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης. Μετά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, στον υποσταθμό μεταφοράς, γίνεται ανύψωση τάσης ούτως ώστε να διευκολυνθεί η μεταφορά της ενέργειας με λιγότερες απώλειες ισχύος. Στη συνέχεια η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται μέσω του δικτύου μεταφοράς Υψηλής (ΥΤ) 150kV (πολική τάση) και Υπερύψηλης Τάσης (ΥΥΤ) 400kV (πολική τάση) [2] στον επόμενο υποσταθμό όπου θα γίνει υποβιβασμός τάσης [15]. Σε αυτό το στάδιο η τάση υποβιβάζεται σε μεγέθη Μέσης τάσης (ΜΤ) 20kV (πολική τάση) και μέσω γραμμών διανομής το ρεύμα φτάνει στους υποσταθμούς διανομής όπου γίνεται ξανά υποβιβασμός τάσης σε Χαμηλή τάση (ΧΤ). Εφόσον η τριφασική τάση φτάσει στα 400V (πολική τάση) μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους καταναλωτές σε τριφασικές συσκευές, 400V, και μονοφασικές συσκευές, 230V (φασική τάση). Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται, μεταφέρεται και καταναλώνεται σε όλη την Ευρώπη γίνεται στη συχνότητα των 50Hz [3]. Η συχνότητα του ρεύματος ελέγχεται και διατηρείται σε κέντρα ελέγχου τα οποία λειτουργούν από τον διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς.

Σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο συναντώνται δύο βασικά είδη δικτύου, το δίκτυο μεταφοράς και το δίκτυο διανομής. Το δίκτυο μεταφοράς έχει ως σκοπό την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης ενώ το δίκτυο διανομής είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά ενέργειας από τους υποσταθμούς στους καταναλωτές. Οι αποστάσεις και οι τάσεις στο δίκτυο μεταφοράς είναι μεγάλες αντίθετα με το δίκτυο διανομής όπου είναι μικρότερες όπως αντίστοιχα και η ποσότητα της μεταφερόμενης ενέργειας. Ως προς τον έλεγχο και τη ρύθμιση, το δίκτυο μεταφοράς ελέγχεται από τον διαχειριστή συστήματος μεταφοράς και ρυθμίζεται από εθνικούς κανονισμούς ενώ το δίκτυο διανομής ελέγχεται από ένα σύνολο διαχειριστών συστήματος διανομής και ρυθμίζεται σε τοπικό επίπεδο. Με την συνύπαρξη και την ορθή λειτουργία των δύο δικτύων επιτυγχάνεται η αξιόπιστη και αποδοτική παράδοση ηλεκτρικής ενέργειας στον καταναλωτή [4, 5]. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η δομή ολόκληρου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Στον Πίνακα 2.1 γίνεται αναφορά στα στοιχεία από τα οποία αποτελούνται το δίκτυο μεταφοράς και το δίκτυο διανομής.

**Πίνακας 2.1:** Διαφορές δικτύου μεταφοράς και δίκτυο διανομής

<u>Δίκτυο Μεταφοράς</u>	<u>Δίκτυο Διανομής</u>
<b>Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας</b> (ορυκτών καυσίμων και ανανεώσιμων πηγών).	<b>Τεχνολογίες έξυπνου δικτύου:</b> για αποδοτικότερη διαχείριση της ροής ενέργειας.
<b>Κέντρα ελέγχου:</b> Χρήση εξελιγμένων υπολογιστικών συστημάτων για παρακολούθηση και έλεγχο της ροής ενέργειας και διασφάλιση της ποιότητάς της.	
<b>Υποσταθμοί-Μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης</b>	<b>Υποσταθμοί-Μετασχηματιστές υποβιβασμού τάσης</b>
<b>Γραμμές μεταφοράς</b> σχεδιασμένες για υψηλές τάσεις και αντοχή σε ακραίες καιρικές συνθήκες	<b>Γραμμές διανομής</b> και καλωδίωση για μεταφορά ενέργειας από τον υποσταθμό στον καταναλωτή
<b>Διασυνδέσεις:</b> σύνδεση μεταξύ των εθνικών δικτύων μεταφοράς εντός Ευρώπης	<b>Μετρητές:</b> καταγραφή και ένδειξη κατανάλωσης της εκάστοτε εγκατάστασης

## 2.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΔΧΤ

Σε ένα Ευρωπαϊκό δίκτυο διανομής, η διάταξη που συναντάται είναι τριφασική συνδεσμολογία με τάση 400V (πολική τάση) [6]. Η τριφασική παροχή γίνεται από έναν μετασχηματιστή διανομής οποίος είναι συνδεδεμένος στο πρωτεύον με το δίκτυο μεταφοράς ΜΤ. Στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εξέρχεται τάση 230V φασική και 400V πολική. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε ένα υποσταθμό υποβιβασμού τάσης ΜΤ/ΧΤ. Με τις τάσεις αυτές τροφοδοτούνται ακολούθως τόσο μονοφασικοί όσο και τριφασικοί καταναλωτές. Οι μονοφασικοί καταναλωτές συνδέονται με μια από τις τρεις φάσεις και τον ουδέτερο, ενώ οι τριφασικοί και με τους τέσσερις αγωγούς.

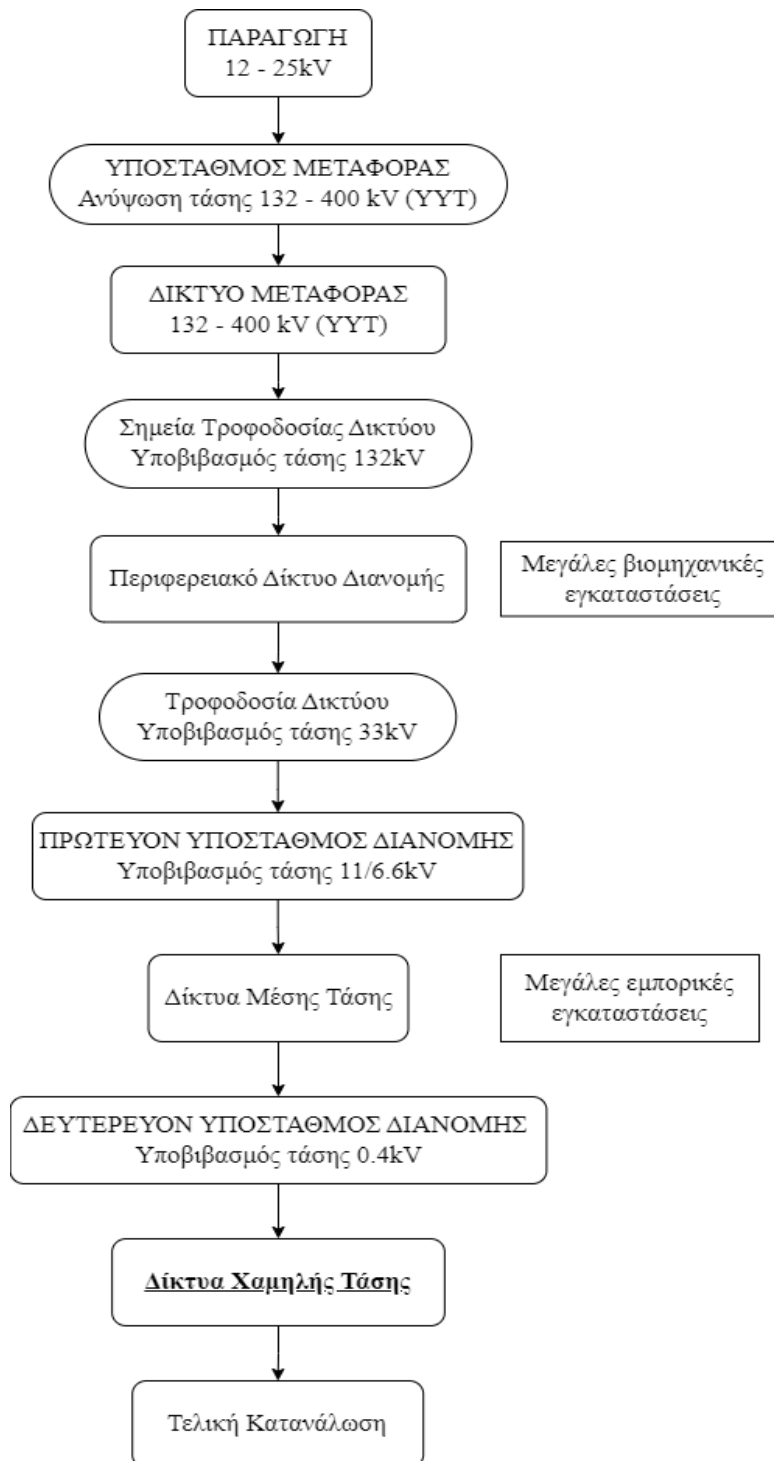
Εντός των υποσταθμών, εκτός των Μ/Σ, συναντώνται και συσκευές προστασίας, όπως ασφαλειοδιακόπτες, διακόπτες αποσύνδεσης και ασφάλειες. Σκοπός αυτών των συσκευών είναι να προστατεύσουν τον υπόλοιπο εξοπλισμό σε περίπτωση σφάλματος, περιορίζοντας το πρόβλημα. Επίσης, υπάρχουν πυκνωτές οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη βελτίωση της τάσης και τη σταθερότητά της κατά τη μεταφορά της ισχύος στο δίκτυο.

## 2.3 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΔΧΤ

Κάθε δίκτυο διανομής ΧΤ έχει κάποια ιδιαίτερα στοιχεία τα οποία το χαρακτηρίζουν. Αρχικά, ο σκοπός του δικτύου είναι η τροφοδοσία των καταναλωτών, για αυτό τον λόγο υπάρχει μεγάλος αριθμός κόμβων οι οποίοι αντιστοιχούν σε καταναλωτές. Επίσης, σε ένα δίκτυο ΧΤ χρησιμοποιείται μεγαλύτερη αναλογία  $R/X$  (πραγματικής αντίστασης προς επαγωγική αντίδραση) από αυτή που θα συναντούσε κανείς σε ένα δίκτυο ΥΤ ή ΜΤ [7]. Λόγω των μεγάλων τιμών τάσεων στα δίκτυα ΥΤ και ΜΤ, χρησιμοποιούνται μικρότερες αναλογίες  $R/X$  με σκοπό τον περιορισμό των απωλειών, ενώ, αντίθετα, στα δίκτυα ΧΤ η αναλογία είναι μεγαλύτερη αφού οι τάσεις είναι αρκετά χαμηλότερες και τα ρεύματα μεγαλύτερα. Αυτό συναντάται κυρίως στην υπόγεια καλωδίωση. Ένα άλλο χαρακτηριστικό που θα απασχολήσει αρκετά την εργασία είναι η ασύμμετρη φόρτιση του ΔΔΧΤ, εξαιτίας της διαφορετικής ισχύος που απορροφούν οι

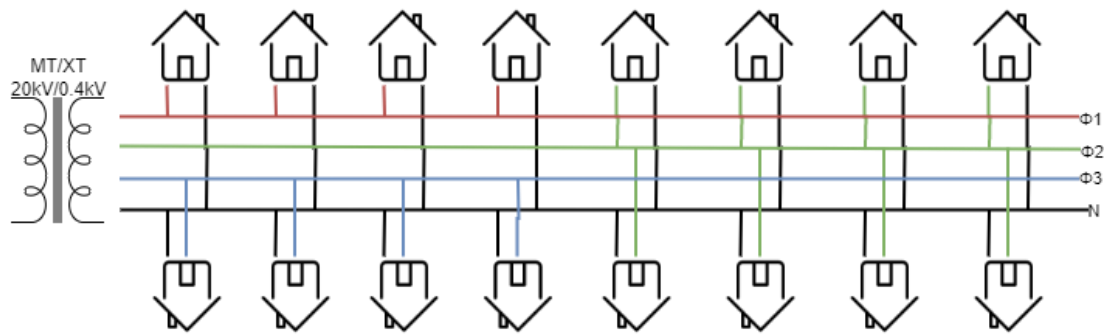
καταναλωτές που συνδέονται σε μία φάση (μονοφασικοί καταναλωτές) ή και στις τρεις φάσεις του ΔΔΧΤ. Επίσης, προκλήσεις αποτελούν η αμφίδρομη ροή ισχύος, και η πρόκληση υπερτάσεων ή υποτάσεων στο ΔΔΧΤ. Τα δίκτυα ΧΤ στην πλειοψηφία τους είναι ακτινικά συνδεδεμένα [7].

Ένα τριφασικό δίκτυο για να είναι συμμετρικά φορτισμένο (ισορροπημένο), χρειάζεται το φορτίο να είναι ίσα κατανεμημένο σε κάθε μια από τις τρεις φάσεις και η διαφορά των φάσεων να είναι  $120^\circ$ . Όταν λοιπόν αυτό δεν ισχύει, το δίκτυο είναι ασύμμετρα φορτισμένο (μη ισορροπημένο). Για να βρεθεί το δίκτυο σε αυτή την κατάσταση μπορούν να συμβάλουν διάφοροι παράγοντες, όπως τα μονοφασικά φορτία να μην είναι ίσα κατανεμημένα μεταξύ των τριών φάσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3 όπου η φάση 2 (Φ2) έχει συνδεδεμένα φορτία με μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με τις άλλες δύο φάσεις. Επίσης, η αύξηση των μονοφασικών γεννητριών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να οδηγήσει το δίκτυο σε ανισορροπία. Ακόμη και τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στη σύνδεση του δικτύου, όπως οι εναέριες γραμμές διανομής και η υπόγεια καλωδίωση μπορούν να προκαλέσουν ανισορροπία όταν έχουν διαφορετικές τιμές σύνθετης αντίστασης [7].



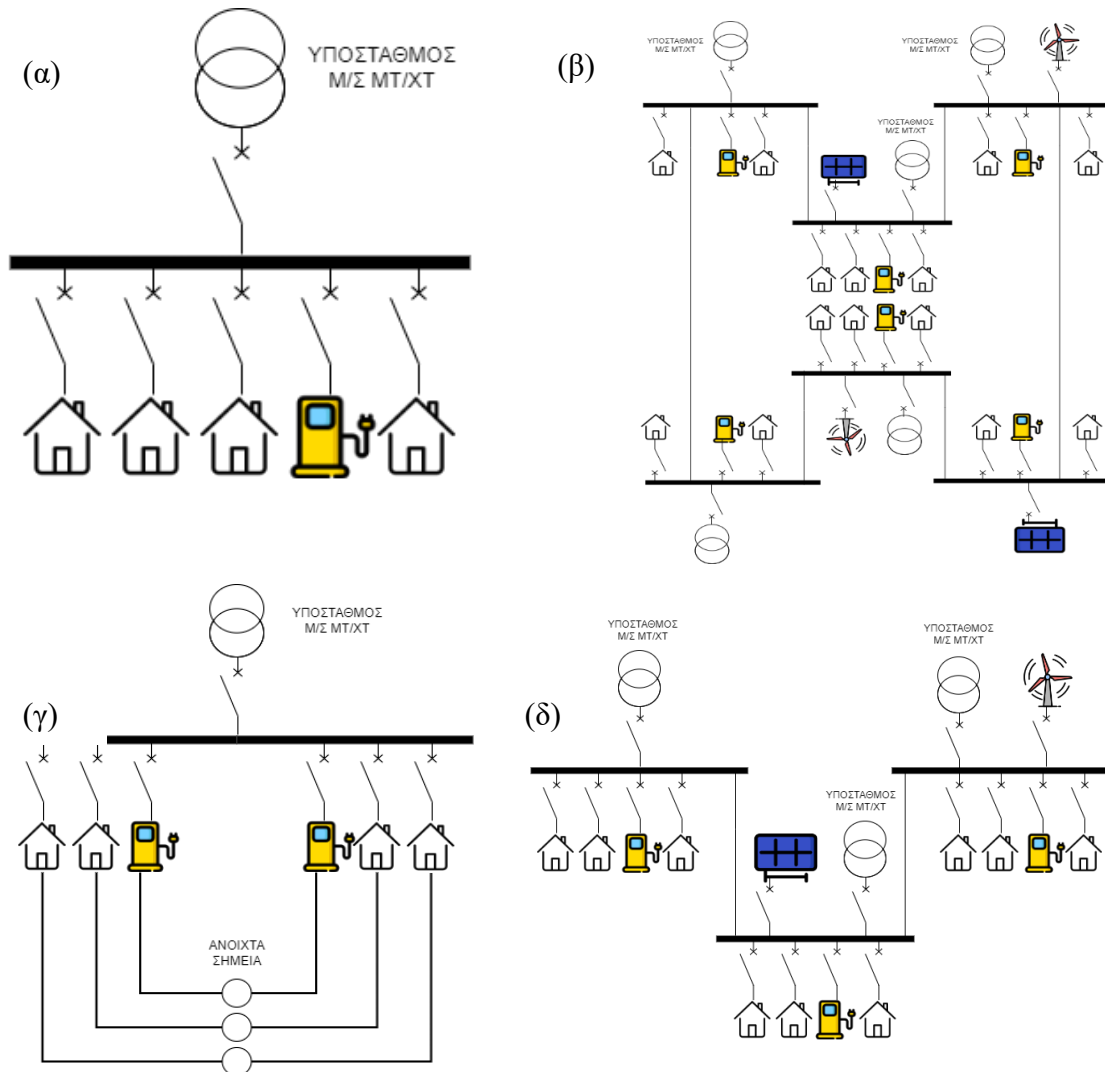
Σχήμα 2.2 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. [7]





**Σχήμα 2.3** Παράδειγμα δικτύου με ασύμμετρη φόρτιση, στο οποίο τα φορτία δεν είναι ίσα κατανομημένα στις τρεις φάσεις. Στις φάσεις 1 και 3 (Φ1, Φ3) είναι συνδεδεμένη μικρότερη ισχύς φορτίου από ότι στη φάση 2 (Φ2) [7]

## 2.4 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ – ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΔΔΧΤ



**Σχήμα 2.4** Τοπολογίες Δικτύων ΧΤ. (α) Ακτινωτή σύνδεση, (β) Σύνδεση πλέγματος δακτυλίου, (γ) Σύνδεση πλέγματος ανοικτού δακτυλίου, (δ) Παράλληλη σύνδεση [7].

Οι κύριες τοπολογίες ΔΔΧΤ είναι: ακτινωτή, δακτυλίου, πλέγματος, ανοικτού δακτυλίου, και παράλληλης σύνδεσης και οι διατάξεις τους παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.4.

### 2.4.1 Ακτινωτή Σύνδεση

Στην ακτινωτή σύνδεση, όλοι οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι με ένα κεντρικό σημείο τροφοδοσίας παρέχοντας απλότητα και εύκολη συντήρηση. Χρησιμοποιείται στα τριφασικά δίκτυα τεσσάρων αγωγών σε μεγάλο βαθμό, και κυρίως σε αγροτικές περιοχές, όπου τα φορτία είναι αραιά και μικρά, λόγω του χαμηλού κόστους, αφού η πολυπλοκότητα τους είναι μικρή σε σχέση με άλλες διατάξεις. Εξαιτίας της δομής τους, όταν παρουσιάζονται σφάλματα, είναι εύκολο να εντοπιστούν και να απομονωθούν [7].

Όμως, παρά τα πλεονεκτήματά τους, παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Τα ακτινικά δίκτυα προσφέρουν την χαμηλότερη ασφάλεια και αξιοπιστία συγκριτικά με τις άλλες τοπολογίες, αφού, λόγω της ροής ισχύος μόνο προς μία κατεύθυνση, σε περίπτωση σφάλματος, όλη η γραμμή διανομής μπορεί να τεθεί εκτός λειτουργίας. Επίσης, παρέχουν αρκετά περιορισμένη ευελιξία, αφού το μέγεθος του δικτύου μπορεί να αυξηθεί ως ένα σημείο πριν χρειαστεί σημαντική αναβάθμιση στις υποδομές.

### 2.4.2 Σύνδεση Πλέγματος Δακτυλίου

Στη σύνδεση πλέγματος δακτυλίου, όλοι οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι με τους γειτονικούς τους, δημιουργώντας ένα κλειστό δακτύλιο, προσφέροντας αξιοπιστία, ευελιξία και ασφάλεια παροχής ισχύος. Επίσης, με τη χρήση αυτής της συνδεσμολογίας, το δίκτυο μπορεί να φιλοξενήσει περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα, ανεμογεννήτριες και άλλα είδη μονάδων διανεμημένης παραγωγής, περιορίζοντας έτσι προβλήματα, όπως υπερτάσεις και αντίστροφη ροή ισχύος. Σε ένα τέτοιο δίκτυο, οι υποσταθμοί είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με υπόγεια καλώδια, δημιουργώντας ένα πλέγμα. Έτσι, σε περίπτωση βλάβης ενός υποσταθμού, ένας γειτονικός υποσταθμός μπορεί να τροφοδοτήσει το δίκτυο. Λόγω όμως του μεγάλου αριθμού συνδέσεων, μεταξύ κόμβων, η εγκατάσταση είναι πιο σύνθετη και με αυξημένο κόστος.

### 2.4.3 Σύνδεση Πλέγματος Ανοικτού Δακτυλίου

Στη σύνδεση πλέγματος ανοικτού δακτυλίου, η ροή ισχύος γίνεται προς μια κατεύθυνση και μόνο από μια παροχή. Μπορεί να δημιουργηθεί συνδέοντας δύο γειτονικά ακτινικά δίκτυα με ένα ανοικτό σημείο στον βρόγχο, το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με το σημείο που εντοπίζεται κάποιο σφάλμα. Εφόσον ο δακτύλιος είναι ανοικτός, δεν υπάρχει επιστροφή στην παροχή για τη ρύθμιση της τάσης και του ρεύματος, οπότε ο έλεγχός τους γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά της παροχής και της αντίστασης του φορτίου. Κατασκευαστικά είναι απλά με χαμηλό κόστος και με εύκολη εγκατάσταση, όμως η έλλειψη επιπλέον τροφοδοσίας τα καθιστά ευάλωτα σε περίπτωση σφάλματος.

#### 2.4.4 Παράλληλη Σύνδεση

Αντίθετα με την τοπολογία πλέγματος ανοικτού δακτυλίου, στην παράλληλη σύνδεση υπάρχουν δύο ή περισσότερες παροχές ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες είναι συνδεδεμένες με πολλά φορτία. Έτσι, το συνολικό φορτίο κατανέμεται ίσα σε κάθε παροχή ανάλογα με την ονομαστική της ισχύ. Μια τέτοια τοπολογία μπορεί να προσφέρει αυξημένη αξιοπιστία και ευκολότερη συντήρηση αφού σε περίπτωση βλάβης μιας παροχής ή συντήρησης, τα φορτία συνεχίζουν να τροφοδοτούνται κανονικά από μια άλλη παροχή. Επίσης, παρέχεται ευελιξία, καθώς νέες μονάδες παραγωγής μπορούν να προστεθούν στο δίκτυο, εφόσον απαιτούνται, λόγω αύξησης των φορτίων. Παρόλα αυτά, είναι σημαντικός ο σχεδιασμός ενός παράλληλα συνδεδεμένου δικτύου, έτσι ώστε τα φορτία να είναι ομοιόμορφα κατανομημένα.

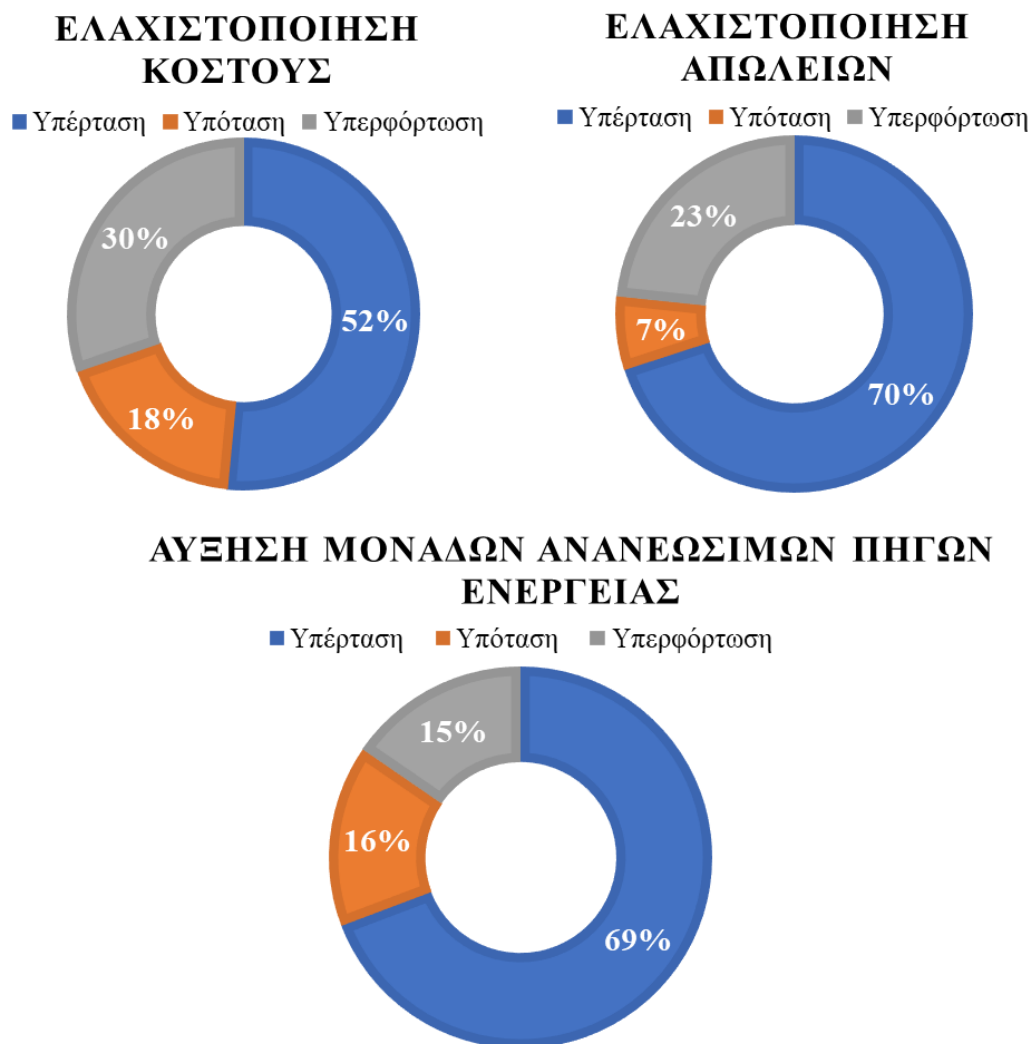
### 2.5 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΑ ΔΔΧΤ

Οι αυξανόμενες ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων οδηγούν στην ανάγκη εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ανανεώσιμων πόρων [8] αλλά και στην αύξηση των ηλεκτρικών οχημάτων (ΗΟ). Τέτοιες μονάδες μπορούν να είναι φωτοβολταϊκά συστήματα, ανεμογεννήτριες και αντλίες θερμότητας, με τα ΦΒ να είναι η δημοφιλέστερη επιλογή λόγω της εύκολης εγκατάστασης και συντήρησης. Όμως, η ραγδαία, και συχνά ανεξέλεγκτη διείσδυση των ΦΒ μονάδων και ΗΟ στο δίκτυο προκαλεί τελικά προβλήματα σε αυτό, τα οποία επηρεάζουν τόσο τον ΔΔΔ όσο και τον καταναλωτή. Στο Σχήμα 2.4 φαίνονται τα συχνότερα προβλήματα με τα οποία ασχολούνται οι μελέτες, βάσει της βιβλιογραφίας, ανάλογα με τον στόχο της κάθε μίας μελέτης. Φαίνεται ότι το συχνότερο πρόβλημα που παρουσιάζεται και επιλύεται είναι οι υπερτάσεις που προκαλούνται στο δίκτυο.

