



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

**Συμβολή στην ανάπτυξη κατανεμημένων αλγορίθμων για τον
έλεγχο και τη λειτουργία ευφών δικτύων διανομής**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιάσοντας, Ν. Κουβελιώτης - Λυσίκατος

Αθήνα, Μάρτιος 2019



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

Συμβολή στην ανάπτυξη κατανεμημένων αλγορίθμων για τον έλεγχο και τη λειτουργία ευφυών δικτύων διανομής

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιάσοντας, Ν. Κουβελιώτης - Λυσίκατος

Συμβουλευτική Επιτροπή : Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου
Σταύρος Α. Παπαθανασίου
Πάυλος Σ. Γεωργιλάκης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 12^η Μαρτίου 2019.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Αναπ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ανδρέας-Γεώργιος Σταφυλοπάτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σπύρος Χατζηβασιλειάδης
Αναπ. Καθηγητής D.T.U.

.....
Αναστάσιος Μπακιρτζής
Καθηγητής Α.Π.Θ.

.....
Αριστείδης Παγουρτζής
Αναπ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2019

.....
Ιάσοντας, Ν. Κουβελιώτης - Λυσίκατος
Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ιάσοντας, Ν. Κουβελιώτης - Λυσίκατος
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Τα σύγχρονα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις και πρωτόγνωρα προβλήματα, για τα οποία αναζητούνται εναλλακτικές λύσεις μέσα από τις καινοτόμες τεχνολογίες των ευφυών δικτύων. Ωστόσο, η ραγδαία αύξηση της «νοημοσύνης» και του όγκου των δεδομένων στα ευφυή δίκτυα οδήγησε στην διερεύνηση τεχνικών ελέγχου, οι οποίες θα μπορούν να επιτύχουν αποδοτικό και σπιβαρό έλεγχο διαφυλάσσοντας την ιδιωτικότητα των χρηστών και κατανέμοντας την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος από ένα κεντρικό σημείο, στο επίπεδο κάθε στοιχειώδους μονάδας ελέγχου.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή στοχεύει στην ανάπτυξη και διερεύνηση κατανεμημένων τεχνικών για τη λειτουργία και τον έλεγχο του ευφυούς Δικτύου Διανομής, οι οποίες θα απαιτούν ανταλλαγή πληροφοριών μόνο μεταξύ γειτονικών (ομότιμων) κόμβων του συστήματος και θα επιτυγχάνουν τη βέλτιστη λύση του προβλήματος απόφασης, χωρίς τη ανάγκη κεντρικού συντονισμού. Αρχικά, πραγματοποιείται μια εποπτική ταξινόμηση μοντέλων κατανεμημένης βελτιστοποίησης και στη συνέχεια αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση των σχετικών με τις προτεινόμενες μεθόδους μελετών.

Πρώτα, αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της Οικονομικής Κατανομής Φορτίου για μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής, για την επίλυση του οποίου χρησιμοποιείται το μοντέλο Τοπικών Εξισώσεων Κλωνωτή. Η βασική μέθοδος ενσωματώνει τα τεχνικά όρια των μονάδων και τον εξισωτικό περιορισμό κάλυψης φορτίου και στη συνέχεια επεκτείνεται προκειμένου να λαμβάνει υπόψη τις απώλειες ενεργού ισχύος μέσω του κατανεμημένου υπολογισμού των Συντελεστών Ποινής Απωλειών κάθε μονάδας.

Στη συνέχεια, αναπτύσσεται μεθοδολογία η οποία επιλύει κατανεμημένα το πρόβλημα της ροής φορτίου. Η μέθοδος βασίζεται στον αλγόριθμο Newton-Raphson σε συνδυασμό με ένα κατανεμημένο πρωτόκολλο για τον υπολογισμό των διορθώσεων τάσης και γωνίας. Η μέθοδος εκμεταλλεύεται μια σημαντική ιδιότητα της Ιακωβιανής μήτρας των εξισώσεων ροής φορτίου.

Αξιοποιώντας την ίδια ιδιότητα μελετάται και το πρόβλημα της ρύθμισης τάσης, το οποίο διατυπώνεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης για την εύρεση των ελάχιστων εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος από τους ελεγχόμενους πόρους του ευφυούς ΔΔ με σκοπό την αντιμετώπιση των παραβιάσεων τάσης. Η μέθοδος χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο κατάβασης βαθμίδας σε συνδυασμό με μια μέθοδο κυρτής βελτιστοποίησης που επιλύει κατανεμημένα την αντιστροφή της Ιακωβιανής των εξισώσεων ροής φορτίου του δικτύου.

Η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα κάθε προτεινόμενης μεθόδου διερευνάται και αξιολογείται με μια σειρά σεναρίων προσομοίωσης, πρώτα σε απλοποιημένα δίκτυα διανομής λίγων κόμβων και στη συνέχεια σε μεγαλύτερα, πρότυπα δίκτυα.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, διερευνάται η δυνατότητα χρήσης τεχνολογιών κατακεντρωμένων μητρώων (blockchain) για την αντιμετώπιση προβλημάτων ευφυών δικτύων, αναγνωρίζοντας τις δυνατότητες και τους περιορισμούς που αυτές εμφανίζουν. Προτείνεται η επίλυση συγκεκριμένων κατηγοριών προβλημάτων και σε αυτήν την κατεύθυνση σχεδιάζονται και υλοποιούνται δύο σενάρια αποκεντρωμένων εφαρμογών, ένα για την αυτοματοποίηση της προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας και ένα για τη λειτουργία αποκεντρωμένης αγοράς ενέργειας στα πλαίσια των ενεργειακών κοινοτήτων.

Λέξεις κλειδιά

Ευφυή Δίκτυα, Δίκτυα Διανομής, Κατακεντρωμένος/Αποκεντρωμένος έλεγχος, Κατακεντρωμένη Βελτιστοποίηση, Οικονομική Κατανομή Φορτίου, Ροή Φορτίου, Βέλτιστη Ρύθμιση Τάσης, Κατακεντρωμένα Μητρώα, Ενεργειακές Κοινότητες.

Abstract

Modern power networks face major challenges and newly posed problems for which alternative solutions are examined, driven by smart grid technologies. However, the rapid increase of networked intelligent electronic devices and data volume in Active Distribution Networks lead the way for the investigation of innovative solutions that would achieve efficient and robust control by dispersing the solution of the centralized problem at the level of each elementary control unit, ensuring at the same time the data privacy of the users.

This thesis aims at developing and investigating distributed techniques for the operation and control of Smart Distribution Grids. These methods require the exchange of information only between adjacent nodes (peers) and achieve the optimal solution without the need for central coordination. Initially, an overview of the most common distributed optimization models is given, together with a detailed literature review of the studies related to the proposed methods.

First, the problem of Economic Dispatch for Distributed Generation (DG) units is tackled, for which the Local Replicator Equation model is employed. The basic algorithm integrates the technical limits of the units and the generation-demand equality constraint and is thereafter extended to optimality take into account the active power losses. It achieves this by calculating in a distributed way the Loss Penalty Factors of the DG units.

Afterwards, the problem of load flow is examined. A distributed methodology is developed which is based on the Newton-Raphson algorithm in combination with a distributed protocol for calculating the correction values of voltages and angles. The method exploits an important property of the Jacobian matrix of the power flow equations.

The same property is used for reaching a distributed solution for the problem of voltage control which is formulated as a distributed optimization problem that aims at minimizing the active and reactive injections of the grid's controllable resources, that will alleviate any voltage violations. The method uses a gradient descent algorithm and an optimization method that performs the inversion of the Jacobian matrix of the power flow equations in a distributed manner.

The accuracy and the effectiveness of each developed method, is investigated and evaluated through a series of simulation scenarios, first in simplified distribution grids with a few nodes and then in larger networks.

In the final chapter, the applicability of blockchain technologies to smart grid problems is investigated, by identifying their potential benefits and limitations. Specific categories of energy related problems are considered particularly relevant for handling them with blockchain technologies. In this direction, two scenarios of decentralized applications

are designed and implemented, the first one pertaining to the automation of the electricity supply and the second one to the facilitation of decentralized energy markets in the context of energy communities.

Keywords

Smart Grids, Distribution Grids, Distributed/Decentralized Control, Distributed Optimization, Economic Dispatch, Load Flow, Optimal Voltage Control, Distributed Ledger, Blockchain, Energy Communities.

Πρόλογος

Η ολοκλήρωση της κοπιώδους προσπάθειας της μελέτης και προετοιμασίας μιας διδακτορικής διατριβής φέρνει αναπόφευκτα στο προσκήνιο μια σειρά ανάμικτων αλλά και αντικρουόμενων συναισθημάτων. Χαρά και θλίψη εναλλάσσονται ιλιγγιωδώς με το κλείσιμο αυτής της φαινομενικά μοναχικής προσπάθειας, κατά τη διάρκεια της οποίας συχνά αναδύεται, άλλοτε περισσότερο και άλλοτε λιγότερο, μια αποκαρδιωτική αίσθηση ματαιότητας. Βέβαια, βλέποντας τα πράγματα πιο ψύχραιμα, καμία προσπάθεια δε μπορεί να είναι ατομική αλλά συλλογική. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο, θα αποπειραθώ να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και την αγάπη μου σε όλους εκείνους τους ανθρώπους οι οποίοι με στήριξαν και με ενθάρρυναν προς αυτόν τον σκοπό και επομένως συνδιαμόρφωσαν αυτή την εργασία.

Πρώτα από όλους πρέπει να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Νίκο Χατζηαργυρίου, ο οποίος πρέπει να πω, στωικά με καθοδηγούσε όλα αυτά τα χρόνια, ενώ παράλληλα μου παρείχε την ελευθερία αλλά και την εμπιστοσύνη προκειμένου να αναπτύξω και να εντάξω στην εργασία τα προσωπικά μου ενδιαφέροντα και προβληματισμούς.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Σταύρο Παπαθανασίου και τον Αναπ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Παύλο Γεωργιλάκη για την αρμονική μας συνεργασία και τις πολύτιμες συμβουλές τους. Ειδικά για τον κ. Γεωργιλάκη, είχα την τύχη τόσο να παρακολουθήσω το μεταπτυχιακό του μάθημα όσο και να συνεργαστούμε σε μια εργασία στα πλαίσια της διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς επιτροπής για τις ιδιαίτερα εύστοχες και χρήσιμες υποδείξεις, τον κ. Α. Γ. Σταφυλοπάτη Καθηγητή Ε.Μ.Π., τον κ. Σ. Χατζηβασιλειάδη Αναπλ. Καθηγητή D.T.U., τον κ. Α. Παγουρτζή Αναπ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. και τον κ. Α. Μπακιρτζή Καθηγητή Α.Π.Θ.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην Υ.Δ. του Chalmers Κ. Αντωνιάδου-Πλυταρία για την αγαστή μας συνεργασία και στο συνάδελφο και φίλο Δρ. Π. Κοτσαμπόπουλο ο οποίος συνετίβλεψε την προπτυχιακή διπλωματική μου εργασία και με ενθάρρυνε στη συνέχεια να ενταχθώ στην ερευνητική ομάδα καθώς και να ξεκινήσω διδακτορικό. Για τις σημαντικότερες συμβουλές σε ερευνητικά αλλά και διαχειριστικά ζητήματα των ερευνητικών προγραμμάτων με τα οποία ασχολήθηκα, οφείλω πολλές ευχαριστίες στον Δρ. Α. Δημέα καθώς επίσης και στη Δρ. Δ. Κουκουλά με την οποία είχα τη μεγάλη χαρά να συνεργαστώ σε διάφορα θέματα.

Τους αγαπητούς φίλους και συναδέλφους Κ. Λατούφη, Α. Βασιλάκη και Φ. Παλαιογιάννη ευχαριστώ θερμά για τη συνεργασία μας σε θέματα αγροτικής ηλεκτροδότησης και επιπρόσθετα τους δύο τελευταίους σε θέματα ενεργειακών κοινοτήτων.

Τους καλούς φίλους και Υ.Δ. Γ. Μεσσήνη και Α. Ρήγα θα ήθελα να ευχαριστήσω για τις παραγωγικές συζητήσεις καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας καθώς και τους συνάδελφους και Υ.Δ. Β. Κλεφτάκη, Δ. Λαγό και τον πρώην συνάδελφο Μ. Μανιατόπουλο για τη συνεργασία μας σε διάφορα εργαστηριακά θέματα. Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στους Γ. Κατσαρό και Ν. Κορρέ για την τεχνική τους υποστήριξη σε ζητήματα ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων και πληροφορικής αντίστοιχα. Τέλος, πολλές ευχαριστίες στον Υ.Δ. Ι. Καρακίτσιο για την παρουσίαση εργασίας εκ μέρους μου σε συνέδριο. Ακόμη, τις πιο θερμές μου ευχαριστίες οφείλω σε όσους ενδεχομένως αμέλησα να αναφέρω αλλά και συνολικά σε όλα τα μέλη της ερευνητικής ομάδας SmartRue σημειώνοντας σε αυτό το σημείο το αξιοθαύμαστο κλίμα συνεργασίας που επικρατεί στους κόλπους της. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους προπτυχιακούς φοιτητές με τους οποίους συνεργαστήκαμε όλα αυτά τα χρόνια στα πλαίσια της εκπόνησης της διπλωματικής τους εργασίας.

Τις ιδιαίτερα θερμές ευχαριστίες στον αγαπητούς φίλους και συνοδοιπόρους σε αυτήν την προσπάθεια Δρ. Δ. Τράκα και Δρ. Χ. Κουρούγιωργα για την τεχνική αλλά και ψυχολογική τους υποστήριξη μέσα από αμέτρητες ώρες συζητήσεων. Ένα τεράστιο ευχαριστώ στον αγαπημένο φίλο Χ. Νασίκα για την παρότρυνσή του να ασχοληθώ με τις τεχνολογίες blockchain καθώς και για την τεχνική υποστήριξή του στο τελευταίο κεφάλαιο της διατριβής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την πολύ καλή μου φίλη Μ. Σαμαρά για τις σημαντικές συμβουλές της σε θέματα αγορών ενέργειας.

Πέρα από την απαραίτητη τεχνική καθοδήγηση όμως, πρέπει να σημειωθεί ότι αντίστοιχα σημαντική (αν όχι περισσότερο) είναι η πηγαία και αλτρουιστική αγάπη που έχω εισπράξει από όλους μου τους φίλους και φυσικά από την οικογένειά μου, τον πατέρα μου Νίκο, τη μητέρα μου Γιάννα, τη θεία μου Χρύσα, τη γιαγιά μου Θεανώ και τα αγαπημένα μου αδέρφια Οδυσσέα και Δάφνη. Η στήριξη όλων των προηγούμενων με διαμόρφωσε καθοριστικά, με στήριξε αλλά και με ώθησε σε οτιδήποτε έχω κάνει.

Κλείνοντας, το μεγαλύτερο ευχαριστώ αρμόζει στην αγαπημένη μου Εύα Ιωαννάτου, η καθημερινή φροντίδα και αγάπη της οποίας έπαιξε τον πιο καθοριστικό ρόλο για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Ιάσοντας Κουβελιώτης-Λυσίκατος

Μάρτιος 2019

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	iii
Πρόλογος	v
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων	xvii
Πίνακας Συντμήσεων	xix
1 Εισαγωγή.....	1
1.1. Το σύγχρονο τοπίο στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας.....	1
1.2. Τα ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας ως κυβερνοφυσικά συστήματα	3
1.3. Δίκτυα αισθητήρων - Internet Of Things	5
1.4. Η προσέγγιση της αποκέντρωσης	6
1.4.1. Η αποκέντρωση ως αρχιτεκτονική λειτουργίας του Ευφυούς ΔΔ	6
1.4.2. Πλεονεκτήματα της κατακευκτωμένης αρχιτεκτονικής.....	8
1.4.3. Ο συγχρονισμός και η αυτό-οργάνωση στη φύση.....	9
1.5. Σκοπός και δομή της διατριβής.....	9
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	13
2.1. Κατακευκτωμένη βελτιστοποίηση σε δικτυωμένα συστήματα.....	13
2.1.1. Βασικές έννοιες.....	13
2.2. Το πρόβλημα της «συναίνεσης» (consensus).....	15
2.2.1. Κατακευκτωμένος υπολογισμός μέσου όρου	15
2.2.2. Περιορισμοί του βασικού μοντέλου συναίνεσης	17
2.2.3. Κλάσεις τεχνικών κατακευκτωμένης βελτιστοποίησης	18
2.3. Εφαρμογές αποκεντρωμένου/κατακευκτωμένου ελέγχου για ευφυή δίκτυα	19
2.4. Οικονομική Κατανομή Φορτίου	19
2.5. Ροή φορτίου	21
2.6. Έλεγχος τάσης.....	21
2.6.1. Ταξινόμηση με βάση τη μοντελοποίηση κάθε στοιχείου	21
2.6.2. Ταξινόμηση με βάση τη μέθοδο επίλυσης	23

2.6.3. Συγκεντρωτική ταξινόμηση των υπό εξέταση μελετών ελέγχου τάσης.....	28
2.7. Σύνοψη και συμπεράσματα.....	32
3 Κατανεμημένη οικονομική κατανομή φορτίου.....	33
3.1. Οικονομική κατανομή φορτίου	33
3.1.1. Κριτήριο οικονομικής κατανομής φορτίου	34
3.2. Δυναμική Πληθυσμών.....	35
3.2.1. Μοντέλο εξισώσεων κλωνωτή	36
3.2.2. Κατανεμημένο μοντέλο εξισώσεων κλωνωτή.....	38
3.2.3. Ευστάθεια και σημείο ισορροπίας του κατανεμημένου μοντέλου.....	38
3.2.4. Μοντέλο εξισώσεων κλωνωτή διακριτού χρόνου.....	41
3.3. Κατανεμημένη επίλυση του προβλήματος Οικονομικής ΚΦ για μονάδες ΔΠ.....	42
3.3.1. Μοντελοποίηση του δικτύου διανομής	42
3.3.2. Συναρτήσεις ευημερίας του κατανεμημένου μοντέλου	43
3.3.3. Κατανεμημένος αλγόριθμος	43
3.3.4. Αντιμετώπιση των συμφορήσεων στις γραμμές	44
3.4. Εισαγωγή απωλειών στο πρόβλημα της Οικονομικής ΚΦ.....	46
3.5. Κατανεμημένη επίλυση της Οικονομικής ΚΦ με απώλειες	46
3.5.1. Τροποποίηση της συνάρτησης ευημερίας.....	47
3.5.2. Κατανεμημένος υπολογισμός των ΣΠΑ	47
3.5.3. Κατανεμημένος αλγόριθμος	51
3.6. Εφαρμογές της μεθόδου και αποτελέσματα	52
3.6.1. Εφαρμογή σε απλοποιημένο ΔΔ.....	52
3.6.2. Εφαρμογή της μεθόδου σε πραγματικό ΔΔ	54
3.6.3. Εφαρμογή σε απλοποιημένο ΔΔ (με απώλειες)	58
3.6.4. Συζήτηση σχετικά με τις παραδοχές στις εξισώσεις ροής φορτίου	60
3.6.5. Εφαρμογή σε τροποποιημένο πρότυπο ΔΔ 123 ζυγών της IEEE (με απώλειες).....	61
3.6.6. Χρόνος σύγκλισης	62
3.6.7. Συγκρίσεις με εναλλακτικές κατανεμημένες μεθόδους	63
3.6.8. Περαιτέρω διερεύνηση και αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου.....	64
3.6.9. Διερεύνηση της μεθόδου σε περίπτωση που χαθεί η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ των κόμβων	67
3.7. Σύνοψη και συμπεράσματα.....	68

4	Κατανεμημένη ροή φορτίου.....	71
4.1.	Εισαγωγή.....	71
4.2.	Διατύπωση του προβλήματος.....	72
4.2.1.	Μοντελοποίηση του δικτύου και παραδοχές.....	72
4.2.2.	Η μέθοδος Newton-Raphson για την επίλυση της ροής φορτίου.....	73
4.2.3.	Κατανεμημένος υπολογισμός των διορθώσεων τάσης και γωνίας.....	74
4.3.	Κατανεμημένος αλγόριθμος ροής φορτίου.....	76
4.4.	Εφαρμογές της μεθόδου και αποτελέσματα.....	77
4.4.1.	Εφαρμογή σε απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων.....	77
4.4.2.	Πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 ζυγών.....	80
4.4.3.	Σύγκριση με μέθοδο αναφοράς.....	82
4.4.4.	Σύγκριση της μεθόδου με μεθόδους διαθέσιμες στη βιβλιογραφία.....	83
4.4.5.	Διερεύνηση της μεθόδου σε περίπτωση που χαθεί η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ των κόμβων.....	86
4.4.6.	Διερεύνηση της μεθόδου σε περίπτωση αμέλειας των γωνιών της τάσης.....	88
4.5.	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	89
5	Κατανεμημένος αλγόριθμος ελέγχου τάσης.....	91
5.1.	Εισαγωγή.....	91
5.2.	Διατύπωση του προβλήματος.....	92
5.2.1.	Μοντελοποίηση του δικτύου και παραδοχές.....	92
5.2.2.	Πρόβλημα βέλτιστης ρύθμισης τάσης.....	93
5.2.3.	Εισαγωγή των ανισωτικών περιορισμών.....	95
5.2.4.	Κατανεμημένος υπολογισμός των πολλαπλασιαστών Lagrange.....	97
5.2.5.	Αλγόριθμος κατάβασης βαθμίδας (Gradient Descent).....	99
5.2.6.	Εναλλακτική προσέγγιση του προβλήματος.....	100
5.3.	Κατανεμημένος αλγόριθμος ελέγχου τάσης.....	101
5.4.	Εφαρμογές της μεθόδου και αποτελέσματα.....	102
5.4.1.	Εξέταση κατανεμημένου υπολογισμού των πολλαπλασιαστών Lagrange....	102
5.4.2.	Απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων – Έλεγχος αέργου ισχύος.....	103
5.4.3.	Απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων – Έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος.....	106
5.4.4.	Εφαρμογή σε τροποποιημένο πρότυπο ΔΔ 123 ζυγών της IEEE.....	107
5.4.5.	Συγκρίσεις και συζήτηση των αποτελεσμάτων.....	108

5.4.6. Εκτίμηση χρόνου σύγκλισης.....	111
5.4.7. Συζήτηση σχετικά με τις απαιτήσεις για συστήματα εποπτείας.....	112
5.4.8. Διερεύνηση της μεθόδου σε περίπτωση που χαθεί η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ των κόμβων	113
5.4.1. Διερεύνηση της ακρίβειας της γραμμικοποίησης των εξισώσεων ροής φορτίου όταν αμελούνται οι φασικές γωνίες	114
5.5. Σύνοψη και συμπεράσματα.....	116
6 Εφαρμογές της τεχνολογίας κατανεμημένων μητρώων στα ευφυή δίκτυα.....	119
6.1. Εισαγωγή	119
6.1.1. Ethereum και «Έξυπνα Συμβόλαια».....	120
6.1.2. Περιορισμοί και προκλήσεις του blockchain	122
6.1.3. Ιδιωτικότητα και blockchain.....	122
6.2. Πεδία εφαρμογών στα ευφυή δίκτυα.....	123
6.2.1. Πλατφόρμες Blockchain για τον ενεργειακό τομέα.....	123
6.2.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	124
6.2.3. Κριτήρια εφαρμοσιμότητας του Blockchain	127
6.3. Ενεργειακές κοινότητες και αποκεντρωμένες αγορές ενέργειας.....	129
6.4. Ανάπτυξη αποκεντρωμένων εφαρμογών μέσω έξυπνων συμβολαίων	130
6.4.1. Συμβόλαιο αυτοματοποίησης προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας.....	133
6.4.2. Συμβόλαιο αποκεντρωμένης αγοράς ενέργειας σε Εν.Κοιν.....	134
6.4.3. Αποτελέσματα - Προσομοιώσεις.....	137
6.5. Συμπεράσματα	140
7 Συμπεράσματα	141
7.1. Ανακεφαλαίωση	141
7.2. Συμβολή	147
7.3. Μελλοντικές επεκτάσεις	149
Βιβλιογραφία	151
Δημοσιεύσεις.....	165
Δημοσιεύσεις.....	167
Παράρτημα.....	169

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1 Ταξινόμηση δομών ελέγχου ανάλογα με την αρχιτεκτονική συντονισμού: a) χωρίς επικοινωνία, b) κεντρικός έλεγχος, CC: central coordinator (κεντρικός ελεγκτής), c) αποκεντρωμένος έλεγχος, ZC: zone coordinator (ελεγκτής ζώνης) και d) καταναμημένος (ή ολικά αποκεντρωμένος) έλεγχος, DC: distributed coordinator (καταναμημένος ελεγκτής) (αναφέρεται πιθανότατα στη διεπαφή του διαχειριστή δικτύου).	7
Σχήμα 2-1 Γράφος 6 κόμβων οι οποίοι τοποθετούνται στο επίπεδο ανάλογα με τις συντεταγμένες με τις οποίες αντιστοιχίζονται, οι ακμές εμφανίζονται με διακεκομμένη γραμμή (αριστερά). Υπολογισμός νέας τιμής ενός κόμβου από τις εκτιμήσεις των γειτόνων του (δεξιά)	16
Σχήμα 2-2 Γράφος δέκα κόμβων (αριστερά) και προσομοίωση της εξέλιξης του μοντέλου συναίνεσης στις δύο διαστάσεις του καρτεσιανού επιπέδου (δεξιά).	17
Σχήμα 3-1 Τροποποιημένες συναρτήσεις οριακού κόστους μονάδων: (a) συμβατική μονάδα, (b) μονάδα ΑΠΕ.....	34
Σχήμα 3-2 Οι διαδικασίες που επηρεάζουν τη δυναμική του πληθυσμού πτηνών: γεννήσεις, θάνατοι και μετανάστευση.	35
Σχήμα 3-3 Μεταβολή των ατόμων του πληθυσμού σε κάθε οικότοπο: (a) αρχική κατάσταση πληθυσμού, (b) κατάσταση ισορροπίας.....	37
Σχήμα 3-4 Μεταβολή των ατόμων του πληθυσμού σε κάθε οικότοπο με περιορισμό τοπικής επικοινωνίας: (a) αρχική κατάσταση πληθυσμού, (b) κατάσταση ισορροπίας.....	41
Σχήμα 3-5 Αναπαράσταση του δικτύου διανομής.....	42
Σχήμα 3-6 Μορφή συνάρτησης ευημερίας μονάδων.....	43
Σχήμα 3-7 Ακτινικά δίκτυα διανομής με υπερφόρτιση γραμμής (a) κατεύθυνση ροής προς τα φύλλα, (b) κατεύθυνση ροής προς τον υποσταθμό.	45
Σχήμα 3-8 Διάγραμμα ροής της μεθόδου για καταναμημένη Οικονομική ΚΦ με όρια υπερφόρτισης των γραμμών.....	45
Σχήμα 3-9 Αρχιτεκτονική της προτεινόμενης μεθόδου, οι μπλε διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στους συνδέσμους επικοινωνίας.....	46
Σχήμα 3-10 Το ακτινικό δίκτυο για την εφαρμογή του καταναμημένου αλγορίθμου Οικονομικής ΚΦ.	53

Σχήμα 3-11 Αποτελέσματα της Οικονομικής ΚΦ: (a) την κατανεμημένη μέθοδο και (b) την κεντρική.	53
Σχήμα 3-12 Τιμές ευημερίας για την: (a) την κατανεμημένη μέθοδο και (b) την κεντρική..	54
Σχήμα 3-13 Η γραμμή P25 της Σπερχειάδας.....	55
Σχήμα 3-14 Γράφος του ηλεκτρικού δικτύου του Σχήματος 3-13. Ο πράσινος κόμβος αντιστοιχεί στο ζυγό αναφοράς και οι κόκκινοι κόμβοι στις μονάδες ΔΠ.	55
Σχήμα 3-15 Αποτελέσματα της Οικονομικής ΚΦ για τη γραμμή P25.	56
Σχήμα 3-16 Τιμές ευημερίας κάθε μονάδας ΔΠ για τη γραμμή P25.	57
Σχήμα 3-17 Λεπτομέρεια του σχήματος των τιμών ευημερίας των κόμβων για τις επαναλήψεις κοντά στην ανίχνευση της συμφόρησης.	57
Σχήμα 3-18 Απλοποιημένο δίκτυο διανομής με διείσδυση μονάδων ΔΠ	58
Σχήμα 3-19 Αποτελέσματα της κατανεμημένης μεθόδου για το απλοποιημένο δίκτυο 6 κόμβων (a) Ενεργός ισχύς κάθε μονάδας, (b) Τιμές ευημερίας κάθε μονάδας και μέση ευημερία, (c) Υπολογισμός των απωλειών σε 3 βήματα (κάθε γραμμής και συνολικές), (d) Συντελεστής ποινής απωλειών κάθε μονάδας για κάθε επανάληψη.	59
Σχήμα 3-20 Τροποποιημένο πρότυπο ΔΔ 123 ζυγών της IEEE.	61
Σχήμα 3-21 Αποτελέσματα της κατανεμημένης μεθόδου για το τροποποιημένο πρότυπο ΔΔ 123 ζυγών της IEEE (a) Ενεργός ισχύς κάθε μονάδας, (b) Τιμές ευημερίας κάθε μονάδας και μέση ευημερία, (c) Υπολογισμός των απωλειών σε 3 βήματα (κάθε γραμμής και συνολικές), (d) Συντελεστής ποινής απωλειών κάθε μονάδας για κάθε επανάληψη.	62
Σχήμα 3-22 Δείγμα τυχαίου δικτύου 10 κόμβων.....	64
Σχήμα 3-23 Σφάλμα και ταχύτητα σύγκλισης του μοντέλου TEK για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου m	65
Σχήμα 3-24 Οι τέσσερις βασικοί τύποι τοπολογίας που θεωρήθηκαν για την παραγωγή τυχαίων γράφων (πάνω) και η απεικόνιση των μη μηδενικών στοιχείων των αντίστοιχων τους πινάκων γεινίασης (sparsity pattern) (κάτω): (a) δέντρο, (b) δίκτυο πλέγματος (mesh network), (c) δίκτυο μικρού κόσμου (small world) και (d) τυχαίο δίκτυο.	66
Σχήμα 3-25 Απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων για δίκτυα με διαφορετικά χαρακτηριστικά και αριθμό κόμβων.....	66
Σχήμα 3-26 Αποτελέσματα της κατανεμημένης μεθόδου για το ΔΔ 6 ζυγών σε περίπτωση απωλειών τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων (a) Ενεργός ισχύς κάθε μονάδας (απώλεια ενός κόμβου), (b) Τιμές ευημερίας κάθε μονάδας και μέση ευημερία (απώλεια των μισών	

κόμβου), (c) Ενεργός ισχύς κάθε μονάδας (απώλεια ενός κόμβου), (d) Τιμές ευημερίας κάθε μονάδας και μέση ευημερία (απώλεια των μισών κόμβου).	67
Σχήμα 4-1 Αναπαράσταση του δικτύου διανομής, κάθε κόμβος θεωρείται ότι είναι εφοδιασμένος με μια ΕΗΣ, οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις.....	72
Σχήμα 4-2 Αναπαράσταση του απλοποιημένου ΔΔ 6 κόμβων.....	77
Σχήμα 4-3 Επαναλήψεις Newton-Raphson - ενημερώσεις στα μέτρα των τάσεων.....	78
Σχήμα 4-4 Επαναλήψεις Newton-Raphson - ενημερώσεις των φασικών γωνιών.....	78
Σχήμα 4-5 Κατανεμημένος υπολογισμός των διορθώσεων γωνιών - πρωτεύουσες τιμές: Ψ_{xi}	79
Σχήμα 4-6 Κατανεμημένος υπολογισμός των διορθώσεων γωνιών - δυικές τιμές: γ_{xi}	79
Σχήμα 4-7 Κατανεμημένος υπολογισμός των διορθώσεων τάσης - πρωτεύουσες τιμές: Ψ_{yi}	79
Σχήμα 4-8 Κατανεμημένος υπολογισμός των διορθώσεων τάσης - δυικές τιμές: γ_{yi}	80
Σχήμα 4-9 Πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 ζυγών [139].....	80
Σχήμα 4-10 Επαναλήψεις Newton-Raphson: (a) ενημερώσεις στα μέτρα των τάσεων, (b) ενημερώσεις στις γωνίες των τάσεων.....	81
Σχήμα 4-11 Κατανεμημένος υπολογισμός διορθώσεων τάσεων και γωνιών: (a) πρωτεύουσες τιμές - Ψ , (b) δυικές τιμές - γ	81
Σχήμα 4-12 Σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με μέθοδο αναφοράς.....	82
Σχήμα 4-13 Απόκριση του κατανεμημένου πρωτοκόλλου στο δίκτυο 6 κόμβων σε περίπτωση απώλειας τηλεπικοινωνίας, πρωτεύουσες τιμές για απώλεια (a) 1 κόμβου, (b) $\sim N/2$ κόμβων, (c) όλων των κόμβων για μικρό χρονικό και διάστημα και (d) όλων των κόμβων για μεγάλο χρονικό διάστημα.....	87
Σχήμα 4-14 Απόκριση του κατανεμημένου πρωτοκόλλου στο δίκτυο 34 κόμβων σε περίπτωση απώλειας τηλεπικοινωνίας, πρωτεύουσες τιμές για απώλεια (a) 1 κόμβου, (b) $\sim N/2$ κόμβων, (c) όλων των κόμβων για μικρό χρονικό και διάστημα και (d) όλων των κόμβων για μεγάλο χρονικό διάστημα.....	88
Σχήμα 4-15 Σύστημα 6 ζυγών: (πάνω αριστερά) Επαναλήψεις Newton-Raphson, ενημερώσεις στα μέτρα των τάσεων, (πάνω δεξιά) Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου με μέθοδο αναφοράς, Κατανεμημένος υπολογισμός	

διορθώσεων τάσεων: (κάτω αριστερά) πρωτεύουσες τιμές - Ψ , (κάτω δεξιά) δυικές τιμές - γ	88
Σχήμα 4-16 Πρότυπο $\Delta\Delta$ της IEEE 34 ζυγών: (πάνω αριστερά) Επαναλήψεις Newton-Raphson, ενημερώσεις στα μέτρα των τάσεων, (πάνω δεξιά) Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου με μέθοδο αναφοράς, Κατανεμημένος υπολογισμός διορθώσεων τάσεων: (κάτω αριστερά) πρωτεύουσες τιμές - Ψ , (κάτω δεξιά) δυικές τιμές - γ	89
Σχήμα 5-1 Αναπαράσταση του δικτύου διανομής, οι κόμβοι διαθέτουν Ελεγχόμενα Φορτία (ΕΦ) ή/και μονάδες ΔΠ, οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις.....	92
Σχήμα 5-2 Συναρτήσεις ποινής για την ενσωμάτωση των τοπικών περιορισμών των μεταβλητών κατάστασης και ελέγχου.	96
Σχήμα 5-3 Κατανεμημένη επίλυση του γραμμικού συστήματος χρησιμοποιώντας μοντέλο πρωτεύουσας-δυικής βελτιστοποίησης (α) - πάνω αριστερά: επαναλήψεις πρωτευουσών μεταβλητών, (b) - πάνω δεξιά: επαναλήψεις δυικών μεταβλητών και (c)- κάτω: σύγκριση με τα αποτελέσματα της κλασσικής μεθόδου αντιστροφής της Ιακωβιανής μήτρας.....	103
Σχήμα 5-4 Αποτελέσματα της μεθόδου από την εφαρμογή στο απλοποιημένο $\Delta\Delta$ 6 κόμβων. (a): μεταβολή στην άεργο έγχυση ανά επανάληψη, (b) συνολική άεργος έγχυση ανά επανάληψη, (c): τάσεις των κόμβων για κάθε επανάληψη, (d): σύγκριση των αποτελεσμάτων με την κεντρική μέθοδο.....	104
Σχήμα 5-5 Κατανεμημένος υπολογισμός των πολλαπλασιαστών κάθε κόμβου για τις 7 επαναλήψεις του Αλγορίθμου 2 που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-4.	105
Σχήμα 5-6 Κλίση $\nabla \mathcal{L}_{ui}$ κάθε κόμβου για κάθε επανάληψη.	105
Σχήμα 5-7 Αποτελέσματα της μεθόδου από την εφαρμογή στο απλοποιημένο $\Delta\Delta$ 6 κόμβων. (a): συνολική έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος ανά επανάληψη, (b): σύγκριση των αποτελεσμάτων με την κεντρική μέθοδο, (c): τάσεις κόμβων ανά επανάληψη, (d): κατανεμημένος υπολογισμός των πολλαπλασιαστών κάθε κόμβου για κάθε επανάληψη του Αλγορίθμου 2.....	106
Σχήμα 5-8 Αποτελέσματα της μεθόδου για το τροποποιημένο $\Delta\Delta$ της IEEE 123 ζυγών. (a): συνολική έγχυση αέργου ισχύος ανά επανάληψη, (b): τάσεις κόμβων.....	107

Σχήμα 5-9 Κατανεμημένος υπολογισμός των συντελεστών λ για το τροποποιημένο $\Delta\Delta$ της IEEE 123 ζυγών, οι οποίοι αντιστοιχούν στις επαναλήψεις του Αλγορίθμου 2 που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-8.	108
Σχήμα 5-10 Αποτελέσματα της μεθόδου για απώλεια ενός κόμβου στο απλοποιημένο $\Delta\Delta$ 6 κόμβων. (α): Ενεργός και άεργος έγχυση ανά επανάληψη, (b): τάσεις των κόμβων για κάθε επανάληψη, (c): κατανεμημένος υπολογισμός πολλαπλασιαστών κάθε κόμβου για κάθε επανάληψη του Αλγορίθμου 2, (d): κλίση $\nabla \mathcal{L}_{ui}$ κάθε κόμβου για κάθε επανάληψη.	114
Σχήμα 6-1 Αξιολόγηση της χρήσης διαφορετικών τεχνολογιών blockchain ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής [198].	128
Σχήμα 6-2 Τοπική αγορά ενέργειας στα πλαίσια μιας ενεργειακής κοινότητας η οποία λειτουργεί χρησιμοποιώντας τεχνολογία blockchain.	131
Σχήμα 6-3 Αλληλεπίδραση καταναλωτών, προμηθευτή και ηλεκτρονικών μετρητών μέσω έξυπνων συμβολαίων.	132
Σχήμα 6-4 Σενάριο χρήσης του συμβολαίου αυτοματοποίησης προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας.	133
Σχήμα 6-5 Αλληλεπίδραση των μελών της Εν.Κοιν. και των ηλεκτρονικών μετρητών μέσω έξυπνων συμβολαίων.	134
Σχήμα 6-6 Σενάριο χρήσης του συμβολαίου αυτοματοποίησης της αποκεντρωμένης αγοράς ενέργειας σε Εν.Κοιν.	135
Σχήμα 6-7 Ταξινόμηση των προσφορών, δημιουργία καμπύλων προσφοράς και ζήτησης και εκκαθάριση της αγοράς.	135
Σχήμα 6-8 Υπολογιστικό κόστος (gas) της μεθόδου (a) revealBuyer και (b) clearMarket συναρτήσει του αριθμού συμμετεχόντων στο συμβόλαιο.	139

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1 Ταξινόμηση των υπό εξέταση μελετών ελέγχου τάσης.....	28
Πίνακας 3-1 Λειτουργικά όρια και συντελεστές κόστους των μονάδων. Το <i>ci</i> αντιστοιχεί σε (χρηματικές μονάδες)/(kW) ² και το <i>bi</i> σε (χρηματικές μονάδες)/(kW) αντίστοιχα.....	52
Πίνακας 3-2 Λειτουργικά όρια των μονάδων και οι συντελεστές κόστους για την Οικονομική ΚΦ, το <i>ci</i> δίνεται σε (χρηματικές μονάδες)/(kW) ² και το <i>bi</i> σε (χρηματικές μονάδες)/(kW) αντίστοιχα, οι τιμές αντίστασης και αντίδρασης των κλάδων δίνονται α.μ.....	58
Πίνακας 3-3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου αλγορίθμου με την κεντρική επίλυση και με την επίλυση που αμελεί τις απώλειες.	60
Πίνακας 3-4 Ακρίβεια της Οικονομικής ΚΦ όπως υπολογίζεται από κατανεμημένες μεθόδους της βιβλιογραφίας για το σύστημα 6 κόμβων.....	63
Πίνακας 3-5 Απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων για τις διάφορες κατανεμημένες μεθόδους.....	64
Πίνακας 3-6 Αριθμός επαναλήψεων για διάφορα σενάρια απώλειας τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων μεταξύ των κόμβων.	68
Πίνακας 4-1 αρχικές τιμές ενεργού και αέργου φορτίου και αντίστασης και αντίδρασης γραμμών (δίνονται α.μ.).	77
Πίνακας 4-2 Ακρίβεια και απαιτούμενες επαναλήψεις της προτεινόμενης μεθόδου.....	82
Πίνακας 4-3 Σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με μεθόδους που προτείνονται στη βιβλιογραφία.	85
Πίνακας 4-4 Αριθμός επαναλήψεων για διάφορα σενάρια απώλειας τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων μεταξύ των κόμβων.	86
Πίνακας 4-5 Ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου αμελώντας τις γωνίες τάσης.....	89
Πίνακας 5-1 Συνολική ενεργός και άεργος ισχύς για διαφορετικούς συντελεστές κόστους.	107
Πίνακας 5-2 Απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων και ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου για διαφορετικά σενάρια δοκιμών.....	109
Πίνακας 5-3 Απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων για διαφορετικά μεγέθη δικτύων.....	109
Πίνακας 5-4 Ταχύτητα σύγκλισης και παραβίαση περιορισμών για διαφορετικούς συντελεστές ποινής.	110

Πίνακας 5-5 Χρόνος σύγκλισης για διαφορετικές τεχνολογίες επικοινωνίας.....	112
Πίνακας 5-6 Απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων και ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου για διαφορετικά σενάρια απώλειας τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων μεταξύ των κόμβων.....	113
Πίνακας 5-7 Σφάλμα της γραμμικοποιημένης μεθόδου όταν αμελούνται οι φασικές γωνίες σε σύγκριση με τη βέλτιστη ροή φορτίου του πακέτου MATPOWER και με τη μέθοδο SDP.	115
Πίνακας 6-1 Δοκιμές στο συμβόλαιο SmartMeters.....	138
Πίνακας 6-2 Δοκιμές στο συμβόλαιο Retailer.	138
Πίνακας 6-3 Δοκιμές στο συμβόλαιο DoubleAuction (Εν.Κοιν.).....	138

Πίνακας Συντμήσεων

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΕΗΣ	Ευφυής Ηλεκτρονική Συσκευή
ΔΔ	Δίκτυο Διανομής
ΔΠ	Διεσπαρμένη Παραγωγή
ΣΠΠ	Σύστημα Πολλαπλών Πρακτόρων
ΜΕΖ	Μοντέλο Έγχυσης Ζυγού
ΔΕΠ	Διεσπαρμένοι Ενεργειακοί Πόροι
ΠΑΖ	Πόροι Απόκρισης Ζήτησης
ΒΡΤ	Βηματικοί Ρυθμιστές Τάσης
ΔΚ	Δυναμική Κλωνωτή
ΚΦ	Κατανομή Φορτίου
ΤΕΚ	Τοπικές Εξισώσεις Κλωνωτή
ΣΠΑ	Συντελεστής Ποινής Απωλειών
<hr/>	
IEA	International Energy Association
GIS	Geographic Information System
AMI	Automated Metering Infrastructure
BMS	Building Management System
IED	Intelligent Electronic Device
PCC	Point of Common Coupling
MAS	Multi-Agent Systems
DOP	Distributed Optimization-based Control
DCOP	Distributed Constraint Optimization
BIM	Bus Injection Model
ESS	Energy Storage Systems
SVR	Step Voltage Regulators
OPF	Optimal Power Flow
RD	Replicator Dynamics
LRE	Local Replicator Equation
PLC	Power Line Communication
PMU	Phasor Measurement Unit

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1. Το σύγχρονο τοπίο στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας

Η ενέργεια είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον ανθρώπινο πολιτισμό, αποτελώντας κεντρικό θέμα σχεδόν όλων των πτυχών της ανθρώπινης κοινωνίας. Στην εποχή μας, σημαντικές αλλαγές λαμβάνουν χώρα στο τομέα της ενέργειας και ειδικότερα στον τομέα του ηλεκτρισμού. Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) στην ετήσια έκθεσή του (για το έτος 2017) ορίζει τέσσερις βασικούς άξονες που προβλέπεται ότι θα διαμορφώσουν τον παγκόσμιο ενεργειακό χάρτη μέχρι το 2040 [1]. Συνοπτικά αναφέρονται, η πτώση του κόστους και η ταχεία ανάπτυξη των τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), ο εξηλεκτρισμός, η στροφή της οικονομίας προς τις υπηρεσίες και το καθαρότερο ενεργειακό μείγμα της Κίνας σε συνδυασμό με την διατηρούμενη αντοχή της σχιστολιθικής παραγωγής στις ΗΠΑ.

Πιο συγκεκριμένα, στο βασικό σενάριο του IEA αναφέρεται αύξηση κατά 30% στην πρωτογενή ενεργειακή ζήτηση, λαμβάνοντας υπόψη ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 3,4% για την παγκόσμια οικονομία και μια αύξηση στον πληθυσμό από τα 7,4 δις. σήμερα, στα 9 δις. μέχρι το 2040. Ο οργανισμός προβλέπει σημαντική αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ οι οποίες μαζί με το φυσικό αέριο θα διατηρούν πολύ σημαντικό μερίδιο στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα. Στην Ευρώπη το ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ εκτιμήθηκε στο 80% με ορίζοντα το 2040, με την αιολική ενέργεια να γίνεται η πρώτη πηγή ηλεκτροπαραγωγής μετά το 2030.

Ο μετασχηματισμός στο ενεργειακό μείγμα δεν είναι όμως ο μοναδικός λόγος που τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αναδιαρθρώνονται. Η αναγκαιότητα για μείωση του κόστους μέσω της αύξησης της ενεργειακής αποδοτικότητας και γενικότερα της ενεργειακής εξοικονόμησης, αποτελεί βασικό πυλώνα, για την αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων

μέσα από καινοτόμες τεχνολογίες. Το ρυθμιστικό πλαίσιο γύρω από τη λειτουργία των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας αλλάζει ριζικά, ενώ εμφανίζονται καινούργια μοντέλα που στοχεύουν στην άμεση εμπλοκή του πολίτη είτε ως μικροπαραγωγού είτε ως ενεργού καταναλωτή στην διαδικασία της λειτουργίας του δικτύου (και κατά πάσα πιθανότητα μελλοντικά και της αγοράς), όπως για παράδειγμα οι ενεργειακές κοινότητες. Μεγάλος αριθμός νοικοκυριών, κοινοτήτων και επιχειρήσεων σταδιακά επενδύουν σε εγκαταστάσεις διεσπαρμένης παραγωγής, γεγονός που επισπεύδει μια ευρεία αναδόμηση του παραδοσιακού μοντέλου της συγκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής και στη συνέχεια της μεταφοράς και της διανομής της μέχρι την κατανάλωση, προς μια πιο αποκεντρωμένη κατεύθυνση.

Από μια πιο τεχνική σκοπιά, ο τρόπος λειτουργίας των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας αλλάζει ριζικά καθώς εξελίσσονται και αποκτούν μεγαλύτερη «νοημοσύνη». Ολοένα και περισσότερα στοιχεία των ηλεκτρικών δικτύων (ακόμα και στο επίπεδο της διανομής) προσφέρουν δυνατότητες καταγραφής δεδομένων, επικοινωνίας και απομακρυσμένου ελέγχου, καθώς επίσης και λήψης αυτοματοποιημένων αποφάσεων βασιζόμενα σε τοπικά δεδομένα με σκοπό την υποστήριξη της περισσότερο αποκεντρωμένης λειτουργίας του δικτύου. Η εγκατάσταση των ηλεκτρονικών μετρητών στην πλευρά του καταναλωτή, μπορεί να προσφέρει σημαντικές πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο όχι μόνο για την κατανάλωση αλλά και για τις τάσεις, ενεργές και άεργες εγχύσεις αλλά και τη συχνότητα σε όλη την έκταση του δικτύου. Είναι επίκαιρο πλέον να μιλάμε για μεγάλα δεδομένα (Big Data) στο πλαίσιο των ηλεκτρικών δικτύων τα οποία παράγονται από: δεδομένα ενεργειακής κατανάλωσης των χρηστών, δεδομένα ηλεκτρικών μετρήσεων, δεδομένα διαχείρισης, ελέγχου και συντήρησης εξαρτημάτων και δικτυακού εξοπλισμού. Επίσης, λειτουργικά δεδομένα του δικτύου ανακτώνται από ευφυείς ηλεκτρονικές συσκευές όπως π.χ. οικονομικά δεδομένα και δεδομένα από καιρικές συνθήκες αλλά και δεδομένα από το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS). Μέχρι το 2020, ο αριθμός των εγκαταστημένων έξυπνων μετρητών στην Ευρώπη αναμένεται να φτάσει τα 240 εκατομμύρια ενώ στη Βόρεια Αμερική θα υπάρχουν 150 εκατομμύρια. Η Κίνα αντίστοιχα προβλέπεται να εγκαταστήσει μέχρι το 2020, περίπου 400 εκατομμύρια έξυπνων μετρητών και η Ιαπωνία περίπου 60 εκατομμύρια. Στην Ελλάδα, ο ΔΕΔΔΗΕ προετοιμάζεται για την πανελλαδική αντικατάσταση των υφιστάμενων 7,5 εκατομμυρίων συμβατικών μετρητών με έξυπνους μετρητές, μέσα στα επόμενα χρόνια. Για έναν διαχειριστή δικτύου ο οποίος θα διαθέτει τέτοιους αριθμούς έξυπνων μετρητών, θα απαιτείται η διαχείριση αρκετών TB δεδομένων ανά ημέρα [2].

Ωστόσο, οι καινούργιες δυνατότητες εισάγουν και καινούργιους προβληματισμούς. Παρόλο που η προώθηση των τεχνολογιών ευφυών δικτύων υπόσχεται τεράστια κοινωνικά και τεχνικά οφέλη, προκύπτουν νέα προβλήματα όπως για παράδειγμα η προστασία της ιδιωτικής ζωής. Οι πελάτες, στα πλαίσια των ευφυών δικτύων, αναμένεται να συνεργάζονται στενά με τον προμηθευτή τους για τη διαχείριση της κατανάλωσής τους, κάτι που θα απαιτεί το διαμοιρασμό πληθώρας προσωπικών πληροφοριών σχετικών με τον τρόπο

χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας, εκθέτοντας τους δυνητικά σε εισβολές ιδιωτικότητας. Ανακύπτουν επομένως, διάφορα ζητήματα ασφάλειας και προστασίας της ιδιωτικής ζωής τα οποία πρέπει να μελετηθούν και να αντιμετωπιστούν [3].

Σε αντιπαράθεση με τα προηγούμενα, ας μην ξεχνάμε ότι εκατομμύρια ανθρώπων σε αναπτυσσόμενες χώρες εξακολουθούν να μην έχουν πρόσβαση σε σύγχρονες ενεργειακές υπηρεσίες. Η κατάσταση αυτή εντείνει την φτώχεια και αυξάνει την ευαισθησία κάποιων κοινωνικών ομάδων σε κλιματικές αλλαγές. Επίσης, μειώνει την περιβαλλοντική βιωσιμότητα σε τοπικό, εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο και δημιουργεί αρνητικές επιπτώσεις στην εκπαίδευση και την υγεία.

Αυτή τη στιγμή, περίπου 1,06 δισεκατομμύρια άνθρωποι στις αναπτυσσόμενες χώρες δεν έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια, ενώ περίπου 3,04 δισεκατομμύρια άνθρωποι βασίζονται σε στερεά καύσιμα για την κάλυψη βασικών αναγκών τους, όπως το μαγείρεμα και η θέρμανση. Στην υποσαχάρια Αφρική, ο αριθμός των ατόμων που δεν έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια και στα σύγχρονα καύσιμα είναι αντίστοιχα 560 και 625 εκατομμύρια άτομα, περίπου το 60% του πληθυσμού. Στις ασιατικές περιοχές, ενώ οι άνθρωποι μπορεί να έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια, συχνά δεν έχουν πρόσβαση στα σύγχρονα καύσιμα. Στην Ανατολική Ασία και τον Ειρηνικό, 200 εκατομμύρια άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια, και σχεδόν 1,1 δισεκατομμύρια άνθρωποι βασίζονται σε στερεά καύσιμα για το μαγείρεμα. Σε επίπεδο χωρών, η Ινδία διατηρεί την πρώτη θέση στην έλλειψη πρόσβασης στην ηλεκτρική ενέργεια προσεγγίζοντας το ένα τρίτο του παγκόσμιου ελλείμματος (270 εκατ. άνθρωποι), ενώ ακολουθούν η Νιγηρία και η Αιθιοπία [4].

Συμπερασματικά, τα σύγχρονα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίζουν σημαντικά προβλήματα, καθώς οι κοινωνικοοικονομικές εξελίξεις σε παγκόσμιο επίπεδο σε συνδυασμό με τους δραματικούς ρυθμούς εξέλιξης της τεχνολογίας, έχουν εισάγει σημαντικές προκλήσεις σε όλους τους τομείς των ΣΗΕ. Σε όλα αυτά τα ζητήματα, στην αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ και της παγκόσμιας ζήτησης, στην ενεργειακή εξοικονόμηση, στους νέους ρόλους που εμφανίζονται στα πλαίσια των ηλεκτρικών δικτύων αλλά και στην αποτελεσματική ηλεκτροδότηση περιοχών που δε διαθέτουν τις κατάλληλες υποδομές, καλούνται σήμερα να προσφέρουν λύσεις οι αναπτυσσόμενες τεχνολογίες των ευφυών δικτύων.

1.2. Τα ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας ως κυβερνοφυσικά συστήματα

Ο όρος ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας (Smart Grids) αναφέρεται σε ενεργά δίκτυα που χαρακτηρίζονται από υψηλή στιβαρότητα, ασφάλεια, αξιοπιστία και ανθεκτικότητα και έχουν ως πρωταρχικό στόχο την αποδοτική κάλυψη των αναγκών των χρηστών τους. Πρόκειται για ένα δίκτυο υποδομών παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ενέργειας, επικαλυπτόμενο από ένα δίκτυο αισθητήρων και υπολογιστών οι οποίοι παρακολουθούν και διαχειρίζονται τη ροή της ενέργειας. Μια ολοκληρωμένη διάταξη υπολογιστικών και φυσικών

διεργασιών, μεταξύ των οποίων αναπτύσσεται μία στενή σχέση διασύνδεσης και συνεργασίας - όπως ένα ευφυές δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας - αναφέρεται ως κυβερνοφυσικό σύστημα (Cyber-physical system). Οι φυσικές διεργασίες παρακολουθούνται και ελέγχονται με βρόχους ανατροφοδότησης μέσω των οποίων οι υπολογιστικές διεργασίες επηρεάζουν τις φυσικές και αντίστροφα. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ενσωματωμένα συστήματα, ένα τυπικό κυβερνοφυσικό σύστημα σχεδιάζεται και υλοποιείται ως ένα δίκτυο στοιχείων που λειτουργούν αλληλοεπιδρώντας μεταξύ τους με φυσικές εισόδους και εξόδους και όχι ως αυτοτελείς συσκευές. Τα κυβερνοφυσικά συστήματα μπορούν να μεταβάλλουν δυναμικά τη δομή τους κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα περίπλοκα στο σχεδιασμό και στη ρεαλιστική μοντελοποίηση. Στα λεγόμενα Δικτυωμένα Κυβερνοφυσικά Συστήματα (Networked Cyber-Physical Systems), τα στοιχεία ελέγχου συνδέονται μεταξύ τους και συντονίζονται για την επίτευξη των στόχων τους.

Τα ευφυή δίκτυα επομένως, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά παθητικά δίκτυα ΗΕ, αποτελούν δικτυωμένα κυβερνοφυσικά συστήματα τα οποία επιτρέπουν τη αμφίδρομη ροή ισχύος και πληροφορίας και στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους εξισορροπώντας τοπικά τη ζήτηση με την παραγωγή πόρων, μειώνοντας τις ροές ισχύος και τις απώλειες. Στα ευφυή δίκτυα είναι ενσωματωμένα πλήθος διεπαφών (Interfaces) όπως συστήματα διαχείρισης οικιακής ενέργειας (Building Management System - BMS) και αναπτυγμένες υποδομές μετρήσεων (AMI - Advanced Metering Infrastructure). Διαθέτουν επίσης την ικανότητα να συντονίζουν τις ανάγκες και τις δυνατότητες πολλών διαφορετικών παραγωγών, εμπορών ενέργειας και τελικών καταναλωτών [5].

Στις μέρες μας, η μετάβαση από το παραδοσιακό παθητικό δίκτυο προς στο ενεργό ευφυές, βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη. Το επίπεδο της διανομής, δεν χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλή διείσδυση έξυπνων συσκευών παρακολούθησης και προστασίας, γεγονός που δεν παρέχει στο διαχειριστή σημαντικές δυνατότητες ελέγχου και βελτίωσης της αποδοτικότητας της λειτουργίας του δικτύου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για την Ελλάδα, αποτελεί ο υφιστάμενος - για λόγους ευστάθειας του συστήματος - περιορισμός στη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα.

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η πολυπλοκότητα των δικτύων διανομής αναμένεται να αυξηθεί με αλματώδεις ρυθμούς στο προσεχές μέλλον, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εύρεση καινοτόμων λύσεων για την αποδοτική επεξεργασία και χρησιμοποίηση των δεδομένων που θα συνοδεύουν την εποπτεία και τον έλεγχο του ευφυούς δικτύου. Σε αυτήν την κατεύθυνση, ερευνώνται μέθοδοι για την εκμετάλλευση της αφανούς σήμερα ευελιξίας των τελικών καταναλωτών και την αύξηση της αποδοτικότητας της διεσπαρμένης παραγωγής όχι μόνο στα πλαίσια της Διαχείρισης Ζήτησης (Demand Side Management) αλλά και για την αντιμετώπιση των τοπικών προβλημάτων που ανακύπτουν στο δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, έχει ανοίξει πλέον η συζήτηση σχετικά με την παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο επίπεδο της διανομής από τον ίδιο τον τελικό χρήστη του δικτύου.

1.3. Δίκτυα αισθητήρων - Internet Of Things

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από ένα σύνολο αυτόνομων κόμβων - αισθητήρων - με δυνατότητες παρατήρησης φυσικών μεγεθών όπως π.χ. θερμοκρασίας, έντασης φωτός, σεισμικής δραστηριότητας και μετάδοσης της πληροφορίας (επεξεργασμένης ή μη) σε ένα σταθμό βάσης. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, το ευφυές δίκτυο αποτελεί ένα κυβερνοφυσικό σύστημα, το επίπεδο επικοινωνίας του οποίου μπορεί να θεωρηθεί ως ένα δίκτυο αισθητήρων καθώς υποστηρίζει αμφίδρομη μεταφορά δεδομένων, κατανεμημένες τεχνολογίες πληροφορικής και έξυπνους αισθητήρες για τη βελτίωση της ασφάλειας, της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας [6].

Ο αναδυόμενος κλάδος των συστημάτων που βασίζονται σε δίκτυα αισθητήρων αποσκοπεί στην ανάπτυξη επεκτάσιμων και ανθεκτικών σε βλάβες και σφάλματα μεθόδων, για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών από τα δεδομένα που συλλέγουν οι αισθητήρες. Τα δίκτυα αισθητήρων εμφανίζουν σημαντικούς περιορισμούς (όπως περιορισμοί ενέργειας, εμβέλειας κ.ά.) με αποτέλεσμα οι κεντρικές μέθοδοι διαχείρισης των δεδομένων (η συγκεντρωση δηλαδή όλων των δεδομένων απευθείας σε ένα σταθμό βάσης προκειμένου να επεξεργαστούν), να καθίστανται πρακτικά αναποτελεσματικές [7]. Από την άλλη πλευρά, τα δεδομένα που παράγονται από τους γειτονικούς αισθητήρες είναι συχνά πλεονάζοντα καθώς είναι σε μεγάλο βαθμό συσχετισμένα. Ακόμη, η ποσότητα των δεδομένων που παράγονται σε μεγάλα δίκτυα αισθητήρων είναι συνήθως τεράστια για να επεξεργαστούν αποδοτικά στον σταθμό βάσης. Ως εκ τούτου, προκύπτει η αναγκαιότητα για ανάπτυξη μεθόδων που θα συνδυάζουν τα δεδομένα ήδη από τους ενδιάμεσους κόμβους και θα μειώνουν τον αριθμό των πακέτων που μεταδίδονται στο σταθμό βάσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τεχνικές συσσώρευσης δεδομένων. Η συσσώρευση δεδομένων ορίζεται ως η διαδικασία συσσώρευσης των δεδομένων από πολλούς αισθητήρες για την εξάλειψη της πλεονάζουσας πληροφορίας και την παροχή της απευθείας σε επεξεργασμένη μορφή στο σταθμό βάσης. Τέτοιες προσεγγίσεις για την αποδοτική διαχείριση των δεδομένων δικτύων αισθητήρων αποτελούν οι τεχνολογίες κατανεμημένων βάσεων δεδομένων, όπως για παράδειγμα η TinyDB και η Cougar, οι οποίες επιτρέπουν την διεκπεραίωση συσσωρευτικών ερωτημάτων (aggregate queries) για την εξαγωγή πληροφοριών όπως η εύρεση ελάχιστης τιμής (MIN), μέγιστης τιμής (MAX), μέσου όρου (AVG) και πλήθους τιμών (COUNT) [6].

Στα πλαίσια των δικτύων αισθητήρων τοποθετείται και η έννοια του «διαδικτύου των πραγμάτων» (Internet of Things - IoT), η οποία αναφέρεται σε ένα δίκτυο από οικιακές συσκευές, οχήματα και διάφορα άλλα στοιχεία τα οποία διαθέτουν ηλεκτρονικές διεπαφές, λογισμικό, αισθητήρες και δυνατότητα επικοινωνίας. Κάθε «πράγμα» είναι μοναδικά αναγνωρίσιμο και σε θέση να αλληλεπιδρά μέσα στην υπάρχουσα υποδομή του Διαδικτύου. Στην περίπτωση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και των υποδομών που συνδέονται με αυτό, ο αντίστοιχος κλάδος Τεχνολογιών Πληροφορίας και Επικοινωνίας (ΤΠΕ) αναφέρεται ως «Διαδίκτυο της Ενέργειας» (Internet of Energy - IoE) [8].

1.4. Η προσέγγιση της αποκέντρωσης

Ο όρος αποκέντρωση αναφέρεται στην απομάκρυνση-αφαίρεση από το κέντρο εξουσιών λήψης αποφάσεων, αρμοδιοτήτων και δραστηριοτήτων και την ανάθεσή τους στην περιφέρεια. Για έναν οργανισμό αντιστοιχεί στην ανάθεση εξουσιών σε άτομα ή μονάδες σε όλα τα επίπεδα ενός οργανισμού, ακόμη και σε εκείνα που απέχουν πολύ από τα κέντρα εξουσίας [9]. Η έννοια της αποκέντρωσης ποικίλλει ανάλογα με τους διαφορετικούς τρόπους που εφαρμόζεται. Διάφορα μοντέλα αποκέντρωσης έχουν εφαρμοστεί σε ιδιωτικές επιχειρήσεις και οργανισμούς, στη δημόσια διοίκηση, στη διαχείριση της οικονομίας κ.ά. Στην πολιτική επιστήμη, η αποκέντρωση αφορά τη σχέση του «τοπικού επιπέδου» - τη στοιχειώδη μονάδα εξουσίας - με το κεντρικό κράτος. Διαφορετικά επίπεδα αποκέντρωσης μπορούν να νοηθούν ως προς το ποιο είναι το τοπικό επίπεδο, ποια η έκτασή του και πόσα διαφορετικά τοπικά επίπεδα υπάρχουν. Ένα σχήμα στο οποίο το τοπικό επίπεδο είναι η επί μέρους «μονάδα» (π.χ. ο πολίτης), αναφέρεται και ως ολική αποκέντρωση [10].

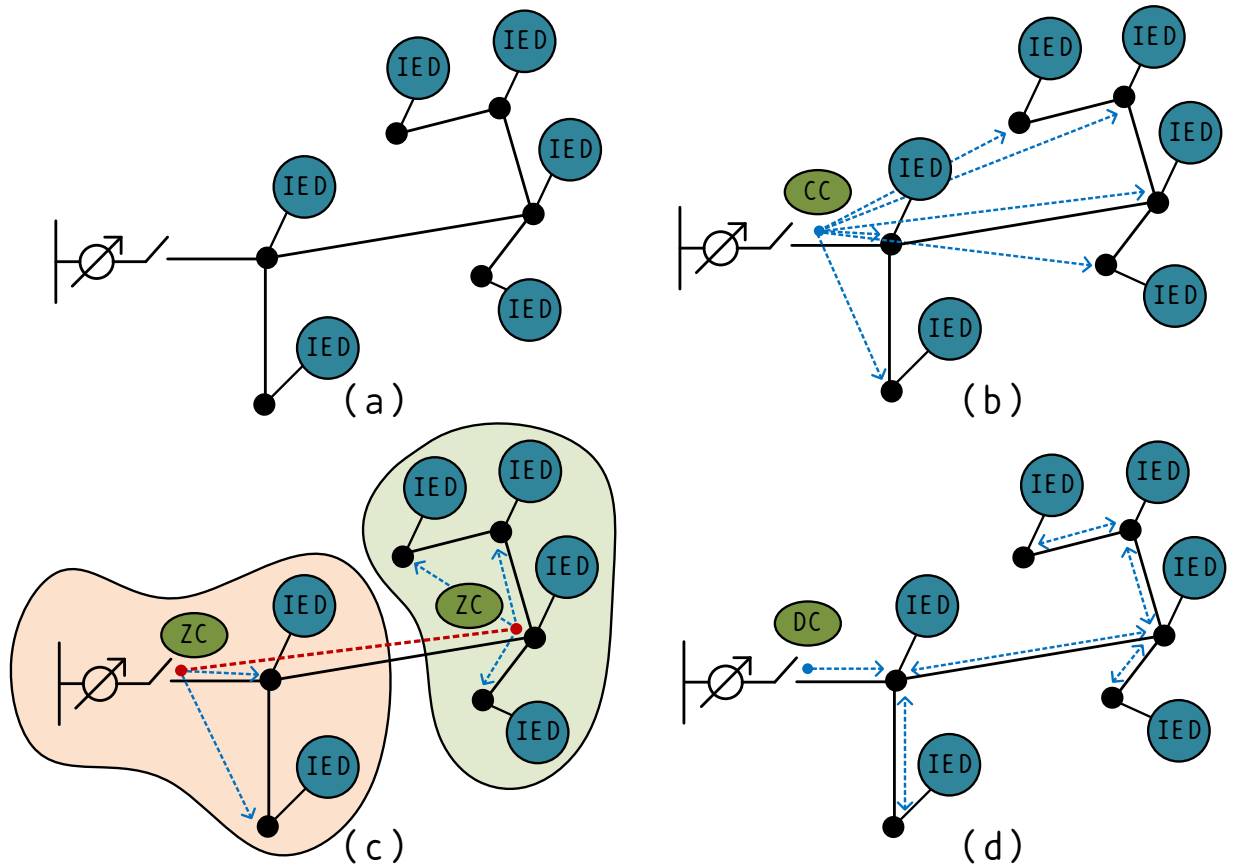
1.4.1. Η αποκέντρωση ως αρχιτεκτονική λειτουργίας του Ευφυούς ΔΔ

Με αφετηρία τα προβλήματα που έχουν ήδη ανακύψει στον κλάδο των δικτύων αισθητήρων αλλά και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το δίκτυο διανομής στο άμεσο μέλλον αναμένεται να λάβει τη μορφή ενός τέτοιου δικτύου, εναλλακτικές προσεγγίσεις διερευνώνται σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου, οι οποίες θα μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά την τεράστια πολυπλοκότητά του, θα προστατεύουν τα προσωπικά δεδομένα των χρηστών του και θα εμφανίζουν σημαντική ανεκτικότητα σε αστοχίες εξοπλισμού.

Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες [11] - [12], η αποκέντρωση αποτελεί μια τέτοια εναλλακτική προσέγγιση για τη λειτουργία του δικτύου διανομής, η οποία μπορεί να διαχωριστεί σε διάφορα επίπεδα ανάλογα με το πρόβλημα που μελετάται κάθε φορά. Μια απλοϊκή αλλά αρκετά αντιπροσωπευτική θεώρηση διαφορετικών περιπτώσεων αποκέντρωσης για τη λειτουργία και το συντονισμό των «ευφύων» οντοτήτων του ΔΔ φαίνεται στο Σχήμα 1-1. Έμφαση πρέπει να δοθεί σε αυτό το σημείο στο γεγονός, ότι ο προτεινόμενος διαχωρισμός δεν αντιστοιχεί απαραίτητα σε τηλεπικοινωνιακή σύνδεση διαφορετικών «ευφύων» οντοτήτων του δικτύου (ή Ευφύων Ηλεκτρονικών Συσκευών - ΕΗΣ/Intelligent Electronic Devices - IED), αλλά στον τρόπο μετάδοσης και συγκέντρωσης (ή όχι) της πληροφορίας που απαιτείται για τις διάφορες λειτουργίες του δικτύου και υποδηλώνει επομένως διαφορετικές ιεραρχίες ως προς τη λήψη των αποφάσεων συντονισμού.

Τα εφαρμοζόμενα συστήματα ελέγχου μπορούν επομένως να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με το αν υπάρχει ή όχι επικοινωνία. Στην πρώτη περίπτωση, οι διαφορετικές δομές ιεράρχησης μπορούν να ταξινομηθούν βάση του τρόπου ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των οντοτήτων ως: i) κεντρική (ή συγκεντρωτική), ii) αποκεντρωμένη και iii) ολικά αποκεντρωμένη ή αλλιώς κατανεμημένη. Συγκεκριμένα, ο όρος κατανεμημένη (Distributed) θα υιοθετηθεί σε αυτήν διατριβή για να υποδηλώσει μια ολικά αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική. Επιπλέον, υβριδικά σχήματα μπορούν να υπάρξουν συνδυάζοντας κάποιες από τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Η πρώτη περίπτωση, στην οποία δεν υπάρχει επικοινωνία (Σχήμα 1-1 (a)), αναφέρεται συχνά ως τοπικός (ή αυτόνομος) έλεγχος (local control). Οι ελεγκτές σε αυτήν την περίπτωση (σημειωμένοι ως ευφυείς ηλεκτρονικές συσκευές (IEDs) στο σχήμα) χρησιμοποιούν μόνο μετρήσεις στο σημείο της κοινής σύνδεσης (PCC) χωρίς κάποια άλλη απομακρυσμένη μέτρηση στο δίκτυο. Αυτή η δομή χαρακτηρίζεται από γρήγορη απόκριση και δεν επηρεάζεται από αστοχίες του επικοινωνιακού δικτύου. Ωστόσο, δεδομένου ότι δεν υπάρχει συντονισμός, δεν εκμεταλλεύεται πλήρως το δυναμικό των ελεγχόμενων οντοτήτων και άρα δεν μπορούν ευρεθούν ολικά βέλτιστες λύσεις για τη λειτουργία του δικτύου [13] - [14]. Στον κεντρικό έλεγχο, (Σχήμα 1-1 (b)), ένας κεντρικός ελεγκτής, λαμβάνει όλες τις απαιτούμενες μετρήσεις και παραμέτρους του δικτύου, μέσω των απομακρυσμένων οντοτήτων, υπολογίζει τη βέλτιστη λύση στο πρόβλημα ελέγχου και στέλνει πίσω τις αποφάσεις ελέγχου [15] - [16]. Ο κεντρικός ελεγκτής σε αυτή την περίπτωση, είναι το μόνο στοιχείο του δικτύου που μπορεί να ξεκινήσει μια ενέργεια ελέγχου προκειμένου να αντιμετωπιστεί κάποιο τοπικό πρόβλημα ή να βελτιστοποιήσει τη λειτουργία του δικτύου.



Σχήμα 1-1 Ταξινόμηση δομών ελέγχου ανάλογα με την αρχιτεκτονική συντονισμού: a) χωρίς επικοινωνία, b) κεντρικός έλεγχος, CC: central coordinator (κεντρικός ελεγκτής), c) αποκεντρωμένος έλεγχος, ZC: zone coordinator (ελεγκτής ζώνης) και d) κατακεντρωμένος (ή ολικά αποκεντρωμένος) έλεγχος, DC: distributed coordinator (κατακεντρωμένος ελεγκτής) (αναφέρεται πιθανότατα στη διαπαφή του διαχειριστή δικτύου).

Ο αποκεντρωμένος έλεγχος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-1 (c), αναφέρεται σε μια αρχιτεκτονική όπου ενδέχεται να υπάρχουν πολλαπλά σημεία ελέγχου. Μια συνηθισμένη περίπτωση αποκεντρωμένου ελέγχου είναι ο διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες (π.χ. [17] - [18]), όπου σε κάθε ζώνη ανατίθεται ένας ελεγκτής (συντονιστής ζώνης). Επιπλέον, οι διάφοροι ελεγκτές ζώνης μπορούν να ανταλλάζουν δεδομένα προκειμένου να επιτυγχάνουν το βέλτιστο συντονισμό σε ολόκληρο το δίκτυο. Στην περίπτωση του κατανεμημένου ελέγχου (Σχήμα 1-1 (d)), όλες οι ενεργές οντότητες του δικτύου βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο ιεραρχίας (είναι ομότιμες) και επικοινωνούν με τις γειτονικές οντότητες προκειμένου να λάβουν κάποια απόφαση που αφορά τη διαχείριση των τοπικών τους πόρων, έχοντας όμως ως στόχο να βρουν τη βέλτιστη λύση για όλο το δίκτυο (π.χ., [19] - [20]). Σε αυτή την αρχιτεκτονική, η «τοπική» συμπεριφορά των ευφυών οντοτήτων σε συνδυασμό με ανταλλαγή πληροφορίας μόνο με γειτονικούς κόμβους οδηγεί σε μια συλλογική απόφαση για όλο το δίκτυο, ανάλογα με τους στόχους που τίθενται κάθε φορά (δηλ. από τον διαχειριστή του δικτύου ή και τους ίδιους τους κόμβους). Η δυνατότητα συντονισμού επικοινωνώντας μόνο με γειτονικούς κόμβους, οδηγεί άμεσα στο συμπέρασμα ότι το συνολικό πρόβλημα του δικτύου λύνεται από οντότητες που αγνοούν μεγάλο μέρος του προβλήματος, του δικτύου ή και ακόμη την ύπαρξη άλλων οντοτήτων πέρα από τις γειτονικές.

1.4.2. Πλεονεκτήματα της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής

Μια κατανεμημένη αρχιτεκτονική για το συντονισμό των πόρων του ΔΔ όπως περιεγράφηκε προηγουμένως, προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα τα βασικότερα εκ των οποίων είναι η επεκτασιμότητα και η δυνατότητα έως κάποιου βαθμού αυτόνομης λειτουργίας και οργάνωσης. Εφόσον, η βέλτιστη απόφαση για όλο το δίκτυο υπολογίζεται από κόμβους που δεν γνωρίζουν όλο το δίκτυο, τότε συνεπάγεται ότι καινούργιοι κόμβοι μπορούν εύκολα να προστεθούν ή να αφαιρεθούν χωρίς να απαιτείται κάποια ρύθμιση στους υπόλοιπους κόμβους, επιτυγχάνοντας έτσι την ιδιότητα της «τοποθέτησης και άμεσης λειτουργίας» (plug and play), χαρακτηριστικό ιδιαίτερα θελκτικό για τα μελλοντικά ευφυή δίκτυα. Αντίστοιχα, αφού η απώλεια ενός (ή κάποιου αριθμού) κόμβων δε θα οδηγήσει το σύστημα σε αδυναμία λήψης απόφασης ελέγχου, μπορεί να υποτεθεί ότι η ευρωστία του δικτύου θα είναι αυξημένη σε σχέση με μια κεντρική προσέγγιση. Για τους ίδιους λόγους, αυξημένη θα είναι και η ανεκτικότητα σε τηλεπικοινωνιακές καθυστερήσεις. Επιπλέον, αφού η πληροφορία που αφορά τις ελεγχόμενες οντότητες του δικτύου (και κατ' επέκταση τους χρήστες του δικτύου) δεν συγκεντρώνεται σε κάποιο κεντρικό σημείο, οι κόμβοι μπορούν να διατηρούν την ιδιωτικότητά τους. Τέλος, η επίλυση των ιδιαίτερα δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης κατανέμεται και επομένως απλοποιείται καθώς κάθε κόμβος επιλύει το τοπικό του πρόβλημα (σε συνδυασμό με τα τοπικά προβλήματα των γειτόνων του).

Όπως φαίνεται, τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την κατανεμημένη αρχιτεκτονική για τη λειτουργία του δικτύου διανομής όπως ορίστηκε στην προηγούμενη ενότητα, δεν είναι μόνο πολλαπλά, αλλά απαντούν και σε προβλήματα που ήδη εμφανίζονται ή που

αναμένεται να εμφανιστούν στα επόμενα χρόνια, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές ευφύων δικτύων.

1.4.3. Ο συγχρονισμός και η αυτό-οργάνωση στη φύση

Η έννοια της αποκέντρωσης χρησιμοποιείται από διάφορους επιστημονικούς κλάδους όπως η πολιτική επιστήμη και η επιστήμη της πληροφορικής ενώ απαντάται στη φύση στα πλαίσια φυσικών μηχανισμών που επιτυγχάνουν το «συγχρονισμό» και την αυτό-οργάνωση. Η θεωρία σμήνους ή «ευφυία σμήνους», περιγράφει πρακτικά την εμφάνιση συλλογικών συμπεριφορών σε έναν πληθυσμό (σμήνος) μέσα από την αλληλεπίδραση μεταξύ των ατόμων που το απαρτίζουν. Εντοπίζεται στη συμπεριφορά κάποιων κοινωνικών εντόμων (μυρμήγκια, μέλισσες, κ.ά.), σε σμήνη πουλιών, κοπάδια ψαριών κ.α. Η οργάνωση του σμήνους δεν επιτυγχάνεται κάτω από την εποπτεία κανενός, αλλά μέσω της αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών (όπως τοποθετούνται στο χώρο) ατόμων. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων ορίζονται από κάποιους απλούς βασικούς κανόνες βάσει πληροφοριών καθαρά τοπικού χαρακτήρα.

Συγκεκριμένα, ο συγχρονισμός είναι η διαδικασία όπου δύο ή περισσότερα συστήματα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και καταλήγουν να λειτουργούν συζευγμένα ως προς κάποια ιδιότητά τους. Το φαινόμενο του συγχρονισμού παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Christiaan Huygens το 1658 μεταξύ δύο συζευγμένων με μια ξύλινη δοκό ρολογιών με εκκρεμή. Έκτοτε έχει παρατηρηθεί πληθώρα φυσικών φαινομένων συγχρονισμού όπως για παράδειγμα ένα είδος πυγολαμπίδων στη νοτιοανατολική Ασία, που συντονίζουν τον κύκλο φωτοβολίας τους επηρεάζοντας η μια την άλλη και καταλήγουν έτσι σε «συναίνεση» (consensus) της φάσης φωτοβολίας τους, ο συγχρονισμός των καρδιακών κυττάρων για το συντονισμό των παλμών της καρδιάς, κ.ά. Ο αυθόρμητος συγχρονισμός στο χειροκρότημα των θεατών σε μία αίθουσα αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα συγχρονισμού χωρίς κεντρικό συντονισμό [21]. Ο συγχρονισμός συναντάται επομένως συχνά στη φύση, με τη μορφή «συναίνεσης», με το στόχο της αυτό-οργάνωσης καθώς επίσης και της εμφάνισης «ευφυίας σμήνους». Τα βασικά χαρακτηριστικά των λεγόμενων «βιολογικών ταλαντωτών» που αποτελούν μοντέλα συγχρονισμού στη φύση, μπορούν να αναπαρασταθούν από βιοφυσικά δίκτυα με πολλά αλληλεπιδρώντα είδη. Ο κλάδος της συστημικής βιολογίας μελετά τέτοια βιοφυσικά δίκτυα χρησιμοποιώντας τόσο το πείραμα όσο και εργαλεία προσομοίωσης, προκειμένου να κατανοήσει τους βιολογικούς ταλαντωτές και να μοντελοποιήσει τις δυναμικές συμπεριφορές των αλληλεπιδρώντων ατόμων [22].

1.5. Σκοπός και δομή της διατριβής

Η αναγκαιότητα για έλεγχο σε πραγματικό χρόνο πολύπλοκων συστημάτων όπως το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, έχει οδηγήσει στην διερεύνηση καινοτόμων τεχνικών ελέγχου που μπορούν να κατανείμουν τις εργασίες στα δομικά στοιχεία των συστημάτων αυτών, έτσι ώστε καθένα από αυτά να λύνει αποδοτικότερα ένα μικρότερο τμήμα του προβλήματος. Η βάση έρευνας για την περάτωση αυτού του στόχου είναι η αξιοποίηση δυναμικών

μαθηματικών μοντέλων (όπως τα μοντέλα «συναίνεσης» και τα μοντέλα βιολογικών ταλαντώσεων), για την ανάπτυξη στιβαρών κατανεμημένων πρωτοκόλλων τα οποία θα επιτυγχάνουν την αυτόματη οργάνωση και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας και του ελέγχου του ευφυούς ΔΔ.

Ταυτόχρονα, η ευρεία εγκατάσταση έξυπνων μετρητών και συσκευών με διεπαφές ηλεκτρονικών ισχύος στα ευφυή δίκτυα διανομής, θέτουν την απαραίτητη υποδομή (τεχνικό υπόβαθρο) για την εφαρμογή τέτοιων μεθόδων ελέγχου. Σε κάθε κόμβο του δικτύου διανομής ο οποίος παρακολουθείται ή διαθέτει ελεγχόμενους πόρους (π.χ., ελεγχόμενα φορτία, μονάδες ΔΠ, κ.ά.) θα θεωρούνται στα πλαίσια της εργασίας αυτής αισθητήρες και ελεγκτές. Ο σκοπός και η συμβολή της παρούσας διατριβής εστιάζεται επομένως στην ανάπτυξη και διερεύνηση της αποτελεσματικότητας κατανεμημένων τεχνικών βελτιστοποίησης προσανατολισμένων στη λειτουργία και στον έλεγχο του ευφυούς δικτύου διανομής.

Η παρούσα διατριβή αποτελείται από 6 κεφάλαια και διαρθρώνεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2, ορίζονται κάποιες βασικές έννοιες και δίνεται η ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας. Αρχικά ταξινομούνται και διερευνώνται κάποιες γενικότερες μέθοδοι κατανεμημένης βελτιστοποίησης ενώ στη συνέχεια αναζητούνται στη βιβλιογραφία μέθοδοι σχετικές με κάθε μια από τις προτεινόμενες μεθόδους που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 3, διατυπώνεται και μελετάται το μοντέλο Τοπικών Εξισώσεων Κλωνωτή από τον κλάδο δυναμικής πληθυσμού (population dynamics), το οποίο εφαρμόζεται για την κατανεμημένη επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου μονάδων ΔΠ στο επίπεδο της διανομής. Αναπτύσσεται και διερευνάται αλγόριθμος ο οποίος λαμβάνει υπόψη τα τεχνικά όρια των μονάδων και τον εξισωτικό περιορισμό κάλυψης φορτίου και στη συνέχεια ο αλγόριθμος επεκτείνεται προκειμένου να λαμβάνει υπόψη τις απώλειες ενεργού ισχύος με βέλτιστο τρόπο. Η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων που αναπτύσσονται καθώς επίσης και η συμπεριφορά του μοντέλου TEK ως προς τις εσωτερικές του παραμέτρους αξιολογούνται μέσα από διαφορετικά σενάρια προσομοιώσεων.

Στο Κεφάλαιο 4, αναπτύσσεται κατανεμημένη μέθοδος για την εύρεση των ροών φορτίου, η οποία βασίζεται σε έναν τροποποιημένο αλγόριθμο Newton-Raphson. Η μέθοδος εκμεταλλεύεται μια σημαντική ιδιότητα της Ιακωβιανής μήτρας των εξισώσεων ροής φορτίου και χρησιμοποιεί ένα κατανεμημένο πρωτόκολλο για τον υπολογισμό των διορθώσεων τάσης και γωνίας. Η ακρίβεια και η πρακτική εφαρμοσιμότητα της μεθόδου ελέγχονται με προσομοιώσεις σε διαφορετικά πρότυπα δίκτυα.

Στο Κεφάλαιο 5 προτείνεται κατανεμημένος αλγόριθμος για την βέλτιστη ρύθμιση της τάσης στα πλαίσια του ευφυούς ΔΔ θεωρώντας ελεγχόμενα φορτία και μονάδες ΔΠ. Αξιοποιώντας την ιδιότητα της Ιακωβιανής μήτρας των εξισώσεων ροής φορτίου, μελετάται το

πρόβλημα της ρύθμισης τάσης ως πρόβλημα βελτιστοποίησης για την εύρεση των ελάχιστων εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος από τους ελεγχόμενους πόρους του ΔΔ με σκοπό την αντιμετώπιση των παραβιάσεων τάσης. Η μέθοδος χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο κατάβασης βαθμίδας σε συνδυασμό με μια μέθοδο κυρτής βελτιστοποίησης. Η ακρίβεια και η πρακτική εφαρμοσιμότητα της προτεινόμενης μεθόδου διερευνάται και αξιολογείται μέσω μιας σειράς σεναρίων προσομοίωσης, πρώτα σε απλοποιημένα δίκτυα διανομής λίγων κόμβων και στη συνέχεια σε μεγαλύτερα, πρότυπα δίκτυα.

Στο κεφάλαιο 6 διερευνάται η εφαρμοσιμότητα των τεχνολογιών καταμεμημένων μητρώων σε προβλήματα ευφυών δικτύων. Διενεργείται σχετική βιβλιογραφική ανασκόπηση και προτείνονται κατάλληλες εφαρμογές. Στη συνέχεια σχεδιάζονται δύο σενάρια προς αυτήν την κατεύθυνση, υλοποιούνται για το πρωτόκολλο Ethereum και αναπτύσσεται και προσομοιώνεται ο κώδικας των αντίστοιχων έξυπνων συμβολαίων.

Στο Κεφάλαιο 7 δίνονται τα συμπεράσματα κάθε κεφαλαίου καθώς επίσης και η συμβολή της διατριβής. Προτείνονται επίσης προοπτικές μελλοντικής έρευνας, σχετικές με τα θέματα της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1. Κατανεμημένη βελτιστοποίηση σε δικτυωμένα συστήματα

Τα δικτυωμένα συστήματα (networked systems) μπορούν να μοντελοποιηθούν ως Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων - ΣΠΠ (Multi-Agent Systems - MAS), όπου κάθε πράκτορας στο δίκτυο αντιπροσωπεύει μια οντότητα ελέγχου η οποία είναι σε θέση να επικοινωνεί, να λαμβάνει μετρήσεις, να κάνει υπολογισμούς και να αλληλεπιδρά με κάποιο βαθμό αυτονομίας με το περιβάλλον της. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το δίκτυο θα επιτυγχάνει τους στόχους του σε βέλτιστο βαθμό, οι πράκτορες θα πρέπει να επιλύουν το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης απόφασης (σε τοπικό επίπεδο) μέσα από ένα σύνολο εφικτών λύσεων. Σε αυτήν την κατεύθυνση, ο βέλτιστος κατανεμημένος έλεγχος (Distributed Optimization-based Control - DOP) αποτελεί ένα μαθηματικά αυστηρό πλαίσιο για την διατύπωση και βέλτιστη επίλυση τέτοιων προβλημάτων.

2.1.1. Βασικές έννοιες

Για τη μοντελοποίηση τόσο των ηλεκτρικών δικτύων όσο και των αλληλεπιδράσεων των κατανεμημένων πρωτοκόλλων, αναφέρονται επιγραμματικά κάποιες βασικές έννοιες από τη θεωρία γράφων, κυρτής βελτιστοποίησης, βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς και δικής θεωρίας (duality theory) [23].

Ένας κατευθυνόμενος γράφος με βάρη, τάξης N , ορίζεται ως $\mathcal{G} \triangleq (V, \mathcal{E}, A)$, όπου V ένα πεπερασμένο σύνολο από N κόμβους, $\mathcal{E} \subset V \times V \setminus \text{diag}(V)$ είναι ένα σύνολο από διατεταγμένα ζεύγη κόμβων τα οποία ονομάζονται ακμές και $A \triangleq [a_{ij}^i] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ο πίνακας γειτνίσεως του γράφου, ο οποίος περιέχει μη αρνητικούς πραγματικούς αριθμούς που αντιστοιχούν στα βάρη των ζευγών $(i, j) \in V \times V \setminus \text{diag}(V)$. Επιπλέον, $a_{ij}^i > 0$ αν και μόνο αν $(i, j) \in \mathcal{E}$. Οι γείτονες εισόδου (in-neighbors) του κόμβου i είναι οι κόμβοι που ανήκουν στο

σύνολο $N_i \triangleq \{j \in V \mid (j, i) \in \mathcal{E} \text{ και } j \neq i\}$. Αντίστοιχα, ο κόμβος j ονομάζεται γείτονας εξόδου (out-neighbor) του κόμβου i αν $i \in N_j$. Ένας κατευθυνόμενος γράφος \mathcal{G} είναι μη κατευθυνόμενος εάν $(i, j) \in \mathcal{E}$ συνεπάγεται $(j, i) \in \mathcal{E}$. Ένας μη κατευθυνόμενος γράφος λέγεται συνεκτικός (connected) αν για κάθε ζευγάρι κορυφών υπάρχει διαδρομή που τις συνδέει. Ένας κατευθυνόμενος γράφος \mathcal{G} ονομάζεται χαλαρά συνεκτικός (ή απλά συνεκτικός) εάν ο μη κατευθυνόμενος γράφος που προκύπτει αν αντικαταστήσουμε όλες τις κατευθυνόμενες ακμές του \mathcal{G} με μη κατευθυνόμενες ακμές είναι ένας συνεκτικός γράφος, ενώ ισχυρά συνεκτικός εάν για κάθε ζευγάρι κορυφών (i, j) υπάρχει ένα κατευθυνόμενο μονοπάτι από την κορυφή i στην κορυφή j καθώς επίσης και ένα κατευθυνόμενο μονοπάτι από την κορυφή j στην κορυφή i . Επιπλέον, ένας κατευθυνόμενος γράφος με βάρη ονομάζεται δίκτυο. Μονοπάτι από έναν κόμβο σε έναν άλλο ενός γραφήματος ονομάζεται μια ακολουθία κόμβων, όπου κάθε κόμβος της ακολουθίας συνδέεται με τον επόμενο του μέσω ακμής. Ένα μονοπάτι λέγεται κύκλος, αν καταλήγει στον ίδιο κόμβο από τον οποίο ξεκινά. Ένας συνεκτικός μη κατευθυνόμενος γράφος χωρίς κύκλους ονομάζεται δέντρο.

Ένα σύνολο $X \in \mathbb{R}^n$ είναι κυρτό εάν $ax + (1 - a)y \in X, \forall x, y \in X$ και $a \in [0, 1]$. Μια συνάρτηση $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ ορισμένη σε ένα κυρτό σύνολο X είναι κυρτή εάν $f(ax + (1 - a)y) \leq af(x) + (1 - a)f(y), \forall x, y \in X$ και $a \in [0, 1]$. Η f είναι αυστηρά κυρτή όταν στην προηγούμενη έκφραση εφαρμόζεται η αυστηρή ανισότητα. Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζεται ως:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} f(x), \quad \tau. \omega. \quad x \in X \quad (2.1)$$

όπου $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση και $X \subseteq \mathbb{R}^n$ είναι το σύνολο των περιορισμών του προβλήματος. Ένα διάνυσμα x^* ονομάζεται διάνυσμα ελαχίστου ή διάνυσμα ολικού ελαχίστου της f στο X εάν $f(x^*) = \inf_{x \in X} f(x)$, ενώ η $f(x^*)$ αναφέρεται ως βέλτιστη τιμή. Σύμφωνα με το θεώρημα του Weierstrass για τις συνεχείς συναρτήσεις, εάν η f είναι συνεχής και το X είναι συμπαγές σύνολο, τότε υπάρχει τουλάχιστον ένα ολικό ελάχιστο της f στο X . Ένα διάνυσμα x^* ονομάζεται διάνυσμα τοπικού ελαχίστου όταν υπάρχει πραγματικό $\varepsilon > 0$ τέτοιο ώστε $f(x^*) \leq f(x), \forall x \in X$ με $\|x - x^*\| \leq \varepsilon$. Επιπλέον, όταν η f και το X είναι κυρτά, συνεπάγεται ότι κάθε τοπικό ελάχιστο θα είναι και ολικό. Το επόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς:

$$\min_{x \in X} f(x), \quad \tau. \omega. \quad g(x) \leq 0 \quad (2.2)$$

όπου τα $X \subset \mathbb{R}^n, f : X \rightarrow \mathbb{R}$ και $g : X \rightarrow \mathbb{R}^r$ είναι κυρτό σύνολο και κυρτές συναρτήσεις αντίστοιχα, αναφέρεται επίσης και ως πρωτεύων πρόβλημα, ενώ η f^* ως πρωτεύουσα βέλτιστη τιμή με $f^* = \inf_{x \in X, g(x) \leq 0} f(x)$. Σύμφωνα με τη δυική θεωρία, η συνάρτηση περιορισμών g μπορεί να ληφθεί υπόψη επαυξάνοντας την αντικειμενική συνάρτηση ως ένα γραμμικό συνδυασμό των f και g . Ορίζεται με αυτόν τον τρόπο η συνάρτηση Lagrange: $\mathcal{L} : X \times \mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}$ έτσι ώστε $\mathcal{L}(x, \mu) \triangleq f(x) + \mu^T g(x)$, όπου μ το διάνυσμα πολλαπλασιαστών Lagrange. Η δυική συνάρτηση $q : \mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}$ ορίζεται ως:

$$q(\mu) = \begin{cases} \inf_{x \in X} \mathcal{L}(x, \mu), & \mu \geq 0, \\ -\infty, & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (2.3)$$

Η δυική συνάρτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό ενός κατώτερου φράγματος για την f^* λύνοντας το πρόβλημα $\max_{\mu \geq 0} q(\mu)$ του οποίου η βέλτιστη τιμή q^* αναφέρεται ως δυική βέλτιστη τιμή, ήτοι $q^* \leq f^*$ (θεώρημα ασθενούς δυικότητας), ενώ στην περίπτωση που ισχύουν οι ικανές και αναγκαίες συνθήκες για ισχυρή δυικότητα εξασφαλίζεται ότι $q^* = f^*$. Οι συνθήκες αυτές είναι:

- $x^* \in X$
- $\mu^* \geq 0$
- $x^* \in \operatorname{argmin}_{x \in X} \mathcal{L}(x, \mu^*)$
- $\mu_\ell^* g_\ell(x^*) = 0$, για όλα τα $\ell \in \{1, \dots, r\}$

2.2. Το πρόβλημα της «συναίνεσης» (consensus)

Το πρόβλημα της συναίνεσης σε ένα καταναμημένο περιβάλλον, αποτελεί ένα βασικό πρόβλημα για το βέλτιστο καταναμημένο έλεγχο, σύμφωνα με το οποίο αναζητείται ο τρόπος όπου οι πράκτορες σε ένα πολυπρακτορικό σύστημα συμφωνούν σε μια ποσότητα ενδιαφέροντος μέσω ενός καταναμημένου αλγορίθμου που περιλαμβάνει τοπικούς υπολογισμούς και ανταλλαγή πληροφοριών. Εναλλακτικά, οι πράκτορες αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόκλισης από τη μεταβλητή συναίνεσης. Τα πρωτόκολλα συναίνεσης αποτελούν δομικά στοιχεία άλλων πιο εξειδικευμένων καταναμημένων διεργασιών όπως για παράδειγμα: η καταναμημένη εκτίμηση παραμέτρων σε ένα δίκτυο αισθητήρων, ο καταναμημένος έλεγχος σχηματισμού πτήσεως, η καταναμημένη ανάθεση εργασιών κ.ά. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση συναίνεσης ενός συστήματος πολλαπλών πρακτόρων σε μια τιμή ενδιαφέροντος είναι ο καταναμημένος υπολογισμός του μέσου όρου κάποιων τοπικών παραμέτρων των πρακτόρων.

2.2.1. Καταναμημένος υπολογισμός μέσου όρου

Έστω δίκτυο που ορίζεται από ένα μη κατευθυνόμενο γράφο $\mathcal{G} \triangleq (V, \mathcal{E})$ με n κόμβους, όπου ο κάθε ένας συσχετίζεται με μια αριθμητική τιμή, z_i της οποίας ζητείται ο μέσος όρος σε όλο το δίκτυο. Το διάνυσμα z θεωρείται ότι διατηρεί τη τιμή κάθε κόμβου i στην i -οστή του συνιστώσα. Επίσης, κάθε κόμβος διαθέτει μια εσωτερική μεταβλητή x_i η οποία θα αναφέρεται ως κατάσταση του κόμβου i και αρχικά τίθεται ίση με z_i .

Ένας κανόνας ανανέωσης για τον υπολογισμό του μέσου όρου διατυπώνεται μέσω του επόμενου συστήματος διακριτού χρόνου:

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{x}(t) - \gamma L \mathbf{x}(t) \quad (2.4)$$

όπου γ είναι το βήμα ανανέωσης και L ο Λαπλασιανός πίνακας του μη κατευθυνόμενου γράφου \mathcal{G} . Ο Λαπλασιανός πίνακας L ορίζεται ως:

$$L_{ij} = \begin{cases} d_i & \alpha\nu \ i = j \\ -1 & \alpha\nu \ (i, j) \in \mathcal{E} \\ 0 & \alpha\lambda\lambda\iota\omega\varsigma \end{cases} \quad (2.5)$$

και d_i είναι ο βαθμός του κόμβου i , (ο αριθμός των γειτόνων του). Ο αλγόριθμος (2.4) αποτελεί ουσιαστικά μια επαναληπτική μέθοδο επίλυσης του ακόλουθου προβλήματος βελτιστοποίησης [24]:

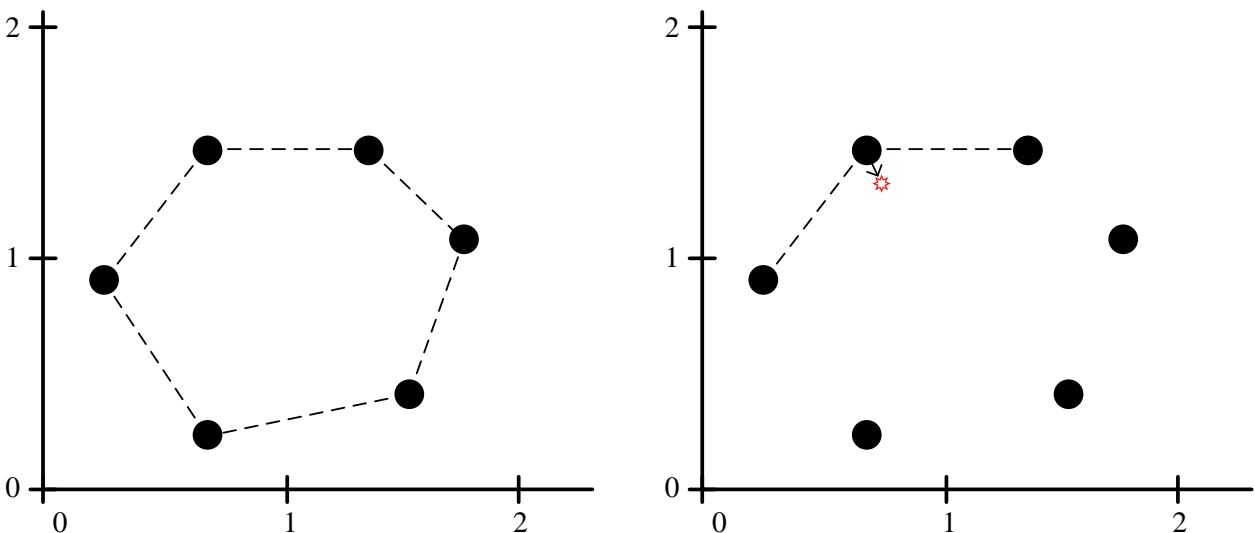
$$\begin{aligned} \min_{x \in \mathbb{R}^n} & \frac{1}{2} \mathbf{x}^T L \mathbf{x} \\ \tau. \omega. & \sum_i x_i = \sum_i z_i \end{aligned} \quad (2.6)$$

όπου μπορεί να δειχθεί ότι ο αλγόριθμος θα οδηγεί κάθε κατάσταση x_i στο μέσο όρο $\sum_i \frac{z_i}{n}$, εφόσον για το βήμα ανανέωσης γ ισχύει:

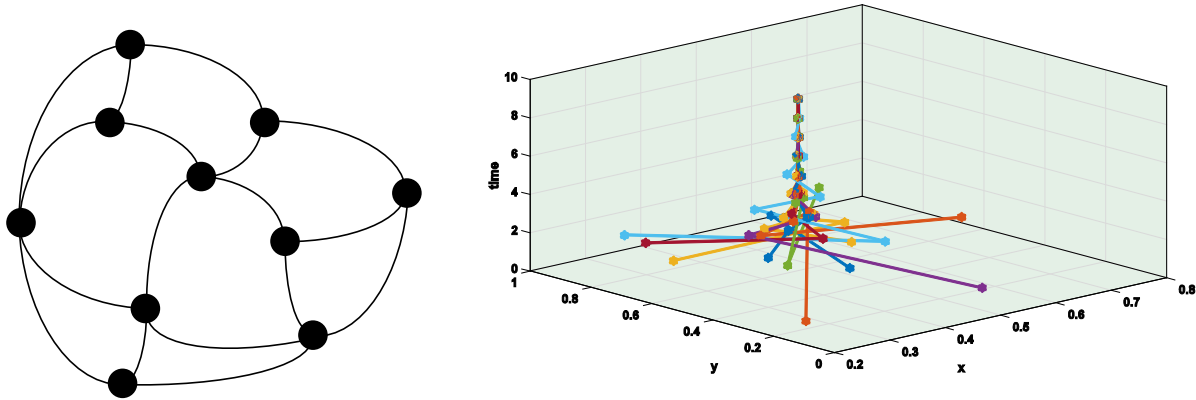
$$0 < \gamma < \frac{1}{2d_{max}} \quad (2.7)$$

με το d_{max} να αντιστοιχεί στο μέγιστο βαθμό κόμβου του γράφου [25].

Στο Σχήμα 2-1 (αριστερά), παρουσιάζεται ένα δίκτυο κόμβων, ο καθένας εκ των οποίων διαθέτει από ένα ζεύγος τιμών, το οποίο αντιστοιχίζεται για τους σκοπούς της παρουσίασης της μεθόδου, στο καρτεσιανό επίπεδο. Ο σκοπός του προβλήματος συντονισμού είναι η συναίνεση στις δύο διαστάσεις (δηλαδή ο υπολογισμός του μέσου όρου της οριζόντιας και ταυτόχρονα της κάθετης συνιστώσας) έτσι ώστε οι κόμβοι να τοποθετηθούν τελικά στο ίδιο σημείο (που θα αντιστοιχεί στο μέσο όρο των αρχικών σημείων στο επίπεδο).



Σχήμα 2-1 Γράφος 6 κόμβων οι οποίοι τοποθετούνται στο επίπεδο ανάλογα με τις συντεταγμένες με τις οποίες αντιστοιχίζονται, οι ακμές εμφανίζονται με διακεκομμένη γραμμή (αριστερά). Υπολογισμός νέας τιμής ενός κόμβου από τις εκτιμήσεις των γειτόνων του (δεξιά)



Σχήμα 2-2 Γράφος δέκα κόμβων (αριστερά) και προσομοίωση της εξέλιξης του μοντέλου συναίνεσης στις δύο διαστάσεις του καρτεσιανού επιπέδου (δεξιά).

Ο υπολογισμός (που αντιστοιχεί υποθετικά στη μετακίνηση) ενός κόμβου μετά από ανταλλαγή πληροφορίας με τους γείτονες φαίνεται στο Σχήμα 2-1 (δεξιά), όπου το καινούργιο σημείο που υπολογίζει κάθε κόμβος με τη σχέση (2.4) θα βρίσκεται μέσα στην κυρτή θήκη (convex hull) που ορίζεται από το σημείο του και τα σημεία των γειτόνων του για τη συγκεκριμένη επανάληψη. Ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται από κάθε κόμβο μέχρι τη σύγκλισή τους σε ένα κοινό σημείο. Η διαδικασία προσομοιώνεται στο Σχήμα 2-2 (δεξιά) για ένα δίκτυο 10 κόμβων, με το γράφο επικοινωνίας να παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-2 (αριστερά).

2.2.2. Περιορισμοί του βασικού μοντέλου συναίνεσης

Από τον ορισμό του Λαπλασιανού πίνακα προκύπτει ότι ο κανόνας ανανέωσης (2.4) απαιτεί ανταλλαγή πληροφοριών μόνο μεταξύ γειτόνων. Ωστόσο, κάποια ζητήματα ανακύπτουν το οποία πρέπει να συζητηθούν. Ένα πρόβλημα είναι ότι ο υπολογισμός της (2.4) απαιτεί κάποιο είδους συντονισμού στο τρόπο που γίνονται οι επαναλήψεις (πιο συγκεκριμένα δεν φαίνεται να είναι ανεκτικός σε απώλεια πακέτων ή τηλεπικοινωνιακές καθυστερήσεις). Επίσης, όλοι οι κόμβοι του δικτύου θα πρέπει να χρησιμοποιούν ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους για τη βελτιστοποίηση, όπως το βήμα ανανέωσης, το ανώτερο επιτρεπτό όριο επαναλήψεων κ.ά., απαίτηση που δεν είναι απαγορευτική για την υλοποίηση του αλγορίθμου αλλά ούτε και επιθυμητή καθώς απαιτεί κάποιο κεντρικό συντονισμό. Επιπλέον, η πληροφορία μπορεί να μην συγκεντρώνεται σε ένα μόνο σημείο του δικτύου, αλλά ο κάθε κόμβος γνωρίζει τις παραμέτρους των γειτόνων του, γεγονός που δεν εξασφαλίζει την επιθυμητή ιδιότητα της ιδιωτικότητας. Παράλληλα, ζητήματα ασφάλειας εγείρονται π.χ. κάποιος κακόβουλος κόμβος μπορεί να εισάγει σκόπιμα ψευδείς πληροφορίες πιθανώς για να οδηγήσει το σύστημα σε κάποιο σημείο ισορροπίας με σκοπό να εξυπηρετήσει τα δικά του συμφέροντα. Αυτά τα ζητήματα ξεφεύγουν από το σκοπό αυτής της διατριβής, παρόλα αυτά αναφέρονται συνοπτικά λύσεις οι οποίες έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Για παράδειγμα, στη μελέτη [25] το βασικό μοντέλο συναίνεσης επεκτείνεται ώστε να μην απαιτείται συντονισμός και ταυτόσημες τιμές στις παραμέτρους της βελτιστοποίησης κα-

θώς επίσης επιτρέπονται ασύγχρονες αλλαγές στην τοπολογία. Στη μελέτη [26], ένα μερικώς ομομορφικό σύστημα κρυπτογράφησης (Partially Homomorphic Encryption) χρησιμοποιείται, προκειμένου να διαφυλαχθεί η ιδιωτικότητα με πλήρως αποκεντρωμένο τρόπο, παρέχοντας εγγυήσεις για συναίνεση στην ακριβή τιμή χωρίς την απαίτηση οι κόμβοι να αποκαλύπτουν την εσωτερική τους κατάσταση στους γείτονές τους. Αντίστοιχα, στις εργασίες [27] και [28] αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της ύπαρξης κακόβουλων κόμβων που σκοπεύουν όχι μόνο να εκτιμήσουν τις αρχικές καταστάσεις άλλων κόμβων αλλά και να διαταράξουν ή να αποτρέψουν τη συναίνεση εισάγοντας ψευδή δεδομένα.

2.2.3. Κλάσεις τεχνικών κατανεμημένης βελτιστοποίησης

Η λογική στην οποία βασίζεται συχνά ο σχεδιασμός αλγορίθμων κατανεμημένης βελτιστοποίησης είναι η χρήση κλασικών μεθόδων για τη βελτιστοποίηση τοπικών συναρτήσεων (σε επίπεδο κόμβου) και παράλληλα η διάδοση των παραμέτρων που αφορούν όλο το δίκτυο μέσω τεχνικών συγχρονισμού. Έτσι, το πρόβλημα της βέλτιστης λήψης απόφασης απαιτεί στις περισσότερες περιπτώσεις κάποια μορφή αυτόματου συντονισμού και συγχρονισμού.

Μια γενίκευση του απλοϊκού μοντέλου (2.4), αποτελεί η επόμενη διαφορική εξίσωση η οποία περιγράφει την χρονική εξέλιξη της εσωτερικής κατάστασης ενός κόμβου i [22]:

$$\dot{x}_i(t) = g_i(y_i) + \frac{K}{c_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} h[x_j(t - \tau_{ij}) - x_i(t)] + w_i(t) \quad (2.8)$$

$$i = 1, 2, \dots, N.$$

όπου $g_i(y_i)$ είναι η συνάρτηση μέτρησης μιας φυσικής παραμέτρου ενδιαφέροντος y_i , $h(x)$ είναι η βαθμωτή συνάρτηση σύζευξης των κόμβων, η οποία εξαρτάται συνήθως από τηλεπικοινωνιακό μέσο, το K είναι το κέρδος του βρόχου ελέγχου, το c_i είναι ένας τοπικός θετικός συντελεστής η επιλογή του οποίου καθορίζει την τελική μορφή της συναίνεσης, οι συντελεστές a_{ij} αντιστοιχούν στα βάρη του δικτύου, το τ_{ij} είναι η καθυστέρηση μετάδοσης από τον κόμβο j στον κόμβο i και $w_i(t)$ είναι ο θόρυβος της ζεύξης.

Διάφορες συναρτήσεις σύζευξης έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Στην περίπτωση που $h(x) = x$, φαίνεται εύκολα πως το μοντέλο (2.8) καταλήγει στο απλό μοντέλο συναίνεσης. Αντίστοιχα, όταν $h(x) = \sin(x)$, τότε ανάγεται στο μοντέλο που εισήχθη από τον Kuramoto [29] και περιγράφει τη συμπεριφορά ενός μεγάλου συνόλου συστημάτων συζευγμένων χημικών και βιολογικών ταλαντωτών. Διαφορετικές επιλογές για τους συντελεστές a_{ij} οδηγούν σε διαφορετικούς αλγορίθμους. Μια μεγάλη κατηγορία τέτοιων αλγορίθμων είναι οι gossip αλγόριθμοι [30], οι οποίοι στοχεύουν στη χρήση βαρών, που υπολογίζονται από τα τοπολογικά χαρακτηριστικά του γράφου επικοινωνίας και επιταχύνουν της διαδικασίας της συναίνεσης.

Προβλήματα κατανεμημένης βελτιστοποίησης επιλύονται επίσης από μοντέλα που προέρχονται από τον κλάδο της βιολογίας και μελετάνε δυναμικά φαινόμενα που εμφανίζονται

στις σχέσεις μεταξύ πληθυσμών (population dynamics) [31]. Στην ίδια κατηγορία τοποθετούνται οι εξισώσεις Lotka-Volterra [32], γνωστές και ως εξισώσεις αρπακτικού-θηράματος και αποτελούν μη γραμμικές, διαφορικές εξισώσεις που συχνά χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη δυναμική των βιολογικών συστημάτων στα οποία αλληλεπιδρούν δύο είδη, το ένα ως θηρευτής και το άλλο ως λεία.

Μια διαφορετική κλάση μεθόδων που εφαρμόζονται σε προβλήματα κατανεμημένης βελτιστοποίησης είναι αυτές οι οποίες έχουν εξελιχθεί από κλασικές μεθόδους κεντρικής βελτιστοποίησης, είτε πρώτης τάξεως όπως οι τεχνικές υποβαθμωτής βελτιστοποίησης (subgradient based methods) [33], είτε δεύτερης τάξεως όπως οι τεχνικές βελτιστοποίησης βασισμένες στη μέθοδο Newton [34]. Επίσης, μέθοδοι που βασίζονται στη χρήση της επαυξημένης συνάρτησης Lagrange και της δυκικής θεωρίας έχουν αναπτυχθεί για προβλήματα κατανεμημένης βελτιστοποίησης. Η πιο δημοφιλής σε αυτήν την κατηγορία είναι η Μέθοδος Εναλλασσόμενης Κατεύθυνσης Πολλαπλασιαστών (Alternating Direction Method of Multipliers - ADMM) [35].

Ένας αλγόριθμος που επιλύει το πρόβλημα της κατανεμημένης κατανομής πόρων είναι ο αλγόριθμος σταδιακής αύξησης και πολλαπλής μείωσης (Additive Increase Multiplicative Decrease - AIMD), ο οποίος χρησιμοποιείται στο διαδίκτυο για τον κατανεμημένο έλεγχο της συμφόρησης στο πρωτόκολλο TCP καθώς επίσης έχει προταθεί η χρήση του και σε εφαρμογές ενεργειακής διαχείρισης έξυπνων δικτύων [36].

Τέλος, μια διαφορετική προσέγγιση από τις προηγούμενες για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης λήψης αποφάσεων σε ένα κατανεμημένο περιβάλλον, είναι η κλάση αλγορίθμων Κατανεμημένης Βελτιστοποίησης υπό Περιορισμούς (Distributed constraint optimization - DCOP ή DisCOP). Ένας τυπικός αλγόριθμος αυτής της κλάσης είναι ο ADOPT ο οποίος αποτελεί μια κατανεμημένη υλοποίηση του αλγορίθμου Branch-and-Bound [37].

2.3. Εφαρμογές αποκεντρωμένου/κατανεμημένου ελέγχου για ευφυή δίκτυα

Διάφορες εφαρμογές για την αποκεντρωμένη/κατανεμημένη διαχείριση του δικτύου έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, όπως για παράδειγμα για την εποπτεία και την εκτίμηση κατάστασης αντίστοιχα [38] - [39], καθώς και για τον έλεγχο της τάσης και τον θερμικών ορίων των γραμμών [40] - [41]. Στις επόμενες υποενότητες γίνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση πρόσφατων μελετών αποκεντρωμένου/κατανεμημένου ελέγχου για τα προβλήματα της οικονομικής κατανομής φορτίου, της ροής φορτίου καθώς επίσης και εφαρμογών ελέγχου τάσης και βέλτιστης ροής φορτίου.

2.4. Οικονομική Κατανομή Φορτίου

Μια ευρεία κατηγορία κατανεμημένων εφαρμογών για το πρόβλημα της Οικονομικής Κατανομής Φορτίου (Οικονομική ΚΦ), βασίζεται στη χρήση πρωτοκόλλων συναίνεσης, το

οποία ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος του συστήματος καθώς οι γεννήτριες συγκλίνουν σε σημεία λειτουργίας με το ίδιο οριακό κόστος. Οι μελέτες [42], [43], [44], [45] και [46] χρησιμοποιούν αυτή την τεχνική για την επίτευξη της κατανεμημένης Οικονομικής ΚΦ. Μια μέθοδος διαχωρισμού που βασίζεται σε χαλάρωση Lagrange (Lagrangian Relaxation decomposition) εφαρμόζεται στη μελέτη [47] λύνοντας την Οικονομική ΚΦ κάθε περιοχής σε ένα δίκτυο χωρισμένο σε ζώνες. Στην εργασία [48], χρησιμοποιείται η μέθοδος ADMM για την λειτουργία μιας αποκεντρωμένης ενεργειακής αγοράς, η οποία ουσιαστικά λύνει το πρόβλημα της Οικονομικής ΚΦ για πολλαπλές περιόδους, ενώ στη μελέτη [49] η μέθοδος ADMM συνδυάζεται με ένα πρωτόκολλο συναίνεσης. Συγκρίσεις μεταξύ της μεθόδου ADMM και άλλων κατανεμημένων αλγορίθμων λαμβάνουν χώρα στη μελέτη [50]. Στην εργασία [51], αντιμετωπίζεται το πρόβλημα του κατανεμημένου ελέγχου για εφαρμογές απόκρισης ζήτησης και στην [36], οι συγγραφείς υιοθετούν τον κατανεμημένο αλγόριθμο AIMD για να καταναείμουν βέλτιστα την παραγωγή ενέργειας σε ένα μικροδίκτυο. Ένας κατανεμημένος αλγόριθμος βασισμένος σε Lagrangian τεχνικές για την Οικονομική ΚΦ αναπτύσσεται στην [52], αλλά αυτό το μοντέλο αγνοεί τα τεχνικά όρια των γεννητριών.

Στην εργασία [53], το πρόβλημα της κατανεμημένης εμπορίας ενέργειας επιλύεται με τεχνικές υποβαθμισμένης βελτιστοποίησης. Μια κατανεμημένη μέθοδος που βασίζεται σε αλγόριθμο κατάβασης βαθμίδας (gradient descent) για τον βέλτιστο έλεγχο της παραγωγής των γεννητριών παρουσιάζεται στη μελέτη [54], ενώ στη [55] το πρόβλημα της Οικονομικής ΚΦ επιλύεται από μια ομάδα πρακτόρων που ανταλλάσσουν και επεξεργάζονται τοπικές πληροφορίες χρησιμοποιώντας το κατανεμημένο πρωτόκολλο των συζευγμένων βιολογικών ταλαντωτών. Οι συγγραφείς της μελέτης [56] παρουσιάζουν έναν αλγόριθμο που βασίζεται σε πρωτόκολλα gossip για τον τριτογενή έλεγχο ενός μικροδικτύου και επιτρέπει την οικονομική βελτιστοποίηση των ελεγχόμενων οντοτήτων του απαιτώντας μόνο επικοινωνία μεταξύ ομότιμων κόμβων. Η μέθοδος της δυικής αποσύνθεσης χρησιμοποιείται στη μελέτη [57] για να υπολογιστεί τοπικά η στρατηγική ελέγχου, αλλά οι συγγραφείς υποθέτουν ένα αρχικό σήμα εκπομπής από μια κεντρική οντότητα. Στις εργασίες [58] και [59], υιοθετείται το μοντέλο Τοπικών Εξισώσεων Κλωνωτή (Local Replicator Equation - LRE) από τον κλάδο της δυναμικής πληθυσμού, για την κατανεμημένη επίλυση της Οικονομικής ΚΦ των μονάδων ΔΠ.

Οι απώλειες διανομής συχνά αμελούνται στις κατανεμημένες εφαρμογές Οικονομικής ΚΦ, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μια μη βέλτιστη λύση [45], [46]. Οι συγγραφείς της εργασίας [45] λαμβάνουν υπόψη τις απώλειες των γραμμών στο συνολικό φορτίο αλλά δεν ενσωματώνουν τους αντίστοιχους συντελεστές ποιότητας στο κριτήριο Οικονομικής ΚΦ και συνεπώς οι απώλειες δεν κατανέμονται με τον βέλτιστο τρόπο. Στην μελέτη [46], ένας κόμβος «αρχηγός» ο οποίος μεταδίδει κάποιες παραμέτρους σε όλο το δίκτυο απαιτείται για την εύρεση της βέλτιστης λύσης και στη μελέτη [50], οι συγγραφείς χρησιμοποιούν ένα μη κυρτό μοντέλο βέλτιστης ροής φορτίου (OPF) που αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκό-

τητα του αλγορίθμου οδηγώντας έτσι σε μια αποκεντρωμένη σε ζώνες και όχι κατανεμημένη υλοποίηση. Τέλος, στην εργασία [55], οι συγγραφείς χρησιμοποιούν μια απλοποιημένη εκδοχή των εξισώσεων Kron για την εκτίμηση των απωλειών που οδηγεί σε έναν προσεγγιστικό υπολογισμό.

2.5. Ροή φορτίου

Το πρόβλημα της κατανεμημένης επίλυσης της ροής φορτίου έχει αρχικά μελετηθεί για το σχεδιασμό παράλληλων αλγορίθμων για συστήματα υπολογιστών πολυεπεξεργασίας που διαθέτουν κατανεμημένη μνήμη, όπως παρουσιάζεται στη μελέτη [60]. Στη μελέτη [61], ο στόχος είναι για κάθε επεξεργαστή να λύνει μόνο ένα μέρος του προβλήματος και να κοινοποιεί τα αποτελέσματά του στους υπόλοιπους επεξεργαστές προκειμένου να ανακτηθεί η ολική λύση. Μια Γκαουσιανή μέθοδος που βασίζεται σε σταθερό Ιακωβιανό πίνακα (Constant Jacobian Gaussian - CJG) εφαρμόζεται στη μελέτη [62] για το πρόβλημα της κατανεμημένης ροής φορτίου, ενώ στην εργασία [63], ένας παράλληλος αλγόριθμος Newton-Raphson αναπτύσσεται για αρχιτεκτονικές πολλαπλών επεξεργαστών με κατανεμημένη μνήμη. Στη μελέτη [64], οι συγγραφείς μελετούν την επεκτασιμότητα κατανεμημένων αλγορίθμων ροής φορτίου τόσο για ακτινικά όσο και για βρογχοειδή δίκτυα διανομής, ενώ στη [65], οι εξισώσεις αποζευγμένης ροής φορτίου υιοθετούνται σε συνδυασμό με μια τεχνική διαχωρισμού του δικτύου.

Οι συγγραφείς της μελέτης [66] προτείνουν ένα μοντέλο γενικευμένων εξισώσεων ροής φορτίου (Global Power Flow - GPF) για την επίτευξη μιας ενιαίας λύσης για δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Στη μελέτη [67] παρουσιάζεται μια μέθοδος κατανεμημένης ροής φορτίου που μπορεί να εφαρμοστεί σε γεωγραφικά χωρισμένες περιοχές ελέγχου, ενώ στη μελέτη [68] μελετάται μια κατανεμημένη μέθοδος Newton για τον υπολογισμό αποζευγμένων προβλημάτων ροής φορτίου. Η μεθοδολογία της μελέτης [69] εκμεταλλεύεται την ακτινική δομή των δικτύων διανομής και επιλύει αποτελεσματικά το πρόβλημα της ροής φορτίου χρησιμοποιώντας τεχνικές από τη θεωρία γράφων. Τέλος, στην εργασία [70], παρουσιάζεται ένα παράλληλο και κατανεμημένο υπολογιστικό σύστημα για την επίλυση της ροής φορτίου μεγάλων διασυνδεδεμένων συστημάτων με τη μέθοδο Newton-Raphson.

2.6. Έλεγχος τάσης

Το πρόβλημα του ελέγχου της τάσης στα δίκτυα διανομής κατέχει εξέχουσα θέση στη έρευνα των ευφυών δικτύων. Στα επόμενα, οι σημαντικότερες και σχετικά πιο πρόσφατες μελέτες παρουσιάζονται και ταξινομούνται με βάση την μοντελοποίηση του προβλήματος και τη μέθοδο που εφαρμόζεται κάθε φορά.

2.6.1. Ταξινόμηση με βάση τη μοντελοποίηση κάθε στοιχείου

α. Μοντελοποίηση του Δικτύου

Η χρήση των κλασικών AC εξισώσεων ροής φορτίου διατυπώνει το λεγόμενο Μοντέλο Έγχυσης Ζυγού - MEZ (Bus Injection Model - BIM) [71]. Για τη διευκόλυνση της επίλυσης του προβλήματος έχουν προταθεί διαφορετικές υποθέσεις, όπως η μικρή διαφορά γωνίας τάσης μεταξύ των ζυγών και η αμέλεια των απωλειών των γραμμών [72], του σταθερού λόγου r/x κατά μήκος των γραμμών ([18], [20]) ή της μικρής απόστασης μεταξύ των μονάδων ΔΠ ([73], [74]) - μια συνηθισμένη παραδοχή για τη μοντελοποίηση των μικροδικτύων. Το DC MEZ έχει χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση DC μικροδικτύων. Μια εναλλακτική διατύπωση αποτελεί το μοντέλο Ροής Κλάδου (ή εξισώσεις DistFlow), το οποίο εφαρμόζεται σε ακτινικά δίκτυα διανομής [71]. Οι εξισώσεις του μοντέλου ροής κλάδου μπορούν να γραμμικοποιηθούν (LinDistFlow) υποθέτοντας ότι οι απώλειες ισχύος είναι αμελητέες σε σύγκριση με τη ροή ισχύος στις γραμμές [75].

β. Πόροι για τον έλεγχο τάσης

Τα στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη συνήθως για τον έλεγχο της τάσης αποτελούνται από τους Διεσπαρμένους Ενεργειακούς Πόρους ΔΕΠ (Distributed Energy Resources - DER) που είναι συνδεδεμένοι στο ΔΔ, όπως οι ελεγχόμενες και μη μονάδες ΔΠ, τα Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage Systems - ESS), τα ηλεκτρικά οχήματα και τους πόρους απόκρισης ζήτησης ΠΑΖ (Demand Response Resources - DRR), των οποίων η ενεργός και άεργος ισχύς ελέγχεται προκειμένου να επιτευχθεί η ρύθμιση της τάσης. Άλλες συμβατικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται επίσης για τον έλεγχο της τάσης είναι οι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ, οι βηματικοί ρυθμιστές τάσης (Step Voltage Regulators - SVR) και οι συστοιχίες ελεγχόμενων πυκνωτών. Οι τελευταίες αναφέρονται ως συσκευές βραδείας ρύθμισης, επειδή ο έλεγχος τους γίνεται σε πιο αργή χρονική κλίμακα σε αντίθεση με τον ταχύτερο έλεγχο που μπορεί να επιτευχθεί σε ελεγχόμενους ΔΕΠ. Ένα είδος τοπικού ελέγχου που προέρχεται από τον έλεγχο των σύγχρονων γεννητριών και χρησιμοποιείται συχνά στη λειτουργία μικροδικτύου, είναι ο έλεγχος με καμπύλες στατισμού (droop control) όπου η ενεργός και η άεργος ισχύς εξόδου ελέγχονται από τη μετρούμενη από τη συσκευή συχνότητα και τάση.

γ. Μεταβλητές ελέγχου

Τα εξεταζόμενα μοντέλα ελέγχουν μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες μεταβλητές ελέγχου: i) άεργος ισχύς ΔΕΠ, ii) ενεργός ισχύς ΔΕΠ, iii) αντιστάθμιση ελεγχόμενων πυκνωτών, iv) ρύθμιση ΣΑΤΥΦ, v) σημείο ρύθμισης βηματικών ρυθμιστών τάσης, vi) σημείο ρύθμισης τάσης αντιστροφών και vii) παρεχόμενο ρεύμα των μονάδων ΔΠ.

δ. Κριτήρια ρύθμισης

Ο πρωταρχικός στόχος του προβλήματος ελέγχου της τάσης είναι η διατήρηση των τάσεων των κόμβων του δικτύου εντός των ορίων. Εκτός από αυτό, μπορούν να τίθενται και άλλα κριτήρια τα οποία συνδέονται με το πρόβλημα ρύθμισης τάσης. Τα κριτήρια αυτά μπορούν να περιλαμβάνουν: i) την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων της τάσης από τα όρια, ii) τη βελτιστοποίηση του προφίλ τάσης (απόκλιση από κάποια τιμή αναφοράς ή

ελαχιστοποίηση των διαφορών τάσης μεταξύ κόμβων), iii) την ταύτιση των τάσεων των ζυγών με κάποια τιμή αναφοράς, iv) την ελαχιστοποίηση των μεταβολών ενεργού ισχύος για τη ρύθμιση της τάσης, v) την ελαχιστοποίηση του αριθμού χειρισμών διακοπών, vi) την ελαχιστοποίηση της περικοπτόμενης παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές, vii) την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος στις γραμμές, viii) τη βελτιστοποίηση της αέργου ισχύος και ix) την ελαχιστοποίηση περικοπτόμενου φορτίου.

ε. Ανάλυση του προβλήματος ελέγχου τάσης

Η μη γραμμική σχέση μεταξύ των εγχύσεων ισχύος και των τάσεων των κόμβων περιπλέκει ιδιαίτερα την επίλυση του προβλήματος ρύθμισης της τάσης. Τα συστήματα κατακεντρωμένου/αποκεντρωμένου ελέγχου συνήθως επιχειρούν την αποσύνθεση (decomposition) του προβλήματος ελέγχου τάσης σε υποπροβλήματα, προκειμένου να χαλαρώσουν τις επικοινωνιακές απαιτήσεις. Μια χρησιμοποιούμενη τεχνική αποσύνθεσης είναι η ανάλυση ευαισθησίας των εξισώσεων ροής φορτίου, η οποία παρέχει μια γραμμική προσέγγιση της σχέσης μεταξύ των τάσεων των κόμβων (μέτρου και φάσης) και των εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά η συμβολή της κάθε μονάδας ΔΠ στην ρύθμιση της τάσης. Άλλες μορφές ανάλυσης ευαισθησίας έχουν επίσης προταθεί, οι οποίες συσχετίζουν τις μεταβολές της τάσης με τις μεταβολές στις λήψεις των Μ/Σ με ΣΑΥΦ [76].

Άλλες προσεγγίσεις αποσυνθέτουν το πρόβλημα και υπολογίζουν την μεταβολή των τάσεων των κόμβων από τις ενέργειες ελέγχου, όπως για παράδειγμα στις μελέτες [77] και [78] χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εμπρόσθιας-ανάστροφης σάρωσης (forward-backward sweep), καθώς επίσης και τη μέθοδο με βρόχο ανάδρασης (feedback approach), στην οποία οι ηλεκτρικές μετρήσεις από το ΣΚΣ τροφοδοτούν τον αλγόριθμο ελέγχου [79]. Οι τεχνικές αυτής της κατηγορίας μπορούν να απλοποιηθούν σημαντικά την επίλυση του προβλήματος, καθώς είναι πολλές φορές ανεξάρτητες από τις παραμέτρους του δικτύου (προσεγγίσεις ανεξάρτητες μοντέλου/model-free approaches, [80]) αφού δεν χρησιμοποιούν τις εξισώσεις ροής φορτίου. Διάφορες παραλλαγές του ελέγχου με καμπύλες στατισμού συνδυάζονται με την προηγούμενη προσέγγιση. Σε προβλήματα που απαιτείται η προσαρμογή των τάσεων σε κάποια τιμή αναφοράς, χρησιμοποιούνται δυναμικά μοντέλα εξισώσεων τα οποία συσχετίζουν τον έλεγχο του αντιστροφέα με την συνολική απόκριση του συστήματος ([81] - [84]).

2.6.2. Ταξινόμηση με βάση τη μέθοδο επίλυσης

α. Μέθοδοι κατακεντρωμένης βελτιστοποίησης

Το πρόβλημα του βέλτιστου ελέγχου της τάσης είναι μια ειδική περίπτωση του προβλήματος της Βέλτιστης Ροής Φορτίου (Optimal Power Flow - OPF). Μέθοδοι κυρτής χαλάρωσης έχουν εφαρμοστεί για την επίλυση με μεθόδους ημιορισμένου προγραμματισμού

(Semidefinite Programming - SDP) καθώς και κωνικού προγραμματισμού δεύτερης τάξης (Second Order Cone Programming - SOCP), οι οποίες υπό ορισμένες συνθήκες (π.χ. για ακτινικά δίκτυα) μπορούν να υπολογίσουν τη βέλτιστη λύση. Το κυρτό πρόβλημα στη συνέχεια αποσυντίθεται (με τεχνικές δεικής αποσύνθεσης) προκειμένου να επιλυθεί με κατανεμημένους αλγόριθμους.

1. Αλγόριθμοι που βασίζονται σε πρωτόκολλα συναίνεσης:

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, στους αλγόριθμους αυτούς οι πράκτορες επικοινωνούν μεταξύ τους και ανταλλάσσουν μια (ή περισσότερες) μεταβλητές ενδιαφέροντος επιδιώκοντας να συγχρονιστούν για να φθάσουν σε μια κατάσταση συναίνεσης. Οι κατανεμημένοι αλγόριθμοι επιλύονται επαναληπτικά μέχρι να συγχρονιστούν στο βέλτιστο σημείο, στο οποίο η συνάρτηση κόστους του προβλήματος λαμβάνει την ελάχιστη τιμή. Απλοί αλγόριθμοι συναίνεσης έχουν χρησιμοποιηθεί στις μελέτες [19] - [20] και [85] - [86]. Στη μελέτη [19], ένας κατανεμημένος αλγόριθμος βελτιστοποίησης που βασίζεται στη μέθοδο ανάβασης βαθμίδας και την ανταλλαγή πολλαπλασιαστών Lagrange, χρησιμοποιείται για την επίλυση ενός μοντέλου SDP με σκοπό τη βελτιστοποίηση των εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος των ΔΕΠ. Μια μέθοδος δεικής ανάβασης (dual ascent) σε συνδυασμό με μια στρατηγική βρόχου ανατροφοδότησης που ανανεώνει τις εγχύσεις αέργου ισχύος σε κάθε επανάληψη, παρουσιάζεται στη μελέτη [20]. Ένας αλγόριθμος κατάβασης βαθμίδας στη μελέτη [85], ελαχιστοποιεί τις διαφορές στις τιμές των τάσεων μεταξύ γειτονικών κόμβων σε μικροδίκτυα. Ένας κατανεμημένος εξελικτικός αλγόριθμος παρουσιάζεται στη μελέτη [86], όπου μέσω μιας δυναμικής μεθόδου βελτιστοποίησης εξασφαλίζεται η γρήγορη σύγκλιση σε σχεδόν βέλτιστες λύσεις. Ένας αλγόριθμος gossip στη μελέτη [87] χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης των απωλειών, το οποίο προσεγγίζεται ως πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού (Quadratic Programming - QP) για τη βελτιστοποίηση των εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος. Στις μελέτες [88] - [90], οι ελεγκτές επικοινωνούν με μοντέλα συζευγμένων ταλαντωτών για την εκτίμηση των παραμέτρων ενδιαφέροντος και την εύρεση της βέλτιστης απόφασης ελέγχου.

2. Μέθοδοι αποσύνθεσης:

Ο αλγόριθμος ADMM για τον έλεγχο της αέργου ισχύος, συγκρίνεται στη μελέτη [75] με έναν αλγόριθμο δεικής ανάβασης. Στη μελέτη [91], ένα μοντέλο βέλτιστης ροής φορτίου για τριφασικά δίκτυα σε συνδυασμό με ένα εναλλακτικό μοντέλο για τον μετασχηματιστή χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ σε ασύμμετρα δίκτυα. Η τάση αναφοράς που προκύπτει από το προηγούμενο μοντέλο χρησιμοποιείται στη μελέτη [92], για την ελαχιστοποίηση των παραβιάσεων της τάσης ελέγχοντας τις εγχύσεις αέργου ισχύος. Η χαλάρωση SOCP σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο ADMM χρησιμοποιούνται στη μελέτη [93] για τη βελτιστοποίηση της ροής αέργου ισχύος με στόχο την ελαχι-

στοποίηση των απωλειών, ωστόσο από τις προσομοιώσεις φάνηκε ότι η ρύθμιση της τάσης στον υποσταθμό ήταν απαραίτητη για να διατηρηθεί η τάση εντός ορίων. Ο αλγόριθμος ADMM χρησιμοποιείται επίσης στις μελέτες [94] - [95], για την κατανομημένη επίλυση του χαλαρωμένου με τη μέθοδο SDP προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου.

β. Αποκεντρωμένες μέθοδοι

1. Μέθοδοι βελτιστοποίησης:

Κλασικές αριθμητικές μέθοδοι προτείνονται για την επίλυση του προβλήματος του ελέγχου της τάσης στις μελέτες [17] και [96], χρησιμοποιώντας την τεχνική του διαχωρισμού σε ζώνες. Κάθε ζώνη επιλύει το πρόβλημα βελτιστοποίησης που την αφορά και η απόφαση του ελεγκτή ζώνης επηρεάζει μόνο την αντίστοιχη ζώνη. Μια μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού (Linear Programming - LP) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της βέλτιστης παραγωγής μονάδων ΔΠ στη μελέτη [17] όπου το δίκτυο χωρίζεται σε περιοχές χρησιμοποιώντας μια τεχνική συσταδοποίησης κόμβων με βάση τις ευαισθησίες τους (ε-decomposition). Στη μελέτη [96], επιλύεται ένα πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού (Non-Linear programming - NLP) για τη βελτιστοποίηση του προφίλ τάσης, ρυθμίζοντας τα σημεία λειτουργίας των μονάδων ΔΠ. Ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού (Mixed Integer Non Linear Programming - MINLP) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των βέλτιστων σημείων λειτουργίας ενεργού και αέργου ισχύος των ελεγχόμενων φορτίων στη μελέτη [97] και στη μελέτη [98] το μοντέλο επεκτείνεται για να ενσωματώσει και τη μοντελοποίηση συστημάτων αποθήκευσης. Ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων με ιεραρχική δομή για δίκτυα χωρισμένα σε ζώνες υλοποιείται στις μελέτες [99] - [100], όπου κάθε συντονιστής ζώνης υπολογίζει την ενεργό και άεργο ισχύ των πόρων διεσπαρμένης παραγωγής και διαχείρισης ζήτησης, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανάβασης βαθμίδας. Η ισχύς εξόδου των διασυνδεδεμένων με αντιστροφείς πόρων διεσπαρμένης παραγωγής στις μελέτες [101] - [102] συγκλίνει στην λύση της βέλτιστης ροής φορτίου χρησιμοποιώντας βρόχους ανάδρασης που ενημερώνουν συνεχώς τα σημεία λειτουργίας τους. Στη μελέτη [103], προτείνεται η χαλάρωση με τη μέθοδο SOCP του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου, για τον υπολογισμό της παραγωγής αέργου ισχύος φωτοβολταϊκών αντιστροφών με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών.

2. Ευριστικές μέθοδοι:

Ευριστικές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση της βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα ελέγχου της τάσης. Ένας γενετικός αλγόριθμος (Genetic Algorithm - GA) χρησιμοποιείται στη μελέτη [18] ενώ στη μελέτη [104] ο έλεγχος της αέργου ισχύος υλοποιείται χρησιμοποιώντας ευαισθησίες και έναν αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO). Άλλες μελέτες, υιοθετούν εμπειρικές ευριστικές προσεγγίσεις όπως οι μελέτες [77] και [78] που χρησιμοποιούν τη μέθοδο εμπρόσθιας-ανάστροφης σάρωσης για την εκτίμηση της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης σε μια γραμμή και τη ρύθμιση στη συνέχεια των βηματικών ρυθμιστών τάσης και των συστοιχιών ελεγχό-

μενων πυκνωτών. Στη μελέτη [80], οι Φ/Β μονάδες στέλνουν σήμα σε περίπτωση παραβίασης της τάσης για την ενεργοποίηση του συστήματος ελέγχου αέργου ισχύος άλλων Φ/Β μονάδων με σκοπό τον περιορισμό της περικοπής ενεργού ισχύος. Ένας ευριστικός αλγόριθμος εκτελείται διαδοχικά σε κάθε ζυγό στη μελέτη [74], για την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος σε μικροδίκτυα. Ένας αλγόριθμος 8 βημάτων χρησιμοποιείται στη μελέτη [76], για να ελαχιστοποιήσει τις αποκλίσεις τάσης ελέγχοντας το ρυθμιστή τάσης κάθε περιοχής. Στην εργασία [105], ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων συντονίζει ένα σύστημα βηματικού ρυθμιστή τάσης και ελεγχόμενους πυκνωτές. Δύο αλγόριθμοι υλοποιημένοι σε σύστημα πολλαπλών πρακτόρων παρουσιάζονται στη μελέτη [106], ο πρώτος βασισμένος στο ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin και ο δεύτερος στη μέθοδο εμπρόσθιας-ανάστροφης σάρωσης. Στη μελέτη [107], τα Φ/Β συστήματα συνεργάζονται με το βηματικό ρυθμιστή τάσης για τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος στην περιοχή ελέγχου τους. Στη μελέτη [108], χρησιμοποιείται ο διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες σε συνδυασμό με μια τεχνική κατωφλίου για τη δυναμική προσαρμογή της επίδρασης κάθε συσκευής στη ρύθμιση της τάσης, ενώ στην εργασία [109], ένας παραμετροποιήσιμος αλγόριθμος επιλέγει μεταξύ διαφορετικών στόχων ελέγχου (την ελαχιστοποίηση των απωλειών ή των μεταβολών της τάσης) των Φ/Β αντιστροφών.

γ. Κατανεμημένες συνεργατικές μέθοδοι

Σε αυτήν την περίπτωση, ο κεντρικός δευτερεύων έλεγχος του μικροδικτύου αλληλεπιδρά με τον αυτόνομο (τοπικό) πρωτεύοντα έλεγχο (συνήθως έλεγχος που βασίζεται σε καμπύλες στατισμού). Το αποτέλεσμα είναι ένας συνδυασμός κατανεμημένου και συνεργατικού δευτερογενούς ελέγχου για τη ρύθμιση τάσης και συχνότητας.

1. Μέθοδοι βασισμένες σε καμπύλες στατισμού:

Στη μελέτη [72], οι παράμετροι των καμπυλών στατισμού των μονάδων ΔΠ ορίζονται χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο συναίνεσης, ενώ στη μελέτη [73], το ίδιο πρωτόκολλο οδηγεί στο συγχρονισμό της μέσης τιμής των τάσεων των μονάδων ΔΠ, σε μια τιμή αναφοράς, όντας ανεκτικό σε μεταβολές στην τοπολογία επικοινωνίας και σε χρονικές καθυστερήσεις. Ένα γραμμικό πρόβλημα συγχρονισμού δεύτερης τάξης προτείνεται στην εργασία [83] υλοποιώντας μια τεχνική Lyapunov. Η χρήση αναλογικών ολοκληρωτών κατανεμημένου μέσου (Distributed Averaging Proportional Integral - DAPI) εισάγεται στη μελέτη [110], όπου οι προτεινόμενοι ελεγκτές μπορούν να παραμετροποιηθούν προκειμένου να επιτύχουν διαφορετικούς στόχους. Στην εργασία [111], πρωτόκολλα συναίνεσης χρησιμοποιούνται για το συγχρονισμό και την παρακολούθηση της κατάστασης του δικτύου στα πλαίσια του πρωτογενούς και του δευτερογενούς ελέγχου, για τον προσδιορισμό της τιμής αναφοράς της τάσης που θα οδηγήσει σε αναλογική έγχυση αέργου ισχύος από κάθε ελεγχόμενο πόρο. Ένας αλγόριθμος κατανεμημένου μέσου όρου χρησιμοποιείται στο βρόχο ελέγχου τάσης των μελετών [112] και [113]. Στην εργασία [114], ο συγχρονισμός

εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας μια τεχνική βασισμένη στη μέθοδο Lyapunov. Κατανεμημένες συνεργατικές μέθοδοι έχουν επίσης προταθεί για τη ρύθμιση της τάσης σε DC μικροδίκτυα, όπου εφαρμόζεται έλεγχος με καμπύλες στατισμού μεταξύ ενεργού ισχύος και τάσης εξόδου ([115]) ή μεταξύ παραγόμενου ρεύματος και τάσης εξόδου ([116]).

2. Μέθοδοι που δε βασίζονται σε καμπύλες στατισμού:

Στη μελέτη [81], κάθε ελεγκτής επικοινωνεί με τους γείτονές του μέσω ενός δυναμικού πρωτοκόλλου συναίνεσης για να εκτιμήσει τη μέση τιμή της τάσης και να συγχρονιστεί στην τάση αναφοράς διορθώνοντας την παραγωγή αέργου. Μια αντίστοιχη μέθοδος που βασίζεται στη διόρθωση των παραγόμενων ρευμάτων σε DC μικροδίκτυα, προτείνεται στη μελέτη [82].

δ. Κατανεμημένος προσαρμοστικός έλεγχος

Αντί να προσαρμόζεται σε κάποια τιμή αναφοράς, το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί την απόδοσή του για να ρυθμίσει κατάλληλα και με αυτόματο τρόπο την είσοδο ελέγχου. Ο προσαρμοστικός δευτερεύων έλεγχος τάσης διατυπώνεται ως πρόβλημα παρακολούθησης κατάστασης στη μελέτη [84], όπου νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν δυναμικά τη μη γραμμική συμπεριφορά του αντιστροφέα.

ε. Κατανεμημένος προβλεπτικός έλεγχος

Στην περίπτωση αυτή, οι ελεγκτές προβλέπουν τη μελλοντική τους κατάσταση σε έναν πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα αλληλεπιδρώντας δυναμικά με τους γείτονές τους. Μόνο οι αποφάσεις που αφορούν την τρέχουσα χρονική στιγμή εφαρμόζονται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την επόμενη χρονική στιγμή χρησιμοποιώντας ουσιαστικά ένα κυλιόμενο χρονικό παράθυρο. Στη μελέτη [117], ο προβλεπτικός έλεγχος ορίζει τις ενέργειες ελέγχου που θα ελαχιστοποιήσουν τις αποκλίσεις τάσης, μέχρι τον συγχρονισμό όλων των τάσεων στην τιμή αναφοράς.

στ. Πολυκριτηριακή ανάλυση

Όταν προκύπτει κάποιος συνδυασμός μεταξύ αντικρουόμενων στόχων, χρησιμοποιούνται μοντέλα λήψης αποφάσεων για τον προσδιορισμό της λύσης. Στα ΣΠΠ των μελετών [118] και [119], τα μοντέλα πολυκριτηριακής ανάλυσης ενσωματώνονται στους ευφυείς πράκτορες, οι οποίοι συντονίζονται μέσω ενός πρωτοκόλλου σύναψης συμβολαίων (Contract Net Protocol - CNP), για να επιλέξουν την καλύτερη επιλογή ελέγχου. Οι ελεγκτές στη μελέτη [120] ανταλλάσσουν μηνύματα για να συνδυάσουν τους τοπικούς περιορισμούς τους, επιλύοντας το πρόβλημα της βέλτιστης διαχείρισης των πόρων τους.

ζ. Υβριδικές μέθοδοι

Σε αυτές τις μεθόδους, ο κατανεμημένος έλεγχος ενεργοποιείται για τη διαχείριση των πόρων των ΔΕΠ μόνο όταν ο τοπικός έλεγχος αποτυγχάνει να διατηρήσει την τάση μέσα στα όρια. Τα υβριδικά σχήματα των μελετών [79] και [121] - [122] χρησιμοποιούν αλγόριθμους

συναίνεσης για τον κατανομημένο έλεγχο συστημάτων αποθήκευσης, ενώ στη μελέτη [123], η ενεργός περικοπή των Φ/Β μονάδων διαμοιράζεται. Στην εργασία [124], οι τοπικοί ελεγκτές ζητούν αύξηση της παραγωγής αέργου ισχύος από τους γείτονες τους μέσω ενός κατανομημένου αλγορίθμου.

2.6.3. Συγκεντρωτική ταξινόμηση των υπό εξέταση μελετών ελέγχου τάσης

Στον παρακάτω πίνακα, οι μελέτες που εξετάστηκαν για το πρόβλημα της ρύθμισης τάσης ταξινομούνται με βάση τις διαφορετικές παραδοχές για τη μοντελοποίηση του προβλήματος αλλά και τη μέθοδο επίλυσης.

Πίνακας 2-1 Ταξινόμηση των υπό εξέταση μελετών ελέγχου τάσης

	Αρχιτεκτονική επικοινωνίας	Μεταβλητές ελέγχου	Κριτήρια ρύθμισης	Μοντελοποίηση ΔΔ	Τεχνική ανάλυσης	Μεθοδολογία επίλυσης
[19]	Κατανομημένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των ΔΕΠ και ΠΑΖ	Ελαχ. των απωλειών ενεργού ισχύος	AC-MEZ	Δυική αποσύνθεση	Κατανομημένη Βελτιστοποίηση (με πρωτόκολλο συναίνεσης)
[20]	Κατανομημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ελαχ. των απωλειών ενεργού ισχύος	AC-MEZ	Δυική αποσύνθεση	Κατανομημένη Βελτιστοποίηση (με πρωτόκολλο συναίνεσης)
[17]	Αποκεντρωμένη (πολλαπλές ζώνες)	Ενεργός και άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ελαχ. των μεταβολών αέργου και μεγ. της ενεργού παραγωγής	AC-MEZ	Συσταδοποίηση του πίνακα ευαισθησίας	Αποκεντρωμένη (βελτιστοποίηση σε ζώνες)
[18]	Αποκεντρωμένη (πολλαπλές ζώνες)	Άεργος ισχύς των ΠΑΖ και ΣΑΤΥΦ	Ελαχ. της αέργου ισχύος και των αποκλίσεων τάσης	AC-MEZ	Συσταδοποίηση του πίνακα ευαισθησίας	Αποκεντρωμένη (ευριστική σε ζώνες)
[77]	Αποκεντρωμένη	ΣΑΤΥΦ/ΒΡΤ	Ικανοποίηση των ορίων τάσης	AC-MEZ	Εμπρόσθια-αναστροφή σάρωση	Αποκεντρωμένη επίλυση (ευριστική)
[80]	Τοπική και αποκεντρωμένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ικανοποίηση των ορίων τάσης	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Αποκεντρωμένη επίλυση (ευριστική)
[72]	Τοπική και κατανομημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ικανοποίηση των ορίων τάσης και διαμοιρασμός ισχύος	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανομημένη συνεργατική με έλεγχο καμπύλων στατισμού
[73]	Τοπική και κατανομημένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ, σημεία ρύθμισης τάσης αντιστροφών	Συγχρονισμός σε τάση αναφοράς και διαμοιρασμός ισχύος	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανομημένη συνεργατική με έλεγχο καμπύλων στατισμού

2.6. Έλεγχος τάσης

[74]	Αποκεντρωμένη	Ενεργός ισχύς των μονάδων ΔΠ και των ηλεκτρικών οχημάτων	Ελαχ. των απωλειών ενεργού ισχύος	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Αποκεντρωμένη επίλυση (ευριστική)
[75]	Κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ελαχ. των απωλειών ενεργού ισχύος	DistFlow	Δυική αποσύνθεση	Συντονισμός μέσω αποσύνθεσης
[76]	Αποκεντρωμένη	Έλεγχος του ΣΑΤΥΦ	Ελαχ. των αποκλίσεων τάσης	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Αποκεντρωμένη επίλυση (ευριστική)
[78]	Αποκεντρωμένη	Συστοιχίες πυκνωτών	Ελαχ. των διαφορών τάσης μεταξύ ζυγών	AC-MEZ	Εμπρόσθια-αναστροφή σάρωση	Αποκεντρωμένη επίλυση (ευριστική)
[79]	Τοπική και κατανεμημένη	Ενεργός ισχύς από συστήματα αποθήκευσης, ενεργός και άεργος από μονάδες ΔΠ	Ικανοποίηση των ορίων τάσης	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Υβριδική
[81]	Κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ, σημεία ρύθμισης τάσης αντιστροφών	Ικανοποίηση των ορίων τάσης και διαμοιρασμός ισχύος	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένη συνεργατική χωρίς έλεγχο καμπύλων στατισμού
[82]	Κατανεμημένη	Παρεχόμενο ρεύμα των μονάδων ΔΠ και σημεία ρύθμισης τάσης αντιστροφών	Ικανοποίηση των ορίων τάσης και διαμοιρασμός φορτίου	DC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένη συνεργατική χωρίς έλεγχο καμπύλων στατισμού
[83]	Κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ, σημεία ρύθμισης τάσης αντιστροφών	Συγχρονισμός σε τάση αναφοράς	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένη συνεργατική χωρίς έλεγχο καμπύλων στατισμού
[84]	Κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ, σημεία ρύθμισης τάσης αντιστροφών	Συγχρονισμός σε τάση αναφοράς	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένος προσαρμοστικός έλεγχος
[85]	Κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ, συστοιχίες πυκνωτών	Ελαχ. των διαφορών τάσης μεταξύ ζυγών	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένη Βελτιστοποίηση (με πρωτόκολλο συναίνεσης)
[86]	Κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ και των ΠΑΖ	Ελαχ. των απωλειών ενεργού ισχύος	AC-MEZ	Συσταδοποίηση του πίνακα αγωγιμοτήτων	Κατανεμημένη Βελτιστοποίηση (με πρωτόκολλο συναίνεσης)
[87]	Κατανεμημένη και αποκεντρωμένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ελαχ. των απωλειών ενεργού ισχύος	AC-MEZ	Συσταδοποίηση με βάση την τοπολογία	Κατανεμημένη Βελτιστοποίηση (με αλγόριθμο gossip)
[88]	Κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των ΔΕΠ	Ικανοποίηση των ορίων τάσης	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Κατανεμημένη Βελτιστοποίηση (με συζευγμένους ταλαντωτές)
[89]	Κατανεμημένη	ΣΑΤΥΦ, άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ, συστοιχιών πυκνωτών και των συσκευών ρύθμισης τάσης)	Ελαχ. (απωλειών ενεργού ισχύος, αποκλίσεων τάσης, αέργου ισχύος)	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένη Βελτιστοποίηση (με συζευγμένους ταλαντωτές)

[90]	Κατανεμημένη	ΣΑΤΥΦ, άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ, συστοιχιών πυκνωτών και ρυθμιστών τάσης)	Ελαχ. (απωλειών ενεργού ισχύος, αποκλίσεων τάσης, αέργου ισχύος)	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Κατανεμημένη Βελτιστοποίηση (με συζευγμένους ταλαντωτές)
[91]	Κατανεμημένη	ΣΑΤΥΦ	Βελτιστοποίηση της ρύθμισης ΣΑΤΥΦ	Ασύμμετρο AC-MEZ	Δυική αποσύνθεση	Συντονισμός μέσω αποσύνθεσης
[92]	Κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ και ηλ. οχημάτων	Ελαχ. των αποκλίσεων τάσης	DistFlow	Δυική αποσύνθεση	Συντονισμός μέσω αποσύνθεσης
[93]	Κατανεμημένη και αποκεντρωμένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ, άεργος ισχύς των συστοιχιών πυκνωτών και των συσκευών ρύθμισης τάσης	Ελαχ. των απωλειών ενεργού ισχύος	DistFlow	Συσταδοποίηση με βάση την τοπολογία	Συντονισμός μέσω αποσύνθεσης
[94]	Κατανεμημένη και αποκεντρωμένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ελαχ. των απωλειών ενεργού ισχύος και του κόστους παραγωγής	Ασύμμετρο AC-MEZ	Δυική αποσύνθεση	Συντονισμός μέσω αποσύνθεσης
[95]	Κατανεμημένη και αποκεντρωμένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ελαχ. απωλειών και περικοπής ενεργού ισχύος και αποκλίσεων τάσης	AC-MEZ	Δυική αποσύνθεση	Συντονισμός μέσω αποσύνθεσης
[96]	Αποκεντρωμένη (πολλαπλές ζώνες)	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Βελτιστοποίηση του προφίλ τάσης	AC-MEZ	Ισοδύναμο Thevenin	Αποκεντρωμένη (βελτιστοποίηση σε ζώνες)
[97]	Αποκεντρωμένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των ΠΑΖ	Ελάχ. μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος και αποκλίσεων τάσης	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Αποκεντρωμένη βελτιστοποίηση
[98]	Αποκεντρωμένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των συστημάτων αποθήκευσης	Ελάχ. μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος και αποκλίσεων τάσης	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Αποκεντρωμένη βελτιστοποίηση
[99], [100]	Αποκεντρωμένη (πολλαπλές ζώνες)	Ενεργός και άεργος ισχύς των ΔΕΠ και ΠΑΖ	Ελαχ. του κόστους των μεταβολών ενεργού και αέργου ισχύος	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Αποκεντρωμένη βελτιστοποίηση
[101]	Αποκεντρωμένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των ΔΕΠ	Ελαχ. αέργου ισχύος και περικοπής ενεργού	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Αποκεντρωμένη βελτιστοποίηση
[102]	Αποκεντρωμένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ελαχ. αέργου ισχύος, περικοπής ενεργού και κόστους παραγωγής	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Αποκεντρωμένη βελτιστοποίηση
[103]	Αποκεντρωμένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ και πυκνωτών	Ελαχ. απωλειών ενεργού ισχύος και αντιστροφεία	DistFlow	Δυική αποσύνθεση	Αποκεντρωμένη βελτιστοποίηση
[104]	Αποκεντρωμένη (πολλαπλές ζώνες)	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ελαχ. απωλειών ενεργού ισχύος	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Αποκεντρωμένη επίλυση (ευριστική)
[105]	Αποκεντρωμένη (πολλαπλές ζώνες)	Συσκευές ρύθμισης τάσης και συστοιχίες πυκνωτών	Ελαχιστοποίηση απωλειών ενεργού ισχύος και αριθμού χειρισμών	AC-MEZ	Εμπρόσθια-αναστροφή σάρωση	Αποκεντρωμένη επίλυση (ευριστική)
[106]	Αποκεντρωμένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των συστημάτων αποθή-	Ελαχ. αποκλίσεων τάσης και μεταβολών	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Αποκεντρωμένη επίλυση (ευριστική)

2.6. Έλεγχος τάσης

	(πολλαπλές ζώνες)	κευσης, συσκευών ρύθμισης τάσης και συστοιχιών πυκνωτών	κατάστασης φόρτισης			
[107]	Αποκεντρωμένη (πολλαπλές ζώνες)	Ενεργός και άεργος ισχύς των ΔΕΠ,	Βελτίωση του προφίλ τάσεων	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Αποκεντρωμένη επίλυση (ευριστική)
[108]	Αποκεντρωμένη (πολλαπλές ζώνες)	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Βελτίωση του προφίλ τάσεων	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Αποκεντρωμένη επίλυση (ευριστική)
[109]	Αποκεντρωμένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ελαχ. απωλειών ενεργού ισχύος ή αποκλίσεων τάσης	DistFlow	Ανεξάρτητη μοντέλου	Αποκεντρωμένη επίλυση (ευριστική)
[110]	Τοπική και κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ικανοποίηση των ορίων τάσης και διαμοιρασμός ισχύος	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένη συνεργατική με έλεγχο καμπύλων στατισμού
[111]	Κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ, σημεία ρύθμισης τάσης αντιστροφών	Ικανοποίηση των ορίων τάσης και διαμοιρασμός ισχύος	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένη συνεργατική με έλεγχο καμπύλων στατισμού
[112]	Κατανεμημένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ, σημεία ρύθμισης τάσης αντιστροφών	Συγχρονισμός σε τάση αναφοράς	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένη συνεργατική με έλεγχο καμπύλων στατισμού
[113]	Κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ, σημεία ρύθμισης τάσης αντιστροφών	Συγχρονισμός σε τάση αναφοράς	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένη συνεργατική με έλεγχο καμπύλων στατισμού
[114]	Κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ, σημεία ρύθμισης τάσης αντιστροφών	Συγχρονισμός σε τάση αναφοράς	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένη συνεργατική με έλεγχο καμπύλων στατισμού
[115]	Κατανεμημένη	Ενεργός ισχύς των μονάδων ΔΠ	Βελτίωση του προφίλ τάσεων	DC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένη συνεργατική με έλεγχο καμπύλων στατισμού
[116]	Κατανεμημένη	Παρεχόμενο ρεύμα των μονάδων ΔΠ και σημεία ρύθμισης τάσης αντιστροφών	Ικανοποίηση των ορίων τάσης και διαμοιρασμός φορτίου	DC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένη συνεργατική με έλεγχο καμπύλων στατισμού
[117]	Κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Συγχρονισμός σε τάση αναφοράς	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Κατανεμημένος προβλεπτικός έλεγχος
[118]	Αποκεντρωμένη	ΣΑΤΥΦ, συστοιχίες πυκνωτών, ενεργός και άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ελαχ. αποκλίσεων τάσης, αριθμού χειρισμών, εγχύσεων αέργου ισχύος και περιεκτικής ενεργού	DistFlow	Ανάλυση ευαισθησίας	Πολυκριτηριακή ανάλυση
[119]	Αποκεντρωμένη	ΣΑΤΥΦ, ενεργός και άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ελαχ. αποκλίσεων τάσης, αριθμού χειρισμών, εγχύσεων αέργου ισχύος και περιεκτικής ενεργού	DistFlow	Ανάλυση ευαισθησίας	Πολυκριτηριακή ανάλυση
[120]	Αποκεντρωμένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των ΔΕΠ	Ικανοποίηση των ορίων τάσης	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Πολυκριτηριακή ανάλυση
[121]	Τοπική και κατανεμημένη	Ενεργός ισχύς των συστημάτων αποθήκευσης και άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ικανοποίηση των ορίων τάσης	AC-MEZ	Ανεξάρτητη μοντέλου	Υβριδική

[122]	Τοπική και κατανεμημένη	Ενεργός και άεργος ισχύς των συστημάτων αποθήκευσης και άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ικανοποίηση των ορίων τάσης	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Υβριδική
[123]	Κατανεμημένη	Ενεργός ισχύς των μονάδων ΔΠ	Ικανοποίηση των ορίων τάσης	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Υβριδική
[124]	Τοπική και κατανεμημένη	Άεργος ισχύς των μονάδων ΔΠ και ηλ. οχημάτων	Ικανοποίηση των ορίων τάσης	AC-MEZ	Ανάλυση ευαισθησίας	Υβριδική

2.7. Σύνοψη και συμπεράσματα

Αρχικά ορίστηκαν κάποιες βασικές έννοιες οι οποίες κρίνονται απαραίτητες για τις μαθηματικές αναλύσεις των μεθόδων που αναπτύσσονται στις επόμενες ενότητες και παρουσιάστηκε το μοντέλο της «συναίνεσης» ως ένα πολύ βασικό εργαλείο για την ανάπτυξη πρωτοκόλλων βέλτιστης κατανεμημένης λήψης αποφάσεων από μια ομάδα ομότιμων κόμβων. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια εποπτική ταξινόμηση κατανεμημένων μοντέλων από μεθόδους που προτείνονται στη βιβλιογραφία, όχι απαραίτητα από τον κλάδο των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Σε επόμενο στάδιο, αναλύθηκε η ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας για κάθε μια από τις μεθόδους που αναπτύσσονται στα επόμενα κεφάλαια, την οικονομική κατανομή φορτίου, τη ροή φορτίου και τη βέλτιστη ρύθμιση τάσης.

Κεφάλαιο 3

Κατανεμημένη οικονομική κατανομή φορτίου

3.1. Οικονομική κατανομή φορτίου

Η οικονομική κατανομή φορτίου αποτελεί μια σημαντική λειτουργία για την τεχνική και οικονομική βελτιστοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η λύση στο πρόβλημα της Οικονομικής ΚΦ κατανέμει τη συνολική ζήτηση μεταξύ των μονάδων παραγωγής, ελαχιστοποιώντας το συνολικό λειτουργικό κόστος του συστήματος. Το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής είναι ουσιαστικά ένα πρόβλημα βέλτιστης κατανομής πόρων. Η αντικειμενική συνάρτηση δίνεται από την επόμενη εξίσωση:

$$\min C_{total}(\mathbf{p}) = \min \sum_{i \in V} C_i(p_i) \quad (3.1)$$

υπό τον περιορισμό κάλυψης φορτίου:

$$p_{Load} = \sum_{i \in V} p_i \quad (3.2)$$

όπου p_{Load} είναι το συνολικό φορτίο του συστήματος, p_i η παραγωγή ενεργού ισχύος της μονάδας i , $C_i(p_i)$ η συνάρτηση κόστους της μονάδας i και $N_G = \{1, \dots, n\}$ το σύνολο των μονάδων. Επίσης, τα τεχνικά όρια των μονάδων λαμβάνονται υπόψη ως ανισωτικοί περιορισμοί στο πρόβλημα βελτιστοποίησης (3.1):

$$p_{min_i} \leq p_i \leq p_{max_i}, \quad \gamma\iota\alpha \ i = 1, \dots, n \quad (3.3)$$

Επιπλέον, τα θερμικά όρια των γραμμών μπορούν να εισαχθούν ως περιορισμοί στο αρχικό πρόβλημα:

$$|p_{line_i}| \leq p_{max_{line_i}}, \quad \gamma\iota\alpha \ i = 1, \dots, k_{lines} \quad (3.4)$$

Στα πλαίσια του προβλήματος της Οικονομικής ΚΦ, συνήθως εξετάζεται μόνο η ροή ενεργού ισχύος υιοθετώντας το μοντέλο εξισώσεων DC ροής φορτίου. Για αυτό το λόγο, το όριο της φαινόμενης ισχύος που θα έπρεπε να τεθεί κανονικά στην προηγούμενη εξίσωση μπορεί να αντικατασταθεί με το αντίστοιχο όριο ενεργού ροής.