Προβλήματα που παρατηρούνται συνήθως είναι υπέρταση, υπόταση και διακυμάνσεις τάσης. Υπέρταση παρατηρείται όταν στο δίκτυο υπάρχει κορεσμός ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και κυρίως από μονάδες ΦΒ. Αυτό συμβαίνει σε διαστήματα υψηλής παραγωγικότητας των ΦΒ μονάδων και χαμηλής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ως αποτέλεσμα η ενέργεια συσσωρεύεται στο δίκτυο χωρίς να καταναλώνεται, προκαλώντας υπέρταση στο δίκτυο. Αντίθετα, σε διαστήματα χαμηλής παραγωγικότητας και υψηλής κατανάλωσης στο δίκτυο μπορεί να παρατηρηθεί υπόταση εφόσον η παραγωγή δεν ικανοποιεί τις ανάγκες κατανάλωσης.

Άλλο ένα ζήτημα προς επίλυση σε ένα σύγχρονο δίκτυο είναι η ολοένα και αυξανόμενη χρήση ΗΟ. Σύμφωνα με το [9], η αγορά των ΗΟ, αμιγώς ηλεκτρικών και υβριδικών με ρευματολήπτη, στην Ευρώπη για το 2022 αυξήθηκε κατά 55%, από το 2021. Ενώ για το 2023 η αγορά των ΗΟ αναμένεται να αυξηθεί κατά 26%. Ακόμη σημαντικότερο είναι πως 10 χρόνια πριν η αγορά όλων των ΗΟ καταλάμβανε μόλις το 0,5% της αγοράς νέων οχημάτων. Η αύξηση αυτή, αν και θεμιτή από οικολογικής άποψης, σίγουρα επηρεάζει με κάποιο τρόπο το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν συνδέεται μεγάλος αριθμός ΗΟ στο δίκτυο ταυτόχρονα για φόρτιση μπορεί να προκαλέσει υπόταση και υπερφόρτωση στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει διότι το δίκτυο δεν είναι σχεδιασμένο για να υποστηρίξει το μεγάλο φορτίο το οποίο απαιτείται σε τέτοιες περιπτώσεις. Επίσης, λόγω του μεγάλου αριθμού ΗΟ και συνεπώς φορτιστών στο

δίκτυο παρατηρούνται απώλειες ισχύος διότι η φόρτιση δεν γίνεται προγραμματισμένα. Έτσι, εφόσον οι συνθήκες φόρτισης, η αποδοτικότητα του σημείου φόρτισης, η υγεία της μπαταρίας, και ο ρυθμός φόρτισης  $[10, 11]$ , δεν είναι εύκολα προβλέψιμες ούτε ελέγξιμες παράμετροι, τότε θα παρουσιάζονται στο δίκτυο απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας.



**Σχήμα 2.5:** Προβλήματα στα ΔΔΧΤ που μελετώνται περισσότερο συναρτήσει του στόχου, με βάση τη βιβλιογραφία.

## **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΞΥΠΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

### **3.1 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ**

Το πρόβλημα της βέλτιστης λειτουργίας ενός έξυπνου δικτύου διανομής μπορεί να διατυπωθεί ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με στόχο τη μέγιστη αποδοτικότητα, αξιοπιστία, και σχέση κόστους-απόδοσης ενώ παράλληλα να ικανοποιεί τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου. Αυτό γίνεται προσδιορίζοντας τις ιδανικές τιμές στις μεταβλητές ελέγχου που αφορούν τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς [9]. Το πρόβλημα της βέλτιστης λειτουργίας ενός έξυπνου δικτύου διανομής έχει διατυπωθεί μαθηματικά ως γραμμικό, μη γραμμικό, γραμμικό μικτών ακεραίων και μη γραμμικό πρόβλημα μικτών ακεραίων, ανάλογα με το μαθηματικό μοντέλο, τους περιορισμούς, την αντικειμενική συνάρτηση και τον τύπο των μεταβλητών ελέγχου.

### **3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΩΝ**

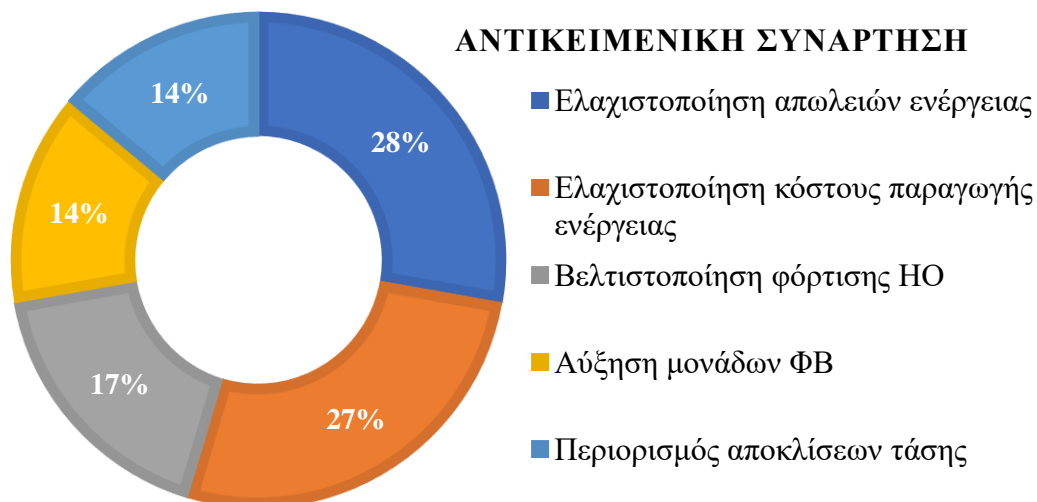
Για να διασφαλιστεί η υψηλή ποιότητα παρεχόμενης ισχύος, όπως καθορίζεται από τις ρυθμιστικές αρχές, γίνεται χρήση μεθόδων διαχείρισης του δικτύου. Αυτές οι μέθοδοι έχουν ως κύριο στόχο την ιδανική αξιοποίηση της υψηλής διεύθυνσης ανανεώσιμων και συμβατικών πηγών ενέργειας στο δίκτυο [9]. Οπότε, με τον ενεργό έλεγχο της ροής ισχύος στο δίκτυο επιτυγχάνεται η αποδοτική και αξιόπιστη λειτουργία του. Χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες παρακολούθησης, επικοινωνίας και ελέγχου επιτρέπεται η προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο και ο συντονισμός των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων. Παρακάτω περιγράφονται ορισμένες από τις κυριότερες μεθόδους ενεργού ελέγχου ενός έξυπνου δικτύου διανομής [9].

- Συντονισμένος έλεγχος τάσης: γίνεται χρήση συσκευών ρύθμισης τάσης οι οποίες λειτουργούν συντονισμένα με όλους τους ΔΕΠ που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Έτσι, επιτυγχάνεται η βελτίωση της καμπύλης τάσης στο δίκτυο διανομής.
- Έλεγχος άεργου ισχύος (EAI): γίνεται χρήση συσκευών οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν ή να εγχύουν άεργο ισχύ στο δίκτυο. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται μπορούν να είναι πυκνωτές ή εγκάρσια πηνία ή ακόμη και οι ίδιες οι μονάδες παραγωγής ενέργειας.
- Απόρριψη ενεργού ισχύος (AEI): γίνεται όταν το δίκτυο δεν μπορεί να μεταφέρει περισσότερη ενέργεια και παρουσιάζονται ήδη υπερτάσεις. Έτσι, εφόσον όλα τα υπόλοιπα μέτρα έχουν χρησιμοποιηθεί, γίνεται τελικά απόρριψη ενεργού ισχύος, ως

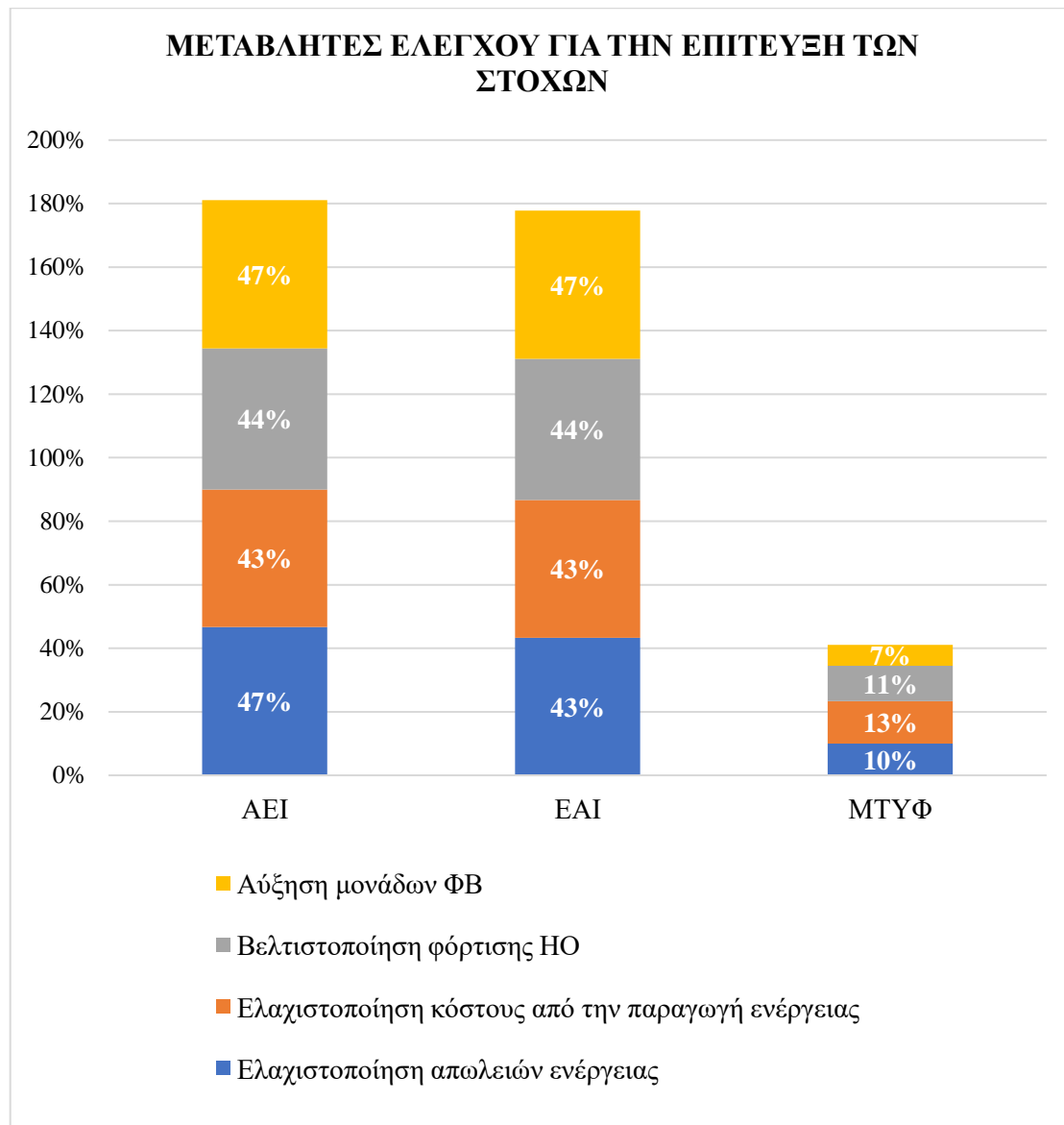
ύστατο μέτρο. Γενικά, η χρήση αυτής της μεθόδου δεν είναι επιθυμητή, αφού απορρίπτεται ενέργεια η οποία θα μπορούσε να καταναλωθεί.

- Μεταβλητός συντελεστής ισχύος (μέθοδος PQ): ο συντελεστής ισχύος μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Αν δηλαδή χρειάζεται απορρόφηση ή έγχυση άεργου ισχύος. Η διαδικασία γίνεται μαζί και με τις άλλες συσκευές ρύθμισης τάσης.
- Έλεγχος καταναμημένων ενεργειακών πόρων: γίνεται ρύθμιση της ενεργού αλλά και της άεργου ισχύος που εισέρχεται στο δίκτυο. Οι γεννήτριες ελέγχονται ώστε η τάση στην έξοδο να είναι εντός ορίων, ρυθμίζοντας την άεργο ισχύ τους (μέθοδος PV). Ενώ γίνεται και έλεγχος της ενεργού ισχύος ώστε να περιορίζονται οι απώλειες ενέργειας.
- Συσκευές αποθήκευσης ενέργειας: μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέτρο αντιμετώπισης της απόρριψης ενεργού ισχύος. Γίνεται χρήση αποθηκευτικών μέσων, όπως μπαταρίες, για να αποθηκεύεται η ενέργεια σε διαστήματα χαμηλής κατανάλωσης όπου παρουσιάζονται υπερτάσεις και να χρησιμοποιείται σε διαστήματα αιχμής φορτίου. Μπορούν ακόμη να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, όπως διακοπή παραγωγής ενέργειας από τις γεννήτριες λόγω βλάβης.
- Αναβάθμιση υποδομών δικτύου: μπορεί να γίνει σε δίκτυα τα οποία κατασκευάστηκαν πριν από μεγάλο διάστημα όπου οι ανάγκες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας ήταν σημαντικά χαμηλότερες. Αναβάθμιση μπορεί να γίνει στους μετασχηματιστές διανομής αλλά και στις γραμμές διανομής ώστε να αντέχουν το μεγάλο φορτίο.

### 3.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ



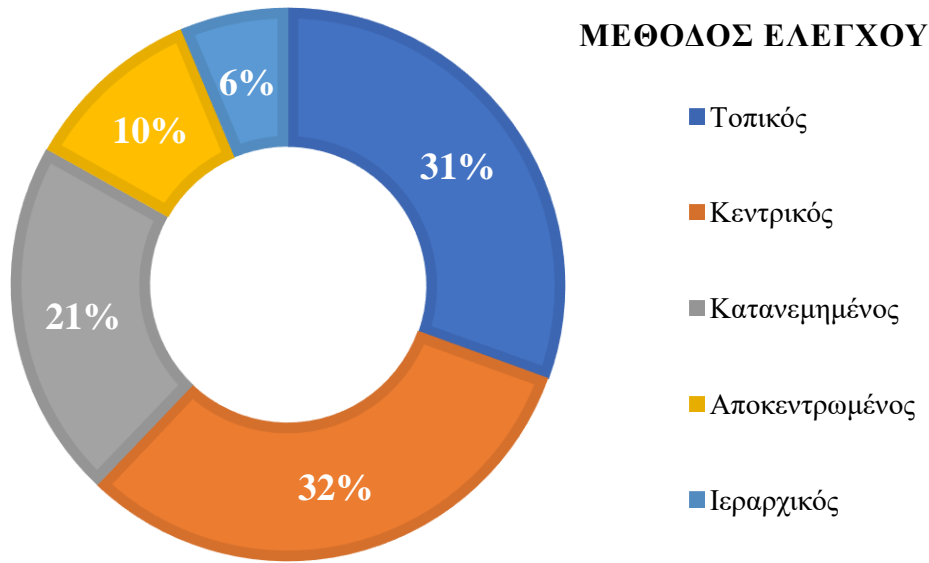
**Σχήμα 3.1:** Οι βασικότερες αντικειμενικές συναρτήσεις της βιβλιογραφίας.



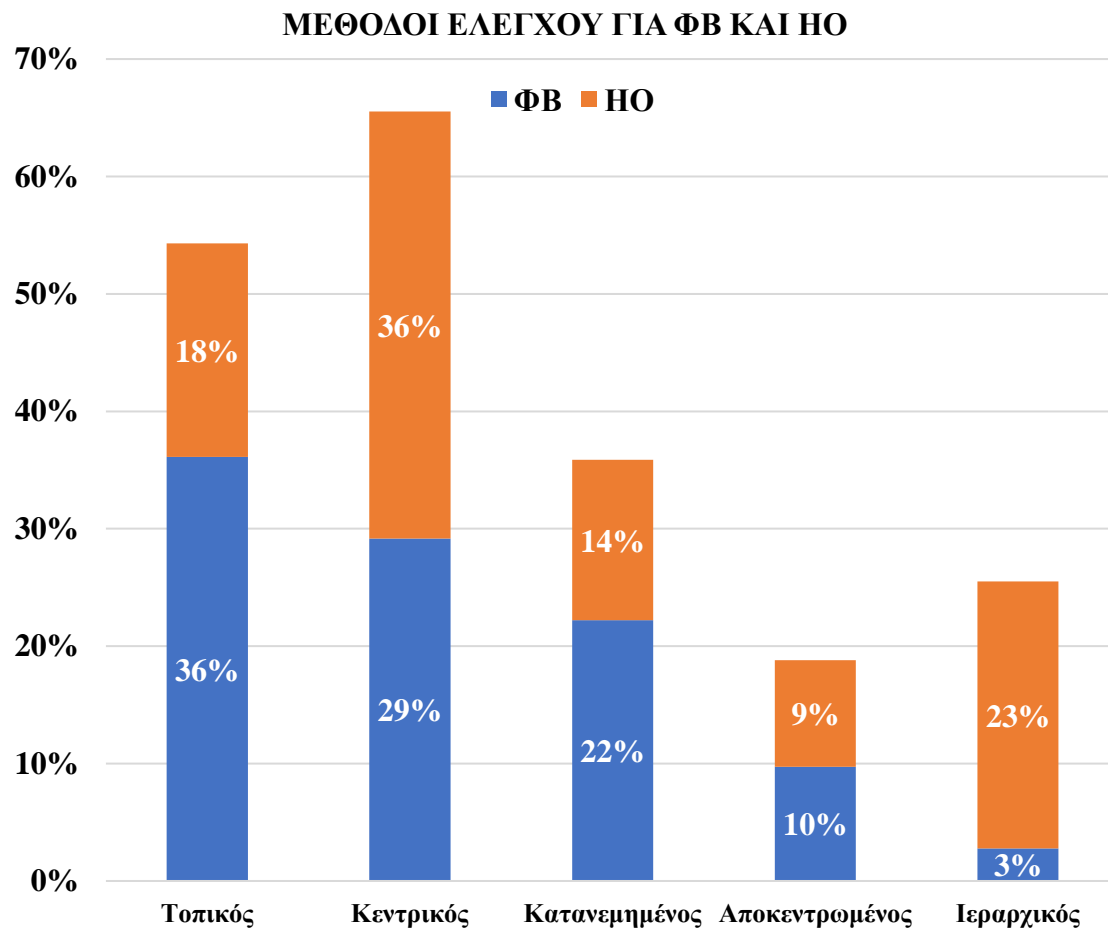
**Σχήμα 3.2:** Μεταβλητές ελέγχου που εφαρμόζονται ανάλογα με τον στόχο.

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι μια μαθηματική αναπαράσταση που χρησιμοποιείται σε προβλήματα βελτιστοποίησης με σκοπό να καθορίσει τις μεταβλητές που πρέπει να ελαχιστοποιηθούν ή να μεγιστοποιηθούν προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Υπάρχουν διάφορων μορφών συναρτήσεις που μπορεί να είναι απλές εξισώσεις, σύνθετες μαθηματικές πράξεις αλλά και συναρτήσεις οι οποίες βασίζονται στις προτιμήσεις των διαχειριστών του δικτύου διανομής, των ιδιοκτητών των γεννητριών παραγωγής ενέργειας αλλά και των καταναλωτών. Σε κάθε πρόβλημα, η αντικειμενική συνάρτηση διαφέρει ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα, λαμβάνοντας υπόψη τα οικονομικά συμφέροντα και το τεχνικό και νομικό πλαίσιο [9]. Οι κύριες αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα διανομής είναι: ελαχιστοποίηση απωλειών ενέργειας, ελαχιστοποίηση κόστους από την παραγωγή ενέργειας, ελαχιστοποίηση κόστους κατά τη φόρτιση των ΗΟ, ενίσχυση του ηλεκτρικού δικτύου για εγκατάσταση περισσότερων μονάδων ΦΒ και ο περιορισμός των αποκλίσεων τάσης.

### 3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ



Σχήμα 3.3: Οι κυριότερες μέθοδοι ελέγχου της βιβλιογραφίας.



Σχήμα 3.4: Οι μέθοδοι ελέγχου που χρησιμοποιούνται περισσότερο για φωτοβολταϊκά συστήματα και φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, αντίστοιχα.



Σε ένα δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης οι μέθοδοι ελέγχου αναφέρονται στη δομή του δικτύου και στη διάταξη με την οποία τοποθετούνται οι συσκευές ελέγχου έτσι ώστε να γίνεται σωστή διανομή ισχύος στους καταναλωτές. Οι διατάξεις αυτές χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που γίνεται η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, αν υπάρχει επικοινωνία ή όχι. Στην κατηγορία των αυτόνομων διατάξεων ανήκει μόνο ο τοπικός έλεγχος ενώ στην κατηγορία των διατάξεων που υπάρχει επικοινωνία ανήκει ο κεντρικός, ο κατανεμημένος, ο αποκεντρωμένος και ο ιεραρχικός έλεγχος. Αξίζει να σημειωθεί ότι διαφορετικές διατάξεις ελέγχου μπορούν να συνδυαστούν ή να προσαρμοστούν ώστε να ταιριάζουν σε συγκεκριμένες αρχιτεκτονικές δικτύων διανομής, λειτουργικές απαιτήσεις και στόχους ελέγχου. Η επιλογή της τοπολογίας ελέγχου εξαρτάται από παράγοντες όπως το μέγεθος του δικτύου, η πολυπλοκότητα, η υποδομή επικοινωνίας και το επιθυμητό επίπεδο αυτοματισμού και συντονισμού. Παρακάτω γίνεται περιγραφή των κυριότερων μεθόδων ελέγχου [9].

### 3.4.1 Τοπικός Έλεγχος

Οι μετρήσεις και οι ρυθμίσεις εκτελούνται τοπικά σε κάθε μεμονωμένη συσκευή ή εξάρτημα στο δίκτυο, αντί να ελέγχονται κεντρικά από ένα μόνο σημείο. Μπορούν να παρέχουν άμεση ανταπόκριση στις μεταβολές των γεννητριών χωρίς να επηρεάζονται από παρεμβολές στην επικοινωνία. Οπότε έχει αυξημένη αξιοπιστία και ανθεκτικότητα εφόσον είναι ανεξάρτητο από υποδομές επικοινωνίας. Ένα τοπικά ελεγχόμενο δίκτυο είναι πιο ευπροσάρμοστο στις τοπικές συνθήκες αφού είναι σχεδιασμένο να ανταποκρίνεται σε αυτές και να κάνει τις απαραίτητες προσαρμογές για τη διατήρηση της βέλτιστης απόδοσης και σταθερότητας. Παρόλα αυτά, εφόσον δεν υπάρχει συντονισμός μεταξύ των κόμβων, δεν υπάρχει η δυνατότητα πλήρους εκμετάλλευσης των πόρων του δικτύου, έτσι το σύστημα δεν βρίσκεται στην ιδανική ελέγξιμη κατάσταση.

### 3.4.2 Κεντρικός Έλεγχος

Όλες οι μετρήσεις στο δίκτυο διανομής ΧΤ συγκεντρώνονται σε έναν κεντρικό συντονιστή, μέσω έξυπνων μετρητών, όπου λαμβάνονται όλες οι αποφάσεις. Αφού ληφθούν οι αποφάσεις στο κέντρο ελέγχου, τότε οι απαραίτητες ρυθμίσεις και ενέργειες μεταφέρονται στους κόμβους του δικτύου για να εφαρμοστούν.

### 3.4.3 Κατανεμημένος Έλεγχος

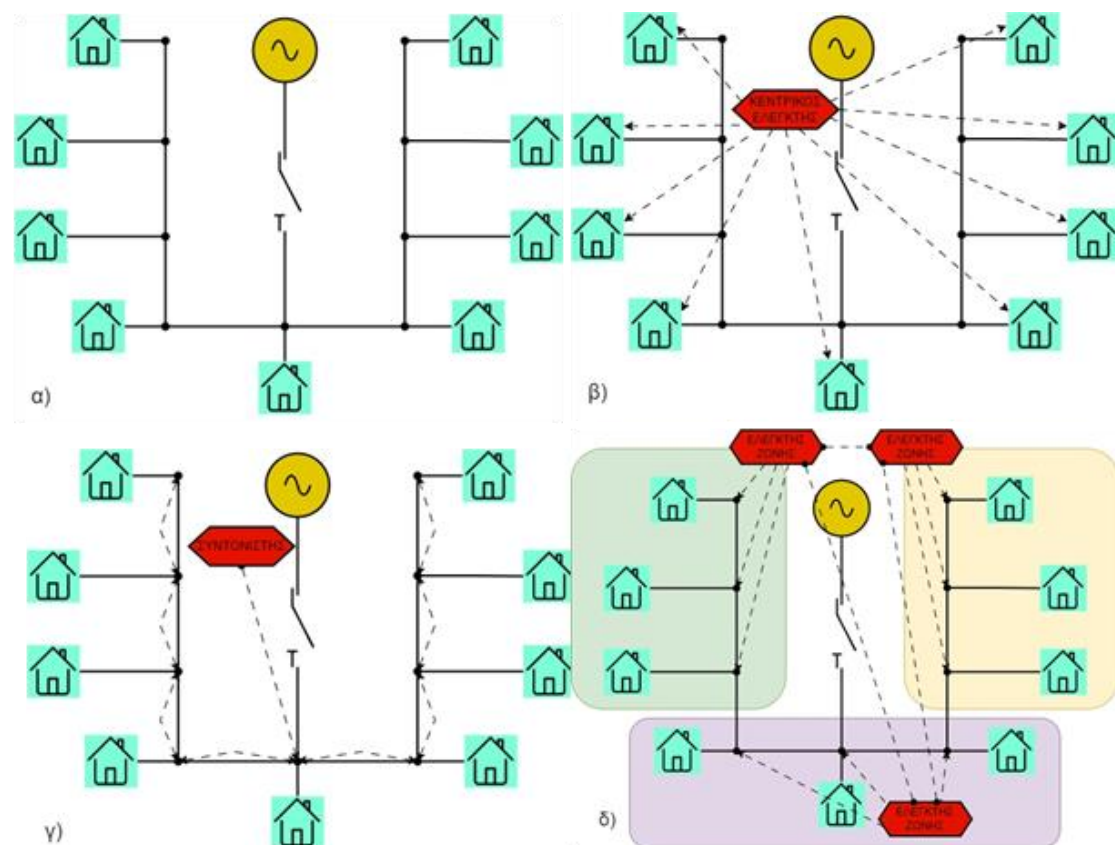
Οι κόμβοι επικοινωνούν μόνο με τους γειτονικούς τους κόμβους, με μια μορφή συνεργασίας, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για επεξεργασία των δεδομένων σε κεντρικό σημείο. Η λήψη αποφάσεων βασίζεται στον κοινό στόχο που έχει τεθεί. Στόχος αυτής της διάταξης είναι η δημιουργία ενός αυτοελεγχόμενου δικτύου το οποίο θα μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τα προβλήματα που ίσως παρουσιαστούν. Ακόμη προσφέρει εύκολη σύνδεση νέων συσκευών στο δίκτυο το οποίο είναι αρκετά σημαντικό εφόσον ολοένα και αυξάνεται η ενσωμάτωση νέων κατανεμημένων ενεργειακών πόρων, όπως ΦΒ πλαίσια, μπαταρίες, ανεμογεννήτριες.

### 3.4.4 Αποκεντρωμένος Έλεγχος

Σε αυτή τη διάταξη το δίκτυο διανομής ΧΤ είναι χωρισμένο σε ζώνες όπου για την κάθε μια ζώνη υπάρχει ξεχωριστή συσκευή ελέγχου. Οι ελεγκτές αυτοί μπορούν να είναι συνδεδεμένοι επίσης και με ελεγκτές από άλλες ζώνες έτσι ώστε να επικοινωνούν για την επίτευξη πιο γενικών στόχων του δικτύου ΧΤ. Δηλαδή, γίνεται ένας συνδυασμός κεντρικού και καταναμημένου ελέγχου, αφού η κάθε ζώνη με τον ελεγκτή της λειτουργεί σαν κεντρική διάταξη με λήψη αποφάσεων σε πιο τοπικό επίπεδο, ενώ οι ελεγκτές μεταξύ τους λειτουργούν σαν καταναμημένοι για την επίλυση κοινών προβλημάτων.

### 3.4.5 Ιεραρχικός Έλεγχος

Γίνεται χρήση μιας πολυεπίπεδης προσέγγισης για τον έλεγχο του δικτύου διανομής ΧΤ. Κάθε ένα από αυτά τα επίπεδα είναι υπεύθυνο για συγκεκριμένες εργασίες, όπως για παράδειγμα το ανώτατο επίπεδο είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία όλου του δικτύου ενώ τα κατώτερα επίπεδα εστιάζουν στον τοπικό έλεγχο και στην παρακολούθηση. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα για αποτελεσματικό έλεγχο σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας αφού το δίκτυο είναι χωρισμένο σε βαθμίδες ελέγχου.



**Σχήμα 3.5:** Η διάταξη για τις βασικότερες μεθόδους ελέγχου που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία. α) τοπικός έλεγχος, β) κεντρικός έλεγχος, γ) καταναμημένος έλεγχος, δ) αποκεντρωμένος έλεγχος.

### 3.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΦΟΡΤΙΟΥ

Τα μοντέλα φορτίου σε ένα δίκτυο διανομής ΧΤ είναι μαθηματικές αναπαραστάσεις που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση και την πρόβλεψη της κατανάλωσης ισχύος των συνδεδεμένων ηλεκτρικών φορτίων. Η χρήση τους είναι απαραίτητη εφόσον βοηθούν στον σχεδιασμό του δικτύου αλλά, στην πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας αλλά και στη βελτιστοποίηση της ροής ισχύος στο δίκτυο. Τα μοντέλα φορτίου που επιλέγονται για κάθε σενάριο σχετίζονται με την στρατηγική διαχείρισης που εφαρμόζεται. Παρακάτω γίνεται περιγραφή των κύριων μοντέλων φορτίου που χρησιμοποιούνται [9].

#### 3.5.1 Μοντελοποίηση Φορτίων στη Βέλτιστη Ροή Ισχύος

Η παροχή ενέργειας προγραμματίζεται ένα ορισμένο διάστημα προηγουμένως και είναι βασισμένη σε διάφορα επίπεδα φορτίων ή σε καμπύλη φορτίου 24 ωρών. Για μακροχρόνιες εκτιμήσεις τα επίπεδα παραγωγής και φορτίου χωρίζονται σε μεγαλύτερα διαστήματα για απλοποίηση του υπολογιστικού φόρτου. Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της βέλτιστης ροής ισχύος μπορεί να είναι καθορισμένα με βάση τη συλλογή δεδομένων ή μπορεί να είναι πιθανοτικά με βάση στατιστικές μελέτες που γίνονται στο δίκτυο. Το στοχαστικό, πιθανοτικό, μοντέλο ενσωματώνει στατιστικές κατανομές με σκοπό να αναπαραστήσουν τη μεταβλητότητα και την τυχαιότητα των φορτίων, επιτρέποντας πιο ακριβείς εκτιμήσεις της ευστάθειας και της αξιοπιστίας του δικτύου.

#### 3.5.2 Μοντελοποίηση Φορτίων για Λειτουργία σε Πραγματικό Χρόνο

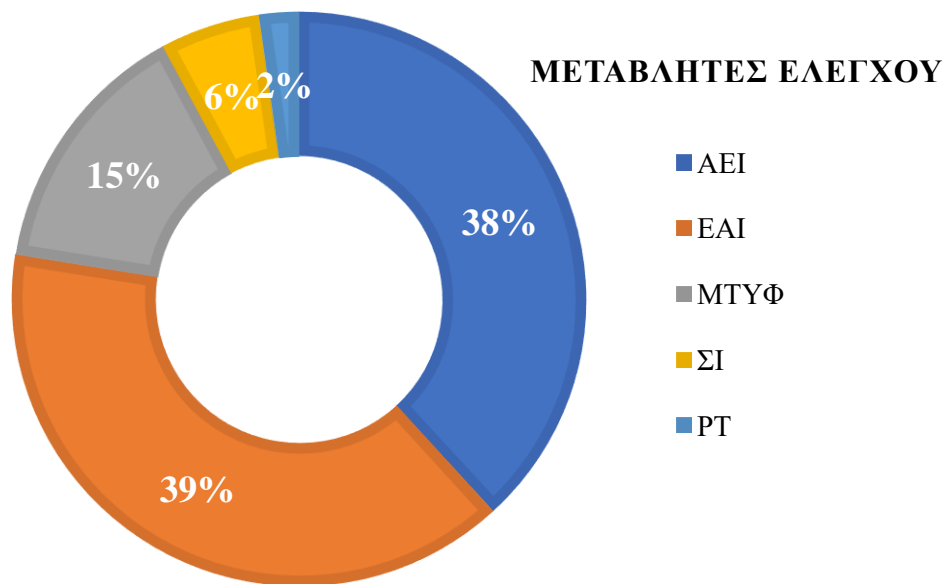
Οι αποφάσεις για το δίκτυο διανομής λαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα οπότε το δίκτυο λαμβάνει εντολές σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Για τη λήψη αποφάσεων χρησιμοποιούνται τοπικές ή απομακρυσμένες μετρήσεις οι οποίες αφού περάσουν μέσα από αλγόριθμο δίνουν τις κατάλληλες εντολές. Τα μοντέλα φορτίου που βασίζονται στη λειτουργία πραγματικού χρόνου μπορεί να είναι με χρήση ημερήσιων προφίλ φορτίου, με χρήση ενός ή περισσότερων επιπέδων φορτίου και με ομαδοποίηση πολλαπλών χρόνων. Μπορεί να γίνει χρήση ιστορικών δεδομένων για να δημιουργηθεί μια αναπαράσταση χρονοσειρών των μοτίβων των φορτίων που καταναλώνονται στο δίκτυο. Στις χρονοσειρές λαμβάνονται υπόψη οι διακυμάνσεις των φορτίων, ημερήσιων και εποχιακών.

#### 3.5.3 Μοντέλο Φορτίου ZIP

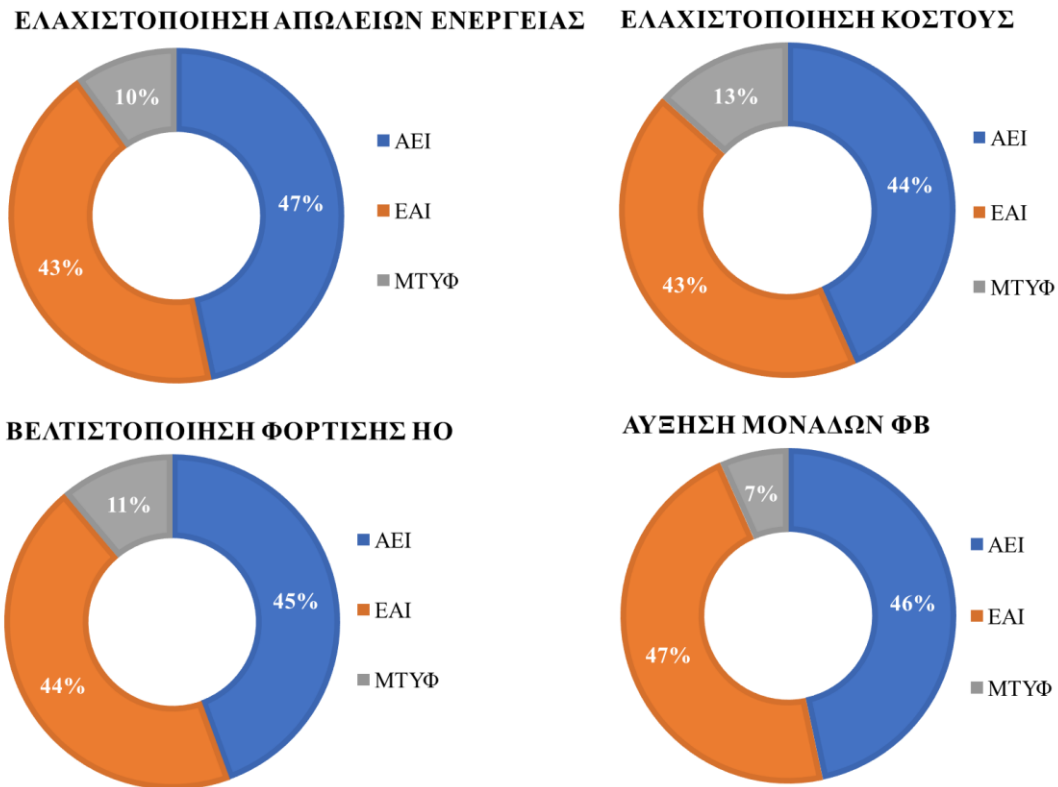
Σε αυτό το μοντέλο γίνεται χρήση σταθερής αντίστασης  $Z$ , σταθερού ρεύματος  $I$  και σταθερής ισχύος  $P$ . Το μοντέλο ZIP χρησιμοποιείται συνήθως για να αναπαραστήσει την εξάρτηση τάσης με τις παραπάνω τιμές. Ακόμη για την αναπαράσταση ηλιακών φωτοβολταϊκών μετατροπέων είναι σημαντική η χρήση της τιμής του σταθερού ρεύματος του μοντέλου [16].

### 3.6 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Οι μεταβλητές ελέγχου αναφέρονται σε παραμέτρους οι οποίες κατά την επίλυση του προβλήματος είναι αυτές που βελτιστοποιούνται έτσι ώστε να παραχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Από τη βιβλιογραφία οι μεταβλητές ελέγχου που βελτιστοποιούνται είναι: μεταγωγέας τάσης υπό φορτίο (ΜΤΥΦ), απόρριψη ενεργού ισχύος (ΑΕΙ), έλεγχος άεργου ισχύος (ΕΑΙ), έλεγχος και έγχυση/απορρόφηση ενεργού/άεργου ισχύος από τις μονάδες διανεμημένης παραγωγής, συντελεστής ισχύος (ΣΙ), ρυθμιστής τάσης (ΡΤ).



**Σχήμα 3.6:** Οι κυριότερες μεταβλητές ελέγχου της βιβλιογραφίας.



**Σχήμα 3.7:** Οι μεταβλητές ελέγχου που χρησιμοποιούνται για κάθε αντικειμενική συνάρτηση για το κάθε αντικείμενο.

### 3.7 ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

#### 3.7.1 Διανεμημένη Παραγωγή

Η διανεμημένη παραγωγή χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: σε αυτή όπου είναι πλήρως ελεγχόμενη και σε αυτή όπου η παραγωγή μπορεί να έχει διακυμάνσεις [9]

Στην πρώτη κατηγορία η παραγωγή ενέργειας μπορεί να προγραμματιστεί εκ των προτέρων με βάση τις ανάγκες της αγοράς. Τέτοιες μονάδες χρησιμοποιούν για την παραγωγή ενέργειας κυρίως ορυκτά καύσιμα και ανάλογα με τη ζήτηση, η παραγωγή τους μπορεί να μεταβληθεί. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν μονάδες παραγωγής όπως αεριοστρόβιλοι, μονάδες υδροηλεκτρικής παραγωγής, βιομάζας και μηχανές εσωτερικής καύσης.

Στη δεύτερη κατηγορία, η παραγωγή ενέργειας δεν μπορεί να προβλεφθεί ούτε να αποδοθεί από τον ΔΔΔ σε προκαθορισμένο χρόνο. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μονάδες ΦΒ και οι μονάδες αιολικής ενέργειας. Οι μονάδες αυτής της κατηγορίας έχουν το χαρακτηριστικό ότι η παραγωγή τους υπόκειται σε αβεβαιότητες, όπως ο άνεμος και η ηλιακή ακτινοβολία και για τον λόγο αυτό η παραγωγή τους δεν μπορεί να θεωρηθεί δεδομένη σε όλα τα χρονικά διαστήματα.

### 3.7.2 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας

Σε ένα τέτοιο σύστημα γίνεται χρήση αποθηκευτικών μέσων ενέργειας στα οποία αποθηκεύεται το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ενέργειας για να χρησιμοποιηθεί σε μεταγενέστερο χρόνο όταν η παραγωγή δεν θα είναι αρκετή για την κάλυψη των αναγκών. Συνήθως το μέσο αποθήκευσης είναι μπαταρίες, όπου για παράδειγμα σε ένα ΦΒ σύστημα φορτίζονται κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας και εκφορτίζονται το βράδυ όταν γίνεται κατανάλωση φορτίου. Όμως, λόγω του σημαντικού κόστους εγκατάστασης των μέσων αυτών, η χρήση τους δεν είναι τόσο ευρεία όσο θα μπορούσε.

### 3.7.3 Διαχείριση Ζήτησης

Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούν τρεις διαφορετικές μέθοδοι για τον μετριασμό της υπερκατανάλωση φορτίου.

- Έλεγχος ζήτησης: τις ώρες της υψηλής ζήτησης φορτίου, ο ΔΔΔ έχει τη δυνατότητα να παρέχει οικονομικά κίνητρα στους καταναλωτές προκειμένου να μειώσουν την κατανάλωσή τους.
- Αποκρινόμενο φορτίο: το φορτίο ακολουθεί μια καμπύλη δυναμικής τιμολόγησης ενέργειας.
- Ευέλικτο φορτίο: η κατανάλωση φορτίου μπορεί να μεταφέρεται από διαστήματα αιχμής σε διαστήματα χαμηλότερης ζήτησης έτσι ώστε η συνολική κατανάλωση να παραμένει σταθερή χωρίς όμως να επιβαρύνεται το σύστημα.

## 3.8 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Στον Πίνακα 3.1 γίνεται ταξινόμηση της βιβλιογραφίας που μελετήθηκε. Για κάθε εργασία, ο Πίνακας 3.1 περιλαμβάνει την ακόλουθη πληροφορία:

- Πηγή, δηλαδή αριθμός της εργασίας όπως εμφανίζεται στο Κεφάλαιο 7 της βιβλιογραφίας.
- Ημερομηνία δημοσίευσης της εργασίας, με την οποία είναι και ταξινομημένες με χρονολογική σειρά στον πίνακα οι εργασίες.
- Τον στόχο – αντικειμενική συνάρτηση της εργασίας.
- Τύπο φορτίου, δηλαδή με τι είδους φορτίου μοντελοποιείται το δίκτυο.
- Μεταβλητές ελέγχου, δηλαδή ποιες μεταβλητές ρυθμίζονται για την επίτευξη του στόχου.
- Μέθοδος ελέγχου, δηλαδή με ποια τοπολογία έχει μοντελοποιηθεί το δίκτυο.
- Μοντέλο δικτύου, δηλαδή αν το δίκτυο της εργασίας είναι βασισμένο σε μονοφασικό ή τριφασικό μοντέλο.

Από τον Πίνακα 3.1 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Αρχικά από τον πίνακα και την ταξινόμηση με βάση τη χρονολογική σειρά είναι φανερό ότι η μεγάλη πλειοψηφία των εργασιών που μελετήθηκαν έχουν πραγματοποιηθεί την τελευταία δεκαετία. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την ανάγκη που υπάρχει στην αγορά ενέργειας για την εύρεση νέων μεθόδων εξομάλυνσης της λειτουργίας των ΔΔΧΤ.
- Οι περισσότερες εργασίες έχουν για αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος ενώ ακολουθούν οι εργασίες με στόχο την ελαχιστοποίηση κόστους. Επίσης, σημαντικός αριθμός εργασιών ασχολείται με την εξομάλυνση της λειτουργίας του δικτύου και με την ελαχιστοποίηση των παραβιάσεων τάσης.
- Από τον πίνακα φαίνεται ότι οι τύποι φορτίου οι οποίοι μοντελοποιούνται συχνότερα είναι οι 24ωρες απεικονίσεις των φορτίων, ενώ σε αρκετές εργασίες χρησιμοποιούνται και ευέλικτα φορτία ή ιστορικά δεδομένα.
- Οι βασικότερες μεταβλητές ελέγχου που παρατηρούνται στις εργασίες που φαίνονται στον πίνακα είναι ο ΕΑΙ, η ΑΕΙ και ακολουθεί η ρύθμιση του ΜΤΥΦ.
- Επίσης, παρατηρείται ότι τα περισσότερα δίκτυα μοντελοποιούνται με κεντρική τοπολογία για τον έλεγχό τους. Ακολουθούν οι μέθοδοι ελέγχου τοπικής τοπολογίας και συντονισμένης τοπολογίας.
- Τέλος, παρατηρείται ότι οι συγγραφείς των εργασιών ασχολούνται ως επί το πλείστον με τριφασικά δίκτυα.

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση βιβλιογραφίας

Πηγή	Ημερομηνία δημοσίευσης	Αντικειμενική συνάρτηση	Τύπος Φορτίου	Μεταβλητές ελέγχου	Μέθοδος ελέγχου	Μοντέλο δικτύου
[17]	24/04/2009	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος	στοχαστική πρόβλεψη 24ωρη απεικόνιση	χωρητικότητα μπαταρίας μέγιστη ισχύς φορτιστή	συντονισμένος	1Φ
[18]	18/12/2009	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος μεγιστοποίηση του κύριου συντελεστή φορτίου του δικτύου	σταθερή ισχύς 24ωρη απεικόνιση	χωρητικότητα μπαταρίας μέγιστη ισχύς φορτιστή	συντονισμένος	1Φ
[19]	28/09/2010	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος αύξηση της αποδοτικότητας του δικτύου	24ωρη απεικόνιση οικιακό προφίλ φορτίου	ροή ενεργού ισχύος ΔΕΠ χωρητικότητα μπαταρίας	συντονισμένος	1Φ
[20]	10/12/2010	ελαχιστοποίηση της απορροφούμενης άεργου ισχύος	24ωρη απεικόνιση 3 προφίλ φορτίου	AEI	συντονισμένος	1Φ
[21]	12/06/2011	μετριάσμος υπέρτασης	ετήσια προφίλ φορτίου	AEI	τοπικός	1Φ
[22]	23/06/2011	μεγιστοποίηση της ενέργειας που παρέχεται σε όλα τα ΗΟ μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα αύξηση του επιπέδου διείσδυσης της παραγωγής ενέργειας από ΦΒ	συνδιασμός σταθερής ισχύος (P) σταθερής αντίστασης (Z)	ροή ενεργού ισχύος ΔΕΠ	συντονισμένος	3Φ
[23]	07/12/2011	μεγιστοποίηση του ρυθμού φόρτισης ΗΟ ελαχιστοποίηση κόστους	ισορροπημένα και ίσα προφίλ παραγωγής/κατανάλωσης	EAI	τοπικός	3Φ
[24]	09/04/2012	ελαχιστοποίηση κόστους ενίσχυση αντοχής ΑΠΕ	50% σταθερή ισχύς (P) 50% σταθερή αντίσταση (Z) ομαδοποιημένο μοντέλο φορτίου 24ωρη απεικόνιση μέγιστη παραγωγή ενέργειας	ροή ενεργού ισχύος ΔΕΠ κατάσταση φόρτισης μπαταρίας	κεντρικός	3Φ
[25]	06/06/2012	περιορισμός παραβιάσεων τάσης με την ελάχιστη AEI	αλγόριθμος που δημιουργεί οικιακά φορτία	AEI EAI	αποκεντρωμένος	3Φ
[26]	25/07/2012	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος	μη ισορροπημένο φορτίο	AEI	τοπικός κεντρικός	3Φ4Α
[27]	18/09/2012	ελαχιστοποίηση των μέγιστων τιμών τάσης / αποκοπών αιχμών τάσης / κόστους	σταθερή ισχύς	φαινόμενη ισχύς μετατροπέα χωρητικότητα μπαταρίας ενεργός/άεργος ισχύς αντιστροφέα	N/A	3Φ4Α



Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση βιβλιογραφίας (συνέχεια)

Πηγή	Ημερομηνία δημοσίευσης	Αντικειμενική συνάρτηση	Τύπος Φορτίου	Μεταβλητές ελέγχου	Μέθοδος ελέγχου	Μοντέλο δικτύου
[28]	05/09/2013	ελαχιστοποίηση κόστους φόρτισης ΗΟ	μη ισορροπημένο φορτίο 24ωρη απεικόνιση σταθερή ισχύς	ενεργός ισχύς ΗΟ	κεντρικός	3Φ
[29]	26/09/2013	ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης αποθηκευμένης ενέργειας για την διατήρηση τάσης σε επιθυμητά επίπεδα	περίοδος 12 μηνών με χρήση προφίλ 15λεπτου μέσου φορτίου και παραγωγής	PCC ενεργό/άεργο φορτίο ισχύος	αποκεντρωμένος	3Φ
[30]	22/01/2014	βελτιστοποίηση της λειτουργίας του τροφοδότη διανομής και εξασφάλιση ρύθμισης τάσης	σταθερή ισχύς	AEI EAI	κατανεμημένος	1Φ
[31]	06/02/2014	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος	οικιακό προφίλ φορτίου	AEI EAI	τοπικός	N/A
[32]	04/03/2014	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος	σταθερή ισχύς	AEI EAI	κεντρικός τοπικός	3Φ4Α
[33]	23/04/2014	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος ελαχιστοποίηση κόστους	μη ισορροπημένο φορτίο σταθερή ισχύς 24ωρη απεικόνιση	AEI EAI	κεντρικός	3Φ4Α
[34]	18/06/2014	ελαχιστοποίηση κόστους ενίσχυση αντοχής ΑΠΕ	οικιακό προφίλ φορτίου	ΜΤΥΦ EAI AEI PCC	συντονισμένος	N/A
[35]	13/08/2014	περισρισμός παραβιάσεων τάσης reduce tap changes	ιστορικά δεδομένα	EAI ΡΤ ενεργός/άεργος ισχύς ΔΕΠ	τοπικός συντονισμένος	N/A
[36]	19/01/2015	περισρισμός παραβιάσεων τάσης	συνεχής παραγωγή σταθερό φορτίο	AEI	συντονισμένος	3Φ
[37]	06/05/2015	ρύθμιση τάσης σε οικικό επίπεδο μείωση κόστους MAE με μπαταρίες	σταθερή ισχύς	χωρητικότητα μπαταρίας φαινόμενη ισχύς αντιστροφέα ισχύς φόρτισης κόστος ενέργειας EAI	N/A	3Φ4Α
[38]	25/06/2015	ενίσχυση αντοχής ΑΠΕ	προφίλ χρονολογικών σειρών	ΜΤΥΦ	τοπικός απομακρυσμένος	3Φ
[39]	29/07/2015	έλεγχος MAE για ρύθμιση τάσης αξιοποιώντας τη διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας	οικιακό προφίλ φορτίου 24ωρη απεικόνιση ιστορικά δεδομένα	ενεργός/άεργος ισχύ ΔΕΠ αναλογία αξιοποίησης αναλογία διαθεσιμότητας σήματος	κατανεμημένος τοπικός	3Φ

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση βιβλιογραφίας (συνέχεια)

Πηγή	Ημερομηνία δημοσίευσης	Αντικειμενική συνάρτηση	Τύπος Φορτίου	Μεταβλητές ελέγχου	Μέθοδος ελέγχου	Μοντέλο δικτύου
[40]	01/09/2015	περισρισμός παραβιάσεων τάσης ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος ελαχιστοποίηση των αποσυνδέσεων ΗΟ	μη ισορροπημένο φορτίο ετήσιο προφίλ παραγωγής και φορτίου	ΣΙ ενεργός/άεργος ισχύς ΔΕΠ	συντονισμένος	3Φ
[41]	03/09/2015		σταθερό ρεύμα στοχαστικό προφίλ φορτίου ΗΟ	κατάσταση φόρτισης μπαταρίας σημείο φόρτισης	κεντρικός	3Φ
[42]	07/09/2015	ρύθμιση τάσης στους ζυγούς	σταθερή και ομοιόμορφη άεργος ισχύς ενεργός ισχύ στο 50%-150% του φορτίου	EAI	αποκεντρωμένος	3Φ
[43]	01/12/2015	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος	σταθερή ισχύς	EAI	τοπικός	3Φ
[44]	01/03/2016	περισρισμός παραβιάσεων τάσης ελαχιστοποίηση χρήσης άεργου ισχύος	ετήσια χρονοσειρά φορτίων σταθερή ισχύς	EAI	N/A	3Φ
[45]	24/05/2016	βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση ενεργών ρυθμιστών τάσης γραμμής	σταθερή ισχύς ιστορικά δεδομένα	EAI άεργος ισχύς ΦΒ	τοπικός	3Φ4Α
[46]	10/08/2016	ελαχιστοποίηση κόστους	μη ισορροπημένο φορτίο	ΜΤΥΦ	κεντρικός	3Φ
[47]	25/08/2016	βέλτιστη διαχείριση ενεργού δικτύου εξασφάλιση ότι η έγχυση ενεργού ισχύος από ΦΒ δεν προκαλεί υπέρταση βέλτιστη διαχείριση όλων των διαθέσιμων ΔΕΠ για την επίτευξη συγκεκριμένου στόχου ελέγχου μεγιστοποίηση των επιπέδων άνεσης των καταναλωτών, διατηρώντας παράλληλα τους θερμοκούς περιορισμούς του δικτύου	ιστορικά δεδομένα	συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα	κατανεμημένος	3Φ
[48]	29/09/2016		1000 προφίλ φορτίου 1000 προφίλ φορτίου ΗΟ	ΜΤΥΦ	ιεραρχικός	3Φ4Α
[49]	04/11/2016		ισορροπημένο	EAI	κεντρικός - απομακρυσμένος τοπικός - αποκεντρωμένος	3Φ
[50]	14/11/2016		έξυπνα φορτία ευέλικτα φορτία 24ωρη απεικόνιση	ενεργός/άεργος ισχύς ΔΕΠ κατανάλωση ενεργού ισχύος	συντονισμένος	3Φ
[51]	16/11/2016		μη ελεγχόμενα βασικά φορτία	AEI	αποκεντρωμένος τοπικός ιεραρχικός κεντρικός	3Φ