3.1.1. Κριτήριο οικονομικής κατανομής φορτίου

Για τη βέλτιστη λύση στο πρόβλημα (3.1) ισχύει το κριτήριο Οικονομικής ΚΦ, το οποίο αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας του συστήματος όπου όλες οι μονάδες λειτουργούν με το ίδιο οριακό κόστος (οριακό κόστος συστήματος λ) [125]:

$$\frac{\partial C_1(p_1)}{\partial p_1} = \frac{\partial C_2(p_2)}{\partial p_2} = \dots = \frac{\partial C_N(p_N)}{\partial p_N} = \lambda \quad (3.5)$$

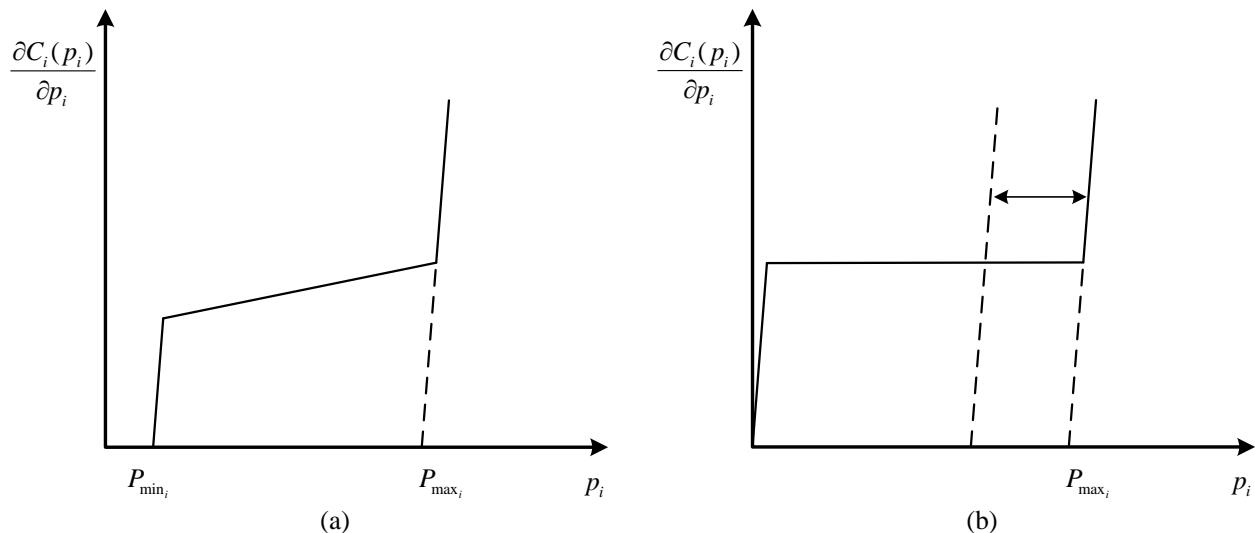
Οι συναρτήσεις κόστους των μονάδων μπορούν να μοντελοποιηθούν ως πολυώνυμα δευτέρου βαθμού:

$$C_i(p_i) = a_i + b_i \cdot p_i + c_i \cdot p_i^2 \quad (3.6)$$

με $a_i, b_i, c_i > 0$. Οι συναρτήσεις οριακού κόστους σε αυτήν την περίπτωση θα διατυπώνονται ως:

$$\frac{\partial C_i(p_i)}{\partial p_i} = b_i + 2 \cdot c_i \cdot p_i \quad (3.7)$$

Προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα τεχνικά όρια των μονάδων, οι συναρτήσεις οριακού κόστους τροποποιούνται κατάλληλα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1 Τροποποιημένες συναρτήσεις οριακού κόστους μονάδων: (a) συμβατική μονάδα, (b) μονάδα ΑΠΕ.

Η αρχική συνάρτηση οριακού κόστους (3.7) μετασχηματίζεται σε συνάρτηση φράγματος (barrier function), αυξάνοντας τεχνικά την κλίση της ευθείας που ορίζεται μέσα στα τεχνικά

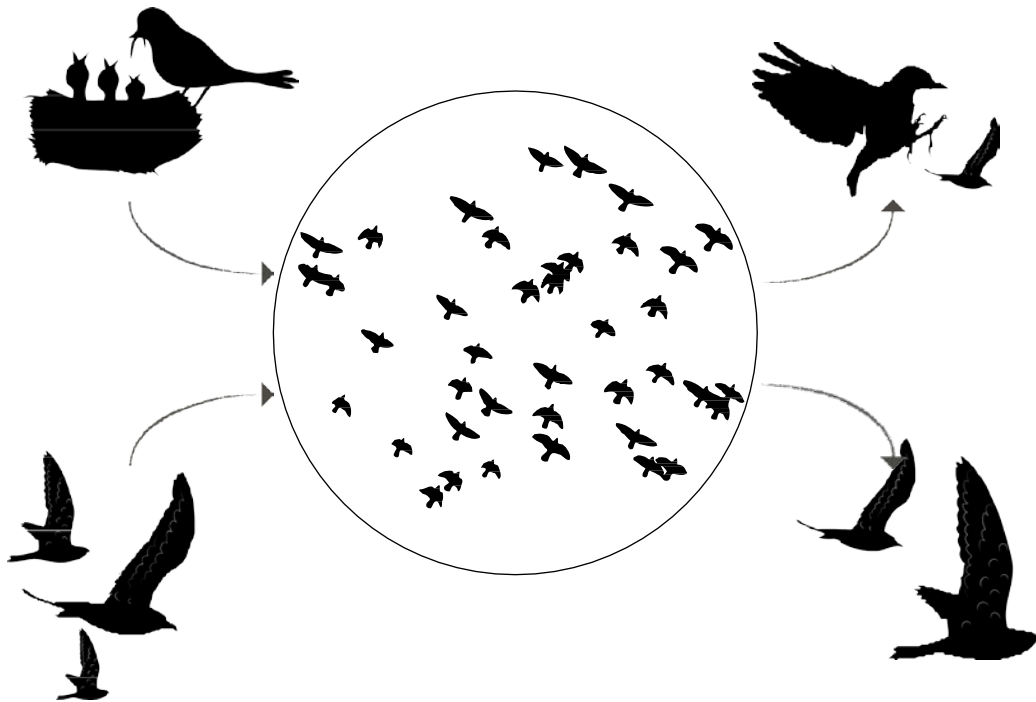
όρια της μονάδας, όταν η παραγόμενη ισχύς υπερβαίνει το όριο μέγιστης ισχύος και αντίστοιχα μειώνοντάς την, όταν η παραγόμενη ισχύς της μονάδας είναι μικρότερη από το τεχνικό ελάχιστο. Η τελική έκφραση που προκύπτει για την συνάρτηση οριακού κόστους είναι:

$$\frac{\partial C_i(p_i)}{\partial p_i} = \begin{cases} m(p_{min_i} - p_i) + b_i + 2 \cdot c_i \cdot p_{min_i}, & p_i < p_{min_i} \\ b_i + 2 \cdot c_i \cdot p_i, & p_{min_i} \leq p_i \leq p_{max_i} \\ m(p_i - p_{max_i}) + b_i + 2 \cdot c_i \cdot p_{max_i}, & p_{max_i} < p_i \end{cases} \quad (3.8)$$

Για τις μονάδες ΑΠΕ, η παράμετρος c_i τίθεται στο μηδέν, ενώ το τεχνικό μέγιστο p_{max_i} εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες.

3.2. Δυναμική Πληθυσμών

Το πεδίο της «Δυναμικής Πληθυσμών» (Population Dynamics) μελετά τις μεταβολές σε ορισμένα χαρακτηριστικά των πληθυσμών (π.χ. το μέγεθος και την ηλικιακή σύνθεση) μαζί με τις βιολογικές και περιβαλλοντικές διαδικασίες που επιφέρουν τις αλλαγές αυτές. Ένας πληθυσμός ορίζεται ως ένα σύνολο ατόμων (όλα τα άτομα ενός είδους) που ζουν μαζί στον ίδιο βιότοπο. Διαφορετικές ομάδες ατόμων που ζουν σε διαφορετικούς βιότοπους (ή οικοτόπους) υπόκεινται σε μεταβολές κάποιων χαρακτηριστικών τους (όπως λ.χ. το μέγεθος του πληθυσμού κάθε ομάδας) ανάλογα με την ευημερία τους στο συγκεκριμένο βιότοπο (Σχήμα 3-2).



Σχήμα 3-2 Οι διαδικασίες που επηρεάζουν τη δυναμική του πληθυσμού πτηνών: γεννήσεις, θάνατοι και μετανάστευση.

Η ευημερία μιας ομάδας μπορεί να μοντελοποιηθεί με μια συνάρτηση ευημερίας (fitness function) ενώ η αλληλεπίδραση των ομάδων με τους οικότοπους (ως προς κάποιο χαρακτηριστικό) με δυναμικά μοντέλα όπως το μοντέλο Δυναμικής Κλωνωτή ΔΚ (Replicator Dynamics - RD). Η ΔΚ αποτελεί στην πράξη ένα μοντέλο για το πώς η φυσική επιλογή επηρεάζει τις πληθυσμιακές ομάδες των ατόμων που αναζητούν θρεπτικά συστατικά στους διαφορετικούς οικότοπους ενός περιβάλλοντος σε σχέση με τη δυνατότητα των οικότοπων να προσφέρουν αυτά τα συστατικά [126]. Τελικά, οι ομάδες φθάνουν σε μια «κοινή ευημερία» μέσα από μια εξελικτική διαδικασία, η οποία αντιστοιχεί στο σημείο ισορροπίας ολόκληρου του περιβάλλοντος [127]. Για αυτό το λόγο, το μοντέλο ΔΚ μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα κατανομής πόρων (όπως είναι άλλωστε και το πρόβλημα της Οικονομικής ΚΦ) διανέμοντας τον πληθυσμό των ομάδων (παραγόμενη ισχύς) μεταξύ των διαφορετικών οικότοπων (μονάδες παραγωγής).

3.2.1. Μοντέλο εξισώσεων κλωνωτή

Ας θεωρήσουμε ένα εξελικτικό παίγνιο, με n αμιγείς στρατηγικές $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, οι οποίες αντιστοιχούν στις επιλογές ενός ατόμου να ζήσει σε κάθε ένα από τους n οικότοπους. Επίσης, ας θεωρήσουμε $x_i(t) \geq 0$ την ανηγμένη (στη μονάδα) ποσότητα των ατόμων που επιλέγουν τη στρατηγική s_i η οποία τους αποδίδει μια συγκεκριμένη απόδοση που προκύπτει από την αντίστοιχη συνάρτηση ευημερίας τους. Τότε, η ποσότητα αυτή του πληθυσμού που επιλέγει την στρατηγική s_i το χρόνο t , (συμβολίζεται με $x_i(t)$), θα έχει τη δυναμική που περιγράφεται από την επόμενη διαφορική εξίσωση [127]:

$$\frac{d}{dt}x_i(t) = x_i(t) \cdot (\pi_i(t) - \bar{\pi}(t)) \quad (3.9)$$

όπου $\sum_{i=1}^n x_i = 1$, $\pi_i(t)$ είναι η αναμενόμενη απόδοση (όφελος) από την επιλογή της s_i (ήτοι η ευημερία των ατόμων που ζουν στον οικότοπο i) για το χρόνο t και $\bar{\pi}(t)$ είναι η μέση απόδοση (ή ευημερία) ολόκληρου του πληθυσμού για το χρόνο t . Υποθέτοντας ότι ο αριθμός των παικτών του πληθυσμού είναι αρκετά μεγάλος ώστε η ποσότητα των ατόμων που επιλέγουν μια συγκεκριμένη στρατηγική να προσεγγίζεται από μία συνεχή μεταβλητή, ορίζεται ως κατάσταση πληθυσμού το διάνυσμα $\mathbf{p}(t) = [p_1(t), \dots, p_n(t)]^T$ και ως p_{total} ο συνολικός πληθυσμός:

$$p_{total} = \sum_{j=1}^N p_j \quad (3.10)$$

Επίσης, έστω Δ το πλέγμα (simplex) που περιέχει τις καταστάσεις του πληθυσμού:

$$\Delta = \left\{ \mathbf{p} \in \mathbb{R}_+^n \mid \sum_{i=1}^n p_i = p_{total} \right\} \quad (3.11)$$

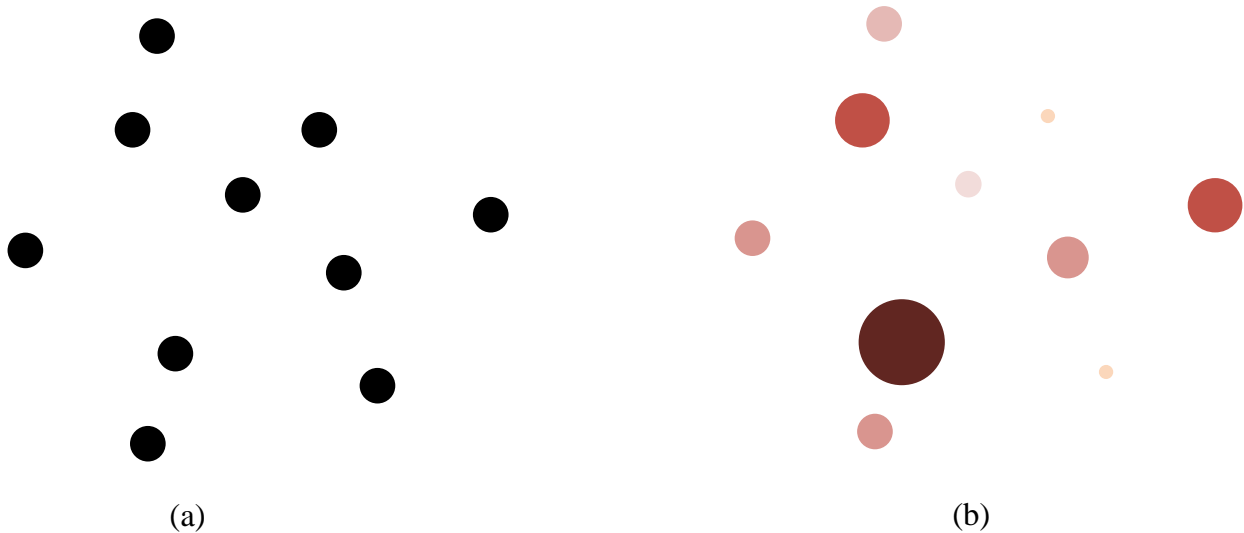
και $\pi_i(p_i)$ η συνάρτηση ευημερίας η οποία εξαρτάται από το p_i . Τότε, το μοντέλο εξισώσεων κλωνωτή (replicator equation model) (3.9) θα δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{p}_i = p_i \cdot (\pi_i(p_i) - \bar{\pi}(\mathbf{p})) \quad (3.12)$$

ενώ ο σταθμισμένος μέσος όρος της ευημερίας (μέση ευημερία) από την έκφραση:

$$\bar{\pi} = \frac{1}{p_{total}} \sum_{i=1}^n p_i \cdot \pi_i(p_i) \quad (3.13)$$

Επιχειρώντας μια πρόχειρη ερμηνεία του μοντέλου, το κομμάτι του πληθυσμού που υιοθετεί μια στρατηγική που αποφέρει μικρότερο όφελος (δηλαδή χειρότερη ευημερία) από το μέσο όρο θα τείνει να μειώνεται, ενώ το μερίδιο του πληθυσμού που υιοθετεί μια στρατηγική που αποφέρει μεγαλύτερο κέρδος από το μέσο όρο (δηλαδή καλύτερη ευημερία) θα τείνει να αυξάνεται. Έτσι, κάτω υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, ο πληθυσμός αναμένεται να οδηγηθεί σε ένα σημείο ισορροπίας στο οποίο η ευημερία σε κάθε οικοτόπο θα είναι ίση με τη μέση ευημερία όλου του πληθυσμού. Αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται αφαιρετικά στο Σχήμα 3-3, θεωρώντας ότι οι κουκίδες αντιστοιχούν σε διαφορετικούς οικοτόπους και το μέγεθος της κουκίδας αντιστοιχεί στο πλήθος ατόμων κάθε οικοτόπου.



Σχήμα 3-3 Μεταβολή των ατόμων του πληθυσμού σε κάθε οικοτόπο: (a) αρχική κατάσταση πληθυσμού, (b) κατάσταση ισορροπίας.

Μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα του μοντέλου εξισώσεων κλωνωτή είναι ότι λόγω του ορισμού της μέσης ευημερίας (3.13), το σύνολο Δ είναι αναλλοίωτο υπό την (3.12) και επομένως αν για την αρχική κατάσταση του πληθυσμού ισχύει $\mathbf{p}(0) \in \Delta$, όλες οι τροχιές του συστήματος διαφορικών εξισώσεων θα παραμένουν στο Δ για κάθε $t \geq 0$ [58]. Επίσης, έστω $\bar{\pi}^*$ η μέση ευημερία στην κατάσταση ισορροπίας, τότε εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί ότι μια μόνιμη κατάσταση της (3.12), δηλαδή $\dot{p}_i = 0$, εντοπίζεται όταν για κάθε $p_i^*(t) > 0$ ισχύει η επόμενη συνθήκη:

$$\pi_i(p_i^*) = \bar{\pi}(\mathbf{p}^*), \quad \text{για κάθε } i = 1, \dots, n \quad (3.14)$$

Θεωρώντας \mathbf{p}^* την κατάσταση ισορροπίας:

$$\mathbf{p}^* = [p_1^*, \dots, p_n^*]^T \quad (3.15)$$

για την οποία θα προκύπτει σύμφωνα με τα προηγούμενα ότι $\mathbf{p}^* \in \Delta$.

3.2.2. Κατανεμημένο μοντέλο εξισώσεων κλωνωτή

Το μοντέλο εξισώσεων κλωνωτή (replicator equation model) (3.12) που περιγράφηκε προηγουμένως δεν είναι κατανεμημένο διότι για την επίλυση απαιτούνται πληροφορίες για όλες τις ομάδες ατόμων που επιλέγουν μια συγκεκριμένη στρατηγική, όπως υποδηλώνει η εξίσωση υπολογισμού της μέσης ευημερίας (3.13). Προκειμένου να επιτευχθεί η κατανεμημένη επίλυση, εξετάζεται ένα μοντέλο που απαιτεί ανταλλαγή πληροφοριών μόνο μεταξύ των γειτονικών οικοτόπων. Σε αυτό το πλαίσιο, θεωρείται συνεκτικός μη κατευθυνόμενος γράφος $\mathcal{G} \triangleq (\mathcal{H}, \mathcal{E})$, με n κόμβους που αντιστοιχίζονται στους οικότοπους (ή στις στρατηγικές) του μοντέλου (3.12) με το σύνολο \mathcal{E} να ορίζει τις ακμές μεταξύ των οικότοπων που επιτρέπεται η ανταλλαγή πληροφοριών. Το επόμενο κατανεμημένο μοντέλο το οποίο απαιτεί ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ γειτόνων και αναφέρεται ως μοντέλο Τοπικών Εξισώσεων Κλωνωτή - TEK (Local Replicator Equation - LRE), προτείνεται στη μελέτη [58]:

$$\dot{p}_i = \frac{p_i}{p_{total}} \cdot \left(\pi_i(p_i) \sum_{j \in N_i} p_j - \sum_{j \in N_i} \pi_j(p_j) p_j \right) \quad (3.16)$$

όπου N_i αποτελεί κατά τα γνωστά το σύνολο που περιέχει τους γείτονες του κόμβου i . Το μοντέλο TEK (3.16), προκύπτει από το μοντέλο (3.12) στην περίπτωση που τα αθροίσματα για τον υπολογισμό της μέσης ευημερίας ληφθούν μόνο για τους γείτονες του κόμβου i . Ωστόσο, παρότι το μοντέλο είναι κατανεμημένο, μένει να διερευνηθεί η ευστάθειά του και εάν εμφανίζει τις ίδιες ιδιότητες με το βασικό μοντέλο (3.12).

3.2.3. Ευστάθεια και σημείο ισορροπίας του κατανεμημένου μοντέλου

Το μοντέλο εξισώσεων κλωνωτή (3.12) παρουσιάζει κάποιες σημαντικές ιδιότητες οι οποίες το καθιστούν κατάλληλο για επίλυση προβλημάτων βέλτιστης κατανομής πόρων. Οι ιδιότητες αυτές είναι:

- I. Το σύνολο Δ είναι αναλλοίωτο υπό τις εξισώσεις (3.12).
- II. Στην κατάσταση ισορροπίας η ευημερία σε κάθε οικότοπο είναι ίση με τη μέση ευημερία όλου του πληθυσμού.
- III. Το μοντέλο συγκλίνει σε ασυμπτωτικά ευσταθές σημείο ισορροπίας \mathbf{p}^* .

Η ισχύς των ανωτέρω ιδιοτήτων πρέπει να διερευνηθεί και για την περίπτωση του μοντέλου TEK (3.16):

- I. Ακολουθείται η απόδειξη που παρουσιάζεται στη μελέτη [128]. Έστω $\mathbf{p}(0) \in \Delta$ και A ο πίνακας γειννίασης του γράφου \mathcal{G} που ορίζει το κατανεμημένο περιβάλλον του μοντέλου TEK. Έστω $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ δύο διανύσματα. Τότε ισχύει ότι:

$$y^T Ax = \sum_{i \in \mathcal{H}} \left(y_i \sum_{j \in N_i} x_j \right) = \sum_{i \in \mathcal{H}} \left(x_i \sum_{j \in N_i} y_j \right) = x^T Ay \quad (3.17)$$

αφού $A = A^T$ καθώς ο γράφος είναι μη κατευθυνόμενος. Τότε, το άθροισμα της εξίσωσης (3.16) για όλους τους κόμβους θα προκύπτει:

$$\sum_{i \in \mathcal{E}} \dot{p}_i = \frac{1}{p_{total}} \left[\sum_{i \in \mathcal{H}} \left(p_i \pi_i(p_i) \sum_{j \in N_i} p_j \right) - \sum_{i \in \mathcal{H}} \left(p_i \sum_{j \in N_i} p_j \pi_j(p_j) \right) \right] \quad (3.18)$$

και ορίζοντας το διάνυσμα $P_\pi \triangleq [p_1 \pi_1(p_1) \quad p_2 \pi_2(p_2) \quad \dots \quad p_n \pi_n(p_n)]^T$, η προηγούμενη εξίσωση γράφεται:

$$\sum_{i \in \mathcal{E}} \dot{p}_i = \frac{1}{p_{total}} (P_\pi^T Ap - P_\pi Ap^T) \quad (3.19)$$

Επομένως, $\sum_{i \in V} \dot{p}_i = 0$ λόγω της (3.17) και αφού $\sum_{i \in V} p_i(0) = p_{total}$, τότε θα ισχύει $\sum_{i \in V} p_i(t) = p_{total}$ για κάθε t και άρα το σύνολο Δ είναι αναλλοίωτο υπό την (3.16). ■

II. Υποθέτοντας ότι $p_i^* > 0$, για κάθε $i \in \mathcal{H}$, η κατάσταση ισορροπίας για το μοντέλο TEK (3.16) επιτυγχάνεται όταν:

$$\pi_i(p_i^*) \sum_{j \in N_i} p_j^* = \sum_{j \in N_i} \pi_j(p_j^*) p_j^*, \quad \text{για κάθε } i \in \mathcal{H} \quad (3.20)$$

όπου εύκολα φαίνεται ότι για να ισχύει η (3.20) πρέπει:

$$\pi_i(p_i^*) = \pi_j(p_j^*), \quad \text{για κάθε } i, j \in \mathcal{H} \quad (3.21)$$

και επειδή ο γράφος \mathcal{G} είναι συνεκτικός:

$$\pi_i(p_i^*) = \pi_j(p_j^*) = \bar{\pi}(p^*), \quad \text{για κάθε } i, j \in \mathcal{H} \quad (3.22)$$

Επομένως, τα δύο μοντέλα (3.12) και (3.16) εμφανίζουν το ίδιο σημείο ισορροπίας. ■

III. Για την ανάλυση ευστάθειας του συστήματος (3.16), πρέπει να εξεταστούν οι συνθήκες τις οποίες πρέπει να πληρούν οι συναρτήσεις ευημερίας $\pi_i(p_i)$. Οι συνθήκες αυτές, όπως προτείνονται στη μελέτη [128] είναι οι εξής:

- (1) Η $\pi_i(p_i)$ πρέπει να είναι μια βαθμωτή συνεχής Lipschitz απεικόνιση στο σύνολο Δ .
- (2) Η $\pi_i(p_i)$ πρέπει να είναι αυστηρά φθίνουσα.
- (3) $\pi_i(0) = B_i$, $B_i > 0$ για κάθε $i \in \mathcal{H}$.

- (4) Έστω $C_i \in \mathbb{R}_+$ για κάθε $i \in \mathcal{H}$ τα σημεία για τα οποία ισχύει $\pi_i(C_i) = 0$, τότε πρέπει να ισχύει $\sum_{j \in V} C_j \geq 1$. Η παράμετρος C_i αναφέρεται ως φέρουσα ικανότητα και χρησιμοποιείται για προσδιορίσει τις θετικές τιμές (της συνάρτησης ευημερίας).

Σύμφωνα με το θεώρημα 3.2 της μελέτης [128] προτείνεται ως υποψήφια συνάρτηση Lyapunov η συνάρτηση:

$$V(\mathbf{p}) = \max_{i \in \mathcal{H}} \pi_i(p_i) \quad (3.23)$$

η οποία είναι τοπικά Lipschitz συνεχής συνάρτηση ως προς \mathbf{p} και συνεχής ως προς t . Για την (3.23), λαμβάνοντας υπόψη τη συνθήκη (4) προκύπτει ότι στην χειρότερη περίπτωση, δηλαδή $\sum_{j \in V} C_j = 1$, τη σημείο ισορροπίας θα είναι $p_i^* = C_i$ στο οποίο θα ισχύει βέβαια $\pi_i(C_i) = \pi_j(C_j) = \bar{\pi}^* = 0$ για όλα τα $i, j \in \mathcal{H}$. Για οποιαδήποτε απόκλιση όμως από αυτό το σημείο, η οποία θα αναπαρίσταται ως αύξηση στον πληθυσμό του i -οστού οικότοπου ($p_i > C_i$), θα αντισταθμίζεται από αντίστοιχη μείωση στον πληθυσμό κάποιου άλλου οικότοπου ($p_j < C_j$, για $j \neq i$) και επομένως θα ισχύει $\pi_j(p_j) > 0$ αφού η $\pi_i(p_i)$ είναι αυστηρά φθίνουσα και συνεπώς ότι $V(\mathbf{p}) > 0$. Άρα για $\mathbf{p} \in \Delta$ με \mathbf{p}^* ολικό ελάχιστο της $V(\mathbf{p})$ στο Δ , προκύπτει ότι $V(\mathbf{p}) \geq 0$ και επομένως η (3.23) αποτελεί συνάρτηση Lyapunov για το σύστημα (3.16). Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό της $\dot{V}(\mathbf{p})$, έστω $\mathcal{H}_\pi = \{j \mid \pi_j(p_j) = V(\mathbf{p})\}$ το σύνολο που περιέχει τους δείκτες για τους οποίους υπάρχει τουλάχιστον ένα σημείο στο οποίο η $V(\mathbf{p})$ δεν είναι διαφορίσιμη (εφόσον έχουμε υποθέσει ότι η $V(\mathbf{p})$ είναι τοπικά Lipschitz συνεχής). Τότε, σύμφωνα με τις μελέτες [128], [129] και αφού όλες οι τροχιές της (3.16) είναι συνεχείς, η $\dot{V}(\mathbf{p})$ θα δίνεται από την:

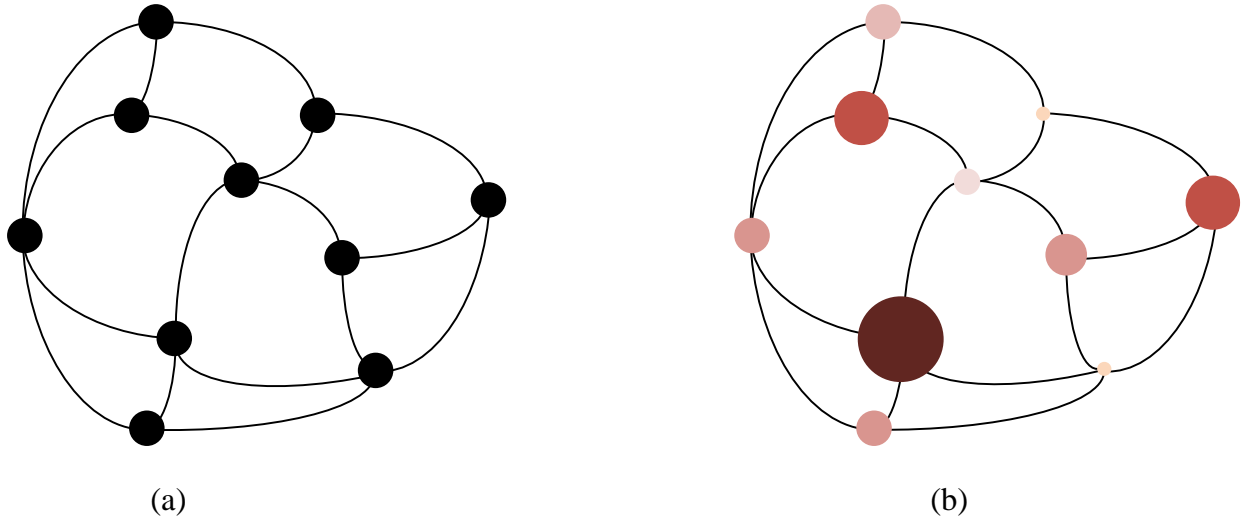
$$\dot{V}(\mathbf{p}) = \left[\sum_{j \in \mathcal{H}_\pi} \lambda_j \nabla \pi_j^T(\mathbf{p}) \right] \dot{\mathbf{p}} = \sum_{j \in \mathcal{H}_\pi} \lambda_j \frac{\partial \pi_j(p_j)}{\partial p_j} \dot{p}_j, \quad (3.24)$$

για κάθε $\lambda_j > 0$ τέτοιο ώστε $\sum_{j \in \mathcal{H}_\pi} \lambda_j = 1$. Αντικαθιστώντας και την (3.16) στην προηγούμενη εξίσωση προκύπτει:

$$\dot{V}(\mathbf{p}) = \frac{1}{p_{total}} \sum_{j \in \mathcal{H}_\pi} \left\{ \lambda_j \frac{\partial \pi_j(p_j)}{\partial p_j} p_j \left[\pi_i(p_i) \sum_{l \in N_j} p_l - \sum_{l \in N_j} p_l \pi_l(p_l) \right] \right\} \quad (3.25)$$

Για την εξίσωση (3.25) συμπεραίνεται ότι $\pi_i(p_i) \geq \pi_l(p_l)$ για κάθε $l \in N_j$ από τον ορισμό της (3.23) και επομένως η έκφραση μέσα στα άγκιστρα θα είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός. Επιπλέον, $\lambda_j > 0$, $p_j > 0$ και $\frac{\partial \pi_j(p_j)}{\partial p_j} < 0$ για κάθε $j \in \mathcal{H}_\pi$ και άρα προκύπτει ότι $\dot{V}(\mathbf{p}) \leq 0$. Αντίστοιχα, επειδή $\dot{V}(\mathbf{p}) = 0$ μόνο στο σημείο ισορροπίας (από την (3.25)), έπεται ότι το σύστημα (3.16) είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. ■

Στο Σχήμα 3-4 παρουσιάζεται η τροποποιημένη μορφή του Σχήματος 3-3, θεωρώντας περιορισμό τοπικής επικοινωνίας.



Σχήμα 3-4 Μεταβολή των ατόμων του πληθυσμού σε κάθε οικότοπο με περιορισμό τοπικής επικοινωνίας: (a) αρχική κατάσταση πληθυσμού, (b) κατάσταση ισορροπίας.

3.2.4. Μοντέλο εξισώσεων κλωνωτή διακριτού χρόνου

Το μοντέλο εξισώσεων κλωνωτή μπορεί επίσης να διατυπωθεί σε διακριτό χρόνο. Έτσι η εξελικτική διαδικασία για κάθε χρονική περίοδο $t = 0, 1, 2, \dots$, αντιπροσωπεύει μια γενιά. Στη μελέτη [130] προτείνεται το επόμενο μοντέλο διακριτού χρόνου:

$$p_i^{t+1} = \frac{a + \pi_i(p_i^t)}{a + \bar{\pi}^t} \cdot p_i^t \quad (3.26)$$

Όπου η παράμετρος $a \geq 0$, αντιστοιχεί στο ρυθμό γεννήσεων (διάρκεια ζωής) για ένα άτομο. Η παράμετρος a επιτελεί τον ρόλο της ρύθμισης του ρυθμού ανάπτυξης ή ύφεσης των στρατηγικών. Μεγάλες τιμές της παραμέτρου οδηγούν σε βραδύτερη σύγκλιση, ενώ μικρότερες τιμές επιτυγχάνουν ταχύτερη αλλά λιγότερο σταθερή σύγκλιση. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με την προηγούμενη ενότητα, το διακριτό ανάλογο του μοντέλου ΤΕΚ προκύπτει:

$$p_i^{t+1} = \frac{a + \pi_i(p_i^t)}{a + \frac{\sum_{j \in N_i} \pi_j(p_j^t) p_j^t}{p_{total}^t}} \cdot p_i^t \quad (3.27)$$

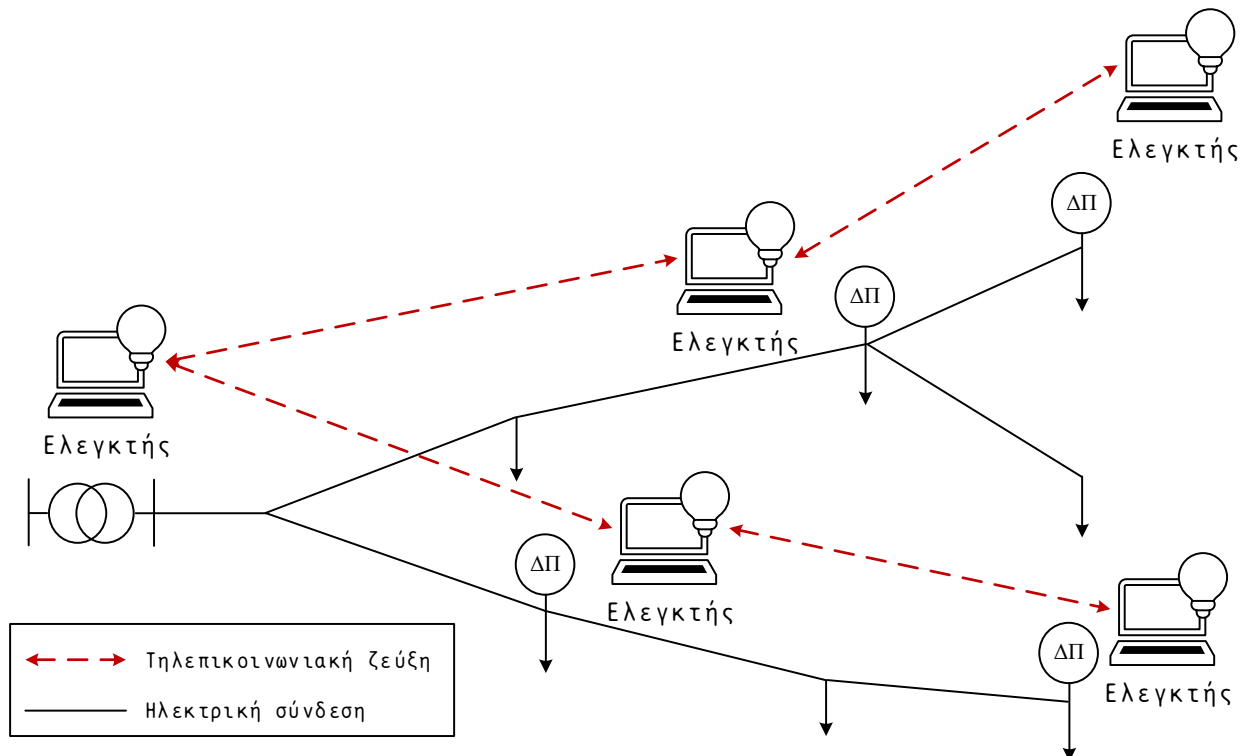
Εναλλακτικά, η μέθοδος Euler μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να επιλυθούν σε διακριτό χρόνο οι διαφορικές εξισώσεις (3.16) θεωρώντας βήμα h και αρχικές συνθήκες την αρχική κατάσταση του πληθυσμού $\mathbf{p}(0) \in \Delta$:

$$p_i^{t+1} = p_i^t + h \frac{p_i^t}{p_{total}^t} \cdot \left(\pi_i(p_i^t) \sum_{j \in N_i} p_j^t - \sum_{j \in N_i} \pi_j(p_j^t) p_j^t \right) \quad (3.28)$$

3.3. Καταμεμημένη επίλυση του προβλήματος Οικονομικής ΚΦ για μονάδες ΔΠ

3.3.1. Μοντελοποίηση του δικτύου διανομής

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου στην επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής των μονάδων ΔΠ σε δίκτυα διανομής γίνονται κάποιες βασικές παραδοχές. Στο Σχήμα 3-5 παρουσιάζεται ένα απλουστευμένο ΔΔ το οποίο περιλαμβάνει μονάδες ΔΠ και φορτία. Οι μονάδες ΔΠ είναι εφοδιασμένες με ελεγκτές οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους σε ένα σχήμα ομότιμης σύνδεσης και υπολογίζουν τα τοπικά σημεία ρύθμισης της ενεργού ισχύος των μονάδων που ελέγχουν. Το δίκτυο διανομής μπορεί να παρασταθεί ως ένας συνεκτικός γράφος, όπου κάθε μονάδα ΔΠ αντιστοιχίζεται σε έναν κόμβο του γραφήματος ενώ ο κόμβος αναφοράς (Μ/Σ) μοντελοποιεί την ισχύ που τροφοδοτείται από το ανάντη δίκτυο. Οι ακμές του γράφου αντιστοιχίζονται στις τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις, οι οποίες θα θεωρείται ότι συμπίπτουν με τις γραμμές του ηλεκτρικού δικτύου. Κάθε μονάδα ΔΠ έχει γνώση του τοπικού φορτίου της. Επίσης, οι ελεγκτές έχουν τη δυνατότητα να υπολογίζουν (ή να μετράνε) τη ροή ισχύος των γραμμών στις οποίες είναι συνδεδεμένοι. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη μόνο την ενεργό ισχύ, αμελώντας τις απώλειες ενεργού ισχύος, τις πιθανές αποκλίσεις τάσης καθώς επίσης και τις ροές αέργου ισχύος για την ικανοποίηση των θερμικών ορίων των γραμμών.



Σχήμα 3-5 Αναπαράσταση του δικτύου διανομής.

3.3.2. Συναρτήσεις ευημερίας του κατανεμημένου μοντέλου

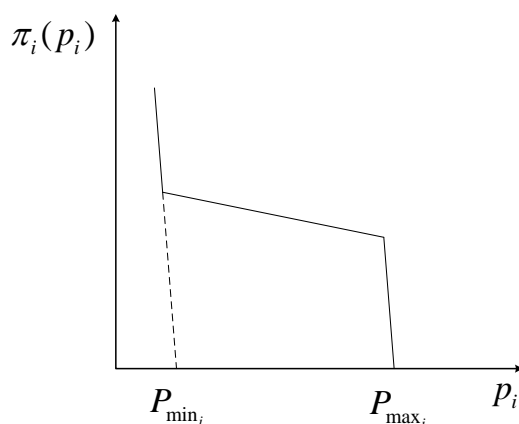
Το μοντέλο TEK μπορεί να εφαρμοστεί στο πρόβλημα οικονομικής φορτίου καθώς όπως έχει αναλυθεί προηγουμένως στην κατάσταση ισορροπίας η συνάρτηση ευημερίας κάθε κόμβου είναι ίση με τη μέση ευημερία. Προκειμένου το μοντέλο TEK να επιλύσει το πρόβλημα Οικονομικής ΚΦ η συνάρτηση ευημερίας επιλέγεται:

$$\pi_i(p_i) = -\frac{\partial C_i(p_i)}{\partial p_i} = -\lambda_i, \quad (3.29)$$

αφού η συνάρτηση ευημερίας πρέπει να είναι γνησίως φθίνουσα. Επιπλέον, επειδή όπως προκύπτει από τα προηγούμενα η συνάρτηση ευημερίας πρέπει να λαμβάνει θετικές τιμές, μια θετική σταθερά προστίθεται στην έκφραση της συνάρτησης ευημερίας η οποία δεν επηρεάζει το σημείο ισορροπίας [128]:

$$\pi_i(p_i) = \begin{cases} B - m(p_{min_i} - p_i) - b_i - 2 \cdot c_i \cdot p_{min_i}, & p_i < p_{min_i} \\ B - b_i - 2 \cdot c_i \cdot p_i, & p_{min_i} \leq p_i \leq p_{max_i} \\ B - m(p_i - p_{max_i}) - b_i - 2 \cdot c_i \cdot p_{max_i}, & p_{max_i} < p_i \end{cases} \quad (3.30)$$

Η τελική μορφή της συνάρτησης ευημερίας φαίνεται στο Σχήμα 3-6, για την οποία προκύπτει ότι πληροί όλες τις απαραίτητες συνθήκες για την ικανοποίηση της ιδιότητας III του μοντέλου TEK.



Σχήμα 3-6 Μορφή συνάρτησης ευημερίας μονάδων.

Συμπερασματικά, στην κατάσταση ισορροπίας το κριτήριο οικονομικής κατανομής θα ικανοποιείται καθώς επίσης το ίδιο θα ισχύει και για τον περιορισμό κάλυψης φορτίου (λόγω της ιδιότητας I του μοντέλου TEK).

3.3.3. Κατανεμημένος αλγόριθμος

Ο βασικός αλγόριθμος για την κατανεμημένη επίλυση του προβλήματος Οικονομικής ΚΦ δίνεται στη συνέχεια. Η διεπαφή του διαχειριστή του ΔΔ ενεργοποιεί τον αλγόριθμο προωθώντας την παράμετρο p_{total} (συνολικό φορτίο). Ο αλγόριθμος 1 ενεργοποιείται μόλις ο

κόμβος i λάβει από κάποιο γειτονικό κόμβο την παράμετρο p_{total} την οποία προωθεί στους υπόλοιπους γείτονές του και στην συνέχεια προχωράει στην επίλυση του μοντέλου βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις TEK μέχρι τη σύγκλιση, ανταλλάσσοντας πληροφορίες με τους γείτονες. Όταν ο κόμβος i ανιχνεύσει τοπική σύγκλιση, περιμένει την απροστολή από τους κατάντη γείτονες του μηνύματος τερματισμού, στο οποίο συμπεριλαμβάνεται η αθροιστική μεταβλητή συνολικής παραγωγής από τις κατάντη μονάδες $\Delta\hat{p}_{DG}^{(j)}$. Ο κόμβος i συμπεριλαμβάνει και τη δική του παραγωγή σε αυτήν τη μεταβλητή και στη συνέχεια την προωθεί στο ανάντη κόμβο. Έτσι η διεπαφή του διαχειριστή του $\Delta\Delta$ στο τέλος της διαδικασίας γνωρίζει τη συνολική παραγωγή από μονάδες $\Delta\Delta$ και μπορεί να υπολογίσει το συνολικό φορτίο, προσθέτοντας την τιμή $\hat{p}_{DG}^{(1)}$ στο μετρούμενο φορτίο του υποσταθμού.

Αλγόριθμος 1 : κατανεμημένη Οικονομική ΚΦ, κόμβος i

1: **Αρχικοποίηση** (Σήμα ενεργοποίησης από γειτονικό κόμβο: p_{total})

Προώθηση παραμέτρου ενεργοποίησης p_{total} στους άλλους γείτονες

Ανάθεση τοπικής παραγωγής: $p_i(0)$

Υπολογισμός: $\pi_i(0)$, με βάση τοπικές παραμέτρους κόστους

2: **Επανάληψη:**

3: **Ανταλλαγή πληροφοριών με γειτονικούς κόμβους**

Αποστολή: $p_i(n), \pi_i(n)$, για κάθε $j \in N_i$

Λήψη: $p_j(n), \pi_j(n)$, από κάθε $j \in N_i$

4: **Υπολογισμός της επόμενης τιμής παραγωγής**

Υπολογισμός: $p_i(n+1), \pi_i(n+1)$ χρησιμοποιώντας το μοντέλο TEK (3.16).

Έως ότου: $|\pi_j(n) - \pi_i(n)| \leq \varepsilon$, για κάθε $j \in N_i$

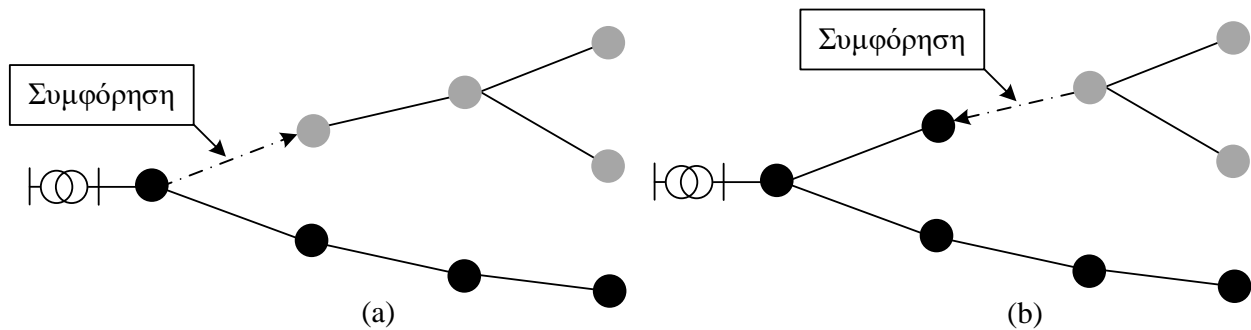
5: **Αναμονή για σήμα τερματισμού από κατάντη κόμβους:** $\hat{p}_{DG}^{(j)}$

6: **Προώθηση σήματος τερματισμού σε ανάντη κόμβο:** $\hat{p}_{DG}^{(i)}$

3.3.4. Αντιμετώπιση των συμφορήσεων στις γραμμές

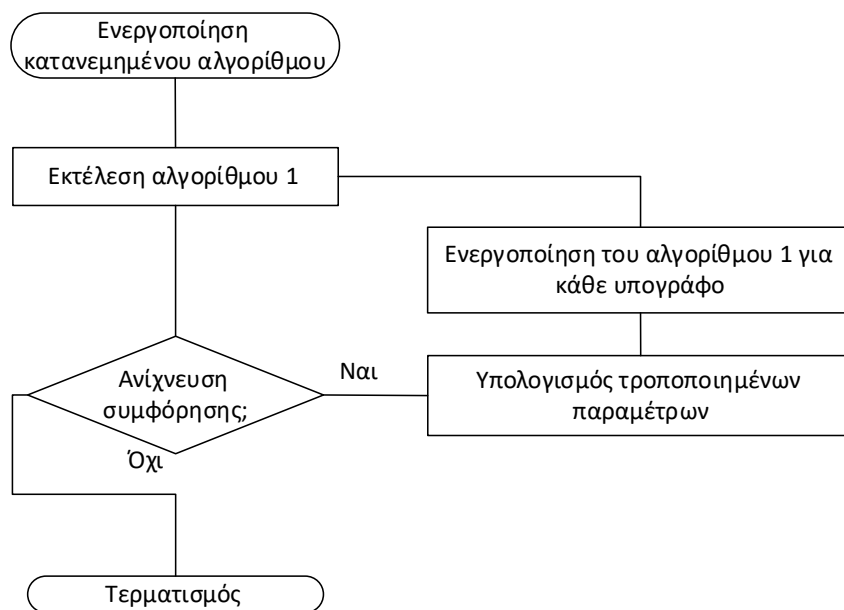
Μετά τον τερματισμό του αλγορίθμου 1, ελέγχονται οι ροές των γραμμών για πιθανές συμφορήσεις. Σε περίπτωση που ανιχνευθεί υπερφόρτιση σε κάποια γραμμή, η περίσσεια ισχύος υπολογίζεται (p_{error}) και ένας δεύτερος αλγόριθμος ενεργοποιείται. Ο αρχικός γράφος χωρίζεται σε δύο υπογράφους, ο πρώτος εκ των οποίων περιέχει όλους τους κόμβους που βρίσκονται πριν από τη υπερφορτισμένη γραμμή και ο δεύτερος όλους τους κόμβους που βρίσκονται μετά την υπερφορτισμένη γραμμή. Η βασική ιδέα είναι για την αντιμετώπιση της συμφόρησης στηρίζεται στο γεγονός ότι η μια ομάδα κόμβων (πρώτος υπογράφος) θα πρέπει να μειώσει την παραγωγή της κατά μια ποσότητα p_{error} και η άλλη θα πρέπει αντίστοιχα να αυξήσει την παραγωγή της κατά την ίδια ποσότητα. Το ποια από τις δύο ομάδες θα πρέπει να αυξήσει και ποια να μειώσει προκύπτει από την κατεύθυνση της ροής της υπερφορτισμένης γραμμής (βλ. Σχήμα 3-7). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η ικανοποίηση του περιορισμού κάλυψης φορτίου καθώς επίσης και των θερμικών ορίων των γραμμών. Επίσης, η ποσότητα p_{error} θα κατανέμεται βέλτιστα σε κάθε υπογράφο με τον

αλγόριθμο 1, θέτοντας ως αρχικές συνθήκες $p_{total}^{con} = p_{max_{line_i}} + \hat{p}_{DG}^{(i)}$ για τον ένα υπογράφο και $p_{total}^{un} = p_{total} - p_{max_{line_i}} + p_{error} + (\hat{p}_{DG}^{(1)} - \hat{p}_{DG}^{(i)})$ (υποθέτοντας ότι ο κόμβος i ανίχνευσε τη συμφόρηση). Οι γραμμές ελέγχονται διαδοχικά για υπερφορτίσεις ξεκινώντας από τους κόμβους που βρίσκονται στην αρχή της γραμμής και στη συνέχεια εξετάζοντας τους πιο απομακρυσμένους κόμβους. Προφανώς, αν ένας από τους δύο υπογράφους αποτελείται μόνο από ένα μόνο κόμβο και ο άλλος περιέχει όλους τους υπόλοιπους, ο αλγόριθμος 1 απαιτείται για να ενεργοποιηθεί μόνο για τον ένα υπογράφο καθώς ο κόμβος που ανήκει στον υπογράφο που περιέχει μόνο έναν κόμβο θα πρέπει απλά να αυξήσει ή να μειώσει αντίστοιχα την παραγωγή του κατά μια ποσότητα p_{error} .



Σχήμα 3-7 Ακτινικά δίκτυα διανομής με υπερφόρτιση γραμμής (a) κατεύθυνση ροής προς τα φύλλα, (b) κατεύθυνση ροής προς τον υποσταθμό.

Στο Σχήμα 3-8, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της μεθόδου για κατανεμημένη οικονομική κατανομή φορτίου λαμβάνοντας υπόψη τα θερμικά όρια στις γραμμές.



Σχήμα 3-8 Διάγραμμα ροής της μεθόδου για κατανεμημένη Οικονομική ΚΦ με όρια υπερφόρτισης των γραμμών.

3.4. Εισαγωγή απωλειών στο πρόβλημα της Οικονομικής ΚΦ

Προκειμένου να ληφθούν υπόψη και οι απώλειες ενεργού ισχύος στο πρόβλημα της Οικονομικής ΚΦ ο περιορισμός κάλυψης φορτίου (3.2), γίνεται:

$$\sum_{i \in N_G} p_i = p_{Load} + p_L \quad (3.31)$$

Και η συνάρτηση Lagrange του προβλήματος βελτιστοποίησης προκύπτει:

$$\mathcal{L}(\mathbf{p}, \lambda, \boldsymbol{\mu}) = C_{tot}(\mathbf{p}) + \lambda \left(p_{Load} + p_L - \sum_{i=1}^n p_i \right) \quad (3.32)$$

Τέλος, το κριτήριο Οικονομικής ΚΦ δίνεται από τη σχέση [125]:

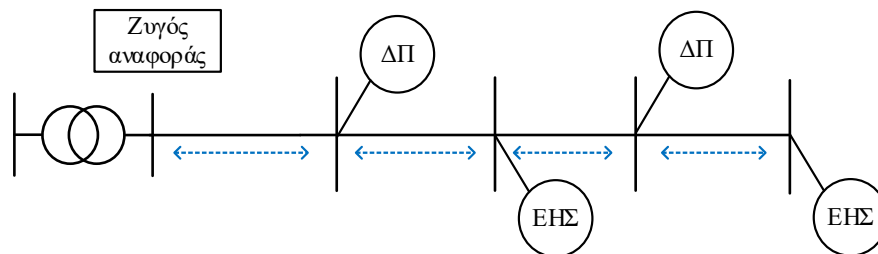
$$w_1 \frac{\partial C_1(p_1)}{\partial p_1} = w_2 \frac{\partial C_2(p_2)}{\partial p_2} = \dots = w_N \frac{\partial C_N(p_N)}{\partial p_N} = \lambda \quad (3.33)$$

Όπου w_i , οι συντελεστές ποιότητος απωλειών (ΣΠΑ) κάθε γεννήτριας, οι οποίοι εκφράζουν τη συμβολή κάθε γεννήτριας στις συνολικές απώλειες του συστήματος:

$$w_i = \frac{1}{1 - \frac{\partial p_L}{\partial p_i}} \quad (3.34)$$

3.5. Κατανομημένη επίλυση της Οικονομικής ΚΦ με απώλειες

Η γενική ιδέα της προτεινόμενης μεθόδου είναι η βέλτιστη κατανομή της παραγωγής ενεργού ισχύος κάθε μονάδας, συμπεριλαμβανομένων των συνολικών απωλειών οι οποίες θα πρέπει να υπολογίζονται με κατανομημένο τρόπο. Ορίζεται επομένως συνεκτικός μη κατευθυνόμενος γράφος $\mathcal{G} \triangleq (V, \mathcal{E})$, με n κόμβους που αντιστοιχίζονται στους οικότοπους της μεθόδου ΤΕΚ όπου $V \triangleq \{1, \dots, n\}$ είναι το σύνολο των κόμβων του δικτύου διανομής (οι οποίοι θεωρείται ότι διαθέτουν κάποια ΕΗΣ) και $\mathcal{E} \subset V \times V$, το σύνολο που ορίζει το δίκτυο επικοινωνίας τους. Στο Σχήμα 3-9, παρουσιάζεται η προτεινόμενη αρχιτεκτονική στην οποία κάθε κόμβος διαθέτει είτε μονάδα ΔΠ ή/και φορτίο και άρα αντιστοιχίζεται σε έναν οικότοπο του μοντέλου ΤΕΚ. Δεδομένου ότι η μέθοδος αφορά την Οικονομική ΚΦ των μονάδων ΔΠ, τα φορτία θεωρούνται μη ελεγχόμενα και άρα πρακτικά συμμετέχουν στη βελτιστοποίηση με σχεδόν μηδενικό πληθυσμό ($P_{\max_i} \approx 0$).



Σχήμα 3-9 Αρχιτεκτονική της προτεινόμενης μεθόδου, οι μπλε διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στους συνδέσμους επικοινωνίας.

Με τον τρόπο αυτό, τα φορτία συμβάλλουν στη γνώση του συνολικού φορτίου του συστήματος, αλλά δεν επηρεάζουν την κατανομή των γεννητριών. Έτσι, ικανοποιείται ο εξισωτικός περιορισμός του προβλήματος της Οικονομικής ΚΦ: $\mathbf{p}(0) = (L_1, L_2, \dots, L_n)$ όπου L_i είναι το φορτίο του κόμβου i .

3.5.1. Τροποποίηση της συνάρτησης ευημερίας

Σύμφωνα με τα προηγούμενα και προκειμένου το μοντέλο ΤΕΚ να λαμβάνει υπόψη τις απώλειες, η συνάρτηση ευημερίας (3.30) τροποποιείται ως εξής:

$$\pi_i(p_i) = -w_i \frac{\partial C_i(p_i)}{\partial p_i} = -\lambda_i \quad (3.35)$$

Με αυτόν τον τρόπο, στην κατάσταση ισορροπίας θα ικανοποιείται το κριτήριο (3.33) το οποίο συμπεριλαμβάνει τους συντελεστές ποινής απωλειών κάθε γεννήτριας. Επίσης, αντίστοιχα με την έκφραση (3.30), μια θετική σταθερά προστίθεται προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι οι συναρτήσεις ευημερίας θα λαμβάνουν πάντα θετικές. Οι συντελεστές w_i ουσιαστικά μεταβάλλουν την κλίση της συνάρτησης ευημερίας μεταξύ των τεχνικών ορίων της γεννήτριας, ανάλογα με τη συμβολή της μονάδας i στις συνολικές απώλειες του συστήματος. Η τροποποιημένη συνάρτηση ευημερίας πληροί όλες τις απαραίτητες προϋποθέσεις που θέτει το μοντέλο ΤΕΚ: είναι συνεχής Lipschitz, αυστηρά φθίνουσα και εξασφαλίζεται ότι λαμβάνει πάντα θετικές τιμές.

3.5.2. Κατανεμημένος υπολογισμός των ΣΠΑ

Οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος στο δίκτυο μπορούν να εκφραστούν ως:

$$p_L = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) \quad (3.36)$$

Όπου, οι πίνακες G και B αποτελούν το πραγματικό και φανταστικό μέρος της μήτρας αγωγιμοτήτων του δικτύου αντίστοιχα, δ_{ik} είναι η διαφορά φάσης των τάσεων μεταξύ των κόμβων i και k , V_i το μέτρο της τάσης του κόμβου i και n ο αριθμός των κόμβων. Επίσης, οι συνολικές απώλειες μπορούν να υπολογιστούν ως το άθροισμα των απωλειών κάθε γραμμής του δικτύου. Οι μιγαδικές απώλειες της γραμμής ij δίνονται από την εξίσωση:

$$\begin{aligned} S_{Lost_{ij}} &= (V_i \angle \theta_i - V_j \angle \theta_j) \cdot \tilde{I}_{ij} = (V_i \angle \theta_i - V_j \angle \theta_j) \cdot (V_i \angle -\theta_i - V_j \angle -\theta_j) (G_{ij} - jB_{ij}) \\ &= (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_j - \delta_i)) (G_{ij} - jB_{ij}) \end{aligned} \quad (3.37)$$

Η διαφορά φάσης μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων στα ΔΔ είναι στην πράξη αρκετά μικρή ώστε να μπορεί να προσεγγιστεί το συνημίτονο της διαφοράς γωνίας τους στη μονάδα, δηλ. $\cos(\delta_j - \delta_i) \cong 1$ [85], [132] και επομένως προκύπτει:

$$P_{Lost_{ij}} \cong G_{ij} (V_i - V_j)^2 \quad (3.38)$$

Άρα οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος μπορούν να προσεγγιστούν από την επόμενη σχέση, ως το άθροισμα των απωλειών σε κάθε γραμμή του δικτύου:

$$p_L \cong \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n G_{ij} (V_i - V_j)^2 \quad (3.39)$$

Ως εκ τούτου, οι απώλειες του συστήματος μπορούν να υπολογιστούν ως άθροισμα των διαφορών τάσης των γειτονικών κόμβων που σημαίνει ότι όλοι οι κόμβοι του συστήματος μπορεί να έχουν συλλογική γνώση των συνολικών απωλειών του δικτύου. Εναλλακτικά, οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος μπορούν να διατυπωθούν και ως συνάρτηση όλων των ενεργών εγχύσεων [125]:

$$p_L = f(p_1, \dots, p_n) \quad (3.40)$$

Προκειμένου οι απώλειες να ληφθούν υπόψη βέλτιστα στο πρόβλημα, θα πρέπει να υπολογιστεί η τιμή $\frac{\partial p_L}{\partial p_i}$ και του αντίστοιχου ΣΠΑ (3.34), για κάθε γεννήτρια. Δεδομένου ότι το πρόβλημα της Οικονομικής ΚΦ μελετά την παραγωγή ενεργού ισχύος κάθε μονάδας, θα εξεταστούν μικρές αλλαγές στην ενεργό παραγωγή κάθε κόμβου, υποθέτοντας παράλληλα ότι δεν υπάρχουν μεταβολές στις εγχύσεις αέργου ισχύος. Έστω λοιπόν ο πίνακας γραμμή A ο οποίος περιέχει όλες τις μερικές παραγώγους της συνάρτησης απωλειών ως προς την ενεργό έγχυση ισχύος κάθε κόμβου (σημειώνεται ότι ο ζυγός αναφοράς δε συμπεριλαμβάνεται στη διαδικασία αφού ο αντίστοιχος ΣΠΑ του διατηρείται κάθε στιγμή ίσος με τη μονάδα):

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_L}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial p_L}{\partial p_n} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Ο πίνακας ευαισθησίας (3.41) μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$A = (W_x F_x^{-1}) \quad (3.42)$$

με $x = [V_2 \dots V_n]^T$, τις μεταβλητές κατάστασης του δικτύου, W_x το διάνυσμα: $W_x = \left[\frac{\partial p_L}{\partial V} \right]$, και F_x η Ιακωβιανή μήτρα:

$$F_x = \begin{bmatrix} J_{22} & \dots & J_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{n2} & \dots & J_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial p_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial p_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial p_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Απόδειξη:

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, $p_L = f(p_1, \dots, p_n)$ και $p_L = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n G_{ij} (V_i - V_j)^2$ και εφαρμόζοντας τον κανόνα της αλυσίδας προκύπτει:

$$\frac{\partial p_L}{\partial p_i} = \sum_j \frac{\partial p_L}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial p_i} \quad (3.44)$$

Γράφοντας τις εξισώσεις σε μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial p_L}{\partial p_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_L}{\partial V_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial V_2}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial V_2}{\partial p_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial V_n}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial V_n}{\partial p_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_L}{\partial V_i} \end{bmatrix} [S_{P_V}] \quad (3.45)$$

Σημειώνεται ότι για το ζυγό αναφοράς ισχύει $\frac{\partial p_L}{\partial p_1} = 0$.

Η Ιακωβιανή μήτρα της συνάρτησης $\mathbf{p}(\mathbf{V})$, έχοντας αφαιρέσει το ζυγό αναφοράς, δίνεται από την έκφραση:

$$F_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial p_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial p_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial p_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Από το θεώρημα αντίστροφης συνάρτησης προκύπτει ότι $J_{F^{-1}}(\mathbf{p}(\mathbf{V})) = [J_F(\mathbf{p})]^{-1}$, αφού οι εξισώσεις ροής φορτίου αποτελούν συνεχώς παραγωγίσιμες συναρτήσεις και η ορίζουσα της Ιακωβιανής μήτρας της συνάρτησης \mathbf{p} στο σημείο \mathbf{V} είναι μη μηδενική (θεωρώντας ότι η κατάσταση \mathbf{V} αντιστοιχεί σε κάποιο σημείο λειτουργίας του δικτύου, αποκλείοντας το ζυγό αναφοράς και ορίζοντας όλους τους υπόλοιπους ζυγούς PQ). Τότε στην κατάσταση \mathbf{V} θα ισχύει:

$$[S_{P_V}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_2}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial V_2}{\partial p_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial V_n}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial V_n}{\partial p_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial p_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial p_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial p_n}{\partial V_n} \end{bmatrix}^{-1} = F_x^{-1} \quad (3.47)$$

και προκύπτει το ζητούμενο:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial p_L}{\partial p_i} \end{bmatrix} F_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_L}{\partial V_i} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

■

Όπως φαίνεται από την εξίσωση (3.42), για να υπολογιστεί η μήτρα A , η Ιακωβιανή μήτρα F_x πρέπει να αντιστραφεί γεγονός που θα απαιτούσε κεντρικό υπολογισμό (συγκέντρωση όλων των πληροφοριών της F_x σε ένα σημείο για να υπολογισθεί ο αντίστροφος). Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα και να επιτευχθεί ο κατανεμημένος υπολογι-

σμός των ΣΠΑ, προτείνεται η ακόλουθη προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία οι ΣΠΑ υπολογίζονται από την κατανεμημένη επίλυση του αντίστοιχου συστήματος γραμμικών εξισώσεων:

$$A \cdot F_x = W_x \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \frac{\partial p_L}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial p_L}{\partial p_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial p_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial p_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial p_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \sum_{k=1}^n V_k G_{2k} & \dots & -2 \sum_{k=1}^n V_k G_{nk} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Όπου, $\frac{\partial p_i}{\partial V_i} = V_i G_{ii} + \frac{p_i}{V_i}$, $\frac{\partial p_i}{\partial V_j} = |V_i Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \cong |V_i Y_{ij}| \cos(\theta_{ij})$ και θ_{ij} , η φασική γωνία του στοιχείου Y_{ij} της μήτρας αγωγιμοτήτων [85], [125], γεγονός το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η Ιακωβιανή μήτρα F_x ακολουθεί την ίδια δομή με τη μήτρα αγωγιμοτήτων με την έννοια ότι το στοιχείο ij της μήτρας F_x θα είναι μη μηδενικό εάν και μόνο εάν το στοιχείο ij της μήτρας Y είναι μη μηδενικό. Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ σημαντική διότι πρακτικά σημαίνει ότι η στήλη i (και αντίστοιχα η γραμμή i , αφού $F_x^T = F_x$) η οποία αντιστοιχεί στις πληροφορίες που πρέπει απαραίτητα να γνωρίζει ο κόμβος i για να επιλύσει το σύστημα (3.49) θα είναι πληροφορίες που θα είναι διαθέσιμες από τους ηλεκτρικούς του γείτονες. Επίσης, σύμφωνα με τις αρχικές θεωρήσεις αλλά και το στόχο της ανάπτυξης της συγκεκριμένης κατανεμημένης μεθόδου, οι ηλεκτρικοί γείτονες θα είναι και γείτονες στο γράφο επικοινωνίας και τελικά συμπεραίνεται ότι κάθε μονάδα θα μπορεί να υπολογίσει τον ΣΠΑ που της αντιστοιχεί χρησιμοποιώντας πληροφορίες από τους γειτονικούς της κόμβους. Επομένως από το σύνολο των $n - 1$ εξισώσεων (3.49) και σε συνδυασμό με την εξίσωση του ζυγού αναφοράς ($\partial p_L / \partial p_1 = 0$), η εξίσωση που αντιστοιχεί στον κόμβο i παίρνει τη μορφή:

$$\sum_{j \in N_i \cup \{i\}} J_{ji} \frac{\partial p_L}{\partial p_j} = -2 \sum_{k \in N_i \cup \{i\}} V_k G_{ik} \quad (3.50)$$

Το παραπάνω σύνολο γραμμικών εξισώσεων μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας τον επαναληπτικό αλγόριθμο Gauss Seidel. Ο κανόνας ανανέωσης κατάστασης του κόμβου i (θέτοντας $\frac{\partial p_L}{\partial p_i} = x_i$) δίνεται από την εξίσωση:

$$x_i(n+1) = -\frac{2}{J_{ii}} \sum_{k \in N_i \cup \{i\}} V_k G_{ik} - \sum_{j \in N_i} \frac{J_{ji}}{J_{ii}} x_j(n) \quad (3.51)$$

Κάθε φορά που παρατηρείται κάποια αλλαγή στην κατάσταση του δικτύου (όταν δηλαδή μεταβάλλεται κάποια παράμετρος στην εξίσωση (3.51), ή λαμβάνεται κατάλληλο μήνυμα από ένα γειτονικό κόμβο), ο επόμενος αλγόριθμος ενεργοποιείται και οι ΣΠΑ κάθε μονάδας υπολογίζονται εκ νέου. Επιπρόσθετα, από την προηγούμενη ανάλυση προκύπτει ότι η προσθήκη ενός καινούργιου κόμβου στο σύστημα απαιτεί τη γνώση της αντίστασης της γραμμής που συνδέει τον καινούργιο κόμβο με τους γειτονικούς κόμβους, ιδιότητα που προσδίδει στην προτεινόμενη μεθοδολογία το χαρακτηριστικό της «τοποθέτησης και άμεσης λειτουργίας» (plug and play). Η παραπάνω ανάλυση καταφέρνει να εκτιμήσει τους

ΣΠΑ των μονάδων ΔΠ σε ΔΔ με πλήρως κατανεμημένο τρόπο καθώς απαιτεί την ανταλλαγή μηνυμάτων μόνο μεταξύ γειτονικών κόμβων και τοπικές μετρήσεις τάσης προκειμένου να υπολογίσει τη συμβολή κάθε μονάδας στις συνολικές απώλειες του συστήματος.

Αλγόριθμος 2: Κατανεμημένος υπολογισμός των Συντελεστών Ποινής Απωλειών (ΣΠΑ), κόμβος i

1: Επανάληψη:

2: Ανταλλαγή πληροφοριών με γειτονικούς κόμβους:

Αποστολή: $w_i(n)$, σε κάθε $j \in N_i$

Λήψη: $w_j(n)$, από κάθε $j \in N_i$

3: Υπολογισμός:

$\{J_{ij} \mid j \in N_i\}$ χρησιμοποιώντας πληροφορίες από τους γείτονες

$w_i(n+1)$ χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.51)

4: Έως ότου: $|w_i(n+1) - w_i(n)| \leq \epsilon_1$

3.5.3. Κατανεμημένος αλγόριθμος

Ο επόμενος αλγόριθμος (αλγόριθμος 3), πρακτικά επεκτείνει τον αλγόριθμο 1 που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα ενσωματώνοντας παράλληλα και τον αλγόριθμο 2.

Αλγόριθμος 3: Κατανεμημένη Οικονομική ΚΦ με απώλειες, κόμβος i

1: Αρχικοποίηση (Σήμα ενεργοποίησης από γειτονικό κόμβο: $p(0)_{total} + p_L(0)$)
/ * Αρχικοποίηση και πρώτη εκτίμηση των απωλειών * /

Ανάθεση τοπικής παραγωγής: $p_i^0(0) = L_i + p_{L_i}^0$

Υπολογισμός: $\pi_i(0)$, με βάση τοπικές παραμέτρους κόστους

2: Επανάληψη:

3: Ανταλλαγή πληροφοριών με γειτονικούς κόμβους:

Αποστολή: $p_i(n), \pi_i(n)$, σε κάθε $j \in N_i$

Λήψη: $p_j(n), \pi_j(n)$, από κάθε $j \in N_i$

4: Ανανέωση παραγωγής με βάση το μοντέλο ΤΕΚ

Υπολογισμός: $p_i(n+1), \pi_i(n+1)$,

/* Με την τροποποιημένη εξίσωση συνάρτησης ευημερίας */

5: Μεταβολή τοπικής παραγωγής: $p_i(n+1)$

6: Μέτρηση τάσης και ανανέωση εκτίμησης απωλειών:

Εάν εντοπιστεί μεταβολή ή ληφθεί αντίστοιχο μήνυμα από γειτονικό κόμβο, ενεργοποίηση του αλγορίθμου 2.

Εάν η μεταβολή των εκτιμώμενων απωλειών υπερβαίνει το όριο, ο αλγόριθμος 3 αρχικοποιείται εκ νέου με:

$$p_i^0(0) = p_i(n+1) + \Delta p_{L_i}^l$$

7: Έως ότου: $|\pi_i(n+1) - \pi_j(n+1)| \leq \epsilon_2$, για κάθε $j \in N_i$

8: Αναμονή για σήμα τερματισμού από κατάντη κόμβους: $\hat{p}_{DG}^{(j)} + \hat{p}_L^{(j)}$

9: Προώθηση σήματος τερματισμού σε ανάντη κόμβο: $\hat{p}_{DG}^{(i)} + \hat{p}_L^{(i)}$

Το αρχικό διάνυσμα Οικονομικής ΚΦ λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες τίθεται σε: $p^0 = p(0) + p_L^0$, μετρώντας τη συνολική ζήτηση του υποσταθμού και συνυπολογίζοντας την προηγούμενη συνολική παραγωγή των μονάδων (πιθανότατα από προηγούμενη εκτέλεση του αλγορίθμου). Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος 3 ενεργοποιείται και οι μονάδες ΔΠ τροποποιούν την παραγωγή τους με βάση το μοντέλο ΤΕΚ. Οι κόμβοι μετρούν τις τάσεις τους και στην περίπτωση που ανιχνευτεί κάποια μεταβολή, ενεργοποιείται ο αλγόριθμος 2 για την ενημέρωση των ΣΠΑ. Αν διαπιστωθεί κάποια αλλαγή στις υπολογιζόμενες απώλειες κάθε γραμμής (υπερβαίνοντας ένα διάστημα ανοχής), ο αλγόριθμος 3 ενεργοποιείται εκ νέου τροποποιώντας το διάνυσμα Οικονομικής ΚΦ με την ανανεωμένη εκτίμηση απωλειών. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τη σύγκλιση των εκτιμήσεων στις απώλειες κάθε γραμμής και τελικά υπολογίζεται η βέλτιστη λύση, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών. Οι παράμετροι που καθορίζουν το διάστημα ανοχής για την εκτίμηση των απωλειών επηρεάζουν τις απαιτούμενες επαναλήψεις της μεθόδου καθώς επίσης και την τελική ακρίβεια της λύσης που υπολογίζεται. Σε κάθε περίπτωση, οι απώλειες συγκλίνουν τελικά στις πραγματικές τιμές. Κατά τον τερματισμό του αλγορίθμου, ο διαχειριστής λαμβάνει την πληροφορία της συνολικής παραγωγής των μονάδων και των συνολικών απωλειών στο δίκτυο.

3.6. Εφαρμογές της μεθόδου και αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογών των αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως σε δίκτυα διανομής καθώς επίσης διεξάγεται και μια γενικότερη διερεύνηση της μεθόδου.

3.6.1. Εφαρμογή σε απλοποιημένο ΔΔ

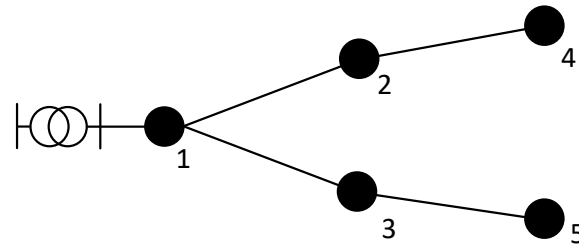
Η πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε αφορά το απλοποιημένο ακτινικό δίκτυο που απεικονίζεται στο Σχήμα 3-10. Οι συντελεστές κόστους μαζί με τα τεχνικά όρια των μονάδων γεννητριών παρατίθενται στον Πίνακα 3-1. Ο κόμβος 1 αντιστοιχεί στην ισχύ που θα παρέχεται από τον υποσταθμό ενώ ο κόμβος 5 διαθέτει μονάδα ΑΠΕ (π.χ. Φ/Β). Οι υπόλοιποι κόμβοι διαθέτουν μονάδες ΔΠ. Το συνολικό φορτίο που εξετάζεται ορίστηκε στα 1000kW.

Πίνακας 3-1 Λειτουργικά όρια και συντελεστές κόστους των μονάδων. Το c_i αντιστοιχεί σε (χρηματικές μονάδες)/(kW)² και το b_i σε (χρηματικές μονάδες)/(kW) αντίστοιχα.

Κόμβος	c_i	b_i	P_{max} (kW)	P_{min} (kW)
1	0	1000	1000	0
2	1,1	900	250	40
3	1,2	1500	350	80

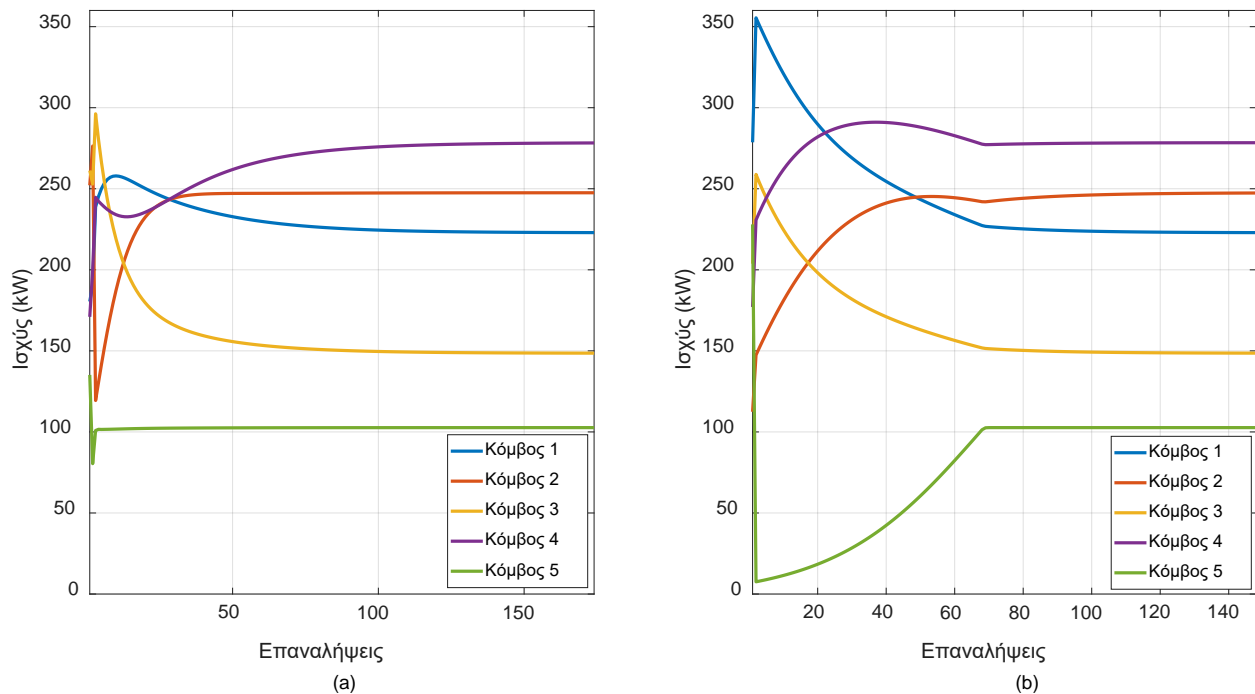
3.6. Εφαρμογές της μεθόδου και αποτελέσματα

4	1,9	800	300	50
5	0	900	100	0



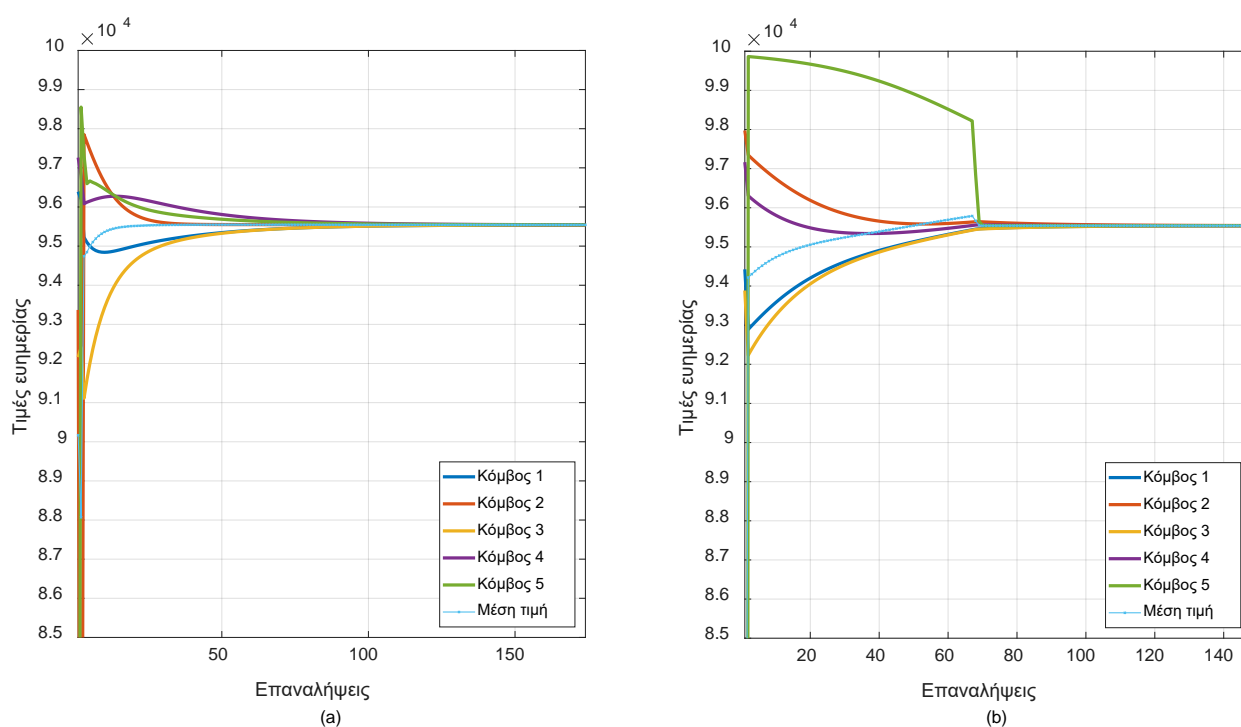
Σχήμα 3-10 Το ακτινικό δίκτυο για την εφαρμογή του κατανεμημένου αλγορίθμου Οικονομικής ΚΦ.

Ο αλγόριθμος προσομοιώθηκε και για τα δύο μοντέλα εξισώσεων κλωνωτή, για την κατανεμημένη εκδοχή (μοντέλο ΤΕΚ) καθώς και την κεντρική (πλήρης επικοινωνία). Τα αποτελέσματα της μεθόδου φαίνονται στο Σχήμα 3-11, όπου προκύπτει ότι τα δύο μοντέλα συγκλίνουν στο ίδιο σημείο ισορροπίας με σφάλμα της τάξεως του 0.01% το οποίο οφείλεται στην επιλογή των παραμέτρων επίτευξης σύγκλισης. Επιπλέον, οι τιθέμενοι τεχνικοί περιορισμοί των μονάδων τηρούνται ικανοποιητικά όπως και ο περιορισμός κάλυψης φορτίου. Στο Σχήμα 3-12, παρουσιάζονται οι τιμές των συναρτήσεων ευημερίας κάθε μονάδας σε συνδυασμό με τη μέση τιμή της ευημερίας η οποία στην περίπτωση του κατανεμημένου μοντέλου έχει υπολογιστεί σε επόμενο στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων και όχι από τον αλγόριθμο όπως στην περίπτωση του κεντρικού μοντέλου.



Σχήμα 3-11 Αποτελέσματα της Οικονομικής ΚΦ: (α) την κατανεμημένη μέθοδο και (β) την κεντρική.

Και στις δύο περιπτώσεις η ευημερία κάθε μονάδας φτάνει στο μέσο όρο του συστήματος καταλήγοντας έτσι στη βέλτιστη λύση του προβλήματος Οικονομικής ΚΦ. Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων είναι ο διαφορετικός αριθμός επαναλήψεων (αν και είναι πρακτικά παραπλήσιος) και η διαφοροποίηση στις τροχιές, γεγονός που είναι άλλωστε αναμενόμενο λόγω των διαφορετικών τοπολογιών επικοινωνίας. Ενδεχόμενες διαφορετικές τιμές ευημερίας μεταξύ των δύο προσεγγίσεων οφείλονται στις διαφορετικές τιμές που μπορούν να επιλέγονται για την παράμετρο B κατά τον ορισμό των συναρτήσεων ευημερίας και δεν επηρεάζουν το σημείο ισορροπίας. Τέλος, για την ακρίβεια της μεθόδου συνολικά σημειώνεται ότι οι παράμετροι σύγκλισης επιλέχθηκαν έτσι ώστε το σφάλμα των τελικών αποτελεσμάτων σε σύγκριση με μέθοδο αναφοράς κεντρικής βελτιστοποίησης τετραγωνικού προγραμματισμού του λογισμικού MATLAB ©, να μην υπερβαίνει το 0.1%.