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση βιβλιογραφίας (συνέχεια)

Πηγή	Ημερομηνία δημοσίευσης	Αντικειμενική συνάρτηση	Τύπος Φορτίου	Μεταβλητές ελέγχου	Μέθοδος ελέγχου	Μοντέλο δικτύου
[52]	18/01/2017	ελαχιστοποίηση κόστους ελαχιστοποίηση χρόνου αναμονής	ευέλικτα φορτία αναβαλλόμενα φορτία διαμορφώσιμα φορτία 24ωρη απεικόνιση ιστορικά δεδομένα	ισχύ μπαταρίας διαμορφώσιμη ενέργεια φορτίου αναβαλλόμενη ενέργεια φορτίου ενεργός/άεργος ισχύ ΔΕΠ ενεργός/άεργος ισχύ ΔΕΠ	ιεραρχικός	N/A
[53]	16/02/2017	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος	ευέλικτα φορτία	ΑΕΙ ΣΙ γεννήτριας εγκατεστημένη χωρητικότητα γεννήτριας	κεντρικός τοπικός καταναμημένος	3Φ
[54]	28/04/2017	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος και χρήσης αποθηκευμένης ενέργειας	ιστορικά δεδομένα	έγχυση ενεργού/άεργου ισχύος ΔΕΠ ΕΑΙ	N/A	N/A
[55]	27/08/2017	ελαχιστοποίηση κόστους	ευέλικτα φορτία	ΑΕΙ ΕΑΙ ΜΤΥΦ	κεντρικός	1Φ
[56]	07/09/2017	περιορισμός παραβιάσεων τάσης	σταθερή ισχύς οικιακό προφίλ φορτίου 24ωρη απεικόνιση	ΑΕΙ	καταναμημένος συντονισμένος	3Φ4Α
[57]	13/09/2017	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος ελαχιστοποίηση κόστους	σταθερή ισχύς	κατάσταση φόρτισης μπαταρίας	συντονισμένος	3Φ
[58]	15/09/2017	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος	μη ισορροπημένο φορτίο σταθερή ισχύς	έγχυση ενεργού/άεργου ισχύος ΔΕΠ	καταναμημένος	3Φ4Α
[59]	18/12/2017	περιορισμός παραβιάσεων τάσης	ισορροπημένη μία φάση	ΜΤΥΦ ΕΑΙ	N/A	3Φ4Α
[60]	24/04/2018	ελαχιστοποίηση κόστους φόρτισης ΗΟ	ZIP ευέλικτα φορτία 24ωρη απεικόνιση	άεργος ισχύ ΔΕΠ	ιεραρχικός	1Φ
[61]	30/08/2018	ελαχιστοποίηση κόστους ελέγχου ΔΕΠ	25%, 60%, και 15% μεταξύ των 3 φάσεων	ΑΕΙ ΕΑΙ ΜΤΥΦ ΣΙ φορτίου	κεντρικός	3Φ
[62]	10/09/2018	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος ελαχιστοποίηση μεταγωγών στους πυκνοτές και ρυθμιστές τάσης	24ωρη απεικόνιση	ενεργός/άεργος ισχύ ΔΕΠ	N/A	ΠΦ
[63]	13/09/2018	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος ελαχιστοποίηση κόστους	προφίλ χρονολογικών σειρών 24ωρη απεικόνιση ιστορικά δεδομένα ευέλικτο φορτίο	ΣΙ γεννήτριας	καταναμημένος	3Φ

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση βιβλιογραφίας (συνέχεια)

Πηγή	Ημερομηνία δημοσίευσης	Αντικειμενική συνάρτηση	Τύπος Φορτίου	Μεταβλητές ελέγχου	Μέθοδος ελέγχου	Μοντέλο δικτύου
[64]	05/10/2018	βελτίωση της ποιότητας ισχύος ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος ελαχιστοποίηση της ενεργού ισχύος που ρέει	24ωρη απεικόνιση	EAI PCC	τοπικός συντονισμένος	3Φ4Α
[65]	23/01/2019	απο το δίκτυο ΜΤ μείωση της εισαγόμενης ενέργειας στο δίκτυο	εκθετική καμπύλη	ΜΤΥΦ	κεντρικός	3Φ4Α
[66]	01/04/2019	ελαχιστοποίηση κόστους	σταθερή γραμμική τάση	AEI EAI	κεντρικός κατανεμημένος	3Φ
[67]	08/07/2019	ανάλυση μεθόδων ελέγχου συχνότητας ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος	ευέλικτα φορτία 24ωρη απεικόνιση	AEI ενεργός ισχύ γεννήτριας	κεντρικός	1Φ
[68]	26/08/2019	ενίσχυση αντοχής ΑΠΕ	σταθερή ισχύς	AEI EAI	συντονισμένος	1Φ
[69]	26/08/2019	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος	ιστορικά δεδομένα	AEI EAI	τοπικός	3Φ
[70]	08/01/2020	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος	μη ισορροπημένο φορτίο	ενεργός ισχύ φόρτισης	N/A	3Φ
[71]	27/03/2020	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος	προφίλ χρονολογικών σειρών 50% διείσδυση ΦΒ	ενεργός/άεργος ισχύ ΔΕΠ AEI παραγωγή ΦΒ	τοπικός	3Φ
[72]	03/07/2020	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος ελαχιστοποίηση κόστους	ιστορικά δεδομένα σταθερή ισχύς	έγχυση ενεργού/άεργου ισχύος	τοπικός συντονισμένος	3Φ
[73]	21/07/2020	ελαχιστοποίηση κόστους ελέγχου ΔΕΠ	ευέλικτα φορτία	AEI EAI	κεντρικός	3Φ
[74]	13/10/2020	ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος δικαιότερη κατανομή της περικοπής των ΦΒ και επιβράβευση των πελατών ΦΒ για τη χρήση της πλεονάζουσας ισχύος σε τοπικό επίπεδο ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος	σταθερή ισχύς	AEI	κεντρικός συντονισμένος	3Φ
[125]	15/11/2020	ελαχιστοποίηση κόστους	μετατοπιζόμενα φορτία	κόστος εισ/εξ κόστος μετατόπισης φορτίου κόστος AEI AEI EAI	κεντρικός	N/A

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση βιβλιογραφίας (συνέχεια)

Πηγή	Ημερομηνία δημοσίευσης	Αντικειμενική συνάρτηση	Τύπος Φορτίου	Μεταβλητές ελέγχου	Μέθοδος ελέγχου	Μοντέλο δικτύου
[75]	25/11/2020	ελαχιστοποίηση κόστους μεγιστοποίηση παραγωγής ΦΒ περισρισμός παραβιάσεων τάσης	ZIP ευέλικτα φορτία 24ωρη απεικόνιση	AEI EAI εισαγωγή/εξαγωγή ισχύος φόρτιση/εκφόρτιση HO ζήτηση ενεργού/άεργου ισχύος	τοπικός κεντρικός	3Φ4A 3Φ 1Φ
[76]	27/11/2020	διατήρη αποδεκτών συνθηκών λειτουργίας σε όλο το σύστημά για ολόκληρο τον ορίζοντα βελτιστοποίησης, με βέλτιστο από άποψη κόστους τρόπο	ευέλικτα φορτία μετατοπιζόμενα φορτία 24ωρη απεικόνιση	AEI άεργος ισχύς αντιστροφέα έγχυση ενεργού ισχύος κόστος	κεντρικός	1Φ
[77]	16/02/2021	περισρισμός παραβιάσεων τάσης ελαχιστοποίηση τεχνικών προβλημάτων	σταθερό ρεύμα	ενεργός/άεργος ισχύς ΔΕΠ	συντονισμένος	3Φ
[78]	30/08/2021	ελαχιστοποίηση αποκλίσεων από τον φορέας παροχής υπηρεσιών διανομής	σταθερή ισχύς 24ωρη απεικόνιση ευέλικτα φορτία	AEI EAI ενεργός ισχύ ανα φάση ζήτηση ενεργού ισχύος HO	κεντρικός	3Φ4A



## **ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ**

### **4.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ**

#### **4.1.1. Γραμμικός Προγραμματισμός (ΓΠ)**

Ο ΓΠ είναι μια μέθοδος για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος, μεγιστοποίηση κέρδους ή ελαχιστοποίηση απωλειών, σε ένα μαθηματικό μοντέλο, οι εξισώσεις του οποίου αναπαρίστανται από γραμμικές σχέσεις. Περιλαμβάνει τον προσδιορισμό μιας γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης, υπό τον περιορισμό ενός συνόλου γραμμικών ανισοτήτων και/ή ισοτήτων. Οι βασικές συνιστώσες ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού είναι οι μεταβλητές ελέγχου, η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί.

Στο [107] χρησιμοποιείται ένα ΓΠ AC-OPF τόσο στον προγραμματιστή όσο και στον ελεγκτή πραγματικού χρόνου για να μειώσει την υπολογιστική πολυπλοκότητα του αλγόριθμου. Το [24] κάνει χρήση ΓΠ για να μεγιστοποιήσει τη ικανότητα φόρτισης ενός φορτιστή ΗΟ. Οι συγγραφείς του άρθρου [113] χρησιμοποιούν ΓΠ σε MATLAB για να επιλύσουν το πρόβλημα της μεθόδου ελέγχου βάση βελτιστοποίησης. Στο άρθρο [55] γίνεται παρουσίαση τεσσάρων μεθόδων με σκοπό να καθοριστούν οι περιοδικές, βραχυπρόθεσμες ρυθμίσεις για την αποκοπή ενέργειας σε ένα δίκτυο με ΦΒ εγκαταστάσεις, όπως και στο άρθρο [26] όπου χρησιμοποιείται ΓΠ για να βρεθεί η βέλτιστη αποκοπή παραγωγής. Στο [109] γίνεται χρήση ΓΠ για να βρεθεί η βέλτιστη λύση τοποθέτησης και μεγέθους του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με χρήση μπαταριών για έναν μεγάλο ορίζοντα ελέγχου. Στο άρθρο [104] λύνεται ένα ΓΠ για την εύρεση των δυναμικών σημείων λειτουργίας για τη διαχείριση της αποθηκευμένης ενέργειας σε μια χρονική περίοδο. Στο άρθρο [19] γίνεται χρήση ΓΠ για να καθοριστούν τα βέλτιστα προφίλ φόρτισης ΗΟ. Στο [29] χρησιμοποιείται ΓΠ για να προσδιοριστεί η μέγιστη ικανότητα φόρτισης των μέσων αποθήκευσης ενέργειας υπό τις χειρότερες συνθήκες, δηλαδή μέγιστης παραγωγής ενέργειας με μηδενικό φορτίο.

#### **4.1.2. Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (ΜΓΠ)**

Ο ΜΓΠ είναι μια τεχνική βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων όπου η αντικειμενική συνάρτηση ή οι περιορισμοί δεν είναι γραμμικοί. Σε αντίθεση με τον ΓΠ, ο οποίος έχει μόνο γραμμικές σχέσεις, ο ΜΓΠ επιτρέπει πιο πολύπλοκες σχέσεις που μπορεί να περιλαμβάνουν μη γραμμικές συναρτήσεις, όπως τετραγωνικές, εκθετικές, λογαριθμικές ή άλλες μη γραμμικές μορφές. Η επίλυση προβλημάτων ΜΓΠ είναι γενικά πιο προκλητική από την επίλυση προβλημάτων ΓΠ, καθώς η παρουσία μη γραμμικών συναρτήσεων συνήθως οδηγεί στην έλλειψη αναλυτικών λύσεων.

Ο ΜΓΠ χρησιμοποιείται στο άρθρο [75] με σκοπό την εύρεση μιας εφικτής βέλτιστης λύσης, σε τουλάχιστον τοπικό επίπεδο, για το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος. Στο άρθρο [70] παρουσιάζει μια μέθοδο η οποία με την απόζευξη του ΜΓΠ εγγυάται μια σχεδόν βέλτιστη λύση για το πρόβλημα ελαχιστοποίησης απωλειών ενέργειας. Στο [65] γίνεται χρήση ΜΓΠ δύο σταδίων για να μεγιστοποιηθεί το όφελος από τη διατήρηση μειωμένης τάσης σε σύστημα με ΜΤΕΦ έτσι ώστε να υπάρχει συντονισμός μεταξύ των ελεγχόμενων στοιχείων σε διαφορετικά επίπεδα τάσης για την αποφυγή παρουσίας προβλημάτων τάσης στους καταναλωτές. Για την ελαχιστοποίηση της απορριπτόμενης ενέργειας στο [119] το πρόβλημα της βελτιστοποίησης λύνεται με ΜΓΠ και συγκεκριμένα μη-κυρτού, στατικού και με συνεχείς μεταβλητές. Στο [90] γίνεται χρήση ΜΓΠ για την εξισορρόπηση του τοπικού συστήματος ενέργειας με τη χρήση ανταγωνιστικών κανόνων αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το [41] χρησιμοποιεί ΜΓΠ μικτών ακεραίων για τη λύση του προβλήματος των αποσυνδέσεων των ΗΟ κατά τη διάρκεια της φόρτισης, ενώ στο [60] χρησιμοποιείται για να βρεθούν τα βέλτιστα προφίλ φόρτισης ΗΟ αλλά και τα όρια ενεργού και άεργου ισχύος. Στο άρθρο [110] με τον ΜΓΠ βρίσκεται η ελάχιστη μείωση της ενέργειας που εγχέεται από τις γεννήτριες στο δίκτυο, με σκοπό τον έλεγχο τάσης. Οι συγγραφείς του άρθρου [76] προτείνουν μια μέθοδο με χρήση ΜΓΠ για τη βέλτιστη διαχείριση μετατοπιζόμενων φορτίων σε ένα σύστημα βέλτιστης ροής ισχύος πολλαπλών περιόδων.

#### 4.1.3. Τετραγωνικός προγραμματισμός (ΤΠ)

Ο ΤΠ είναι ένας τύπος ΜΓΠ όπου η συνάρτηση στόχου είναι τετραγωνική και οι περιορισμοί είναι γραμμικοί. Στον ΤΠ, η συνάρτηση στόχου περιλαμβάνει όρους που είναι τετραγωνικοί στις μεταβλητές ελέγχου.

Στο [28] γίνεται χρήση επαναληπτικού ΤΠ για να λυθεί το μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο αναζητεί μια λύση ελαχιστοποίησης του κόστους φόρτισης ΗΟ για όλες τις φάσεις, κόμβους και χρονικά σημεία, ενώ η ίδια μέθοδος χρησιμοποιείται στο [33] με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης ενός ασύμμετρα φορτισμένου τριφασικού δικτύου τεσσάρων αγωγών με μεγάλη διείσδυση ΦΒ και τέλος στο [88] για ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος και κόστους παραγωγής. Στο άρθρο [42] οι συγγραφείς χρησιμοποιούν ΤΠ με στόχο τη χρήση της άεργου ισχύος, από τις μονάδες διανεμημένης παραγωγής, για εξισορρόπηση της τάσης στους ζυγούς. Στο [67] γίνεται χρήση τετραγωνικά περιορισμένου προγραμματισμού μικτών ακεραίων για την βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενός ενεργού δικτύου διανομής λαμβάνοντας υπόψη και αβεβαιότητες. Στο [45] ο ΤΠ χρησιμοποιείται για να βρεθεί μια βέλτιστη καμπύλη  $Q(P)$  έτσι ώστε η τιμή της τάσης να διατηρείται εντός ορίων όλο τον χρόνο με την ελάχιστη χρήση άεργου ισχύος, ενώ στο [81] στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των αλλαγών στις μεταβλητές ελέγχου διατηρώντας ταυτόχρονα την τάση εντός ορίων. Στο άρθρο [111] χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής βελτιστοποίησης ο οποίος βασίζεται σε ΤΠ μικτών ακεραίων με σκοπό την ελαχιστοποίηση εισαγωγής/εξαγωγής ενέργειας από το δίκτυο προς όφελος καταναλωτών/δικτύου. Οι απώλειες ενέργειας ελαχιστοποιούνται στο [18], [17] με χρήση ΤΠ ελέγχοντας την ισχύ των φορτιστών ΗΟ και ελέγχοντας την χωρητικότητα των μπαταριών των ΗΟ, αντίστοιχα.



## 4.2 ΕΥΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 4.2.1. Γενετικός αλγόριθμος (ΓΑ)

Ο ΓΑ είναι ευρετική μέθοδος βελτιστοποίησης που εμπνέεται από τη φυσική επιλογή. Ξεκινά με ένα τυχαίο πλήθος πιθανών λύσεων και η ταξινόμηση του κρίνεται ανάλογα με την επίδοση του κατά τη λύση του προβλήματος. Η επιλογή καθορίζει ποιες λύσεις θα συνεισφέρουν στην επόμενη γενιά ενώ η διασταύρωση των λύσεων ανταλλάσσει γενετικές πληροφορίες μεταξύ τους. Η μετάλλαξη εισάγει τυχαίες αλλαγές για να διατηρήσει την ποικιλία. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέσα από πολλές γενιές. Οι ΓΑ είναι ευέλικτοι και αποτελεσματικοί για πολύπλοκα προβλήματα και χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς, όπως ο συνδυαστικός προγραμματισμός και η μηχανική μάθηση. Η ικανότητά τους να εξερευνούν ποικίλες λύσεις τους καθιστά χρήσιμους σε μεγάλους χώρους λύσεων.

Ένας ΓΑ συναντάται στο άρθρο [27] με σκοπό να βρεθεί η τοποθεσία, το μέγεθος και η βέλτιστη ροή ισχύος, σε ένα δίκτυο ΜΤ, για πολλές μονάδες μπαταριών αποθήκευσης ενέργειας. Ενώ στο [86] ο ΓΑ χρησιμοποιείται σε ένα δίκτυο για να βρεθεί σε ποια φάση είναι ιδανικότερο να γίνει η σύνδεση ενός σπιτιού για να αποφευχθεί η ανισορροπία στις τάσεις των τριών φάσεων.

### 4.2.2. Πρακτικοί Ευρετικοί αλγόριθμοι (ΕΑ)

Ένας ΕΑ είναι μια προσέγγιση στην επίλυση προβλημάτων ή την βελτιστοποίηση που χρησιμοποιεί πρακτικές, ευφυείς στρατηγικές αντί να αναζητά απαραίτητα την βέλτιστη λύση. Οι ΕΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν μια εξαντλητική αναζήτηση της βέλτιστης λύσης είναι υπολογιστικά δαπανηρή ή ακατόρθωτη. Οπότε ο ΕΑ ψάχνει μια αρκετά ικανοποιητική λύση μέσα σε ένα λογικό χρονικό πλαίσιο.

Ένας ΕΑ κεντρικού ελέγχου χρησιμοποιείται στο [41] για να βρεθούν ο βέλτιστες παράμετροι στα σημεία φόρτισης ΗΟ έτσι ώστε να περιοριστούν τόσο τα προβλήματα τάσης αλλά και θερμότητας στα δίκτυα ΧΤ. Στο [63] μελετάται η ευελιξία από την πλευρά της ζήτησης με ευρετικό τρόπο παρουσιάζοντας θετικά αποτελέσματα για την εφαρμογή των μεθόδων, σε ένα δίκτυο ΧΤ, δείχνοντας ότι η ποιότητα ισχύος βελτιώνεται αλλά και το κόστος ενέργειας μειώνεται. Στο άρθρο [125] οι συγγραφείς εισηγούνται μια μέθοδο με χρήση ΕΑ για την εκτίμηση των θέσεων μετατοπιζόμενων φορτίων και ακολούθως λύνει προβλήματα διαχείρισης του συστήματος διανομής με ΜΓΠ μικτών ακεραίων. Στο [47] προτείνεται μια ευρετική μέθοδος που βασίζεται στην ανάλυση ευαισθησίας τάσης, με σκοπό την παράκαμψη της συνδυαστικής φύσης του προβλήματος χωροθέτησης, για την επιλογή των πιο αποτελεσματικών θέσεων στο δίκτυο για την εγκατάσταση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας.

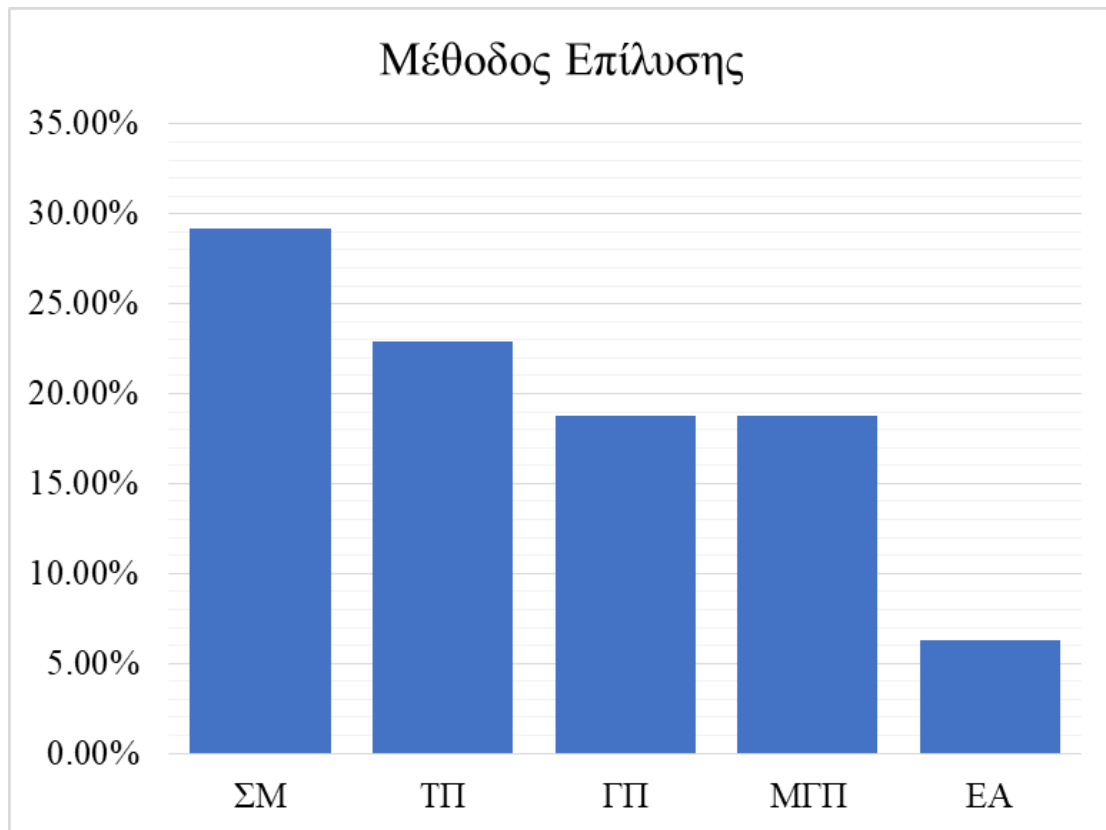
## 4.3 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ (ΣΜ)

Οι ΣΜ είναι αλγόριθμοι ή τεχνικές που ενσωματώνουν τυχαιότητα ή πιθανότητα στην προσέγγισή τους για την εύρεση λύσεων σε προβλήματα. Αυτές οι μέθοδοι είναι ιδιαίτερα χρήσιμες όταν υπάρχει αβεβαιότητα, που όπως φάνηκε και από τη βιβλιογραφία όταν το πρόβλημα ασχολείται με μονάδες ΦΒ ή με φόρτιση ΗΟ τότε παρατηρούνται αβεβαιότητες

όπως ηλιοφάνεια/καιρικές συνθήκες αλλά και διαστήματα φόρτισης/προγραμματισμού, αντίστοιχα.

Μια μέθοδος που παρουσιάζεται συχνά είναι η ανάλυση Μόντε Κάρλο (ΜΚ). Η ανάλυση ΜΚ είναι μια υπολογιστική τεχνική που χρησιμοποιεί τυχαία δείγματα και στατιστική μοντελοποίηση για να αναλύσει την επίδραση της αβεβαιότητας και της μεταβλητότητας σε ένα σύστημα. Το όνομά της προέρχεται από το καζίνο του Μόντε Κάρλο στο Μονακό, γνωστό για τα παιχνίδια τύχης του, αντικατοπτρίζοντας την τυχειότητα της μεθόδου.

Μια ΣΜ βελτιστοποίησης παρουσιάζεται στο άρθρο [102]. Κατά τον επιχειρησιακό σχεδιασμό, λοιπόν, εισάγονται στο στοχαστικό πρόγραμμα αποτελέσματα πρόβλεψης πολλαπλών σεναρίων ΦΒ και προφίλ φορτίου με στόχο την ελαχιστοποίηση του καθημερινού κόστους λειτουργίας οικιακών συσκευών. Επίσης στο [77] διαμορφώνεται ένα πρόβλημα στοχαστικής βελτιστοποίησης για τη βέλτιστη τοποθέτηση των συσκευών αναδιαμόρφωσης τάσης. Στο άρθρο [96], [89] γίνεται ανάλυση ΜΚ για να εξεταστούν οι αβεβαιότητες οι οποίες προκύπτουν από το μέγεθος/τοποθεσία/κατανάλωση/παραγωγή των ΦΒ συστημάτων, ΗΟ και αντλιών θερμότητας. Στα [98], [103], [108] γίνεται ξανά μια ανάλυση ΜΚ πάνω σε ένα δίκτυο του Ηνωμένου Βασιλείου για να εξεταστεί η απόδοση διαφορετικών μεθόδων ελέγχου λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα στην κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο αλλά και της παραγωγής από τις ΦΒ μονάδες. Το ίδιο συμβαίνει και στο [41], [113] λαμβάνοντας υπόψη όμως την αβεβαιότητα από την κατανάλωση των ΗΟ αντί την παραγωγή των ΦΒ. Στο [63] η εξομοίωση ΜΚ γίνεται για να εξεταστεί η στοχαστική φύση των διανεμημένων ενεργειακών πόρων αλλά και της ευελιξίας από τη πλευρά της ζήτησης των καταναλωτών ενώ στο [48] για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων από τη μη ελεγχόμενη φόρτιση ΗΟ χρησιμοποιώντας 1000 ημερήσιες προσομοιώσεις. Οι συγγραφείς του [55] χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση με ΜΚ προσπαθούν να μετριάσουν τις αρνητικές επιπτώσεις από τα σφάλμα πρόβλεψης παραγωγής/κατανάλωσης. Στο [97] γίνεται ανάλυση ΜΚ για να εξεταστεί η απόδοση του δικτύου σε διαφορετικές διεισδύσεις ΦΒ μονάδων.



**Σχήμα 4.1:** Μέθοδοι επίλυσης των άρθρων της βιβλιογραφίας που μελετήθηκαν.

**Πίνακας 4.1:** Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος και μέθοδοι ενσωμάτωσης στο δίκτυο

Πηγή	Μέθοδος επίλυσης	Μέθοδος ενσωμάτωσης
[27]	ΓΑ	από πάνω προς τα κάτω
[86]	ΓΑ	από πάνω προς τα κάτω
[107]	ΓΠ	Λειτουργία από ΔΔΔ ισχυρός προγραμματιστής ελεγκτής πραγματικού χρόνου
[24]	ΓΠ	Μικτή
[113]	ΓΠ ΣΜ	Διαχειρίζεται από ΔΔΔ από πάνω προς τα κάτω Βασισμένο σε κανόνες
[71]	ΓΠ	με βάση το νοικοκυριό
[26]	ΓΠ	από κάτω προς τα πάνω βασισμένο σε αλγόριθμο
[109]	ΓΠ	από πάνω προς τα κάτω
[87]	ΓΠ	από κάτω προς τα πάνω

**Πίνακας 4.1: Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος και μέθοδοι ενσωμάτωσης στο δίκτυο (συνέχεια)**

Πηγή	Μέθοδος επίλυσης	Μέθοδος ενσωμάτωσης
[104]	ΓΠ	από πάνω προς τα κάτω
[19]	ΓΠ	Μικτή Βασισμένο σε πράκτορα από κάτω προς τα πάνω Markov Chain
[69]	ΓΠ	από πάνω προς τα κάτω
[118]	ΓΠ	από κάτω προς τα πάνω
[51]	ΓΠ	Βασισμένο σε πράκτορα
[29]	ΓΠ	από πάνω προς τα κάτω
[125]	ΕΑ	από κάτω προς τα πάνω συντονισμός SL
[47]	ΕΑ	από πάνω προς τα κάτω
[75]	ΜΓΠ	προφίλ φόρτισης βάσει του χρήστη συμμετοχή πελατών
[70]	ΜΓΠ	από κάτω προς τα πάνω
[65]	ΜΓΠ	Διαχειρίζεται από ΔΔΔ από πάνω προς τα κάτω
[119]	ΜΓΠ	από πάνω προς τα κάτω
[90]	ΜΓΠ	με βάση την αγορά
[110]	ΜΓΠ	από πάνω προς τα κάτω
[76]	ΜΓΠ	Με γνώμονα τον πελάτη ΔΔΔ συνεργασία με τον πελάτη βασισμένο σε αλγόριθμο από πάνω προς τα κάτω
[60]	ΜΓΠ	Λειτουργία/συντονισμός από ΔΔΔ
[41]	ΜΓΠ ΕΑ ΣΜ	από πάνω προς τα κάτω Διαχειρίζεται από ΔΔΔ Monte Carlo
[57]	Μικτών ακεραίων	Βασισμένο σε πράκτορα από κάτω προς τα πάνω Markov Chain Monte Carlo
[85]	Πρακτικές μέθοδοι	από πάνω προς τα κάτω
[25]	Πρακτικές μέθοδοι	από πάνω προς τα κάτω

**Πίνακας 4.1: Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος και μέθοδοι ενσωμάτωσης στο δίκτυο (συνέχεια)**

Πηγή	Μέθοδος επίλυσης	Μέθοδος ενσωμάτωσης
[105]	Πρακτικές μέθοδοι	από πάνω προς τα κάτω
[96]	ΣΜ	Διαχειρίζεται από ΔΔΔ
[98]	ΣΜ	Διαχειρίζεται από ΔΔΔ Με βάση το χρόνο
[103]	ΣΜ	Διαχειρίζεται από ΔΔΔ Βασισμένο σε κανόνες
[63]	ΣΜ ΕΑ	Βασισμένο σε κανόνες Οικονομικό κίνητρο
[48]	ΣΜ	Συμμετοχή πελατών με βάση την αγορά
[55]	ΣΜ	από πάνω προς τα κάτω
[27]	ΣΜ	από κάτω προς τα πάνω
[116]	ΣΜ	Βασισμένο σε κίνητρα
[77]	ΣΜ	από πάνω προς τα κάτω
[89]	ΣΜ	Διαχειρίζεται από ΔΔΔ
[108]	ΣΜ	από πάνω προς τα κάτω
[97]	ΣΜ	από πάνω προς τα κάτω
[57]	ΣΜ	Βασισμένο σε πράκτορα
[102]	ΣΜ	Με βάση τα δεδομένα
[28]	ΤΠ	Με γνώμονα τον πελάτη
[42]	ΤΠ	Με γνώμονα τον πελάτη
[33]	ΤΠ	Διαχειρίζεται από ΔΔΔ από κάτω προς τα πάνω βασισμένο σε αλγόριθμο
[67]	ΤΠ	από κάτω προς τα πάνω
[45]	ΤΠ	από πάνω προς τα κάτω με βάση τα ιστορικά δεδομένα
[111]	ΤΠ	από κάτω προς τα πάνω βασισμένο σε αλγόριθμο Με γνώμονα τον πελάτη

**Πίνακας 4.1: Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος και μέθοδοι ενσωμάτωσης στο δίκτυο (συνέχεια)**

Πηγή	Μέθοδος επίλυσης	Μέθοδος ενσωμάτωσης
[81]	ΤΠ	από πάνω προς τα κάτω ελεγκτής πραγματικού χρόνου
[18]	ΤΠ	από κάτω προς τα πάνω βασισμένο σε αλγόριθμο
[68]	ΤΠ	από πάνω προς τα κάτω
[17]	ΤΠ	από πάνω προς τα κάτω
[74]	ΤΠ	από πάνω προς τα κάτω
[88]	ΤΠ	από πάνω προς τα κάτω βασισμένο σε αλγόριθμο
[82]	-	από πάνω προς τα κάτω
[38]	-	από πάνω προς τα κάτω Με βάση το χρόνο

#### 4.4 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζεται, για κάθε μία από τις εργασίες της βιβλιογραφίας που μελετήθηκε, η μέθοδος επίλυσης του προβλήματος και η μέθοδος ενσωμάτωσης στο δίκτυο. Για κάθε εργασία, ο Πίνακας 4.1 περιλαμβάνει την ακόλουθη πληροφορία:

- Πηγή, δηλαδή αριθμός της εργασίας όπως εμφανίζεται στο Κεφάλαιο 7 της βιβλιογραφίας.
- Μέθοδος επίλυσης, δηλαδή ποιος τρόπος χρησιμοποιείται από τους συγγραφείς για την επίτευξη της αντικειμενικής συνάρτησης.
- Μέθοδος ενσωμάτωσης, δηλαδή με ποιον τρόπο υλοποιείται η λύση του προβλήματος στο δίκτυο.

Από τον Πίνακα 4.1 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Παρατηρείται αρχικά ότι η πιο συχνή μέθοδος επίλυσης είναι οι στοχαστικές μέθοδοι. Όπως φαίνεται συμπεραίνεται από τον πιο πάνω πίνακα οι στοχαστικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται περίπου στο 30% στις εργασίες που μελετήθηκαν. Ακολουθεί η μέθοδος με χρήση τετραγωνικού προγραμματισμού.
- Τέλος παρατηρείται ότι η μέθοδος ενσωμάτωσης στις περισσότερες εργασίες βασίζεται στον έλεγχο της λειτουργίας του δικτύου από τον ΔΔΔ, με τον έλεγχο να γίνεται από πάνω προς τα κάτω. Ενώ στην αντίθετη περίπτωση, όπου γίνεται ενσωμάτωση της μεθόδου από κάτω προς τα πάνω, παρατηρείται ότι οι περιπτώσεις είναι περίπου μισές. Στην δεύτερη περίπτωση η ενσωμάτωση βασίζεται πρώτα στην συμπεριφορά των καταναλωτών για τη λήψη αποφάσεων.

Πίνακας 4.2: Συνεισφορά των άρθρων της βιβλιογραφίας που μελετήθηκαν

Πηγή	Ημερομηνία δημοσίευσης	Συμβολή Άρθρου
[79]	17/11/2003	Παρουσιάζει έναν αλγόριθμο ροής ισχύος, βασισμένο στο BFS, για τριφασικά ακτινωτά δίκτυα τεσσάρων αγωγών με ουδέτερο και πολλαπλή γείωση. Η μέθοδος ροής φορτίου που προτείνεται επιτρέπει στον χρήστη να μελετήσει τις συνέπειες των ουδέτερων και γείωσης στη λειτουργία πραγματικών δικτύων διανομής. Το δίκτυο 5 επί 5 που παρουσιάζεται μπορεί να ενσωματωθεί σε ασθενώς δικτυωτό δίκτυο διανομής με ΦΒ.
[17]	24/04/2009	Προτείνει συντονισμένο έλεγχο φόρτισης HO για την ελαχιστοποίηση των απωλειών και μεγιστοποίηση του συντελεστή φορτίου σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση HO.
[18]	18/12/2009	Χρήση ιστορικών δεδομένων για τα μοντέλα των φορτίων και στοχαστικό προγραμματισμό για να παρουσιάσει το σφάλμα στις προβλέψεις (που προκαλεί απώλειες). Μπορεί να αποφευχθεί η φόρτιση τα διαστήματα μέγιστης ζήτησης εφόσον τα οικιακά φορτία είναι γνωστά (ιστορικά) αλλά λιγότερες απώλειες.
[19]	28/09/2010	Μέθοδος για συντονισμένο έλεγχο φόρτισης HO για την αντιμετώπιση των αποκλίσεων τάσης στο δίκτυο. Γίνεται χρήση ΦΒ, ΑΓ, ΑΘ.
[20]	10/12/2010	Χρήση droop-based AEI για αποφυγή υπερτάσεων σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ. Προτείνει μέθοδο με AEI για ίση απορριπτόμενη ενέργεια μεταξύ των αντιστροφών.
[21]	12/06/2011	Εξετάζει τη βιωσιμότητα μιας λύσης για το πρόβλημα της υπέρτασης από μεγάλη χρήση ΦΒ συστημάτων. Ελέγχει αν μπορεί μια τοπική κοινότητα να έχει εγκατεστημένα μόνο όσα ΦΒ χρειάζεται για την κάλυψη των αναγκών της και κατά πόσο χρειάζεται η AEI από τους αντιστροφείς.
[22]	23/06/2011	Παρουσιάζει πως η φόρτιση HO μπορεί να βελτιστοποιηθεί για να γίνεται σύμφωνα με τους περιορισμούς του δικτύου χωρίς να εμποδίζει τα οικιακά φορτία.
[23]	07/12/2011	Αρχικά εξετάζει τις τυπικές μεθόδους άεργου ισχύος που προτείνονται από τους κώδικες δικτύου και ακολούθως παρουσιάζει μια νέα μέθοδο για την αύξηση του επιπέδου διείσδυσης ΦΒ, βασισμένη στις μεθόδους cosφ(P) και Q(U).
[80]	31/01/2012	Εξετάζει το πρόβλημα της σταθεροποίησης τάσης σε γεωγραφικά μικρές κοινότητες με υψηλή διείσδυση ΦΒ.
[24]	09/04/2012	Παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα της συντονισμένης φόρτισης HO σε δίκτυο XT, προτείνοντας τοπικό έλεγχο όπου ο φορτιστής δίνει τη μέγιστη δυνατή ισχύ στο HO κρατώντας την τάση εντός ορίων. Γίνεται επίσης σύγκριση αποτελεσμάτων με κεντρικό έλεγχο.
[25]	06/06/2012	Τεχνική και οικονομική μελέτη στρατηγικών για αύξηση χωρητικότητας ΦΒ μονάδων. Χρήση μεθόδων με έλεγχο αντιστροφεία, MTYΦ στον ΜΣ και ενίσχυση δικτύου.
[26]	25/07/2012	Περιγραφή των ρίσκων όταν γίνεται αποκοπή των καταναμημένων ενεργειακών πόρων από το δίκτυο όταν παρουσιάζεται υπέρταση. Προτείνει τοπικό και κεντρικό έλεγχο για την AEI και την ελαχιστοποίηση της.
[27]	18/09/2012	Μέθοδος που συμβάλει στην απόφαση για εγκατάσταση MAE με βάση μια ανάλυση κόστους.
[81]	19/02/2013	Κεντρικός έλεγχος με MPC για έλεγχο τάσης στο δίκτυο διανομής. Ο ελεγκτής συντονίζει την ισχύ εξόδου στις DG και με τη χρήση MTYΦ οι τάσεις επαναφέρονται εντός ορίων.
[82]	28/03/2013	Δείχνει πως το φορτίο από τα HO μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενεργά για ενίσχυση τάσης σε δίκτυα με προβλήματα τάσης όπου χρησιμοποιούνται ΦΒ μονάδες.
[83]	06/08/2013	Προτείνει μια μέθοδο για την χρήση των δημόσιων φορτιστών HO ως MAE για τη ρύθμιση τάσης σε περιοχές με υψηλή διείσδυση ΦΒ
[28]	05/09/2013	Παρουσιάζει μια νέα προσέγγιση στο πρόβλημα της φόρτισης HO. Χρήση μεθόδου με τριφασική ανισόρροπη ροή φορτίου η οποία μοντελοποιεί με ακρίβεια τις ανισορροπίες που υπάρχουν στα ΔΔΧΤ. Επιτυγχάνει αποφυγή υπερφορτώσεων. Πραγματοποιεί πολυπεριοδικές βελτιστοποιήσεις για να ελαχιστοποιήσει το κόστος φόρτισης HO. Παρέχει πλεονέκτημα τόσο για χρήστες όσο και για ΔΔΔ. Γίνεται διαχείριση αβεβαιοτήτων, προερχόμενες από χρήστες, με κυλιόμενη βελτιστοποίηση.
[84]	16/09/2013	Προτείνει μια νέα ισχυρή και αποδοτική προσέγγιση με σκοπό της αντιμετώπισης της υπέρτασης που προκαλείται από μονάδες ΦΒ σε δίκτυα XT. Χρήση καταναμημένων και τοπικών αλγορίθμων για τη διαχείριση της παραγωγής και αποφυγή υπερτάσεων.
[29]	26/09/2013	Χρήση αποκεντρωμένων MAE για δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ. Γίνεται παρουσίαση αποτελεσμάτων εφαρμόσιμα σε δίκτυα XT και χρήση μεθόδου ανάλυση ευαισθησίας τάσης.

Πίνακας 4.2: συνεισφορά των άρθρων της βιβλιογραφίας που μελετήθηκαν (συνέχεια)

Πηγή	Ημερομηνία δημοσίευσης	Συμβολή Άρθρου
[85]	20/10/2013	Προτείνει ευέλικτο έλεγχο για συντονισμένη - συνεργατική λειτουργία ΔΕΠ που χρησιμοποιούν αντιστροφείς για περιορισμό προβλημάτων τάσης. Γίνεται συνεργασία μονοφασικών με τριφασικών αντιστροφέων με χρήση κεντρικού ελεγκτή.
[30]	22/01/2014	Μέθοδος για διαχείριση δικτύων με υψηλή διείσδυση ΦΒ, με χρήση OID ορισμένο ως ημιορισμένο πρόγραμμα.
[31]	06/02/2014	Παρουσιάζει την προοπτική που έχουν τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ για τον περιορισμό υπερτάσεων. Χρήση διαφόρων μεθόδων ελέγχου και ΜΑΕ.
[32]	04/03/2014	Περιγραφή συνδυασμού κεντρικού και τοπικού ελέγχου για έλεγχο τάσης στους ΦΒ αντιστροφείς σε μη ισορροπημένα τριφασικά δίκτυα τεσσάρων αγωγών.
[86]	02/04/2014	Προτείνει μέθοδο για μεταφορά των οικιακών φορτίων μεταξύ των φάσεων κάνοντας χρήση κεντρικού ελεγκτή και στατικού διακόπτη. Υπολογίζει ποια φορτία θα μεταφερθούν προσπαθώντας να κρατήσει τις μεταφορές στο ελάχιστο.
[87]	02/04/2014	Προτείνει νέα μέθοδο βασισμένη σε σενάρια για απόφαση της ελάχιστης ποσότητας συσκευών αποθήκευσης ενέργειας που πρέπει να εγκατασταθούν για αποφυγή υπερτάσεων σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ.
[33]	23/04/2014	Περιεκτική μελέτη στον έλεγχο αντιστροφέων ΦΒ για τη βελτίωση της απόδοσης τους σε μη ισορροπημένα τριφασικά δίκτυα τεσσάρων αγωγών με υψηλή διείσδυση ΦΒ. Εισήγηση στρατηγικής για έλεγχο ΦΒ βασισμένη στον ΕΑΙ και ΑΕΙ σε μονοφασικούς αντιστροφείς.
[88]	21/05/2014	Προτείνει μια περιεκτική μέθοδο ελέγχου ΦΒ συστημάτων βασισμένη τόσο στον έλεγχο άεργου ισχύος όσο και στην ΑΕΙ σε ανομοιόμορφα κατανεμημένα ΦΒ τα οποία προκαλούν ανισορροπία σε τριφασικό δίκτυο.
[34]	18/06/2014	Παρουσιάζει μια τεχνική και οικονομική ανάλυση για αυτόνομο έλεγχο τάσης σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ.
[35]	13/08/2014	Προτείνει μια στρατηγική ελέγχου για παροχή υποστήριξης VAr υπό διαφορετικές συνθήκες που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας από ΦΒ χρησιμοποιώντας τρεις τρόπους ελέγχου.
[89]	15/08/2014	Νέα πιθανοτική μέθοδος για την εκτίμηση των επιπτώσεων των αντλιών θερμότητας στο δίκτυο διανομής.
[90]	04/12/2014	Νέα προσέγγιση για τη διαχείριση δικτύων ΧΤ λαμβάνοντας υπόψη τοπικές πηγές ενέργειας και τους νομικούς κανόνες της αγοράς.
[91]	18/12/2014	Ιεραρχικός εποπτικός έλεγχος για τον έλεγχο και συντονισμό των φορτίων των ΗΟ και ΑΘ με κατανεμημένο τρόπο.
[36]	19/01/2015	Χρησιμοποιεί μικροαντιστροφείς σε παράλληλη διάταξη για να εξετάσει εφαρμογές με ΑΕΙ σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ.
[92]	10/03/2015	Κεντρικός συντονισμένος έλεγχος για φόρτιση ΗΟ για τον έλεγχο της ευελιξίας που προσφέρει η μέθοδος τριφασικών φορτιστών και τριφασικών ΦΒ μονάδων.
[93]	18/03/2015	Προτείνει έναν κατανεμημένο έλεγχο, για δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ, ο οποίος χρησιμοποιεί ελάχιστη πληροφορία μεταξύ των ελεγκτών.
[37]	06/05/2015	Αξιολόγηση της σημασίας του σχεδιασμού του αντιστροφέα σε ΜΑΕ μπαταριών. Για διαφορετικούς σχεδιασμούς, μελετώνται οι αντισταθμίσεις μεταξύ διαφορετικών στόχων: ρύθμιση τάσης στα τερματικά σύνδεσης εσωτερικού, συνολική αιχμή. Γίνεται χρήση αντιστροφέα με δυνατότητα διαφασικής μεταφοράς ισχύος και ΕΑΙ.
[94]	25/05/2015	Αναπτύσσει έναν αλγόριθμο για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης/παροχής αποθηκευμένης ενέργειας και παράλληλα μετριάει την αύξηση του ρεύματος στον ουδέτερο. Επίσης αναπτύσσει μια στρατηγική φόρτισης/εκφόρτισης χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο εξισορρόπησης ισχύος για να παρέχει ένα ελεγχόμενο αποτέλεσμα μετριασμού υπό μεταβλητό φορτίο και ανισορροπία ΦΒ.
[95]	15/06/2015	Παρουσιάζει τις επιπτώσεις που προκύπτουν από την υποστήριξη τάσης με άεργο ισχύ από τους φορτιστές ΗΟ, σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΗΟ.
[38]	25/06/2015	Παρουσιάζει μια τεχνική και οικονομική εκτίμηση για τα πιθανά οφέλη της χρήσης ΜΤΥΦ για την αύξηση των ΦΒ στο δίκτυο.



Πίνακας 4.2: συνεισφορά των άρθρων της βιβλιογραφίας που μελετήθηκαν (συνέχεια)

Πηγή	Ημερομηνία δημοσίευσης	Συμβολή Άρθρου
[96]	13/07/2015	Πιθανοτική εκτίμηση επιπτώσεων των τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα σε τριφασικό δίκτυο τεσσάρων αγωγών με χρήση Monte Carlo. Γίνεται μια ανάλυση κατάταξης για να προσδιορίσει ποιες τεχνολογίες θα προκαλέσουν προβλήματα στην παροχή κατά την μικρότερη διείσδυση και έτσι να καθορίσει εκ των προτέρων την καλύτερη μέθοδο αντιμετώπισης, επίσης πραγματοποιήσε ανάλυση συσχέτισης για να εξετάσει γιατί ορισμένες παροχές εμφανίζουν προβλήματα νωρίτερα από άλλες. Με σκοπό να βοηθήσει τους ΔΔΔ στην εκτίμηση της αντοχής τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα στο δίκτυο.
[39]	29/07/2015	Μέθοδος με χρήση MAE για ρύθμιση τάσης σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ. Χρησιμοποιείται συντονισμένη (κατανεμημένη και τοπική) μέθοδος για έλεγχο συσκευών και ρύθμιση τάσης αξιοποιώντας τη χωρητικότητα των συσκευών κατά τη καθημερινή λειτουργία.
[40]	01/09/2015	Μελετά την ενσωμάτωση των ΦΒ συστημάτων στο υφιστάμενο ΔΔΧΤ με στόχο την εύρεση λύσεων για τον πρόβλημα της υπέρτασης.
[41]	03/09/2015	Προτείνει κεντρικό έλεγχο με χρήση λιγοστών δεδομένων για έλεγχο σημείων φόρτισης ΗΟ για περιορισμό προβλημάτων τάσης και υπερφόρτωσης. Γίνεται σε τριφασικό δίκτυο και μονοφασικό φορτίο.
[42]	07/09/2015	Δημιουργία μεθόδου για βέλτιστη ρύθμιση τάσεων των διαύλων σε ανισόρροπα δίκτυα διανομής με χρήση προγράμματος κυρτής τετραγωνικής βελτιστοποίησης με χρήση αλγόριθμου βασισμένου στο ADMM.
[97]	05/10/2015	Προτείνει τρεις μεθόδους ελέγχου με χρήση ΜΤΥΦ για την αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι ΜΣ με ΜΤΥΦ.
[98]	04/11/2015	Προτείνει τρεις μεθόδους για έλεγχο τάσης σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ με χρήση ΜΤΥΦ.
[99]	03/12/2015	Παρουσιάζει έναν αλγόριθμο με βηματικό έλεγχο με βάση την πτώση τάσης για την αντιμετώπιση των υπερτάσεων κάνοντας απόρριψης της περιττής ενεργής ισχύος σε ένα δίκτυο με ΑΓ.
[100]	01/03/2016	Προτείνει δύο νέες μεθόδους με τεχνικές αποζημίωσης έργου ισχύος για αντιμετώπιση των υπερτάσεων σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ συστημάτων.
[44]	01/03/2016	Προτείνει έναν επαναληπτικό αλγόριθμο για αντιμετώπιση των υπερτάσεων σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ συστημάτων. Ο αλγόριθμος παρουσιάζει θετικά αποτελέσματα με γρήγορη σύγκλιση.
[101]	14/04/2016	Παρουσίαση αποτελεσμάτων μετά από ερευνά για την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των κοινών ΕΑΙ με προαιρετική ΑΕΙ.
[45]	24/05/2016	Νέα μέθοδος βελτιστοποίησης για τον σχεδιασμό τοπικών Q(P) καμπυλών για ΦΒ μονάδες με χρήση ιστορικών δεδομένων. Οι καμπύλες σχεδιάζονται για να κρατούν την τάση εντός ορίων με όσο το δυνατόν λιγότερη άεργο ισχύ. Για τριφασικό δίκτυο τεσσάρων αγωγών. Κάνει χρήση μόνο μετρήσεων τάσης και παραγωγής ΦΒ χωρίς να απαιτεί συλλογή προσωπικών δεδομένων.
[102]	17/06/2016	Προτείνει ένα πλαίσιο διαχείρισης ενέργειας μεταξύ ζήτησης και παραγωγής για περιεκτική υλοποίηση των κατανεμημένων οικιακών ΦΒ συστημάτων. Κάθε σύστημα διαχείρισης ενέργειας λειτουργεί με βάση τις προβλέψεις, το επιχειρησιακό σχέδιο και τα στάδια ελέγχου.
[103]	18/07/2016	Προτείνει μια μέθοδο απομακρυσμένης εκτίμησης τάσης στους κόμβους με σκοπό να αποκαταστήσει την ανάγκη για απομακρυσμένο έλεγχο και συνεπώς την επένδυση στις υποδομές χωρίς να επηρεάζει την απόδοση. Αρχικά με μια μέθοδο που προτείνει μπορεί να αναγνωρίζει τον αριθμό των καταναλωτών ανά φάση και να δημιουργεί μια παροχή σπού χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των τάσεων βασισμένο μόνο σε τοπικές μετρήσεις του ΜΣ.
[46]	10/08/2016	Εκτίμηση της απόδοσης των ΡΤ μέσω ενός συνόλου τεχνικών παραμέτρων που σχετίζονται με την ποιότητα ισχύος. Μελέτη για την βέλτιστη τοποθέτηση των IVR και των απαιτούμενων αλλαγών θέσης.
[47]	25/08/2016	Νέα ευρετική μέθοδος για τον σχεδιασμό του αριθμού, της τοποθεσίας και του μεγέθους των MAE για αποφυγή υπερτάσεων και υποτάσεων.
[104]	15/09/2016	Νέα μέθοδος ελέγχου για διαχείριση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας για αποφυγή υπερτάσεων με χρήση δυναμικού σημείου ρύθμισης.
[48]	29/09/2016	Εξετάζει την εισαγωγή υπολογιστών υψηλής απόδοσης για να επιταχύνει την πιθανοτική επίπτωση και τον έλεγχο που γίνεται σε ΔΔΧΤ με ΗΟ και λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες με χρήση Monte Carlo για να μελετηθεί η μη ελεγχόμενη φόρτιση. Γίνεται χρήση υπολογιστών υψηλής απόδοσης για έλεγχο ΗΟ και ΜΤΥΦ για περιορισμό προβλημάτων.