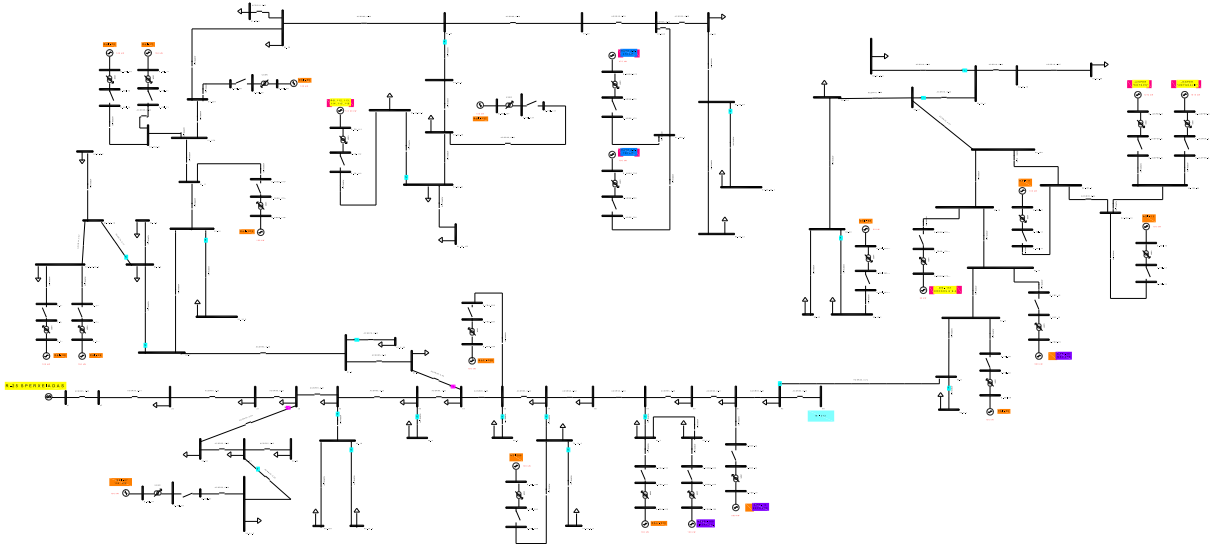


Σχήμα 3-12 Τιμές ευημερίας για την: (a) την καταμεμημένη μέθοδο και (b) την κεντρική.

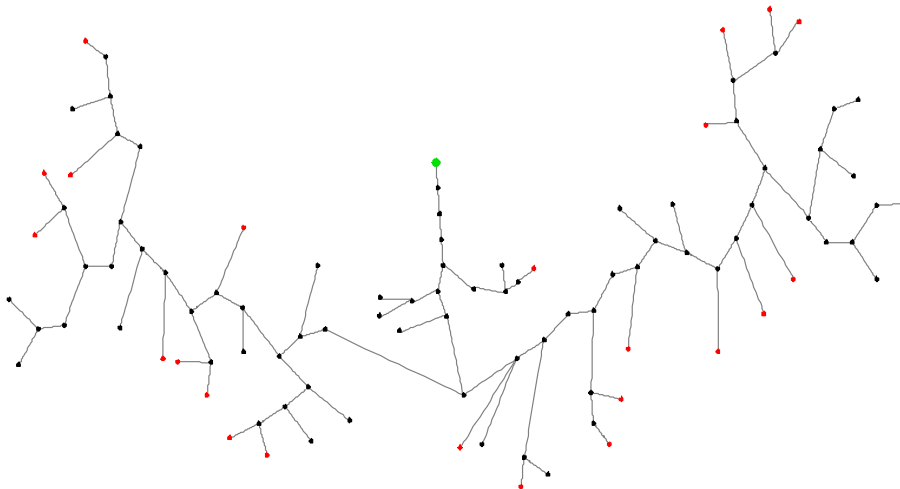
3.6.2. Εφαρμογή της μεθόδου σε πραγματικό ΔΔ

Προκειμένου να διερευνηθεί η επεκτασιμότητα της προτεινόμενης μεθόδου χρησιμοποιείται το ΔΔ που απεικονίζεται στο Σχήμα 3-13 και αποτελεί τμήμα του ελληνικού ΔΔ. Το δίκτυο βρίσκεται στην περιοχή της Σπερχειάδας (γραμμή P25) στην κεντρική Ελλάδα και παρουσιάζει υψηλή διείσδυση μονάδων ΔΠ. Συγκεκριμένα, διαθέτει 24 μονάδες Φ/Β παραγωγής. Η σύνδεση με το ανάντη σύστημα μοντελοποιείται επίσης ως μονάδα παραγωγής με τεχνικό μέγιστο τη μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση του Μ/Σ. Οι συναρτήσεις ευημερίας των μονάδων διαμορφώνονται σύμφωνα με το Σχήμα 3-6 ενώ οι συντελεστές κόστους επιλέ-

γονται τυχαία έτσι ώστε $c_i \in [0.006, 0.015]$, $b_i \in [0.001, 0.009]$. Στη συνέχεια κατασκευάζεται ο ηλεκτρικός γράφος του δικτύου (παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-14) και τέλος ορίζεται η «γειτονιά» κάθε μονάδας εξετάζοντας το κριτήριο της ηλεκτρικής τους γειτνίασης.



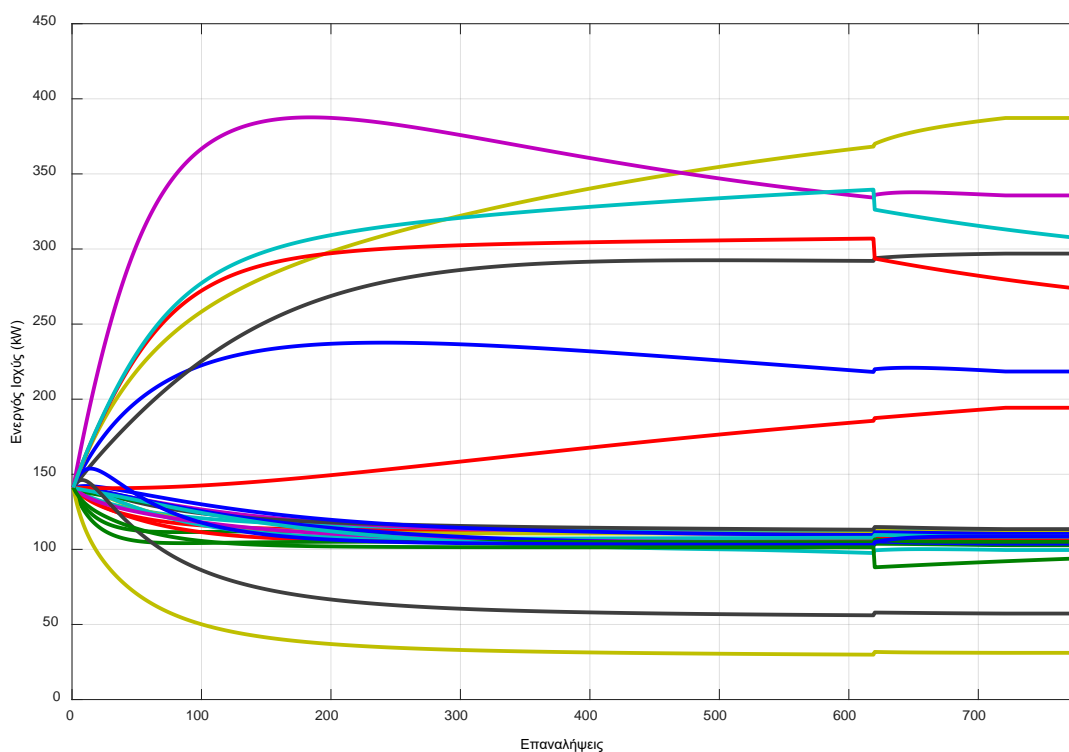
Σχήμα 3-13 Η γραμμή P25 της Σπερχειάδας.



Σχήμα 3-14 Γράφος του ηλεκτρικού δικτύου του Σχήματος 3-13. Ο πράσινος κόμβος αντιστοιχεί στο ζυγό αναφοράς και οι κόκκινοι κόμβοι στις μονάδες ΔΠ.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου απεικονίζονται στο Σχήμα 3-15 υποθέτοντας φορτίο 3,5MW (βάσει πραγματικών μετρήσεων στο δίκτυο). Η μέγιστη παραγωγή των Φ/Β γεννητριών καθορίζεται από την ονομαστική τους ισχύ θεωρώντας ευνοϊκές καιρικές συνθήκες, όταν η παραγωγή τους είναι κοντά στην ονομαστική. Μετά την σύγκλιση της μεθόδου, πραγματοποιείται ανάλυση ροών φορτίου χρησιμοποιώντας το πακέτο MATPOWER [131] του λογισμικού MATLAB®. Οι ροές των γραμμών υπολογίζονται και στη συνέχεια συγκρίνονται

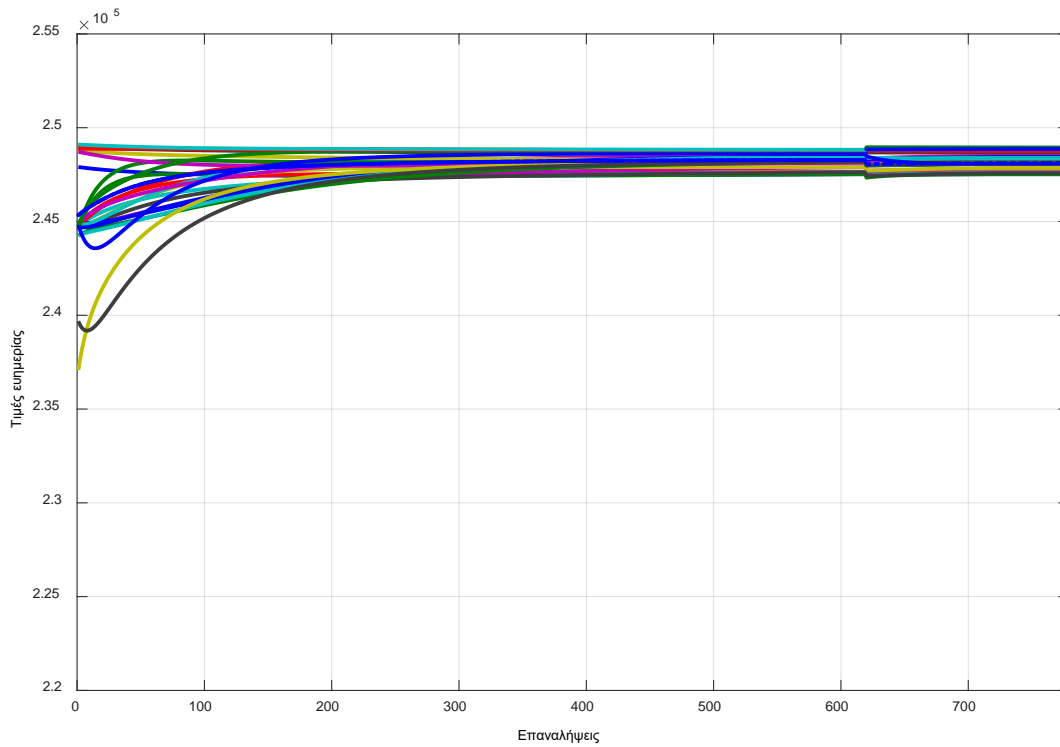
με τα καθορισμένα όρια. Ο αλγόριθμος είναι κατανομημένος, παρόλο που σε αυτή τη συγκεκριμένη προσομοίωση, η ανάλυση ροής φορτίου διεξάγεται κεντρικά. Σε μια πραγματική εφαρμογή, οι κόμβοι του δικτύου θα μπορούσαν να γνωρίζουν τη ροή φορτίου των γραμμών στις οποίες είναι συνδεδεμένοι. Τελικά, εμφανίζεται παραβίαση του θερμικού ορίου της γραμμής 39-40 με $p_{error} = 400\text{kW}$. Στη συνέχεια ο αρχικός γράφος χωρίζεται σε δύο υπογράφους και η μέθοδος εκτελείται προκειμένου να αντισταθμιστεί βέλτιστα η πλεονάζουσα ισχύς. Ο πρώτος υπογράφος περιέχει 3 κόμβους, οι οποίοι μειώνουν την παραγωγή τους κατά 400kW και ο δεύτερος περιέχει όλους τους υπόλοιπους, οι οποίοι αυξάνουν με βέλτιστο τρόπο την παραγωγή τους κατά την ίδια ποσότητα. Μετά τη δεύτερη σύγκλιση της μεθόδου, η ανάλυση ροής φορτίου εκτελείται εκ νέου και δεν προκύπτει κάποια συμφόρηση, οπότε και ο αλγόριθμος τερματίζει.



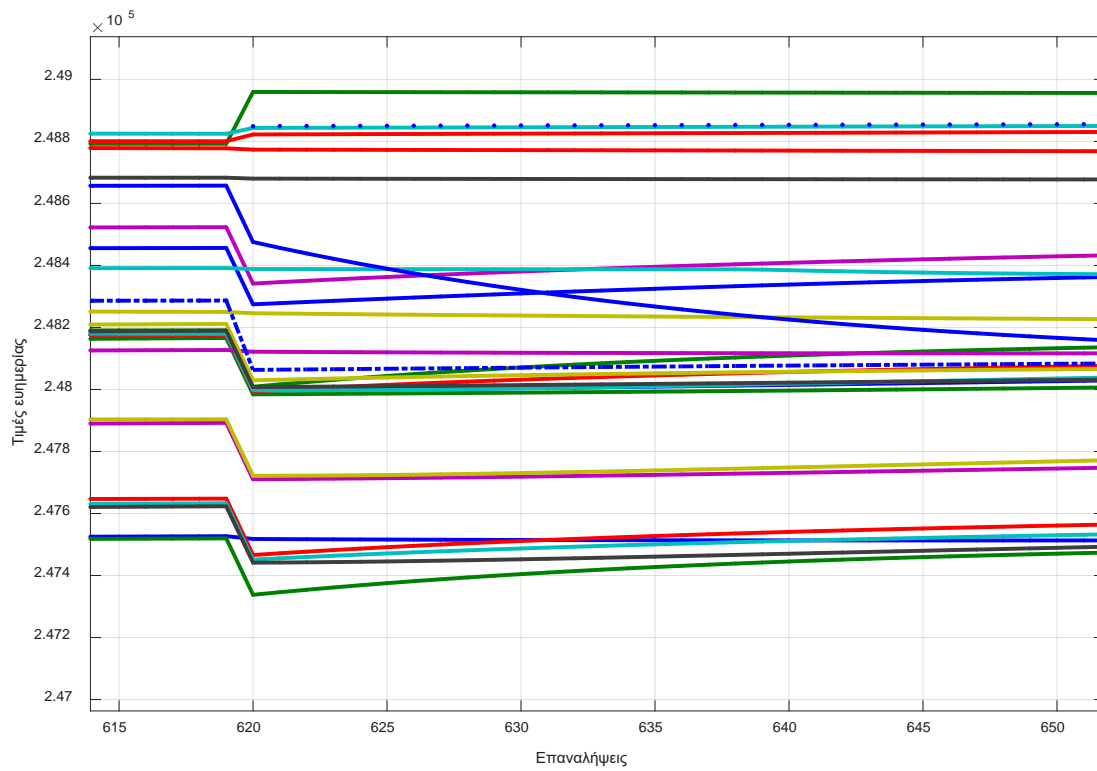
Σχήμα 3-15 Αποτελέσματα της Οικονομικής ΚΦ για τη γραμμή P25.

Στο Σχήμα 3-16 παρουσιάζονται οι τιμές ευημερίας των κόμβων, ενώ στο Σχήμα 3-17 δίνεται η λεπτομέρεια του σχήματος των τιμών ευημερίας των κόμβων για τις επαναλήψεις κοντά στην ανίχνευση της συμφόρησης και την ενεργοποίηση του αλγορίθμου για την αντιμετώπισή της. Ειδικότερα, στην επανάληψη 619 μετά την πρώτη σύγκλιση και στη φάση διόρθωσης, οι τιμές ευημερίας των κόμβων που ανήκουν στο δεύτερο υπογράφο μειώνονται αναπόφευκτα, αυξάνοντας την παραγωγή τους και άρα το οριακό τους κόστος. Αντίθετα, οι κόμβοι του πρώτου υπογράφου αυξάνουν τις τιμές ευημερίας τους με τη μείωση της παραγωγής τους.

3.6. Εφαρμογές της μεθόδου και αποτελέσματα



Σχήμα 3-16 Τιμές ευημερίας κάθε μονάδας ΔΠ για τη γραμμή P25.

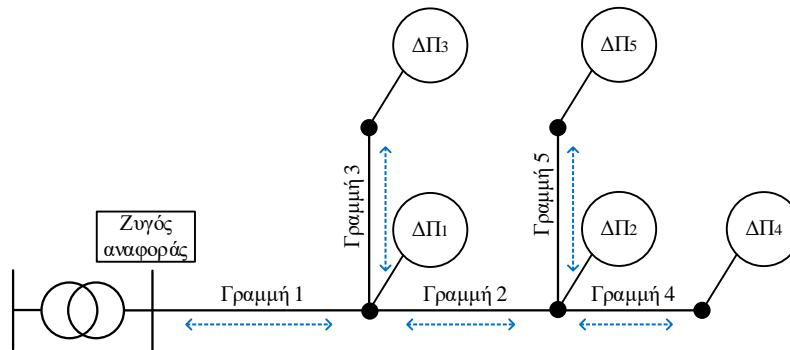


Σχήμα 3-17 Λεπτομέρεια του σχήματος των τιμών ευημερίας των κόμβων για τις επαναλήψεις κοντά στην ανίχνευση της συμφόρησης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μονάδες ΔΠ που εξετάζονται στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι Φ/Β, εκ των οποίων η πλειοψηφία έχουν ονομαστική ισχύ κοντά στα 100kW. Όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 3-15, το σημείο λειτουργίας τους ορίζεται στο τεχνικό μέγιστο αρχικά (αυτό εξαρτάται βέβαια και από τις παραμέτρους κόστους), αλλά μια από αυτές τις μονάδες περικόπτει ελαφρώς την παραγωγή της προκειμένου να συμβάλει στην ανακούφιση της συμφόρησης που προέκυψε μετά την πρώτη σύγκλιση της μεθόδου.

3.6.3. Εφαρμογή σε απλοποιημένο ΔΔ (με απώλειες)

Στο Σχήμα 3-18 παρουσιάζεται ένα δίκτυο διανομής με 6 κόμβους και 5 μονάδες ΔΠ. Οι αντίστοιχες οικονομικές και τεχνικές παράμετροι δίνονται στον Πίνακα 3-2. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε προηγουμένως ο αλγόριθμος εκτελείται για συνολικό φορτίο 860kW και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με συμβατική μέθοδο βελτιστοποίησης που βασίζεται σε αλγόριθμο τετραγωνικού προγραμματισμού και τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο βιβλίο [125].



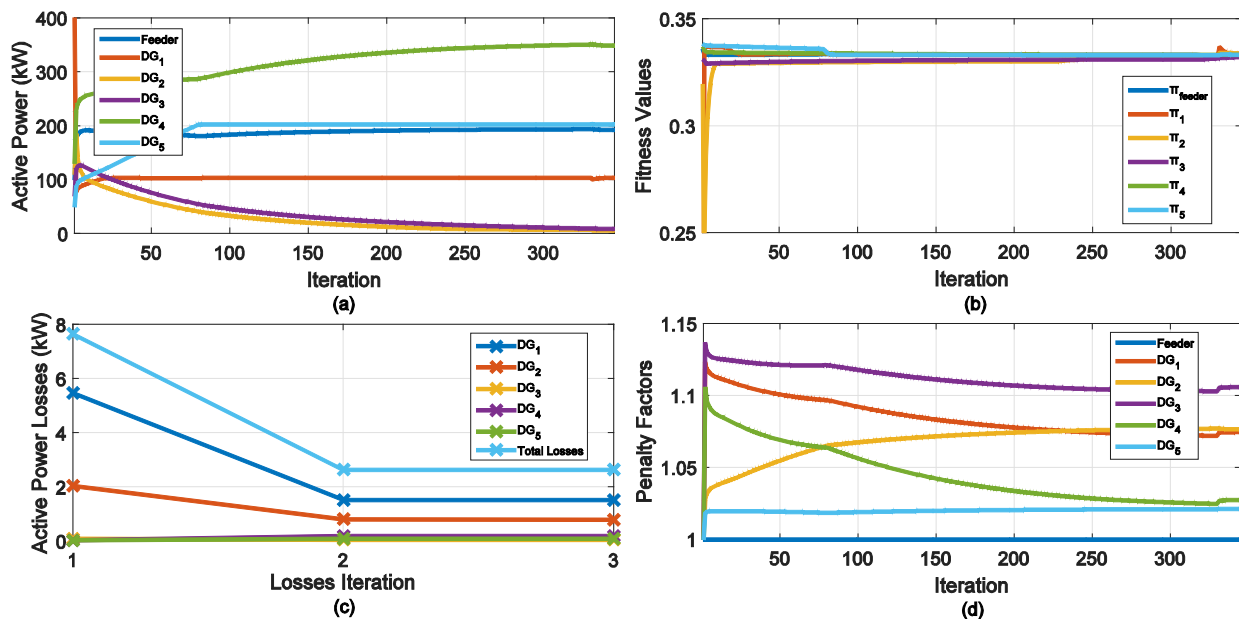
Σχήμα 3-18 Απλοποιημένο δίκτυο διανομής με διείσδυση μονάδων ΔΠ

Πίνακας 3-2 Λειτουργικά όρια των μονάδων και οι συντελεστές κόστους για την Οικονομική ΚΦ, το c_i δίνεται σε (χρηματικές μονάδες)/(kW)² και το b_i σε (χρηματικές μονάδες)/(kW) αντίστοιχα, οι τιμές αντίστασης και αντίδρασης των κλάδων δίνονται α.μ.

Ζυγός	c_i	b_i	P_{min} (kW)	P_{max} (kW)	Γραμμή	R (αμ)	X (αμ)
Αναφοράς	0,015	0,0011	0	1000			
$\Delta\Pi_1$	0,0095	0,0011	10	100	1	0,030643	0,02443
$\Delta\Pi_2$	0,0085	0,009	10	100	2	0,020352	0,065311
$\Delta\Pi_3$	0,0065	0,008	10	100	3	0,016199	0,0208
$\Delta\Pi_4$	0,008	0,0011	10	500	4	0,018386	0,014658
$\Delta\Pi_5$	0,0075	0,001	20	200	5	0,018386	0,014658

Στο Σχήμα 3-19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου που αναπτύχθηκε. Η συνολικός αριθμών επαναλήψεων που απαιτήθηκε μέχρι τη σύγκλιση ήταν 345. Σημειώνεται ότι ο αριθμός των επαναλήψεων εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους του αλγορίθμου,

όπως ο αριθμός των κόμβων, η τοπολογία του γράφου επικοινωνίας και οι παράμετροι ανοχής $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, που καθορίζουν την ακρίβεια της λύσης. Στο Σχήμα 3-19 (α) παρουσιάζεται η τροχιά του διανύσματος παραγωγής των μονάδων, δηλαδή η υπολογιζόμενη ενεργός ισχύς κάθε γεννήτριας σε κάθε επανάληψη της μεθόδου μέχρι τη σύγκλιση. Η αρχική τιμή του διανύσματος παραγωγής τίθεται σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφεται στον αλγόριθμο 2 και στη συνέχεια κάθε μονάδα υπολογίζει την αρχική τιμή της συνάρτησης ευημερίας (φαίνεται στο Σχήμα 3-19 (β)). Ο αλγόριθμος ενεργοποιείται με καταναμημένο τρόπο, αφού οι μονάδες επικοινωνούν μόνο με τους γειτονικούς κόμβους και με βάση τις μετρούμενες διαφορές στις τιμές ευημερίας των γειτόνων από τις δικές τους διαπιστώνουν ότι λειτουργούν με διαφορετικό οριακό κόστος και ξεκινούν να ανταλλάσσουν μηνύματα. Πραγματοποιούν τον τοπικό υπολογισμό στις απώλειες της γραμμής τους (παρουσιάζεται Σχήμα 3-19 (γ)) και στη συνέχεια βελτιστοποιούν την τιμή της παραγωγής τους για να φθάσουν στις ίδιες τιμές ευημερίας (εντός του προκαθορισμένου ορίου). Οι απώλειες υπολογίζονται σε κάθε επανάληψη και όταν διαπιστωθεί κάποια αλλαγή στις τιμές τους (υπερβαίνοντας ένα προκαθορισμένο όριο), ο αλγόριθμος αρχικοποιείται εκ νέου στην επανάληψη 331 και κατανέμει βέλτιστα τις αποκλίσεις με 14 επιπλέον επαναλήψεις έως ότου υπολογιστούν και πάλι αρκετά κοντινές τιμές ευημερίας (απαιτούνται μόνο λίγες επαναλήψεις αφού ο αλγόριθμος είναι κοντά στο σημείο ισορροπίας). Οι απώλειες συγκλίνουν μετά από μία ακόμη ανανέωση, με αποτέλεσμα τον τερματισμό του αλγορίθμου και τον υπολογισμό του βέλτιστου διανύσματος παραγωγής. Στο Σχήμα 3-19 (d), δίνονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου 3 ο οποίος εκτελείται παράλληλα με τον αλγόριθμο 2 (υπολογισμός ΣΠΑ κάθε κόμβου).



Σχήμα 3-19 Αποτελέσματα της καταναμημένης μεθόδου για το απλοποιημένο δίκτυο 6 κόμβων (α) Ενεργός ισχύς κάθε μονάδας, (β) Τιμές ευημερίας κάθε μονάδας και μέση ευημερία, (γ) Υπολογισμός των απωλειών σε 3 βήματα (κάθε γραμμής και συνολικές), (δ) Συντελεστής ποινής απωλειών κάθε μονάδας για κάθε επανάληψη.

Στον Πίνακα 3-3 συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας με συμβατική μέθοδο βελτιστοποίησης. Όπως φαίνεται, οι αποκλίσεις στις τιμές παραγωγής των μονάδων είναι αμελητέες. Πρέπει να σημειωθεί ότι η λύση του προβλήματος Οικονομικής ΚΦ που αγνοεί τις απώλειες αυξάνει τις συνολικές ενεργές απώλειες κατά 4,1%, όπως προκύπτει από υπολογισμούς ροής φορτίου.

Πίνακας 3-3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου αλγορίθμου με την κεντρική επίλυση και με την επίλυση που αμελεί τις απώλειες.

Ζυγός	Κεντρική υλοποίηση	Προτεινόμενη μέθοδος	Σφάλμα (%)	Χωρίς απώλειες
Αναφοράς	192,16	192,53	-0,19	187,82
$\Delta\Pi_1$	99,99	100,36	-0,36	99,99
$\Delta\Pi_2$	10,00	9,98	0,11	10,00
$\Delta\Pi_3$	10,00	9,98	0,11	10,00
$\Delta\Pi_4$	348,31	349,96	-0,18	352,17
$\Delta\Pi_5$	199,99	200,27	-0,13	199,99

3.6.4. Συζήτηση σχετικά με τις παραδοχές στις εξισώσεις ροής φορτίου

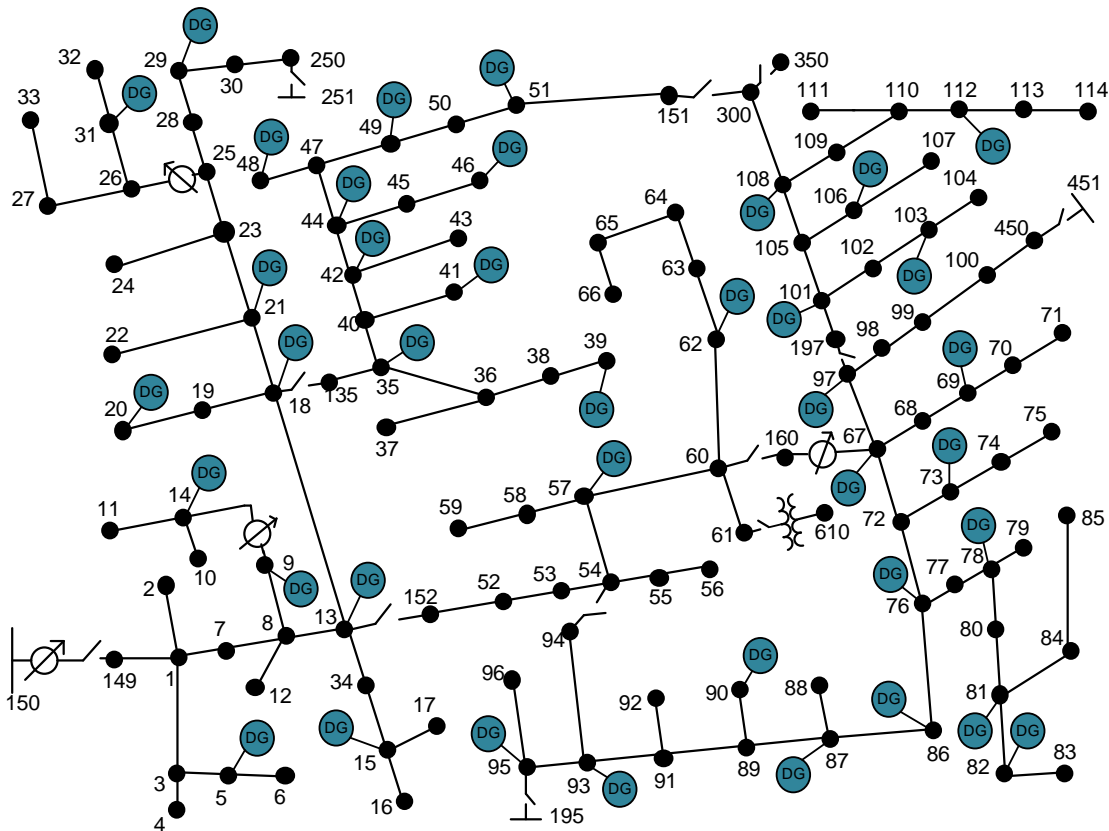
Η βασική παραδοχή που έγινε προκειμένου να ενσωματωθούν οι απώλειες των γραμμών στο πρόβλημα της Οικονομικής ΚΦ ήταν η υπόθεση της μικρής διαφοράς φάσης μεταξύ των γειτονικών κόμβων, έτσι ώστε να προσεγγιστεί το συνημίτονό της στη μονάδα. Με αυτόν τον τρόπο απλοποιήθηκε η συνάρτηση των συνολικών απωλειών και η επακόλουθη ανάλυση, ενώ αποφεύχθηκε η υπόθεση ότι οι μετρήσεις φασικών γωνιών θα είναι διαθέσιμες στο επίπεδο διανομής. Διαφορετικά, η ενσωμάτωση των εξισώσεων ροής φορτίου στην ανάλυση του προβλήματος μπορεί να επιτευχθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

1) Υποθέτοντας ότι το υπό μελέτη $\Delta\Delta$ εξοπλίζεται με Μετρητές Φάσης (Phasor measurement Units, PMUs). Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η ακριβής μέτρηση της διαφοράς φάσης μεταξύ των γειτονικών κόμβων και η σχετική ανάλυση που έχει πραγματοποιηθεί για την ενσωμάτωση των απωλειών θα χρησιμοποιεί επιπλέον τις φασικές γωνίες. Η συνάρτηση των συνολικών απωλειών μπορεί να διατυπωθεί ως: $p_L = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j))$. Οι μεταβλητές κατάστασης θα πρέπει να καταστρωθούν: $x = [\delta_2 \dots \delta_n \ V_2 \dots V_n]^T$, και το διάνυσμα W_x αντίστοιχα: $W_x = \left[\frac{\partial p_L}{\partial \delta} \ \frac{\partial p_L}{\partial V} \right]$. Στη συνέχεια η ανάλυση μπορεί να συνεχιστεί με παρόμοιο τρόπο. Βεβαίως, παρότι η χρήση των PMUs στα $\Delta\Delta$ (ιδιαίτερα των μ PMUs) αποκτά ολοένα και περισσότερο ενδιαφέρον, η εκτεταμένη εφαρμογή τους είναι ακόμη περιορισμένη [133].

2) Οι διαφορές φάσης μεταξύ γειτονικών κόμβων μπορούν να υπολογίζονται σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύσσεται στη μελέτη [134] και στη συνέχεια να ενσωματώνονται στην ανάλυση όπως περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο. Ωστόσο, αυτό θα αύξανε την πολυπλοκότητα της μεθόδου καθώς θα απαιτούσε επιπλέον υπολογισμούς και ανταλλαγή πληροφορίας και μετρήσεις των ροών στις γραμμές (που δεν απαιτούνται στην προτεινόμενη μεθοδολογία). Από την άλλη πλευρά, στον Πίνακα 3-3, τα αποτελέσματα του προτεινόμενου αλγορίθμου συγκρίνονται με την κεντρική λύση που χρησιμοποιεί την ολοκληρωμένη διατύπωση των εξισώσεων ροής φορτίου. Όπως φαίνεται, η προσέγγιση που χρησιμοποιείται, παρέχει αποτελέσματα με αμελητέο σφάλμα, χρησιμοποιώντας έναν απλούστερο αλγόριθμο και υποθέτοντας ότι οι μετρήσεις αποκτήθηκαν από ΕΗΣ, όπως οι ηλεκτρονικοί μετρητές.

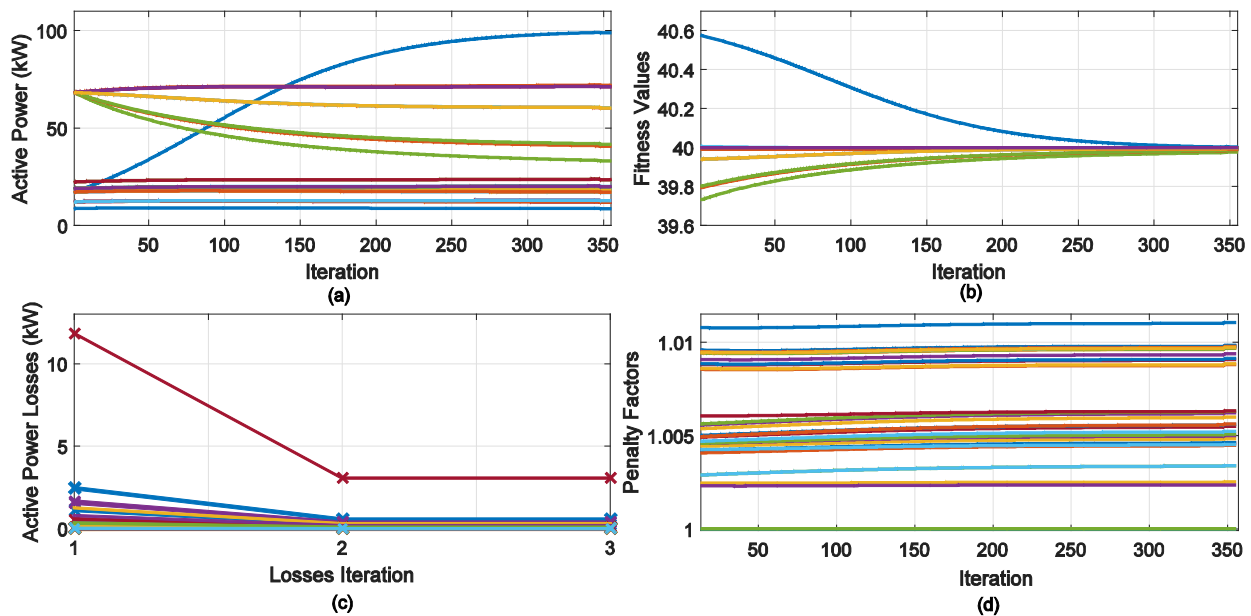
3.6.5. Εφαρμογή σε τροποποιημένο πρότυπο ΔΔ 123 ζυγών της IEEE (με απώλειες)

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται μια τροποποιημένη εκδοχή του πρότυπου ΔΔ IEEE 123 ζυγών στο οποίο έχουν εισαχθεί 39 μονάδες ΔΠ οι τεχνικές και οικονομικές παράμετροι των οποίων περιγράφονται στη μελέτη [135]. Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου για το συγκεκριμένο δίκτυο παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-20.



Σχήμα 3-20 Τροποποιημένο πρότυπο ΔΔ 123 ζυγών της IEEE.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-20, η μέθοδος παρουσιάζει αξιοσημείωτη επεκτασιμότητα, καθώς απαιτούνται 354 επαναλήψεις για τη σύγκλιση, για ένα πρόβλημα με σημαντικά αυξημένη πολυπλοκότητα (υπάρχουν 39 μονάδες ΔΠ σε αυτή την περίπτωση και 85 κόμβοι φορτίου, 25 από τους οποίους έχουν φορτίο και μονάδα ΔΠ), σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση που απαιτήθηκαν 345 επαναλήψεις για ένα σύστημα 6 κόμβων. Το ίδιο συμπέρασμα εξάγεται και για τον κατανομημένο υπολογισμό των απωλειών που όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-20 (c), δεν απαιτεί περισσότερες από 3 ενημερώσεις, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση με το απλούστερο σύστημα. Οι αντίστοιχοι υπολογισμοί των ΣΠΑ απεικονίζονται στο Σχήμα 3-20 (d).



Σχήμα 3-21 Αποτελέσματα της κατανομημένης μεθόδου για το τροποποιημένο πρότυπο ΔΔ 123 ζυγών της IEEE (a) Ενεργός ισχύς κάθε μονάδας, (b) Τιμές ευημερίας κάθε μονάδας και μέση ευημερία, (c) Υπολογισμός των απωλειών σε 3 βήματα (κάθε γραμμής και συνολικές), (d) Συντελεστής ποινής απωλειών κάθε μονάδας για κάθε επανάληψη.

3.6.6. Χρόνος σύγκλισης

Προκειμένου να διερευνηθεί η πρακτικότητα της μεθόδου, εκτιμάται προσεγγιστικά ο απαιτούμενος χρόνος σύγκλισης. Η μέθοδος υλοποιείται στο περιβάλλον JADE σε Η/Υ με χαρακτηριστικά Intel Core i5-6500 CPU@3.20 GHz με 8 GB μνήμης RAM. Ο συνολικός χρόνος σύγκλισης μπορεί να αποσυντεθεί στον υπολογιστικό χρόνο t_c κάθε επανάληψης και στον χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση μηνυμάτων μεταξύ των γειτόνων t_s . Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για τη σύγκλιση: $t_{total} = (t_c + t_s) \cdot N_{iterations}$. Ο μέσος χρόνος της προτεινόμενης μεθόδου, για τους υπολογισμούς κάθε επανάληψης ενός κόμβου, υπολογίζεται στα 0,059121s. Για την προσέγγιση του χρόνου μετάδοσης, θεωρείται ότι οι γειτονικοί κόμβοι επικοινωνούν με την τεχνολογία επικοινωνίας γραμμής ρεύματος (Power Line Communication - PLC) θεωρώντας ταχύτητα μεταφοράς

τα 200kbps [136]. Τα ανταλλασσόμενα μηνύματα περιέχουν τις τιμές της παραγόμενης ισχύος, της παραμέτρου ευημερίας και των ΣΠΑ και επομένως θεωρούνται ότι δεν υπερβαίνουν τα 30bytes. Ο χρόνος μετάδοσης υπολογίζεται ως: $t_s = (30 \cdot 8 \text{ bits}) / (200 \cdot \frac{10^3 \text{ bits}}{s}) = 1,20 \text{ ms}$. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο χρόνος σύγκλισης για την περίπτωση του συστήματος 6 κόμβων: $t_{total_1} = 20,81 \text{ s}$ και για το πρότυπο ΔΔ 123 ζυγών: $t_{total_2} = 21,35 \text{ s}$, οι οποίοι κρίνονται αποδεκτοί για την πρακτική εφαρμογή του προβλήματος Οικονομικής ΚΦ.

3.6.7. Συγκρίσεις με εναλλακτικές κατανεμημένες μεθόδους

Σε αυτή την ενότητα, γίνεται σύγκριση του προτεινόμενου αλγορίθμου με αντιπροσωπευτικές κατανεμημένες μεθόδους, που αναφέρονται συνοπτικά στη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Η σύγκριση εξετάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και τον απαιτούμενο αριθμό επαναλήψεων της μεθόδου για σύγκλιση. Οι μέθοδοι που εξετάζονται είναι οι επόμενες:

- Η μέθοδος λάμδα συναίνεσης (Lambda consensus) [45]. Αυτή η μέθοδος υπολογίζει τις συνολικές απώλειες, αλλά δεν λαμβάνει υπόψη τους συντελεστές ποινής απωλειών κάθε γεννήτριας και συνεπώς τη συνεισφορά κάθε γεννήτριας στις απώλειες.
- Η μέθοδος των συζευγμένων ταλαντωτών (Coupled Oscillators) που αναπτύσσεται στη μελέτη [55] και χρησιμοποιεί τις εξισώσεις εκτίμησης απωλειών Kron για τον υπολογισμό των απωλειών και τη συνεισφορά κάθε γεννήτριας.
- Η μέθοδος consensus and innovations που αναπτύσσεται στη μελέτη [43], η οποία αμελεί τις απώλειες.

Στον Πίνακα 3-4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των εξεταζόμενων μεθόδων (την απόκλιση της συνολικής ενεργού ισχύος) σε σύγκριση με τη βέλτιστη λύση όπως προκύπτει από την εφαρμογή στο απλοποιημένο σύστημα των 6 κόμβων.

Πίνακας 3-4 Ακρίβεια της Οικονομικής ΚΦ όπως υπολογίζεται από κατανεμημένες μεθόδους της βιβλιογραφίας για το σύστημα 6 κόμβων.

	Σφάλμα (%)
Προτεινόμενη μέθοδος	0,31
Lambda Consensus [45]	0,7
Coupled Oscillators [55]	2,4
Consensus + Innovations [43]	2,2

Όπως φαίνεται, η προτεινόμενη μέθοδος εμφανίζει την υψηλότερη ακρίβεια μεταξύ των εναλλακτικών μεθόδων που δοκιμάστηκαν. Στον Πίνακα 3-5 διενεργείται σύγκριση του αριθμού των απαιτούμενων επαναλήψεων για το σύστημα 6 κόμβων και το πρότυπο ΔΔ 123 κόμβων της IEEE. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι η προτεινόμενη μέθοδος εμφανίζει σημαντική επεκτασιμότητα και παρόλο που έχει χειρότερη συμπεριφορά για το μικρότερο δίκτυο,

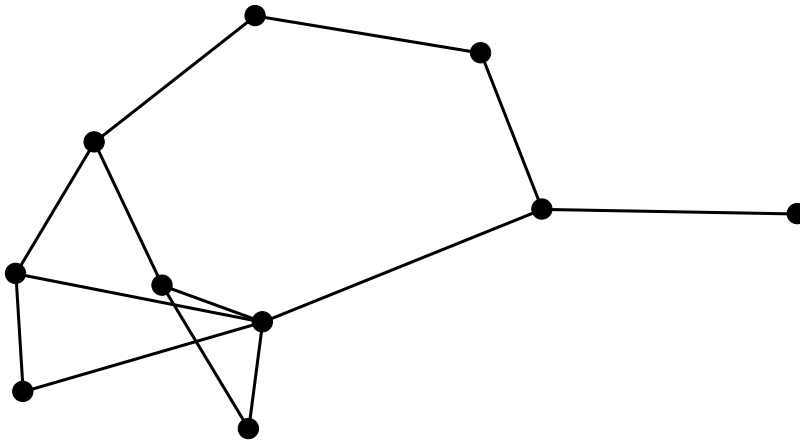
είναι σαφώς πιο αποδοτική για μεγαλύτερα και πιο ρεαλιστικά δίκτυα παρέχοντας αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια, συμπεριλαμβάνοντας τον υπολογισμό αλλά και τη βέλτιστη κατανομή των απωλειών.

Πίνακας 3-5 Απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων για τις διάφορες κατανεμημένες μεθόδους.

	Σύστημα 6 κόμβων	Πρότυπο σύστημα 123 κόμβων
Προτεινόμενη μέθοδος	345	354
Lambda Consensus [45]	80	305
Coupled Oscillators [55]	169	596
Consensus + Innovations [43]	300	460

3.6.8. Περαιτέρω διερεύνηση και αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου

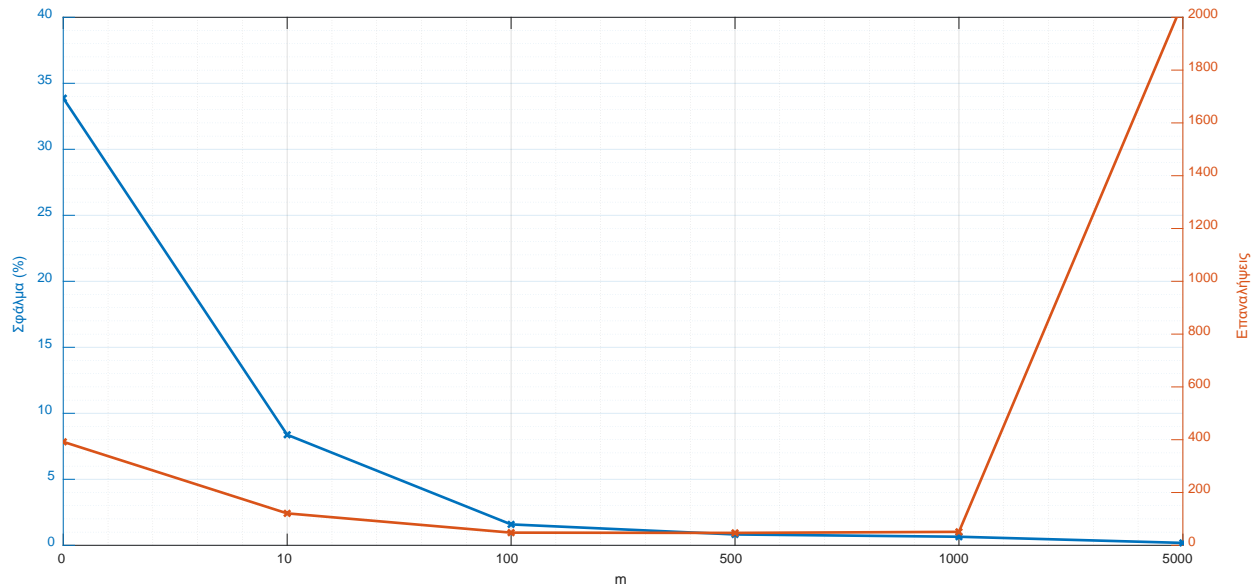
Σε αυτήν την ενότητα διερευνάται η επίδραση των εσωτερικών παραμέτρων του μοντέλου βελτιστοποίησης καθώς επίσης εκτιμάται και η επίδραση που έχει στην ταχύτητα σύγκλισης, ο τύπος της τοπολογίας με την οποία οι κόμβοι επικοινωνούν καθώς επίσης και το μέγεθος του δικτύου. Για κάθε περίπτωση, διενεργούνται προσομοιώσεις Monte Carlo και σχολιάζονται τα αποτελέσματα.



Σχήμα 3-22 Δείγμα τυχαίου δικτύου 10 κόμβων.

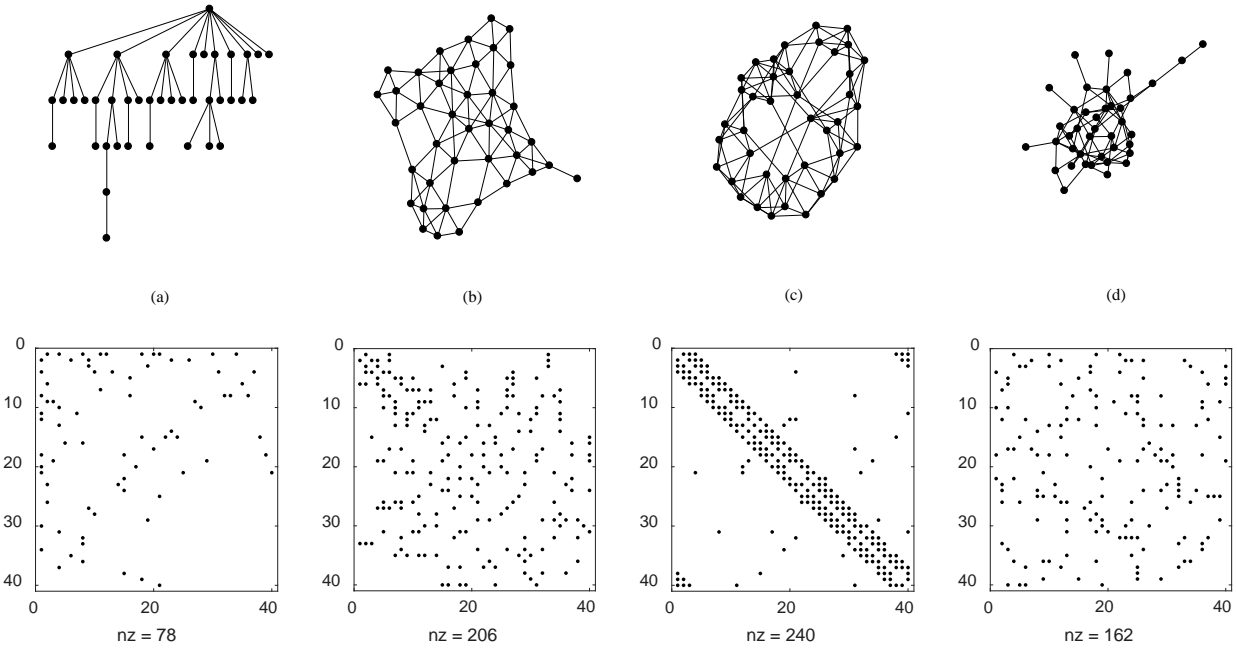
Αρχικά παράγονται τυχαίοι γράφοι 10 κόμβων για τον βαθμό των οποίων ισχύει $2 \leq \frac{1}{N} \sum_{i \in V} d_i \leq 3$, σκοπεύοντας στην κατασκευή γράφων παρόμοιων με το γράφο που εμφανίζεται στο Σχήμα 3-22 και στη συνέχεια εκτελείται το μοντέλο TEK για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων m και B . Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκε ότι η παράμετρος B δεν επηρεάζει την ταχύτητα σύγκλισης αλλά ούτε και την ακρίβεια της μεθόδου, αρκεί να εξασφαλιστεί ότι όλες οι συναρτήσεις ευημερίας παραμένουν θετικές. Από την άλλη πλευρά η επιλογή της παραμέτρου m όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-23 επηρεάζει τόσο την ταχύτητα

σύγκλισης όσο και την ακρίβεια της τελικής λύσης (συμπέρασμα αναμενόμενο καθώς ουσιαστικά αντιστοιχεί στην ελαστικότητα τήρησης των τοπικών περιορισμών κάθε κόμβου).

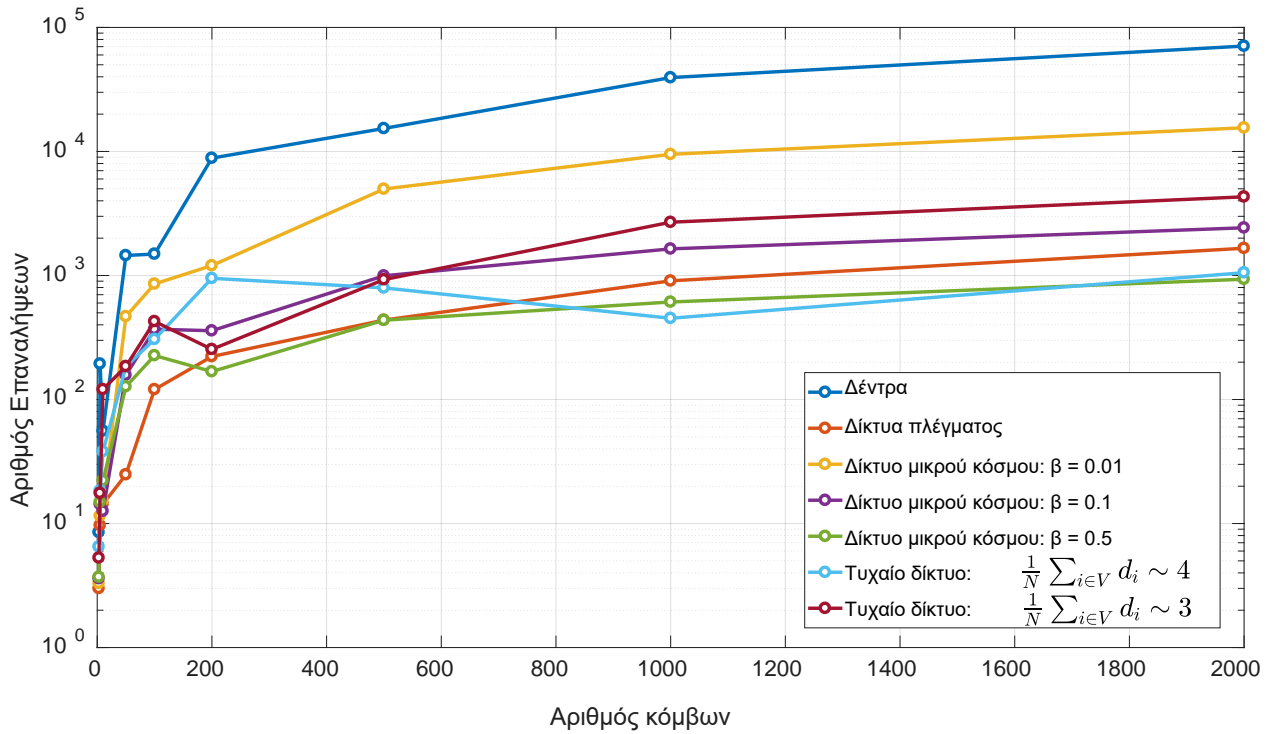


Σχήμα 3-23 Σφάλμα και ταχύτητα σύγκλισης του μοντέλου TEK για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου m .

Στη συνέχεια, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση του τύπου τοπολογίας αλλά και του αριθμού κόμβων στην ταχύτητα σύγκλισης, θεωρούνται τέσσερις βασικοί τύποι τοπολογίας για κάθε έναν από τους οποίους παράγονται τυχαία δίκτυα κατασκευάζοντας κάθε φορά μη κατευθυνόμενους συνεκτικούς γράφους με διαφορετικό αριθμό κόμβων σύμφωνα με τη μέθοδο Monte Carlo. Οι τοπολογίες του ίδιου τύπου παρότι τυχαίες παράγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να πληρούν συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 3-24, (a)), παράχθηκαν τυχαία δέντρα, με το σκεπτικό ότι το $\Delta\Delta$ λειτουργούν σε μεγάλη πλειοψηφία σε ακτινική δομή (οι γράφοι της ηλεκτρικής τοπολογίας τους δηλαδή, αντιστοιχούν σε δέντρα). Ο δεύτερος τύπος τοπολογίας αναφέρεται σε δίκτυο πλέγματος (mesh networks), τα οποία χρησιμοποιούνται στην πράξη για την μοντελοποίηση δικτύων κατανομής γεωγραφικά κόμβων (όπως π.χ. τα ασύρματα κυψελοειδή δίκτυα επικοινωνίας) (Σχήμα 3-24, (b)). Στη συνέχεια, παράχθηκαν τυχαία δίκτυα που εμφανίζουν χαρακτηριστικά των λεγόμενων δικτύων μικρού κόσμου (small world networks) (Σχήμα 3-24, (c)). Ιδιότητες από αυτά τα δίκτυα απαντώνται σε διάφορα φαινόμενα του πραγματικού κόσμου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα δικτύου μικρού κόσμου είναι οι γράφοι που χαρακτηρίζουν της αλληλεπιδράσεις των ατόμων στα κοινωνικά δίκτυα. Τα δίκτυα αυτά παράχθηκαν με βάση τη μέθοδο των Watts και Strogatz για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου β . Τέλος, εξετάστηκαν τυχαία μη κατευθυνόμενα συνεκτικά δίκτυα (Σχήμα 3-24, (d)) τα οποία παράχθηκαν ορίζοντας την πιθανότητα ύπαρξης ή όχι ζεύξης μεταξύ 2 κόμβων με τέτοιο τρόπο ώστε να ρυθμίζεται κατάλληλα ο μέσος όρος των βαθμών των κόμβων ($\frac{1}{N} \sum_{i \in V} d_i$).



Σχήμα 3-24 Οι τέσσερις βασικοί τύποι τοπολογίας που θεωρήθηκαν για την παραγωγή τυχαίων γράφων (πάνω) και η απεικόνιση των μη μηδενικών στοιχείων των αντίστοιχών τους πινάκων γειτνίασης (sparsity pattern) (κάτω): (a) δέντρο, (b) δίκτυο πλέγματος (mesh network), (c) δίκτυο μικρού κόσμου (small world) και (d) τυχαίο δίκτυο.

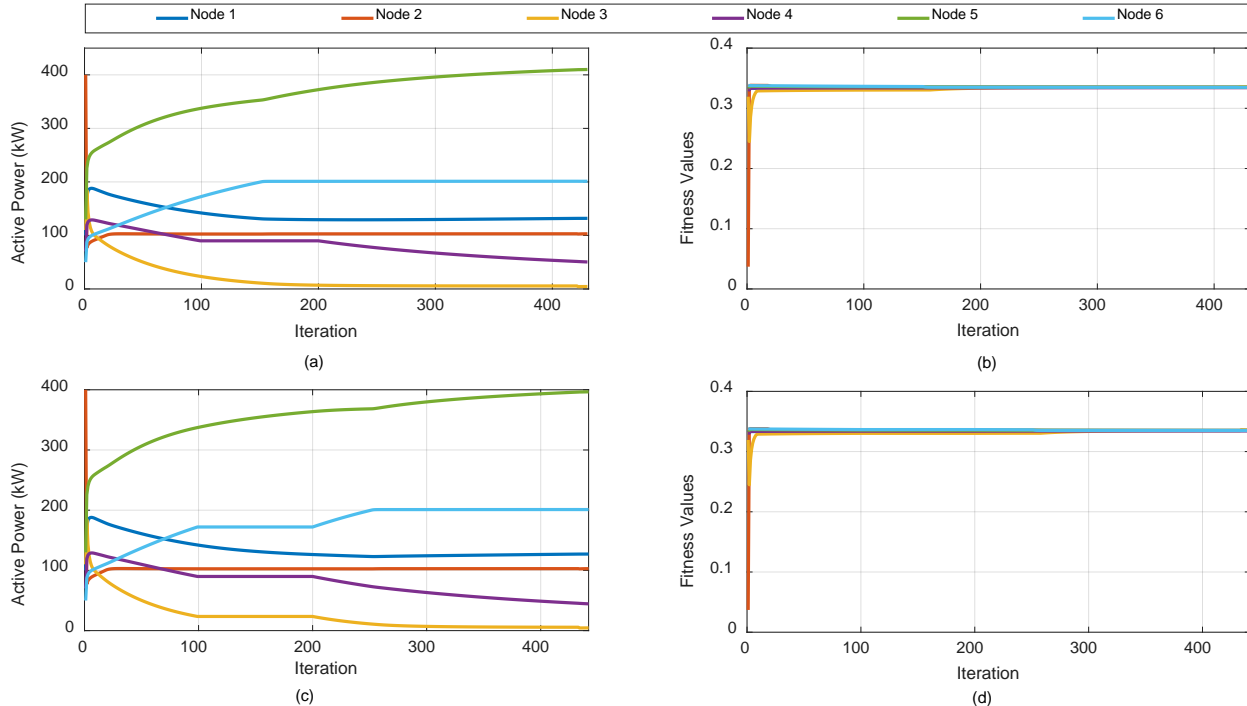


Σχήμα 3-25 Απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων για δίκτυα με διαφορετικά χαρακτηριστικά και αριθμό κόμβων.

Στο Σχήμα 3-25 δίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όπου μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα δίκτυα πλέγματος, τα δίκτυα μικρού κόσμου με την μεγαλύτερη παράμετρο β και τα τυχαία δίκτυα με μέσο όρο βαθμών κόμβων $\frac{1}{N} \sum_{i \in V} d_i \sim 4$, εμφανίζουν την καλύτερη συμπεριφορά. Ενδιαφέρον, έχει το γεγονός ότι για αυτές τις τοπολογίες, ένας διπλασιασμός στο μέγεθος του προβλήματος (στην πολυπλοκότητα δηλαδή), από κάποιο σημείο και έπειτα επιφέρει μικρή μόνο αύξηση στον απαιτούμενο αριθμό επαναλήψεων του προβλήματος ο οποίος σχετίζεται βέβαια και με τον απαιτούμενο χρόνο επίλυσης.

3.6.9. Διερεύνηση της μεθόδου σε περίπτωση που χαθεί η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ των κόμβων

Στην περίπτωση που χαθεί η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ 2 ή περισσότερων κόμβων, οι κόμβοι θα διατηρούν σταθερές τις τελευταίες τιμές που έλαβαν από τους γείτονες με τους οποίους διακόπηκε η επικοινωνία μέχρι την επίλυση του προβλήματος και την επαναφορά της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης. Παράλληλα, συνεχίζουν τις επαναλήψεις του κατανεμημένου μοντέλου TEK για το οποίο θα εξακολουθούν να ισχύουν οι ιδιότητες που αναφέρονται στην ενότητα 3.2.3 με αποτέλεσμα μετά την επίλυση του τηλεπικοινωνιακού προβλήματος και την επαναφορά των ζεύξεων, ο αλγόριθμος να συγκλίνει στη βέλτιστη λύση. Κάποια σχετικά σενάρια προσομοιώθηκαν καταργώντας την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ κάποιων κόμβων με τυχαίο τρόπο και επαναφέροντάς την μετά από συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων.



Σχήμα 3-26 Αποτελέσματα της κατανεμημένης μεθόδου για το $\Delta\Delta$ 6 ζυγών σε περίπτωση απωλειών τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων (α) Ενεργός ισχύς κάθε μονάδας (απώλεια ενός κόμβου), (β) Τιμές ευημερίας κάθε μονάδας και μέση ευημερία (απώλεια των μισών κόμβου), (γ) Ενεργός ισχύς κάθε

μονάδας (απώλεια ενός κόμβου), (d Τιμές ευημερίας κάθε μονάδας και μέση ευημερία (απώλεια των μισών κόμβου).

Τα αποτελέσματα αυτών των σεναρίων παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα όπου για την περίπτωση απώλειας ενός, των μισών και όλων των κόμβων (περίπτωση μεγάλης διάρκειας), η διάρκεια της διακοπής των τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων τέθηκε εμπειρικά στις 100 επαναλήψεις ενώ στο σενάριο απώλειας όλων των κόμβων για μικρή διάρκεια, ο ίδιος αριθμός τέθηκε στις 50 επαναλήψεις. Στο Σχήμα 3-26 απεικονίζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου TEK για δύο σενάρια (απώλεια ενός κόμβου και των μισών κόμβων).

Πίνακας 3-6 Αριθμός επαναλήψεων για διάφορα σενάρια απώλειας τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων μεταξύ των κόμβων.

Μελέτη	Απώλεια 1 κόμβου	Απώλεια $\sim N/2$ κόμβων	Απώλεια όλων των κόμβων	
			(μικρή διάρκεια)	(μεγάλη διάρκεια)
	Αριθμός επαναλήψεων			
Σύστημα 6 κόμβων	431	442	401	451
Πρότυπο σύστημα 123 κόμβων	361	400	412	461

3.7. Σύνοψη και συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, αναπτύχθηκαν καινοτόμες κατανεμημένες μέθοδοι βελτιστοποίησης για εφαρμογές του προβλήματος Οικονομικής ΚΦ για ευφυή ΔΔ. Οι προτεινόμενες μέθοδοι βασίζονται στο μοντέλο Τοπικών Εξισώσεων Κλωνωτή (TEK), το οποίο είναι κατάλληλο για την επίλυση προβλημάτων κατανομής πόρων σε αρχιτεκτονικές κατανεμημένης επικοινωνίας. Οι μέθοδοι απαιτούν ανταλλαγή πληροφοριών μόνο μεταξύ ομότιμων κόμβων του συστήματος και επιτυγχάνουν τη βέλτιστη λύση χωρίς τη ανάγκη ύπαρξης κεντρικού συντονισμού.

Ο πρώτος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στοχεύει στην επίλυση του προβλήματος Οικονομικής ΚΦ λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους τοπικούς ανισωτικούς περιορισμούς των μονάδων (δηλαδή τα τεχνικά τους όρια) καθώς επίσης και τον εξισωτικό περιορισμό κάλυψης φορτίου. Ο δεύτερος αλγόριθμος αντιμετωπίζει και τη συμφόρηση των γραμμών (για ακτινικά δίκτυα μόνο). Ο τελικός αλγόριθμος ενσωματώνει με βέλτιστο τρόπο και τις απώλειες ενεργού ισχύος μέσω του κατανεμημένου υπολογισμού των Συντελεστών Ποινής Απωλειών (ΣΠΑ) κάθε μονάδας.

Η ακρίβεια των μεθόδων που αναπτύχθηκαν διερευνήθηκε με μια σειρά σεναρίων. Ο πρώτος αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε ένα απλοποιημένο ΔΔ το οποίο διαθέτει 5 μονάδες ΔΠ και στη συνέχεια σε ένα τμήμα του ελληνικού ΔΔ, στην περιοχή της Σπερχειάδας (γραμμή P25) για το οποίο εξετάστηκε και η συμφόρηση των γραμμών λόγω της υψηλής διείδυσης μονάδων ΔΠ. Ο τρίτος αλγόριθμος για την ενσωμάτωση των απωλειών ενεργού ισχύος

εφαρμόστηκε σε ένα απλοποιημένο δίκτυο διανομής 6 κόμβων και στη συνέχεια σε πρότυπο ΔΔ της IEEE 123 ζυγών το οποίο τροποποιήθηκε έτσι ώστε να εμφανίζει αυξημένη διείσδυση μονάδων ΔΠ.

Οι προτεινόμενες μέθοδοι βρίσκουν τη βέλτιστη λύση με αμελητέο σφάλμα, σε σύγκριση με μια συμβατική μέθοδο κεντρικής βελτιστοποίησης. Επίσης, συγκρίνοντας τις προσομοιώσεις σε διαφορετικά δίκτυα προκύπτει ότι εμφανίζουν επεκτάσιμη συμπεριφορά αφού ο αριθμός των απαιτούμενων επαναλήψεων για προβλήματα με διαφορετική πολυπλοκότητα είναι αρκετά κοντινός καθώς επίσης χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα της «τοποθέτησης και άμεσης λειτουργίας». Τέλος εξετάστηκε η επίδραση που έχουν στην ταχύτητα σύγκλισης οι παράμετροι του μοντέλου, οι διαφορετικές τοπολογίες επικοινωνίας καθώς και ο αριθμός κόμβων του δικτύου καθώς επίσης διερευνήθηκε η ανεκτικότητα της μεθόδου σε περιπτώσεις που χαθεί η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων.

Κεφάλαιο 4

Κατανεμημένη ροή φορτίου

4.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, αναπτύσσεται μέθοδος για την κατανεμημένη επίλυση της ροής φορτίου. Ένα τέτοιο εργαλείο για το επίπεδο της διανομής μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες στον διαχειριστή του δικτύου καθώς μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα της ροής φορτίου χωρίς να χρειάζεται να συγκεντρώσει όλες τις απαιτούμενες μετρήσεις σε έναν κεντρικό σημείο [137]. Επιπλέον, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για άλλες αποκεντρωμένες εφαρμογές ευφών δικτύων, όπως η κατανεμημένη εκτίμηση κατάστασης, ο κατανεμημένος έλεγχος τάσης, η βέλτιστη ροή φορτίου κ.ά. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που πρέπει να ληφθούν κάποιες αποφάσεις σχετικά με τη διαχείριση της παραγωγής από μονάδες ΔΠ ή του φορτίου σε τοπικό επίπεδο προκειμένου να αντιμετωπιστεί κάποιο πρόβλημα, πραγματοποιώντας μια κατανεμημένη ροή φορτίου, θα μπορούσε να αξιολογηθεί ο αντίκτυπος συγκεκριμένων ενεργειών πριν αυτές εφαρμοστούν.

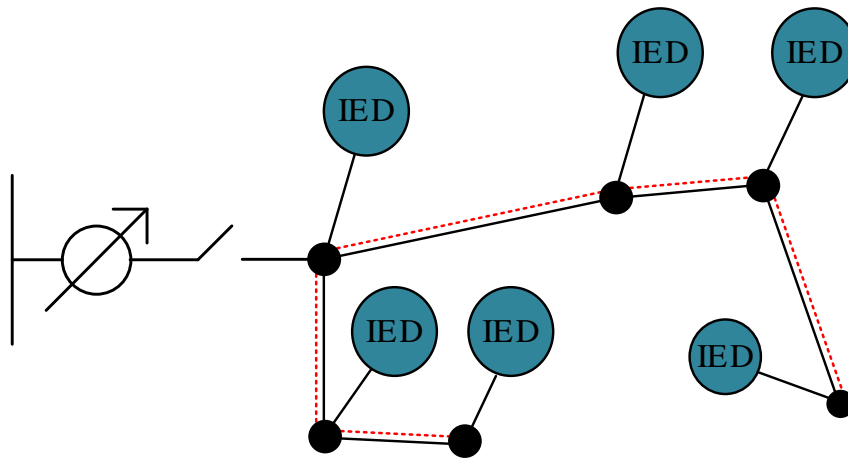
Η προτεινόμενη μέθοδος επιτρέπει τον υπολογισμό των ροών φορτίου χρησιμοποιώντας μόνο τοπικές μετρήσεις και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ ηλεκτρικών γειτόνων. Για την επίλυση, χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson, σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο κυρτής βελτιστοποίησης. Η μέθοδος αξιοποιεί τις ιδιότητες της Ιακωβιανής μήτρας των εξισώσεων ροής φορτίου και υπολογίζει με πλήρως κατανεμημένο τρόπο τη λύση στο πρόβλημα ροής φορτίου, παρακάμπτοντας την αντιστροφή της Ιακωβιανής. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι επεκτάσιμος, δεν απαιτεί κεντρικό συντονισμό και παρουσιάζει τη δυνατότητα της «τοποθέτησης και άμεσης λειτουργίας» σε περιπτώσεις επαναδιαμόρφωσης του δικτύου, καθώς απαιτεί μόνο ανταλλαγή τοπικών πληροφοριών και τη γνώση των σύνθετων αντιστάσεων των γραμμών που συνδέουν τους κόμβους.

4.2. Διατύπωση του προβλήματος

Ο σκοπός της επίλυσης των εξισώσεων ροής φορτίου (ΡΦ) είναι η εύρεση μια λύσης τάσεων, ρευμάτων και ροών πραγματικής και αέργου ισχύος σε κάθε ζυγό του δικτύου δεδομένου ενός συνόλου φορτίων και μονάδων παραγωγής.

4.2.1. Μοντελοποίηση του δικτύου και παραδοχές

Αντίστοιχα με τις προηγούμενες ενότητες, το ηλεκτρικό δίκτυο αναπαρίσταται από ένα γράφο $\mathcal{G}_1 \triangleq (\mathcal{N}_1, \mathcal{E}_1)$ και το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο από ένα δεύτερο γράφο \mathcal{G}_2 (βλέπε Σχήμα 4-1). Για λόγους απλότητας, όλοι οι κόμβοι εκτός από τον ζυγό αναφοράς επιλέγονται έτσι ως ζυγοί PQ. Αυτή η παραδοχή έχει νόημα για τους σκοπούς του υπολογισμού της ροής φορτίου στα δίκτυα διανομής θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν γεννήτριες που ρυθμίζουν αυτόματα την τάση. Μια επιπλέον παραδοχή που γίνεται για την προτεινόμενη μέθοδο είναι ότι ο γράφος επικοινωνίας \mathcal{G}_2 συμπίπτει με το γράφο που αντιπροσωπεύει το ηλεκτρικό δίκτυο, δηλαδή οι ηλεκτρικοί γείτονες είναι σε θέση να ανταλλάσσουν πληροφορίες.



Σχήμα 4-1 Αναπαράσταση του δικτύου διανομής, κάθε κόμβος θεωρείται ότι είναι εφοδιασμένος με μια ΕΗΣ, οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις.

Έστω N ο αριθμός των ηλεκτρικών κόμβων του δικτύου και $Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}$ το στοιχείο ij της μήτρας αγωγιμοτήτων. Κάθε κόμβος θεωρείται ότι είναι εφοδιασμένος με μία ΕΗΣ, ικανή να μετράει την καθαρή ενεργό P_i και άεργο ισχύ Q_i που εισάγεται στον κόμβο. Θέτοντας $\varphi_{ij} = \theta_{ij} - \delta_j + \delta_i$, η πολική μορφή των εξισώσεων ροής ισχύος για την καθαρή ενεργό και άεργο ισχύ P_i, Q_i , που εισέρχονται στο δίκτυο στον κόμβο i δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
 P_i &= \sum_{n=1}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| \cos(\varphi_{ij}) \\
 Q_i &= - \sum_{n=1}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| \sin(\varphi_{ij})
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

4.2.2. Η μέθοδος Newton-Raphson για την επίλυση της ροής φορτίου

Η βασική ιδέα για την εφαρμογή της μεθόδου Newton-Raphson στο πρόβλημα της ροής φορτίου βασίζεται στην χρήση του αναπτύγματος Taylor για μια συνάρτηση πολλαπλών μεταβλητών. Θεωρώντας ένα σύνολο n μη γραμμικών εξισώσεων οι οποίες εξαρτώνται από n μεταβλητές x_1, x_2, \dots, x_n :

$$\begin{aligned} f_1(x_1, \dots, x_n) &= \eta_1 \\ f_2(x_1, \dots, x_n) &= \eta_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, \dots, x_n) &= \eta_n \end{aligned} \quad (4.2)$$

Για την επίλυση του παραπάνω συστήματος, υπολογίζεται η Ιακωβιανή μήτρα των εξισώσεων (4.2) και στη συνέχεια επιλύεται το σύστημα:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1^k, \dots, x_n^k) \\ \vdots \\ f_n(x_1^k, \dots, x_n^k) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{x_1^k} & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_{x_n^k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_{x_1^k} & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_{x_n^k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^k \\ \vdots \\ \Delta x_n^k \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Στη συνέχεια, η εξίσωση ανανέωσης για κάθε μεταβλητή εκφράζεται ως:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \Delta x_i^k \quad (4.4)$$

Και οι επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρις ότου η υπολογιζόμενη τιμή Δx_i^k να βρίσκεται εντός ενός ορίου ανοχής.

Για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου με τη χρήση της προαναφερθείσας μεθοδολογίας, διατυπώνονται οι εξισώσεις απόκλισης ενεργού και αέργου ισχύος (active and reactive power mismatch) [125]:

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_{i,s} - P_i \\ \Delta Q_i &= Q_{i,s} - Q_i \end{aligned} \quad (4.5)$$

όπου $P_{i,s}$ και $Q_{i,s}$ είναι η καθαρή προγραμματισμένη ενεργός και άεργος ισχύς που εισάγεται στον κόμβο αντίστοιχα, δηλ.: $P_{i,s} = P_{gi} - P_{di}$ και $Q_{i,s} = Q_{gi} - Q_{di}$, με P_{gi} , Q_{gi} η ενεργός και η άεργος παραγωγή και P_{di} , Q_{di} το ενεργό και το άεργο φορτίο. Στη συνέχεια υπολογίζεται η επόμενη έκφραση:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = -J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V|/|V| \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Όπου J η Ιακωβιανή μήτρα των εξισώσεων (4.5). Οι εξισώσεις ανανέωσης των τάσεων και των γωνιών των κόμβων δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} V_i^{k+1} &= V_i^k + \Delta V_i^k \\ \theta_i^{k+1} &= \theta_i^k + \Delta \theta_i^k \end{aligned} \quad (4.7)$$

έως ότου ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης:

$$\begin{aligned} \max|\Delta V| &< \varepsilon_1 \\ \max|\Delta\theta| &< \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Προκειμένου να υπολογιστούν οι διορθώσεις των τάσεων και των γωνιών από την επίλυση του συστήματος (4.6), απαιτείται η αντιστροφή της Ιακωβιανής μήτρας J :

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta|V|/|V| \end{bmatrix} = -J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Ωστόσο, ο υπολογισμός της έκφρασης (4.9) απαιτεί τη συγκέντρωση πληροφορίας από όλους τους κόμβους του δικτύου. Στη συνέχεια, περιγράφεται μια εναλλακτική προσέγγιση που ξεπερνά αυτόν τον περιορισμό και είναι σε θέση να επιτύχει μια πλήρως κατανεμημένη επίλυση.

4.2.3. Κατανεμημένος υπολογισμός των διορθώσεων τάσης και γωνίας

Έστω N_i το σύνολο που περιέχει του γείτονες του κόμβου i :

$$N_i = \{j : (i, j) \in G_1\} \quad (4.10)$$

Μέχρι τον τερματισμό του αλγόριθμου ροής φορτίου και για κάθε ανανέωση των τιμών των τάσεων και γωνιών χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.7), κάθε κόμβος πρέπει να γνωρίζει τις τιμές διόρθωσης ΔV_i^k και $\Delta\theta_i^k$. Για να επιτύχουμε μια πλήρως κατανεμημένη λύση χωρίς την αντιστροφή της Ιακωβιανής μήτρας, προτείνεται η επίλυση του συστήματος των $2(N-1)$ γραμμικών εξισώσεων χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

Για να καταδειχθεί η δυνατότητα εφαρμογής αυτής της ιδέας, αναλύεται μια πολύ σημαντική ιδιότητα της Ιακωβιανής μήτρας. Όπως συζητήθηκε και στην ενότητα 3.5.2, η Ιακωβιανή μήτρα J (κάθε ένας από τους 4 τετραγωνικούς υποπίνακες που τη συνθέτουν σε αυτήν την περίπτωση) ακολουθεί την ίδια δομή με τη μήτρα αγωγιμοτήτων με την έννοια ότι το στοιχείο $(i-1, j-1)$ κάθε υποπίνακα της J θα είναι μη μηδενικό εάν και μόνο εάν οι κόμβοι i και j συνδέονται ηλεκτρικά. Ορίζοντας $x_i = \Delta\delta_i$ και $y_i = \Delta|V_i|/|V_i|$, οι δύο εξισώσεις που αντιστοιχούν στον κόμβο i από το σύνολο των $2(N-1)$ εξισώσεων έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned} J_{(i-1)(i-1)}x_i + \sum_{j \in N_i} J_{(i-1)(j-1)}x_j + \\ J_{(i-1)(N-1)}y_i + \sum_{j \in N_i} J_{(i-1)(N+j-2)}y_j = -\Delta P_i \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} J_{(N+i-2)(i-1)}x_i + \sum_{j \in N_i} J_{(N+i-2)(j-1)}x_j + \\ J_{(N+i-2)(N-1)}y_i + \sum_{j \in N_i} J_{(N+i-2)(N+j-2)}y_j = -\Delta Q_i \end{aligned} \quad (4.12)$$

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (4.11) και (4.12), όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για ένα συγκεκριμένο κόμβο είτε είναι άμεσα διαθέσιμες από τοπικές μετρήσεις είτε έμμεσα από τους ηλεκτρικούς γείτονές του. Έτσι, οι γραμμικές εξισώσεις (4.11), (4.12) παρέχουν τα x_i, y_i ως ένα γραμμικό συνδυασμό τοπικών και γειτονικών μεταβλητών κατάστασης. Χρησιμοποιώντας αυτή την ιδιότητα, μπορεί να αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος κυρτής βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό των x_i, y_i για κάθε κόμβο του δικτύου, ως αποτέλεσμα της επίλυσης του συστήματος γραμμικών εξισώσεων:

$$A \cdot \Psi = b \quad (4.13)$$

Με $A = J$, $\Psi = [\mathbf{x} \ \mathbf{y}]^T$ και $b = -[\Delta P \ \Delta Q]^T$.

Η λύση σε αυτό το γραμμικό σύστημα μπορεί να βρεθεί με την επίλυση του ακόλουθου κυρτού προβλήματος βελτιστοποίησης:

$$\begin{aligned} \min \|\Psi\|_2^2 \\ \tau. \omega.: A \cdot \Psi = b \end{aligned} \quad (4.14)$$

Η συνάρτηση Lagrange του προβλήματος (4.14) δίνεται από την εξίσωση:

$$A = \|\Psi\|_2^2 + \gamma(A \cdot \Psi - b) \quad (4.15)$$

όπου γ το διάνυσμα πολλαπλασιαστών Lagrange. Προκειμένου να υπολογιστεί η βέλτιστη τιμή (4.14), Ψ^* πρέπει να ισχύει:

$$\nabla A = 0 \Rightarrow \left. \begin{aligned} \nabla A_{\Psi} = 0 \\ \nabla A_{\gamma} = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} -2\Psi - A^T \gamma = 0 \\ A\Psi - b = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

Για την εύρεση της βέλτιστης τιμής χρησιμοποιείται ο παρακάτω κανόνας ανανέωσης (σύστημα διακριτού χρόνου) που αντιστοιχεί στο συνεχές σύστημα το οποίο προτείνεται στη μελέτη [138] για την βελτιστοποίηση της (4.15):

$$\begin{aligned} \Psi(\kappa + 1) &= (1 - 2\beta) \cdot \Psi(\kappa) - \beta \cdot A \cdot \gamma(\kappa) \\ \gamma(\kappa + 1) &= \gamma(\kappa) - \beta \cdot (A \cdot \Psi(\kappa) - b) \end{aligned} \quad (4.17)$$

όπου β , θετική σταθερά.

Ο κανόνας ανανέωσης (4.17) είναι καταναμημένος αφού κάθε κόμβος υπολογίζει επαναληπτικά τις μεταβλητές Ψ_{x_i}, Ψ_{y_i} καθώς επίσης και τις δυϊκές μεταβλητές που τους αντιστοιχούν $\gamma_{x_i}, \gamma_{y_i}$, χρησιμοποιώντας ένα σταθμισμένο άθροισμα των παραμέτρων που λαμβάνουν από τη γειτονιά τους.

Επιπλέον, όπως αποδεικνύεται στη μελέτη [138], εάν ισχύει $0 < \beta < \min\{1, \frac{2}{\sigma_{max}^2}\}$, με σ_{max}^2 τη μεγαλύτερη μη μηδενική ιδιοτιμή του πίνακα $A^T \cdot A$, τότε το καταναμημένο πρωτόκολλο (4.17) συγκλίνει εκθετικά στις βέλτιστες τιμές Ψ^* και γ^* .

4.3. Κατανεμημένος αλγόριθμος ροής φορτίου

Όταν απαιτείται, ο κατανεμημένος αλγόριθμος ενεργοποιείται από το διαχειριστή του δικτύου (εναλλακτικά από κάποιον κόμβο) με την ανταλλαγή τοπικών μηνυμάτων, τα οποία μεταδίδονται σε όλο το δίκτυο. Στη συνέχεια, κάθε κόμβος στο δίκτυο υιοθετεί την τοπική στρατηγική που περιγράφεται στη συνέχεια. Θεωρείται ότι οι κόμβοι είναι σε θέση να μετρήσουν την ενεργό και άεργο ισχύ τους. Επίσης, η σύνθετη αντίσταση μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων θεωρείται γνωστή. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό κάθε κόμβος να υπολογίσει τους όρους της Ιακωβιανής μήτρας που αντιστοιχούν στις εξισώσεις (4.11) και (4.12) και στη συνέχεια να επιλύσει το κατανεμημένο πρωτόκολλο (4.17). Όταν έχουν υπολογιστεί οι διορθώσεις τάσης και γωνίας, κάθε κόμβος ενημερώνει τις μεταβλητές κατάστασής του και ελέγχει το κριτήριο σύγκλισης.