Πίνακας 4.2: συνεισφορά των άρθρων της βιβλιογραφίας που μελετήθηκαν (συνέχεια)

Πηγή	Ημερομηνία δημοσίευσης	Συμβολή Άρθρου
[105]	20/10/2016	Προτείνει μια αυτόνομη μέθοδο για έλεγχο των ΜΣ με χρήση ελέγχου πτώσης τάσης για αποτελεσματική διαχείριση δικτύων με υψηλή διείσδυση ΦΒ
[49]	04/11/2016	Αξιολογεί μια κεντρική/αποκεντρωμένη στρατηγική για τον προσδιορισμό αναφορών άεργου ισχύος για ΦΒ αντιστροφείς που είναι συνδεδεμένοι σε ακτινικό ΔΔΧΤ.
[106]	14/11/2016	Προτείνει μέθοδο που θα χρησιμοποιείται από τον ΔΔΔ για λήψη αποφάσεων για τον σχεδιασμό του δικτύου.
[50]	14/11/2016	Μέθοδος για συντονισμένο έλεγχο ΔΕΠ και φορτίων. Συντονισμένος έλεγχος ΦΒ και έξυπνων φορτίων για τη βελτίωση της τάσης στο δίκτυο.
[51]	16/11/2016	Προτείνει ενιαίο έλεγχο για ταυτόχρονη διαχείριση της συμφόρησης δικτύου και αποκλίσεων τάσης σε ακτινωτά δίκτυα διανομής.
[52]	18/01/2017	Προτείνει MPC για συσκευές PLUG&PLAY με φορτία ευέλικτα και αναβαλλόμενα.
[53]	16/02/2017	Νέα μέθοδος η οποία γεφυρώνει τις λειτουργικές πτυχές των ΔΔΧΤ με το στάδιο σχεδιασμού, που οδηγεί σε πιο αποτελεσματική χρήση της υπάρχουσας υποδομής και των ελέγχων των γεννητριών.
[107]	15/03/2017	Νέα μέθοδος δύο σταδίων κεντρικού MPC για καταναμημένες MAE για περιορισμό των προβλημάτων τάσης που προκαλούνται στα ΔΔΧΤ από υψηλή διείσδυση ΦΒ. Γίνεται ενσωμάτωση ενός γραμμικοποιημένου AC-OPF με σκοπό να μειωθεί η υπολογιστική πολυπλοκότητα των αλγορίθμων.
[54]	28/04/2017	Προτείνει αλγόριθμο για τον έλεγχο MAE. Λύνει το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος με στόχο την ελαχιστοποίηση απωλειών και των MAE κρατώντας την τάση εντός ορίων.
[108]	30/06/2017	Προτείνει μια μέθοδο για διαχείριση του φορτίου με βάση την τάση. Μεθοδολογία για να ποσοτικοποιηθεί η μείωση της συνολικής ζήτησης που ξεκλειδώνεται με τον έλεγχο των πρωτεύοντων των υποσταθμών λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις και τους περιορισμούς τάσης σε ολόκληρο το δίκτυο διανομής.
[55]	27/08/2017	Προτείνει πολυπεριοδικό αλγόριθμο OPF περιορισμένης πιθανότητας για χρήση σε ΔΔΧΤ για αντιμετώπιση αβεβαιοτήτων.
[109]	29/08/2017	Παρουσιάζει μια νέα μέθοδο αποσύνθεσης Benders που λαμβάνει υπόψη τις στρατηγικές MPC σε ένα πρόβλημα σχεδιασμού και λειτουργίας.
[56]	07/09/2017	Προτείνει μια νέα στρατηγική ρύθμισης της τάσης για αντιμετώπιση των υπερτάσεων σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ συστημάτων. Προτείνει μια μέθοδο που χρησιμοποιεί HO για αποθήκευση περίσσιας ενέργειας αλλά και AEI.
[57]	13/09/2017	Ενσωματωμένη μέθοδος για διαχείριση της συμφόρησης δικτύου η οποία περιλαμβάνει τα πλεονεκτήματα έμμεσου ελέγχου βάσει αγοράς και του άμεσου ελέγχου AEI.
[58]	15/09/2017	Παρουσιάζει μια νέα κυρτή προσέγγιση για AC OPF στα μη ισορροπημένα τριφασικά ΔΔΧΤ τεσσάρων αγωγών με MAE.
[110]	04/12/2017	Προτείνει κεντρικό έλεγχο, που βασίζεται στην τάση των φάσεων, με χρήση ΜΠΠ για περιορισμό υπερτάσεων.
[59]	18/12/2017	Εξετάζει την αντοχή ενός εγχώριου αγροτικού ΔΔΧΤ στη διείσδυση ΦΒ συστημάτων και γίνεται προσομοίωση τεχνικών αντιμετώπισης υπερτάσεων.
[60]	24/04/2018	Κατασκευή μοντέλων για φόρτιση HO και ιδανική ροή ισχύος η οποία χρησιμοποιεί την ικανότητα των HO να εγχύουν άεργο ισχύ στο δίκτυο.
[61]	30/08/2018	Διαμόρφωση του προβλήματος OPF ώστε να μπορεί να εντοπίζει τις ανισορροπίες σε τριφασικό δίκτυο διανομής και ακολούθως με εφαρμογή περιορισμών να γίνεται αντιμετώπιση των προβλημάτων ποιότητας ισχύος.
[62]	10/09/2018	Προτείνει μια γενικευμένη μέθοδο και λύση για την ενσωμάτωση του predictor-corrector primal-dual interior point method (PCPDIPM) για την επίλυση του προβλήματος OPF σε πολυφασικά ΔΔΧΤ με υψηλή διείσδυση ΦΒ.
[63]	13/09/2018	Προτείνει μεθόδους, που εφαρμόζονται από τη μεριά των καταναλωτών, για δίκτυα με υπερφορτώσεις και προβλήματα τάσης από μη συντονισμένες μονάδες παραγωγής.

Πίνακας 4.2: συνεισφορά των άρθρων της βιβλιογραφίας που μελετήθηκαν (συνέχεια)

Πηγή	Ημερομηνία δημοσίευσης	Συμβολή Άρθρου
[64]	05/10/2018	Προτείνει μια νέα στρατηγική για την αποτελεσματική ρύθμιση της τάσης για αντιμετώπιση των υπερτάσεων σε τριφασικά δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ συστημάτων. Κάνει χρήση μιας τεχνικής αντιστάθμισης ανισοροπίας τάσης με αντιστροφείς δέλτα και ακολούθως χρησιμοποιεί έναν καταναεμημένο συναινετικό αλγόριθμο για τον έλεγχο της άεργου ισχύος που ανταλλάσσεται για τη ρύθμιση της τάσης.
[111]	27/12/2018	Προτείνει προσαρμοσμένο αποκεντρωμένο έλεγχο για οικιακά ΜΑΕ με μπαταρίες με σκοπό να περιοριστούν τα προβλήματα τάσης και θερμότητας.
[65]	23/01/2019	Προτείνεται κεντρική, τριφασική διατήρηση μειωμένης τάσης βασισμένη σε AC-OPF για την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων από την ενεργή και συντονισμένη διαχείριση των υποδομών των ΔΔΔ. Σε μη ισοροπημένα δίκτυα ΜΤ/ΧΤ με υψηλή διείσδυση ΦΒ.
[112]	15/03/2019	Προτείνει μια μέθοδο τοπικού ελέγχου των ΔΕΠ όπου χρησιμοποιεί ιστορικά δεδομένα για να μιμηθεί την λειτουργία του κεντρικού ελέγχου χωρίς όμως να απαιτείται η υποδομή του κεντρικού ελέγχου. Γίνεται χρήση μηχανικής μάθησης.
[66]	01/04/2019	Νέος αλγόριθμος ελέγχου τάσης για ΦΒ αντιστροφείς για επέκταση των δυνατοτήτων τους με πρόσθετη λειτουργία υποστήριξης τάσης δικτύου.
[113]	10/05/2019	Προτείνει δύο μεθόδους ελέγχου με ΜΤΥΦ για την αντιμετώπιση των προβλημάτων τάσης που προκαλεί η μεγάλη παρουσία ΦΒ και ΗΟ.
[114]	15/05/2019	Σχεδιάζει ένα μοντέλο βελτιστοποίησης το οποίο ελέγχει ευέλικτα τις φορτίσεις/εκφορτίσεις των ΗΟ με σκοπό να ελαχιστοποιήσει τους κύκλους φόρτισης των μπαταριών αλλά και την υποβάθμισή τους.
[115]	04/07/2019	Παρουσίαση του προβλήματος του παρόχου υπηρεσιών ευελιξίας ο οποίος λειτουργεί μια δεξαμενή πόρων ευελιξίας συνδεδεμένων σε ΧΤ για τη βέλτιστη παροχή αποθεματικού περιορισμού συχνότητας.
[67]	08/07/2019	Παρουσιάζει πως τα ενεργά δίκτυα διανομής μπορούν να συντονιστούν με κεντρικό έλεγχο για την παροχή βοηθητικών υπηρεσιών και παροχής για λειτουργία σε νησιά.
[68]	26/08/2019	Μέθοδος Fair OID (FOID) η οποία διασφαλίζει ότι η αποκοπή ισχύος θα είναι ανάλογη-δίκαια καταναεμημένη σε όλα τα σπίτια. Καλύτερα αποτελέσματα, από VVC, για ελαχιστοποίηση απωλειών, όχι όμως καλύτερα από OID.
[69]	26/08/2019	Μέθοδος για έλεγχο ΔΕΠ βασισμένη σε δεδομένα με τοπικό έλεγχο με σκοπό να μιμηθεί τον κεντρικό έλεγχο. Χωρίς να απαιτείται επικοινωνία ή επιπλέον αναβάθμιση δικτύου.
[116]	12/09/2019	Παρουσιάζει μια μέθοδο για την αξιοποίηση των έξυπνων κτιρίων για τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος με τη χρήση καταναεμημένου MPC για τον VVC.
[117]	30/10/2019	Παρουσιάζει τα αποτελέσματα μιας έρευνας για τη χρήση έξυπνων κατεμημένων φορτίων σε ένα δίκτυο που πάσχει από υπερτάσεις οι οποίες προκαλούνται από αντίστροφη ροή ισχύος από τα συστήματα ΦΒ.
[118]	11/11/2019	Προτείνει έναν χρονικά σύνθετο κυλιόμενο ορίζοντα βελτιστοποίησης, με τον έλεγχο να γίνεται σε οικιακό επίπεδο για την παροχή υπηρεσιών. Χρήση οικιακών μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας και παροχή της στο σύστημα.
[119]	06/12/2019	Μελέτη των πλεονεκτημάτων που προσφέρει ο ανεξάρτητος ανά φάση έλεγχος των αντιστροφένων των ΔΕΠ για την ελαχιστοποίηση της ανισοροπίας τους δικτύου.
[70]	08/01/2020	Παρουσίαση μεθόδου για βέλτιστη διανομή μπαταριών σε τριφασικό μη ισοροπημένο δίκτυο διανομής. Εύρεση εφικτής λύσης για την αποφυγή ταυτόχρονης φόρτισης και εκφόρτισης.
[120]	29/01/2020	Προτείνει μια νέα μέθοδο με συντονισμένη συναίνεση μεταξύ των φάσεων για αντιμετώπιση των υπερτάσεων σε δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ συστημάτων.
[71]	27/03/2020	Παρουσιάζει 5 μεθόδους OPF με σκοπό δείξει με ποια μέθοδο γίνεται πιο δίκαιη αποκοπή ισχύος από τις ΦΒ μονάδες. Οι 3 μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη τη δίκαιη αποκοπή (απαλείφουν αδικία λόγω τοποθεσίας) ενώ οι άλλοι 2 όχι και ωφελούν περισσότερο τους χρήστες που βρίσκονται κοντά στις παροχές.
[121]	30/03/2020	Αναπτύσσει μια ισχυρή προσέγγιση προγραμματισμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους για τη φόρτιση των ΗΟ διατηρώντας ταυτόχρονα την ικανοποίηση των κατόχων ΗΟ και τους περιορισμούς του τοπικού δικτύου σε ένα στοχαστικό περιβάλλον.
[72]	03/07/2020	Παρέχει λύση για τις σύνθετες εξατομικευμένες ρυθμίσεις που χρειάζονται οι τοπικοί ελεγκτές για να λειτουργούν ιδανικά. Ομαδοποίηση των κανόνων σε ένα κοινό σύνολο το οποίο παρέχεται στους ΔΕΠ σε πραγματικό χρόνο. Γίνεται χρήση τοπικού ελέγχου βασισμένο σε δεδομένα.

**Πίνακας 4.2: συνεισφορά των άρθρων της βιβλιογραφίας που μελετήθηκαν (συνέχεια)**

Πηγή	Ημερομηνία δημοσίευσης	Συμβολή Άρθρου
[73]	21/07/2020	Προτείνει μια μέθοδο εύκολα διαχειρίσιμου κεντρικού OPF για υποστήριξη τάσης στο δίκτυο μεταφοράς και παράλληλα βελτιστοποιεί τη λειτουργία του δικτύου διανομής ικανοποιώντας τους περιορισμούς ποιότητας ισχύος.
[122]	02/09/2020	Παρέχει μια ανάλυση για τις κύριες τεχνικές ρύθμισης VVC που μπορούν να εφαρμοστούν στο ΔΔΧΤ με ΦΒ.
[123]	24/09/2020	Μελέτη τοπικών μεθόδων ελέγχου βάσει δεδομένων και ρύθμιση τάσης με VVC.
[74]	13/10/2020	Εξετάζει τα πλεονεκτήματα των συντονισμένων αντιστροφών έναντι των αυτόνομων στο όσον αφορά τον έλεγχο της αξιοποιούμενης ισχύος και τάσης.
[124]	26/10/2020	Προτείνει μια κατανεμημένη προσέγγιση χωρίς μοντέλο για ώστε να βρεθεί, κατά προσέγγιση, η βέλτιστη τροχιά ελέγχου των καταναλωτών λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες.
[125]	15/11/2020	Νέα μέθοδος προσέγγισης πολυπεριοδικής βέλτιστης ροής ισχύος για προβλήματα μεγάλης κλίμακας που περιλαμβάνουν μετατοπιζόμενα φορτία με χρήση ευρετικής τεχνικής πολλαπλών εκδόσεων.
[75]	25/11/2020	Ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου, ευέλικτου και εύκολα αναπαραγόμενου εργαλείου πολυπεριοδικής βέλτιστης ροής ισχύος για μη ισορροπημένα ΔΔΧΤ και ρεαλιστικά μοντέλα συσκευών. Προτείνει και συγκρίνει την απόδοση των μοντέλων συσκευών τελευταίας τεχνολογίας με σκοπό να προβάλει την ευελιξία του έξυπνου ΔΔΧΤ. Επίσης προτείνει ένα πλαίσιο συνεργασίας ΔΔΔ/καταναλωτή για χρήση των συσκευών από τον ΔΔΔ με σκοπό την καλύτερη διαχείριση του δικτύου.
[76]	27/11/2020	Νέο πλαίσιο πολυπεριοδικής βέλτιστης ροής ισχύος που περιλαμβάνει διάφορους ευέλικτους οικιακούς πόρους. Δίνεται έμφαση στην υλοποίηση ώστε το μοντέλο να είναι ευκολά διαχειρίσιμο. Όπου υπάρχουν μετατοπιζόμενα φορτία προτείνει ένα νέο ευρετικό αλγόριθμο για την επίλυση του ΜΑΜΓΠ το οποίο παρέχει μια διαχειριστική και βιώσιμη λύση.
[126]	18/12/2020	Κατασκευή ιεραρχικού ελέγχου σύμφωνα με τις συνθήκες επικοινωνίας και υπολογισμού μεταξύ ΜΤ/ΧΤ. Συντονισμού κεντρικού ελέγχου στο ΜΤ και κατανεμημένου ελέγχου στο ΧΤ.
[77]	16/02/2021	Νέα μέθοδος για εγκατάσταση συσκευών εναλλαγής φάσης στο δίκτυο λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς εγκατάστασης και λειτουργίας.
[127]	22/03/2021	Προτείνει μια προσαρμοζόμενη μέθοδο διαχείρισης τάσης και συμφόρησης για περιορισμό προβλημάτων θερμότητας και τάσης σε δίκτυα μεγάλου μεγέθους χωρίς χρήση ηλεκτρικών μοντέλων. Γίνεται έλεγχος του ΜΤΥΦ στο πρωτεύον (ΜΤ) και συνεχόμενος υπολογισμός της μέγιστης επιτρεπόμενης παραγωγής ΦΒ για αποφυγή συμφόρησης.
[78]	30/08/2021	Νέα μέθοδος τριών σταδίων με χρήση MPC για διαχείριση περιορισμών. Σε τριφασικό δίκτυο τεσσάρων αγωγών. Για διαχείριση και εκμετάλλευση της ευελιξίας που προσφέρουν τα έξυπνα κτίρια.

#### 4.5 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζεται η συνεισφορά των εργασιών της βιβλιογραφίας που μελετήθηκαν. Για κάθε εργασία, ο Πίνακας 4.1 περιλαμβάνει την ακόλουθη πληροφορία:

- Πηγή, δηλαδή αριθμός της εργασίας όπως εμφανίζεται στο Κεφάλαιο 7 της βιβλιογραφίας.
- Ημερομηνία δημοσίευσης της εργασίας, με την οποία είναι και ταξινομημένες με χρονολογική σειρά στον πίνακα οι εργασίες.
- Συμβολή άρθρου, δηλαδή ποια τι παρουσιάζει η κάθε εργασία και ποια καινοτομία εισάγει στον τομέα της διαχείρισης ενός σύγχρονου έξυπνου ΔΔΧΤ.

Από τον Πίνακα 4.2 προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Παρατηρείται ότι οι συγγραφείς των εργασιών χρησιμοποιούν διάφορες μεθόδους και τακτικές για να αντιμετωπίσουν, για τους περισσότερους, το κοινό πρόβλημα των υπερτάσεων σε ΔΔΧΤ με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.
- Εξετάζονται επίσης διαφορετικοί μέθοδοι ελέγχου των ΔΔΧΤ, ενώ σε ορισμένες εργασίες οι συγγραφείς παρέχουν συγκριτικά στοιχεία μεταξύ των μεθόδων για την απόδοσή τους. Όπως γίνεται στο [24] όπου παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα του συντονισμένου ελέγχου φόρτισης ΗΟ ενώ παράλληλα γίνεται και σύγκριση για χρήση κεντρικού ελέγχου. Μια άλλη σύγκριση γίνεται στο [74] όπου οι συγγραφείς παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα των συντονισμένων αντιστροφών ΦΒ, αντί των αυτόνομων, όσον αφορά τον έλεγχο της ισχύος και της τάσης.
- Παρατηρείται ακόμη ότι πέραν των μεθόδων επίλυσης των προβλημάτων, παρουσιάζονται και μελέτες οι οποίες αφορούν τεχνικές και οικονομικές στρατηγικές που χρησιμοποιούνται στα ΔΔΧΤ [25], [34] όπως και των ρίσκων από τη μη ελεγχόμενη λειτουργία των ΔΕΠ [26].
- Άλλο ένα σημαντικό ζήτημα της σύγχρονης κοινωνίας, γενικότερα, είναι η ορθή διαχείριση των ηλεκτρονικών συσκευών που περιέχουν προσωπικά δεδομένα. Σε αυτό το πλαίσιο εργάζονται και οι συγγραφείς του [45] όπου λαμβάνουν μετρήσεις μόνο τάσεων και παραγωγής των ΦΒ μονάδων χωρίς να απαιτείται η συλλογή προσωπικών δεδομένων.
- Μια σημαντική παρατήρηση είναι η χρήση των εγκαταστάσεων των ΗΟ για την υποστήριξη του δικτύου σε περίπτωση υπέρτασης. Οι συγγραφείς των [56], [60], [82], [83], [92] για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα των παραβάσεων τάσης από την υψηλή διείσδυση ΑΠΕ κατασκευάζουν ένα συντονισμένο έλεγχο ΑΠΕ και εγκαταστάσεων ΗΟ. Όπου σε περίπτωση υπερτάσεων γίνεται χρήση των εγκαταστάσεων ΗΟ για την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας για μελλοντική χρήση. Οι συγγραφείς του [111] παρουσιάζουν μια αντίστοιχη μέθοδο με χρήση οικιακών ΜΑΕ αντί εγκαταστάσεων ΗΟ.



## **ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ**

### **5.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ**

#### **5.1.1 Απλοποιήσεις**

Στο [28] το φορτίο φόρτισης των ΗΟ θεωρείται ως μονοφασικό και σταθερής ισχύος, τα αποτελέσματα δείχνουν όμως ότι 2 από τα 37 ΗΟ, τα οποία βρίσκονται στην άκρη του δικτύου, έχουν χαμηλότερο ρυθμό φόρτισης. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι σε όλα τα ΗΟ η φόρτιση ξεκίνα σε όλα μαζί ταυτόχρονα στο διάστημα χαμηλού κόστους φόρτισης. Παρόλα αυτά, αυτή η ελεγχόμενη μέθοδος παρουσιάζει θετικά αποτελέσματα ως προς τη διαχείριση του δικτύου αλλά και ως προς την αντοχή αυτού σε ΗΟ. Μια απλοποίηση παρουσιάζεται στο άρθρο [79] όπου αντί να γίνεται χρήση αυτομετασχηματιστή αυτός αντικαθίσταται με μια γραμμή, παρέχοντας σταθερή τάση. Ενώ και τα φορτία θεωρούνται ως σταθερής ισχύος ή σταθερής αγωγιμότητας. Στο [58] γίνεται μια απλοποίηση στο μοντέλο για το δίκτυο διανομής με την οποία όλα τα φορτία θεωρούνται πως έχουν σταθερό ρεύμα και σταθερή αντίσταση με σκοπό να εξεταστεί το χειρότερο σενάριο. Οπότε και το σφάλμα προσέγγισης συμπεριλαμβάνει και το σφάλμα από αυτήν την απλοποίηση. Επίσης, η συνεισφορά των μέσων αποθήκευσης ενέργειας θεωρείται ως έγχυση ρεύματος. Η προτεινόμενη στρατηγική αποδείχθηκε εφικτή και αποτελεσματική για τη βελτίωση της ρύθμισης τάσης και ισορροπίας του δικτύου για τριφασικό δίκτυο τεσσάρων αγωγών με υψηλή διείσδυση ΦΒ. Οπότε, ταυτόχρονα αυξάνεται και η ικανότητα του δικτύου να ανταποκριθεί σε υψηλότερες απαιτήσεις ενέργειας και να απορροφήσει μεγαλύτερες ποσότητες ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Όπως και στο [33], [65], επίσης τα φορτία θεωρούνται σταθερής ισχύος. Στο [65] αναφέρει πως στο σενάριο της χειρότερης περίπτωσης όπου τα φορτία είναι σταθερής ισχύος ή ρεύματος τότε οι απώλειες μπορούν να ελαχιστοποιηθούν αυξάνοντας τις τιμές τάσης. Κατά συνέπεια, όμως, αυξάνεται η ζήτηση ενέργειας και πιθανόν η εισαγωγή ενέργειας στο δίκτυο. Οπότε, η ελαχιστοποίηση απωλειών οδηγεί τελικά σε μεγαλύτερη κατανάλωση και λιγότερη εξαγωγή ανανεώσιμης ενέργειας στο δίκτυο. Ακόμη, στο [92] τα φορτία θεωρούνται ως σταθερής ισχύος με συντελεστή ισχύος 0,95 και γίνεται τυχαία κατανομή στα νοικοκυριά. Απλοποιήσεις γίνονται και στα άρθρα [59], [49], [23] όπου τα φορτία θεωρούνται πλήρως ισορροπημένα σε τριφασικά δίκτυα.

### 5.1.2 Προσεγγίσεις

Στο [79] γίνεται αναγωγή Κρον, δηλαδή ο ουδέτερος αγωγός ενσωματώνεται σε μια από τις φάσεις, εφόσον ουδέτερος και γείωση δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον στη μοντελοποίηση, όπου η χρήση της μεθόδου επαληθεύεται και με τα αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Όταν όμως ο στόχος είναι ο υπολογισμός των ρευμάτων και των τάσεων με ρητό τρόπο τότε αυτή η προσέγγιση αποφεύγεται. Στο [58] γίνεται χρήση ενός μοντέλου στο οποίο είναι απαραίτητη η αναπαράσταση του ουδέτερου αγωγού για τον υπολογισμό των απωλειών και των τάσεων σε αυτόν, αλλιώς όπου δεν χρειάζεται γίνεται αναγωγή Κρον. Αναγωγή Κρον γίνεται και στο [112] για να γίνει αναπαράσταση της ροής ισχύος σε τριφασικό μοντέλο με τρεις αγωγούς. Αυτή η μέθοδος όμως μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένο υπολογισμό απωλειών, οπότε για πιο σωστό υπολογισμό των απωλειών λαμβάνεται υπόψη η διαφορά της ισχύος εισόδου και εξόδου κάθε φάσης. Επίσης και στο [61] γίνεται χρήση τις ίδιας μεθόδου, όπου θεωρείται ότι ο ουδέτερος αγωγός είναι γειωμένος σε πολλά σημεία και η χωρητικότητα των καλωδίων αμελείται λόγω του μικρού μήκους των καλωδίων.

Μια άλλη προσέγγιση που χρησιμοποιείται [71] είναι η γραμμική ροή ισχύος με σκοπό τον καθορισμό των βέλτιστων ρυθμίσεων για την ΑΕΙ για περιοδικά και μικρά διαστήματα. Γίνεται χρήση γραμμικών εξισώσεων οι οποίες προκύπτουν από τη σύνθετη τριφασική εξίσωση πτώσης τάσης.

### 5.1.3 Χαλαρώσεις

Στο [58] γίνεται κυρτή χαλάρωση για την επαναδιατύπωση του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος σε ένα κυρτό ΤΟ με γραμμικούς περιορισμούς και ακολούθως αναπτύσσεται αντίστοιχη διατύπωση για τριφασικό μη ισορροπημένο δίκτυο. Στο [70] το πρόβλημα είναι η ελαχιστοποίηση απωλειών σε τριφασικό δίκτυο και αυτό διατυπώνεται ως ένα κυρτό πρόγραμμα κώνου δεύτερης τάξης με σκοπό την αντιμετώπιση της μεταβλητής παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας με την αποστολή μπαταριών. Έτσι, συνδέοντας το χαλαρό πρόβλημα κώνου με το ακριβές ΜΓΠ προσφέρει μια φυσικά πραγματοποιήσιμη λύση για την πολυπεριοδική αποστολή μπαταριών. Στο [65] προτείνεται μια προσέγγιση δύο σταδίων για τη χαλάρωση των ακεραίων μεταβλητών, αποφεύγοντας παράλληλα την υπόταση με σκοπό την αξιοποίηση των οφελών από την ενεργή και συντονισμένη διαχείριση της υποδομής που ανήκει στους διαχειριστές του δικτύου διανομής σε μη ισορροπημένα δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΦΒ. Χαλαρώσεις γίνονται στο [41] όπου οι δυναμικές μεταβλητές απόφασης οι οποίες συσχετίζονται με την κατάσταση φόρτισης του κάθε ΗΟ θεωρούνται ως συνεχείς με όρια μεταξύ μηδέν και ένα με σκοπό την επίλυση ενός μιγαδικού προβλήματος μικτών ακεραίων ΜΓΠ. Επίσης, στο [61] εισάγονται μεταβλητές με σκοπό να χαλαρώσουν τους περιορισμούς τάσης, θερμότητας ή εξισορρόπησης και να αποφευχθεί το ανέφικτο. Στο [81] η εγκυρότητα του ελεγκτή ενισχύθηκε με την εισαγωγή χαλαρώσεων στους περιορισμούς τάσης σε περίπτωση μη εφικτής βελτιστοποίησης βοηθώντας έτσι στον προσδιορισμό της αλληλουχίας των ενεργειών ελέγχου που απαιτούνται για τη βελτίωση των πιο προβληματικών τάσεων, ακόμη και όταν το πρόβλημα είναι ανέφικτο με τους αρχικούς περιορισμούς. Στο [47] στην έρευνα για βέλτιστο σχεδιασμό μονάδων αποθήκευσης ενέργειας γίνεται χρήση κυρτής χαλάρωσης σε πολυπεριοδική βέλτιστη ροή ισχύος. Για τη λήψη μιας υπολογιστικά εφικτής κυρτής



αναδιατύπωσης, στο πρόβλημα της δυαδικότητας των μεταβλητών επιλογής στον ΦΒ αντιστροφέα και των μη γραμμικών σχέσεων ροής ισχύος, αξιοποιεί προσεγγίσεις τακτοποίησης που προωθούν τη σπανιότητα και οι τεχνικές ημικαθορισμένης χαλάρωσης [30]. Στο άρθρο [66], η μέθοδος πολλαπλασιαστών εναλλασσόμενης κατεύθυνσης πολλαπλών μπλοκ χρησιμοποιείται για τη χαλάρωση της σύζευξης μεταξύ των συναρτήσεων κόστους, για την αποσύνθεση του προβλήματος βελτιστοποίησης σε υποπροβλήματα που μπορούν να επιλυθούν παράλληλα. Στο [52] γίνεται χρήση χαλάρωσης κώνου δευτέρας τάξης στις εξισώσεις ροής ισχύος για τη μοντελοποίησή τους στο δίκτυο διανομής και τη βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου σε σύγκριση με τη γραμμική προσέγγιση που χρησιμοποιείται σε άλλη μελέτη. Οι συγγραφείς στο [54] έχουν ένα περίπλοκο πρόβλημα πολυπεριοδικής βέλτιστης ροής ισχύος το οποίο αντιμετωπίζουν αναδιατυπώνοντάς το ως ημιορισμένο πρόβλημα με τετραγωνικούς και κυρτούς περιορισμούς. Τέλος στο [123] θεωρείται ότι οι ΔΕΠ λειτουργούν στο γραμμικό κομμάτι της καμπύλης τους Volt/Var.

## 5.2 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ

### 5.2.1 Ελεγχιμότητα

Στο [75] εξετάζεται μια μέθοδος η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα όπου ο ΔΔΔ μπορεί να κάνει μόνο μερικές προσαρμογές στα προφίλ φορτίου των πελατών, αντί να αποφασίζει πλήρως για τα προφίλ, όπως γίνεται συνήθως. Αναλύονται οι δυνατότητες, όπως η ανακατανομή της ενεργής ισχύος, η υποστήριξη της άεργης ισχύος και η εξισορρόπηση φάσεων αναδεικνύοντας την αποσυμφόρηση των κοινών οικιακών συσκευών. Η μέθοδος εξετάστηκε σε σενάριο με ρεαλιστικό δίκτυο διανομής με θετικά αποτελέσματα και μείωση των απωλειών ισχύος κυρίως όταν προσφέρεται μεγαλύτερη ευελιξία στον ΔΔΔ για προσαρμογές στα ευέλικτα φορτία, στις ΦΒ μονάδες και στα ΗΟ. Στο [28] χρησιμοποιείται ένα δίκτυο το οποίο αντιπροσωπεύει έναν τυπικό προαστιακό σταθμό στην Ιρλανδία. Σε αυτό το δίκτυο όλες οι καλωδιώσεις ελέγχονται από τον ΔΔΔ όπως και η μέγιστη απορρόφηση ισχύος των νοικοκυριών από τον Μ/Σ. Η μέθοδος που παρουσιάζεται σε αυτή τη μελέτη μπορεί να διαβεβαιώσει τον ΔΔΔ ότι τα δίκτυα αναπαρίστανται και ελέγχονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος παραβίασης τάσης ή υπερφόρτωσης του δικτύου. Στο [90] γίνεται η υπόθεση ότι το δίκτυο παρακολουθείται πλήρως με έξυπνους μετρητές και οι εγκαταστάσεις που συμμετέχουν στην Τοπική Εξισορρόπηση μπορούν να ελέγχονται μέσω διαδικτύου ή ειδικής επικοινωνίας. Στο [73] παρουσιάζεται μια μέθοδος κεντρικού ελέγχου στη οποία ο ΔΔΔ μπορεί να βελτιστοποιήσει τη λειτουργία του δικτύου με ασφάλεια ενώ παράλληλα επωφελείται από τις τακτικές που αποδίδουν εισόδημα συνεισφέροντας στους στόχους του διαχειριστή του δικτύου μεταφοράς. Αντίθετα, στο [63] παρουσιάζεται μια μέθοδος στην οποία οι καταναλωτές έχουν τον απόλυτο έλεγχο για την βελτιστοποίηση του συστήματος. Στη μελέτη εισηγούνται πολλές μέθοδοι ευελιξίας από πλευράς ζήτησης μεγάλης κλίμακας βασισμένες σε δεδομένα πραγματικών δικτύων και με χρήση ρεαλιστικών εργαλείων. Στο [76] προτείνεται ένα πλαίσιο συνεργασίας ΔΔΔ και καταναλωτών στο οποίο ο ΔΔΔ μπορεί να χρησιμοποιήσει τις οικιακές συσκευές για να επιτύχει καλύτερη διαχείριση του συστήματος. Στο [22] παρουσιάζεται μια μέθοδος για ελεγχόμενη φόρτιση ΗΟ από τον ΔΔΔ για να βοηθήσει στην ανακούφιση του δικτύου και να επιτρέψει στους ιδιοκτήτες ΗΟ να φορτίζουν τα οχήματά τους διατηρώντας ένα πειραματικό δίκτυο εντός αποδεκτών ορίων λειτουργίας ενώ παράλληλα

εξασφαλίζεται ότι τα οικιακά φορτία παραμένουν ανεπηρέαστα. Στο άρθρο [106] προτάθηκε μια μεθοδολογία που προτείνεται να χρησιμοποιηθεί από τον ΔΔΔ ως εργαλείο λήψης αποφάσεων για τον βέλτιστο σχεδιασμό του δικτύου διανομής. Στο [57] προτείνεται μια λύση στην οποία ο ΔΔΔ επεμβαίνει στο δίκτυο και επιλέγει τις κατάλληλες τοποθεσίες για ΑΕΙ σε περίπτωση που οι καταναλωτές δεν συμμορφώνονται στις μετατοπίσεις φορτίου για εξομάλυνση του δικτύου. Στο [49] προτείνεται ένας κεντρικός απομακρυσμένος έλεγχος όπου ο ΔΔΔ πραγματοποιεί μια εναλλακτική ροή ισχύος και τα αποτελέσματα της στέλνονται ως σημεία ρύθμισης ισχύος στον αντιστροφέα κάθε ΦΒ για τοπικό έλεγχο. Το άρθρο υποστηρίζεται από εκτενή αποτελέσματα τόσο σχετικά με τον κεντρικό ελεγκτή όσο και με τον τοπικό ελεγκτή των ΦΒ.

### 5.2.2 Παρατηρησιμότητα

Στο [28] ο ΔΔΔ έχει πλήρη γνώση των φορτίων εφόσον ο ίδιος παρείχε τα εμπιστευτικά δεδομένα ζήτησης όπως και τη συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας για κάθε πελάτη. Στο [70] γίνεται υπόθεση ότι ο ΔΔΔ γνωρίζει την τοπολογία του δικτύου, ώστε να μπορεί να διαμορφώσει και να λύσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης με βάση τις παραμέτρους του δικτύου και να διαχειριστεί ανάλογα τους διαθέσιμους ευέλικτους πόρους. Στο [112] αναφέρεται πως ο ΔΔΔ δεν γνωρίζει την ακριβή παραγωγή όλων των ΦΒ μονάδων στο ΔΔΧΤ, γνωρίζει όμως την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων διανεμημένης παραγωγής και επισημαίνει ότι η παραγωγή των ΦΒ μπορεί να εκτιμηθεί με κάποια αβεβαιότητα χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα. Στο άρθρο [51] εξετάζεται μια άμεση προσέγγιση της απόρριψης φορτίου λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία των νοικοκυριών με τη διαδικασία να συντονίζεται από τον ΔΔΔ.

### 5.2.3 Προβλεψιμότητα

Στο [28] εισάγεται μια Ιακωβιανή εξίσωση η οποία ενημερώνεται επαναληπτικά για να υπολογιστούν οι ασυμφωνίες τάσης και ακολούθως με τη χρήση της ανεστραμμένης της μορφής προβλέπονται οι διακυμάνσεις τάσης για συγκεκριμένες αλλαγές στις τιμές του ρεύματος. Η ακρίβεια του Ιακωβιανού πίνακα διασφαλίζεται εκτελώντας ροές ισχύος με θεωρητικά φορτία ΗΟ. Στο [107] κατασκευάστηκε ένα μοντέλο προγνωστικού ελέγχου όπου λαμβάνονται υπόψη οι προβλέψεις για τα χειρότερα σενάρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες ΦΒ. Οπότε οι συγγραφείς επιλύουν ένα ισχυρό πολυπεριοδικό πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος το οποίο υποβάλλεται σε αυτές τις συνθήκες με ωριαίες ενημερώσεις στα επίπεδα ενέργειας. Οι συγγραφείς στο [92] θεωρούν πώς ο συντονισμένος αλγόριθμος φόρτισης ΗΟ που χρησιμοποιείται έχει ορθές προβλέψεις για τη συμπεριφορά των ΗΟ, την παραγωγή ενέργειας από μονάδες ΦΒ και τα προφίλ φορτίων. Στο [109] γίνεται χρήση ενός μοντέλου προγνωστικού ελέγχου για να βρεθεί η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα του σχεδιασμού ενός δικτύου να οποίο θα αξιοποιεί μπαταρίες για αποθήκευση ενέργειας. Στο [66] χρησιμοποιείται ένα γραμμικό μοντέλο για την πρόβλεψη τάσης, όπου μέσα από τις προβλέψεις ο αλγόριθμος φαίνεται να προσφέρει υψηλή ακρίβεια συγκρίνοντας τα προβλεπόμενα αποτελέσματα με τα πραγματικά. Το [52] εισάγει έναν ελεγκτή πρόβλεψης για τη διαχείριση ευέλικτων φορτίων plug & play με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους σε όλο το σύστημα σε ένα έξυπνο δίκτυο. Ο αλγόριθμος είναι αναδρομικά επιτυχής εφόσον ορίζει κατάλληλα τις

συνθήκες σύνδεσης των συσκευών στο δίκτυο αλλά και το σύνολο των περιορισμών. Στο [116] προτείνεται ένας κατανεμημένος έλεγχος πρόβλεψης για έλεγχο Volt/Var. Ο ελεγκτής χρησιμοποιεί τοπικές μετρήσεις για να υπολογίσει την απαιτούμενη άεργο ισχύ για την επαναφορά της τάσης εντός ορίων. Η άεργος ισχύς παρέχεται στο δίκτυο από έξυπνα κτίρια και συστήματα HVAC των οποίων τα φορτία ελέγχονται μέσω διακοπών ON/OFF. Στο [54] γίνεται χρήση ενός ελέγχου πρόβλεψης όπου ο αλγόριθμος παρακολουθεί μόνο την ισχύ που ανταλλάσσεται στον ζυγό και τις μετεωρολογικές μεταβλητές στο δευτερεύον του υποσταθμού για να προβλέψει τη μελλοντική κατάσταση του δικτύου και να αποτρέψει πιθανές υποτάσεις ή υπερτάσεις. Στο [121] χρησιμοποιούνται προβλεπόμενες τιμές για την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας των ΗΟ έτσι ώστε να ελέγχεται αν το ΗΟ θα φορτιστεί ή όχι όταν συνδεθεί στο δίκτυο.



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ενεργειακή βιομηχανία παγκόσμια κινείται προς ένα πιο βιώσιμο ηλεκτρικό σύστημα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και ΤΧΑ στην πλευρά των καταναλωτών, ενώ ένα σημαντικό μέρος αυτής της τεχνολογίας εγκαθίσταται στο ΔΔΧΤ. Για την ομαλή ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών έχουν αναπτυχθεί αρκετές νέες τεχνολογίες από ερευνητές και ερευνητικούς οργανισμούς σε όλο τον κόσμο. Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διπλωματική εργασία παρέχει μια εκτενή ανασκόπηση των διάφορων πλαισίων σχεδιασμού και λειτουργίας των ΔΔΧΤ.

Αυτή η εργασία επικεντρώνεται στα σημαντικότερα προβλήματα που εμφανίζονται στα σύγχρονα ΔΔΧΤ και παρουσιάζει μια ταξινόμηση των μοντέλων και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη βέλτιστη διαχείριση των έξυπνων ΔΔΧΤ, περιγράφει τις μεθόδους επίλυσης του προβλήματος και αναφέρει μελλοντικές περιοχές έρευνας στον τομέα της βέλτιστης διαχείρισης έξυπνων ΔΔΧΤ. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι συνεισφορές των μελετημένων άρθρων πάνω στο θέμα της βέλτιστης διαχείρισης έξυπνων ΔΔΧΤ.

Όπως φάνηκε μέσα από τη μελέτη της βιβλιογραφίας η κύρια πρόκληση είναι η αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ η οποία εάν δεν αξιολογηθεί σωστά μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα όπως υπέρταση, υπόταση, θερμική υπερφόρτωση, προβλήματα ποιότητας ισχύος, ανισορροπία φάσεων και ζητήματα προστασίας του συστήματος. Ειδικότερα, όπως φαίνεται μέσα από τη μελέτη της βιβλιογραφίας, η υπέρταση θεωρείται το κύριο πρόβλημα όταν υπάρχει υψηλή διείσδυση ΑΠΕ και η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του δικτύου και των απωλειών ισχύος και ενέργειας είναι τα κυριότερα ζητήματα. Οι συχνότερες μέθοδοι ελέγχου είναι ο τοπικός και ο κεντρικός έλεγχος για αντιμετώπιση υψηλής διείσδυσης ΦΒ στο δίκτυο και ο κατακεντημένος έλεγχος για δίκτυα με υψηλή διείσδυση ΗΟ. Επίσης, η χρήση ΑΕΙ και ΕΑΙ είναι συχνότερες ενέργειες που εξετάζονται για την επαναφορά της ομαλής λειτουργίας του δικτύου ενώ χρησιμοποιούνται κυρίως στοχαστικές μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος στο ΔΔΧΤ.

## 6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Καθώς έχει ανατείλει η εποχή των έξυπνων δικτύων, η κύρια πρόκληση είναι η αναβάθμιση των παραδοσιακών ΔΔΧΤ και η περαιτέρω ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών με σκοπό την καλύτερη παρακολούθηση και έλεγχο των δικτύων. Ωστόσο, οι περισσότεροι ΔΔΔ παραμένουν παθητικοί και δεν έχουν αναπτύξει υποδομές για ενσωμάτωση πλήρως έξυπνων δικτύων. Έχουν παρουσιαστεί ορισμένες μελέτες σε ρεαλιστικά μοντέλα δικτύων. Όμως, χρειάζεται αρκετά μεγαλύτερη προσπάθεια για περαιτέρω ανάπτυξη. Η χρήση σύγχρονων τεχνολογιών και έξυπνων συστημάτων μπορεί να διευκολύνει την ευέλικτη λειτουργία των ΔΕΠ. Παρά τη σημαντική έρευνα που έχει γίνει στον τομέα της βέλτιστης διαχείρισης έξυπνων δικτύων διανομής υπάρχουν ακόμα ενδιαφέροντα πεδία για μελλοντική έρευνα και τομείς για περαιτέρω διερεύνηση.

Οι αβεβαιότητες που παρουσιάζονται στο δίκτυο διανομής, οι οποίες μπορεί να οφείλονται στις καιρικές συνθήκες ή και στην απροσδόκητη συμπεριφορά από τους τελικούς καταναλωτές, παίζουν σημαντικό ρόλο κατά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός ΔΔΧΤ. Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας φάνηκε πως ορισμένες μελέτες λαμβάνουν υπόψη κάποιες από τις αβεβαιότητες αυτές ενώ κάποιες άλλες όχι. Αντί αυτού, εισάγουν υποθέσεις για να παρθούν ορθότερα αποτελέσματα μετριάζοντας τον μη υπολογισμό των αβεβαιοτήτων. Κάποιοι από αυτούς τους συγγραφείς θα ήθελαν σε μελλοντικές μελέτες να συμπεριλάβουν αυτό τον παράγοντα. Στο [75] αναφέρεται πώς θα γίνει μελέτη για επέκταση της πολυπεριοδικής βέλτιστης ροής ισχύος που αναπτύχθηκε για να λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες. Οι συγγραφείς του [70] σε επόμενη τους μελέτη θα διερευνήσουν τον ρόλο της αβεβαιότητας και της ευρωστίας στην πρόβλεψη σφαλμάτων και θα επιχειρήσουν τη μείωση του χάσματος βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας ισχυρότερες χαλαρώσεις στις εξισώσεις ροής ισχύος. Επίσης, οι συγγραφείς του [57] θα ασχοληθούν με την περαιτέρω διερεύνηση των αβεβαιοτήτων για να εξασφαλιστεί μια πιο εύρωστη και αξιόπιστη λειτουργία με ενσωμάτωση μεθόδων ελέγχου τάσης σε οικιακά δίκτυα με ασύμμετρη φόρτιση.

Η ενσωμάτωση ΜΑΕ σε ΔΔΧΤ με αυξημένους ανανεώσιμους πόρους προσφέρει σημαντικά οφέλη, όπως αυξημένη ευστάθεια του δικτύου, μεγαλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εξοικονόμηση κόστους. Ωστόσο, απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, προηγμένα συστήματα διαχείρισης και υποστηρικτικές πολιτικές για την αντιμετώπιση των τεχνικών και οικονομικών προκλήσεων. Αρκετές μελέτες της βιβλιογραφίας ασχολήθηκαν με τη χρήση ΜΑΕ για την εξομάλυνση της λειτουργίας του ΔΔΧΤ, ενώ άλλες αναφέρουν μελλοντικές μελέτες για την ενσωμάτωσή τους. Στο [119] οι συγγραφείς σχεδιάζουν επέκταση του πλαισίου ώστε να περιλαμβάνει και συσκευές που πρόκειται να ενταχθούν μελλοντικά στο ΔΔΧΤ, όπως ΗΟ και ΜΑΕ με μπαταρίες. Οι συγγραφείς του [90] θα ήθελαν να εξετάσουν πώς επηρεάζει η τοπικότητα των γεννητριών, των ΜΑΕ και των ενεργών φορτίων τη δυνατότητα εξισορρόπησης ισχύος, μείωσης απωλειών ισχύος και παροχής επικουρικών υπηρεσιών. Στο [53] αναφέρεται πως θα γίνει διερεύνηση για την προσθήκη άλλων ενεργών μονάδων, όπως ελεγχόμενα φορτία ή ΜΑΕ μπαταριών, για να αποφευχθεί η ΑΕΙ και να αυξηθεί η χρήση των ΑΠΕ στα ΔΔΧΤ. Επίσης, στο [109] σχεδιάζεται περαιτέρω ανάλυση του αντίκτυπου διαφορετικών εγκαταστάσεων ΦΒ και τοπολογιών δικτύου για τη βέλτιστη τοποθέτηση και το μέγεθος των κατανεμημένων μπαταριών αλλά και

μελέτη για το αν προτιμώνται περισσότερο κεντρικές ή κατανεμημένες μπαταρίες. Οι συγγραφείς του [47] σχεδιάζουν να ασχοληθούν με τη διερεύνηση κατάλληλων αλγόριθμων ελέγχου για ΜΑΕ, που θα εφαρμοστούν σε λειτουργία δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Στο [68] αναφέρεται πως μελλοντικά θα γίνει διερεύνηση του αντίκτυπου της αποθήκευσης ενέργειας και της ανταπόκρισης στη ζήτηση για την παροχή ρύθμισης τάσης, τη βελτίωση της δίκαιης απόρριψης ισχύος και τη μείωση των απωλειών σε όλο το δίκτυο. Οι συγγραφείς του [106] θα ήθελαν να επεκτείνουν τη μέθοδό τους ώστε να συμπεριλαμβάνει τον έλεγχο συσκευών με διαχρονικούς περιορισμούς, όπως μπαταρίες, ευέλικτα φορτία και να κάνουν σύγκριση με συστήματα τοπικού ελέγχου, όπως επίσης και στο [54] όπου οι συγγραφείς επιθυμούν να κάνουν επέκταση της μελέτης με χρήση συντονισμένων ΜΤΥΦ και ΜΑΕ.

Μελλοντικές έρευνες ακόμη περιλαμβάνουν την κατασκευή αυτοπροσαρμοζόμενου κατανεμημένου ελέγχου [124] και την έρευνα για τον εντοπισμό και την τυποποίηση της αρχιτεκτονικής επικοινωνίας για τους ΦΒ αντιστροφείς επόμενης γενιάς [33]. Επιπλέον, περιλαμβάνει τη σύγκριση μεθόδων ελέγχου που βασίζονται σε δεδομένα με άλλες μεθόδους μηχανικής μάθησης και την αξιολόγηση των κινδύνων από τη χρήση τέτοιων μεθόδων [112]. Θα διερευνηθεί επίσης η επίδραση των σφαλμάτων πρόβλεψης και επικοινωνίας στην επιλογή τοποθέτησης των αντιστροφέων [30] και θα εξεταστούν μηχανισμοί για την κατανομή του κόστους μεταξύ όλων των ιδιοκτητών συστημάτων φωτοβολταϊκών [31]. Σημαντική είναι και η πειραματική επαλήθευση του προτεινόμενου πλαισίου τόσο από την άποψη της ΑΕΙ και των χαρακτηριστικών καμπυλών έργου ισχύος, όσο και σε πιο περίπλοκα μοντέλα με πολλαπλά χαρακτηριστικά που βασίζονται σε εργαλεία μηχανικής μάθησης [72].





**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Π. Γεωργιλάκης, Οικονομική και Αξιόπιστη Λειτουργία Σύγχρονων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα: Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2023.
- [2] J. Yang και Y. Wang, «Review on Protection Issues of Low-Voltage Distribution Networks with Multiple Power-electronic-converter-interfaced distribution energy resources,» σε *International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015)*, Beijing, China, 2015.
- [3] M. Al-Jaafreh και G. Mokryani, «Planning and Operation of Low Voltage Distribution Networks: A Comprehensive Review,» *IET Energy Systems Integration*, pp. Volume 1, no. 3, pp. 133-146, 2019.
- [4] Z. Lan, Y. Long και Y. Rao, «Review of Voltage Control in Low Voltage Distribution Networks with High Penetration of Photovoltaics,» σε *2nd International Conference on Information Technologies and Electrical Engineering*, Zhuzhou, Hunan, China, 2019.
- [5] M. Usman, M. Coppo, F. Bignucolo και R. Turri, «Losses Management in Active Distribution Networks: A Review,» σε *Electric Power Systems Research*, Padova, Italy, 2018, pp. Volume 163, pp. 116-132.
- [6] S. Ismael, S. A. Aleem, A. Abdelaziz και A. Zobaa, «State-of-the-art of Hosting Capacity in Modern Power Systems with Distributed Generation,» σε *Renewable Energy*, 2019, pp. Volume 130, 1002-1020.
- [7] A. Alhamali, M. Farrag, G. Bevan και D. Hepburn, «Review of Energy Storage Systems in electric grid and their potential in distribution networks,» σε *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Cairo, Egypt, 2017.
- [8] I. T. F. o. D. G. P. a. Optimization, «State-of-the-Art Techniques and Challenges Ahead for Distributed Generation Planning and Optimization,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 28, no. 2, pp. 1493-1502, 19 Sept 2012.
- [9] V. Evangelopoulos, P. Georgilakis και N. Hatziargyriou, «Optimal Operation of Smart Distribution Networks: A Review of Models, Methods and Future Research,» *Electric Power Systems Research*, pp. Volume 140, pp. 95-106, 01 Nov 2016.
- [10] K. Antoniadou-Plytaria, I. Kouveliotis-Lysikatos, P. Georgilakis και N. Hatziargyriou, «Distributed and Decentralized Voltage Control of Smart Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 8, no. 6, pp. 2999-3008, 08 Mar 2019.