Αλγόριθμος 1: Κατανεμημένος υπολογισμός ροών φορτίου | Κόμβος i

1: Αρχικοποίηση

Ανάθεση: $P_{i,s}, Q_{i,s}$

/ Καθαρή προγραμματισμένη ενεργός και άεργος ισχύς */*

2: Επανάληψη:

3: Λήψη τοπικών μετρήσεων

4: Τοπική ανταλλαγή πληροφοριών

Αποστολή: x_i, y_i σε κάθε $j \in N_i$

Λήψη: x_j, y_j από κάθε $j \in N_i$

5: Υπολογισμός όρων Ιακωβιανής

6: Διατύπωση των εξ. (4.17)

7: Επανάληψη:

8: Επίλυση των εξ. (4.17) (εύρεση $\Psi_{x_i}^*, \Psi_{y_i}^*$)

9: Έως ότου $\|\Psi_i(k+1) - \Psi_i(k)\| < \varepsilon_1, \|\gamma_i(k+1) - \gamma_i(k)\| < \varepsilon_2$

10: Ανανέωση τάσης και γωνίας κόμβου και υπολογισμός αποκλίσεων ενεργού και άεργου ισχύος

11: Έως ότου: $\max |\Delta V_i| < \varepsilon_3$

$\max |\Delta \theta_i| < \varepsilon_4$

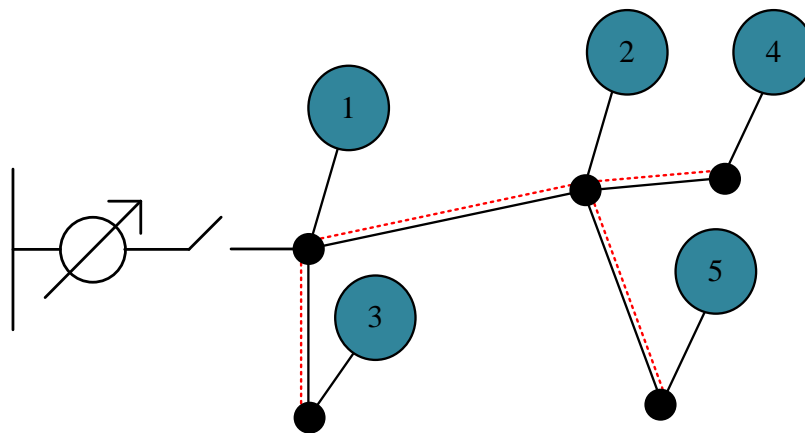
Ο τερματισμός του Αλγορίθμου 1 επιτυγχάνεται όταν τα μηνύματα μεταξύ γειτονικών κόμβων σταματούν να ανταλλάσσονται σε όλο το δίκτυο. Σε μια κατανεμημένη αρχιτεκτονική συντονισμού, όταν ένας κόμβος σταματά να λαμβάνει μηνύματα από τους γείτονές του και ταυτόχρονα οι παράμετροί του ικανοποιούν το κριτήριο τερματισμού, γνωρίζει ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει. Κάποια στιγμή, αναπόφευκτα όλοι οι κόμβοι του συστήματος θα έχουν συγκλίνει και συγχρονιστεί στην τελική λύση. Επιπλέον, η επιλογή των παραμέτρων ανοχής $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ και ε_4 , αποτελεί ένα ποιοτικό συμβιβασμό μεταξύ της ακρίβειας της μεθόδου και του συνολικού χρόνου σύγκλισης. Οι παράμετροι επελέγησαν μέσω εκτεταμένων σεναρίων προσομοίωσης, με σκοπό η προτεινόμενη μέθοδος να παρέχει αποτελέσματα με αποδεκτή ακρίβεια σε μικρό χρόνο σύγκλισης.

4.4. Εφαρμογές της μεθόδου και αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται μελέτες από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου πρώτα για έναν απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων και στη συνέχεια για ένα μεγαλύτερο σύστημα, το πρότυπο ΔΔ 34 ζυγών της IEEE.

4.4.1. Εφαρμογή σε απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων

Το απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων φαίνεται στο Σχήμα 4-2. Ο πρώτος κόμβος ορίζεται ως ζυγός αναφοράς και οι υπόλοιποι ζυγοί ως κόμβοι PQ (αριθμημένοι από 1 έως 5). Κάθε κόμβος θεωρείται ότι είναι σε θέση να επικοινωνήσει με τους γειτονικούς του κόμβους και να λάβει τοπικές μετρήσεις. Στον Πίνακα 4-1 δίνονται τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη δικτύου.



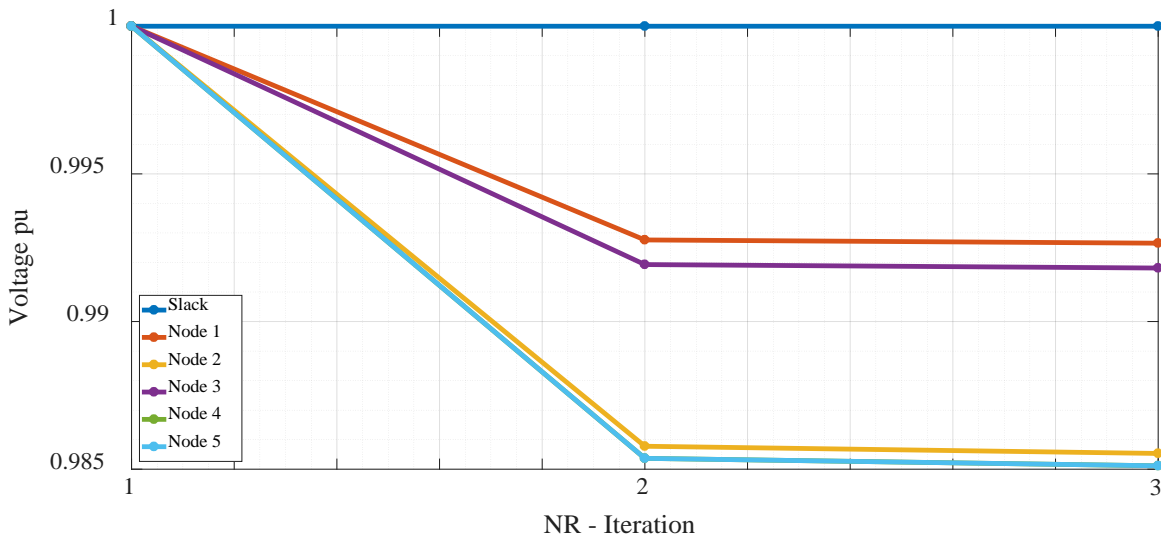
Σχήμα 4-2 Αναπαράσταση του απλοποιημένου ΔΔ 6 κόμβων.

Πίνακας 4-1 αρχικές τιμές ενεργού και αέργου φορτίου και αντίστασης και αντίδρασης γραμμών (δίνονται α.μ.).

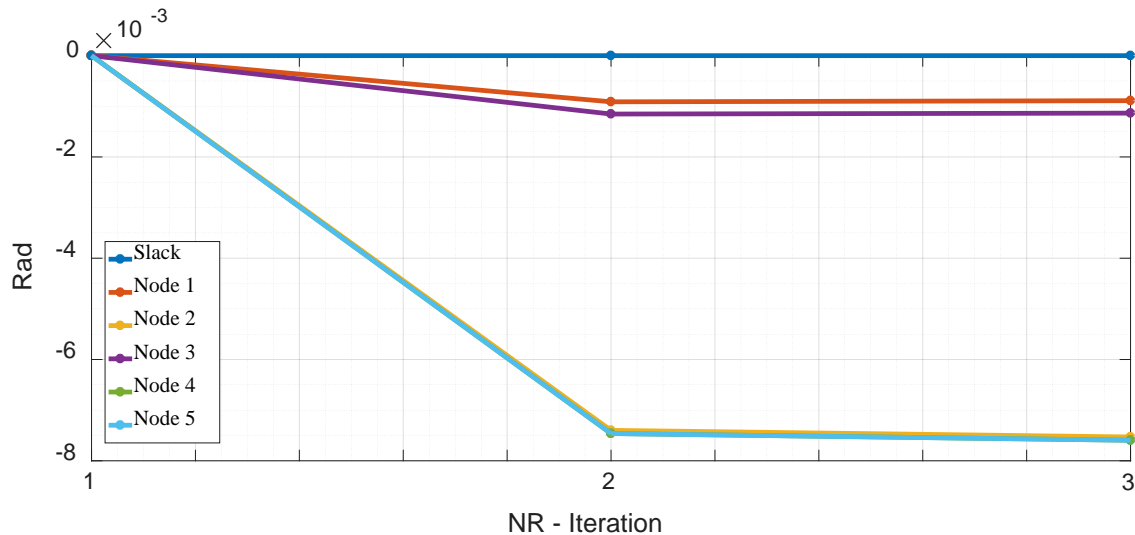
Ζυγός	$P_{i,s}$ (αμ)	$Q_{i,s}$ (αμ)	Γραμμή	R (αμ)	X (αμ)
Αναφοράς (0)					
1	0,0567	0,0416	0-1	0,030643	0,02443
2	0,451	0,258	1-2	0,020352	0,065311
3	0,133	0,0966	1-3	0,016199	0,0208
4	0,076	0,044	2-4	0,018386	0,014658
5	0,076	0,044	2-5	0,018386	0,014658

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αλγόριθμου ροής φορτίου. Στα δύο πρώτα σχήματα (Σχήμα 4-3 και Σχήμα 4-4), παρουσιάζονται οι επαναλήψεις της μεθόδου Newton-Raphson, όπου τα μέτρα και οι γωνίες τάσης ενημερώνονται με τις εξισώσεις (4.7). Από τις τρεις επαναλήψεις που απαιτούνται μέχρι τη σύγκλιση της μεθόδου και τον υπολογισμό της λύσης ροής φορτίου, πραγματοποιήθηκαν δύο ενημερώσεις στις

μεταβλητές κατάστασης (η πρώτη επανάληψη αντιστοιχεί στην αρχικοποίηση). Στα Σχήματα 4-5 έως 4-8, εμφανίζεται ο καταναμημένος υπολογισμός των διορθώσεων γωνιών και τάσεων ($\Delta\theta_i^k$ και ΔV_i^k), δηλ. οι επαναλήψεις του διακριτού συστήματος (4.17), που επίλυει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης (4.14). Για τις δύο ενημερώσεις που έγιναν, πρακτικά λύνονται δύο προβλήματα βελτιστοποίησης, η πρώτη επίλυση παρουσιάζεται στις επαναλήψεις 1 έως 119 ενώ η δεύτερη στις επαναλήψεις 120 έως 235. Στο Σχήμα 4-5 και στο Σχήμα 4-6, παρουσιάζονται οι πρωτεύουσες (Ψ_{x_i}) και οι δυικές (γ_{x_i}) τιμές του καταναμημένου υπολογισμού των δύο ενημερώσεων γωνίας αντίστοιχα. Παρόμοια, ο καταναμημένος υπολογισμός των ενημερώσεων τάσης (πρωτεύουσες - Ψ_{y_i} και δυικές - γ_{y_i} τιμές αντίστοιχα) δίνεται στο Σχήμα 4-7 και στο Σχήμα 4-8.

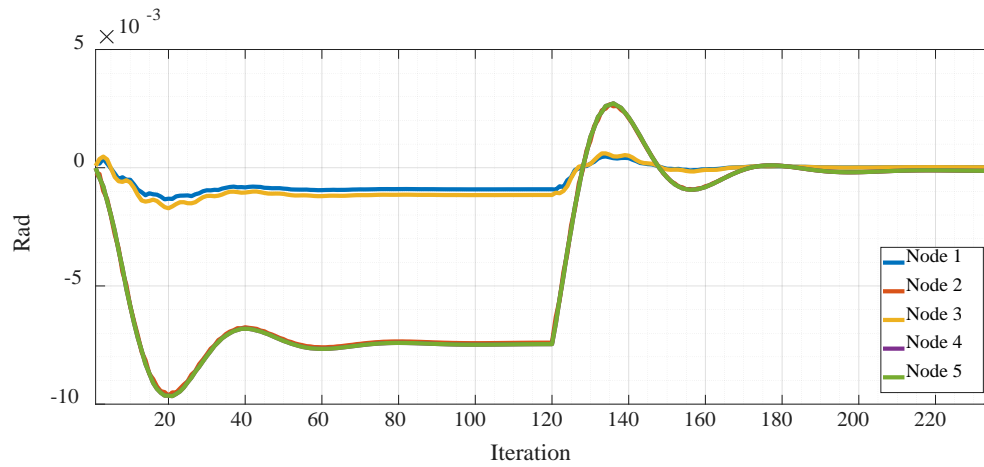


Σχήμα 4-3 Επαναλήψεις Newton-Raphson - ενημερώσεις στα μέτρα των τάσεων.

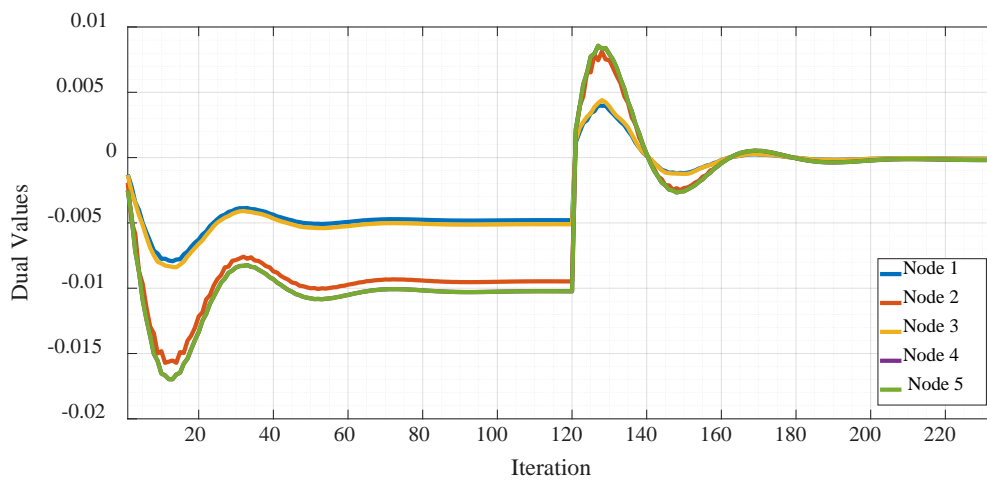


Σχήμα 4-4 Επαναλήψεις Newton-Raphson - ενημερώσεις των φασικών γωνιών.

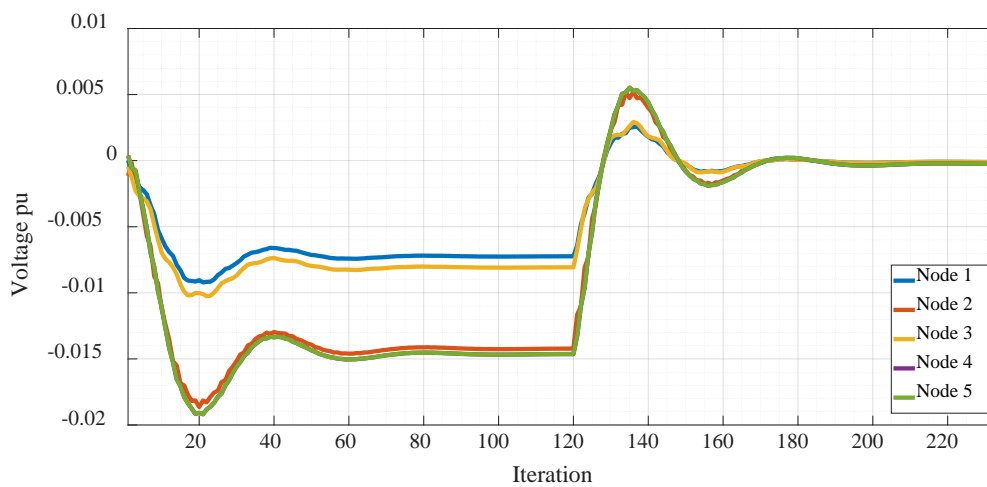
4.4. Εφαρμογές της μεθόδου και αποτελέσματα



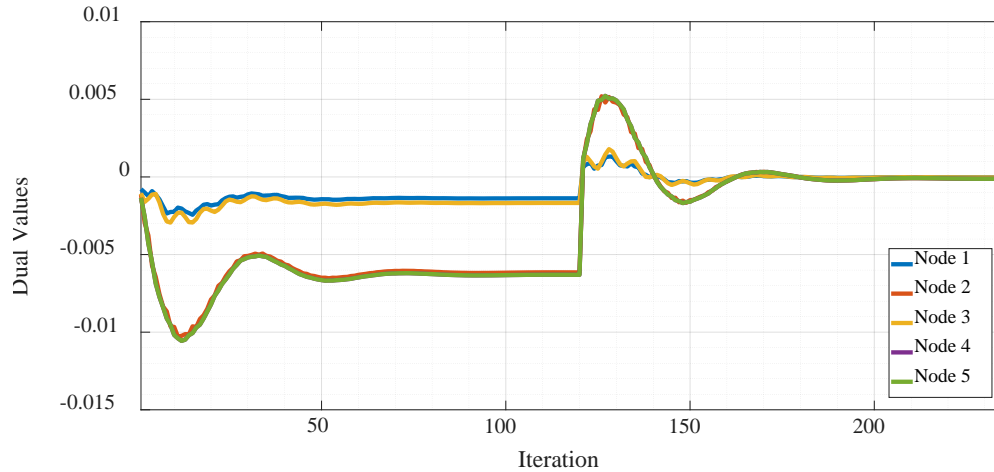
Σχήμα 4-5 Κατανεμημένος υπολογισμός των διορθώσεων γωνιών - πρωτεύουσες τιμές: Ψ_{x_i} .



Σχήμα 4-6 Κατανεμημένος υπολογισμός των διορθώσεων γωνιών - δεικές τιμές: γ_{x_i} .



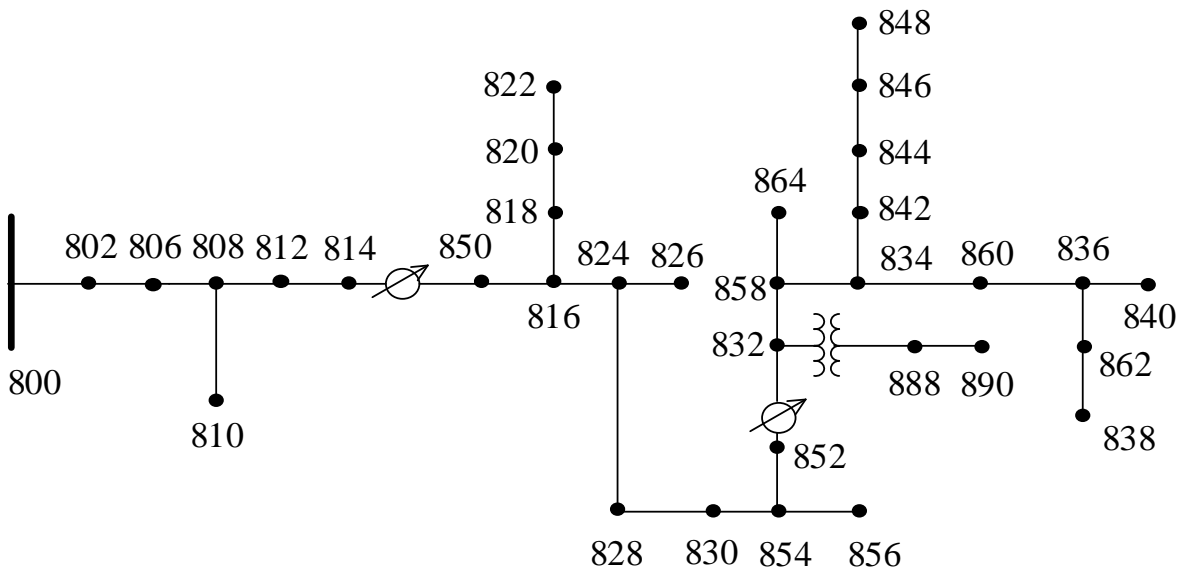
Σχήμα 4-7 Κατανεμημένος υπολογισμός των διορθώσεων τάσης - πρωτεύουσες τιμές: Ψ_{y_i} .



Σχήμα 4-8 Κατανεμημένος υπολογισμός των διορθώσεων τάσης - δυικές τιμές: γ_{y_i} .

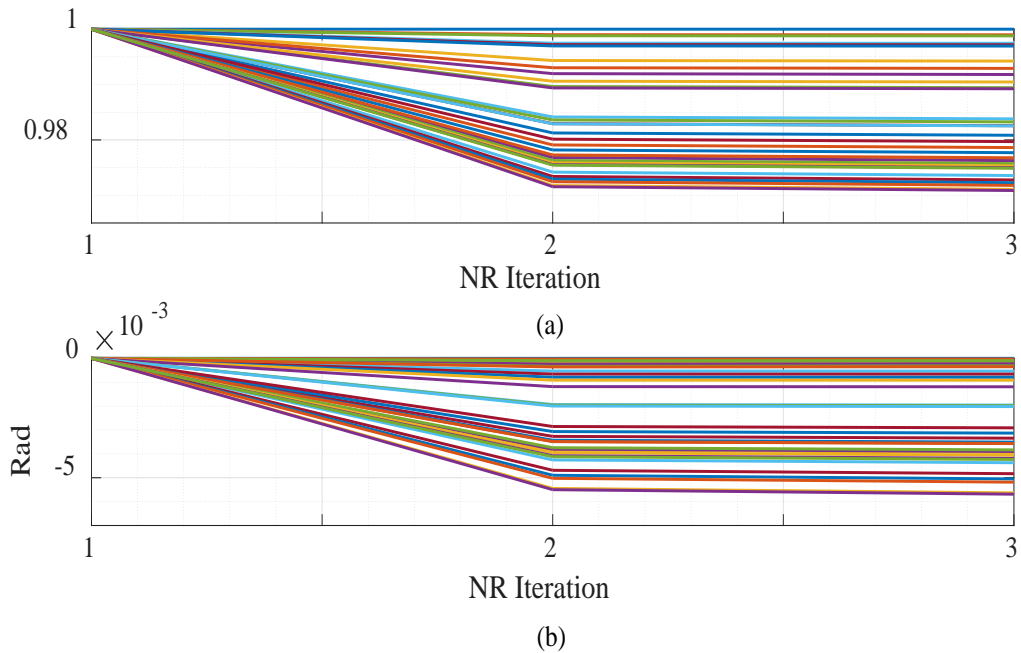
4.4.2. Πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 ζυγών

Σε αυτή την ενότητα δίνονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στο πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 ζυγών [139], το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4-9. Οι επαναλήψεις Newton-Raphson παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-10, ενώ οι επαναλήψεις των κατανεμημένων επιλύσεων της βελτιστοποίησης φαίνονται στο Σχήμα 4-11. Όπως παρατηρείται, οι απαιτούμενες ενημερώσεις στις μεταβλητές κατάστασης είναι επίσης δύο και σε αυτή τη περίπτωση, οδηγώντας στη διατύπωση και την κατανεμημένη επίλυση δύο προβλημάτων βελτιστοποίησης, η πρώτη παρουσιάζεται σε επαναλήψεις 1-2576 ενώ η δεύτερη στις επαναλήψεις 2576-3597 στο Σχήμα 4-11.

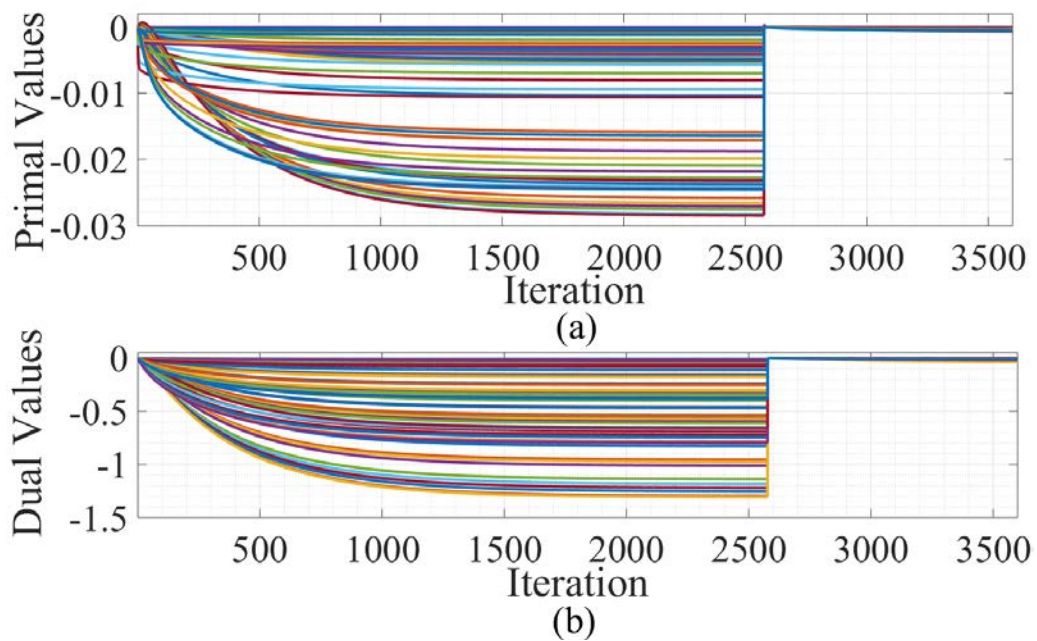


Σχήμα 4-9 Πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 ζυγών [139].

4.4. Εφαρμογές της μεθόδου και αποτελέσματα



Σχήμα 4-10 Επαναλήψεις Newton-Raphson: (a) ενημερώσεις στα μέτρα των τάσεων, (b) ενημερώσεις στις γωνίες των τάσεων.



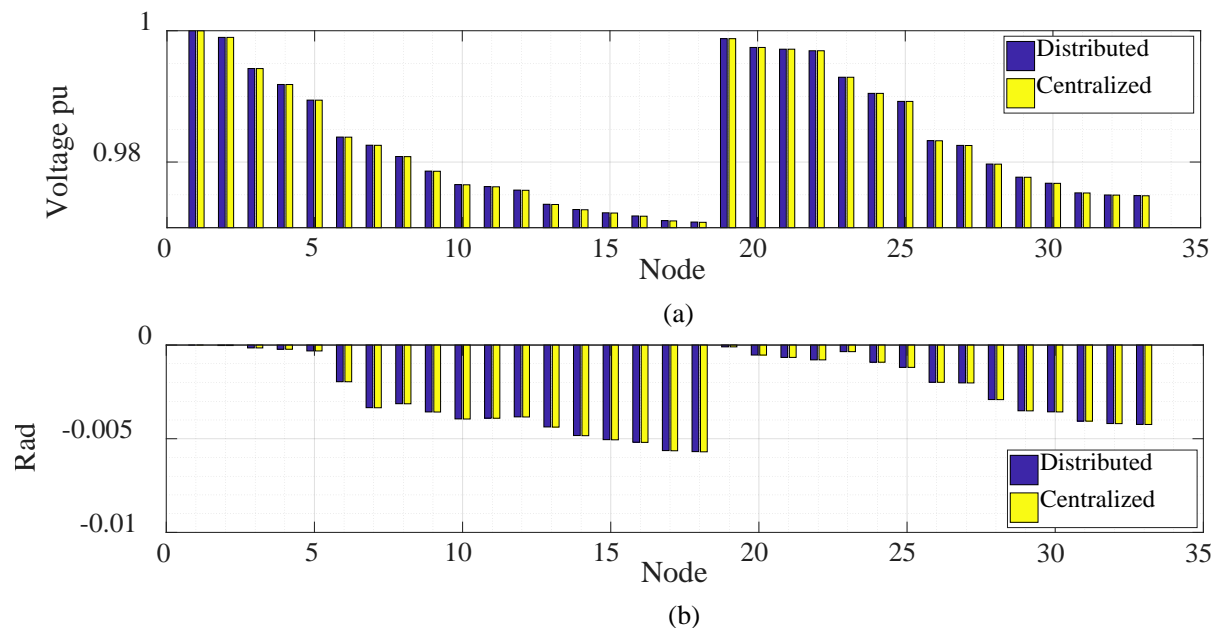
Σχήμα 4-11 Κατανεμημένος υπολογισμός διορθώσεων τάσεων και γωνιών: (a) πρωτεύουσες τιμές $-\Psi$, (b) δυϊκές τιμές $-\gamma$.

4.4.3. Σύγκριση με μέθοδο αναφοράς

Η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου διερευνήθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματά της με τις λύσεις ροής φορτίου που παράγονται από το λογισμικό Matpower [131]. Στο Σχήμα 4-12, τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων της προτεινόμενης και της μεθόδου αναφοράς συγκρίνονται για το σύστημα 6 ζυγών, το πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 ζυγών καθώς επίσης και για το πρότυπο ΔΔ της IEEE 123 ζυγών. Επιπλέον, στον Πίνακα 4-2 παρουσιάζονται τα μεσαία και μέγιστα σφάλματα στις υπολογισμένες τιμές μέτρων και γωνιών τάσεων. Στη συνέχεια διερευνάται η ακρίβεια της μεθόδου σε περίπτωση που οι γωνίες αμεληθούν από το μοντέλο ροής φορτίου.

Πίνακας 4-2 Ακρίβεια και απαιτούμενες επαναλήψεις της προτεινόμενης μεθόδου

Μελέτη	Μέσο σφάλμα (%)		Μέγιστο σφάλμα (%)		Αριθμός επαναλήψεων
	Μέτρο τάσης	Γωνία τάσης	Μέτρο τάσης	Γωνία τάσης	
Σύστημα 6 ζυγών	0,0008	0,0005	0,0761	0,0902	235
πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 ζυγών	0,0019	0,1111	0,0043	0,1683	3593
πρότυπο ΔΔ της IEEE 123 ζυγών	0,0082	0,4786	0,0125	0,5427	2043



Σχήμα 4-12 Σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με μέθοδο αναφοράς.

4.4.4. Σύγκριση της μεθόδου με μεθόδους διαθέσιμες στη βιβλιογραφία

Για τη εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η προτεινόμενη μέθοδος κατανεμημένης ροής φορτίου διενεργήθηκαν συγκρίσεις με μεθόδους της βιβλιογραφίας με τις οποίες επιλύεται το ίδιο πρόβλημα. Οι μέθοδοι οι οποίες επιλέχθηκαν παρουσιάζονται συνοπτικά και σχολιάζονται στη συνέχεια:

1) Η μέθοδος Gauss-Seidel. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο Gauss-Seidel στην επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου προκύπτει ο επόμενος κανόνας ανανέωσης ο οποίος υπολογίζει επαναληπτικά την τάση κάθε κόμβου [125]:

$$V_i^{(k)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_{i,s} - jQ_{i,s}}{V_i^{(k-1)*}} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^N Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right) \quad (4.18)$$

Όπως, μπορεί να παρατηρηθεί από την παραπάνω εξίσωση κάθε κόμβος για να υπολογίσει την τάση του χρειάζεται τοπικές πληροφορίες (ο πρώτος από τους τρεις όρους της παρένθεσης) καθώς και πληροφορίες διαθέσιμες από τους ηλεκτρικούς του γείτονες (ο δεύτερος και ο τρίτος όρος του αθροίσματος).

2) Η μέθοδος εμπρόσθιας-ανάστροφης σάρωσης (forward-backward sweep). Σε αυτήν την περίπτωση η ροή φορτίου επιλύεται επαναληπτικά χρησιμοποιώντας δύο σύνολα εξισώσεων. Το πρώτο σύνολο εξισώσεων (ανάστροφη σάρωση) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ροής στους κλάδους, ξεκινώντας από τα φύλλα του ηλεκτρικού δέντρου και προχωρώντας προς τους ανάντη κόμβους. Το άλλο σύνολο εξισώσεων (εμπρόσθια σάρωση) υπολογίζει τις τάσεις και τις γωνίες κάθε κόμβου ξεκινώντας από τη ρίζα (κόμβος αναφοράς) και προχωρώντας προς την κατόντη κόμβους μέχρι τα φύλλα. Στη βιβλιογραφία απαντώνται πολλές διαφοροποιήσεις και προεκτάσεις της μεθόδου [140], ωστόσο η κλασσική υλοποίηση της μεθόδου χρησιμοποιεί τα επόμενα σύνολα εξισώσεων:

$$\begin{aligned} P_i &= P'_{i+1} + r_j \frac{(P'_{i+1}{}^2 + Q'_{i+1}{}^2)}{V_{i+1}^2} \\ Q_i &= Q'_{i+1} + x_j \frac{(P'_{i+1}{}^2 + Q'_{i+1}{}^2)}{V_{i+1}^2} \end{aligned} \quad (4.19)$$

με $P'_{i+1} = P_{i+1} + P_{L_{i+1}}$ και $Q'_{i+1} = Q_{i+1} + Q_{L_{i+1}}$, $P_{L_{i+1}}$ και $Q_{L_{i+1}}$ το ενεργό και άεργο φορτίο του κόμβου i , P_{i+1} , Q_{i+1} την ενεργό και άεργο ροή που εξέρχεται από τον κόμβο $i + 1$ και r_j , x_j την αντίσταση και αντίδραση του κλάδου j (που συνδέει τους κόμβους i και $i + 1$). Ο υπολογισμός των τάσεων και των γωνιών δίνεται από τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} V_{i+1} &= \left[V_i^2 - 2(P_i r_j + Q_i x_j) + (r_j^2 + x_j^2) \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} \right]^{1/2} \\ \delta_{i+1} &= \delta_i + \tan^{-1} \frac{(P_i r_j + Q_i x_j)}{V_i^2 - (P_i r_j + Q_i x_j)} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Όπως προκύπτει από τις παραπάνω εκφράσεις, η μέθοδος εμπρόσθιας-ανάστροφης σάρωσης πληροί τους περιορισμούς τοπικής επικοινωνίας καθώς κάθε κόμβος μπορεί να εκτελέσει τους τοπικούς του υπολογισμούς λαμβάνοντας πληροφορίες από τους κατάντη και ανάντη κόμβους. Ωστόσο η μέθοδος δεν ανταποκρίνεται στους στόχους που έχουν τεθεί στην παρούσα διατριβή για μια πλήρως κατανεμημένη αρχιτεκτονική καθώς απαιτεί μια συγκεκριμένη ιεραρχία λόγω της διαδοχικά εμπρόσθιας και έπειτα της ανάστροφης σάρωσης ολόκληρου του δικτύου και συνεπώς δεν προσφέρει τα πλεονεκτήματα των κατανεμημένων μεθόδων όπως έχουν σχολιαστεί στο Κεφάλαιο 1.

2) Η μέθοδος η Μέθοδος Εναλλασσόμενης Κατεύθυνσης Πολλαπλασιαστών (*Alternating Direction Method of Multipliers - ADMM*), μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα κυρτής βελτιστοποίησης με εξισωτικούς περιορισμούς:

$$\begin{aligned} \min_{x \in X} f(x) \\ \text{τ.ω. } Ax = b \end{aligned} \quad (4.21)$$

Προκειμένου να εφαρμοστεί στο πρόβλημα ροής φορτίου (σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία) το πρόβλημα γράφεται:

$$\begin{aligned} \min \|x\|_1 \\ \text{τ.ω. } Ax = b \end{aligned} \quad (4.22)$$

θεωρώντας $A = J$, $x = [\Delta\theta \quad \Delta|V|/|V|]^T$ και $b = -[\Delta P \quad \Delta Q]^T$. Το πρόβλημα γράφεται ως εξής για πάρει την κατάλληλη μορφή για επίλυση σύμφωνα με τη μεθοδολογία ADMM:

$$\begin{aligned} \min f(x) + \|z\|_1 \\ \text{τ.ω. } x - z = 0 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Όπου η f είναι συνάρτηση δεικτής (indicator function) του $\{x \in \mathbb{R}^n \mid Ax = b\}$. Οι κανόνες ανανέωσης του αλγορίθμου ADMM προκύπτουν στη συνέχεια [141]:

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= \Pi(z^k - u^k) \\ z^{k+1} &= S_{1/\rho}(x^{k+1} + u^k) \\ u^{k+1} &= u^k + (x^{k+1} - z^{k+1}) \end{aligned} \quad (4.24)$$

Με την έκφραση Π να υποδηλώνει την προβολή στο σύνολο $\{x \in \mathbb{R}^n \mid Ax = b\}$, ο κανόνας ανανέωσης του x μπορεί να γραφτεί ρητά ως εξής:

$$x^{k+1} = (I - A^T(AA^T)^{-1}A)(z^k - u^k) + A^T(AA^T)^{-1}b \quad (4.25)$$

Ενώ η συνάρτηση $S_{1/\rho}$ αντιστοιχεί στη συνάρτηση συρρίκνωσης:

$$S_{1/\rho}(x) = \max(0, x - 1/\rho) - \max(0, -x - 1/\rho) \quad (4.26)$$

Από τους παραπάνω κανόνες ανανέωσης παρατηρείται ότι ο υπολογισμός x^{k+1} απαιτεί τη συγκέντρωση όλων των πληροφοριών του δικτύου και τη διεξαγωγή κεντρικού υπολογισμού ενώ ο υπολογισμός των z^{k+1} και u^{k+1} μπορεί να εκτελεστεί σε τοπικό επίπεδο. Η

4.4. Εφαρμογές της μεθόδου και αποτελέσματα

μέθοδος δηλαδή δεν πληροί τους περιορισμούς τοπικής επικοινωνίας για τον κανόνα ανανέωσης (4.25).

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν προηγουμένως θεωρώντας σε κάθε περίπτωση ως μέθοδο αναφοράς τον αλγόριθμο Newton-Raphson του πακέτου MATPOWER.

Πίνακας 4-3 Σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με μεθόδους που προτείνονται στη βιβλιογραφία.

Μελέτη	Σύστημα 6 ζυγών	πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 ζυγών	πρότυπο ΔΔ της IEEE 123 ζυγών
Gauss-Seidel			
Αριθμός επαναλήψεων	98	772	4913
Μέτρο τάσης, Μέσο σφάλμα (%)	0,0037	<1e-4	<1e-4
Μέτρο τάσης, Μέγιστο σφάλμα (%)	0,0074	<1e-4	<1e-4
Γωνία τάσης, Μέσο σφάλμα (%)	0,0157	0,3211	0,0275
Γωνία τάσης, Μέγιστο σφάλμα (%)	0,0395	0,6681	0,0298
Forward-Backward Sweep			
Αριθμός επαναλήψεων	3	4	4
Μέτρο τάσης, Μέσο σφάλμα (%)	<1e-4	<1e-4	0,599
Μέτρο τάσης, Μέγιστο σφάλμα (%)	<1e-4	<1e-4	1,038
Γωνία τάσης, Μέσο σφάλμα (%)	0,0190	0,0021	14,022
Γωνία τάσης, Μέγιστο σφάλμα (%)	0,0424	0,0076	17,266
ADMM			
Αριθμός επαναλήψεων	6	7	6
Γωνία τάσης, Μέσο σφάλμα (%)	<1e-4	<1e-4	<1e-4
Γωνία τάσης, Μέσο σφάλμα (%)	<1e-4	<1e-4	<1e-4
Γωνία τάσης, Μέσο σφάλμα (%)	<1e-4	0,0007	<1e-4
Γωνία τάσης, Μέγιστο σφάλμα (%)	<1e-4	0,0226	<1e-4

4.4.5. Διερεύνηση της μεθόδου σε περίπτωση που χαθεί η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ των κόμβων

Σε αυτήν την ενότητα διερευνάται η απόκριση της μεθόδου σε περίπτωση απώλειας τηλεπικοινωνιακών συνδέσεων μεταξύ των κόμβων. Για τη μελέτη αυτού του προβλήματος γίνεται η υπόθεση ότι σε περίπτωση που χαθεί η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων οι κόμβοι διατηρούν σταθερές τις τελευταίες τιμές που έλαβαν από τους γείτονες με τους οποίους διακόπηκε η επικοινωνία μέχρι την επίλυση του προβλήματος και την επαναφορά της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης. Παράλληλα, συνεχίζουν τις επαναλήψεις του κατανεμημένου πρωτοκόλλου σύμφωνα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Για τον κατανεμημένο αλγόριθμο βελτιστοποίησης το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως προσθήκη θορύβου στο αρχικό σύστημα και εφαρμόζοντας τα αποτελέσματα του Θεωρήματος 2 της εργασίας [138], προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος θα συγκλίνει στη βέλτιστη λύση και επομένως στην επίλυση του συστήματος γραμμικών εξισώσεων όσο ο πίνακας A (4.14) παραμένει αντιστρέψιμος, προϋπόθεση που τηρείται.

Στη συνέχεια, δίνονται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις διαφόρων σεναρίων απώλειας τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων για διαφορετικά δίκτυα. Συγκεκριμένα (Πίνακας 4-4), παρουσιάζεται ο αριθμός των απαιτούμενων επαναλήψεων μέχρι τη σύγκλιση του αλγορίθμου για απώλεια ενός μόνο κόμβου, απώλεια των μισών κόμβων και απώλεια όλων των κόμβων (ιδιαίτερα δυσχερές και μη ρεαλιστικό σενάριο). Στην περίπτωση απώλειας ενός, μισών και όλων των κόμβων (περίπτωση μεγάλης διάρκειας), η διάρκεια της διακοπής των τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων τέθηκε εμπειρικά στα ίδια επίπεδα με τον μισό αριθμό των επαναλήψεων που απαιτεί ιδανικά ο αλγόριθμος κυρτής βελτιστοποίησης, ενώ στο σενάριο απώλειας όλων των κόμβων για μικρή διάρκεια, ο ίδιος αριθμός τέθηκε κοντά στο ένα τέταρτο του αριθμού απαιτούμενων επαναλήψεων αντίστοιχα.

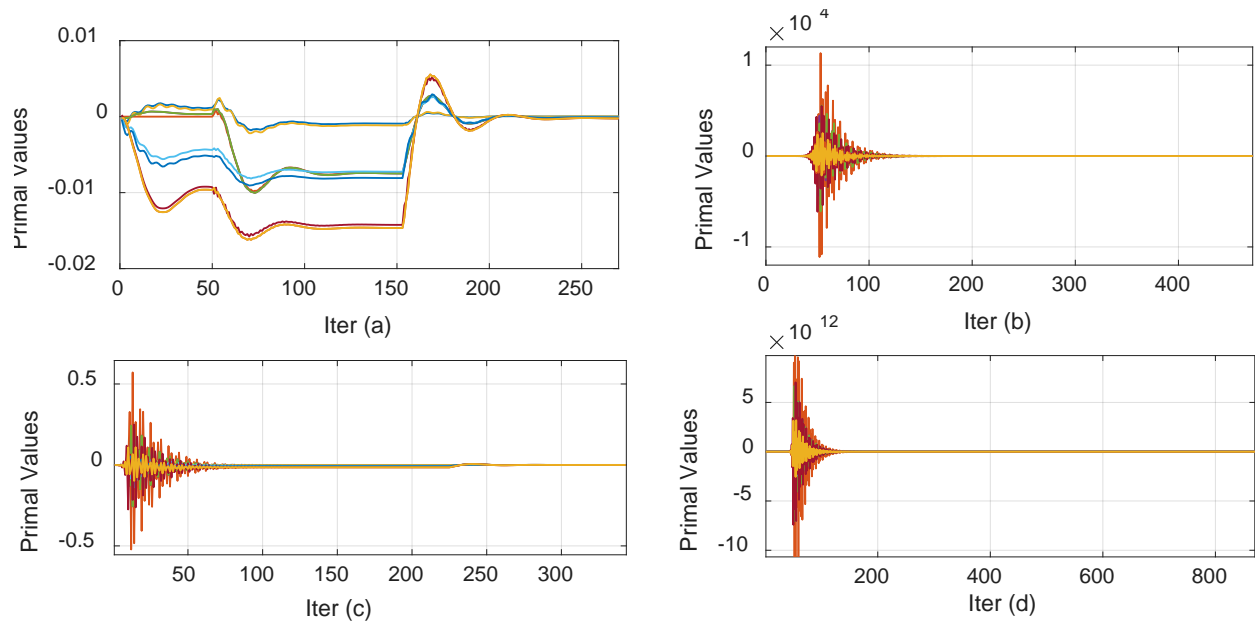
Πίνακας 4-4 Αριθμός επαναλήψεων για διάφορα σενάρια απώλειας τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων μεταξύ των κόμβων.

Μελέτη	Απώλεια 1 κόμβου	Απώλεια $\sim N/2$ κόμβων	Απώλεια όλων των κόμβων	
			(μικρή διάρκεια)	(μεγάλη διάρκεια)
	Αριθμός επαναλήψεων			
Σύστημα 6 ζυγών	271	554	343	897
πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 ζυγών	5152	5204	5324	5591
πρότυπο ΔΔ της IEEE 123 ζυγών	2949	3227	3800	4151

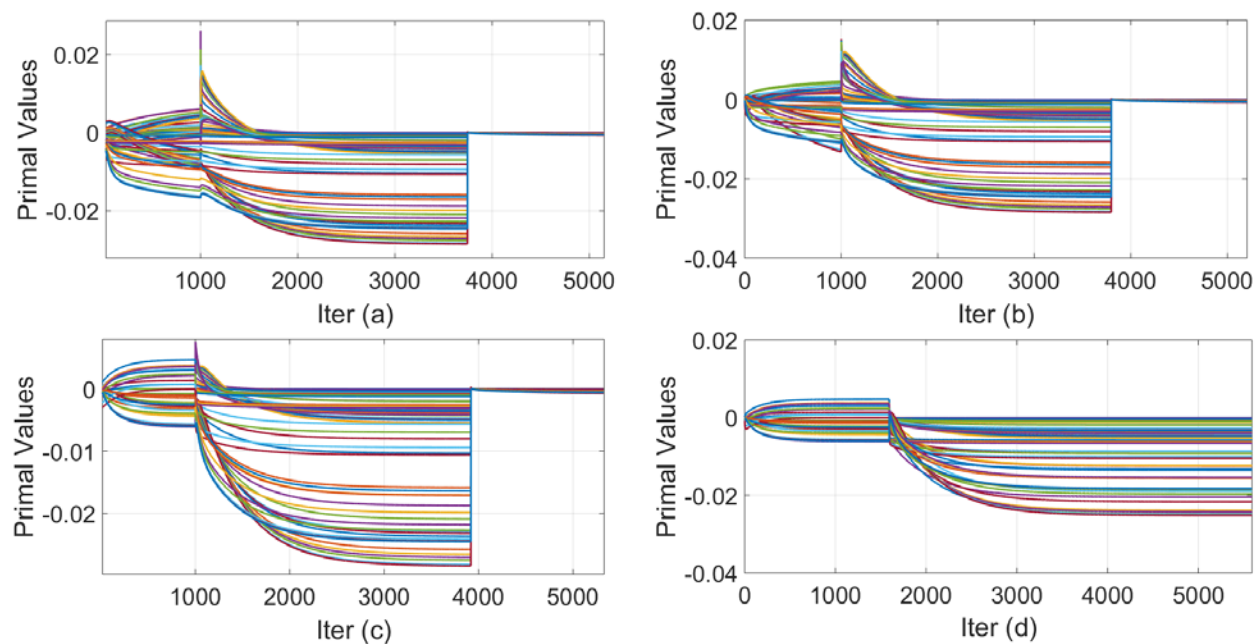
Στα σχήματα 4-13 και 4-14, φαίνεται η απόκριση του κατανεμημένου αλγορίθμου για τα σενάρια που παρουσιάστηκαν στον προηγούμενο πίνακα. Παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει σε κάθε περίπτωση (ακόμα και στο ακραίο σενάριο) ενώ εμφανίζεται αύξηση

4.4. Εφαρμογές της μεθόδου και αποτελέσματα

στον απαιτούμενο αριθμό επαναλήψεων εξαρτώμενη από τον αριθμό των τηλεπικοινωνιακών συνδέσεων που αφαιρούνται και τον αριθμό επαναλήψεων που αυτές διατηρούνται εκτός λειτουργίας. Συμπερασματικά, ο αλγόριθμος διακρίνεται από αυξημένη σπιβαρότητα σε διαταραχές όπως η διακοπή της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων και επιτυγχάνει τη σύγκλιση στη βέλτιστη τιμή μετά την αποκατάσταση των τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων.



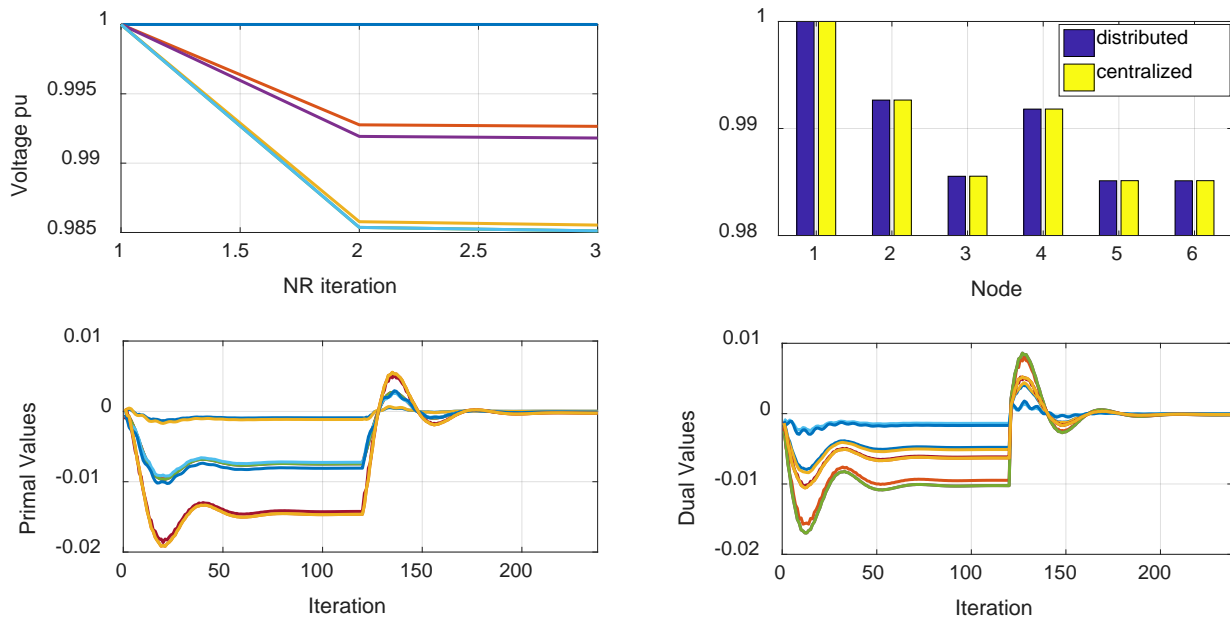
Σχήμα 4-13 Απόκριση του κατανεμημένου πρωτοκόλλου στο δίκτυο 6 κόμβων σε περίπτωση απώλειας τηλεπικοινωνίας, πρωτεύουσες τιμές για απώλεια (a) 1 κόμβου, (b) $\sim N/2$ κόμβων, (c) όλων των κόμβων για μικρό χρονικό και διάστημα και (d) όλων των κόμβων για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 4-14 Απόκριση του καταναμημένου πρωτοκόλλου στο δίκτυο 34 κόμβων σε περίπτωση απώλειας τηλεπικοινωνίας, πρωτεύουσες τιμές για απώλεια (a) 1 κόμβου, (b) $\sim N/2$ κόμβων, (c) όλων των κόμβων για μικρό χρονικό και διάστημα και (d) όλων των κόμβων για μεγάλο χρονικό διάστημα.

4.4.6. Διερεύνηση της μεθόδου σε περίπτωση αμέλειας των γωνιών της τάσης

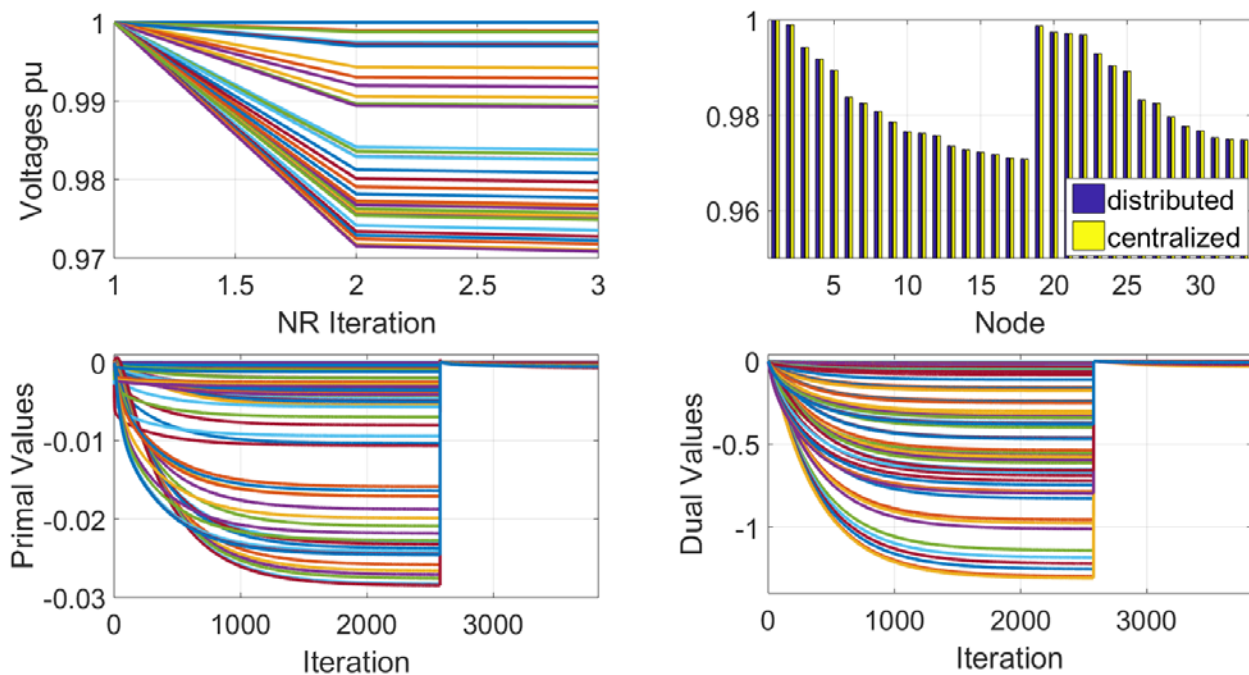
Ενδιαφέρον έχει η διερεύνηση της ακρίβειας της μεθόδου στην περίπτωση που οι φασικές γωνίες της τάσης αμεληθούν από το μοντέλο. Όπως είναι γνωστό, μια συνήθης παραδοχή για τα δίκτυα διανομής είναι ότι η διαφορά γωνίας μεταξύ γειτονικών κόμβων είναι αρκετά μικρή ώστε να προσεγγίζεται στο μηδέν και αυτό το φαινόμενο εντείνεται όσο ο λόγος $\frac{r}{x}$ των σύνθετων αντιστάσεων των γραμμών αυξάνεται. Επίσης, παρατηρώντας τα μεγέθη των φασικών γωνιών που έχουν υπολογιστεί για την περίπτωση του συστήματος 6 ζυγών και του πρότυπου $\Delta\Delta$ της IEEE 34 ζυγών (Σχήμα 4-4 και Σχήμα 4-12 αντίστοιχα), προκύπτει ότι εμφανίζουν αρκετά μικρές τιμές. Με αυτό το σκεπτικό, εξετάζεται η ακρίβεια του μοντέλου για τον υπολογισμό των τάσεων, εάν οι φασικές γωνίες μηδενιστούν δηλαδή $\delta_i = 0 \forall i \in \mathcal{N}_1$. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αρκετά ενθαρρυντικά καθώς παρατηρείται μια μικρή μόνο αύξηση στο σφάλμα (Πίνακας 4-5) σε συνδυασμό με ένα παρόμοιο αριθμό απαιτούμενων επαναλήψεων. Στο Σχήμα 4-15 δίνονται τα αποτελέσματα από το σύστημα 6 ζυγών και στο Σχήμα 4-16 τα αποτελέσματα από το πρότυπο $\Delta\Delta$ της IEEE 34 ζυγών. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται ίδιος αριθμός ανανεώσεων τάσης όπως και στην περίπτωση που οι γωνίες λαμβάνονταν υπόψη. Σημειώνεται ότι, παρότι οι γωνίες μηδενίζονται, δεν αλλάζει ο αριθμός των εξισώσεων που ορίζονται για το σύστημα κυρτής βελτιστοποίησης (4.17).



Σχήμα 4-15 Σύστημα 6 ζυγών: (πάνω αριστερά) Επαναλήψεις Newton-Raphson, ενημερώσεις στα μέτρα των τάσεων, (πάνω δεξιά) Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου με μέθοδο αναφοράς, Καταναμημένος υπολογισμός διορθώσεων τάσεων: (κάτω αριστερά) πρωτεύουσες τιμές - Ψ , (κάτω δεξιά) δυικές τιμές - γ .

Πίνακας 4-5 Ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου αμελώντας τις γωνίες τάσης

Μελέτη	Μέσο σφάλμα (%)	Μέγιστο σφάλμα (%)
	Μέτρο τάσης	
Σύστημα 6 ζυγών	0,0028	0,0036
πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 ζυγών	0,2049	0,4513
πρότυπο ΔΔ της IEEE 123 ζυγών	0,0802	0,1215



Σχήμα 4-16 Πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 ζυγών: (πάνω αριστερά) Επαναλήψεις Newton-Raphson, ενημερώσεις στα μέτρα των τάσεων, (πάνω δεξιά) Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου με μέθοδο αναφοράς, Κατανεμημένος υπολογισμός διορθώσεων τάσεων: (κάτω αριστερά) πρωτεύουσες τιμές $-\Psi$, (κάτω δεξιά) δυικές τιμές $-\gamma$.

4.5. Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτή αναπτύχθηκε και διερευνήθηκε καινοτόμος κατανεμημένος αλγόριθμος για την επίλυση ροής φορτίου για μονοφασικά δίκτυα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Newton-Raphson σε συνδυασμό με ένα κατανεμημένο πρωτόκολλο. Η μέθοδος εκμεταλλεύεται μια σημαντική ιδιότητα της Ιακωβιανής μήτρας των εξισώσεων ροής φορτίου. Στην συνέχεια εξετάστηκε μέσω προσομοιώσεων η δυνατότητα εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε ΔΔ. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε έναν απλοποιημένο σύστημα 6 ζυγών, στο

πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 και 123 ζυγών. Τα αποτελέσματα έδειξαν μεγάλη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα, καθώς επίσης και την επεκτασιμότητα της μεθόδου. Ενδιαφέρον είχαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όταν οι γωνίες των τάσεων αμελήθηκαν από το μοντέλο ροής φορτίου, όπου παρατηρήθηκε και στις τρεις περιπτώσεις δικτύων αμελητέα αύξηση στο σφάλμα υπολογισμού των τάσεων και παραπλήσιος αριθμός απαιτούμενων επαναλήψεων.

Η προτεινόμενη μέθοδος συγκρίθηκε με μεθόδους από τη βιβλιογραφία για την επίλυση της ροής φορτίου. Συγκεκριμένα συγκρίθηκε με τη μέθοδο Gauss-Seidel, τη μέθοδο Forward-Backward Sweep και τον αλγόριθμο ADMM. Σχετικά με τη μέθοδο Gauss-Seidel, η οποία μπορεί να υλοποιηθεί σε κατανεμημένο περιβάλλον, προέκυψαν παραπλήσια αποτελέσματα, ενώ συγκριτικά, η μέθοδος Forward-Backward Sweep απαιτεί πολύ μικρότερο αριθμό επαναλήψεων. Ωστόσο, και οι δύο αυτές μέθοδοι μειονεκτούν ως προς την προς την προτεινόμενη μέθοδο ως προς το γεγονός ότι οι υπολογισμοί απαιτούν μια συγκεκριμένη ιεραρχία (λόγω π.χ. της σάρωσης του δικτύου) γεγονός που δεν οδηγεί σε μια πραγματικά κατανεμημένη επίλυση και δεν ανταποκρίνεται τελικά στους στόχους που έχουν τεθεί στην παρούσα διατριβή. Η μέθοδος ADMM παρουσίασε τα πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα (συνδυασμός αριθμού επαναλήψεων και ακρίβειας), ωστόσο η παρούσα υλοποίηση δεν επιτρέπει την κατανεμημένη υλοποίηση. Τέλος διερευνήθηκε η απόκριση της μεθόδου σε περίπτωση που χαθεί η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ των κόμβων όπου και διαπιστώθηκε η αυξημένη στιβαρότητά της.

Κεφάλαιο 5

Κατανεμημένος αλγόριθμος ελέγχου τάσης

5.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, αντιμετωπίζεται το πρόβλημα του ελέγχου της τάσης στα πλαίσια ευφυών ΔΔ. Η αυξημένη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής από ΑΠΕ στα ΔΔ προκαλεί περιστασιακές μεταβολές τάσης και πιθανώς οδηγεί σε τοπικές παραβιάσεις των ορίων. Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων, οι διαχειριστές του δικτύου καταφεύγουν συχνά σε μέτρα ενίσχυσης του δικτύου στο στάδιο του σχεδιασμού δικτύου πριν από τη σύνδεση των νέων μονάδων ΔΠ. Άλλες τεχνικές οι οποίες επιστρατεύονται -κατά τη λειτουργία- περιλαμβάνουν τον έλεγχο Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ, τον έλεγχο των μονάδων ΔΕΠ με μεθόδους που βασίζονται σε καμπύλες στατισμού για την αντιμετώπιση των παραβιάσεων τάσης και συχνότητας λαμβάνοντας υπόψη τους τοπικούς περιορισμούς των μονάδων, κ.α.

Η προτεινόμενη μέθοδος στοχεύει στο δευτερεύον επίπεδο ρύθμισης της τάσης, διατυπώνοντας το πρόβλημα ελέγχου της τάσης ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και επιλύοντάς το στη συνέχεια με κατανεμημένο τρόπο. Η εύρεση της βέλτιστης λύσης του αντίστοιχου προβλήματος κατανομής πόρων περιλαμβάνει τον έλεγχο ευέλικτων μικροπηγών (μονάδες ΔΠ) και ελεγχόμενων φορτίων, τα οποία ουσιαστικά θεωρείται ότι παρέχουν επικοινωνικές υπηρεσίες στο δίκτυο. Σχεδιάζεται επομένως, ένας κατανεμημένος αλγόριθμος δύο επιπέδων, ο οποίος βασίζεται στην τοπική επικοινωνία των ευφυών οντοτήτων που θεωρούνται ότι συμμετέχουν στην επίλυση του προβλήματος, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος οι οποίες θα αντιμετωπίσουν τις παραβιάσεις της τάσης σε όλο το δίκτυο. Οι περιορισμοί τάσης έχουν εισαχθεί ως ελαστικοί περιορισμοί (soft constraints) στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος μέσω συναρτήσεων ποινής. Η μέθοδος βασίζεται σε έναν αλγόριθμο κατάβασης βαθμίδας σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο συναίνεσης για να επιτύχει την πλήρως κατανεμημένη υλοποίηση.

5.2. Διατύπωση του προβλήματος

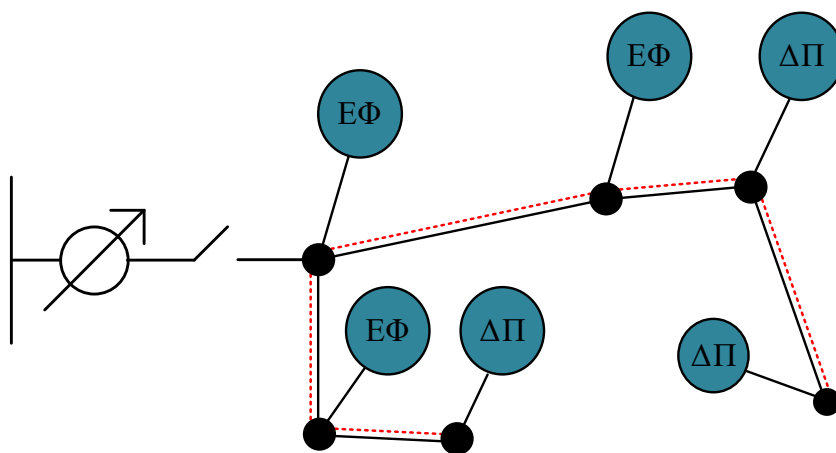
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το πρόβλημα ρύθμισης της τάσης μπορεί να εκφραστεί ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο στη συνέχεια θα λυθεί με κατανεμημένο τρόπο. Έτσι, η διαθέσιμη ευελιξία ενεργού και αέργου ισχύος χρησιμοποιείται με βέλτιστο τρόπο, ενώ αποφεύγεται η περιττή περικοπή ενεργού ισχύος. Η αντικειμενική συνάρτηση έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\min F(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) \quad (5.1)$$

Όπου \mathbf{P} και \mathbf{Q} είναι διανύσματα που αντιστοιχούν στην ευελιξία ενεργού και αέργου ισχύος κάθε κόμβου του δικτύου η οποία χρησιμοποιείται προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι παραβιάσεις της τάσης.

5.2.1. Μοντελοποίηση του δικτύου και παραδοχές

Το ηλεκτρικό δίκτυο αναπαρίσταται κατά τα γνωστά από το γράφο $\mathcal{G}_1 \triangleq (\mathcal{N}_1, \mathcal{E}_1)$, ενώ το δίκτυο επικοινωνίας αναπαρίσταται από το γράφο $\mathcal{G}_2 \triangleq (\mathcal{N}_2, \mathcal{E}_2)$ (Σχήμα 5-1). Όλοι οι κόμβοι, εξαιρουμένου του κόμβου αναφοράς μοντελοποιούνται ως ζυγοί PQ.



Σχήμα 5-1 Αναπαράσταση του δικτύου διανομής, οι κόμβοι διαθέτουν Ελεγχόμενα Φορτία (ΕΦ) ή/και μονάδες ΔΠ, οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις.

Έστω N ο αριθμός των ηλεκτρικών κόμβων του δικτύου. Το ηλεκτρικό δίκτυο αναπαρίσταται από την μήτρα αγωγιμοτήτων, $Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}$. Κάθε κόμβος θεωρείται ότι διαθέτει κάποια ΕΗΣ (π.χ. έξυπνο μετρητή) η οποία μετράει καθαρή ενεργό και άεργο ισχύ P_{NET_i} και Q_{NET_i} αντίστοιχα, καθώς επίσης και την τάση του κόμβου $\mathbf{V}_i = |V_i| \angle \delta_i$ (η απαίτηση για μέτρηση γωνίας μπορεί να χαλαρωθεί στη συνέχεια). Για τους $M \leq N$ κόμβους οι οποίοι διαθέτουν κάποια ελεγχόμενη μονάδα ΔΠ είτε ελεγχόμενο φορτίο, η καθαρή ενεργός και άεργος ισχύς διαχωρίζονται στα ελεγχόμενα (P_{C_i}, Q_{C_i}) και σταθερά μέρη (P_{U_i}, Q_{U_i}) έτσι ώστε:

$$P_{NET_i} = P_{C_i} + P_{U_i}, \quad Q_{NET_i} = Q_{C_i} + Q_{U_i} \quad (5.2)$$

Η παραπάνω διατύπωση είναι γενικευμένη και μπορεί να αντιπροσωπεύει τόσο παραγωγή (θετικές τιμές) όσο και κατανάλωση ισχύος (αρνητικές τιμές). Ο ζυγός με αριθμό 1 θεωρείται ως ο ζυγός αναφοράς. Επίσης, υιοθετείται ο συμβολισμός $\varphi_{ij} = \theta_{ij} - \delta_{ij}$ και $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$.

5.2.2. Πρόβλημα βέλτιστης ρύθμισης τάσης

Έστω ένα σύνολο από $2(N - 1)$ μεταβλητές κατάστασης για τους PQ ζυγούς του δικτύου:

$$\mathbf{x} = [\delta_2 \quad \dots \quad \delta_N \quad |V_2| \quad \dots \quad |V_N|]^T, \quad (5.3)$$

ένα σύνολο από $2(N - 1)$ μεταβλητές ελέγχου:

$$\mathbf{u} = [P_{C_2} \quad \dots \quad P_{C_N} \quad Q_{C_2} \quad \dots \quad Q_{C_N}]^T, \quad (5.4)$$

και ένα σύνολο από δύο σταθερές παραμέτρους για τον ζυγό αναφοράς:

$$\boldsymbol{\rho} = [\delta_1 \quad |V_1|]^T \quad (5.5)$$

Ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση της επόμενης αντικειμενικής συνάρτησης:

$$F(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \sum_{i \in N \setminus \{1\}} f_i(\mathbf{u}) + f_{ref}(\mathbf{x}) \quad (5.6)$$

Όπου οι συναρτήσεις κόστους f_i κάθε κόμβου PQ ορίζονται ως:

$$f_i(P_{C_i}, Q_{C_i}) = c_{P_i}(P_{C_i})^2 + c_{Q_i}(Q_{C_i})^2 \quad (5.7)$$

Ενώ η συνάρτηση κόστους του ζυγού αναφοράς εξαρτάται από τις εξισώσεις ροής φορτίου:

$$f_{ref}(\mathbf{x}) = c_{P_{ref}} \mathcal{P}_1(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta})^2 + c_{Q_{ref}} \mathcal{Q}_1(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta})^2 \quad (5.8)$$

Όπως φαίνεται, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ορίζεται ως το άθροισμα των συναρτήσεων κόστους f_i , η κάθε μία εκ των οποίων αφορά την έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος του κόμβου i στο δίκτυο με σκοπό την αντιμετώπιση όλων των παραβιάσεων τάσης. Τα βάρη c_{P_i} , c_{Q_i} , μοντελοποιούν το κόστος συνεισφοράς κάθε κόμβου στην ολική αντικειμενική συνάρτηση και αντιστοιχούν στα κίνητρα που λαμβάνει προκειμένου να παρέχει επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο για τη ρύθμιση της τάσης. Ο προσδιορισμός αυτών των βαρών ξεφεύγει από το σκοπό αυτής της εργασίας, ωστόσο θα θεωρηθεί ότι θα υπάρχει ένας αριθμός ευέλικτων κόμβων που συμμετέχουν στον αλγόριθμο ρύθμισης τάσης έτσι ώστε να υπάρχει κάποια εφικτή λύση στο πρόβλημα ελέγχου, το οποίο παίρνει τελικά τη μορφή:

$$\min \left\{ \sum_{i \in N \setminus \{1\}} f_i(P_{C_i}, Q_{C_i}) + f_{ref}(\mathcal{P}_1(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}), \mathcal{Q}_1(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta})) \right\} \quad (5.9)$$

Υπό τον περιορισμό η παρεχόμενη λύση, να αποτελεί λύση των εξισώσεων ροής φορτίου $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\rho})$:

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_i(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}) - P_{NET_i} &= 0 \\ \mathcal{Q}_i(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}) - Q_{NET_i} &= 0 \quad \gamma \mu \alpha \quad i \neq 1 \end{aligned} \quad (5.10)$$

Καθώς επίσης και να ικανοποιεί τους περιορισμούς τάσης:

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (5.11)$$

Όπου $\mathcal{P}_i(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}), \mathcal{Q}_i(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta})$ οι εξισώσεις ροής φορτίου για τον κόμβο i :

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_i(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}) &= \sum_{n=1}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| \cos(\varphi_{ij}) \\ \mathcal{Q}_i(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}) &= - \sum_{n=1}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| \sin(\varphi_{ij}) \end{aligned} \quad (5.12)$$

Το πρόβλημα διατυπώνεται σαν ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου, όπου ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση συναρτήσεων κόστους κάθε κόμβου, προκειμένου να τηρηθούν οι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου. Σημειώνεται ότι η διαφορετική διατύπωση για τις εγχύσεις του ζυγού αναφοράς στην εξίσωση (5.9), οφείλεται στο γεγονός ότι για τον ζυγό αναφοράς δεν περιλαμβάνεται ένα ελεγχόμενο και ένα σταθερό μέρος για την έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος (όπως συμβαίνει με όλους του υπόλοιπους κόμβους). Αντίθετα, η ροή που εισέρχεται στο υπό μελέτη δίκτυο θα εξαρτάται από τις τάσεις και τις γωνίες στο δίκτυο [142].

Για την επίλυση του προβλήματος (5.9) μπορεί να διατυπωθεί η συνάρτηση Lagrange, ενσωματώνοντας τους εξισωτικούς περιορισμούς (5.10) και ορίζοντας ένα σύνολο $2(N-1)$ πολλαπλασιαστών Lagrange $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_{P_2} \quad \dots \quad \lambda_{P_N} \quad \lambda_{Q_2} \quad \dots \quad \lambda_{Q_N}]^T$. Κάθε συντελεστής αντιστοιχεί σε μια εξίσωση ροής φορτίου. Η συνάρτηση Lagrange δίνεται επομένως από την επόμενη εξίσωση:

$$\mathcal{L}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\rho}) = F(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\rho}) =$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{1\}} f_i(P_{C_i}, Q_{C_i}) + f_{ref}(\mathcal{P}_1, \mathcal{Q}_1) + \boldsymbol{\lambda}^T \begin{bmatrix} |V_2| \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{2j}| \cos \varphi_{2j} - P_{NET_2} \\ \dots \\ |V_N| \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{Nj}| \sin \varphi_{Nj} - Q_{NET_N} \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Προκειμένου να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση της F , αναζητείται ένα σημείο $(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda})$, για το οποίο ισχύει $\nabla \mathcal{L} = 0$. Κατά γνωστά, εάν η F είναι κυρτή, οι συναρτήσεις των εξισωτικών περιορισμών αφινικοί και οι συναρτήσεις των ανισωτικών περιορισμών κυρτές, τότε το σημείο αυτό θα αποτελεί και το ολικό ελάχιστο της F . Η συνθήκη $\nabla \mathcal{L} = 0$ δίνει τις επόμενες εξισώσεις:

$$\left. \begin{array}{l} \nabla \mathcal{L}_x = 0 \\ \nabla \mathcal{L}_u = 0 \\ \nabla \mathcal{L}_\lambda = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \left[\frac{\partial F}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial g}{\partial x} \right]^T \boldsymbol{\lambda} = 0 \\ \left[\frac{\partial F}{\partial u} \right] + \left[\frac{\partial g}{\partial u} \right]^T \boldsymbol{\lambda} = 0 \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\rho}) = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \quad (5.14)$$

$$\left[\frac{\partial F}{\partial \delta_2} \quad \dots \quad \frac{\partial F}{\partial \delta_N} \quad \frac{\partial F}{\partial |V_2|} \quad \dots \quad \frac{\partial F}{\partial |V_N|} \right]^T + [J]^T \boldsymbol{\lambda} = 0 \quad (5.15)$$

$$\begin{bmatrix} 2c_{P_2} P_{c_2} \\ \vdots \\ 2c_{P_N} P_{c_N} \\ 2c_{Q_2} Q_{c_2} \\ \vdots \\ 2c_{Q_N} Q_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & -1 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix} \boldsymbol{\lambda} = 0 \quad (5.16)$$

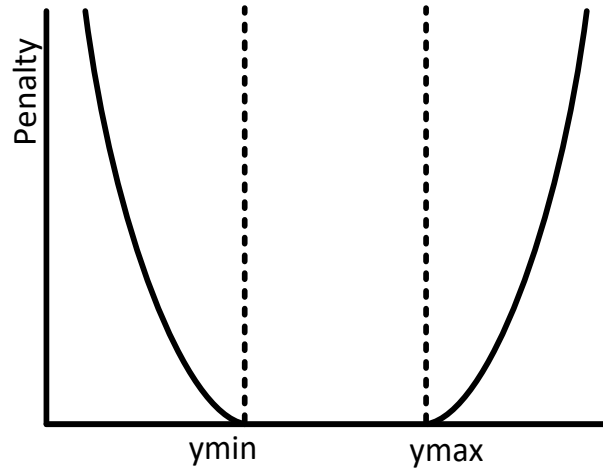
$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\rho}) = 0 \quad (5.17)$$

Σημειώνεται ότι η μήτρα $J = \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)$ αποτελεί την Ιακωβιανή μήτρα των εξισώσεων ροής φορτίου. Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης μεθόδου υιοθετείται η παραδοχή ότι οι διαφορές φασικών γωνιών των γειτονικών κόμβων είναι αρκετά μικρές ώστε η γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής φορτίου (5.10) να εισάγει αμελητέο σφάλμα. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται ότι το πρόβλημα βελτιστοποίησης (5.9) θα είναι κυρτό. Προκειμένου να γραμμικοποιηθούν οι μη γραμμικοί όροι, λαμβάνεται το μοντέλο γραμμικοποίησης που προτείνεται στη μελέτη [143] και τελικά χρησιμοποιούνται οι προσεγγίσεις $\cos\varphi_{ij} \approx \cos\theta_{ij}$ και $\sin\varphi_{ij} \approx \sin\theta_{ij} - \delta_{ij}\cos\theta_{ij}$ (θεωρώντας επίσης $\cos\delta_{ij} \approx 1$ και $\sin\delta_{ij} \approx \delta_{ij}$ όταν $\delta_{ij} \approx 0$). Οι μη γραμμικοί όροι στις εκφράσεις των τάσεων μπορούν να γραμμικοποιηθούν αντίστοιχα, διατηρώντας μόνο τον όρο πρώτης τάξης από την ανάλυση των εκφράσεων σε σειρά Taylor $|V_i| \cdot |V_j| \approx |V_i| + |V_j| - 1$. Η ακρίβεια της γραμμικοποίησης θεωρείται αποδεκτή, καθώς σε κάθε επανάληψη γίνονται μικρές μεταβολές στις μεταβλητές ελέγχου με κατάλληλη ρύθμιση στο βήμα του αλγόριθμου κατάβασης βαθμίδας, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

5.2.3. Εισαγωγή των ανισωτικών περιορισμών

Υποθέτοντας ότι οι παραβιάσεις τάσης αποτελούν τη βασική συνθήκη ενεργοποίησης του αλγορίθμου, πρέπει να διασφαλισθεί ότι κάθε κόμβος θα ελέγχει τον ανισωτικό περιορισμό (5.11) που του αντιστοιχεί. Κάποιοι επιπλέον τοπικοί περιορισμοί που δεν έχουν αναφερθεί ακόμα, είναι τα τεχνικά όρια κάθε κόμβου για τις εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος τα οποία θα πρέπει επίσης να ικανοποιούνται κάθε στιγμή:

$$\begin{array}{l} P_{min} \leq P_i \leq P_{max} \\ Q_{min} \leq Q_i \leq Q_{max} \end{array} \quad (5.18)$$



Σχήμα 5-2 Συναρτήσεις ποινής για την ενσωμάτωση των τοπικών περιορισμών των μεταβλητών κατάστασης και ελέγχου.

Οι ανισωτικοί περιορισμοί εισάγονται στη βελτιστοποίηση ως ελαστικοί περιορισμοί (soft constraints) χρησιμοποιώντας συναρτήσεις ποινής. Οι συναρτήσεις ποινής ενεργοποιούνται σε περίπτωση που παρατηρηθεί παραβίαση σε κάποιον ανισωτικό περιορισμό, οπότε και εισάγεται ο αντίστοιχος όρος ποινής όπως φαίνεται και στην εξίσωση (5.19). Έτσι ρυθμίζεται ο υπολογισμός των πολλαπλασιαστών λ και εξασφαλίζεται ότι η ενημέρωση των παραμέτρων ελέγχου δεν θα θέσει κανένα από τα V_i, P_i, Q_i εκτός από τα επιτρεπόμενα όρια. Τελικά, για κάθε κόμβο ορίζονται συναρτήσεις ποινής που έχουν την μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 5-2 και δίνονται από την παρακάτω έκφραση:

$$w_i(y_i) = \begin{cases} s_i(y_i - y_{min})^2, & \text{έαν } y_i < y_{min} \\ s_i(y_i - y_{max})^2, & \text{έαν } y_i > y_{max} \\ 0, & \text{έαν } y_{min} \leq y_i \leq y_{max} \end{cases} \quad (5.19)$$

με $y = \langle V, P, Q \rangle$.