- [11] I. T. F. ο. V. C. i. S. Grids, «Review of Challenges and Research Opportunities for Voltage Control in Smart Grids,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 34, no. 4, pp. 2790-2801, 06 Feb 2019.
- [12] T. Aziz και N. Ketjoy, «PV Penetration Limits in Low Voltage Networks and Voltage Variations,» *IEEE Access*, pp. Volume 5, pp. 16784-16792, 30 Aug 2017.
- [13] S. Huang, Q. Wu, Z. Liu και A. Nielsen, Review of Congestion Management Methods for Distribution Networks with High Penetration of Distributed Energy Resources, Istanbul, Turkey: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe, 2015.
- [14] S. Hashemi και J. Ostergaard, «Methods and strategies for overvoltage prevention in low voltage distribution systems with PV,» *IET RPG*, pp. Volume 11, no.2, pp. 205-214, 17 Jan 2017.
- [15] Π. Σ. Γεωργιάκης, Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα: Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), 2015.
- [16] Z. Shen, Z. Wei, G. Sun και S. Chen, «Representing ZIP loads in convex relaxations of optimal power flowZhangliang Shen\*, Zhinong Wei, Guoqiang Sun, Sheng Chen,» *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 372-385, 11 Mar 2019.
- [17] K. Clement-Nyns, E. Haesen και J. Driesen, «Coordinated Charging of Multiple Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Residential Distribution Grids,» σε *Power Systems Conference and Exposition*, Seattle, WA, USA, 2009.
- [18] R. Tonkoski και L. Lopes, «Impact of Active Power Curtailment on Overvoltage Prevention and Energy Production of PV Inverters Connected to Low Voltage Residential Feeders,» *Electric Power Systems Research*, pp. Volume 36, no. 12, pp. 3566-3574, 2011.
- [19] R. Tonkoski, L. Lopes και T. El-Fouly, «Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 2, no. 2, pp. 139-147, 2010.
- [20] K. Clement-Nyns, E. Haesen και J. Driesen, «The Impact of Vehicle-to-grid on the Distribution Grid,» *Electric Power Systems Research*, pp. Volume 81, no. 1, pp. 185-192, 2010.
- [21] K. Clement-Nyns, E. Haesen και J. Driesen, «The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 25, no. 1, pp. 371-380, 2009.
- [22] P. Richardson, D. Flynn και A. Keane, «Optimal Charging of Electric Vehicles in Low-Voltage Distribution Systems,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 27, no. 1, pp. 268-279, 2011.
- [23] E. Demirok, P. González, K. Frederiksen, D. Sera, P. Rodriguez και R. Teodorescu, «Local Reactive Power Control Methods for Overvoltage Prevention of Distributed Solar Inverters in Low-Voltage Grids,» *IEEE Journal of Potovoltaics*, pp. Volume 1, no. 2, pp. 174-182, 2011.
- [24] P. Richardson, D. Flynn και A. Keane, «Local Versus Centralized Charging Strategies for Electric Vehicles in Low Voltage Distribution Systems,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 3, no. 2, pp. 1020-1028, 2012.

- [25] T. Stetz, F. Marten και M. Braun, «Improved Low Voltage Grid-Integration of Photovoltaic Systems in Germany,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 4, no. 2, pp. 534-542, 2012.
- [26] P. Ferreira, P. Carvalho, L. Ferreira και M. Ilic, «Distributed Energy Resources Integration Challenges in Low-Voltage Networks: Voltage Control Limitations and Risk of Cascading,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 4, no. 1, pp. 82-88, 2012.
- [27] J. Trant, F. Geth, D. Six και J. Driesen, «Multiobjective Battery Storage to Improve PV Integration in Residential Distribution Grids,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 4, no. 1, pp. 182-191, 2012.
- [28] A. O'Connell, D. Flynn και A. Keane, «Rolling Multi-Period Optimization to Control Electric Vehicle Charging in Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 29, no. 1, pp. 340-348, 2013.
- [29] F. Marra, G. Yang, C. Traeholt, J. Ostergaard και E. Larsen, «A decentralized Storage Strategy for Residential Feeders With Photovoltaics,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 5, no. 2, pp. 974-981, 2013.
- [30] E. Dall'Anese, S. Dhople και G. Giannakis, «Optimal Dispatch of Photovoltaic Inverters in Residential Distribution Systems,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 5, no. 2, pp. 487-497, 2014.
- [31] J. v. Appen, T. Stetz, M. Braun και A. Schmiegel, «Local Voltage Control Strategies for PV Storage Systems in Distribution Grids,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 5, no. 2, pp. 1002-1009, 2014.
- [32] S. Weckx, C. Gonzalez και J. Driesen, «Combined Central and Local Active and Reactive Power Control of PV Inverters,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 5, no. 3, pp. 776-784, 2014.
- [33] X. Su, M. Masoum και P. Wolfs, «Optimal PV Inverter Reactive Power Control and Real Power Curtailment to Improve Performance of Unbalanced Four-Wire LV Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 5, no. 3, pp. 967-977, 2014.
- [34] T. Stetz, K. Diwold, M. Kraiczy, D. Geibel, S. Schmidt και M. Braun, «Techno-Economic Assessment of Voltage Control Strategies in Low Voltage Grids,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 5, no. 4, pp. 2125-2132, 2014.
- [35] M. Alam, K. M. Muttaqi και D. Sutanto, «A Multi-Mode Control Strategy for VAr Support by Solar PV Inverters in Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 30, no. 3, pp. 1316-1326, 2014.
- [36] O. Gargica, P. Nguyen, W. Kling και T. Uhl, «Microinverter Curtailment Strategy for Increasing Photovoltaic Penetration in Low-Voltage Networks,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 6, no. 2, pp. 369-379, 2015.
- [37] F. Geth, J. Tant, R. Belmans και J. Driesen, «Balanced and Unbalanced Inverter Strategies in Battery Storage Systems for Low-voltage Grid Support,» *IET GTD*, pp. Volume 9, no. 10, pp. 929-936, 2015.
- [38] A. Navarro-Espinosa και L. Ochoa, «Increasing the PV Hosting Capacity of LV Networks: OLTC-fitted Transformers vs. Reinforcements,» σε *ISGT North America conference*, Washington, DC, USA, 2015.

- [39] Y. Wang, K. Tan, X. Peng και P. So, «Coordinated Control of Distributed Energy-Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. Volume 31, no. 3, pp. 1132-1141, 2015.
- [40] G. Yang, F. Marra, M. Juamperez, S. Kjaer, S. Hashemi, J. Ostergaard, H. Ipsen και K. Frederiksen, «Voltage Rise Mitigation for Solar PV Integration at LV Grids Studies from PVNET. dk,» *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, pp. Volume 3, no. 3, pp. 411-421, 2015.
- [41] J. Quiros-Tortos, L. Ochoa, S. Alnaser και T. Butler, «Control of EV Charging Points for Thermal and Voltage Management of LV Networks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 31, no. 4, pp. 3028-3039, 2015.
- [42] B. Robbins και A. Dominguez-Garcia, «Optimal Reactive Power Dispatch for Voltage Regulation in Unbalanced Distribution Systems,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 31, no. 4, pp. 2903-2913, 2015.
- [43] R. Kabiri, D. Holmes, B. McGrath και L. Meegahapola, «LV Grid Voltage Regulation Using Transformer Electronic Tap Changing, With PV Inverter Reactive Power Injection,» *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, pp. Volume 3, no. 4, pp. 1182-1192, 2015.
- [44] E. Pompodakis, I. Drougakis, I. Lelis και M. Alexiadis, «Photovoltaic systems in low-voltage networks and overvoltage correction with reactive power control,» *IET RPG*, pp. Volume 10, no. 3, pp. 410-417, 2016.
- [45] S. Weckx και J. Driesen, «Optimal Local Reactive Power Control by PV Inverters,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 7, no. 4, pp. 1624-1633, 2016.
- [46] N. Efkarpidis, T. D. Rybel και J. Driesen, «Optimal Placement and Sizing of Active In-Line Voltage Regulators in Flemish LV Distribution Grids,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. Volume 52, no. 6, pp. 4577-4584, 2016.
- [47] A. Giannitrapani, S. Paoletti, A. Vicino και D. Zarilli, «Optimal Allocation of Energy Storage Systems for Voltage Control in LV Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 8, no. 6, pp. 2859-2870, 2016.
- [48] A. Procopiou, J. Quiros-Tortos και L. Ochoa, «HPC-Based Probabilistic Analysis of LV Networks with EVs: Impacts and Control,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 8, no. 3, pp. 1479-1487, 2016.
- [49] A. Molina-Garcia, R. Mastromauro, T. Garcia-Sanchez, S. Pugliese, M. Liserre και S. Stasi, «Reactive Power Flow Control for PV Inverters Voltage Support in LV Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 8, no. 1, pp. 447-456, 2016.
- [50] R. Yang και Y. Zhang, «Coordinated Optimization of Distributed Energy Resources and Smart Loads in Distribution Systems,» σε *PESGM*, Boston, MA, USA, 2016.
- [51] A. Haque, P. Nguyen, T. Vo και F. Bliet, «Agent-based Unified Approach for Thermal and Voltage Constraint Management in LV Distribution Network,» *Electric Power Systems Research*, pp. Volume 143, February 2017, pp. 462-473, 2016.
- [52] C. L. Floc, S. Bansal, C. Tomlin, S. J. Moura και M. Zeilinger, «Plug-and-Play Model Predictive Control for Load Shaping and Voltage Control in Smart

- Grids,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 10, no. 3, pp. 2334-2344, 2017.
- [53] S. Karagiannopoulos, P. Aristidou και G. Hug, «Hybrid Approach for Planning and Operating Active Distribution Grids,» *IET GTD*, pp. Voume 11, no. 3, pp. 685-695, 2017.
- [54] D. Zarilli, A. Giannitrapani, S. Paoletti και A. Vicino, «Energy Storage Operation for Voltage Control in Distribution Networks: A Receding Horizon Approach,» *IEEE Transactions on Control Systems and Technology*, pp. Volume 26, no. 2, pp. 599-609, 2017.
- [55] S. Karagiannopoulos, L. Roald, P. Aristidou και G. Hug, «Operational Planning of Active Distribution Grids under Uncertainty,» σε *IREP Symposium Announcement, X Bulk Power Systems Dynamics and Control Symposium*, Espinho, Portugal, 2017.
- [56] M. Zeraati, M. Golshan και J. Guerrero, «A Consensus-Based Cooperative Control of PEV Battery and PV Active Power Curtailment for Voltage Regulation in Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 10, no.1, pp. 670-680, 2017.
- [57] A. Haque, M. Nijhuis, G. Ye, P. Nguyen, F. Bliet και J. Sloopweg, «Integrating Direct and Indirect Load Control for Congestion Management in LV Networks,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 10, no. 1, pp. 741-751, 2017.
- [58] J. Watson, N. Watson και I. Lestas, «Optimized Dispatch of Energy Storage Systems in Unbalanced Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 9, np. 2, pp. 639-650, 2017.
- [59] T. Aziz και N. Ketjoy, «Enhancing PV Penetration in LV Networks Using Reactive Power Control and On Load Tap Changer With Existing Transformers,» *IEEE Access*, pp. Volume 6, pp. 2683-2691, 2017.
- [60] J. Wang, G. Bharati, S. Paudyal, O. Ceylan, B. Bhattari και K. Myers, «Coordinated Electric Vehicle Charging With Reactive Power Support to Distribution Grids,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. Volume 15, no. 1, pp. 54-63, 2018.
- [61] S. Karagiannopoulos, P. Aristidou και G. Hug, «A Centralised Control Method for Tackling Unbalances in Active Distribution Grids,» σε *PSCC*, Dublin, Ireland, 2018.
- [62] Q. Nguyen, H. Padullaparti, K. Lao, S. Santoso, X. Ke και N. Samaan, «Exact Optimal Power Dispatch in Unbalanced Distribution Systems With High PV Penetration,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 34, no. 1, pp. 718-728, 2018.
- [63] I. Avramidis, V. Evangelopoulos, P. Georgilakis και N. Hatziaargyriou, «Demand Side Flexibility Schemes for Facilitating the High Penetration of Residential Distributed Energy Resources,» *IET GTD*, pp. Volume 12, no. 18, pp. 4079-4088, 2018.
- [64] M. Zeraati, M. Golshan και J. Guerrero, «Voltage Quality Improvement in Low Voltage Distribution Networks Using Reactive Power Capability of Single-Phase PV Inverters,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 10, no. 5, pp. 5057-5065, 2018.

- [65] L. Gutierrez-Lagos και L. Ochoa, «OPF-Based CVR Operation in PV-Rich MV–LV Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 34, no. 4, pp. 2778-2789, 2019.
- [66] H. Almasalma, S. Claeys και G. Deconinck, «Peer-to-peer-based integrated grid voltage support function for smart photovoltaic inverters,» *Applied Energy*, pp. Volume 239, April 2018, pp. 1037-1048, 2019.
- [67] S. Karagiannopoulos, K. Gallmann, M.G. Vaya, P. Aristidou και G. Hug, «Active Distribution Grids Offering Ancillary Services in Islanded and Grid-Connected Mode,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 11. no. 1, pp. 623-633, 2019.
- [68] P. Lusi, L. Andrew, S. Chakraborty, A. Liebman και G. Tack, «Reducing the Unfairness of Coordinated Inverter Dispatch in PV-Rich Distribution Networks,» σε *IEEE Powertech*, Milan, Italy, 2019.
- [69] S. Karagiannopoulos, R. Dobbe, P. Aristidou, D. Callaway και G. Hug, «Data-driven Control Design Schemes in Active Distribution Grids: Capabilities and Challenges,» σε *IEEE Powertech*, Milan, Italy, 2019.
- [70] n. Nazir, P. Racherla και M. Almassalki, «Optimal Multi-Period Dispatch of Distributed Energy Resources in Unbalanced Distribution Feeders,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 35, no. 4, pp. 2683-2692, 2020.
- [71] M. Liu, A. Procopiou, K. Petrou, L. Ochoa, T. Langstaff, J. Harding και J. Theunissen, «On the Fairness of PV Curtailment Schemes in Residential Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 11, no. 5, pp. 4502-4512, 2020.
- [72] S. Karagiannopoulos, G. Valverde, P. Aristidou και G. Hug, «Clustering Data-Driven Local Control Schemes in Active Distribution Grids,» *IEEE Systems Journal*, pp. Volume 15, no. 1, pp. 1467-1476, 2020.
- [73] S. Karagiannopoulos, C. Mylonas, P. Aristidou και G. Hug, «Active Distribution Grids Providing Voltage Support: The Swiss Case,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 12, no. 1, pp. 268-278, 2020.
- [74] P. Lusi, L. Andrew, A. Liebman και G. Tack, «The Added Value of Coordinating Inverter Control,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 12, no. 2, pp. 1238-1248, 2020.
- [75] I. Avramidis, F. Capitanescu και G. Deconinck, «A Comprehensive Multi-Period Optimal Power Flow Framework for Smart LV Networks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, p. Early Access, 2020.
- [76] I. Avramidis, F. Capitanescu και G. Deconinck, «A Generic Multi-period Optimal Power Flow Framework for Combating Operational Constraints via Residential Flexibility Resources,» *IET GTD*, pp. Voume 15, no. 2, pp. 306-320, 2020.
- [77] B. Liu, K. Meng, Z. Dong, P. Wong και W. Wei, «Optimal Placement of Phase-Reconfiguration Devices in Low-Voltage Distribution Network with Residential PV Generation,» *IET RPG*, pp. Volume 14, no. 18, pp. 3752-3761, 2021.
- [78] I. Avramidis, V. Evangelopoulos, P. Georgilakis και N. Hatziargyriou, «Predictive Control in LV Networks: A 3-Stage Approach for Smart Sustainable Buildings,» σε *IEEE Powertech*, Madrid, Spain, 2021.

- [79] R. Ciric, A. Feltrin και L. Ochoa, «Power flow in four-wire distribution networks-general approach,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 18, no. 4, pp. 1283-1290, 2003.
- [80] R. Yan και T. Saha, «Investigation of Voltage Stability for Residential Customers Due to High Photovoltaic Penetrations,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 27, no. 2, pp. 651-662, 2012.
- [81] G. Valverde και T. V. Cutsem, «Model Predictive Control of Voltages in Active Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 4, no. 4, pp. 2152-2161, 2013.
- [82] F. Marra, G. Y. Yang, Y. T. Fawzy, C. Træholt, E. Larsen, R. Garcia-Valle και M. M. Jensen, «Improvement of Local Voltage in Feeders With Photovoltaic Using Electric Vehicles,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 28, no. 3, pp. 3515-3516, 2013.
- [83] F. Marra, G. Yang, C. Traeholt, E. Larsen, J. Ostergaard, B. Blazic και W. Deprez, «EV Charging Facilities and Their Application in LV Feeders With Photovoltaics,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 4, no. 3, pp. 1533-1540, 2013.
- [84] G. Mokhtari, A. Ghos, G. Nourbaksh και G. Ledwich, «Smart Robust Resources Control in LV Network to Deal With Voltage Rise Issue,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 4, no. 4, pp. 1043-1050, 2013.
- [85] R. Caldon, M. Coppo και R. Turri, «Distributed Voltage Control Strategy for LV Networks with Inverter-interfaced Generators,» *Electric Power Systems Research*, pp. Volume 107, February 2014, pp. 85-92, 2013.
- [86] F. Shahnian, P. Wolfs και A. Ghosh, «Voltage Unbalance Reduction in Low Voltage Feeders by Dynamic Switching of Residential Customers Among Three Phases,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 5, no. 3, pp. 1318-1327, 2014.
- [87] S. Hashemi, J. Ostergaard και G. Yang, «A Scenario-Based Approach for Energy Storage Capacity Determination in LV Grids With High PV Penetration,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 5, no. 3, pp. 1514-1522, 2014.
- [88] X. Su, M. Masoum και P. Wolfs, «Comprehensive Optimal Photovoltaic Inverter Control Strategy in Unbalanced Three-phase Four-wire Low Voltage Distribution Networks,» *IET GTD*, pp. Volume 8, no. 12, pp. 1848-1859, 2014.
- [89] A. Navarro-Espinosa και P. Mancarella, «Probabilistic Modeling and Assessment of the Impact of Electric Heat Pumps on Low Voltage Distribution Networks,» *Applied Energy*, pp. Volume 127, August 2014, pp. 249-266, 2014.
- [90] B. Olek και M. Wierzbowski, «Local Energy Balancing and Ancillary Services in Low-Voltage Networks With Distributed Generation, Energy Storage, and Active Loads,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. Volume 62, no. 44, pp. 2499-2508, 2014.
- [91] I. d. C. Mendaza, I. Szczesny, J. Pilai και B. Bak-Jensen, «Flexible Demand Control to Enhance the Dynamic Operation of Low Voltage Networks,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 6, no. 2, pp. 705-715, 2014.

- [92] S. Weckx και J. Driesen, «Load Balancing With EV Chargers and PV Inverters in Unbalanced Distribution Grids,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 6, no. 2, pp. 635-643, 2015.
- [93] F. Olivier, P. Aristidou, D. Ernst και T. V. Cutsem, «Active Management of Low-Voltage Networks for Mitigating Overvoltages Due to Photovoltaic Units,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 7, no. 2, pp. 926-936, 2015.
- [94] M. Alam, K. Muttaqi και D. Sutanto, «Community Energy Storage for Neutral Voltage Rise Mitigation in Four-Wire Multigrounded LV Feeders With Unbalanced Solar PV Allocation,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 6, no. 6, pp. 2845-2855, 2015.
- [95] N. Leemput, F. Geth, J. V. Roy, J. Buscher και J. Driesen, «Reactive Power Support in Residential LV Distribution Grids through Electric Vehicle Charging,» *Sustainable Energy, Grids and Networks*, pp. Volume 3, September 2015, pp. 24-35, 2015.
- [96] A. Navarro-Espinosa και L. Ochoa, «Probabilistic Impact Assessment of Low Carbon Technologies in LV Distribution Systems,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 31, no. 3, pp. 2192-2203, 2015.
- [97] C. Long, A. Procopiou, L. Ochoa, G. Bryson και D. Randles, «Performance of OLTC-based Control Strategies for LV Networks with Photovoltaics,» σε *PESGM*, Denver, CO, USA, 2015.
- [98] C. Long και L. Ochoa, «Voltage Control of PV-Rich LV Networks: OLTC-Fitted Transformer and Capacitor Banks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 31, no. 5, pp. 4016-4025, 2015.
- [99] S. Chalise, H. Atia, B. Poudel και R. Tonkoski, «Impact of Active Power Curtailment of Wind Turbines Connected to Residential Feeders for Overvoltage Prevention,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 7, no. 2, pp. 471-479, 2015.
- [100] A. Momeneh, M. Castilla, J. Miret, P. Marti και M. Velasco, «Comparative Study of Reactive Power Control Methods for Photovoltaic Inverters in Low-voltage Grids,» *IET RPG*, pp. Volume 10, no. 3, pp. 310-318, 2016.
- [101] B. Bletterie, S. Kadam, R. Bolgaryn και A. Zegers, «Voltage Control with PV Inverters in Low Voltage Networks—In Depth Analysis of Different Concepts and Parameterization Criteria,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 32, no. 1, pp. 177-185, 2016.
- [102] Y. Fujimoto, H. Kikusato, S. Yoshizawa, S. Kawano, A. Yoshida, S. Wakao, N. Murata, Y. Amano, S. Tanabe και Y. Hayashi, «Distributed Energy Management for Comprehensive Utilization of Residential Photovoltaic Outputs,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 9, no. 2, pp. 1216-1227, 2016.
- [103] A. Procopiou και L. Ochoa, «Voltage Control in PV-Rich LV Networks Without Remote Monitoring,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 32, no. 2, pp. 1224-1236, 2016.
- [104] S. Hashemi και J. Ostergaard, «Efficient Control of Energy Storage for Increasing the PV Hosting Capacity of LV Grids,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 9, no. 3, pp. 2295-2303, 2016.



- [105] S. Hashemi, J. Ostergaard, T. Degner, R. Brandl και W. Heckmann, «Efficient Control of Active Transformers for Increasing the PV Hosting Capacity of LV Grids,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. Volume 13, no. 1, pp. 270-277, 2016.
- [106] S. Karagiannopoulos, P. Aristidou, A. Ulbig, S. Koch και G. Hug, «Optimal Planning of Distribution Grids Considering Active Power Curtailment and Reactive Power Control,» σε *PESGM*, Boston, MA, USA, 2016.
- [107] P. Fortenbacher, J. Mathieu και G. Andersson, «Modeling and Optimal Operation of Distributed Battery Storage in Low Voltage Grids,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 32, no. 6, pp. 4340-4350, 2017.
- [108] A. Ballanti και L. Ochoa, «Voltage-Led Load Management in Whole Distribution Networks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 33, no. 2, pp. 1544-1554, 2017.
- [109] P. Fortenbacher, A. Ulbig και G. Andersson, «Optimal Placement and Sizing of Distributed Battery Storage in Low Voltage Grids Using Receding Horizon Control Strategies,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 33, no. 3, pp. 2383-2394, 2017.
- [110] J. Leon, A. Padilha-Feltrin και A. Filho, «Voltage control in low voltage distribution networks with high penetration photovoltaic system,» σε *ISGT Latin America conference*, Quito, Ecuador, 2017.
- [111] A. Procopiou, K. Petrou, L. Ochoa, T. Langstaff και J. Theunissen, «Adaptive decentralized Control of Residential Storage in PV-Rich MV–LV Networks,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 34, no. 3, pp. 2378-2389, 2018.
- [112] S. Karagiannopoulos, P. Aristidou και G. Hug, «Data-Driven Local Control Design for Active Distribution Grids Using Off-Line Optimal Power Flow and Machine Learning Techniques,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 10, no. 6, pp. 6461-6471, 2019.
- [113] J. Franco, A. Procopiou, J. Quiros-Tortos και L. Ochoa, «Advanced control of OLTC-enabled LV networks with PV systems and EVs,» *IET GTD*, pp. Volume 13, no. 14, pp. 2967-2975, 2019.
- [114] Y. Huang, «Day-Ahead Optimal Control of PEV Battery Storage Devices Taking Into Account the Voltage Regulation of the Residential Power Grid,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 34, no. 6, pp. 4154-4167, 2019.
- [115] J. Engels, B. Claessens και G. Deconinck, «Grid-Constrained Distributed Optimization for Frequency Control With Low-Voltage Flexibility,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 11, no. 1, pp. 612-622, 2019.
- [116] S. Dhulipala, R. Monteiro, R. d. S. Teixeira, C. Ruben, A. Bretas και G. Guimarães, «Distributed Model-Predictive Control Strategy for Distribution Network Volt/VAR Control: A Smart-Building-Based Approach,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. Volume 55, no. 6, pp. 7041-7051, 2019.
- [117] T. Chen, Y. Zheng, B. Chaudhuri και S. Hui, «Distributed Electric Spring Based Smart Thermal Loads for Overvoltage Prevention in LV Distributed Network Using Dynamic Consensus Approach,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 11, no. 4, pp. 2098-2108, 2019.

- [118] K. Petrou και L. Ochoa, «Customer-Led Operation of Residential Storage for the Provision of Energy Services,» σε *ISGT Latin America conference*, Gramado, Brazil, 2019.
- [119] A. Gastalver-Rubio, E. Romero-Ramos και J. Maza-Ortega, «Improving the Performance of Low Voltage Networks by an Optimized Unbalance Operation of Three-Phase Distributed Generators,» *IEEE Access*, pp. Volume 7, 177504 - 177516, 2019.
- [120] A. Procopiou και L. Ochoa, «Asset Congestion and Voltage Management in Large-Scale MV-LV Networks with Solar PV,» *IEEE Transactions on Power Systems*, p. Early Access, 2021.
- [121] W. Tang, Y. Cai, L. Zhang, B. Zhang, Z. Wang, Y. Fu και X. Xiao, «Hierarchical Coordination Strategy for Three-phase MV and LV Distribution Networks with High-penetration Residential PV Units,» *IET RPG*, pp. Volume 14, no. 9, pp. 3996-4006, 2020.
- [122] I. Avramidis, F. Capitanescu και G. Deconinck, «Practical Approximations and Heuristic Approaches for Managing Shiftable Loads in the Multi-period Optimal Power Flow Framework,» *Electric Power Systems Research*, pp. Volume 190, January 2021, 106684, 2020.
- [123] B. Wei, Z. Qiu και G. Deconinck, «A Mean-Field Voltage Control Approach for Active Distribution Networks With Uncertainties,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. Volume 12, no. 2, pp. 1455-1466, 2020.
- [124] A. Eggli, S. Karagiannopoulos, S. Bolognani και G. Hug, «Stability Analysis and Design of Local Control Schemes in Active Distribution Grids,» *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Volume 36, no. 3, pp. 1900-1909, 2020.
- [125] K. Luo και W. Shi, «Comparison of Voltage Control by Inverters for Improving the PV Penetration in Low Voltage Networks,» *IEEE Access*, pp. Volume 8, pp. 161488-161497, 2020.
- [126] W. Sun, F. Neumann και G. Harrison, «Robust Scheduling of Electric Vehicle Charging in LV Distribution Networks Under Uncertainty,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. Volume 56, no. 5, pp. 5785-5795, 2020.
- [127] L. Wang, R. Yan, F. Bai, T. Saha και K. Wang, «A Distributed Inter-Phase Coordination Algorithm for Voltage Control With Unbalanced PV Integration in LV Systems,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. Volume 11, no. 4, pp. 2687-2697, 2020.