Η χρήση συναρτήσεων ποινής επιτρέπει στους κόμβους να μεταβάλλουν την ενεργό και άεργο ισχύ τους προκειμένου να εξαλειφθούν οι όποιες παραβιάσεις στην τάση. Επομένως, κάθε κόμβος είναι υπεύθυνος για την επιτήρηση της δικής του τάσης και ταυτόχρονα η παραβίαση ενός τοπικού περιορισμού επιλύεται βέλτιστα με την κατανεμημένη ελαχιστοποίηση του προβλήματος (5.9). Επίσης, επειδή οι ανισωτικοί περιορισμοί είναι ελαστικοί, τα όρια τάσης V_{max}, V_{min} μπορούν να τεθούν ελαφρώς χαμηλότερα από τα τεχνικά όρια του δικτύου. Για κάθε κόμβο ορίζεται μια παράμετρος ποινής s_i (steepness), η τιμή της οποίας επηρεάζει την ελαστικότητα στην παραβίαση του περιορισμού. Τελικά η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει τη μορφή:

$$F^{new} = F(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \sum_{i=2}^N w_i \quad (5.20)$$

Όπου η συνάρτηση ποινής $w_i \geq 0$, όπως φαίνεται από την εξίσωση (5.19) λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του μηδενός μόνο όταν σημειώνεται κάποια παραβίαση στον ανισωτικό περιορισμό στον κόμβο i . Μετά την εισαγωγή των συναρτήσεων ποινής, οι $2(N - 1)$ τιμές των πολλαπλασιαστών λ υπολογίζονται από την (5.15) ως:

$$\left[\frac{\partial F}{\partial \delta_2} \quad \dots \quad \frac{\partial F}{\partial \delta_N} \quad \frac{\partial F}{\partial |V_2|} + \frac{\partial w_2}{\partial |V_2|} \quad \dots \quad \frac{\partial F}{\partial |V_N|} + \frac{\partial w_N}{\partial |V_N|} \right]^T + [J]^T \lambda = 0 \quad (5.21)$$

5.2.4. Κατανεμημένος υπολογισμός των πολλαπλασιαστών Lagrange

Η βασική ιδέα για την επίτευξη της πλήρως κατανεμημένης επίλυσης του προβλήματος ρύθμισης της τάσης έγκειται στο ότι κάθε κόμβος στο δίκτυο ενεργεί ως ομότιμος με τους ηλεκτρικούς του γείτονες. Μετρά την τάση του, υπολογίζει τη δική του συμβολή στην αντικειμενική συνάρτηση (είτε ως κόστος ενεργού/αέργου είτε λόγω παραβίασης περιορισμών) επικοινωνώντας με τους ηλεκτρικούς γείτονές του και στην συνέχεια λαμβάνει την απόφαση για την ποσότητα έγχυσης ενεργού/αέργου ισχύος που ελαχιστοποιεί την ολική αντικειμενική συνάρτηση. Στο πλαίσιο της διαδικασίας αυτής, κάθε κόμβος πρέπει να υπολογίσει τους αντίστοιχους συντελεστές Lagrange με κατανεμημένο τρόπο:

$$\lambda = - \left[\left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) \right]^{T^{-1}} \cdot \left(\frac{\partial F^{new}}{\partial x} \right) \quad (5.22)$$

Η διάσταση του διανύσματος λ είναι $2(N - 1)$ καθώς ορίζονται 2 συντελεστές για κάθε σύνολο εξισώσεων ροής φορτίου (μία για την έγχυση ενεργού και μία για την έγχυση αέργου ισχύος) και $N - 1$ σύνολα εξισώσεων (ο ζυγός αναφοράς δεν λαμβάνεται υπόψη σε αυτό το σημείο). Κατά τα γνωστά, ορίζουμε το σύνολο N_i το οποίο περιέχει τους γείτονες του κόμβου i , δηλαδή $N_i = \{j : (i, j) \in \mathcal{G}_1\}$. Για τον προσδιορισμό ενός κανόνα ανανέωσης για την ελαχιστοποίηση της F^{new} κάθε κόμβος απαιτείται να μπορεί να υπολογίσει με κατανεμημένο τρόπο τους δύο πολλαπλασιαστές που του αντιστοιχούν λ_{P_i} , λ_{Q_i} . Η συνήθης προσέγγιση για αυτόν τον υπολογισμό είναι αντιστροφή της Ιακωβιανής μήτρας των εξισώσεων ροής φορτίου $\left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)$ και στη συνέχεια η εκτέλεση του υπολογισμού (5.22). Προκειμένου όμως οι συντελεστές να υπολογιστούν με πλήρως κατανεμημένο τρόπο, προτείνεται η εναλλακτική προσέγγιση της κατανεμημένης επίλυσης του συστήματος $2(N - 1)$ γραμμικών εξισώσεων (5.21). Το σύστημα εξισώσεων είναι δυνατόν να επιλυθεί καθότι η Ιακωβιανή μήτρα όπως έχει συζητηθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια χαρακτηρίζεται από την επόμενη πολύ σημαντική ιδιότητα· κάθε ένας από τους 4 τετραγωνικούς υποπίνακες που τη συνθέτουν, ακολουθεί την ίδια δομή με τη μήτρα αγωγιμοτήτων με την έννοια ότι το στοιχείο $(i - 1, j - 1)$ κάθε υποπίνακα της μήτρας $[J]$ θα είναι μη μηδενικό εάν και μόνο εάν οι κόμβοι i και j συνδέονται ηλεκτρικά. Αντίστοιχα και με τις μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, έτσι και σε αυτή την περίπτωση, γίνεται η παραδοχή ότι η τοπολογία του δικτύου επικοινωνίας συμπίπτει με την τοπολογία του ηλεκτρικού δικτύου και επομένως οι ηλεκτρικοί γείτονες μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες. Τέλος, σημειώνεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος δεν απαιτεί το δίκτυο να είναι ακτινικό, ωστόσο απαιτεί

να ισχύει η προηγούμενη παραδοχή. Επομένως, από το σύνολο των $2(N-1)$ εξισώσεων (5.21), οι εξισώσεις που αντιστοιχούν στον κόμβο i έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$J_{(i-1)(i-1)}\lambda_{P_i} + \sum_{j \in N_i} J_{(i-1)(j-1)}\lambda_{P_j} + J_{(i-1)(N-1)}\lambda_{Q_i} + \sum_{j \in N_i} J_{(i-1)(N+j-2)}\lambda_{Q_j} = -\frac{\partial F}{\partial \delta_i} \quad (5.23)$$

$$J_{(N+i-2)(i-1)}\lambda_{Q_i} +$$

$$\sum_{j \in N_i} J_{(N+i-2)(j-1)}\lambda_{P_j} + J_{(N+i-2)(N-1)}\lambda_{P_i} + \sum_{j \in N_i} J_{(N+i-2)(N+j-2)}\lambda_{Q_j} = -\frac{\partial F}{\partial |V_i|} - \frac{\partial w_i}{\partial |V_i|} \quad (5.24)$$

Όπου εύκολα δείχνεται ότι $\frac{\partial F}{\partial \delta_j} = \frac{\partial F}{\partial |V_j|} = 0$, για όσους κόμβους δεν γεινιάζουν ηλεκτρικά με τον ζυγό αναφοράς. Συμπερασματικά, οι γραμμικές εξισώσεις (5.21) παρέχουν σε κάθε κόμβο τους συντελεστές λ_{P_i} , λ_{Q_i} ως γραμμικό συνδυασμό των μεταβλητών κατάστασης του κόμβου i και των γειτονικών του κόμβων.

Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει την κατανεμημένη εύρεση των συντελεστών λ χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο κυρτής βελτιστοποίησης όπως προκύπτει από τις μελέτες [138] και [144] - [145], ως τη λύση του γραμμικού συστήματος εξισώσεων $[A] \cdot \lambda = b$, με $[A] = [J]^T$ και $b = -\left[\frac{\partial F}{\partial \delta_2} \ 0 \ \dots \ 0 \ \frac{\partial F}{\partial |V_2|} + \frac{\partial w_2}{\partial |V_2|} \ \frac{\partial w_3}{\partial |V_3|} \ \dots \ \frac{\partial w_N}{\partial |V_N|}\right]^T$.

Αυτό το γραμμικό σύστημα εξισώσεων μπορεί να επιλυθεί ορίζοντας το επόμενο κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\begin{aligned} \min & \|\lambda\|_2^2 \\ \tau. \omega. : & [J]^T \lambda = b \end{aligned} \quad (5.25)$$

Για την επίλυση του (5.25), κατά τα γνωστά διατυπώνεται η συνάρτηση Lagrange $A = \|\lambda\|_2^2 + \gamma([J]^T \lambda - b)$ και ορίζονται οι αντίστοιχοι πολλαπλασιαστές γ^T . Για τη βέλτιστη τιμή λ^* θα ισχύει:

$$\nabla A = 0 \Rightarrow \left. \begin{aligned} \nabla A_{\lambda} &= 0 \\ \nabla A_{\gamma} &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} -2\lambda - J\gamma &= 0 \\ J^T \lambda - b &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.26)$$

Το σύστημα συνεχούς χρόνου που προτείνεται στη μελέτη [138] μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του λ^* :

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} &= -2\lambda - J^T \gamma \\ \dot{\gamma} &= J\lambda - b \end{aligned} \quad (5.27)$$

Ένας διακριτός κανόνας ανανέωσης για το προηγούμενο συνεχές σύστημα βρίσκεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Euler θεωρώντας βήμα β :

$$\begin{aligned} \lambda(k+1) &= (1-2\beta) \cdot \lambda(k) - \beta \cdot J \cdot \gamma(k) \\ \gamma(k+1) &= \gamma(k) - \beta \cdot (J^T \cdot \lambda(k) - b) \end{aligned} \quad (5.28)$$

όπου β είναι θετική σταθερά.

Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση το σύστημα είναι (5.28) είναι κατανομημένο και κάθε κόμβος μπορεί να υπολογίσει επαναληπτικά τους συντελεστές λ_{P_i} , λ_{Q_i} , καθώς επίσης και τις αντίστοιχες δεικτικές του τιμές γ_{P_i} , γ_{Q_i} , χρησιμοποιώντας ένα σταθμισμένο άθροισμα από τις τοπικές του μετρήσεις και πληροφορίες που παρέχονται από τους γείτονές του.

Επισκόπηση θεωρήματος σύγκλισης:

Στη μελέτη [138] αποδεικνύεται ότι το σύστημα (5.28) συγκλίνει και μάλιστα με εκθετικό ρυθμό, εάν το βήμα ανανέωσης β επιλεγθεί έτσι ώστε να ισχύει $0 < \beta < \min\{1, \frac{2}{\sigma_{max}^2}\}$, όπου σ_{max}^2 είναι η μεγαλύτερη μη μηδενική ιδιοτιμή της μήτρας $J^T \cdot J$.

Οι κανόνες ανανέωσης διακριτού χρόνου για τις καταστάσεις του κόμβου i δίνονται από τις επόμενες εξισώσεις:

$$\lambda_{P_i}^{(\kappa+1)} = (1 - 2\beta) \cdot \lambda_{P_i}^{(\kappa)} - \beta \cdot \left(\sum_{j \in N_i} J_{(i-1)(j-1)} \gamma_{Q_j}^{(\kappa)} + \sum_{j \in N_i} J_{(i-1)(N+j-2)} \gamma_{P_j}^{(\kappa)} + J_{(i-1)(N+j-2)} \gamma_{Q_i}^{(\kappa)} \right) \quad (5.29)$$

$$\lambda_{Q_i}^{(\kappa+1)} = (1 - 2\beta) \cdot \lambda_{Q_i}^{(\kappa)} - \beta \cdot \left(\sum_{j \in N_i} J_{(N+i-2)(j-1)} \gamma_{Q_j}^{(\kappa)} + \sum_{j \in N_i} J_{(N+i-2)(N+j-2)} \gamma_{P_j}^{(\kappa)} + J_{(N+i-2)(N-1)} \gamma_{P_i}^{(\kappa)} \right) \quad (5.30)$$

$$\gamma_{P_i}^{(\kappa+1)} = \gamma_{P_i}^{(\kappa)} - \beta \cdot \left(\sum_{j \in N_i} J_{(i-1)(j-1)} \lambda_{P_j}^{(\kappa)} + J_{(i-1)(N-1)} \lambda_{Q_i}^{(\kappa)} + \sum_{j \in N_i} J_{(i-1)(N+j-2)} \lambda_{Q_j}^{(\kappa)} + \frac{\partial F}{\partial \delta_i} \right) \quad (5.31)$$

$$\gamma_{Q_i}^{(\kappa+1)} = \gamma_{Q_i}^{(\kappa)} - \beta \cdot \left(\sum_{j \in N_i} J_{(N+i-2)(j-1)} \lambda_{P_j}^{(\kappa)} + J_{(N+i-2)(N-1)} \lambda_{P_i}^{(\kappa)} + \sum_{j \in N_i} J_{(N+i-2)(N+j-2)} \lambda_{Q_j}^{(\kappa)} + \frac{\partial F}{\partial |V_i|} + \frac{\partial w_i}{\partial |V_i|} \right) \quad (5.32)$$

5.2.5. Αλγόριθμος κατάβασης βαθμίδας (Gradient Descent)

Η βέλτιστη λύση για τις μεταβλητές ελέγχου \mathbf{u} λαμβάνεται υπολογίζοντας το στάσιμο σημείο $(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o, \rho_o)$ της συνάρτησης Lagrange (5.13) για το οποίο ισχύει $\nabla \mathcal{L} = 0$. Αυτή η συνθήκη υποδηλώνει ότι η λύση ικανοποιεί επίσης τους εξισωτικούς περιορισμούς (και άρα η ευρεθείσα λύση είναι μια λύση των εξισώσεων ροής φορτίου του δικτύου). Η στρατηγική

της μεθόδου κατάβασης βαθμίδας είναι εύρεση μιας διαδρομής προς την κατεύθυνση μείωσης της \mathcal{L} . Για να τη διατύπωση ενός κανόνα ανανέωσης για τις παραμέτρους ελέγχου, χρησιμοποιείται η κλίση της συνάρτησης \mathcal{L}_u [142]:

Ο υπολογισμός του λ γίνεται χρησιμοποιώντας τον κατανεμημένο αλγόριθμο συναίνεσης που αναλύθηκε παραπάνω. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο κανόνας ανανέωση για τις παραμέτρους ελέγχου P_{C_i} και Q_{C_i} . Το βήμα κατάβασης βαθμίδας α , είναι θετική σταθερά και επιλέγεται εμπειρικά.

Η διαδικασία εκτελεί επαναληπτικά τα ακόλουθα βήματα:

1. Τα V_i, δ_i θεωρούνται γνωστά είτε από επίλυση της ροής φορτίου είτε μέσω τοπικών μετρήσεων (έτσι εξασφαλίζεται ότι η συνθήκη $\nabla \mathcal{L}_\lambda = 0$ ικανοποιείται).
2. Οι μεταβλητές κατάστασης εισάγονται στις $2(N - 1)$ εξισώσεις του γραμμικού συστήματος και το λ υπολογίζεται κατανεμημένα επιλύοντας το διακριτό σύστημα (5.28) (ικανοποιώντας τη συνθήκη $\nabla \mathcal{L}_x = 0$).
3. Στη συνέχεια, οι πολλαπλασιαστές λ αντικαθίστανται στην εξίσωση (5.16) και υπολογίζεται το διάνυσμα $\nabla \mathcal{L}_u$, ήτοι κάθε κόμβος υπολογίζει:

$$\nabla \mathcal{L}_{u_i} = \begin{bmatrix} 2c_{P_i} P_{c_i} \\ 2c_{Q_i} Q_{c_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{P_i} \\ \lambda_{Q_i} \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

4. Εάν το διάνυσμα $\nabla \mathcal{L}_u$, δεν ικανοποιεί τη συνθήκη σύγκλισης, τότε οι μεταβλητές ελέγχου κάθε κόμβου ενημερώνονται σύμφωνα με την επόμενη εξίσωση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τη σύγκλιση:

$$\begin{bmatrix} P_{C_i} \\ Q_{C_i} \end{bmatrix}^{t+1} = \begin{bmatrix} P_{C_i} \\ Q_{C_i} \end{bmatrix}^t - \alpha \cdot \nabla \mathcal{L}_{u_i} \quad (5.34)$$

5.2.6. Εναλλακτική προσέγγιση του προβλήματος

Μια εναλλακτική προσέγγιση για τη διατύπωση ενός κανόνα ανανέωσης για τις μεταβλητές ελέγχου χωρίς τη διατύπωση της συνάρτησης Lagrange μπορεί να ληφθεί υπολογίζοντας την κλίση της αρχικής συνάρτησης $F(x, u)$ [146]:

$$\nabla F_u = \frac{\partial F}{\partial u} + \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial u} \quad (5.35)$$

Παρατηρώντας ότι η μήτρα $\frac{\partial x}{\partial u}$ εξαρτάται από τον πεπλεγμένο περιορισμό: $g(x, u) = 0$ και χρησιμοποιώντας το θεώρημα της πεπλεγμένης συνάρτησης:

$$\frac{\partial x}{\partial u} = \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial u} \quad (5.36)$$

Και τελικά η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει:

$$\nabla F_u = \frac{\partial F}{\partial u} + \frac{\partial F}{\partial x} \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial u} \quad (5.37)$$

Και όπως παρατηρείται, το αποτέλεσμα ταυτίζεται με το αποτέλεσμα της προηγούμενης ανάλυσης. Σημειώνεται ότι για λόγους καλύτερης παρουσίασης διατηρήθηκε ο συμβολισμός F αντί για F_{new} για την αντικειμενική συνάρτηση χωρίς αυτό να σημαίνει ότι οι ανισωτικοί περιορισμοί δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη.

5.3. Κατανεμημένος αλγόριθμος ελέγχου τάσης

Μετά την ενσωμάτωση των περιορισμών τάσης στην κατανεμημένη βελτιστοποίηση μέσω των συναρτήσεων ποινής και τη σχεδίαση ενός κατανεμημένου μοντέλου για τον υπολογισμό των συντελεστών λ , παρουσιάζεται η συνολική μέθοδος ρύθμισης τάσης στα πλαίσια της οποίας κάθε κόμβος στο δίκτυο ενεργεί ως ομότιμος και υιοθετεί μια τοπική συμπεριφορά (επικοινωνώντας αποκλειστικά με γειτονικούς κόμβους) η οποία όμως θα επιτύχει τελικά την ολικά βέλτιστη απόφαση. Κάθε κόμβος, θα πρέπει να αποφασίσει δηλαδή για την τοπική έγχυση ΔQ_i και ΔP_i που θα αναιρέσει τις παραβιάσεις τάσης σε όλο το δίκτυο με βέλτιστο τρόπο - ελαχιστοποιώντας δηλαδή την αρχική αντικειμενική συνάρτηση (5.9). Θεωρείται ότι οι κόμβοι είναι σε θέση να ενεργοποιήσουν τον αλγόριθμο ρύθμισης τάσης είτε ανιχνεύοντας κάποια τοπική παραβίαση με τοπικές μετρήσεις είτε λαμβάνοντας κάποιο μήνυμα ενεργοποίησης από γειτονικούς κόμβους. Ο προτεινόμενος κατανεμημένος αλγόριθμος ρύθμισης τάσης περιλαμβάνει δύο επίπεδα εκτέλεσης. Το πρώτο επίπεδο αποτελείται από τον αλγόριθμο κατάβασης βαθμίδας, όπου κάθε κόμβος συμμετέχει στη διαδικασία για να υπολογίσει το u_i^* , έτσι ώστε να καθορίσει τη βέλτιστη λύση για τα ΔP_i^* , ΔQ_i^* . Σε κάθε στάδιο ενημέρωσης του πρώτου επιπέδου, οι κόμβοι υποχρεούνται να ενεργοποιήσουν τον κατανεμημένο αλγόριθμο για τον υπολογισμό των συντελεστών λ (Αλγόριθμος 1). Αυτοί οι υπολογισμοί περιλαμβάνονται στο δεύτερο επίπεδο.

Αλγόριθμος 1: Κατανεμημένος υπολογισμός των πολλαπλασιαστών Lagrange, κόμβος i

1: Αρχικοποίηση

Ανάθεση: $\lambda_{P_i}(0), \lambda_{Q_i}(0), \gamma_{P_i}(0), \gamma_{Q_i}(0)$

/* Αρχικοποίηση και πρώτη εκτίμηση του λ */

2: Επανάληψη:

3: Τοπική ανταλλαγή πληροφοριών

Αποστολή: $V_i(\kappa), \lambda_{P_i}(\kappa), \lambda_{Q_i}(\kappa), \gamma_{P_i}(\kappa), \gamma_{Q_i}(\kappa)$ σε κάθε $j \in N_i$

Λήψη: $V_j(\kappa), \lambda_{P_j}(\kappa), \lambda_{Q_j}(\kappa), \gamma_{P_j}(\kappa), \gamma_{Q_j}(\kappa)$ από κάθε $j \in N_i$

4: Ανανέωση τοπικών συντελεστών λ

Υπολογισμός: $\lambda_{P_i}(\kappa+1), \lambda_{Q_i}(\kappa+1), \gamma_{P_i}(\kappa+1), \gamma_{Q_i}(\kappa+1),$

5: Έως ότου: $|\lambda_{P_i}(\kappa+1) - \lambda_{P_i}(\kappa)| \leq \varepsilon_1, |\lambda_{Q_i}(\kappa+1) - \lambda_{Q_i}(\kappa)| \leq \varepsilon_1$

Η προτεινόμενη μέθοδος ενεργοποιείται όταν εντοπιστεί κάποια παραβίαση τάσης. Το σήμα ενεργοποίησης πρέπει να δοθεί από τουλάχιστον έναν κόμβο και στη συνέχεια διαδίδεται σε όλο το δίκτυο.

Αλγόριθμος 2: Κατανεμημένη ρύθμιση τάσης, κόμβος i

1: Αρχικοποίηση

Ανάθεση: $x_i(0) = [P_i(0), Q_i(0), V_i(0)]$

/ Αρχικοποίηση με την τρέχουσα ενεργό και άεργο έγχυση */*

2: Επανάληψη:

3: Τοπική ανταλλαγή πληροφοριών

Ενεργοποίηση αλγορίθμου 1 για τον υπολογισμό $\lambda_{P_i}, \lambda_{Q_i}$

4: Ενημέρωση μεταβλητών ελέγχου

Υπολογισμός: $P_{C_i}^{t+1}, Q_{C_i}^{t+1}$

5: Μεταβολή εγχύσεων

Μεταβολή έγχυσης ενεργού και άεργου ισχύος: $\Delta P_{C_i}^{t+1}, \Delta Q_{C_i}^{t+1}$

6: Μέτρηση τάσης:

Εάν $V_i < V_{min}$ ή $V_i > V_{max}$ ή άλλη παραβίαση ανισωτικών περιορισμών, εισαγωγή συναρτήσεων ποινής

7: Έως ότου: $\|\nabla \mathcal{L}_{u_i}\| \leq \varepsilon_2$

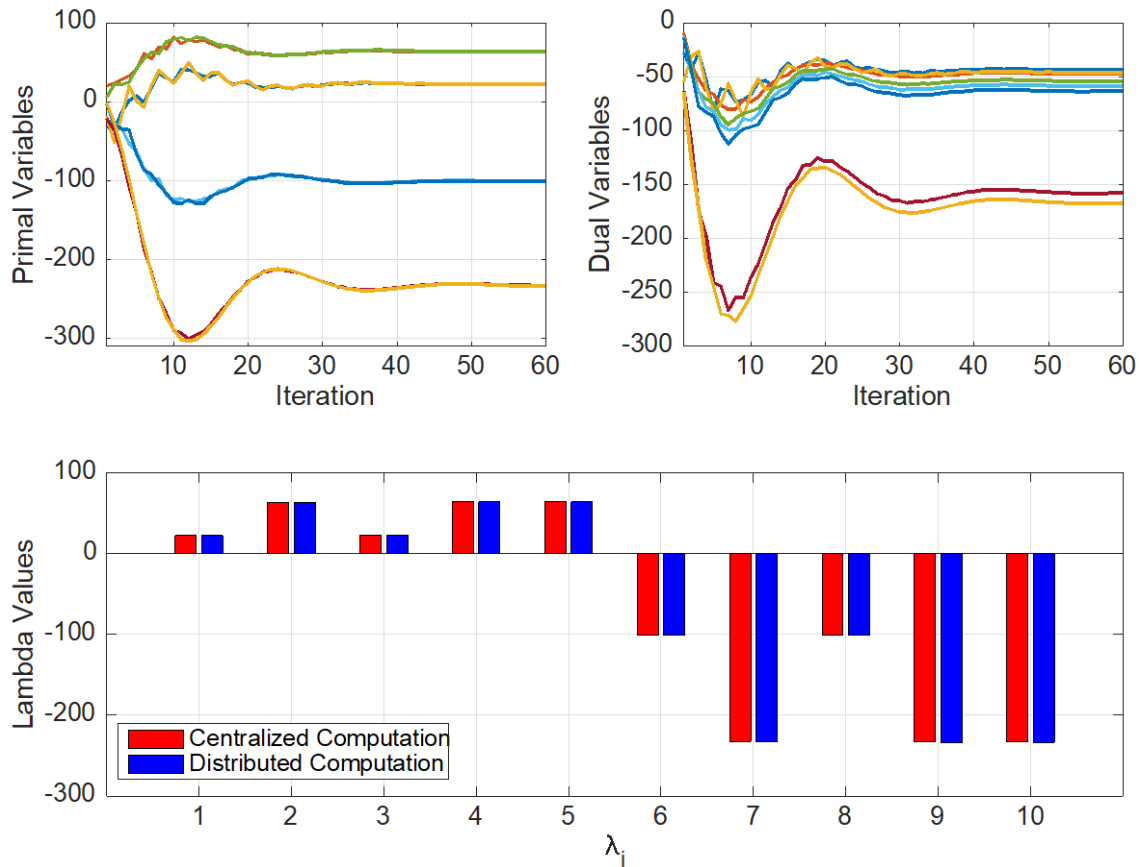
5.4. Εφαρμογές της μεθόδου και αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου καθώς επίσης διερευνώνται ζητήματα πρακτικής εφαρμοσιμότητας. Πρώτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από εφαρμογές του Αλγορίθμου 1 και στη συνέχεια οι προσομοιώσεις της μεθόδου ρύθμισης τάσης για ένα απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων και στη συνέχεια για ένα μεγαλύτερο σύστημα, το πρότυπο ΔΔ 123 ζυγών της IEEE. Για το πρώτο δίκτυο, εξετάζονται 3 διαφορετικές περιπτώσεις στις οποίες λαμβάνονται παραδοχές ανάλογα με τις τεχνολογίες ευφυών ΔΔ με τις οποίες το δίκτυο θεωρείται ότι είναι εξοπλισμένο. Τα δύο πρώτα σενάρια κάνουν την παραδοχή ότι οι μετρήσεις φασικών γωνιών δεν είναι διαθέσιμες (στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται η προσέγγιση $\sin\varphi_{ij} \approx \sin\theta_{ij}$), ενώ στην τρίτη περίπτωση, οι γωνίες θεωρούνται διαθέσιμες (από Μετρητές Φάσης).

5.4.1. Εξέταση κατανεμημένου υπολογισμού των πολλαπλασιαστών Lagrange

Οι πολλαπλασιαστές Lagrange υπολογίζονται για το απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων που έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 4 και Σχήμα 4-2 οι παράμετροι του οποίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1. Οι τιμές των συντελεστών υπολογίζονται με την κατανεμημένη επίλυση του γραμμικού συστήματος εξισώσεων. Οι επαναλήψεις των πρωτεύουσών καθώς και των δυικών μεταβλητών μέχρι τη σύγκλιση και το τελικό υπολογισμό των συντελεστών δίνονται στο Σχήμα 5-3. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5-3 (α) εμφανίζονται οι επαναλήψεις

και η σύγκλιση των πρωτευουσών μεταβλητών (συντελεστές λ), ενώ στο Σχήμα 5-3 (β) δίνεται το αντίστοιχο γράφημα για τις δυικές μεταβλητές (ο υπολογισμός των δυικών μεταβλητών στο σύστημα (5.28) δεν έχει κάποια άλλη εφαρμογή στον αλγόριθμο ρύθμισης τάσης πέρα από τον υπολογισμό των συντελεστών λ , οι οποίοι τροφοδοτούνται στη συνέχεια τον Αλγόριθμο 2). Ο αριθμός των απαιτούμενων επαναλήψεων και η ακρίβεια της λύσης εξαρτώνται από το όριο ανοχής που τίθεται στο κριτήριο σύγκλισης. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5-3, για ένα σύστημα που αποτελείται από $2(N - 1) = 10$ εξισώσεις, χρειάζονται περίπου 60 επαναλήψεις για την επίτευξη ακρίβειας μεγαλύτερη από 1%.

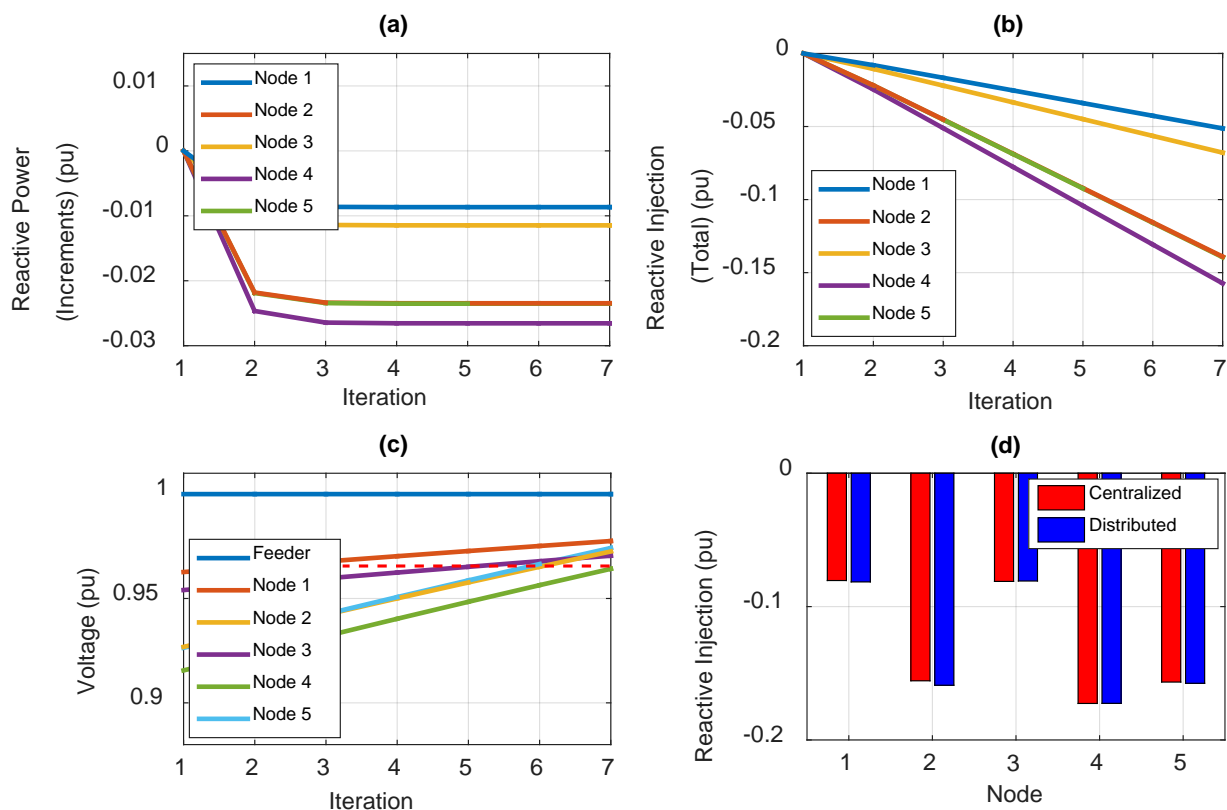


Σχήμα 5-3 Κατανεμημένη επίλυση του γραμμικού συστήματος χρησιμοποιώντας μοντέλο πρωτεύουσας-δυικής βελτιστοποίησης (α) - πάνω αριστερά: επαναλήψεις πρωτευουσών μεταβλητών, (β) - πάνω δεξιά: επαναλήψεις δυικών μεταβλητών και (c)- κάτω: σύγκριση με τα αποτελέσματα της κλασσικής μεθόδου αντιστροφής της Ιακωβιανής μήτρας.

5.4.2. Απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων – Έλεγχος αέργου ισχύος

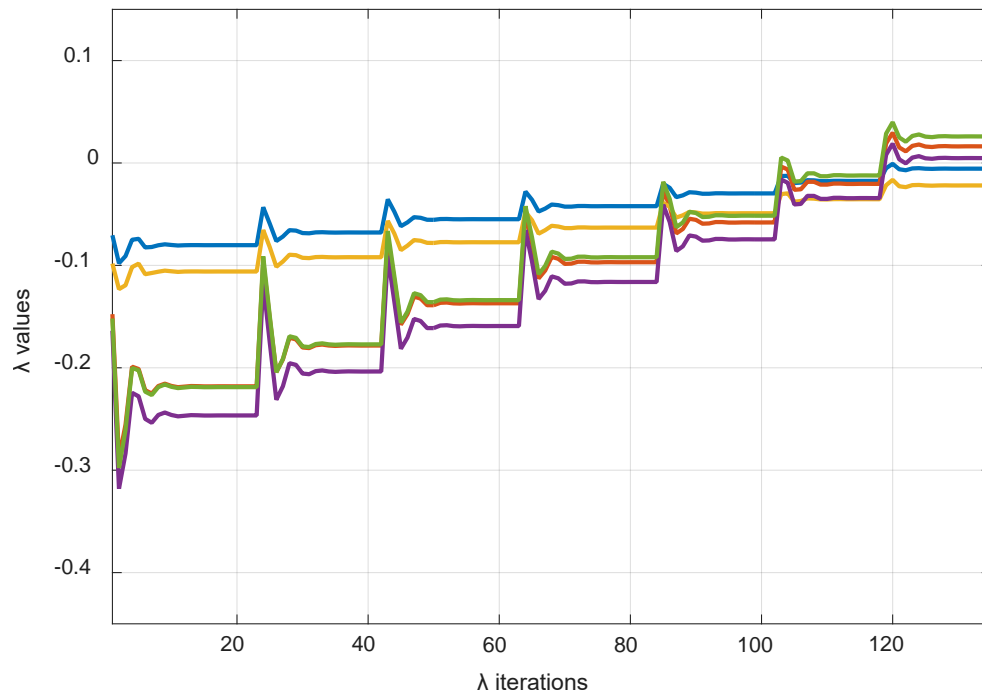
Στο πρώτο σενάριο, το απλοποιημένο ΔΔ 6 ζυγών θεωρείται ότι διαθέτει 5 μονάδες ΔΠ (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-2), με δυνατότητα ελέγχου της έγχυσης αέργου ισχύος (η οποία βέβαια περιορίζεται από την μέγιστη φαινόμενη ισχύ και την ενεργό ισχύ στην οποία λειτουργεί για το συγκεκριμένο σενάριο). Οι μονάδες ΔΠ μετρούν την τάση τους και ανταλλάσσουν μηνύματα με τους γείτονές τους. Η ενεργοποίηση του αλγορίθμου ελέγχου τάσης δίνεται από τουλάχιστον έναν κόμβο ο οποίος ανιχνεύει την παραβίαση της τάσης.

Για λόγους απλότητας, σε αυτό το σενάριο εξετάζονται μόνο εγχύσεις αέργου ισχύος. Οι διαφορές γωνίας φάσης των παρακείμενων κόμβων ($\delta_i - \delta_j$), θεωρούνται αρκετά μικρές ώστε να παραλείπονται από το μοντέλο. Η μεταβολή της έγχυσης αέργου ισχύος ανά κόμβο, ανά επανάληψη ($\alpha \cdot \nabla \mathcal{L}_{u_i}$) και η συνολική έγχυση αέργου ισχύος απεικονίζονται στο Σχήμα 5-4 (a) και (b), αντίστοιχα. Στο Σχήμα 5-4 (c) παρουσιάζονται οι τάσεις των κόμβων σε κάθε επανάληψη της μεθόδου, ενώ στο Σχήμα 5-4 (d), το τελικό αποτέλεσμα συγκρίνεται με το αποτέλεσμα της κεντρικής βελτιστοποίησης.

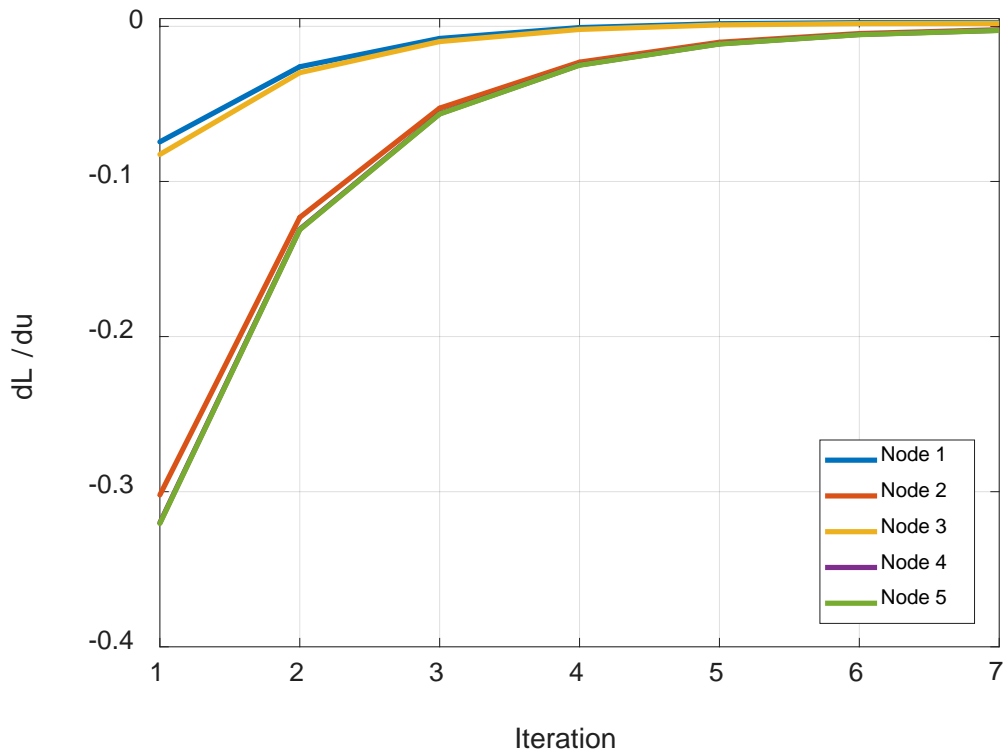


Σχήμα 5-4 Αποτελέσματα της μεθόδου από την εφαρμογή στο απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων. (a): μεταβολή στην άεργο έγχυση ανά επανάληψη, (b) συνολική άεργος έγχυση ανά επανάληψη, (c): τάσεις των κόμβων για κάθε επανάληψη, (d): σύγκριση των αποτελεσμάτων με την κεντρική μέθοδο.

Στο Σχήμα 5-5 φαίνεται ο κατανεμημένος υπολογισμός των πολλαπλασιαστών για κάθε μια από τις 7 επαναλήψεις του Αλγορίθμου 2. Κάθε κόμβος λαμβάνει πληροφορίες μόνο από τη γειτονιά του και υπολογίζει τον κατάλληλο πολλαπλασιαστή Lagrange προκειμένου να τον τροφοδοτήσει στον Αλγόριθμο 2 και να ανανεώσει τη μεταβλητή απόφασής του. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του Αλγορίθμου 2 δηλ. $\|\nabla \mathcal{L}_{u_i}\| \leq \varepsilon_2$. Όταν ο αλγόριθμος τερματίσει, οι τιμές των παραμέτρων ελέγχου παραμένουν αμετάβλητες (έως ότου κάποια καινούργια παραβίαση τάσης τον ενεργοποιήσει εκ νέου). Τέλος, στο Σχήμα 5-6 παρουσιάζονται οι τιμές $\nabla \mathcal{L}_{u_i}$ κάθε κόμβου για κάθε επανάληψη μέχρι την ικανοποίηση του κριτηρίου σύγκλισης και τον τερματισμό του αλγορίθμου.



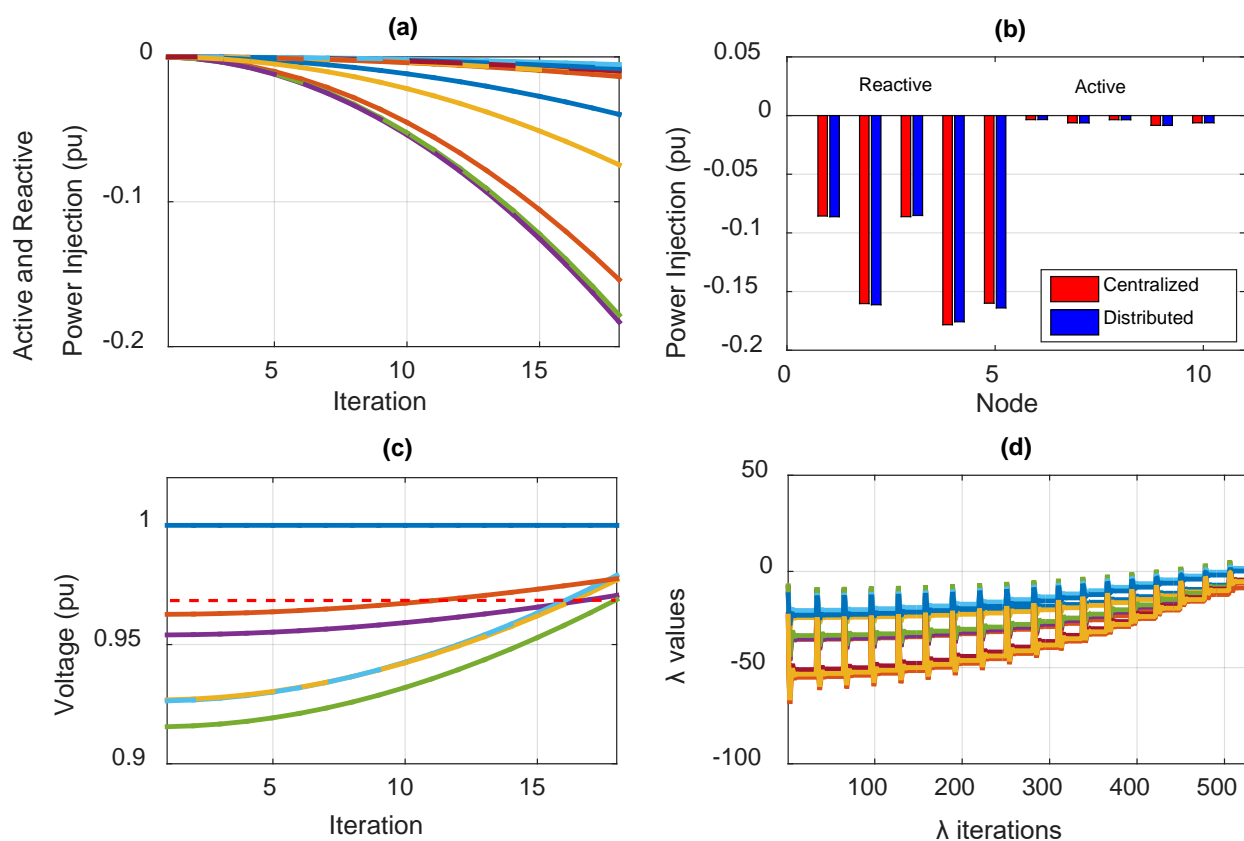
Σχήμα 5-5 Κατανομημένος υπολογισμός των πολλαπλασιαστών κάθε κόμβου για τις 7 επαναλήψεις του Αλγορίθμου 2 που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-4.



Σχήμα 5-6 Κλίση $\nabla \mathcal{L}_{u_i}$ κάθε κόμβου για κάθε επανάληψη.

5.4.3. Απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων – Έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος

Σε αυτή την περίπτωση, εξετάζονται και μεταβολές στην ενεργό ισχύ, υποθέτοντας ότι είτε οι ΔΠ έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν την παραγωγή τους είτε ότι ορισμένοι κόμβοι διαθέτουν ελεγχόμενα ευέλικτα φορτία που συμμετέχουν στον αλγόριθμο για τη ρύθμιση της τάσης. Οι συντελεστές κόστους της ενεργού ισχύος, c_{P_i} επιλέγονται πολύ υψηλότεροι σε σχέση με τους αντίστοιχους για τα κόστη της αέργου ισχύος c_{Q_i} , δεδομένου ότι η μέθοδος στοχεύει στην υψηλότερη δυνατή εκμετάλλευση της διαθέσιμης αέργου ισχύος για την επίλυση του προβλήματος και στην περίπτωση που δεν αυτή δεν επαρκεί, την αξιοποίηση και της ενεργού. Ο αριθμός των πολλαπλασιαστών Lagrange είναι $2(N - 1) = 10$ και κάθε κόμβος είναι υπεύθυνος για τον υπολογισμό 2 από τους προηγούμενους. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της μεθόδου δίνονται στο Σχήμα 5-7. Στο Σχήμα 5-7 (b), οι εγχύσεις ενεργού ισχύος αντιστοιχούν σε περικοπή φορτίου ή ισοδύναμα στην αύξηση της παραγωγής ενεργού ισχύος από μονάδες ΔΠ.



Σχήμα 5-7 Αποτελέσματα της μεθόδου από την εφαρμογή στο απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων. (a): συνολική έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος ανά επανάληψη, (b): σύγκριση των αποτελεσμάτων με την κεντρική μέθοδο, (c): τάσεις κόμβων ανά επανάληψη, (d): κατανεμημένος υπολογισμός των πολλαπλασιαστών κάθε κόμβου για κάθε επανάληψη του Αλγορίθμου 2.

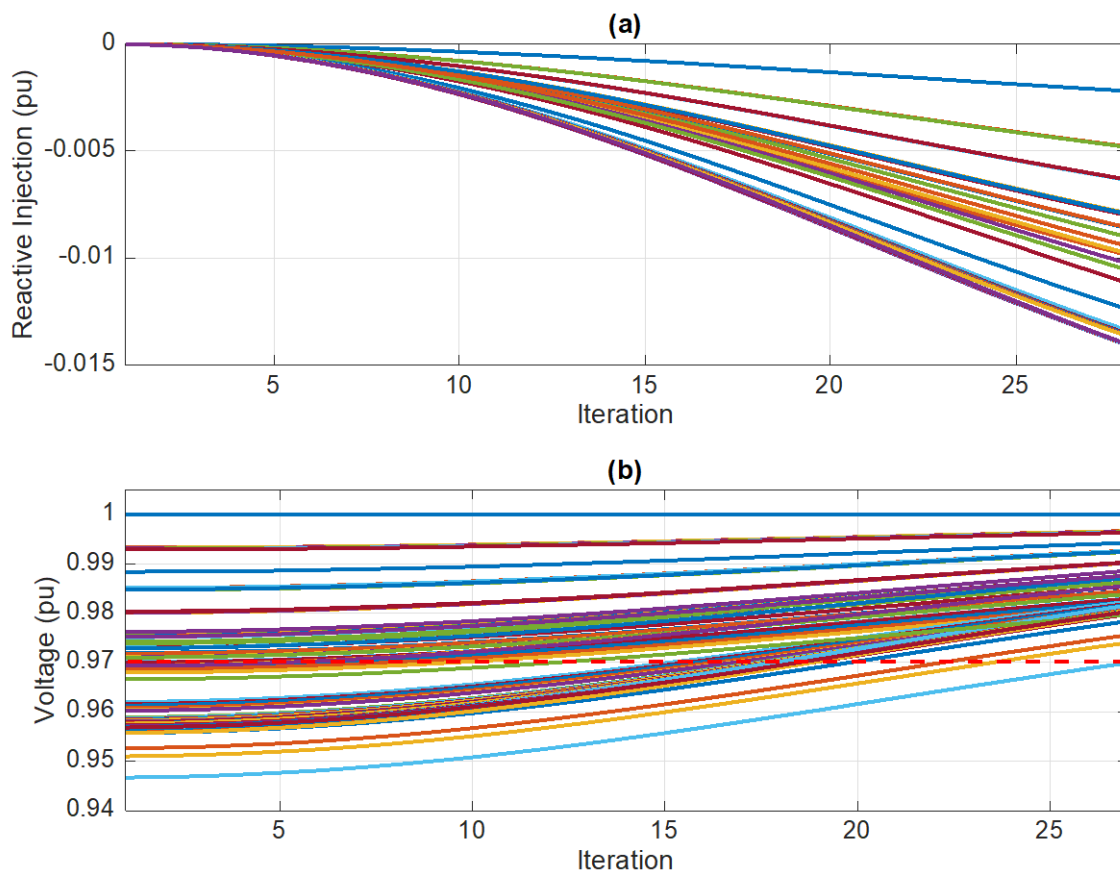
Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της αξιοποίησης της ευελιξίας ενεργού ισχύος μαζί με την άεργο, εξετάζονται διαφορετικοί συνδυασμοί για τη σχέση μεταξύ των συντελεστών κόστους. Στον Πίνακα 5-1 συγκρίνονται τα αποτελέσματα για τα διαφορετικά σενάρια.

Πίνακας 5-1 Συνολική ενεργός και άεργος ισχύς για διαφορετικούς συντελεστές κόστους.

Τύπος έγχυσης	Συντελεστές κόστους	Συνολική άεργος ισχύς (α.μ.)	Συνολική ενεργός ισχύς (α.μ.)
Μόνο άεργος	$c_{P_i} \gg c_{Q_i}$	0.64	0
Ενεργός και άεργος	$c_{P_i} = 10 \cdot c_{Q_i}$	0.58	0.044
Ενεργός και άεργος	$c_{P_i} = c_{Q_i}$	0.359	0.27

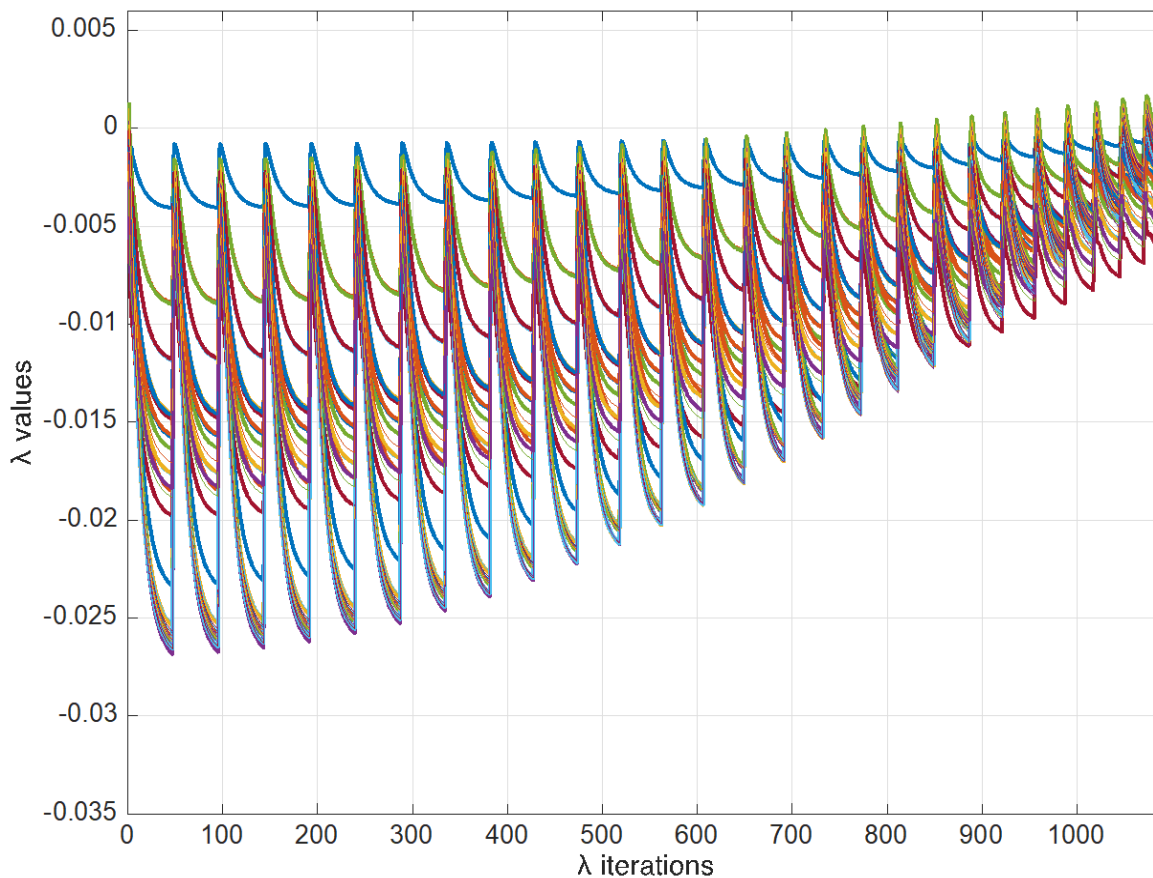
5.4.4. Εφαρμογή σε τροποποιημένο πρότυπο ΔΔ 123 ζυγών της IEEE

Η μέθοδος εφαρμόστηκε στο τροποποιημένο ΔΔ της IEEE 123 ζυγών που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3 στο Σχήμα 3-20 και διαθέτει 39 μονάδες ΔΠ. Σε αυτήν την περίπτωση έγινε η θεώρηση ότι οι μονάδες ΔΠ ελέγχουν μόνο την έγχυση αέργου ισχύος και οι αντίστοιχοι συντελεστές κόστους τους ορίστηκαν $c_{Q_i} = 1$.



Σχήμα 5-8 Αποτελέσματα της μεθόδου για το τροποποιημένο ΔΔ της IEEE 123 ζυγών. (a): συνολική έγχυση αέργου ισχύος ανά επανάληψη, (b): τάσεις κόμβων.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται στο Σχήμα 5-8, ενώ στο Σχήμα 5-9, φαίνεται ο κατανεμημένος υπολογισμός των συντελεστών λ για τις 27 διαδοχικές εκτελέσεις του Αλγορίθμου 1. Οι κόμβοι χωρίς μονάδες ΔΠ συμμετέχουν στους υπολογισμούς διατηρώντας μηδενικά τεχνικά όρια για την έγχυση αέργου ισχύος.



Σχήμα 5-9 Κατανεμημένος υπολογισμός των συντελεστών λ για το τροποποιημένο ΔΔ της IEEE 123 ζυγών, οι οποίοι αντιστοιχούν στις επαναλήψεις του Αλγορίθμου 2 που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-8.

5.4.5. Συγκρίσεις και συζήτηση των αποτελεσμάτων

Στον παρακάτω πίνακα, δίνεται ο απαιτούμενος αριθμός των επαναλήψεων για τους Αλγορίθμους 1 και 2 και η ακρίβεια της μεθόδου συγκρίνεται με την κεντρική προσέγγιση. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που οι διαφορές φασικών γωνιών θεωρούνται αρκετά μικρές για να παραληφθούν, το συνολικό σφάλμα της λύσης δεν είναι σημαντικά αυξημένο σε σύγκριση τη περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη. Το τελικό σφάλμα που προκύπτει αποδίδεται επίσης και στην επιλογή του κριτηρίου ανοχής για τον τερματισμό των αλγορίθμων, καθώς επίσης και στην επιλογή του βήματος ανανέωσης των μεταβλητών απόφασης. Ένα μικρότερο βήμα βελτιώνει την ακρίβεια σε βάρος όμως της αύξησης του αριθμού επαναλήψεων.

5.4. Εφαρμογές της μεθόδου και αποτελέσματα

Πίνακας 5-2 Απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων και ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου για διαφορετικά σενάρια δοκιμών.

Εφαρμογή	Επαναλήψεις Αλγορίθμου 2	Συνολικές επαναλήψεις	Σφάλμα (%)
Απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων – Έλεγχος αέργου ισχύος	7	135	1,83
Απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων – Έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος	18	533	1,91
Απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων – Έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος και ενσωμάτωση των φασικών γωνιών	18	582	1,57
ΔΔ 123 ζυγών της IEEE	27	1092	3,14

Όπως φαίνεται, ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων της μεθόδου για τη σύγκλιση εξαρτάται από το μέγεθος του προβλήματος. Ωστόσο, μπορεί να μειωθεί σημαντικά όταν χρησιμοποιούνται κατάλληλες αρχικές τιμές (λ και γ). Στον Πίνακα 5-3, ενδιαφέροντα συμπεράσματα προκύπτουν από τη σύγκριση των επιδόσεων του αλγορίθμου για διαφορετικά μεγέθη δικτύου. Ειδικότερα, με τον υπολογισμό του μέσου αριθμού επαναλήψεων ανά επανάληψη του Αλγορίθμου 2 (δηλ. τις ανανεώσεις των παραμέτρων ελέγχου) παρατηρείται μια εξαιρετικά επεκτάσιμη συμπεριφορά.

Πίνακας 5-3 Απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων για διαφορετικά μεγέθη δικτύων.

Εφαρμογή	Επαναλήψεις Αλγορίθμου 2	Μέση τιμή αριθμού επαναλήψεων Αλγορίθμου 1	Συνολικές επαναλήψεις
Απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων	7	19,28	135
ΔΔ 34 ζυγών της IEEE	13	25,9	337
ΔΔ 69 ζυγών της IEEE	20	33,8	676
ΔΔ 123 ζυγών της IEEE	27	40,44	1092

Η μέθοδος για την ενσωμάτωση των ανισωτικών περιορισμών χρησιμοποιώντας συναρτήσεις ποινής εμφανίζει την πολύ σημαντική ιδιότητα για την εφαρμογή ελέγχου τάσης σε πραγματικό χρόνο, της αποτελεσματικής αντιμετώπισης των μη εφικτών αρχικών σημείων. Γενικά η μέθοδος συντελεστών ποινής προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα όπως αυξημένη ευρωστία σε συνδυασμό με μια σχετικά απλή υλοποίηση. Από την άλλη πλευρά, το μειονέκτημα της χρήσης μεθόδων ποινής για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με περιορισμούς είναι ότι ορισμένοι περιορισμοί ενδέχεται να παραβιαστούν (για αυτό και οι περιορισμοί με συναρτήσεις ποινής ονομάζονται ελαστικοί περιορισμοί). Η α-

κριβής προσαρμογή των συντελεστών ποινής μπορεί ωστόσο να διασφαλίσει ότι η παραβίαση των περιορισμών διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα (κάτω του 0,7%), όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5-4. Για την περίπτωση του ελεγχόμενου αντιστροφέα, ο οποίος απαιτεί απόλυτους περιορισμούς (hard constraints) για τα όρια ενεργού και αέργου ισχύος, γίνεται η παραδοχή ότι ο αντιστροφέας θα εφαρμόσει μόνο την εφικτή τιμή, δηλαδή εάν $Q_{C_i}^*$ υπερβαίνει ελαφρώς το Q_{limit_i} , τότε ο μετατροπέας θα εφαρμόσει το Q_{limit_i} . Δεδομένου όμως ότι $Q_{C_i}^* \cong Q_{limit_i}$ το συνολικό σφάλμα που αυτό θα προκαλέσει στην βέλτιστη λύση θα είναι αμελητέο. Στον Πίνακα 5-4, διερευνάται πώς οι συντελεστές ποινής επηρεάζουν την αποδοτικότητα του αλγορίθμου όσον αφορά τις απαιτούμενες επαναλήψεις, την ευστάθεια καθώς επίσης και την παραβίαση των περιορισμών για το σενάριο προσομοίωσης που παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.4.2. Στις τρεις πάνω στήλες, δίνεται η ταχύτητα σύγκλισης και η παραβίαση των περιορισμών τάσης για διαφορετικές τιμές του συντελεστή ποινής, διατηρώντας παράλληλα όλες τις άλλες παραμέτρους του αλγορίθμου στις ίδιες τιμές. Επιπλέον, η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τους συντελεστές ποινής της αέργου ισχύος (διατηρώντας σε αυτήν την περίπτωση σταθερούς τους συντελεστές ποινής των περιορισμών τάσης) και τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις τρεις κάτω στήλες του Πίνακα 5-4.

Πίνακας 5-4 Ταχύτητα σύγκλισης και παραβίαση περιορισμών για διαφορετικούς συντελεστές ποινής.

Συντελεστές (βαθμός κλίσης) των συναρτήσεων ποινής για τους περιορισμούς τάσης	Επαναλήψεις αλγορίθμου 2	Παραβίαση περιορισμών τάσης (%) (Χειρότερη περίπτωση)
0	9	1,98
20	8	0,1
27	7	-0,08
50	6	-0,39
100	87	-0,63
125	Ασταθής	-
Συντελεστές (βαθμός κλίσης) των περιορισμών αέργου ισχύος για συντελεστή περιορισμών τάσης = 27	Επαναλήψεις αλγορίθμου 2	Παραβίαση περιορισμών αέργου (%) (Χειρότερη περίπτωση)
0	7	25,3
5	7	3,5
10	7	0,7
20	13	-1,15
50	34	-4,0
100	Ασταθής	-

5.4.6. Εκτίμηση χρόνου σύγκλισης

Στα πλαίσια της μελέτης της πρακτικής εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου, εξετάζεται ο απαιτούμενος χρόνος σύγκλισης των σεναρίων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Τέσσερις διαφορετικές τεχνολογίες επικοινωνιών μελετήθηκαν για την εκτίμηση του χρόνου σύγκλισης: η τεχνολογία επικοινωνίας γραμμής ρεύματος (Power Line Communication - PLC) [147], η τεχνολογία κυψελοειδών ασύρματων δικτύων κατά το πρότυπο LTE [148], η αναδυόμενη τεχνολογία των κυψελοειδών ασύρματων δικτύων πέμπτης γενιάς (5G) [149] και τέλος ένα τοπικό δίκτυο Ethernet με πρωτόκολλο IPv4 σε πραγματικό πεδίο δοκιμών για καινοτόμες εφαρμογές ευφών δικτύων [150]. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ένας εμπορικός Φ/Β αντιστροφέας με δυνατότητα ελέγχου της έγχυσης ενεργού και αέργου ισχύος του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου [151]. Ο εργαστηριακός αντιστροφέας χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να υπολογισθεί ο απαιτούμενος χρόνος t_{inv} , που απαιτείται στην πράξη μεταξύ της στιγμής που δίνεται μια εντολή για κάποιο σημείο ρύθμισης της ισχύος εξόδου και της στιγμής κατά την οποία η τιμή ρύθμισης έχει πραγματικά εφαρμοστεί από τη συσκευή.

Ο συνολικός χρόνος σύγκλισης υπολογίσθηκε ως εξής:

$$t_{total} = (t_c + t_s) \cdot N_{TotIter} + t_{inv} \cdot N_{GrIter} \quad (5.38)$$

Όπου t_c είναι ο υπολογιστικός χρόνος για κάθε επανάληψη, t_s ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοση μηνυμάτων στους γείτονες, $N_{TotIter}$ ο αριθμός των συνολικών επαναλήψεων του σεναρίου υπό μελέτη και N_{GrIter} ο αριθμός των ανανεώσεων των μεταβλητών έγχυσης. Ο χρόνος t_{inv} , πολλαπλασιάζεται με το N_{GrIter} , δεδομένου ότι κάθε φορά που λαμβάνεται νέα απόφαση για την έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος σε έναν κόμβο (δηλαδή όταν οι μεταβλητές ελέγχου του κόμβου ενημερώνονται), εισάγεται μια καθυστέρηση μέχρι την εφαρμογή του νέου σημείου ρύθμισης ισχύος εξόδου του αντιστροφέα. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της κατανομημένης αρχιτεκτονικής είναι ότι μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι ο χρόνος μετάδοσης t_s δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τα διαφορετικά μεγέθη του δικτύου, αφού τα μηνύματα ανταλλάσσονται μόνο μεταξύ γειτόνων.

Για τις τρεις πρώτες τεχνολογίες επικοινωνίας, η καθυστέρηση (latency) λαμβάνεται από πειραματικά αποτελέσματα σύγχρονων μελετών, υιοθετώντας τα σενάρια χειρότερης περίπτωσης, ώστε να ευρεθεί ένα ανώτερο όριο για το χρόνο σύγκλισης. Για την περίπτωση του πεδίου δοκιμών, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις διατηρώντας την τηλεπικοινωνιακή τοπολογία του απλοποιημένου συστήματος 6 κόμβων που φαίνεται στο Σχήμα 4-2. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εκτιμώμενων (και μετρημένων, όπου είναι δυνατόν) συνολικών χρόνων σύγκλισης για τις διάφορες περιπτώσεις. Θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι οι υπολογισμένοι χρόνοι σύγκλισης, παρότι υπερβολικά απαισιόδοξοι, εξακολουθούν να είναι σαφώς αποδεκτοί για μια μέθοδο που στοχεύει στην αντιμετώπιση των παραβιάσεων της τάσης στο δευτερεύον επίπεδο ελέγχου.

Πίνακας 5-5 Χρόνος σύγκλισης για διαφορετικές τεχνολογίες επικοινωνίας.

Τύπος	Υποτιθέμενη καθυστέρηση χειρότερης περίπτωσης	Συνολικός χρόνος για κάθε σενάριο	
		Απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων – Έλεγχος α-έργου ισχύος	Πρότυπο ΔΔ 123 ζυγών της IEEE
PLC	200ms	45s	5,08min
κυψελοειδή ασύρματα LTE	100ms	31,55s	3,26min
κυψελοειδή ασύρματα 5G	40ms	23,45s	2,17min
IPv4 σε Ethernet (πραγματικό πεδίο δοκιμών)	170ms	41s	4,54min

5.4.7. Συζήτηση σχετικά με τις απαιτήσεις για συστήματα εποπτείας

Η αρχική υπόθεση που έγινε κατά την ανάλυση της προτεινόμενης μεθόδου και αναφέρεται στη διαθεσιμότητα ΕΗΣ και κατ' επέκταση μετρήσεων σε όλους τους ηλεκτρικούς κόμβους του ΔΔ, παρότι δεν ανταποκρίνεται στη σημερινή πραγματικότητα των ΔΔ, ευθυγραμμίζεται όπως έχει αναλυθεί και στην εισαγωγική ενότητα με την υπάρχουσα τάση για συνεχή αύξηση των ευφύων συσκευών στη διανομή. Ήδη στις μέρες μας ένας σημαντικός αριθμός ΕΗΣ χρησιμοποιούνται για τον αποδοτικότερο έλεγχο και την εποπτεία διαφόρων στοιχείων των ΔΔ [152]. Λαμβάνοντας υπόψη τη συνεχιζόμενη μετάβαση σε ένα πιο ενεργό ΔΔ, οι ακόλουθες προοπτικές υποστηρίζουν την πρακτική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου:

1) Η χρήση δεδομένων από έξυπνους μετρητές, ο αριθμός των οποίων αυξάνεται με αλματώδεις ρυθμούς σε πολλές χώρες. Σε αυτή την περίπτωση, οι διαφορές γωνίας φάσης μεταξύ γειτονικών κόμβων μπορούν είτε να υπολογιστούν έμμεσα είτε να θεωρηθούν αρκετά μικρές και παραλειφθούν από το μοντέλο. Η παράλειψη αυτών των διαφορών θα οδηγούσε σε μια μικρή (αλλά αποδεκτή) αύξηση του σφάλματος της τελικής λύσης (όπως προκύπτει και από τον Πίνακα 5-2).

2) Η ευρεία χρήση μικρο-Μετρητών Φάσης (μPMUs) στο επίπεδο της διανομής. Τα τελευταία χρόνια, οι πλήρως ενσωματωμένοι μικρο-μετρητές φάσης τραβούν ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον λόγω του ιδιαίτερα χαμηλού τους κόστους, της δομοστοιχειακής (modular) αρχιτεκτονικής τους [153] και της ικανότητάς τους να επιτρέπουν συγχρονισμένες τριφασικές μετρήσεις τάσης/ρεύματος τόσο σε δίκτυα διανομής μέσης όσο και χαμηλής τάσης [154].

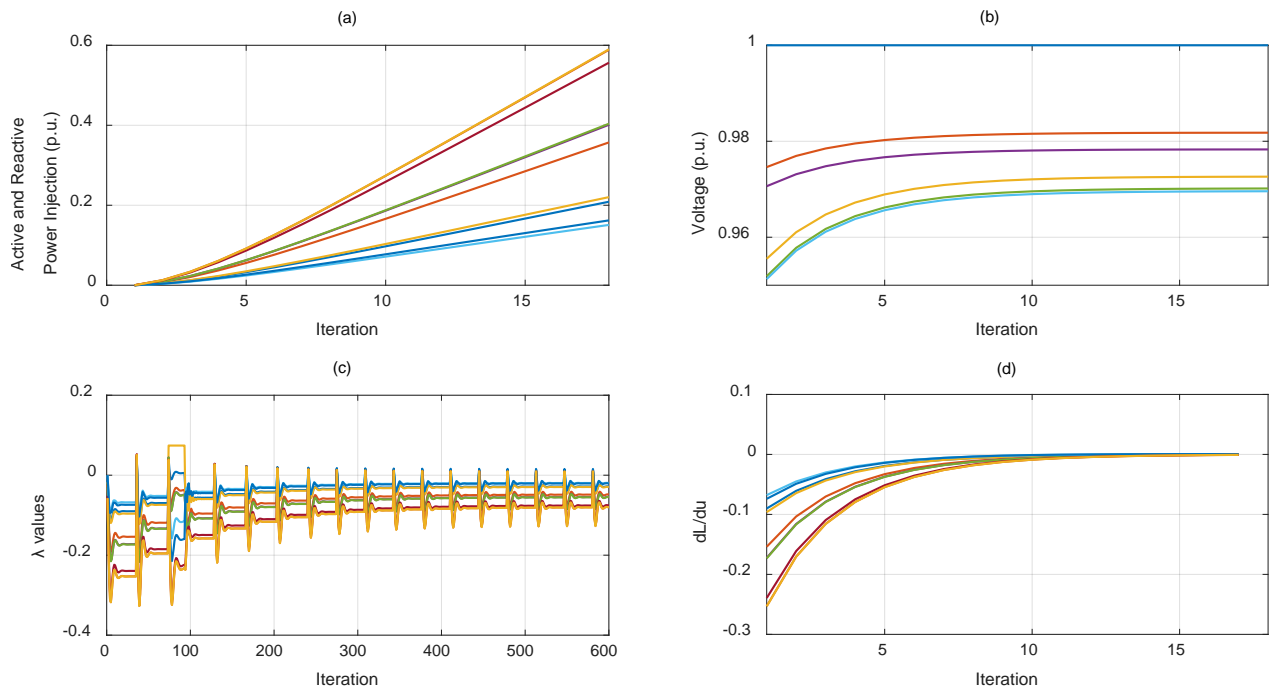
3) Η εφαρμογή μεθοδολογιών βέλτιστης τοποθέτησης των μPMUs, οι οποίες θα επιτρέπουν τη χρήση έμμεσων μετρήσεων σε ορισμένους κόμβους (δηλαδή εκτιμώμενων από τις άμεσες μετρήσεις), μειώνοντας επομένως τον απαιτούμενο αριθμό μPMUs που απαιτείται να εγκατασταθούν [155].

5.4.8. Διερεύνηση της μεθόδου σε περίπτωση που καθεί η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ των κόμβων

Ακολουθώντας την ανάλυση του κεφαλαίου 4.4.5 και παρατηρώντας ότι η προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης τάσης χρησιμοποιεί το ίδιο κατανομημένο μοντέλο για την έμμεση αντιστροφή της Ιακωβιανής μήτρας με το Κεφάλαιο 4, πραγματοποιούνται οι αντίστοιχες προσομοιώσεις και τα αποτελέσματα δίνονται στον επόμενο πίνακα. Στο Σχήμα 5-10 φαίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου για απώλεια ενός κόμβου στο απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων με έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος, όπου στην τρίτη επανάληψη του αλγορίθμου 2, ο κόμβος 3 αποκόπηκε από το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο.

Πίνακας 5-6 Απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων και ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου για διαφορετικά σενάρια απώλειας τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων μεταξύ των κόμβων.

Μελέτη	Απώλεια 1 κόμβου	Απώλεια $\sim N/2$ κόμβων	Απώλεια όλων των κόμβων	
			(μικρή διάρκεια)	(μεγάλη διάρκεια)
	Αριθμός επαναλήψεων			
Απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων (αέργος)	231	619	623	1115
Απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων (ενεργός και αέργος)	616	1418	1505	1967
ΔΔ 123 ζυγών της IEEE	1107	1139	1715	6060



Σχήμα 5-10 Αποτελέσματα της μεθόδου για απώλεια ενός κόμβου στο απλοποιημένο ΔΔ 6 κόμβων. (a): Ενεργός και άεργος έγχυση ανά επανάληψη, (b): τάσεις των κόμβων για κάθε επανάληψη, (c): κατανεμημένος υπολογισμός πολλαπλασιαστών κάθε κόμβου για κάθε επανάληψη του Αλγορίθμου 2, (d): κλίση $\nabla \mathcal{L}_{u_i}$ κάθε κόμβου για κάθε επανάληψη.

5.4.1. Διερεύνηση της ακρίβειας της γραμμικοποίησης των εξισώσεων ροής φορτίου όταν αμελούνται οι φασικές γωνίες

Σε αυτό το σημείο διερευνάται το σφάλμα του γραμμικοποιημένου μοντέλου βέλτιστης ροής φορτίου στην περίπτωση που δεν λαμβάνονται υπόψη οι γωνίες των τάσεων. Επιπρόσθετα αποπειράται να αναγνωριστούν οι συνθήκες που θα πρέπει να ισχύουν στο υπό μελέτη δίκτυο έτσι ώστε το σφάλμα στην εξαγόμενη λύση να είναι αποδεκτό. Για τις ανάγκες αυτής της ανάλυσης, δίνεται μια προσεγγιστική έκφραση των εξισώσεων ροής φορτίου κάθε κόμβου (ενεργός και άεργος έγχυση σε κάθε κόμβο) μέσω της γραμμικοποίησής τους:

$$\begin{aligned} P_i &= G_{ij}(2|V_i| - 1) + \sum_{j=1}^N (G_{ij}(|V_i| + |V_j| - 1) + B_{ij}(\delta_i - \delta_j)) \\ Q_i &= -B_{ij}(2|V_i| - 1) + \sum_{j=1}^N (G_{ij}(\delta_i - \delta_j) - B_{ij}(|V_i| + |V_j| - 1)) \end{aligned} \quad (5.39)$$

Παρατηρώντας τις παραπάνω εξισώσεις εύκολα προκύπτει ότι οι σχετικοί με το υπό διερεύνηση σφάλμα όροι είναι οι διαφορές γωνιών μεταξύ των γειτονικών κόμβων δηλαδή ο όρος $B_{ij}(\delta_i - \delta_j)$ στην ενεργό έγχυση και ο όρος $G_{ij}(\delta_i - \delta_j)$ στην άεργο έγχυση. Κατά συνέπεια γίνεται η υπόθεση ότι μια ενδεχομένως προβληματική περίπτωση στην οποία το σφάλμα θα αυξάνονταν, θα ήταν η περίπτωση εκείνη στην οποία εμφανίζεται αλλαγή προσήμου μεταξύ των φασικών γωνιών γειτονικών κόμβων. Η εμφάνιση μιας αλλαγής προσήμου μεταξύ δύο κόμβων i και j σε ένα ακτινικό δίκτυο σημαίνει πρακτικά ότι η ροή ισχύος από τον ανάντη κόμβο του i έχει αντίθετη φορά από τη ροή ισχύος από τον κατάντη κόμβο j προς τον i . Επιπρόσθετα, στην περίπτωση που η διαφορά των φασικών γωνιών δεν είναι αρκετά μικρή, παρατηρείται ότι ανάλογα με τη σχέση μεταξύ του πραγματικού και φανταστικού μέρους της μήτρας αγωγιμοτήτων, το σφάλμα υπολογισμού της ενεργού εγχύσεως θα είναι διαφορετικό από το σφάλμα υπολογισμού της άεργου εγχύσεως και αναμένεται τελικά να σχετίζεται με το λόγο r/x . Συγκεκριμένα για την αγωγιμότητα ενός κλάδου ισχύει:

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \cdot \frac{(r_{ij} - jx_{ij})}{(r_{ij} - jx_{ij})} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} - j \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} = g_{ij} + jb_{ij}$$

και παίρνοντας $\frac{r_{ij}}{x_{ij}} = \varphi_{ij}$ προκύπτει $\frac{g_{ij}}{b_{ij}} = -\varphi_{ij}$. Συμπερασματικά, μπορούν να εξαχθούν κάποιες γενικές κατευθύνσεις ανάλογα με τη φύση του προβλήματος που μελετάται σύμφωνα με τις οποίες η αμέλεια των γωνιών θα αναμένεται να μην αυξάνει σημαντικά το σφάλμα της ευρεθείσας λύσης. Οι συνθήκες που θα πρέπει να εξετάζονται είναι ύπαρξη

σημαντικού αριθμού εναλλαγών στην κατεύθυνση των ροών ισχύος κατά μήκος μιας γραμμής και ο λόγος r/x . Αντιθέτως, στην περίπτωση του προτεινόμενου αλγορίθμου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3 για την οικονομική ΚΦ με απώλειες, το σφάλμα στον υπολογισμό θα εξαρτάται μονάχα από τον συνολικό αριθμό των φορών που η κατεύθυνση των ροών ισχύος εναλλάσσεται κατά μήκος μιας γραμμής και όχι από το λόγο r/x . Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σφάλματος γραμμικοποίησης όπως προέκυψε από διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση. Η γραμμικοποιημένη μέθοδος συγκρίνεται με τη βέλτιστη ροή φορτίου του πακέτου MATPOWER [131] και με την υλοποίηση της βέλτιστης ροής φορτίου με τη μέθοδο χαλάρωσης ημιορισμένου προγραμματισμού (SDP) [156]. Το δίκτυο που εξετάστηκε είναι το πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 ζυγών, στο οποίο μεταβλήθηκε με μια σειρά σεναρίων ο λόγος r/x . Στη συνέχεια το δίκτυο τροποποιήθηκε δραστικά ώστε να εμφανίζει σημαντικό αριθμό εναλλασσόμενων κατευθύνσεων των ροών ισχύος οπότε και εφαρμόστηκαν οι ίδιες μεταβολές στο λόγο r/x , με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων. Οι εμπειρικές τροποποιήσεις στις γραμμές του δικτύου έγιναν με τέτοιο τρόπο ώστε με διαφορετικές αλλαγές στο αντίσταση και αντίδραση κάθε γραμμής να προκύπτει τελικά ο ζητούμενος λόγος r/x (παιρνοντας το μέσο όρο του r/x κάθε γραμμής). Παρότι η εν λόγω ανάλυση δεν μπορεί να γενικευθεί, πρέπει να σημειωθεί ότι φαίνεται να επιβεβαιώνει την αρχική υπόθεση σχετικά με τους παράγοντες που επιτρέπουν ή όχι την αμέλεια των φασικών από το μοντέλο εξισώσεων ροής φορτίου για εφαρμογές βέλτιστης ροής φορτίου. Χαρακτηριστικά, στην περίπτωση του πρότυπου ΔΔ της IEEE 34 ζυγών στο οποίο δεν εμφανίζονται εναλλαγές στην κατεύθυνση των ροών ισχύος στις γραμμές, διαπιστώνεται ότι η αμέλεια των γωνιών προκαλεί αμελητέο σφάλμα λαμβάνοντας υπόψη ότι και η ίδια η γραμμικοποίηση εισάγει κάποιο σφάλμα ως προς τις συγκρινόμενες μεθόδους. Παρατηρείται επίσης ότι η αύξηση του r/x μειώνει το σφάλμα στον υπολογισμό της αέργου ισχύος ενώ αντίθετα η μείωση του r/x μειώνει το σφάλμα υπολογισμού της ενεργού ισχύος. Στην περίπτωση του τροποποιημένου δικτύου τα αποτελέσματα εμφανίζουν απαγορευτικά σφάλματα και παρότι για αυξημένο λόγο r/x σημειώνεται κάποια βελτίωση προκύπτει το συμπέρασμα ότι η αμέλεια των γωνιών δημιουργεί πρόβλημα. Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί ότι το αρχικό δίκτυο έχει τροποποιηθεί σημαντικά (εισάγοντας διαδοχικά μεγάλα φορτία και μεγάλες παραγωγές κατά μήκος των γραμμών του) προκειμένου να εμφανίζονται εναλλασσόμενες κατευθύνσεις στις ροές ισχύος (στην πράξη ανά 2 ή 3 διαδοχικούς κόμβους). Τέλος, ενδιαφέρον συμπέρασμα προκύπτει ότι η εκτίμηση των τάσεων στα περισσότερα σενάρια, διατηρεί αποδεκτό σφάλμα.

Πίνακας 5-7 Σφάλμα της γραμμικοποιημένης μεθόδου όταν αμελούνται οι φασικές γωνίες σε σύγκριση με τη βέλτιστη ροή φορτίου του πακέτου MATPOWER και με τη μέθοδο SDP.

σενάριο	Σφάλμα			
	r/x	Ενεργός ισχύς (%)	Άεργος ισχύς (%)	Μέτρο τάσης (%)

		SDP	AC-MP	SDP	AC-MP	SDP	AC-MP
Πρότυπο IEEE 34 ζυγών	1,4	0,1736	0,1747	0,2330	0,2346	0,4684	0,4643
	10	0,1736	0,1736	0,0292	0,0292	0,0292	0,0292
	0,35	0,0471	0,0598	0,2565	0,3243	4,4130	0,0183
Τροποποιημένο IEEE 34 ζυγών	1,4	54,947	54,939	4,7680	4,7706	0,5676	0,2256
	10	12,319	7,392	5,372	5,9323	0,1813	0,3611
	0,35	116,84	118,21	16,699	14,699	4,7496	1,5682

5.5. Σύνοψη και συμπεράσματα

Σε αυτήν την ενότητα, αναπτύχθηκε μια πλήρως κατανεμημένη μέθοδος για την βέλτιστη επίλυση του προβλήματος ρύθμισης τάσης στα πλαίσια των ευφυών ΔΔ. Αρχικά διατυπώθηκε το πρόβλημα βελτιστοποίησης για την εύρεση των ελάχιστων εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος από τους ελεγχόμενους πόρους του ΔΔ, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι παραβιάσεις της τάσης. Η μέθοδος χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο κατάβασης βαθμίδας σε συνδυασμό με μια κυρτή μέθοδο βελτιστοποίησης που επιλύει με κατανεμημένο τρόπο την αντιστροφή της Ιακωβιανής των εξισώσεων ροής φορτίου του δικτύου, αξιοποιώντας μια σημαντική τοπολογική του ιδιότητα. Οι περιορισμοί τάσης μοντελοποιήθηκαν αποτελεσματικά ως ελαστικοί περιορισμοί χρησιμοποιώντας συναρτήσεις ποινής. Ο αλγόριθμος ενεργοποιείται με αυτόματο τρόπο, παρουσιάζει επεκτάσιμη συμπεριφορά και καλή ακρίβεια σε σύγκριση με μια κεντρική προσέγγιση. Επίσης, έχει δυνατότητα «τοποθέτησης και άμεσης λειτουργίας», καθώς απαιτεί μόνο γνώση των σύνθετων αντιστάσεων των γραμμών που συνδέουν τους ηλεκτρικούς γείτονες και τοπική ανταλλαγή πληροφοριών.

Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε απλοποιημένο ΔΔ 6 ζυγών, για το οποίο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα και η ακρίβεια του κατανεμημένου μοντέλου για τον υπολογισμό των συντελεστών Lagrange σε 3 διαφορετικά σενάρια ρύθμισης τάσης. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε στη συνέχεια σε ένα μεγαλύτερο ΔΔ, το πρότυπο ΔΔ της IEEE 123 ζυγών. Διενεργήθηκαν συγκρίσεις και συζητήθηκαν τα αποτελέσματα της μεθόδου, τα οποία κρίθηκαν ικανοποιητικά, διεξήχθησαν περαιτέρω μελέτες σχετικά με την εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου σύγκλισης θεωρώντας διαφορετικές τηλεπικοινωνιακές υποδομές και συζητήθηκε η πρακτική εφαρμοσιμότητα της μεθόδου.

Τέλος, εξετάστηκε η απόκριση της μεθόδου σε περίπτωση που χαθεί η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ των κόμβων όπου και διαπιστώθηκε ότι ο αλγόριθμος παρουσιάζει αυξημένη στιβαρότητα και διερευνήθηκαν οι συνθήκες εκείνες οι οποίες επηρεάζουν το σφάλμα του γραμμικοποιημένου μοντέλου σε περίπτωση που αμεληθούν οι φασικές γωνίες.

Κεφάλαιο 6

Εφαρμογές της τεχνολογίας κατανεμημένων μητρώων στα ευφυή δίκτυα

6.1. Εισαγωγή

Οι τεχνολογίες κατανεμημένων μητρώων (εναλλακτικά καθολικών) (blockchain ή distributed ledgers) αποτελούν πρωτόκολλα κατανεμημένων δικτύων Η/Υ, τα οποία μπορούν να διαχειρίζονται με ασφάλεια και να διατηρούν αναλλοίωτα τα δεδομένα που εισάγουν και επεξεργάζονται οι χρήστες τους, χωρίς να απαιτείται κάποιος κεντρικός διαχειριστής για τη διασφάλιση των προηγούμενων. Ωστόσο, αυτός ο ορισμός παρότι γενικός, ενδεχομένως να μην περιγράφει αποτελεσματικά την πληθώρα των καινοτόμων εφαρμογών που αναδύονται τα τελευταία χρόνια και υπόσχονται έναν ακραιφνή μετασχηματισμό τομέων όπως ο χρηματοπιστωτικός, οι μεταφορές, ο τομέας αλυσίδων εφοδιασμού (supply chain) και σύμφωνα με πρόσφατες εργασίες [157] και ο τομέας της ενέργειας.

Ως αφετηρία για την κατανόηση της τεχνολογίας blockchain αναφέρεται συνήθως η πρώτη πραγματική εφαρμογή της ή οποία έλαβε χώρο στο πεδίο των κρυπτονομισμάτων (cryptocurrencies), το Bitcoin. Το πρόβλημα το οποίο έλυσε το Bitcoin, είναι η δυνατότητα για διεκπεραίωση ηλεκτρονικών συναλλαγών μεταξύ κάποιων ενδιαφερομένων μερών για τα οποία δεν απαιτείται να υπάρχει εμπιστοσύνη αλλά ούτε και να παρεμβάλλεται κάποιο ενδιάμεσο μέρος στο οποίο θα πρέπει οι προηγούμενοι να βασιστούν (λ.χ., ένα τραπεζικό σύστημα). Το ίδιο το πρωτόκολλο, το οποίο εκτελείται αποκεντρωμένα στο δίκτυο και όλοι οι κόμβοι είναι ομότιμοι (P2P network), διασφαλίζει μέσω κρυπτογραφικών αποδείξεων ορισμένες σημαντικές ιδιότητες (με την προϋπόθεση βέβαια ότι ισχύουν κάποιες παραδοχές). Οι συναλλαγές οι οποίες επικυρώνονται από το δίκτυο είναι υπολογιστικά ανέφικτο να αντιστραφούν, ενώ παράλληλα αντιμετωπίζεται το πρόβλημα των διπλών δαπανών (double spending attack) [158].

Στα πλαίσια του αποκεντρωμένου συστήματος συναλλαγών που ορίζει το πρωτόκολλο του Bitcoin, χρησιμοποιείται ένα δημόσιο κατανεμημένο μητρώο (distributed ledger) με τη δομή μιας αλυσίδας από μπλοκ που περιλαμβάνουν τις συναλλαγές. Η αλυσίδα διατηρείται και επεκτείνεται από τους ανώνυμους συμμετέχοντες του πρωτοκόλλου, οι οποίοι ονομάζονται μεταλλωρύχοι (miners) και από τους οποίους απαιτείται η επίλυση ενός «κρυπτογραφικού παζλ» προκειμένου να προστεθούν καινούργια μπλοκ, παρέχοντας έτσι τη λεγόμενη «απόδειξη εργασίας» (Proof Of Work - PoW). Οι ιδιοκτήτες bitcoins παράγουν και δημοσιεύουν τις συναλλαγές τους στο δίκτυο, για τις οποίες οι μεταλλωρύχοι αναλαμβάνουν να διαπιστώσουν την εγκυρότητά τους και να τις προσθέσουν στην συνέχεια σε καινούργια μπλοκ της αλυσίδας χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο πρωτόκολλο συναίνεσης. Το πρωτόκολλο συναίνεσης του Bitcoin, αποδεικνύεται ασφαλές εφόσον η υπολογιστική δύναμη των έντιμων παικτών (μεταλλωρύχων) παραμένει αυστηρά μεγαλύτερη από το μισό της συνολικής υπολογιστικής δύναμης του δικτύου και οι (έντιμοι) παίκτες παραμένουν «συγχρονισμένοι» μέσω του δικτύου [159]. Οι μεταλλωρύχοι ανταμείβονται από το πρωτόκολλο για τη διατήρηση της αλυσίδας λαμβάνοντας bitcoins. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται και διανέμονται καινούργια bitcoins στο δίκτυο, ενώ παράλληλα δίνεται ισχυρό κίνητρο στους μεταλλωρύχους να «εργάζονται» για το δίκτυο στηρίζοντας έτσι τη λειτουργία του.

6.1.1. Ethereum και «Έξυπνα Συμβόλαια»

Πέρα από το Bitcoin, έχουν δημιουργηθεί εκατοντάδες άλλα ψηφιακά νομίσματα γνωστά και ως «altcoins» όπως το Ethereum, το Zcash, το Monero κ.ά., καθένα εκ των οποίων μπορεί να διαφέρει από το Bitcoin ως προς το οικονομικό μοντέλο, τη μέθοδο ανταμοιβών, τον αλγόριθμο συναίνεσης, ή γενικότερα να προορίζεται για διαφορετικά πεδία εφαρμογών. Έτσι, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής για ασφάλεια, επεκτασιμότητα και ταχύτητα συναλλαγών, έχουν διαμορφωθεί διαφορετικά πρωτόκολλα συναίνεσης π.χ.: Proof of Work, Proof of Stake, Multisignature/Byzantine Fault Tolerance (BFT), Proof of Authority, κ.ά. και ανάλογα με την πρόσβαση που έχουν οι χρήστες στα δεδομένα του μητρώου αλλά και με την εμπιστοσύνη που υπάρχει μεταξύ τους ορίζονται διαφορετικές κατηγορίες τεχνολογιών blockchain όπως δημόσιο (public) ή χωρίς άδεια (permissionless), ιδιωτικό (private) ή με άδεια (permissioned), ανοιχτό (open) και κλειστό (closed). Ο πρώτος διαχωρισμός εξετάζει εάν οποιοσδήποτε χρήστης έχει δικαίωμα να γράψει δεδομένα στο blockchain ή όχι και ο δεύτερος, εάν οποιοδήποτε χρήστης μπορεί να διαβάσει τα δεδομένα αυτά ή όχι [160]. Μια «υβριδική» περίπτωση στην οποία συνδυάζονται χαρακτηριστικά του δημόσιου και ιδιωτικού blockchain αναφέρεται συχνά ως blockchain κοινοπραξίας (consortium blockchain).

Εναλλακτικές εφαρμογές της τεχνολογίας blockchain πέρα από τα συστήματα συναλλαγών περιλαμβάνουν τη χρήση ψηφιακών περιουσιακών στοιχείων για τον έλεγχο της ιδιοκτησίας μιας υποκείμενης φυσικής συσκευής (Smart Property), για μη ανταλλάξιμα περιου-

σιακά στοιχεία όπως τα ονόματα τομέα (Namecoin), καθώς και πιο περίπλοκες εφαρμογές στις οποίες τα ψηφιακά περιουσιακά στοιχεία ελέγχονται από αλγορίθμους οι οποίοι υλοποιούν κάποιους κανόνες που εισάγονται από τους χρήστες (Smart Contracts). Η πλατφόρμα του Ethereum ανήκει στην τελευταία κατηγορία καθώς αποτελεί μια τεχνολογία blockchain η οποία διαθέτει μια ενσωματωμένη Turing-πλήρη (Turing-complete) γλώσσα προγραμματισμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνταξη «έξυπνων συμβολαίων», επιτρέποντας στους χρήστες του δικτύου να προγραμματίσουν οποιοδήποτε από τα συστήματα που αναφέρονται παραπάνω και πιθανότατα πολλά άλλα. Τα συστήματα αυτά αναφέρονται συνήθως ως Αποκεντρωμένες Εφαρμογές (DApps - Decentralized Applications). Συνοψίζοντας όλα τα προηγούμενα, ένας ενδιαφέροντας ορισμός που δόθηκε για το blockchain από τον ιδρυτή του Ethereum Vitalik Buterin και ο οποίος αποφεύγει τις αναφορές σε οικονομοτεχνικούς όρους καθώς επίσης και σε χαρακτηριστικά της τελικής υλοποίησης είναι ο επόμενος: *«ένα blockchain είναι ένας μαγικός υπολογιστής όπου ο καθένας μπορεί να μεταφορτώσει προγράμματα και να αφήσει τα προγράμματα να εκτελεστούν αυτόματα, με την τρέχουσα και όλες τις προηγούμενες καταστάσεις κάθε προγράμματος να είναι πάντα δημόσια ορατές, παρέχοντας πολύ ισχυρές κρυπτοοικονομικές (cryptoeconomic) εγγυήσεις ότι τα προγράμματα που εκτελούνται στην αλυσίδα θα συνεχίσουν να εκτελούνται ακριβώς με τον τρόπο που ορίζει το πρωτόκολλο του blockchain»* [161], [162].

Επομένως, αντίστοιχα με το Bitcoin, το κατανεμημένο πρωτόκολλο του Ethereum μπορεί να θεωρηθεί ένα σύστημα μετάβασης κατάστασης (state transition system), όπου κάθε κατάσταση αποτελείται από αντικείμενα τα οποία ονομάζονται «λογαριασμοί» (accounts). Κάθε λογαριασμός διαθέτει μια διεύθυνση και τη δυνατότητα να επιτελεί άμεσες μεταφορές αξίας και να στέλνει πληροφορίες σε άλλους λογαριασμούς. Προκειμένου να εκτελεσθεί οποιαδήποτε από τα προηγούμενα, απαιτείται η μετάβαση της κατάστασης στο κατανεμημένο μητρώο του Ethereum από την προηγούμενη (πριν δηλαδή τη μεταφορά αξίας ή των δεδομένων μεταξύ κάποιων λογαριασμών) σε μια καινούργια (που θα αντανakλά τις αλλαγές που διενεργήθηκαν). Ένας λογαριασμός του Ethereum περιλαμβάνει τέσσερα πεδία: ένα μοναδικό αριθμό (nonce), το τρέχον υπόλοιπο του λογαριασμού, το κωδικό συμβολαίου του λογαριασμού (εάν υπάρχει) και τον αποθηκευτικό χώρο του λογαριασμού (κενό από προεπιλογή). Για την εκτέλεση των συναλλαγών απαιτείται η πληρωμή τελών (τα οποία αντανakλούν πρακτικά το κόστος/κίνητρο των μεταλλωρύχων για τη στήριξη του δικτύου και την εκτέλεση του κώδικα των συμβολαίων των χρηστών). Για την πληρωμή των τελών χρησιμοποιείται το «Ethereum» το οποίο είναι το εσωτερικό «κρυπτο-καύσιμο» του Ethereum. Οι λογαριασμοί μπορούν να ανήκουν είτε σε εξωτερικούς χρήστες (ελεγχόμενοι δηλ. από ιδιωτικά κλειδιά) είτε σε συμβόλαια (ελεγχόμενοι από την κώδικα των συμβολαίων). Στη δεύτερη περίπτωση, κάθε φορά που ο λογαριασμός λαμβάνει ένα μήνυμα ο κώδικάς του ενεργοποιείται, επιτρέποντάς του να διαβάζει και να γράφει στον εσωτερικό του αποθηκευτικό του χώρο, να στέλνει άλλα μηνύματα ή να δημιουργεί με τη σειρά του νέα συμβόλαια. Ο κώδικας των συμβολαίων του Ethereum μεταγλωττίζεται σε μια χαμηλού επιπέδου γλώσσα μηχανής που βασίζεται σε στοίβα, η οποία αναφέρεται ως «Κώδικας

Εικονικής Μηχανής του Ethereum» (EVM bytecode). Προκειμένου να αποφεύγονται ακούσιοι είτε εκούσιοι ατέρμονες βρόχοι και γενικότερα ως κίνητρο για την ελαχιστοποίηση των πιθανών υπολογιστικών σπαταλών στον κώδικα των συμβολαίων (τον οποίο συντάσσουν οι χρήστες), κάθε συναλλαγή πρέπει να ορίσει ένα όριο για το πόσα υπολογιστικά βήματα εκτέλεσης κώδικα μπορεί να χρησιμοποιήσει. Ως μονάδα υπολογισμού των βημάτων εκτέλεσης ορίζεται το «καύσιμο» (gas), όπου συνήθως ένα υπολογιστικό βήμα κοστίζει μία μονάδα καυσίμου, αλλά ορισμένες άλλες λειτουργίες κοστίζουν περισσότερο καθώς είναι πιο δαπανηρές ή αυξάνουν την ποσότητα δεδομένων που πρέπει να αποθηκευτούν. Οποιαδήποτε συναλλαγή ή εκτέλεση κώδικα επομένως στο δίκτυο, απαιτεί την πλήρωση κάποιων τελών ανάλογα με τον αριθμό των βημάτων που εκτελούνται ή με τον όγκο των δεδομένων που αποθηκεύονται, τα οποία πληρώνονται σε Ether. Πρέπει τέλος να επισημανθεί ότι τα συμβόλαια στο Ethereum δεν πρέπει να θεωρούνται ως ένα μέσο εκπλήρωσης κάποιων καταστάσεων ή επικύρωσης της «συμμόρφωσης» κάποιων εμπλεκομένων μερών. Αντιθέτως, έχει περισσότερο νόημα να εκλαμβάνονται ως «αυτόνομοι πράκτορες» που ζουν μέσα στο περιβάλλον εκτέλεσης του Ethereum, εκτελώντας πάντοτε ένα συγκεκριμένο κομμάτι κώδικα όταν «ενεργοποιούνται» από ένα μήνυμα είτε μια συναλλαγή και έχουν τον άμεσο έλεγχο πάνω στο υπόλοιπό τους (το υπόλοιπο Ether του λογαριασμού τους) αλλά και στα δεδομένα που βρίσκονται στον χώρο αποθήκευσής τους [162].

6.1.2. Περιορισμοί και προκλήσεις του blockchain

Ο κλάδος των τεχνολογιών κατανεμημένων μητρώων είναι εκ των πραγμάτων ιδιαίτερα πρόσφατος καθώς επίσης και ενεργό πεδίο έρευνας. Κάποιες βασικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν μελλοντικά περιλαμβάνουν την περιορισμένη δυνατότητα κλιμάκωσης (scalability), τους σημαντικούς περιορισμούς στην αποθήκευση δεδομένων, την αλληλεπίδραση με εξωτερικά δεδομένα, τους ενεργοβόρους μηχανισμούς συναίνεσης και τον χαμηλό αριθμό συναλλαγών ανά μονάδα χρόνου (αφορά κυρίως τα δημόσια blockchain που χρησιμοποιούν PoW), την ιδιωτικότητα των δεδομένων των χρηστών και τη δυσκολία για μετατροπές στο εκάστοτε πρωτόκολλο σε περίπτωση που προκύψει κάποιο πρόβλημα ή κενό ασφαλείας [163], [164].

6.1.3. Ιδιωτικότητα και blockchain

Οι δημόσιες τεχνολογίες blockchain δεν έχουν ως πρωταρχικό στόχο τη διατήρηση της ιδιωτικότητας των χρηστών αλλά τη λειτουργία του αποκεντρωμένου δικτύου. Τα «έξυπνα συμβόλαια» της πλατφόρμας Ethereum για παράδειγμα, εμφανίζουν σημαντικούς περιορισμούς σε αυτό το ζήτημα καθώς δεν μπορούν να επεξεργαστούν δεδομένα που πρέπει να διατηρηθούν εμπιστευτικά. Ένας τρόπος για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ιδιωτικότητας στο blockchain είναι χρησιμοποιώντας κάποια ιδιόκτητη υλοποίηση τεχνολογίας blockchain (όπως λ.χ. το ανοιχτού κώδικα λογισμικό hyperledger που να έχει αναπτύξει η εταιρία IBM). Εναλλακτικές λύσεις αναπτύσσονται ωστόσο τα τελευταία χρόνια, με σκοπό την αποτελεσματική διαχείριση των ευαίσθητων δεδομένων και τη διαχείριση της ιδιωτικότητας σε δημόσια και ανοιχτά blockchain. Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα είναι η πλατφόρμα

Enigma η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη αποκεντρωμένων εφαρμογών οι οποίες προστατεύουν τα ευαίσθητα δεδομένα των χρηστών τους διατηρώντας τα ιδιωτικά. Έτσι, προκύπτει η πολλά υποσχόμενη έννοια των «κρυφών συμβολαίων» (secret contracts) τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και συγκεκριμένα σε προβλήματα διαχείρισης προσωπικών δεδομένων. Το πρωτόκολλο Enigma διασπά τα ευαίσθητα δεδομένα και τα διανέμει σε κρυπτογραφημένη μορφή σε όλους τους κόμβους του δικτύου οι οποίοι στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτά τα δεδομένα για να πραγματοποιήσουν υπολογισμούς χωρίς να τα δουν ή να τα εκθέσουν σε κάποιον τρίτο [165].

Συγκεκριμένα το δίκτυο ομότιμων κόμβων (P2P) του Enigma, επιτρέπει σε διαφορετικούς χρήστες να αποθηκεύουν και να εκτελούν υπολογισμούς σε δεδομένα διατηρώντας τα εντελώς ιδιωτικά. Το υπολογιστικό μοντέλο του Enigma βασίζεται σε ένα βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο ασφαλούς υπολογισμού πολλών συμμετεχόντων (secure multi-party computation), με παρεχόμενες εγγυήσεις από ένα επαληθεύσιμο σύστημα διαμοιρασμού απορρήτων (secret sharing) [166].

6.2. Πεδία εφαρμογών στα ευφυή δίκτυα

6.2.1. Πλατφόρμες Blockchain για τον ενεργειακό τομέα

Πέρα από την έρευνα σχετικά με τις διάφορες τεχνολογίες blockchain, τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται σημαντικός αριθμός από εμπορικές πλατφόρμες και έργα προσανατολισμένα σε εφαρμογές του κλάδου της ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστικά, στην εργασία [157] αναφέρονται και σχολιάζονται 140 έργα και εταιρίες παγκοσμίως τα οποία εφαρμόζουν τις τεχνολογίες blockchain με σκοπό την επίλυση προβλημάτων ευφυών δικτύων. Συνοπτικά αναφέρονται οι επόμενες:

- *Energy Web*: πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα του Energy Web Foundation (EWF), με δυνατότητες επεκτασιμότητας και στόχο την αντιμετώπιση των ρυθμιστικών, επιχειρησιακών και εμπορικών αναγκών του ενεργειακού τομέα. Αποτελεί μια πλατφόρμα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη και τη λειτουργία εφαρμογών για προβλήματα διαχείρισης ενέργειας. Το EWF ξεκίνησε τη beta έκδοση ενός δημόσιου δοκιμαστικού δικτύου που ονομάζεται Tobalaba, βασίζεται στο Ethereum, αλλά αποσκοπεί στην επίτευξη καλύτερης επεκτασιμότητας και αυξημένης ταχύτητας διεκπεραίωσης συναλλαγών, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο συναίνεσης Proof of Authority, ο οποίος ονομάζεται Aura [166].

- *Wepower*: η πλατφόρμα δίνει τη δυνατότητα σε παραγωγούς από ΑΠΕ να αντλήσουν κεφάλαια με την έκδοση δικών τους ενεργειακών μαρκών (energy tokens), οι οποίες αντιπροσωπεύουν την ενέργεια που δεσμεύονται να παράγουν. Ως αποτέλεσμα, οι παραγωγοί ενέργειας μπορούν να πραγματοποιούν απευθείας συναλλαγές με υποψήφιους αγοραστές (καταναλωτές και επενδυτές). Η πλατφόρμα βασίζεται στο Ethereum και στα έξυπνα συμβόλαια [167].

- *Verv VLUX*: η πλατφόρμα στοχεύει στην ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ ομότιμων χρηστών έχοντας ως στόχο οι καταναλωτές να επωφελούνται από την πλεονάζουσα ενέργεια των γειτονικών τους παραγωγών (από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας) λαμβάνοντας υπόψη και συστήματα αποθήκευσης. Και σε αυτήν την περίπτωση η υλοποίηση βασίζεται στο Ethereum [168].

- *LO3 Energy*: πρόκειται για μια εταιρεία τεχνολογίας ενέργειας που εδρεύει στη Νέα Υόρκη και έχει αναπτύξει το έργο Brooklyn Microgrid (BMG) σε συνεργασία με τη Siemens. Η BMG χρησιμοποιεί μια πλατφόρμα ομότιμων κόμβων που χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την εμπορία ενέργειας στην κοινότητα. Αυτό επιτρέπει στους καταναλωτές με πλεονάζουσα ηλιακή ενέργεια να πωλούν απευθείας στους γείτονές τους στα πλαίσια μιας τοπικής οικονομίας. Η BMG χρησιμοποιεί μια ιδιωτική τεχνολογία blockchain η οποία αναπτύχθηκε από την LO3 Energy για την υποστήριξη τοπικών αγοροπωλησιών ενέργειας [169].

- *Power Ledger*: η συγκεκριμένη αυστραλιανή νεοφυής επιχείρηση επικεντρώνεται σε εφαρμογές blockchain όπως η εμπορία ενέργειας σε δίκτυα ομότιμων κόμβων. Αυτό επιτρέπει την ανταλλαγή πλεονάζουσας ενέργειας από οικιακές ή εμπορικές μονάδες στο δίκτυο διανομής ή στα πλαίσια ενός μικροδικτύου. Επιπλέον, η εφαρμογή επιτρέπει επίσης άλλες χρήσεις όπως: η διαχείριση περιουσιακών στοιχείων, η εμπορία δικαιωμάτων άνθρακα, η φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων κ.ά. έχοντας ως βάση το Ethereum [170].

- *Grid+* : αποτελεί μέρος του οργανισμού ConsenSys, ο οποίος χρησιμοποιεί την τεχνολογία blockchain για την ανάπτυξη εφαρμογών για διαφορετικά πεδία χρήσης. Συγκεκριμένα η πλατφόρμα Grid+ χρησιμοποιεί το Ethereum για να διευκολύνει την πρόσβαση στις αγορές ενέργειας [171].

6.2.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Από πλευράς βιβλιογραφίας, ένας μεγάλος αριθμός εργασιών έχει δημοσιευθεί πρόσφατα σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα προβλημάτων ευφυών δικτύων. Μια σταχυολόγηση επιχειρείται στις επόμενες παραγράφους. Ο μεγαλύτερος αριθμός εργασιών που διερευνήθηκαν μελετά ζητήματα σχετικά με τη χρήση τεχνολογιών blockchain σε προβλήματα «τοπικών αγορών ενέργειας», ενώ το κύριο τεχνικό πλεονέκτημα που φαίνεται να προκύπτει είναι οι εγγυήσεις ασφάλειας των συναλλαγών [172]. Πιο συγκεκριμένα, οι τοπικές αγορές ενέργειας ανάλογα με τις υποθέσεις κάθε εργασίας μπορούν να εντάσσονται στα πλαίσια Εικονικών Σταθμών Παραγωγής (Virtual Power Plants - VPP), μικροδικτύων, ενεργειακών κοινοτήτων ή συνεταιρισμών, κ.ά. Οι συγγραφείς της εργασίας [173] προτείνουν μια προσαρμογή της τεχνολογίας blockchain σε ενεργειακές κοινότητες, προκειμένου να υπάρξει ένας αποτελεσματικός και ανθεκτικός τρόπος για να υποστηριχθούν οι συναλλαγές εντός μιας ενεργειακής κοινότητας, επιτρέποντας τη συμμετοχή στην κεντρική αγορά ενέργειας. Σημειώνουν όμως του περιορισμούς που θα είχε η χρήση υπαρχόντων πρωτοκόλλων όπως το Bitcoin και το Ethereum, κυρίως επειδή η μέθοδος συναίνεσής τους βασίζεται στη μέθοδο απόδειξης εργασίας (PoW) αντί για τη μέθοδο απόδειξη κατάστασης (PoS) η οποία

είναι σε θέση να ικανοποιεί την απαίτηση για αυξημένη ταχύτητα συναλλαγών. Στην εργασία [174] προτείνεται ένα καταναμημένο σύστημα εμπορίας ηλεκτρικής ενέργειας για τη διανομή που βασίζεται σε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων και ένα σύστημα έξυπνων συμβολαίων για την υλοποίηση της ασφαλούς διευθέτησης των τοπικών ενεργειακών συναλλαγών παρέχοντας ενθαρρυντικά αποτελέσματα προς την κατεύθυνση της ενίσχυσης της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου. Ένας αποκεντρωμένος μηχανισμός για συναλλαγές ενέργειας για μικροδίκτυα προτείνεται στη μελέτη [175], που βασίζεται σε blockchain και τη λογική της συνεχόμενης διπλής δημοπρασίας (Continuous Double Auction - CDA) μεταξύ υποψήφιων καταναλωτών και παραγωγών. Η μέθοδος προβλέπει την ανταλλαγή ψηφιακών πιστοποιητικών μεταξύ των συναλλασσόμενων για τη διασφάλιση των συναλλαγών. Στη μελέτη [176], παρουσιάζονται αποτελέσματα από μια εφαρμογή αγοροπωλησίας σε επίπεδο μικροδικτύου που βασίζεται σε blockchain χωρίς την ανάγκη κεντρικών διαμεσολαβητών. Μια αρχιτεκτονική για ενεργειακές συναλλαγές χρησιμοποιώντας έξυπνα συμβόλαια παρουσιάζεται στη μελέτη [177], όπου παρουσιάζονται μέρη από την υλοποίηση των έξυπνων συμβολαίων σε Ethereum καθώς και την εκτέλεση δοκιμών πάνω σε αυτά. Οι συγγραφείς της μελέτης [178] παρουσιάζουν μια εφαρμογή ενός συστήματος εμπορίας ενέργειας επιλέγοντας τη χρήση μιας πλατφόρμας που ονομάζεται Multichain. Η πλατφόρμα έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται δύο ή και περισσότερα περιουσιακά στοιχεία, με σκοπό τη δυνατότητα ανταλλαγής τόσο ενέργειας όσο και χρημάτων. Επίσης, είναι ταχύτερη από το Bitcoin ή το Ethereum στην ταχύτητα επεξεργασίας και εκτέλεσης των συναλλαγών, ενώ παρουσιάζει επεκτάσιμη συμπεριφορά [178]. Στην εργασία [179], προτείνεται ένας μηχανισμός ενεργειακών συναλλαγών βασισμένος σε blockchain, που αποτελείται από δύο στάδια: το στάδιο της ενεργοποίησης δημοπρασίας και το στάδιο της συνεχούς δημοπρασίας. Οι συμμετέχοντες μπορούν να ανταλλάξουν ηλεκτρική ενέργεια ή και θερμότητα μέσα από μια διαδικασία διαπραγματεύσεως. Για το σκοπό αυτό σχεδιάζονται έξυπνα συμβόλαια τα οποία και ελέγχονται σε ένα δοκιμαστικό δίκτυο του Ethereum. Στη μελέτη [180] παρουσιάζεται ένα έξυπνο συμβόλαιο το οποίο υλοποιεί μια δημοπρασία ενεργειακών πόρων. Ο μηχανισμός δημοπρασίας υλοποιεί μια κλειστή δημοπρασία δεύτερης τιμής (τύπου Vickrey). Η μέθοδος υλοποιήθηκε στο δίκτυο διανομής μιας πανεπιστημιούπολης όπου χρησιμοποιήθηκε ένα Φ/Β σύστημα των 72kW ως μονάδα παραγωγής και το πρωτόκολλο Ethereum για την ανάπτυξη των συμβολαίων.

Ένα εναλλακτικό πλαίσιο για τις αποκεντρωμένες αγορές ενέργειας αποτελεί το πλαίσιο των ενεργειακών κοινοτήτων (ή ενεργειακών συνεταιρισμών).

Στην εργασία [181], παρουσιάζεται ένα καταναμημένο σύστημα ελεγκτών (ανοιχτού κώδικα) βασισμένο σε blockchain για τον αποτελεσματικό διαμοιρασμό της χρήσης συστημάτων αποθήκευσης σε ενεργειακές κοινότητες. Η προτεινόμενη δομή ελέγχου αντικατοπτρίζει το μεταβαλλόμενο ενεργειακό τοπίο. Το blockchain επιτρέπει την επαλήθευση και την ακεραιότητα των ενεργειακών δεδομένων καθώς επίσης εδραιώνει την εμπιστοσύνη μεταξύ των συμμετεχόντων. Κάθε (προσομοιούμενο) νοικοκυριό εκτελεί έναν (πλήρη) κόμβο Ethereum (full node) και ένα λογισμικό το οποίο αναλαμβάνει την αλληλεπίδραση

των ελεγχόμενων ενεργειακών πόρων με το blockchain. Στην κατεύθυνση των ενεργειακών κοινοτήτων και πιο συγκεκριμένα του εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού (Virtual Net Metering) κινείται η μελέτη [182], η οποία προτείνει μια λύση βασισμένη σε blockchain, σχεδιασμένη για να εξυπηρετεί τις ενεργειακές κοινότητες οι οποίες διαμοιράζονται την παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανάλογα με τους στόχους που έχουν θέσει, χρησιμοποιώντας τη υποδομή των έξυπνων μετρητών του δικτύου διανομής. Με τελευταία υποκατηγορία περιλαμβάνει τη χρήση blockchain για την ασφαλή και διαφανή έκδοση και διαχείριση πράσινων πιστοποιητικών [183], [184]. Η εργασία [185] μελετάει τη δυνατότητα για αυτοματοποίησης του ρόλου του προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας έξυπνα συμβόλαια. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της διαπραγμάτευσης των τιμών πριν από τη χρήση μεταξύ των παραγωγών και των καταναλωτών (με 1000 συμμετέχοντες) και του διακανονισμού των πληρωμών μετά τη χρήση.

Μια άλλη κατηγορία μελετών εξετάζει τη χρήση τεχνολογιών blockchain για τη μοντελοποίηση και επίλυση προβλημάτων διαχείρισης της ζήτησης καθώς επίσης και τη διαχείριση της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Η μελέτη [186] προτείνει τη χρήση ενός κατανεμημένου μητρώου για την αποθήκευση πληροφοριών που προκύπτουν από συσκευές στα πλαίσια του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), ενώ έξυπνα συμβόλαια καταστρώνονται προκειμένου να προσδιοριστεί ο προγραμματισμός της διαθέσιμης ενεργειακής ευελιξίας στο επίπεδο κάθε παραγωγού/καταναλωτή καθώς και κάποιοι κανόνες για την εξισορρόπηση της ζήτησης στο επίπεδο της διανομής. Στη μελέτη [187], το πρόβλημα της διαχείρισης της ζήτησης μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας τη θεωρία παιγνίων με σκοπό τον έλεγχο του προφίλ φορτίου και η τεχνολογία blockchain εισάγεται προκειμένου να διασφαλιστεί η ομαλή και ασφαλής πρακτική εφαρμογή του μοντέλου, σε ένα δίκτυο ομότιμων κόμβων. Ένα αποκεντρωμένο σύστημα εμπορίας ηλεκτρικής ενέργειας βασισμένο σε blockchain κοινοπραξίας (consortium blockchain) παρουσιάζεται στην εργασία [188], για τη διαχείριση της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Η αγορά μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική διαδικασία για την εκκαθάριση μιας διπλής δημοπρασίας, ενώ διενεργείται και μελέτη ασφάλειας της προτεινόμενης εφαρμογής. Στην ίδια θεματική κινείται και η μελέτη [189], η οποία λαμβάνει υπόψη και την ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων ισχύος στο δίκτυο.

Η μελέτη [190], εξετάζει κάποια τεχνικά ζητήματα (από την πλευρά των ΣΗΕ) σχετικά με τη δυνατότητα εφαρμογής του blockchain στα μικροδίκτυα. Συγκεκριμένα, μελετάει την μεταβολή των απωλειών ενεργού ισχύος στις γραμμές των μικροδικτύων στην περίπτωση που χρησιμοποιείται κάποια τεχνολογία blockchain για τη διαχείριση των ενεργειακών συναλλαγών που λαμβάνουν χώρα σε αυτό. Η εργασία [191], παρουσιάζει μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή συνδυάζοντας μια αποκεντρωμένη μέθοδο για επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου με αποκεντρωμένο τρόπο με την κατανεμημένη εκτέλεση κώδικα των έξυπνων

συμβολαίων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί την μέθοδο ADMM, για την επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου ελέγχοντας τον προγραμματισμό συστημάτων αποθήκευσης και ευέλικτων φορτίων στο δίκτυο διανομής, ενώ συντονίζει την επίλυση των υποπροβλημάτων των ελεγχόμενων πόρων μέσα από το έξυπνο συμβόλαιο, επιτρέποντας έτσι την επαλήθευση της εγκυρότητας της βέλτιστης λύσης. Στη μελέτη [192], ένα προσαρμοσμένο blockchain χρησιμοποιείται ως στρώμα επαλήθευσης και επικύρωσης των ενεργειών που επιτελούνται από τους ελεγχόμενους ενεργειακούς πόρους, ωστόσο οι συγγραφείς αναφέρουν τους περιορισμούς που έχει το μοντέλο συναίνεσης που χρησιμοποιούν το οποίο βασίζεται στο μηχανισμό PoW.

Τέλος, μια σειρά μελετών εξετάζει τη δυνατότητα επίλυσης των προβλημάτων διαχείρισης των ευαίσθητων προσωπικών δεδομένων των χρηστών στα ευφυή δίκτυα καθώς και ζητήματα κυβερνοασφάλειας εφαρμόζοντας τεχνολογίες blockchain [193], [194]. Ειδικότερα, μια λύση για το πρόβλημα της διαφύλαξης της ιδιωτικότητας των προσωπικών δεδομένων προτείνεται στην εργασία [195], με εφαρμογή στο πρόβλημα της εμπορίας ηλεκτρικής ενέργειας και της τιμολόγησης, η οποία επιτρέπει στους προμηθευτές να υπολογίζουν τους μηνιαίους λογαριασμούς των πελατών τους χωρίς να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα κατανάλωσης των πελατών τους. Μια διαφορετική κατεύθυνση ακολουθεί η μελέτη [196], στην οποία προτείνεται η χρήση ενός στρώματος «ανώνυμης επικοινωνίας» (anonymous communication layer) για τη διαφύλαξη της ιδιωτικότητας των συναλλαγών και των δεδομένων των χρηστών.

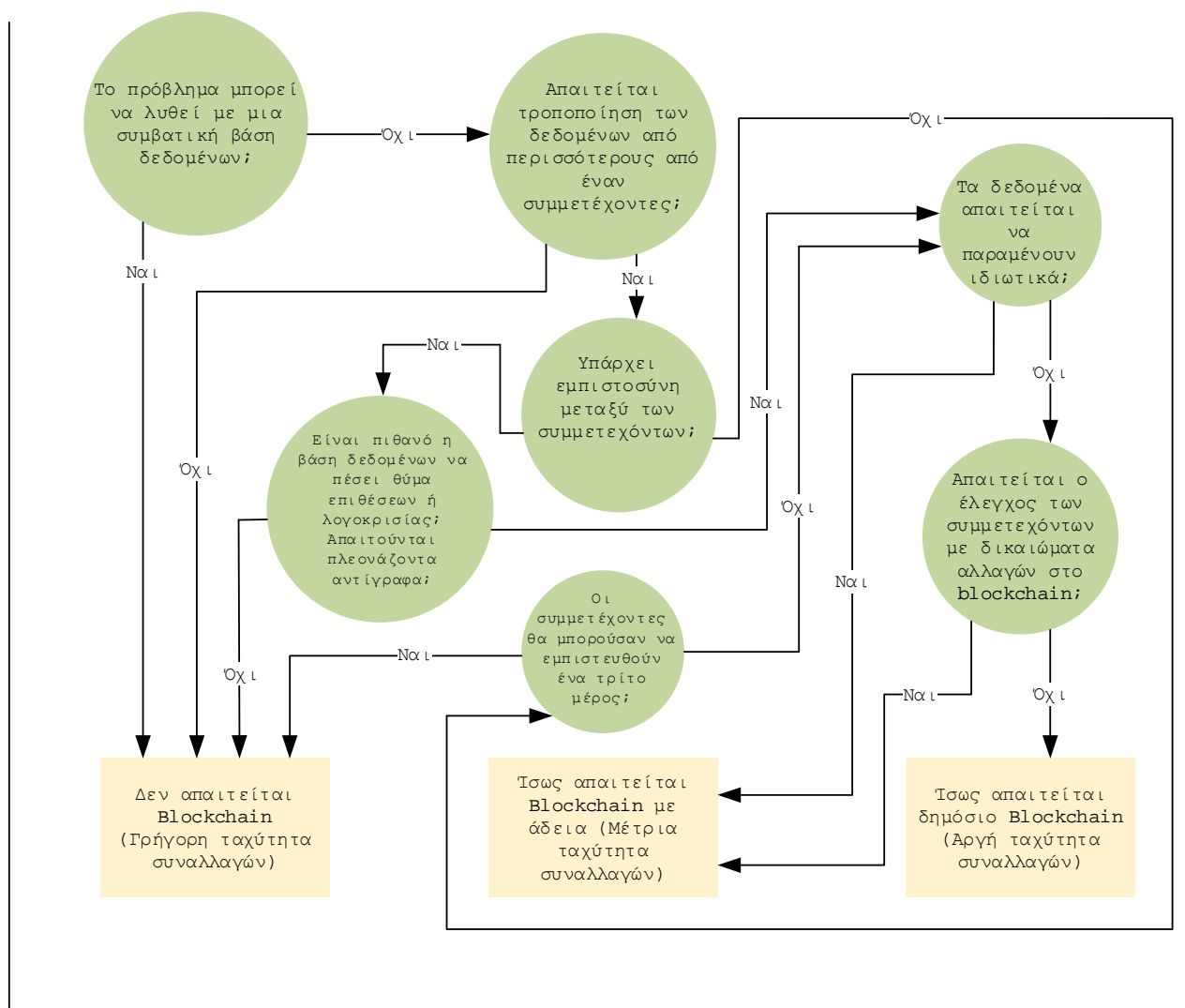
6.2.3. Κριτήρια εφαρμοσιμότητας του Blockchain

Το blockchain αποτελεί μια ιδιαίτερα νέα τεχνολογία, με ενδιαφέρουσες δυνατότητες ειδικότερα όσον αφορά την αποκεντρωμένη επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων (κυρίως συναλλαγών), η οποία πιθανότατα όμως δεν διακρίνεται ακόμα για την απαραίτητη τεχνολογική ωριμότητά της. Ο ρυθμός με τον οποίο τα διάφορα πρωτόκολλα αλλάζουν και εξελίσσονται είναι ταχύτατος, ενώ οι περιορισμοί που εμφανίζονται σήμερα στις διάφορες υλοποιήσεις και αποτελούν τροχοπέδη για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας (όπως αναφέρονται και στα προηγούμενα), αναμένεται να αντιμετωπιστούν στο μέλλον. Εντούτοις, ενδιαφέρον παρουσιάζει η συζήτηση σχετικά με την εφαρμοσιμότητα του blockchain σε διαφορετικές κατηγορίες προβλημάτων και η αξιολόγηση ανά περίπτωση, των πλεονεκτημάτων που θα προκύψουν σε αντιπαράβολη με τα αντίστοιχα μειονεκτήματα.

Στην εργασία [197], συγκεντρώνονται από τη βιβλιογραφία κάποια κριτήρια τα οποία ορίζουν μια εμπειρική μεθοδολογία για την διακρίβωση της εφαρμοσιμότητας κάποιας τεχνολογίας blockchain σε ένα συγκεκριμένο πρακτικό πρόβλημα. Παρότι, η μεθοδολογία είναι αρκετά απλοϊκή, δίνει μια κατεύθυνση σκέψης για το εάν έχει νόημα – αυστηρά από τεχνικής άποψης – να χρησιμοποιηθεί blockchain, εφόσον απαιτούνται ορισμένες προϋποθέσεις για την εκάστοτε εφαρμογή. Τα βασικά αυτά κριτήρια είναι:

- Απαιτείται η ύπαρξη βάσης δεδομένων

- Η βάση δεδομένων απαιτείται να διαμοιράζεται μεταξύ πολλαπλών χρηστών οι οποίοι επιθυμούν να εισάγουν δεδομένα σε αυτή
- Οι συναλλαγές είναι αλληλοεξαρτώμενες (δηλ. η σειρά με την οποία καταγράφονται έχει σημασία)
- Οι χρήστες που εισάγουν δεδομένα στη βάση δεν εμπιστεύονται ο ένας τον άλλον, με την έννοια ότι ενδέχεται να έχουν αντικρουόμενα συμφέροντα
- Απαιτείται η απομάκρυνση του ενδιάμεσου



Σχήμα 6-1 Αξιολόγηση της χρήσης διαφορετικών τεχνολογιών blockchain ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής [198].

Μια πιο αναλυτική μεθοδολογία για την αξιολόγηση της χρήσης του blockchain σε συγκεκριμένες εφαρμογές φαίνεται στο παραπάνω σχήμα το οποίο μεταφράστηκε από τη μελέτη [198] και η οποία βασίζεται στην απάντηση μερικών ερωτήσεων για την πρόταση της χρήσης ή μη διαφορετικών τεχνολογιών blockchain.

Ωστόσο, παρότι δεν αναφέρεται στα προηγούμενα, υπάρχουν και άλλες αξίες που μπορεί να προσφέρει η αξιοποίηση των τεχνολογιών blockchain. Μια βασική είναι αυτή της αποκέντρωσης. Επιπρόσθετα, σε συνδυασμό με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των εφαρμογών blockchain στα προβλήματα ευφυών δικτύων προκύπτει ότι, για συγκεκριμένες κατηγορίες η διερεύνηση της χρήσης τεχνολογιών blockchain εμφανίζει σημαντικό ενδιαφέρον καθώς επίσης και ότι, με την αναμενόμενη αντιμετώπιση των τεχνολογικών προκλήσεων που παρουσιάζουν σήμερα, η χρήση τους αναμένεται να γίνει ακόμα πιο ελκυστική στο μέλλον. Ωστόσο, αυτές οι κατηγορίες προβλημάτων φαίνονται να είναι συγκεκριμένες καθώς άπτονται ζητημάτων όπως, οι εμπορικές συναλλαγές (η διασφάλιση και η αυτοματοποίησή τους και μάλιστα χωρίς να απαιτείται κάποιο τρίτο μέρος), η διαφύλαξη της ιδιωτικότητας των χρηστών και άλλων συγγενικών με αυτά.

6.3. Ενεργειακές κοινότητες και αποκεντρωμένες αγορές ενέργειας

Οι Ενεργειακές Κοινότητες όπως ορίζονται από τον Ν.4513/2018, αποτελούν έναν νέο θεσμό που δίνει τη δυνατότητα για συγκρότηση συνεταιρισμών από ιδιώτες, επιχειρήσεις και φορείς της τοπικής αυτοδιοίκησης για τη δραστηριοποίηση στον κλάδο της ενέργειας. Συγκεκριμένα, «*Η Ενεργειακή Κοινότητα (Ε.Κοιν.) είναι αστικός συνεταιρισμός αποκλειστικού σκοπού με στόχο την προώθηση της κοινωνικής και αλληλέγγυας οικονομίας, όπως ορίζεται στην παρ. 1 του άρθρου 2 του ν. 4430/2016 (Α' 205), και της καινοτομίας στον ενεργειακό τομέα, την αντιμετώπιση της ενεργειακής ένδειας και την προαγωγή της ενεργειακής αειφορίας, την παραγωγή, αποθήκευση, ιδιοκατανάλωση, διανομή και προμήθεια ενέργειας, την ενίσχυση της ενεργειακής αυτάρκειας και ασφάλειας σε νησιωτικούς δήμους, καθώς και τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην τελική χρήση σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, μέσω της δραστηριοποίησης στους τομείς των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.), της Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (Σ.Η.Θ.Υ.Α.), της ορθολογικής χρήσης ενέργειας, της ενεργειακής αποδοτικότητας, των βιώσιμων μεταφορών, της διαχείρισης της ζήτησης και της παραγωγής, διανομής και προμήθειας ενέργειας*» [199].

Επιπλέον, σε συνδυασμό με αλλά ενεργειακά εργαλεία όπως ο ενεργειακός συμψηφισμός (net metering) και ο εικονικός ενεργειακός συμψηφισμός (virtual net metering), ο θεσμός των Εν.Κοιν., ανοίγει καινούργιους δρόμους προς την κατεύθυνση της ενίσχυσης αποκεντρωμένης παραγωγής από ανανεώσιμες, της αποκεντρωμένης διαχείρισης της ενέργειας κ.ά. Η ίδια η Εν.Κοιν. μπορεί να κάνει επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές, ή σε έργα εξοικονόμησης ενέργειας, ή ακόμη και να ρυθμίζει το ενεργειακό προφίλ των μελών έτσι ώστε να εξυπηρετεί τους στόχους της, όπως αυτοί τίθενται μέσα από τις οργανωτικές της διαδικασίες. Καθώς η κοινότητα αποτελεί έναν συνεταιρισμό με κάποιον σκοπό (όπως λ.χ. κάποιος από τους προαναφερθέντες), λαμβάνει αποφάσεις με αυτόνομο τρόπο και καθώς επίσης μπορεί να προμηθεύεται ενέργεια από την κεντρική αγορά, διαφαίνεται πλέον η δυνατότητα για ύπαρξη αποκεντρωμένων λειτουργικών δομών στα πλαίσια της κεντρικής αγοράς ενέργειας.

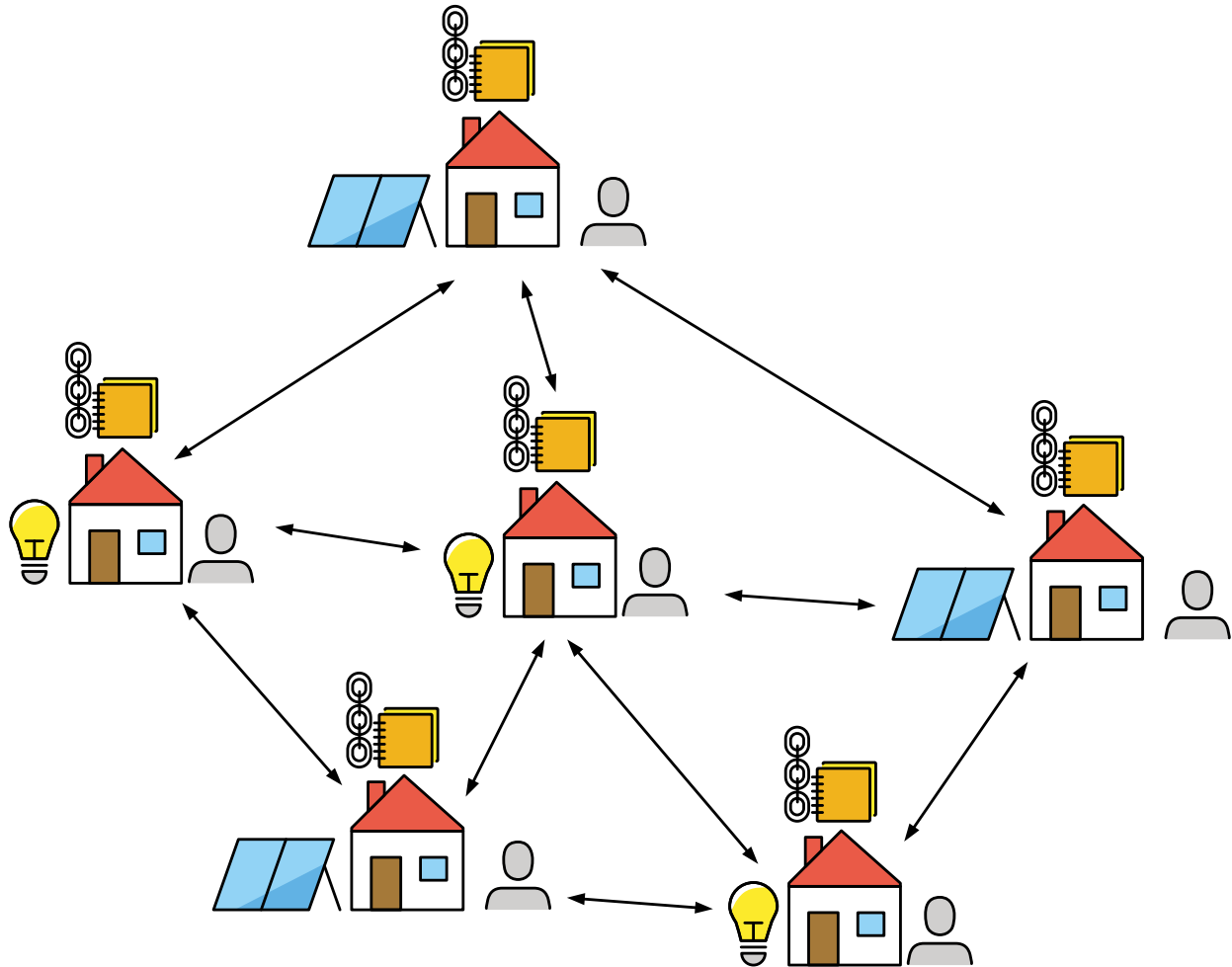
Από ερευνητικής σκοπιάς, διάφορα μοντέλα διερευνώνται, σχετικά με αποκεντρωμένες αγορές ενέργειας. Σύμφωνα με τη μελέτη [200], η λειτουργία αποκεντρωμένων αγορών ενέργειας (και ειδικότερα η εμπορία μεταξύ ομότιμων κόμβων – P2P trading) μπορεί να επιφέρει πλεονεκτήματα όπως η αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος, η προώθηση των ανανεώσιμων κ.ά. Στη μελέτη [201], διατυπώνεται και επιλύεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για αποκεντρωμένες αγορές ενέργειας στα πλαίσια ενεργειακών κοινοτήτων. Η μοντελοποίηση προβλέπει τον έλεγχο της ενέργειας που ανταλλάζει η κοινότητα με άλλες κοινότητες είτε με την κεντρική αγορά ανάλογα με τις προτιμήσεις των μελών της. Ένα παρόμοιο πρόβλημα επιλύεται στη μελέτη [202], αλλά με κατανεμημένο τρόπο χρησιμοποιώντας μια τεχνική κατανεμημένης βελτιστοποίησης. Οι συγγραφείς της εργασίας [203], συγκρίνουν δύο προσεγγίσεις για τοπική αγοροπωλησία ενέργειας σε δίκτυα διανομής ΧΤ, μια κεντρική και μία αποκεντρωμένη που βασίζεται σε ένα σχήμα συνεχούς διπλής δημοπρασίας. Και τις δύο περιπτώσεις, συμπεραίνουν ότι μπορούν να προσφέρουν πολλαπλά οφέλη στα μέλη της κοινότητας. Στη μελέτη [204], διερευνάται το κατά πόσον οι αποκεντρωμένες αγορές ενέργειας μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση του κόστους για τους καταναλωτές και σε αύξηση του κέρδους για τους παραγωγούς (από διεσπαρμένες μονάδες), στα πλαίσια ενός μικροδικτύου το οποίο αποτελεί και ενεργειακή κοινότητα. Τρία σχήματα αγοράς μοντελοποιήθηκαν, ο διαμοιρασμός των «λογαριασμών» ηλ. Ενέργειας (bill sharing), η χρήση μιας μέσης τιμής αγοράς (mid-market rate - MMR) και μια στρατηγική τιμολόγησης που βασίζεται σε δημοπρασία. Σε κάθε περίπτωση, οι προσομοιώσεις έδειξαν σημαντική εξοικονόμηση στο κόστος ενέργειας των μελών της κοινότητας.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι τα μοντέλα αποκεντρωμένων αγορών ενέργειας που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, ταυτίζουν συχνά τις ενεργειακές κοινότητες με τα μικροδίκτυα (ενσωματώνοντας δηλ. στις μοντελοποιήσεις του και τεχνικά ζητήματα του δικτύου), γεγονός που δεν υπονοείται απαραίτητα στην περίπτωση της ελληνικής νομοθεσίας. Χαρακτηριστικά, η έννοια της «τοπικότητας» των μελών της Εν.Κοιν. στην Ελλάδα (η εγγύτητα των μελών της δηλ. ως προς το σημείο σύνδεσής τους με το ΔΔ) δεν είναι ιδιαίτερα περιορισμένη καθώς είναι δυνατόν να συμμετέχουν στην Εν.Κοιν. μέλη που κατοικούν ακόμα και στην ίδια περιφέρεια. Αυτή η παρατήρηση είναι σημαντική για τη μελέτη πρακτικών εφαρμογών διότι, αποσυνδέει τη Εν.Κοιν. από τα τεχνικά προβλήματα του δικτύου για τα οποία θα μπορούσε να προσφέρει λύσεις (με την έννοια της παροχής «επικουρικών υπηρεσιών στο επίπεδο της διανομής») και την τοποθετεί στο ανώτατο επίπεδο λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή στο επίπεδο της αγοράς. Σε αυτήν την κατεύθυνση αναπτύσσονται και διερευνώνται στη συνέχεια κάποιες απλοϊκές αποκεντρωμένες εφαρμογές χρησιμοποιώντας τεχνολογία blockchain και έξυπνα συμβόλαια.

6.4. Ανάπτυξη αποκεντρωμένων εφαρμογών μέσω έξυπνων συμβολαίων

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται δύο αποκεντρωμένες εφαρμογές οι οποίες αναπτύχθηκαν για το πρωτόκολλο Ethereum στη γλώσσα Solidity [205]. Τα δύο σενάρια επιλέχθηκαν έπειτα από τη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας, αλλά λαμβάνοντας υπόψη και τα

χαρακτηριστικά, τις δυνατότητες και τους περιορισμούς του Ethereum (ως δημόσιο και ανοιχτό blockchain), όπως περιγράφηκαν στα προηγούμενα. Οι τεχνολογίες blockchain (και ιδιαίτερα αυτές που υποστηρίζουν έξυπνα συμβόλαια) εμφανίζουν σίγουρα μεγάλο ενδιαφέρον, ωστόσο απαιτείται διερεύνηση των περιορισμών τους όταν προτείνονται καινούργια σενάρια χρήσης. Η επίλυση προβλημάτων για παράδειγμα, που απαιτούν εκτέλεση αλγορίθμων μεγάλης πολυπλοκότητας ή αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων είναι (τουλάχιστον μέχρι στιγμής) απαγορευτική.



Σχήμα 6-2 Τοπική αγορά ενέργειας στα πλαίσια μιας ενεργειακής κοινότητας η οποία λειτουργεί χρησιμοποιώντας τεχνολογία blockchain.

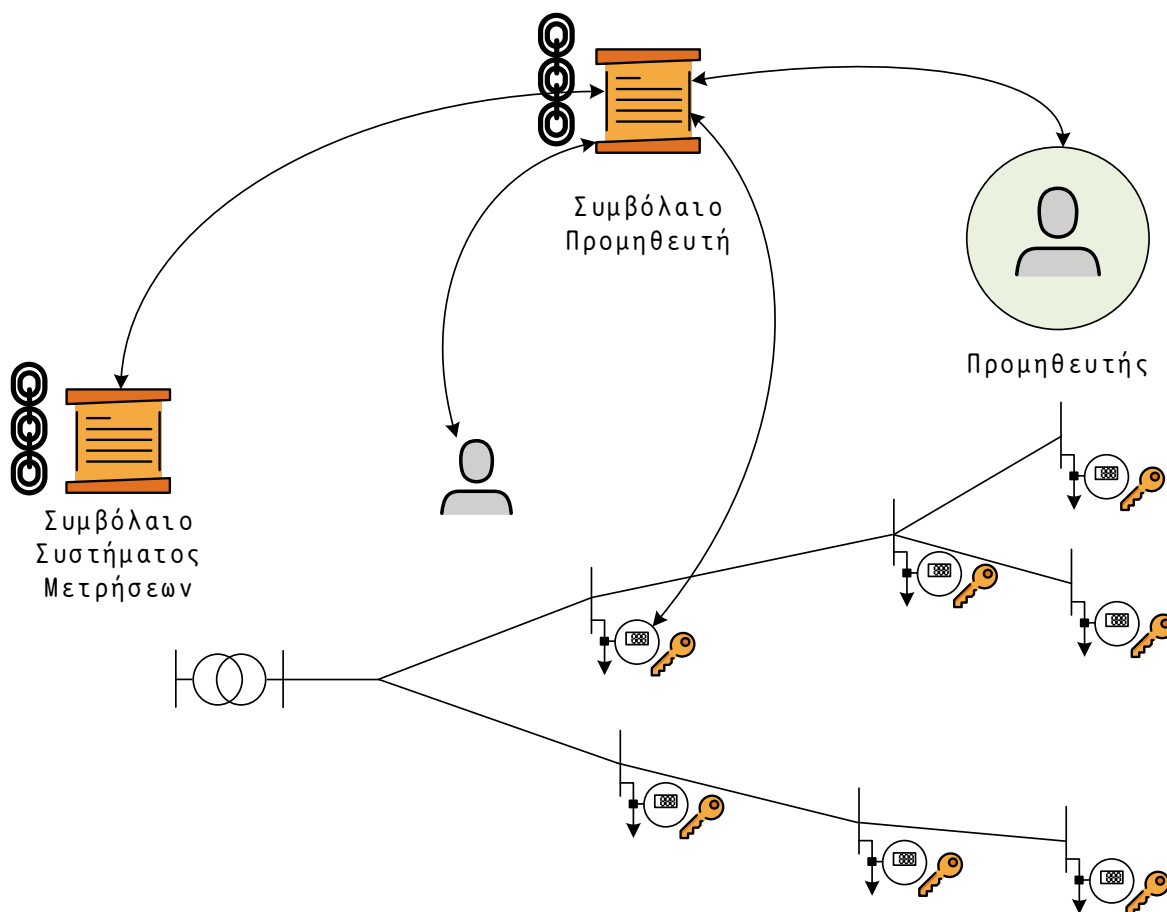
Απαγορευτική θα ήταν επομένως η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, ή η αποθήκευση δεδομένων καταναλώσεων (με αυξημένη συχνότητα μετρήσεων), ενώ αντίστοιχα δε θα είχε νόημα η επίλυση κατανεμημένων αλγορίθμων όπως αυτοί που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής. Ένας ακόμη περιορισμός, πρέπει να συζητηθεί και αφορά τη λεγόμενη ταχύτητα των συναλλαγών. Τον χρόνο δηλαδή που απαιτείται από το πρωτόκολλο με την οποία εισάγονται καινούργια μπλοκ και τον χρόνο που χρειάζεται στη συνέχεια για να επιβεβαιωθούν. Η ταχύτητα αυτή για το Ethereum είναι

περίπου 15 sec και 3 λεπτά αντίστοιχα, γεγονός που αμέσως αποκλείει τη χρήση του σε εφαρμογές που απαιτούν πολύ μικρότερους χρόνους απόκρισης.

Από την άλλη πλευρά, νόημα φαίνεται να έχει η χρήση τεχνολογιών blockchain για εφαρμογές αυτοματοποίησης και διασφάλισης αγορών. Ακόμη περισσότερο ενδιαφέρον έχει η αποκεντρωμένη λειτουργία μιας τοπικής αγοράς, ένα σχήμα δηλαδή στο οποίο κάποιος κεντρικός παίκτης που θα αναλάμβανε την λειτουργία της τοπικής αγοράς και την αλληλεπίδραση με την κεντρική αγορά ενέργειας, αντικαθίσταται από ένα πρωτόκολλο το οποίο ακολουθούν όλοι οι συμμετέχοντες της τοπικής αυτής αγοράς (Σχήμα 6-2). Στην πράξη, μια τέτοια τοπική αγορά θα μπορούσε να ορίζεται από μια Εν.Κοιν.

Κάποιες βασικές υποθέσεις (ασφαλείας) που έγιναν στα επόμενα για τη σχεδίαση των αποκεντρωμένων εφαρμογών είναι οι εξής:

- Ο πάροχος του συστήματος μετρήσεων είναι έμπιστος
- Οι ηλεκτρονικοί μετρητές αλληλεπιδρούν με το blockchain και
- Δεν είναι εφικτό να υποκλαπεί το ιδιωτικό κλειδί κάθε ηλεκτρονικού μετρητή

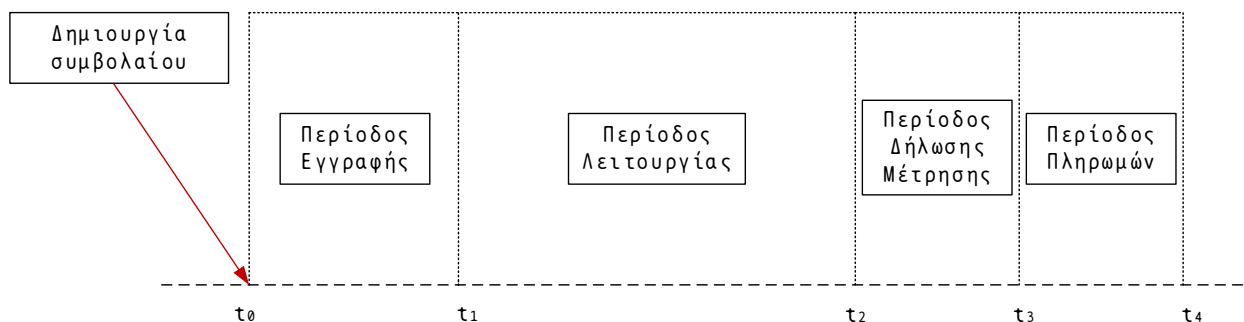


Σχήμα 6-3 Αλληλεπίδραση καταναλωτών, προμηθευτή και ηλεκτρονικών μετρητών μέσω έξυπνων συμβολαίων.

6.4.1. Συμβόλαιο αυτοματοποίησης προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας

Το πρώτο σενάριο που υλοποιήθηκε περιγράφει την αυτοματοποίηση της διαδικασίας εμπορίας ηλεκτρικής ενέργειας και μοντελοποιούνται οι αλληλεπιδράσεις του καταναλωτή, του προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η αλληλεπίδραση με το σύστημα μετρήσεων για την τιμολόγηση (Σχήμα 6-3).

Το σενάριο χρήσης που αναπτύχθηκε ακολουθεί την επόμενη διαδικασία. Ο προμηθευτής αρχικοποιεί ένα έξυπνο συμβόλαιο για πώληση ενέργειας σε συγκεκριμένη τιμή και για συγκεκριμένη χρονική περίοδο και δημοσιεύει τις πληροφορίες αυτές μαζί με κάποιες επιπλέον παραμέτρους έτσι ώστε να γίνουν διαθέσιμες στους υποψήφιους πελάτες. Ορίζονται έτσι οι διάφορες περίοδοι για την παρεχόμενη υπηρεσία, όπως η περίοδος εγγραφής, η περίοδος λειτουργίας (δηλ. κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας), η περίοδος που γίνεται η δήλωση των καταναλώσεων και τέλος η περίοδος των πληρωμών (Σχήμα 6-4).



Σχήμα 6-4 Σενάριο χρήσης του συμβολαίου αυτοματοποίησης προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας.

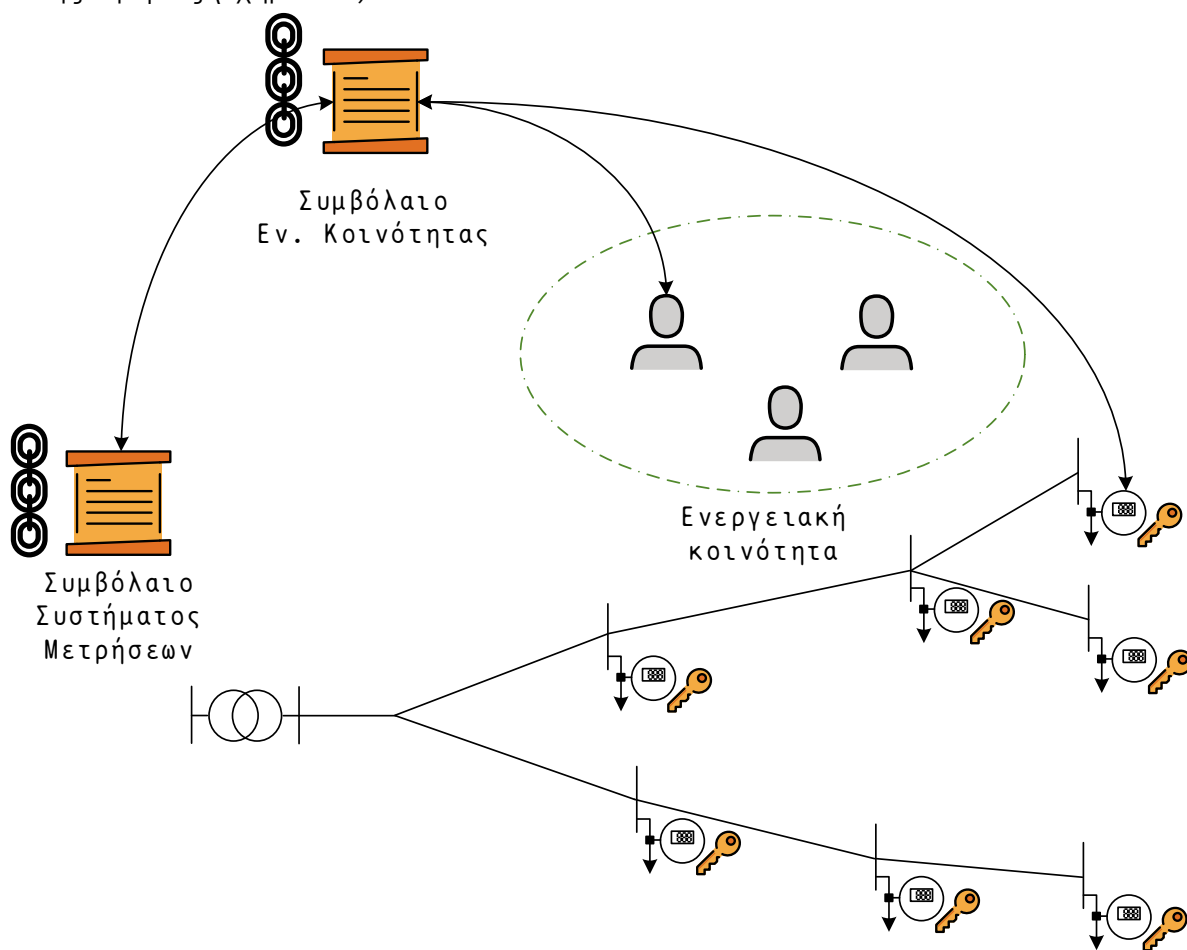
Σε περίπτωση που κάποιος πελάτης ενδιαφερθεί για την υπηρεσία, πρέπει να εγγραφθεί, ορίζοντας παράλληλα και τη διεύθυνση του ηλεκτρονικού του μετρητή και καταθέτοντας ένα αρχικό ποσό στο συμβόλαιο το οποίο αντιστοιχεί στην εγγύηση και το οποίο του επιστρέφεται στο τέλος της διαδικασίας. Παράλληλα με την επιτυχή εγγραφή του χρήστη, ο ηλεκτρονικός μετρητής πρέπει να «ενημερωθεί» για την περίοδο λειτουργίας αλλά και την περίοδο δήλωσης της συνολικής ενέργειας που καταναλώθηκε κατά την περίοδο χρήσης. Για να είναι επιτυχής η εγγραφή ενός χρήστη απαιτείται η διεύθυνση του ηλεκτρονικού μετρητή που δηλώνει να είναι έγκυρη, γεγονός που επιβεβαιώνεται από άλλο συμβόλαιο το οποίο ανήκει στον πάροχο του συστήματος μετρήσεων.

Το συμβόλαιο του παρόχου συστήματος μετρήσεων θεωρείται ήδη ανεπτυγμένο στο blockchain και η διεύθυνσή του γνωστή. Επίσης, υποθέτοντας ότι η αρχική εγγύηση που έχει καταθέσει ο χρήστης είναι μεγαλύτερη από το κόστος της ενέργειας που θα καταναλώσει, μετά την περίοδο δήλωσης μέτρησης, ο χρήστης λαμβάνει τη διαφορά και μετά το τέλος της περιόδου πληρωμών ο προμηθευτής λαμβάνει το συνολικό κόστος που προκύπτει από το κόστος της ενέργειας που κατανάλωσαν οι πελάτες του. Παρότι δεν υλοποιήθηκε στο συγκεκριμένη εφαρμογή, με μικρές τροποποιήσεις, ο προμηθευτής μπορεί να

ελέγξει τον αριθμό των πελατών που θα εγγραφούν στην υπηρεσία, ανάλογα με τους στόχους του και τη συνολική ενέργεια που σκοπεύει να εμπορευθεί στην περίοδο λειτουργίας που ορίζει. Ο κώδικας των έξυπνων συμβολαίων που μοντελοποιούν τις προηγούμενες αλληλεπιδράσεις δίνεται στο παράρτημα ενώ σε επόμενη ενότητα σχολιάζονται αποτελέσματα από δοκιμές πάνω σε αυτά.

6.4.2. Συμβόλαιο αποκεντρωμένης αγοράς ενέργειας σε Εν.Κοιν.

Το επόμενο σενάριο που υλοποιήθηκε στοχεύει στη μοντελοποίηση της λειτουργίας μιας τοπικής αγοράς ενέργειας η οποία μπορεί να υλοποιηθεί στα πλαίσια μιας Εν.Κοιν. Η εφαρμογή παρέχει ένα επίπεδο πάνω στο οποίο τα μέλη της κοινότητας μπορούν να εμπορευθούν μεταξύ τους ενέργεια ή ακόμα και να αγοράσουν από τη κεντρική αγορά. Ωστόσο δεν επιτελείται κάποιου είδους βελτιστοποίηση καθώς όπως σχολιάστηκε και παραπάνω κάτι τέτοιο δε φαίνεται να γίνεται με αποδοτικό τρόπο στο blockchain (όσον αφορά τουλάχιστον την περίπτωση του Ethereum). Αυτό που μπορεί να γίνει όμως είναι η διασφάλιση, η αυτοματοποίηση καθώς και η αποκέντρωση της διαδικασίας της εκκαθάρισης της τοπικής αγοράς (Σχήμα 6-5).

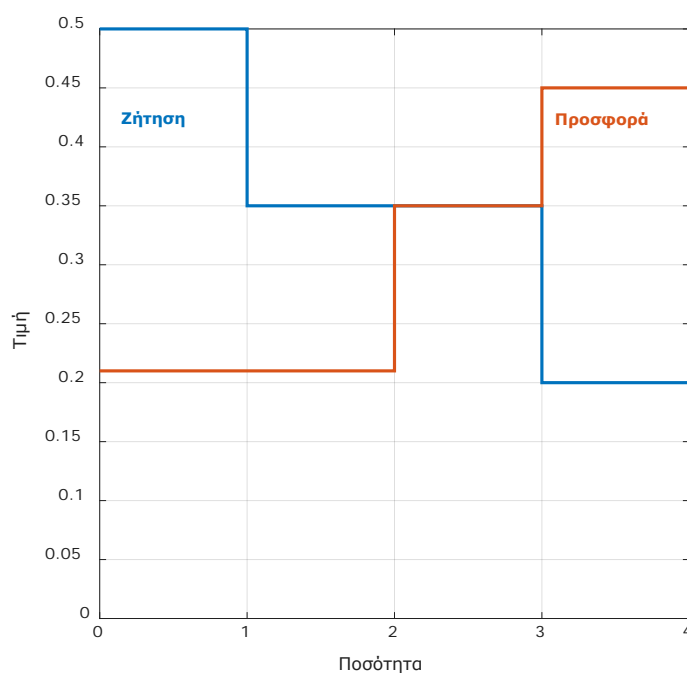


Σχήμα 6-5 Αλληλεπίδραση των μελών της Εν.Κοιν. και των ηλεκτρονικών μετρητών μέσω έξυπνων συμβολαίων.



Σχήμα 6-6 Σενάριο χρήσης του συμβολαίου αυτοματοποίησης της αποκεντρωμένης αγοράς ενέργειας σε Εν.Κοιν.

Το σενάριο χρήσης σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα. Κατά τη δημιουργία του συμβολαίου, ορίζονται (κατ' αντιστοιχία και με το προηγούμενο σενάριο) οι διαφορετικές χρονικές περιόδους οι οποίες περιλαμβάνουν την υποβολή (σφραγισμένων) προσφορών για παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, το άνοιγμα των προσφορών, την εκκαθάριση της αγοράς, την περίοδο χρήσης, την περίοδο δηλώσεων και τέλος την περίοδο των πληρωμών και την καταστροφή του συμβολαίου.



Σχήμα 6-7 Ταξινόμηση των προσφορών, δημιουργία καμπύλων προσφοράς και ζήτησης και εκκαθάριση της αγοράς.

Η λογική του σεναρίου είναι η εσωτερική διαχείριση της αγοράς ενέργειας της κοινότητας σε πρώτη φάση και η δυνατότητα για επιπλέον προμήθεια ενέργειας από την κεντρική αγορά σε περίπτωση που αυτό απαιτείται. Για την «προσομοίωση» της τοπικής αγοράς στο σύμβολο επιλέχθηκε ο μηχανισμός της διπλής δημοπρασίας σύμφωνα με τον οποίο, ανοίγονται οι προσφορές ζήτησης και προσφοράς, ταξινομούνται κατά φθίνουσα και αύξουσα σειρά αντίστοιχα και στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή εκκαθάρισης της αγοράς και

ο όγκος ενέργειας που θα ανταλλαχθεί, από την τομή των δύο καμπυλών που έχουν σχηματιστεί [175], όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6-7. Από την ποσότητα που θα εμπορευθεί προσδιορίζονται οι προσφορές που γίνονται αποδεκτές ενώ οι τα μέλη εκείνα οι προσφορές των οποίων δεν έγιναν αποδεκτές προβλέπεται να προμηθευτούν ενέργεια από την κεντρική αγορά. Και σε αυτήν την υλοποίηση έχει γίνει η υπόθεση ότι παρέχεται η δυνατότητα για τη διασταύρωση της εγκυρότητας του ηλεκτρονικού μετρητή που δηλώνεται από κάθε χρήστη κατά την υποβολή προσφορών, από κατάλληλο συμβόλαιο του προμηθευτή του συστήματος μετρήσεων. Οι ηλεκτρονικοί μετρητές έχουν στη συνέχεια την ευθύνη για την δήλωση των μετρήσεων κάθε χρήστη για τη συγκεκριμένη περίοδο, προκειμένου έτσι να γίνουν και οι ανάλογες πληρωμές μεταξύ των χρηστών. Σημειώνεται επιπλέον η υπόθεση ότι μαζί με την υποβολή προσφορών καταθέτονται χρηματικές εγγυήσεις από κάθε χρήστη οι οποίες θα πρέπει να είναι μάλιστα μεγαλύτερες από το κόστος ενέργειας που εκτιμάται ότι θα εμπορευτούν. Στην περίπτωση αποκλίσεων των τιμών παραγωγής και κατανάλωσης από τις αντίστοιχες προσφορές (που έγιναν δεκτές κατά την εκκαθάριση της αγοράς) το συμβόλαιο κάνει τις κατάλληλες τροποποιήσεις στα ποσά που αποστέλλονται κατά την περίοδο πληρωμών. Στην περίπτωση των παραγωγών οι προσφορές των οποίων έγιναν δεκτές, το ποσό το οποίο λαμβάνεται είναι η μικρότερη τιμή μεταξύ της αρχικά δηλωθείσας και αυτής που παράχθηκε πραγματικά, ενώ στην περίπτωση των καταναλωτών πληρώνεται το ποσό που έχει αρχικά δηλωθεί και εάν η πραγματική κατανάλωση υπερβαίνει τη δηλωμένη τότε η διαφορά πληρώνεται με την τιμή της κεντρικής αγοράς. Στην περίπτωση των παραγωγών οι προσφορές των οποίων δεν έγιναν δεκτές, η ενέργεια που παράγαγαν δεν πληρώνεται, ενώ στην περίπτωση των καταναλωτών που δεν αγόρασαν από την τοπική αγορά, η κατανάλωσή τους χρεώνεται με την τιμή της κεντρικής αγοράς. Σημειώνεται ότι τα προηγούμενα είναι ένας απλός τρόπος για να υλοποιηθεί η τοπική αγορά της Εν.Κοιν. προκειμένου να διερευνηθεί τη χρήση της τεχνολογίας blockchain σε τεχνικό επίπεδο. Εύκολα θα μπορούσαν να επιλεχθούν διαφορετικοί κανόνες ανάλογα με τους στόχους που θέτουν τα μέλη της κοινότητας αλλά και ανάλογα με τις δυνατότητες και την ευελιξία του εκάστοτε ρυθμιστικού πλαισίου της αγοράς ενέργειας. Σαφώς, για να έχει νόημα (από οικονομικής απόψεως) η λειτουργία τοπικών αγορών ενέργειας (και επομένως το πλαίσιο διαχείρισης που έχει δομηθεί σε αυτήν την ενότητα) απαιτείται να ισχύουν κάποιες οικονομικές συνθήκες όπως για παράδειγμα κίνητρα για μεγιστοποίηση της κατανάλωσης σε τοπικό επίπεδο της παραγωγής από διεσπαρμένες μονάδες. Η διερεύνηση αυτών των κινήτρων αλλά και η σχετική οικονομοτεχνική ανάλυση ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της εργασίας, ωστόσο σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη κατεύθυνση φαίνεται να υποστηρίζεται από πρόσφατες εργασίες (όπως αυτές που διερευνήθηκαν στην ενότητα 6.3) αλλά και από το πνεύμα των ρυθμιστικών διατάξεων που δίνουν κίνητρα για μεγιστοποίηση της ιδιοκατανάλωσης, όπως ο ενεργειακός συμψηφισμός και ο εικονικός ενεργειακός συμψηφισμός.

Τέλος, ένα τεχνικό ζήτημα που πρέπει να σχολιαστεί είναι το χρονικό πλαίσιο στο λειτουργούν οι εφαρμογές οι οποίες αναπτύχθηκαν. Και στις δύο εφαρμογές που αναπτύχθηκαν αναφέρεται η περίοδος χρήσης η οποία είναι και η πιο σημαντική φάση όσον αφορά την

πρακτική εφαρμογή. Το πρόβλημα μπορεί να εξεταστεί τόσο οικονομικά όσο και τεχνικά, καθώς στην περίπτωση της χρήσης ενός δημόσιου blockchain όπως το Ethereum, η αλληλεπίδραση και η μεταβολή των δεδομένων κοστίζει αλλά και όπως έχει σχολιαστεί και προηγουμένως απαιτείται συγκεκριμένος χρόνος για την επιβεβαίωση των συναλλαγών. Οι συγκεκριμένες εφαρμογές θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν διάρκεια χρήσης μιας ημέρας (ή ακόμη και μικρότερη), ενός μήνα, ενός χρόνου ή αυθαίρετα μεγαλύτερη ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής, το πλήθος των συμμετεχόντων, τους στόχους του δημιουργού του συμβολαίου και την ιδιότητα της τεχνολογίας blockchain που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα η χρήση ενός blockchain με άδεια μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ταχύτητα διεκπεραίωσης των συναλλαγών και να μειώσει αντίστοιχα το κόστος τους, επιτρέποντας έτσι τη λειτουργία σε ακόμη μικρότερες κλίμακες (π.χ. σε ωριαία κλίμακα). Στην περίπτωση του Ethereum, αν θεωρηθεί ότι στη χειρότερη περίπτωση θα απαιτούνταν 3 λεπτά για την αλληλεπίδραση κάθε χρήστη με τα συμβόλαια και λαμβάνοντας υπόψη τα οικονομικά κόστη (που αναλύονται στη συνέχεια) για κάθε κλήση αλλά και για τη δημιουργία των συμβολαίων, δε φαίνεται (εμπειρικά) να έχει ιδιαίτερο νόημα η λειτουργία σε χρονικές κλίμακες μικρότερες της μιας ημέρας.

6.4.3. Αποτελέσματα - Προσομοιώσεις

Ο κώδικας των έξυπνων συμβολαίων για την μοντελοποίηση των ανωτέρω σεναρίων αναπτύχθηκε στη γλώσσα Solidity [205] (παράτιθενται στο παράρτημα) και μεταγλωττίστηκε με το πλαίσιο λογισμικού truffle [206]. Στη συνέχεια τα συμβόλαια αναπτύχθηκαν στο λογισμικό Ganache [207], το οποίο αποτελεί ένα τοπικό προσομοιωμένο Ethereum blockchain και χρησιμοποιείται για την εκτέλεση δοκιμών (με τη μορφή σεναρίων) σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον και την εξαγωγή των αριθμών βημάτων εκτέλεσης (gas) που θα απαιτούνταν για την κλήση κάθε μεθόδου των συμβολαίων καθώς και την δημιουργία και την ανάπτυξή τους στο πραγματικό blockchain. Στους επόμενους πίνακες δίνεται το υπολογιστικό κόστος για κάθε μια από τις μεθόδους που υλοποιήθηκαν όπως εξάχθηκαν από τα σενάρια δοκιμής τα οποία βασίστηκαν στο Σχήμα 6-4 και στο Σχήμα 6-6.

Στον Πίνακα 6-1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την κλήση των δύο μεθόδων (που μεταβάλλουν τα δεδομένα στο blockchain) του συμβολαίου που ανήκει στο πάροχο του συστήματος μετρήσεων (smartMeters) και οι οποίες προσθέτουν ή αφαιρούν διευθύνσεις ηλεκτρονικών μετρητών. Σημειώνεται ότι η μέθοδος που εξετάζει την εγκυρότητα κάποιας διεύθυνσης ηλ. μετρητή (η οποία καλείται από τα άλλα συμβόλαια) δεν κοστίζει καθώς ουσιαστικά μόνο διαβάζει δεδομένα από το blockchain χωρίς να κάνει κάποια μεταβολή. Επίσης, ορίζοντας και συγκεκριμένη τιμή για το υπολογιστικό κόστος (gas), 3gwei/gas όπως φαίνεται και στους πίνακες, προκύπτει το κόστος σε Ευρώ που θα είχε η συγκεκριμένη εφαρμογή λαμβάνοντας φυσικά την ανταλλακτική αξία ether σε Ευρώ, τη χρονική στιγμή που επιτελέστηκαν οι δοκιμές. Οι επόμενοι Πίνακες (6-2 και 6-3), δίνουν τα αποτελέσματα για τα υπολογιστικά κόστη κάθε μεθόδου των συμβολαίων του προμηθευτή και της τοπικής αγοράς της Εν.Κοιν.

Πίνακας 6-1 Δοκιμές στο συμβόλαιο SmartMeters.

Gas					Block limit: 6721975 gas	
Methods		3gwei / gas			102,75 eur/eth	
Contract	Method	Min	Max	Avg	#calls	eur (avg)
smartMeters	registerMeter	-	-	43900	4	0,01
	unregisterMeter	-	-	14482	1	0,00
Deployments					% of limit	
smartMeters		-	-	524994	7.8 %	0,16

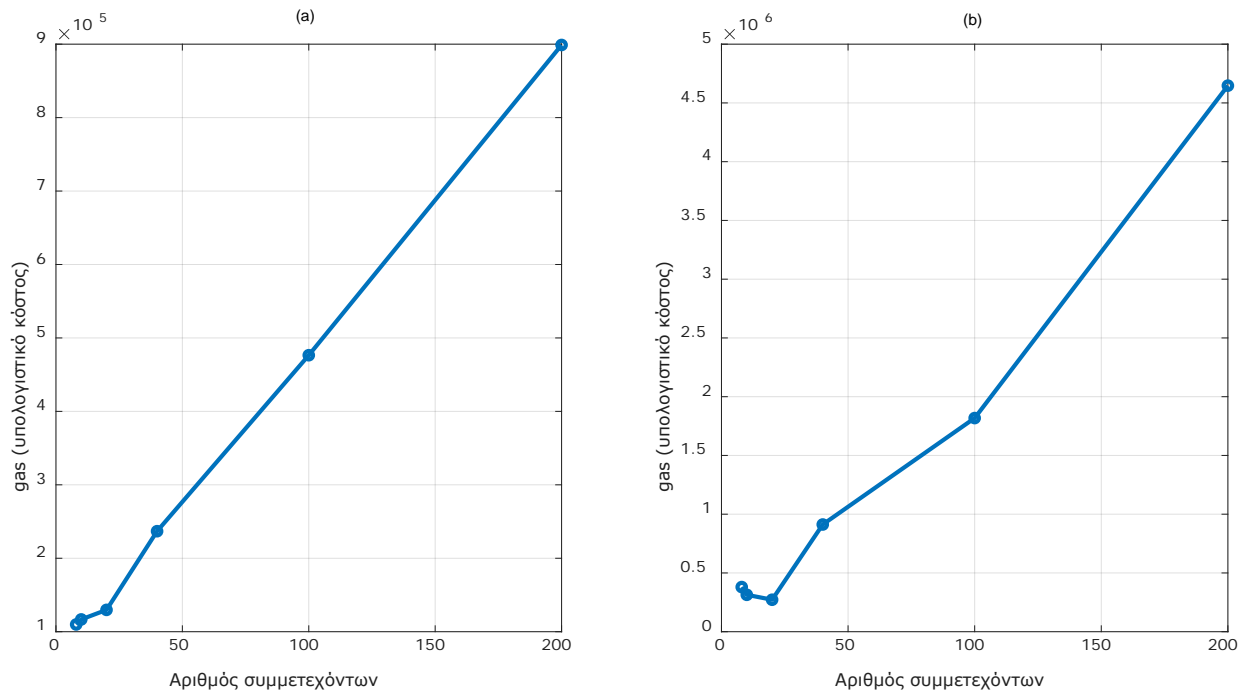
Πίνακας 6-2 Δοκιμές στο συμβόλαιο Retailer.

Gas					Block limit: 6721975 gas	
Methods		3gwei / gas			102,75 eur/eth	
Contract	Method	Min	Max	Avg	#calls	eur (avg)
retailer	declarePeriod	-	-	52656	1	0,01
	finalize	-	-	13484	1	0,00
	paymentPeriod	-	-	37281	1	0,01
	subscribeUser	-	-	125865	1	0,03
Deployments					% of limit	
Retailer		-	-	1408078	20,9 %	0,29

Πίνακας 6-3 Δοκιμές στο συμβόλαιο DoubleAuction (Εν.Κοιν.).

Gas					Block limit: 6721975 gas	
Methods		3gwei / gas			102,75 eur/eth	
Contract	Method	Min	Max	Avg	#calls	eur (avg)
doubleAuction	bidBuyer	180726	195726	183726	5	0,06
	bidSeller	180946	195946	183946	5	0,08
	clearMarket	-	-	272084	1	0,01
	energyDeclarationsBuyers	-	-	46605	5	0,01
	energyDeclarationsSellers	-	-	46583	5	0,01
	finalize	-	-	13395	1	0,00
	receivePayment	52238	58948	57600	5	0,02
	revealBuyer	105168	129703	116777	5	0,04
	revealSellers	105124	129723	116745	5	0,04
	sendPayment	-	-	59045	5	0,02
Deployments					% of limit	
doubleAuction		4268899	4269155	4269027	63,5 %	1,33

Από τις δοκιμές στο συμβόλαιο του προμηθευτή η πιο ακριβή κλήση ήταν αυτή της εγγραφής ενός νέου χρήστη καθώς και η ανάπτυξη του συμβολαίου στο blockchain, ωστόσο από αλληπάλληλες δοκιμές προέκυψε (όπως ήταν και αναμενόμενο) ότι δεν υπήρχε εξάρτηση του υπολογιστικού κόστους από τον αριθμό των συμμετεχόντων. Αντιθέτως στην περίπτωση του συμβολαίου της Εν.Κοιν. (doubleAuction), κάποιες μέθοδοι επηρεάζονταν από τον αριθμό των συμμετεχόντων (γεγονός που αντανακλάται και από την ύπαρξη τιμών στις αντίστοιχες στήλες Min και Max). Οι πιο κοστοβόρες αλλά και ευαίσθητες μέθοδοι ως προς τον αριθμό των συμμετεχόντων διερευνήθηκαν περαιτέρω προσομοιώνοντας τις σε διαφορετικά σενάρια, μεταβάλλοντας τον αριθμό των συμμετεχόντων (Σχήμα 6-8) από 4 έως 200 (περιορισμός του λογισμικού Ganache). Αυτές είναι, η μέθοδος revealBuyer (και η αντίστοιχή της revealSeller) η οποία εισάγει την ανοιγμένη προσφορά ταξινομώντας την στο κατάλληλο μητρώο (Σχήμα 6-8. (a)) και η clearMarket (Σχήμα 6-8. (b)), η οποία κάνει την εκκαθάριση της αγοράς όπως περιγράφηκε προηγουμένως και είναι η πιο ακριβή υπολογιστικά. Σε κάθε περίπτωση, το υπολογιστικό κόστος παρότι αυξημένο, δεν κρίνεται απαγορευτικό για μια πραγματική υλοποίηση (ακόμη και στη χειρότερη περίπτωση), γεγονός που υποδεικνύει την εφαρμοσιμότητα της συγκεκριμένης τεχνολογίας στα σενάρια που μελετήθηκαν. Σημειώνεται ότι το κόστος εκκαθάρισης αγοράς που καταγράφηκε για το δυσμενέστερο σενάριο (με τους 200 συμμετέχοντες) ήταν στα 1,43 Ευρώ (με τις προαναφερθείσες τιμές για gas και ether).



Σχήμα 6-8 Υπολογιστικό κόστος (gas) της μεθόδου (a) revealBuyer και (b) clearMarket συναρτήσεως του αριθμού συμμετεχόντων στο συμβόλαιο.

6.5. Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, διερευνήθηκαν διαφορετικές τεχνολογίες blockchain, τα πλεονεκτήματά τους αλλά και κάποιοι βασικοί περιορισμοί και προκλήσεις που αυτές εμφανίζουν. Στη συνέχεια, έγινε ανάλυση και παρουσίαση εμπορικών εφαρμογών αλλά και βιβλιογραφική ανασκόπηση πρόσφατων μελετών που σχεδιάζουν εφαρμογές για προβλήματα ευφυών δικτύων χρησιμοποιώντας τεχνολογίες blockchain. Αξιολογήθηκαν οι διαφορετικές κατηγορίες προβλημάτων ως προς την δυνατότητα χρήσης τεχνολογιών blockchain και λαμβάνοντας υπόψη τους σχετικούς ανασχετικούς παράγοντες, προτάθηκε η εφαρμογή τους σε προβλήματα σχετικά με την αυτοματοποίηση και τη διασφάλιση εμπορικών συναλλαγών.

Έπειτα, εξετάστηκε το νέο νομοθετικό πλαίσιο των ενεργειακών κοινοτήτων στην Ελλάδα και διερευνήθηκε βιβλιογραφικά η αξία των αποκεντρωμένων αγορών ενέργειας. Συνδυάζοντας όλα τα προηγούμενα, σχεδιάστηκαν δύο απλά σενάρια αποκεντρωμένων εφαρμογών που βασίζονται σε τεχνολογία blockchain. Το πρώτο σενάριο αφορά την αυτοματοποίηση της προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας και το δεύτερο την λειτουργία αποκεντρωμένης αγοράς ενέργειας στα πλαίσια Εν.Κοιν., όπου υλοποιήθηκε ο μηχανισμός διπλής δημοπρασίας για την εκκαθάριση της τοπικής αγοράς. Τέλος, αναπτύχθηκαν τα σχετικά έξυπνα συμβόλαια για το πρωτόκολλο Ethereum, στη γλώσσα Solidity τα οποία προσομοιώθηκαν με το περιβάλλον Truffle και Ganache και σχολιάστηκαν τα αποτελέσματα, ως προς τα υπολογιστικά κόστη (gas) που προέκυψαν. Τα υπολογιστικά κόστη κρίθηκαν ικανοποιητικά για τις συγκεκριμένες εφαρμογές ενώ η πιο ακριβή μέθοδος ήταν αυτή της εκκαθάρισης της τοπικής αγοράς (στη δεύτερη εφαρμογή).

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

7.1. Ανακεφαλαίωση

Η συνεχώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα των ευφυών δικτύων έχει οδηγήσει στη διερεύνηση εναλλακτικών προσεγγίσεων για τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου, οι οποίες θα μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά τον τεράστιο όγκο πληροφορίας, θα προστατεύουν τα προσωπικά δεδομένα των χρηστών του και θα εμφανίζουν σημαντική ανεκτικότητα σε αστοχίες εξοπλισμού. Η αποκέντρωση της αρχιτεκτονικής ελέγχου και λειτουργίας του δικτύου διανομής αποτελεί μια τέτοια εναλλακτική στοχεύοντας στην απομάκρυνση της ευθύνης λήψης αποφάσεων από κάποιο κεντρικό σημείο και την ανάθεση τοπικών ευθυνών στα ίδια τα στοιχεία που συνθέτουν το δίκτυο. Τα στοιχεία αυτά επιφορτίζονται με την ευθύνη λήψης της τοπικής απόφασης λαμβάνοντας υπόψη τους τοπικούς περιορισμούς που μπορεί να έχουν (πληροφορία που δεν αφορά απαραίτητα το υπόλοιπο δίκτυο), επικοινωνώντας με κοντινούς κόμβους (τους γείτονές τους) προκειμένου να καταλήξουν σε μια απόφαση για την διαχείριση των πόρων τους, η οποία θα είναι η βέλτιστη για ολόκληρο το δίκτυο.

Οι βασικοί στόχοι της παρούσας διατριβής είναι:

- Η αναγνώριση των μοντέλων εκείνων που μπορούν να εφαρμοστούν σε προβλήματα κατανεμημένης βελτιστοποίησης καθώς επίσης και η βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών που προτείνουν κατανεμημένες μεθόδους για εφαρμογές ευφυών δικτύων διανομής.
- Η ανάπτυξη καινοτόμων κατανεμημένων μεθόδων προσανατολισμένων στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των ευφυών ΔΔ παρέχοντας εγγυήσεις για την εύρεση της βέλτιστης λύσης η οποία θα είναι ταυτόσημη με τη λύση του αρχικού (κεντρικού) προβλήματος.

- Η διερεύνηση, μέσω προσομοιώσεων, της ακρίβειας και της πρακτικής εφαρμοσιμότητας των προτεινόμενων μεθόδων καθώς και των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους.

Στα πλαίσια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, αναγνωρίστηκαν τα μοντέλα εκείνα τα οποία έχουν προταθεί για την επίλυση προβλημάτων βέλτιστου κατανεμημένου ελέγχου. Όπως προέκυψε, το μοντέλο της «συναίνεσης» αποτελεί ένα πολύ βασικό εργαλείο για την ανάπτυξη πρωτοκόλλων βέλτιστης κατανεμημένης λήψης αποφάσεων από μια ομάδα ομότιμων κόμβων καθώς επίσης και πρωτοκόλλων διάχυσης πληροφορίας, όπως η κατανεμημένη εύρεση π.χ. του μέσου όρου. Τα δύο προβλήματα συνδέονται άλλωστε αφού και η εύρεση του μέσου όρου πρακτικά διατυπώνεται με τη μορφή ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Η γενίκευση του πρωτοκόλλου συναίνεσης, όπως παρουσιάστηκε στη δεύτερη ενότητα, οδηγεί τελικά στον ορισμό παραπλήσιων μοντέλων κάποιων εκ των οποίων έχουν παρατηρηθεί σε βιοφυσικές διεργασίες και σχετίζονται με την έννοια του συγχρονισμού όπως απαντάται στη φύση. Στη συνέχεια αναγνωρίστηκαν και άλλες κλάσεις τεχνικών κατανεμημένης βελτιστοποίησης οι οποίες προέρχονται είτε από την εξέλιξη των αντίστοιχων κλασικών αναλυτικών μεθόδων βελτιστοποίησης είτε από τον κλάδο της πληροφορικής. Για κάποιες αδυναμίες οι οποίες παρατηρήθηκαν στις κατανεμημένες τεχνικές που διερευνήθηκαν, όπως η ευαισθησία σε θέματα ασφάλειας ή η απαίτηση ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των γειτονικών ομότιμων κόμβων, προτάθηκαν μελέτες οι οποίες αντιμετωπίζουν τα προβλήματα αυτά και στη συνέχεια δεν συζητήθηκαν περαιτέρω στην παρούσα διατριβή.

Έπειτα, επιχειρήθηκε η καταγραφή και η ταξινόμηση των πρόσφατων μελετών (τουλάχιστον κατά το χρόνο διενέργειας της επισκόπησης), σχετικών με τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής. Τα προβλήματα που μελετήθηκαν είναι η οικονομική κατανομή φορτίου, η ροή φορτίου και η βέλτιστη ρύθμιση τάσης. Για το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου αναφέρθηκαν δύο βασικές κατηγορίες επίλυσης, η πρώτη βασίζεται σε μοντέλα συναίνεσης και συγγενικά τους και η δεύτερη σε αναλυτικά μοντέλα κατανεμημένης βελτιστοποίησης. Σημειώθηκε μια έλλειψη στη βέλτιστη ενσωμάτωση των απωλειών ενεργού ισχύος στην κατανεμημένη επίλυση του προβλήματος Οικονομικής ΚΦ. Το πρόβλημα της κατανεμημένης ροής φορτίου μελετήθηκε αρχικά για το σχεδιασμό παράλληλων αλγορίθμων για συστήματα υπολογιστών πολυεπεξεργασίας με κατανεμημένη μνήμη. Ωστόσο, η αναγκαιότητα για αποκεντρωμένη επίλυση σε δίκτυα χωρισμένα σε ζώνες τα οποία δεν μοιράζονται πληροφορίες οδήγησε στην μελέτη για την κατανεμημένη επίλυσή του. Σημειώθηκε και σε αυτό το σημείο μια έλλειψη για έναν πλήρως κατανεμημένο αλγόριθμο για την επίλυση της ροής φορτίου. Σχετικά με την κατανεμημένη ρύθμιση τάσης, καταγράφηκε μεγάλος αριθμός πρόσφατων δημοσιεύσεων οι περισσότερες εκ των οποίων εμφάνιζαν σημαντική ανομοιογένεια. Για αυτό το λόγο, προτάθηκε μοντέλο ταξινόμησης με βάση τον τρόπο μοντελοποίησης (του Δικτύου, των ελεγχόμενων πόρων, των μεταβλητών ελέγχου, τα κριτήρια ρύθμισης, κ.ά.) καθώς επίσης και τη μέθοδο επίλυσης.

Το πρώτο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε αφορά την κατανομημένη επίλυση της Οικονομικής ΚΦ για ευφυή ΔΔ, για το οποίο αναπτύχθηκε πλήρως κατανομημένη μέθοδος βελτιστοποίησης. Η μέθοδος βασίζεται στο μοντέλο Τοπικών Εξισώσεων Κλωνωτή (TEK) το οποίο επιλέχθηκε επειδή διαθέτει συγκεκριμένες ιδιότητες (που δεν διαθέτουν άλλα πρωτόκολλα όπως λ.χ. το πρωτόκολλο «συναίνεσης») οι οποίες το καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλο για την άμεση εφαρμογή του στην επίλυση προβλημάτων κατανομής πόρων, όπως το πρόβλημα Οικονομικής ΚΦ. Συγκεκριμένα, κάθε σημείο της τροχιάς επίλυσης του μοντέλου ικανοποιεί τον εξισωτικό περιορισμό ικανοποίησης φορτίου, τα τεχνικά όρια των μονάδων αποτελούν τοπικούς περιορισμούς οι οποίοι δε χρειάζεται να κοινοποιούνται στο υπόλοιπο δίκτυο και στο σημείο ισορροπίας του (εφόσον ικανοποιούνται κάποιες βασικές παραδοχές) το μοντέλο TEK ικανοποιεί το κριτήριο Οικονομικής ΚΦ οδηγώντας έτσι στην εύρεση της βέλτιστης λύσης.

Ξεκινώντας από αυτό το βασικό μοντέλο αναπτύχθηκαν τρεις αλγόριθμοι για εφαρμογές Οικονομικής ΚΦ μονάδων ΔΠ σε ευφυή ΔΔ. Ο πρώτος αλγόριθμος υλοποιεί πρακτικά το μαθηματικό μοντέλο ορίζοντας τις απαραίτητες αρχικοποιήσεις και τους κανόνες ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ των μονάδων καθώς και την ανίχνευση της σύγκλισης σε ένα κατανομημένο περιβάλλον. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε δεύτερος αλγόριθμος προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη η συμφόρηση των γραμμών (σε περίπτωση που το υπό εξέταση ΔΔ διατηρεί ακτινική τοπολογία λειτουργίας). Πρέπει να σημειωθεί ότι η ιδέα που εφαρμόστηκε παρότι επιτυγχάνει την τήρηση των θερμικών ορίων των γραμμών με μια σχετικά απλή και γρήγορη υλοποίηση, δεν παρέχει εγγυήσεις για την εύρεση της ολικά βέλτιστης λύσης. Ο τελικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε ωστόσο, ενσωματώνει με βέλτιστο τρόπο στο πρόβλημα της Οικονομικής ΚΦ τις απώλειες ενεργού ισχύος των γραμμών. Το επιτυγχάνει αυτό εισάγοντας καινοτόμο μαθηματική ανάλυση η οποία εκμεταλλεύεται μια βασική ιδιότητα της Ιακωβιανής μήτρας απωλειών ενεργού ισχύος ως προς τις τάσεις του δικτύου. Με βάση αυτήν την ιδιότητα και χρησιμοποιώντας τον επαναληπτικό αλγόριθμο Gauss-Seidel, κάθε μονάδα μπορεί να υπολογίσει το Συντελεστή Ποινής Απωλειών (ΣΠΑ) που της αντιστοιχεί. Με αυτόν τον τρόπο, μια παράμετρος που θα απαιτούσε τη συγκέντρωση όλων των πληροφοριών του δικτύου σε ένα κεντρικό σημείο για να υπολογισθεί, βρίσκεται επαναληπτικά χρησιμοποιώντας μόνο πληροφορίες από τους ηλεκτρικούς γείτονες, καταλήγοντας δηλαδή στην αποσύνθεση του αρχικού προβλήματος σε επίπεδο ηλεκτρικών κόμβων. Η βασική παραδοχή που έγινε αφορά στην αναγκαιότητα ύπαρξης κάποιας ΕΗΣ σε κάθε ηλεκτρικό κόμβο του δικτύου καθώς επίσης και στη γνώση της σύνθετης αντίστασης των γραμμών. Παρότι η ύπαρξη μετρήσεων τάσης σε όλους τους κόμβους του δικτύου μπορεί να κριθεί υπερβολική σαν παραδοχή για τα δεδομένα των σημερινών ΔΔ, κρίνεται πλήρως ευθυγραμμισμένη με το πνεύμα και το κίνητρο της παρούσας διατριβής, ιδιαίτερα όσον αφορά τη μορφή που αναμένεται να λάβουν τα μελλοντικά δίκτυα.

Η ακρίβεια των μεθόδων που αναπτύχθηκαν διερευνήθηκε μέσω της εκτέλεσης διαφόρων σεναρίων προσομοίωσης. Ο πρώτος αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε ένα απλοποιημένο ΔΔ με 5 μονάδες ΔΠ και στη συνέχεια σε ένα τμήμα του ελληνικού ΔΔ, στην περιοχή της

Σπερχειάδας (γραμμή P25) για το οποίο ελέγχθηκε και η συμφόρηση των γραμμών λόγω της υψηλής διείσδυσης μονάδων ΔΠ. Οι οικονομικές παράμετροι των μονάδων ΔΠ επιλέχθηκαν τυχαία καθώς η προσομοίωση σκόπευε στη διερεύνηση της επεκτασιμότητας της μεθόδου καθώς επίσης ο προσδιορισμός αυτών των οικονομικών παραμέτρων ξεφεύγει από τους στόχους αυτής της διατριβής. Ο τρίτος αλγόριθμος για την ενσωμάτωση των απωλειών ενεργού ισχύος εφαρμόστηκε σε ένα απλοποιημένο δίκτυο διανομής 6 κόμβων και στη συνέχεια σε πρότυπο ΔΔ της IEEE 123 ζυγών, το οποίο τροποποιήθηκε έτσι ώστε να εμφανίζει αυξημένη διείσδυση μονάδων ΔΠ. Συμπερασματικά, όπως αναμένονταν και από τη θεωρητική ανάλυση, οι προτεινόμενες μέθοδοι βρίσκουν τη βέλτιστη λύση με αμελητέο σφάλμα, σε σύγκριση με μια συμβατική κεντρική βελτιστοποίηση. Το σφάλμα εξαρτάται από τον ορισμό του διαστήματος ανοχής για τα κριτήρια σύγκλισης αλλά και από την ελαστικότητα της συνάρτησης φράγματος που υλοποιεί τους τοπικούς περιορισμούς (δηλ. τα τεχνικά όρια των μονάδων). Άλλες παράμετροι του μοντέλου δεν επηρεάζουν την ακρίβεια ούτε την ταχύτητα σύγκλισης. Επίσης, οι αλγόριθμοι εμφανίζουν σημαντική επεκτασιμότητα αφού ο αριθμός των απαιτούμενων επαναλήψεων για προβλήματα με διαφορετική πολυπλοκότητα είναι αρκετά κοντινός καθώς επίσης χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα της «τοποθέτησης και άμεσης λειτουργίας». Ενδιαφέροντα συμπεράσματα προέκυψαν εξετάζοντας με προσομοιώσεις Monte Carlo (για την παραγωγή τυχαίων δικτύων), την επίδραση που επιφέρουν στην ταχύτητα σύγκλισης τα τοπολογικά χαρακτηριστικά του γράφου επικοινωνίας των κόμβων. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι τα δίκτυα πλέγματος, τα δίκτυα μικρού κόσμου και τυχαία δίκτυα τα οποία πληρούν μια συγκεκριμένη ιδιότητα, εμφανίζουν επεκτάσιμη συμπεριφορά, ιδιαίτερα όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων του δικτύου. Τέλος, εξετάστηκε μέσω προσομοιώσεων και διαπιστώθηκε η σημαντική ανεκτικότητα της μεθόδου σε περιπτώσεις που αποκόπτεται η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, ακόμα και σε στην περίπτωση που χάνεται σημαντικός αριθμός τηλεπικοινωνιακών ζευξών.

Για την κατανομημένη επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου, αναπτύχθηκε αλγόριθμος ο οποίος βασίζεται στη μέθοδο Newton-Raphson σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Η μέθοδος εκμεταλλεύεται την ιδιότητα της Ιακωβιανής μήτρας των εξισώσεων ροής φορτίου (με την ίδια λογική όπως και στην προηγούμενη ενότητα). Πρακτικά για τον υπολογισμό της ροής φορτίου, κάθε κόμβος πρέπει να γνωρίζει τις διορθώσεις στο μέτρο και στη γωνία της τάσης του, ο υπολογισμός των οποίων απαιτεί πληροφορίες από όλο το δίκτυο. Ωστόσο, αποσυνθέτοντας το πρόβλημα σε επίπεδο κόμβων προκύπτει, ότι είναι δυνατό οι διορθώσεις να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας πληροφορίες μόνο από τους ηλεκτρικούς γείτονες, παρακάμπτοντας έτσι την άμεση αντιστροφή της Ιακωβιανής μήτρας των εξισώσεων ροής φορτίου και διατυπώνοντας ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό με έμμεσο τρόπο. Για αυτόν τον υπολογισμό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ο αλγόριθμος Gauss-Seidel, όπως έγινε και στην προηγούμενη ενότητα, ωστόσο λόγω της μεγαλύτερης πολυπλοκότητας της Ιακωβιανής μήτρας σε αυτήν την περίπτωση προτιμήθηκε η διατύπωση και επίλυση του προβλήματος ως πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Η ακρίβεια της μεθόδου διερευνήθηκε μέσω προσομοιώσεων όπου καταγράφηκαν και παρουσιάστηκαν όλες οι διαφορετικές φάσεις εκτέλεσης των αλγορίθμων. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε έναν απλοποιημένο σύστημα 6 ζυγών, στο πρότυπο ΔΔ της IEEE 34 ζυγών και στο πρότυπο ΔΔ της IEEE 123 ζυγών. Τα αποτελέσματα έδειξαν μεγάλη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα, καθώς επίσης και την επεκτασιμότητα της μεθόδου. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ακρίβεια της μεθόδου σε αυτήν την περίπτωση εξαρτάται από τις παραμέτρους των κριτηρίων σύγκλισης. Επιπρόσθετα, όταν οι γωνίες των τάσεων αμελήθηκαν από το μοντέλο ροής φορτίου παρατηρήθηκε ότι τα μέτρα των τάσεων υπολογίσθηκαν με μια αμελητέα αύξηση στο σφάλμα σε συνδυασμό με έναν παραπλήσιο αριθμό απαιτούμενων επαναλήψεων. Η προτεινόμενη μέθοδος συγκρίθηκε με μεθόδους από τη βιβλιογραφία για την επίλυση της ροής φορτίου και διαπιστώθηκε ότι παρέχει το πλεονέκτημα της μη απαίτησης οποιασδήποτε ιεραρχίας ως προς τον τρόπο διεξαγωγής των υπολογισμών σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. Τέλος, διερευνήθηκε η απόκριση της μεθόδου σε περίπτωση που χαθεί η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ των κόμβων όπου και διαπιστώθηκε η αυξημένη στιβαρότητά της.

Ο επόμενος καταναμημένος αλγόριθμος αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ρύθμισης τάσης στα πλαίσια των ευφύων ΔΔ. Μια προσέγγιση για την επίτευξη του στόχου αυτού είναι η εύρεση των ελάχιστων εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος που θα πρέπει να παρέχονται στο δίκτυο από τους ελεγχόμενους πόρους του, προκειμένου να εξαιρεθούν οποιοσδήποτε παραβιάσεις στην τάση. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη λογική ότι οι ελεγχόμενοι πόροι του δικτύου θα παρέχουν κατά κάποιο τρόπο επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο και άρα θα πρέπει να αποζημιώνονται για την συνεισφορά τους αυτή. Η μέθοδος πρακτικά αποσυνθέτει το πρόβλημα ελέγχου της τάσης σε επίπεδο ηλεκτρικού κόμβου (με αντίστοιχη λογική όπως και στις προηγούμενες ενότητες) και εισάγει την τοπική πληροφορία της παραβίασης τάσης κάθε κόμβου (εφόσον υφίσταται) στη συνολική αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Το επιτυγχάνει αυτό ορίζοντας συναρτήσεις ποινής (για κάθε παραβιαζόμενο περιορισμό τάσης), οι οποίες στη συνέχεια μετατρέπονται σε πληροφορία του δικτύου χρησιμοποιώντας ένα καταναμημένο πρωτόκολλο. Ο κάθε κόμβος βελτιστοποιεί την έγχυσή του - χωρίς να απαιτείται άμεση κοινοποίηση των τοπικών πληροφοριών έγχυσης - χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο κατάβασης βαθμίδας και διαδοχικά συμμετέχει στην καταναμημένη επίλυση του προβλήματος κυρτής βελτιστοποίησης το οποίο αντιστοιχεί στην έμμεση αντιστροφή της Ιακωβιανής μήτρας των εξισώσεων ροής φορτίου του δικτύου. Συμπερασματικά, ο κάθε κόμβος υιοθετεί μια τοπική συμπεριφορά που αφορά τις τοπικές του μεταβλητές και περιορισμούς ενώ παράλληλα συμμετέχει σε μια διαδικασία «συναίνεσης» με το υπόλοιπο δίκτυο, υπολογίζοντας τελικά την βέλτιστη τοπική απόφαση για όλο το δίκτυο. Ο αλγόριθμος ενεργοποιείται με αυτόματο τρόπο και έχει δυνατότητα «τοποθέτησης και άμεσης λειτουργίας», καθώς απαιτεί μόνο γνώση των σύνθετων αντιστάσεων των γραμμών που συνδέουν τους ηλεκτρικούς γείτονες και τοπική ανταλλαγή πληροφοριών.

Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε απλοποιημένο ΔΔ 6 ζυγών, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα και η ακρίβειά της. Αρχικά, παρουσιάστηκε η επίλυση της έμμεσης αντιστροφής της Ιακωβιανής μήτρας των εξισώσεων ροής φορτίου η οποία κρίθηκε αποτελεσματική. Στην συνέχεια ελέγχθηκε η συνολική συμπεριφορά του αλγορίθμου μέσω τριών διαφορετικών σεναρίων. Πολύ σημαντικό συμπέρασμα αποτελεί το γεγονός ότι η μέθοδος παρουσιάζει παραπλήσια αποτελέσματα στην περίπτωση που οι φασικές γωνίες αμελούνται από το μοντέλο (θεωρώντας δηλαδή ότι είναι διαθέσιμες μετρήσεις μόνο μέτρου τάσεων στους κόμβους π.χ. από συσκευές όπως οι ηλεκτρονικοί μετρητές). Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε στη συνέχεια σε μεγαλύτερα ΔΔ όπως το πρότυπο ΔΔ της IEEE 123 ζυγών για τα οποία προέκυψε ότι παρουσιάζει ιδιαίτερα επεκτάσιμη συμπεριφορά και αποδεκτή ακρίβεια σε σύγκριση με μια κεντρική προσέγγιση. Σχετικά με την ακρίβεια της μεθόδου, προέκυψε ότι εξαρτάται από τις παραμέτρους που τίθενται στα κριτήρια σύγκλισης των αλγορίθμων, τους συντελεστές ποινής για την παραβίαση των ανισωτικών περιορισμών και από τη γραμμικοποίηση των μη γραμμικών όρων που εμπεριέχονται στις εξισώσεις ροής φορτίου. Από τις μελέτες που διενεργήθηκαν σχετικά με την εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου σύγκλισης θεωρώντας διαφορετικές τηλεπικοινωνιακές υποδομές, προέκυψε η πρακτική εφαρμοσιμότητα της προτεινόμενης μεθόδου. Τέλος, εξετάστηκε η απόκριση της μεθόδου όταν χάνεται η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ των κόμβων στο δίκτυο, όπου και διαπιστώθηκε ότι ο αλγόριθμος παρουσιάζει αυξημένη σπιβαρότητα σε αυτές τις διαταραχές και έγινε μια απόπειρα καταγραφής των παραμέτρων εκείνων οι οποίες επηρεάζουν περισσότερο το σφάλμα του γραμμικοποιημένου μοντέλου στην περίπτωση που αμελούνται οι φασικές γωνίες.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διατριβής ακολουθήθηκε μια διαφορετική προσέγγιση για αποκεντρωμένες εφαρμογές. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης τεχνολογιών κατανεμημένων μητρώων (blockchain) για την αντιμετώπιση προβλημάτων ευφυών δικτύων. Σε αυτό το πλαίσιο διενεργήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση των δυνατοτήτων, των πλεονεκτημάτων αλλά και των βασικών περιορισμών και προκλήσεων που εμφανίζουν διαφορετικές τεχνολογίες blockchain. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν εμπορικές εφαρμογές για προβλήματα ευφυών δικτύων οι οποίες χρησιμοποιούν τεχνολογίες blockchain καθώς επίσης και επιλέχθηκαν και αναλύθηκαν σχετικές βιβλιογραφικές μελέτες. Οι διάφορες κατηγορίες προβλημάτων ευφυών δικτύων αξιολογήθηκαν ως προς την αποτελεσματικότητα χρήσης τεχνολογιών blockchain σε αυτές και έγιναν προτάσεις για τις κατηγορίες εκείνες που η χρήση του blockchain αναμένεται να δώσει ενθαρυντικά αποτελέσματα. Χαρακτηριστικά προέκυψε το συμπέρασμα, ότι η εφαρμογή τους σε προβλήματα σχετικά με την αυτοματοποίηση και τη διασφάλιση των εμπορικών συναλλαγών στα πλαίσια των ευφυών δικτύων κρίνονται τα πιο κατάλληλα πεδία χρήσης.

Σε επόμενη φάση, εξετάστηκε το νέο νομοθετικό πλαίσιο των ενεργειακών κοινοτήτων στην Ελλάδα και διερευνήθηκε βιβλιογραφικά η αξία των αποκεντρωμένων αγορών ενέργειας. Δύο απλά σενάρια αποκεντρωμένων εφαρμογών που βασίζονται σε τεχνολογία

blockchain σχεδιάστηκαν, σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Το πρώτο σενάριο αφορά την αυτοματοποίηση της προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας και το δεύτερο την λειτουργία αποκεντρωμένης αγοράς ενέργειας στα πλαίσια Εν.Κοιν., όπου και υλοποιήθηκε ο μηχανισμός διπλής δημοπρασίας για την εκκαθάριση της τοπική αγοράς. Τα σχετικά έξυπνα συμβόλαια υλοποιήθηκαν για το πρωτόκολλο Ethereum, στη γλώσσα Solidity και προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας το περιβάλλον Truffle και Ganache. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι τα υπολογιστικά κόστη (gas) παρέμεναν σε ικανοποιητικά επίπεδα για την εφαρμογή της αυτοματοποίησης της προμήθειας ηλ. ενέργειας ενώ ελαφρώς πιο αποθαρρυντικά ήταν για την περίπτωση της υλοποίησης της διπλής δημοπρασίας καθώς συγκεκριμένες μέθοδοι (όπως αναμένονταν) προέκυψε ότι εξαρτώνται από το συνολικό αριθμό των συμμετεχόντων στην εφαρμογή υποδεικνύοντας έτσι έναν περιορισμό στη δυνατότητα επεκτασιμότητάς της. Αυτές οι μέθοδοι ήταν, η μέθοδος εκκαθάρισης της τοπικής αγοράς και οι μέθοδοι ανοίγματος προσφορών.

7.2. Συμβολή

Οι κύριες συμβολές της διατριβής συνοψίζονται ως εξής:

Κεφάλαιο 2:

- Προτάθηκε σύστημα ταξινόμησης των τεχνικών κατανεμημένης βελτιστοποίησης. Συνολικά ορίστηκαν τέσσερις κλάσεις αλγορίθμων, η πρώτη κλάση περιλαμβάνει τους αλγορίθμους οι οποίοι ανάγονται στο μοντέλο συναίνεσης, η δεύτερη περιλαμβάνει μοντέλα που μελετούν δυναμικά φαινόμενα πληθυσμών, η τρίτη αφορά μεθόδους που προέρχονται από αποσύνθεση αναλυτικών μεθόδων βελτιστοποίησης και η τέταρτη αλγορίθμους που προέρχονται από τον κλάδο της πληροφορικής.
- Έγινε ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας και προτάθηκε ταξινόμησή της. Ιδιαίτερα για τις μελέτες που αφορούσαν το πρόβλημα ρύθμισης της τάσης δόθηκε αναλυτικό σύστημα ταξινόμησης με βάση τον προτεινόμενο τρόπο μοντελοποίησης, τη μέθοδο επίλυσης κ.ά.

Κεφάλαιο 3:

- Διατυπώθηκε και μελετήθηκε το πρόβλημα της Οικονομικής ΚΦ μονάδων ΔΠ στα πλαίσια ευφύων ΔΔ, για το οποίο αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι για την πλήρως κατανεμημένη επίλυσή του έχοντας επιλέξει ως καταλληλότερο το μοντέλο εξισώσεων TEK. Στο βασικό μοντέλο προτάθηκε απλοϊκή και όχι απαραίτητα βέλτιστη προσέγγιση για την ενσωμάτωση των περιορισμών συμφόρησης των γραμμών.

- Πραγματοποιήθηκε καινοτόμος ανάλυση για τον κατανεμημένο υπολογισμό και τη βέλτιστη ενσωμάτωση των απωλειών ενεργού ισχύος στη διαδικασία της Οικονομικής ΚΦ. Οι απώλειες κατανέμονται σε κάθε μονάδα χρησιμοποιώντας τους Συντελεστές Ποινής Απωλειών (ΣΠΑ).
- Εισήχθη καινοτόμος προσέγγιση για τον κατανεμημένο υπολογισμό των συντελεστών ποινής απωλειών μέσω της επίλυσης ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων αποφεύγοντας την άμεση αντιστροφή της Ιακωβιανής μήτρας απωλειών ενεργού ισχύος ως προς τις τάσεις του δικτύου, αποσυνθέτοντας έτσι το αρχικό πρόβλημα σε επίπεδο ηλεκτρικών κόμβων.

Κεφάλαιο 4:

- Αναπτύχθηκε πλήρως κατανεμημένος αλγόριθμος, επεκτάσιμος και με δυνατότητα «τοποθέτησης και άμεσης λειτουργίας» σε περιπτώσεις επαναδιαμόρφωσης του δικτύου, για την επίλυση του προβλήματος της ροής φορτίου. Η προτεινόμενη μέθοδος επιτρέπει τον υπολογισμό των ροών φορτίου χρησιμοποιώντας μόνο τοπικές μετρήσεις και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ ηλεκτρικών γειτόνων.

Κεφάλαιο 5:

- Παρουσιάστηκε καινοτόμος κατανεμημένος αλγόριθμος που αξιοποιεί βασική ιδιότητα της μήτρας αγωγιμοτήτων του δικτύου για την αντιμετώπιση των παραβιάσεων της τάσης, βρίσκοντας το ολικό βέλτιστο για όλο το δίκτυο, χωρίς την απαίτηση της εύρεσης της αντίστροφης Ιακωβιανής μήτρας των εξισώσεων ροής φορτίου ή οποιονδήποτε άλλον κεντρικό υπολογισμό.
- Οι παραβιάσεις τάσης επιφέρουν την εισαγωγή τοπικών συναρτήσεων ποινής οι οποίες στη συνέχεια διαδίδονται στο υπόλοιπο δίκτυο μέσω ενός αλγορίθμου που βασίζεται στο μοντέλο της συναίνεσης για την κατανεμημένη επίλυση ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων.
- Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι επεκτάσιμος, επικεντρώνεται στην τοπική φύση του προβλήματος παραβίασης της τάσης και δεν απαιτεί κεντρικό συντονισμό ούτε για τη ενεργοποίηση ούτε για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Επιπλέον, παρουσιάζει τη δυνατότητα της «τοποθέτησης και άμεσης λειτουργίας» καθώς απαιτεί μόνο τοπικές μετρήσεις και επικοινωνία και τη γνώση της σύνθετης αντίστασης των κλάδων.

Κεφάλαιο 6:

- Αξιολογήθηκαν διαφορετικές κατηγορίες προβλημάτων ευφυών δικτύων ως προς τη δυνατότητα αντιμετώπισής τους χρησιμοποιώντας τεχνολογίες blockchain και επιλέχθηκαν συγκεκριμένες από αυτές ως οι πιο κατάλληλες.
- Σχεδιάστηκαν, υλοποιήθηκαν και προσομοιώθηκαν δύο σενάρια αποκεντρωμένων εφαρμογών που βασίζονται σε τεχνολογία blockchain, για την αυτοματοποίηση της προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας και τη λειτουργία αποκεντρωμένων αγορών ενέργειας στα πλαίσια Εν.Κοιν.

7.3. Μελλοντικές επεκτάσεις

Κάποιες προτεινόμενες μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας διατριβής είναι οι εξής:

- Η εισαγωγή περαιτέρω περιορισμών στο πρόβλημα τις Οικονομικής ΚΦ όπως οι περιορισμοί στο μέγιστο επιτρεπόμενο ρυθμό αύξησης και μείωσης της παραγωγής (ramp-up και ramp-down αντίστοιχα). Με την προσθήκη αυτών των περιορισμών το πρόβλημα της Οικονομικής ΚΦ παίρνει πλέον την μορφή ενός προβλήματος προγραμματισμού καθώς εισάγονται περιορισμοί στις μεταβλητές των μονάδων για διαδοχικές χρονικές στιγμές.
- Στο ίδιο πλαίσιο, θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη και συστήματα αποθήκευσης για το αντίστοιχο πρόβλημα προγραμματισμού.
- Ενδιαφέρον θα είχε να μελετηθεί το κατά πόσον οι προτεινόμενες μέθοδοι οι οποίες θεωρούν απαραίτητα μετρήσεις σε κάθε κόμβο του δικτύου θα μπορούσαν να συνδυαστούν με καταναμημένες μεθόδους εκτίμησης κατάστασης προκειμένου να χαλαρώσουν αυτόν τον περιορισμό.
- Για κάθε μια από τις προτεινόμενες μεθόδους, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να μελετηθεί η περίπτωση ασύμμετρων τριφασικών δικτύων διανομής.
- Επίσης, στις περιπτώσεις όπου γίνονται γραμμικοποιήσεις, θα μπορούσαν να διερευνηθούν εναλλακτικές προσεγγίσεις με σκοπό τη μείωση των τελικών σφαλμάτων.
- Η πρακτική εφαρμοσιμότητα των μεθόδων θα μπορούσε να διερευνηθεί περαιτέρω με προσομοιώσεις του ηλεκτρικού δικτύου σε συνδυασμό με ρεαλιστικές προσομοιώσεις των τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων (co-simulation).
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η σχεδίαση και διερεύνηση συνδυαστικών αλγορίθμων που θα βελτιστοποιούν τη λειτουργία του δικτύου και θα χρησιμοποιούν το blockchain σε υψηλό επίπεδο για τη διασφάλιση των συναλλαγών και ακόμη περισσότερο η χρήση καταναμημένων αλγορίθμων βελτιστοποίησης για τον συγκεκριμένο σκοπό.
- Τέλος, για την ανάπτυξη των έξυπνων συμβολαίων, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μεθοδολογίες οι οποίες θα διασφαλίζουν την ιδιωτικότητα των δεδομένων των χρηστών (σε δημόσια blockchain), χρησιμοποιώντας κατάλληλα πρωτόκολλα κρυπτογραφίας (π.χ. secure multi-party computation).

Βιβλιογραφία

- [1] IEA, 2017. Chapter 1: Introduction and scope, in *World Energy Outlook 2017*. International Energy Agency.
- [2] C. S. Lai and L. L. Lai, "Application of Big Data in Smart Grid," *2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Kowloon, 2015, pp. 665-670.
- [3] P. McDaniel and S. McLaughlin, "Security and Privacy Challenges in the Smart Grid," in *IEEE Security & Privacy*, vol. 7, no. 3, pp. 75-77, May-June 2009.
- [4] World Bank. 2017. State of Electricity Access Report 2017. World Bank, Washington, DC. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/26646> License: CC BY 3.0 IGO.
- [5] X. Yu and Y. Xue, "Smart Grids: A Cyber-Physical Systems Perspective," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 5, pp. 1058-1070, May 2016.
- [6] Etimad Fadel, V.C. Gungor, Laila Nassef, Nadine Akkari, M.G. Abbas Malik, Suleiman Al-masri, Ian F. Akyildiz, "A survey on wireless sensor networks for smart grid", *Computer Communications*, Volume 71, 2015, Pages 22-33, ISSN 0140-3664.
- [7] J. Considine, F. Li, G. Kollios and J. Byers, "Approximate aggregation techniques for sensor databases," *Proceedings. 20th International Conference on Data Engineering*, 2004, pp. 449-460.
- [8] M. Jaradat, M. Jarrah, A. Bouselham, Y. Jararweh, M. Al-Ayyoub, "The Internet of Energy: Smart Sensor Networks and Big Data Management for Smart Grid", *Procedia Computer Science*, Volume 56, 2015, Pages 592-597, ISSN 1877-0509.
- [9] Schneider, Aaron, "Decentralization: Conceptualization and measurement", *Studies in Comparative International Development*, 2003, Sep, vol. 38, no. 3, pp=32-56, ISSN 1936-6167.
- [10] Pullman, Nick and Kevin Streff. "Creating a Security Education, Training, and Awareness Program." *Handbook of Research on Social and Organizational Liabilities in Information Security*. IGI Global, 2009. 325-345. Web. 2 Mar. 2018.
- [11] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani and C. Marnay, "Microgrids," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 78-94, July-Aug. 2007.
- [12] F. F. Wu, K. Moslehi and A. Bose, "Power System Control Centers: Past, Present, and Future," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 11, pp. 1890-1908, Nov. 2005.
- [13] V. Kekatos, L. Zhang, G. B. Giannakis, and R. Baldick, "Voltage regulation algorithms for multiphase power distribution grids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 5, pp. 3913-3923, Sep. 2016.
- [14] S. Ghosh, S. Rahman, and M. Pipattanasomporn, "Distribution voltage regulation through active power curtailment with PV inverters and solar generation forecasts," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 13-22, Jan. 2017.
- [15] A. Kulmala, S. Repo, and P. Järventausta, "Coordinated voltage control in distribution networks including several distributed energy resources," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 2010-2020, July 2014.

- [16] Y. J. Kim, S. J. Ahn, P. I. Hwang, G. C. Pyo, and S. I. Moon, "Coordinated control of a DG and voltage control devices using a dynamic programming algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 42–51, Feb. 2013.
- [17] L. Yu, D. Czarkowski, and F. de León, "Optimal distributed voltage regulation for secondary networks with DGs," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 959–967, June 2012.
- [18] A. Abessi, V. Vahidinasab, and M. S. Ghazizadeh, "Centralized support distributed voltage control by using end-users as reactive power support," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 178–188, Jan. 2016.
- [19] B. Zhang, A. Y. S. Lam, A. D. Domínguez-García, and D. Tse, "An optimal and distributed method for voltage regulation in power distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 4, pp. 1714–1726, July 2015.
- [20] S. Bolognani, R. Carli, G. Cavraro, and S. Zampieri, "Distributed reactive power feedback control for voltage regulation and loss minimization," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 60, no. 4, pp. 966–981, Apr. 2015.
- [21] Carl Anderson, "Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. Eric Bonabeau, Marco Dorigo, Guy Theraulaz, " *The Quarterly Review of Biology* 76, no. 2 (Jun., 2001): 268-269.
- [22] S. Barbarossa and G. Scutari, "Bio-Inspired Sensor Network Design," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 26-35, May 2007.
- [23] M. Zhu, S. Martinez, *Distributed Optimization-Based Control of Multi-Agent Networks in Complex Environments*, 1st ed. Springer, United States: Springer, 2015.
- [24] R. Olfati-Saber and R. Murray. "Consensus Problems in Networks of agents with Switching Topology and Time-Delays", *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 49, n. 9, pp. 1520-1533, September 2004.
- [25] M. Mehyar, D. Spanos, J. Pongsajapan, S. H. Low and R. M. Murray, "Asynchronous Distributed Averaging on Communication Networks," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, no. 3, pp. 512-520, June 2007.
- [26] H. Gao, M. Ruan, & Y. Wang, "Secure and Privacy-Preserving Consensus", CoRR, abs/1707.04491, 2017.
- [27] Q. Liu, X. Ren and Y. Mo, "Secure and privacy preserving average consensus," *2017 11th Asian Control Conference (ASCC)*, Gold Coast, QLD, 2017, pp. 274-279.
- [28] M. Kefayati, M. S. Talebi, H. R. Rabiee and B. H. Khalaj, "On Secure Consensus Information Fusion over Sensor Networks", *2007 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications*, Amman, 2007, pp. 108-115.
- [29] Y. Kuramoto, "Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence". Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- [30] F. Bénézit, V. Blondel, P. Thiran, J. Tsitsiklis and M. Vetterli, "Weighted Gossip: Distributed Averaging using non-doubly stochastic matrices," *2010 IEEE International Symposium on Information Theory*, Austin, TX, 2010, pp. 1753-1757.
- [31] J. Barreiro-Gomez, G. Obando and N. Quijano, "Distributed Population Dynamics: Optimization and Control Applications," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 47, no. 2, pp. 304-314, Feb. 2017.
- [32] P. Antoniou, A. Pitsillides (2009) "Congestion Control in Autonomous Decentralized Networks Based on the Lotka-Volterra Competition Model". In: Alippi C., Polycarpou M., Panayiotou C., Ellinas G. (eds) *Artificial Neural Networks – ICANN 2009*. ICANN 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5769. Springer, Berlin, Heidelberg.

- [33] M. Zhu and S. Martinez, "On Distributed Convex Optimization Under Inequality and Equality Constraints," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57, no. 1, pp. 151-164, Jan. 2012.
- [34] D. Varagnolo, F. Zanella, A. Cenedese, G. Pillonetto and L. Schenato, "Newton-Raphson Consensus for Distributed Convex Optimization," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 61, no. 4, pp. 994-1009, April 2016.
- [35] Stephen Boyd; Neal Parikh; Eric Chu; Borja Peleato; Jonathan Eckstein, "Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers," in *Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers*, 1, Now Foundations and Trends, 2011.
- [36] M. Liu, E. Crisostomi, M. Raugi and R. Shorten, "Optimal distributed power generation for thermal and electrical scheduling in a microgrid," *IEEE PES ISGT Europe 2013*, Lyngby, 2013, pp. 1-5.
- [37] W. Yeoh, A. Felner, S. Koenig, "BnB-ADOPT: An Asynchronous Branch-and-Bound DCOP Algorithm", *Journal of Artificial Intelligence Research* 38, 85-133, 2010. 172, 2010.
- [38] Nordman, M.M.; Lehtonen, M., "Distributed agent-based State estimation for electrical distribution networks," *IEEE Trans. on PWRs*, vol.20, no.2, pp.652-8, May 2005.
- [39] Le Xie; Dae-Hyun Choi; Kar, S.; Poor, H.V., "Fully Distributed State Estimation for Wide-Area Monitoring Systems," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol.3, no.3, pp.1154,1169, Sept. 2012.
- [40] I. Leisse, O. Samuelsson, and J. Svensson, "Coordinated voltage control in distribution systems with DG - Control algorithm and case study," in *Integration of Renewables into the Distribution Grid*, CIREN 2012 Workshop, may 2012, pp. 1 -4b.
- [41] Sansawatt, T.; Ochoa, L.F.; Harrison, G.P., "Smart Decentralized Control of DG for Voltage and Thermal Constraint Management," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol.27, no.3, pp.1637,1645, Aug. 2012.
- [42] Ziang Zhang; Mo-Yuen Chow, "Incremental cost consensus algorithm in a smart grid environment," *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, vol., no., pp.1,6, 24-29 July 2011.
- [43] S. Kar and G. Hug, "Distributed robust economic dispatch in power systems: A consensus + innovations approach," *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, San Diego, CA, 2012, pp. 1-8.
- [44] K. Chen, J. Xie, L. Wang, D. Yue, T. Yong and Y. Li, "A fully distributed economic dispatch strategy for power systems considering flexible loads," *Control Conference (CCC), 2015 34th Chinese*, Hangzhou, 2015, pp. 6602-6607.
- [45] G. Binetti, A. Davoudi, F. L. Lewis, D. Naso and B. Turchiano, "Distributed Consensus-Based Economic Dispatch with Transmission Losses," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1711-1720, July 2014.
- [46] H. Xing, Y. Mou, M. Fu and Z. Lin, "Distributed algorithm for economic power dispatch including transmission losses," *Control Conference (ECC), 2015 European*, Linz, 2015, pp. 1076-1081.
- [47] Conejo, A.J.; Aguado, J.A., "Multi-area coordinated decentralized DC optimal power flow," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.13, no.4, pp.1272,1278, Nov 1998.
- [48] E. Loukarakis, C. J. Dent and J. W. Bialek, "Decentralized Multi-Period Economic Dispatch for Real-Time Flexible Demand Management," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 672-684, Jan. 2016.

- [49] H. Xing, Z. Lin and M. Fu, "An ADMM + consensus based distributed algorithm for dynamic economic power dispatch in smart grid," *Control Conference (CCC)*, 2015 34th Chinese, Hangzhou, 2015, pp. 9048-9053.
- [50] W. Zheng, W. Wu, B. Zhang, Z. Li and Y. Liu, "Fully distributed multi-area economic dispatch method for active distribution networks," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 12, pp. 1341-1351, 9 4 2015.
- [51] A. D. Domínguez-García and C. N. Hadjicostis, "Distributed algorithms for control of demand response and distributed energy resources," *Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, 2011 50th IEEE Conference on, Orlando, FL, 2011, pp. 27-32.
- [52] Mudumbai, R.; Dasgupta, S.; Cho, B., "Distributed control for optimal economic dispatch of power generators," *Control Conference (CCC)*, 2010 29th Chinese, vol., no., pp.4943,4947, 29-31 July 2010.
- [53] D. Gregoratti and J. Matamoros, "Distributed Energy Trading: The Multiple-Microgrid Case," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 2551-2559, April 2015.
- [54] W. Zhang, W. Liu, X. Wang, L. Liu and F. Ferrese, "Online Optimal Generation Control Based on Constrained Distributed Gradient Algorithm," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 35-45, Jan. 2015.
- [55] Loia, V.; Vaccaro, A., "Decentralized Economic Dispatch in Smart Grids by Self-Organizing Dynamic Agents," *Systems, Man, and Cybernetics: Systems, IEEE Transactions on*, vol.44, no.4, pp.397,408, April 2014.
- [56] De Brabandere, K.; Vanthournout, K.; Driesen, J.; Deconinck, G.; Belmans, R., "Control of Microgrids," *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, vol., no., pp.1,7, 24-28 June 2007.
- [57] P. Srikantha and D. Kundur, "Distributed Optimization of Dispatch in Sustainable Generation Systems via Dual Decomposition," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2501-2509, Sept. 2015.
- [58] Pantoja, A.; Quijano, N., "Distributed optimization using population dynamics with a local replicator equation," *Decision and Control (CDC)*, 2012 IEEE 51st Annual Conference on, vol., no., pp.3790,3795, 10-13 Dec. 2012.
- [59] A. Pantoja, N. Quijano and K. M. Passino, "Dispatch of distributed generators under local-information constraints," *American Control Conference (ACC)*, 2014, Portland, OR, 2014, pp. 2682-2687.
- [60] Y. Fukuyama, Y. Nakanishi, H.-D. Chiang, "Fast distribution power flow using multi-processors", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 18, Issue 5, 1996, Pages 331-337, ISSN 0142-0615.
- [61] Baran, E. Kaszkurewicz and D. M. Falcao, "Team algorithms in distributed load flow computations," in *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, no. 6, pp. 583-588, Nov 1995.
- [62] M. Osano and M. A. M. Capretz, "A distributed method for solving nonlinear equations applying the power load flow calculation," *Proceedings of the Thirtieth Hawaii International Conference on System Sciences*, Wailea, HI, USA, 1997, pp. 676-680 vol.5.
- [63] Feng Tu and A. J. Flueck, "A message-passing distributed-memory parallel power flow algorithm," *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, 2002, pp. 211-216 vol.1.

- [64] Fangxing Li, Robert P. Broadwater, "Distributed algorithms with theoretic scalability analysis of radial and looped load flows for power distribution systems", *Electric Power Systems Research*, Volume 65, Issue 2, 2003, Pages 169-177, ISSN 0378-7796.
- [65] K. Dasgupta and K. S. Swarup, "Distributed Fast Decoupled Load Flow Analysis," 2008 Joint International Conference on *Power System Technology and IEEE Power India Conference*, New Delhi, 2008, pp. 1-6.
- [66] Hongbin Sun and Boming Zhang, "Distributed power flow calculation for whole networks including transmission and distribution," 2008 *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Chicago, IL, 2008, pp. 1-6.
- [67] G. Ezhilarasi, K. Swarup, "Distributed load flow using partitioning and equivalencing of power networks", *Proc. 16th National Power Syst. Conf.*, pp. 335-340, 2010-Dec.-1517.
- [68] Hsu and M. D. Ilić, "Distributed newton method for computing real decoupled power flow in lossy electric energy networks," 2012 *North American Power Symposium (NAPS)*, Campaign, IL, 2012, pp. 1-7.
- [69] P. Sharma, A. Chaturvedi, G. Purohit, R. Shivarudraswamy, "Distributed Load Flow Analysis using Graph Theory", *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical and Computer Engineering*, no.74, pp224-227, 2011.
- [70] R. Sreerama Kumar, E. Chandrasekharan, "A parallel distributed computing framework for Newton–Raphson load flow analysis of large interconnected power systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 73, 2015, Pages 1-6, ISSN 0142-0615.
- [71] S. H. Low, "Convex relaxation of optimal power flow–Part I: Formulations and equivalence," *IEEE Trans. Control Netw. Syst.*, vol. 1, no. 1, pp.15–27, Mar. 2014.
- [72] J. Schiffer, T. Seel, J. Raisch, and T. Sezi, "Voltage stability and reactive power sharing in inverter-based microgrids with consensus-based distributed voltage control," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 96–109, Jan. 2016.
- [73] J. Lai, H. Zhou, X. Lu, X. Yu, and W. Hu, "Droop-based distributed cooperative control for microgrids with time-varying delays," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 4, pp. 1775–1789, July 2016.
- [74] C. Ahn and H. Peng, "Decentralized voltage control to minimize distribution power loss of microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1297–1304, Sep. 2013.
- [75] P. Šulc, S. Backhaus, and M. Chertkov, "Optimal distributed control of reactive power via the alternating direction method of multipliers," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 4, pp. 968–977, Dec. 2014.
- [76] N. Yorino, Y. Zoka, M. Watanabe, and T. Kurushima, "An optimal autonomous decentralized control method for voltage control devices by using a multi-agent system," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 2225–2233, Sep. 2015.
- [77] M. E. Elkhatab, R. El-Shatshat, and M. M. A. Shalama, "Novel coordinated voltage control for smart distribution networks with DG," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 4, pp. 598–605, Dec. 2011.
- [78] M. E. Elkhatab, R. El-Shatshat, and M. M. A. Shalama, "Decentralized reactive power control for advanced distribution automation systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1482–1990, Sep. 2012.
- [79] G. Mokhtari, A. Ghosh, G. Nourbakhsh, and G. Ledwich, "Smart robust resources control in LV network to deal with voltage rise issue," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 1043–1050, Oct. 2013.

- [80] F. Olivier, P. Aristidou, D. Ernst, and T. V. Cutsem, "Active management of low-voltage networks for mitigating overvoltages due to photovoltaic units," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 926–936, Mar. 2016.
- [81] V. Nasirian, Q. Shafiee, J. M. Guerrero, F. L. Lewis, and A. Davoudi, "Droop-free distributed control for AC microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 2, pp. 1600–1617, Feb. 2016.
- [82] V. Nasirian, S. Moayedi, A. Davoudi, and F. L. Lewis, "Distributed cooperative control of DC microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 4, pp. 2288–2303, Apr. 2015.
- [83] A. Bidram, A. Davoudi, F. L. Lewis, and J. M. Guerrero, "Distributed cooperative secondary control of microgrids using feedback linearization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3462–3470, Aug. 2013.
- [84] A. Bidram, A. Davoudi, F. L. Lewis, and S. S. Ge, "Distributed adaptive voltage control of inverter-based microgrids," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 4, pp. 862–872, Dec. 2014.
- [85] A. Maknouninejad and Z. Qu, "Realizing unified microgrid voltage profile and loss minimization: A cooperative distributed optimization and control approach," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1621–1630, July 2014.
- [86] K. Utkarsh, A. Trivedi, D. Srinivasan, and T. Reindl, "A consensus-based distributed computational intelligence technique for real-time optimal control in smart distribution grids," in *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 51–60, Feb. 2017.
- [87] S. Bolognani and S. Zampieri, "A distributed control strategy for reactive power compensation in smart microgrids," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 58, no. 11, pp. 2818–2833, Nov. 2013.
- [88] V. Loia, A. Vaccaro, and K. Vaisakh, "A self-organizing architecture based on fuzzy agents for smart grid voltage control," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 9, no. 3, pp. 1415–1422, Aug. 2013.
- [89] A. Vaccaro, G. Velotto, and A. F. Zobaa, "A decentralized and cooperative architecture for optimal voltage regulation in smart grids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 10, pp. 4593–4602, Oct. 2011.
- [90] A. Vaccaro and A. F. Zobaa, "Voltage regulation in active networks by distributed and cooperative meta-heuristic optimizers," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 99, pp. 9–17, June 2013.
- [91] B. A. Robbins, H. Zhu, and A. D. Dominguez-Garcia, "Optimal tap setting of voltage regulation transformers in unbalanced distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 256–267, Jan. 2016.
- [92] B. A. Robbins and A. D. Dominguez-Garcia, "Optimal reactive power dispatch for voltage regulation in unbalanced distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 2903–2913, July 2016.
- [93] W. Zheng, W. Wu, B. Zhang, H. Sun, and Y. Liu, "A fully distributed reactive power optimization and control method for active distribution networks," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 1021–1033, Mar. 2016.
- [94] E. Dall'Anese, H. Zhu, and G. B. Giannakis, "Distributed optimal power flow for smart microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1464–1475, Sep. 2013.

- [95] E. Dall' Anese, S. V. Dhople, B. B. Johnson, and G. B. Giannakis, "Decentralized optimal dispatch of photovoltaic inverters in residential distribution systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 4, pp. 957–967, Dec. 2014.
- [96] A. R. Di Fazio, G. Fusco, and M. Russo, "Decentralized control of distributed generation for voltage profile optimization in smart feeders," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1586–1596, Sep. 2013.
- [97] K. Christakou, D.-C. Tomozei, J.-Y. Le Boudec, and M. Paolone, "GECN: Primary voltage control for active distribution networks via real-time demand-response," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 622–631, Mar. 2014.
- [98] K. Christakou, D.-C. Tomozei, M. Bahramipanah, J.-Y. Le Boudec, and M. Paolone, "Primary voltage control in active distribution networks via broadcast signals: the case of distributed storage," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2314–2325, Sep. 2014.
- [99] A. Bernstein, L. Reyes-Chamorro, J.-Y. Le Boudec, and M. Paolone, "A composable method for real-time control of active distribution networks with explicit power setpoints. Part I: Framework," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 125, pp. 254–264, Aug. 2015.
- [100] L. Reyes-Chamorro, A. Bernstein, J.-Y. Le Boudec, and M. Paolone, "A composable method for real-time control of active distribution networks with explicit power setpoints. Part II: Implementation and validation," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 125, pp. 265–280, Aug. 2015.
- [101] E. Dall' Anese and A. Simonetto, in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 942–952, March 2018.
- [102] E. Dall' Anese, S. V. Dhople, and G. B. Giannakis, "Photovoltaic inverter controllers seeking AC optimal power flow solutions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 2809–2823, July 2016.
- [103] M. Farivar, R. Neal, C. Clarke, and S. Low, "Optimal inverter VAR control in distribution systems with high PV penetration," in *Proc. IEEE PES Gen. Meet.*, San Diego, CA, USA, July 2012, pp. 1–7.
- [104] M. Nayeripour, H. Fallahzadeh–Abarghouei, E. Waffenschmidt, and S. Hasanvand, "Coordinated online voltage management of distributed generation using network partitioning," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 141, pp. 202–209, Dec. 2016.
- [105] X. Zhang, A. J. Flueck, and C. P. Nguyen, "Agent-based distributed Volt/Var control with distributed power flow solver in smart grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 600–607, Mar. 2016.
- [106] M. Bahramipanah, R. Cherkaoui, and M. Paolone, "Decentralized voltage control of clustered active distribution network by means of energy storage systems," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 136, pp. 370–382, July 2016.
- [107] M. Chamana, B. H. Chowdhury, and F. Jahanbakhsh, "Distributed control of voltage regulating devices in the presence of high PV penetration to mitigate ramp-rate issues," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1086–1095, March 2018.
- [108] P. Pachanapan, O. Anaya–Lara, A. Dyśko, and K. L. Lo, "Adaptive zone identification for voltage level control in distribution networks with DG," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1594–1602, Dec. 2012.
- [109] H.-G. Yeh, D. F. Gayme, and S. H. Low, "Adaptive VAR control for distribution circuits with photovoltaic generators," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1656–1663, Aug. 2012.

- [110] J. W. Simpson-Porco, Q. Shafiee, F. Dörfler, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, and F. Bullo, "Secondary frequency and voltage control of islanded microgrids via distributed averaging," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 11, pp. 7025–7038, Nov. 2015.
- [111] D. He, D. Shi, and R. Sharma, "Consensus-based distributed cooperative control for microgrid voltage regulation and reactive power sharing," in *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conf. Europe (ISGT Europe)*, Istanbul, Turkey, 2014.
- [112] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Distributed secondary control for islanded microgrids - A novel approach," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 2, pp. 1018–1031, Feb. 2014.
- [113] F. Guo, C. Wen, J. Mao, and Y.-D. Song, "Distributed secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter-based microgrids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 7, pp. 4355–4364, July 2015.
- [114] A. Bidram, A. Davoudi, F. L. Lewis, and Z. Qu, "Secondary control of microgrids based on distributed cooperative control of multi-agent systems," *IET Gen. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 8, pp. 822–831, Aug. 2013.
- [115] A. Maknouninejad, Z. Qu, F. L. Lewis, and A. Davoudi, "Optimal, nonlinear and distributed designs of droop controls for DC microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2508–2516, Sep. 2014.
- [116] S. Anand, B. G. Fernandes, and J. M. Guerrero, "Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1900–1913, Apr. 2013.
- [117] G. Lou, W. Gu, Y. Xu, M. Cheng and W. Liu, "Distributed MPC-Based Secondary Voltage Control Scheme for Autonomous Droop-Controlled Microgrids," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 792-804, April 2017.
- [118] H. E. Farag, E. F. El-Saadany, and R. Seethapathy, "A two ways communication-based distributed control for voltage regulation in smart distribution feeders," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 271–281, Mar. 2012.
- [119] H. E. Farag and E. F. El-Saadany, "A novel cooperative protocol for distributed voltage control in active distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1645–1656, May 2013.
- [120] M. E. Collins, R. W. Silversides, and T. C. Green, "Control and coordination of a distribution network via decentralized decision making," in *Proc. IEEE PES Gen. Meet.*, Vancouver, Canada, 2013.
- [121] Y. Wang, K. T. Tan, X. Y. Peng, and P. L. So, "Coordinated control of distributed energy storage systems for voltage regulation in distribution networks," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 31, no. 3, pp. 1132–1141, June 2016.
- [122] G. Mokhtari, G. Nourbakhsh, and A. Ghosh, "Smart coordination of energy storage units (ESUs) for voltage and loading management in distribution networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 4812–4820, Nov. 2013.
- [123] D. Reeves, G. Nourbakhsh, G. Mokhtari, and A. Ghosh, "A distributed control-based coordination scheme of household PV systems for overvoltage prevention," in *Proc. IEEE PES Gen. Meet.*, Vancouver, Canada, 2013.
- [124] B. A. Robbins, C. N. Hadjikostis, and A. D. Dominguez-García, "A two-stage distributed architecture for voltage control in power distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1470–1482, May 2013.
- [125] J. Zhu, *Optimization of Power System Operation*, vol. 49. Wiley-IEEE Press, 2009

- [126] Peter D. Taylor, Leo B. Jonker, Evolutionary stable strategies and game dynamics, *Mathematical Biosciences*, Volume 40, Issues 1–2, July 1978, Pages 145-156, ISSN 0025-5564
- [127] J. Hofbauer and K. Sigmund., *Evolutionary Games and Population Dynamics*. Cambridge University Press, 1998.
- [128] A. Pantoja, N. Quijano, and K. Passino, "Dispatch of distributed generators using a local replicator equation," in *Proceedings of the 50th IEEE Conference in Decision and Control*, pp. 7494–7499, 2011.
- [129] D. Shevitz and B. Paden, "Lyapunov stability theory of nonsmooth systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39, no. 9, pp. 1910–1914, 1994.
- [130] T. Rees, "An Introduction to Evolutionary Game Theory", 1996.
- [131] Zimmerman, R.D.; Murillo-Sanchez, C.E.; Thomas, R.J., "MATPOWER's extensible optimal power flow architecture," *Power & Energy Society General Meeting*, 2009. PES '09. IEEE, vol., no., pp.1,7, 26-30 July 2009.
- [132] S. Elsaiah, M. Benidris and J. Mitra, "Analytical approach for placement and sizing of distributed generation on distribution systems," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 6, pp. 1039-1049, June 2014.
- [133] G. Sánchez-Ayala, J. R. Agüerc, D. Elizondo and M. Lelic, "Current trends on applications of PMUs in distribution systems," *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2013 IEEE PES*, Washington, DC, 2013, pp. 1-6.
- [134] A. M. Prostejovsky, O. Gehrke, A. M. Kosek, T. Strasser and H. W. Bindner, "Distribution Line Parameter Estimation Under Consideration of Measurement Tolerances," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 726-735, April 2016.
- [135] Z. Wang and J. Wang, "Self-Healing Resilient Distribution Systems Based on Sectionalization Into Microgrids," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 6, pp. 3139-3149, Nov. 2015.
- [136] D. I. Koukoula; N. D. Hatziaargyriou, "Gossip Algorithms for Decentralized Congestion Management of Distribution Grids," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. PP, no.99, pp.1-10.
- [137] Shahidehpour, M. and Wang, Y. (2003) Parallel and Distributed Load Flow of Distribution Systems, in *Communication and Control in Electric Power Systems*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- [138] J. Wang and N. Elia, "Distributed solution of linear equations over unreliable networks," *2016 American Control Conference (ACC)*, Boston, MA, 2016, pp. 6471-6476.
- [139] IEEE Distribution System Analysis Subcommittee. Radial Test Feeders [Online]. Available: <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>.
- [140] U. Eminoglu & M. H. Hocaoglu (2008) Distribution Systems Forward/Backward Sweep-based Power Flow Algorithms: A Review and Comparison Study, *Electric Power Components and Systems*, 37:1, 91-110.
- [141] Stephen Boyd, Neal Parikh, Eric Chu, Borja Peleato and Jonathan Eckstein (2011), "Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers", *Foundations and Trends® in Machine Learning*: Vol. 3: No. 1, pp 1-122.
- [142] Zhu, J. (2009) Optimal Power Flow, in *Optimization of Power System Operation*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- [143] P. A. Trodden, W. A. Bukhsh, A. Grothey and K. I. M. McKinnon, "Optimization-Based Islanding of Power Networks Using Piecewise Linear AC Power Flow," in *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 1212-1220, May 2014.

- [144] S. Mou, A. S. Morse, Z. Lin, L. Wang and D. Fullmer, "A distributed algorithm for efficiently solving linear equations," *2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Osaka, 2015, pp. 6791-6796.
- [145] J. Wang, N. Elia, "Solving Systems of Linear Equations by Distributed Convex Optimization in the Presence of Stochastic Uncertainty", *IFAC Proceedings Volumes, Volume 47, Issue 3*, 2014, Pages 1210-1215.
- [146] L. Gan and S. H. Low, "An Online Gradient Algorithm for Optimal Power Flow on Radial Networks," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 625-638, March 2016.
- [147] Hendrik C. Ferreira, Lutz Lampe, John Newbury, Theo G. Swart (2011) *Systems and Implementations*, in *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- [148] J. J. Nielsen et al., "Secure Real-Time Monitoring and Management of Smart Distribution Grid Using Shared Cellular Networks," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 2, pp. 10-17, April 2017.
- [149] Cosovic, M., Tsitsimelis, A., Vukobratovic, D., Matamoros, J., & Anton-Haro, C. (2017). "5G Mobile Cellular Networks: Enabling Distributed State Estimation for Smart Grid. " *arXiv preprint arXiv:1703.00178*.
- [150] Kouveliotis-lysikatos, D. Koukoula, I. Vlachos, A. Dimeas, N. Hatziargyriou and S. Makriniakas, "Decentralized Distribution System Operation Techniques: Results from the Meltemi Community Smart Grids Pilot Site," in *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 1673-1677, 10 2017.
- [151] G. Messinis et al., "A multi-microgrid laboratory infrastructure for smart grid applications," *MedPower 2014*, Athens, 2014, pp. 1-6.
- [152] F. F. Wu, K. Moslehi, and A. Bose, "Power system control centers: Past, present, and future," *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 11, pp. 1890-1908, Nov. 2005.
- [153] A. von Meier; E. Stewart; A. McEachern; M. Andersen; L. Mehrmanesh, "Precision Micro-Synchrophasors for Distribution Systems: A Summary of Applications," in *IEEE Trans.on Smart Grid*, vol. PP, no.99, pp.1-1, June 2017.
- [154] J. J. Nielsen et al., "Secure Real-Time Monitoring and Management of Smart Distribution Grid Using Shared Cellular Networks," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 2, pp. 10-17, April 2017.
- [155] L. Huang, Y. Sun, J. Xu, W. Gao, J. Zhang and Z. Wu, "Optimal PMU Placement Considering Controlled Islanding of Power System," in *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 29, no. 2, pp. 742-755, March 2014.
- [156] J. Lavaei and S. H. Low, "Zero Duality Gap in Optimal Power Flow Problem," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 92-107, Feb. 2012.
- [157] Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D. P., Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, 143-174.
- [158] Nakamoto S., "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system", 2008. Διαθέσιμο: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>, προσπελάστηκε 25/01/2018.
- [159] Garay J., Kiayias A., Leonardos N. "The Bitcoin Backbone Protocol: Analysis and Applications". In: Oswald E., Fischlin M. (eds) *Advances in Cryptology - EUROCRYPT 2015*. EUROCRYPT 2015. Lecture Notes in Computer Science, vol 9057. Springer, Berlin, Heidelberg.

- [160] Lee, D., Chuen, K. and Deng, R. (2018). Handbook of blockchain, digital finance, and inclusion, Volume 2. Singapore: Elsevier Academic Press.
- [161] Vitalik Buterin, "Visions, part 1: The value of blockchain technology." Διαθέσιμο: <https://blog.ethereum.org/2015/04/13/visions-part-1-the-value-of-blockchain-technology/>, προσπελάστηκε 25/01/2018.
- [162] "Ethereum white paper", V Buterin, 2013, Διαθέσιμο: <https://github.com/ethereum/wiki/wiki/Ethereum-White-Paper>, προσπελάστηκε 25/01/2018.
- [163] Yli-Huumo J, Ko D, Choi S, Park S, Smolander K (2016) Where Is Current Research on Blockchain Technology?-A Systematic Review. *PLOS ONE* 11(10): e0163477.
- [164] N. Z. Aitzhan and D. Svetinovic, "Security and Privacy in Decentralized Energy Trading Through Multi-Signatures, Blockchain and Anonymous Messaging Streams," in *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, vol. 15, no. 5, pp. 840-852, 1 Sept.-Oct. 2018.
- [165] "Welcome to Enigma! Start Here", Διαθέσιμο: <https://blog.enigma.co/welcome-to-enigma-start-here-e65c8c9125ef>, προσπελάστηκε 25/01/2018.
- [166] "Enigma: Decentralized computation platform with guaranteed privacy". G Zyskind, O Nathan, A Pentland. 2015. *arxiv.org arXiv preprint arXiv:1506.03471*. Energy Web Foundation, Energy web foundation, Διαθέσιμο: <http://energyweb.org/>, 2017, προσπελάστηκε 25/01/2018.
- [167] WePower, Wepower White paper, Διαθέσιμο: <https://icorating.com/upload/whitepaper/CDt62AS6jjiVUY8CNdHk0aYJyCS7ez8Yp5HgKod.pdf>, 2018, προσπελάστηκε 25/01/2018.
- [168] Vlux, Verv Vlux Whitepaper The evolution of energy Version 1.9, [https://vlux.io/media/VLUX Whitepaper:pdf](https://vlux.io/media/VLUX%20Whitepaper.pdf), προσπελάστηκε 25/01/2018.
- [169] Mengelkamp E., Gärttner J., Rock K., Kessler S., Orsini L., Weinhardt C, "Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid", *Applied Energy*, Volume 210, 2018.
- [170] Power Ledger White paper, Διαθέσιμο: <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/4519667/Documents%20Power%20Ledger%20Whitepaper.pdf>, προσπελάστηκε 25/01/2018.
- [171] Grid+ White paper, Διαθέσιμο: <https://gridplus.io/assets/Gridwhitepaper.pdf>, προσπελάστηκε 25/01/2018.
- [172] K. Shuaib, J. A. Abdella, F. Sallabi and M. Abdel-Hafez, "Using Blockchains to Secure Distributed Energy Exchange", *2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, Thessaloniki, 2018, pp. 622-627.
- [173] D. Vangulick, B. Cornélusse and D. Ernst, "Blockchain for Peer-to-Peer Energy Exchanges: Design and Recommendations", *2018 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Dublin, 2018, pp. 1-7.
- [174] F. Luo, Z. Y. Dong, G. Liang, J. Murata and Z. Xu, "A Distributed Electricity Trading System in Active Distribution Networks Based on Multi-Agent Coalition and Blockchain," in *IEEE Transactions on Power Systems*, Early access, 2018.
- [175] J. Wang, Q. Wang, N. Zhou, and Y. Chi, "A novel electricity transaction mode of microgrids based on blockchain and continuous double auction", *Energies*, vol. 10, no. 12, p. 1971, 2017.

- [176] Esther Mengelkamp, Johannes Gärtner, Kerstin Rock, Scott Kessler, Lawrence Orsini, Christof Weinhardt, "Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid", *Applied Energy*, Volume 210, 2018.
- [177] I. Kounelis, G. Steri, R. Giuliani, D. Geneiatakis, R. Neisse and I. Nai-Fovino, "Fostering consumers' energy market through smart contracts", 2017 International Conference in Energy and Sustainability in Small Developing Economies (ES2DE), Funchal, 2017, pp. 1-6.
- [178] Se-Chang Oh, Min-Soo Kim, Yoon Park, Gyu-Tak Roh, Chin-Woo Lee, (2017) "Implementation of blockchain-based energy trading system", *Asia Pacific Journal of Innovation and Entrepreneurship*, Vol. 11 Issue: 3, pp.322-334.
- [179] Zhao, S.; Wang, B.; Li, Y.; Li, Y. Integrated Energy Transaction Mechanisms Based on Blockchain Technology. *Energies* 2018, 11, 2412.
- [180] A. Hahn, R. Singh, C. Liu and S. Chen, "Smart contract-based campus demonstration of decentralized transactive energy auctions", 2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, 2017, pp. 1-5.
- [181] Jonas Schlund, Lorenz Ammon, and Reinhard German. 2018. "ETHome: Open-source blockchain based energy community controller", In *Proceedings of the Ninth International Conference on Future Energy Systems (e-Energy '18)*. ACM, New York, NY, USA.
- [182] C. Plaza, J. Gil, F. de Chezelles and K. A. Strang, "Distributed Solar Self-Consumption and Blockchain Solar Energy Exchanges on the Public Grid Within an Energy Community," *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Palermo, 2018, pp. 1-4.
- [183] J. A. F. Castellanos, D. Coll-Mayor and J. A. Notholt, "Cryptocurrency as guarantees of origin: Simulating a green certificate market with the Ethereum Blockchain," 2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), Oshawa, ON, 2017, pp. 367-372.
- [184] M. J. Ashley and M. Johnson, "Establishing a Secure, Transparent, and Autonomous Blockchain of Custody for Renewable Energy Credits and Carbon Credits," in *IEEE Engineering Management Review*.
- [185] L. Thomas, C. Long, P. Burnap, J. Wu and N. Jenkins, "Automation of the supplier role in the GB power system using blockchain-based smart contracts," in *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 2619-2623, 10 2017.
- [186] Pop C., Cioara T., Antal M., Anghel I., Salomie I., and Bertoncini M. "Blockchain Based Decentralized Management of Demand Response Programs in Smart Energy Grids", *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18(1), 162.
- [187] Sana Noor, Wentao Yang, Miao Guo, Koen H. van Dam, Xiaonan Wang, "Energy Demand Side Management within micro-grid networks enhanced by blockchain", *Applied Energy*, Volume 228, Pages 1385-1398, 2018.
- [188] J. Kang, R. Yu, X. Huang, S. Maharjan, Y. Zhang and E. Hossain, "Enabling Localized Peer-to-Peer Electricity Trading Among Plug-in Hybrid Electric Vehicles Using Consortium Blockchains," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 6, pp. 3154-3164, Dec. 2017.
- [189] C. Liu, K. K. Chai, X. Zhang, E. T. Lau and Y. Chen, "Adaptive Blockchain-Based Electric Vehicle Participation Scheme in Smart Grid Platform," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 25657-25665, 2018.

- [190] M. L. Di Silvestre, P. Gallo, M. G. Ippolito, E. R. Sanseverino and G. Zizzo, "A Technical Approach to the Energy Blockchain in Microgrids", in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 11, pp. 4792-4803, Nov. 2018.
- [191] E. Münsing, J. Mather and S. Moura, "Blockchains for decentralized optimization of energy resources in microgrid networks", *2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, Mauna Lani, HI, 2017, pp. 2164-2171.
- [192] P. Danzi, M. Angjelichinoski, Č. Stefanović and P. Popovski, "Distributed proportional-fairness control in microgrids via blockchain smart contracts," *2017 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Dresden, 2017, pp. 45-51.
- [193] M. Mylrea and S. N. G. Gourisetti, "Blockchain: A path to grid modernization and cyber resiliency", *2017 North American Power Symposium (NAPS)*, Morgantown, WV, 2017, pp. 1-5.
- [194] G. Liang, S. R. Weller, F. Luo, J. Zhao and Z. Y. Dong, "Distributed Blockchain-Based Data Protection Framework for Modern Power Systems against Cyber Attacks," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018.
- [195] Abidin, A., Aly, A., Cleemput, S., and Mustafa, "Secure and Privacy-Friendly Local Electricity Trading and Billing in Smart Grid", CoRR, abs/1801.08354, 2018.
- [196] Bergquist J., Laszka A., Sturm M., and Dubey A, "On the design of communication and transaction anonymity in blockchain-based transactive microgrids", In *Proceedings of the 1st Workshop on Scalable and Resilient Infrastructures for Distributed Ledgers (SERIAL '17)*. ACM, New York, NY, USA, Article 3, 6 pages, 2017.
- [197] C. Edeland and T. Mörk, "Blockchain Technology in the Energy Transition : An Exploratory Study on How Electric Utilities Can Approach Blockchain Technology", Dissertation, KTH Royal Institute of Technology, 2018.
- [198] M. E. Peck, "Blockchain world - Do you need a blockchain? This chart will tell you if the technology can solve your problem," in *IEEE Spectrum*, vol. 54, no. 10, pp. 38-60, October 2017.
- [199] N.4513/2018 – Ενεργειακές Κοινότητες – ΦΕΚ 9Α/23/1/2018, διαθέσιμο: <https://www.e-nomothesia.gr/energeia/nomos-4513-2018-fek-9a-23-1-2018.html>, προσπελάστηκε 25/01/2018.
- [200] J. Abdella and K. Shuaib, "Peer to Peer Distributed Energy Trading in Smart Grids: A Survey," *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 1560, Jun. 2018.
- [201] F. Moret and P. Pinson, "Energy Collectives: A Community and Fairness based Approach to Future Electricity Markets," in *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018.
- [202] E. Sorin, L. Bobo and P. Pinson, "Consensus-based Approach to Peer-to-Peer Electricity Markets with Product Differentiation," in *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018.
- [203] J. Guerrero, A. Chapman and G. Verbic, "A study of energy trading in a low-voltage network: Centralised and distributed approaches", *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Melbourne, VIC, 2017, pp. 1-6.
- [204] C. Long, J. Wu, C. Zhang, L. Thomas, M. Cheng and N. Jenkins, "Peer-to-peer energy trading in a community microgrid," *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, IL, 2017, pp. 1-5.
- [205] Solidity, Διαθέσιμο: <https://solidity.readthedocs.io/en/v0.4.24/>, προσπελάστηκε 25/01/2018.
- [206] Truffle, Διαθέσιμο: <https://truffleframework.com/docs/truffle/overview>, προσπελάστηκε 25/01/2018.

[207] Ganache, Διαθέσιμο: <https://truffleframework.com/docs/ganache/overview>, προσπελάστηκε 25/01/2018.

Δημοσιεύσεις

Δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά

I. N. Kouveliotis-Lysikatos, D. I. Koukoula and N. D. Hatziargyriou, "A Double-layered Fully Distributed Voltage Control Method for Active Distribution Networks," in *IEEE Transactions on Smart Grid*.

K. E. Antoniadou-Plytaria, I. N. Kouveliotis-Lysikatos, P. S. Georgilakis and N. D. Hatziargyriou, "Distributed and Decentralized Voltage Control of Smart Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2999-3008, Nov. 2017.

I. Kouveliotis-Lysikatos and N. Hatziargyriou, "Fully distributed economic dispatch of distributed generators in active distribution networks considering losses," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 3, pp. 627-636, 2 16 2017.

Δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων

Kouveliotis-Lysikatos and N. Hatziargyriou, "A Distributed Load Flow Solver for Smart Grid Applications," *2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Sarajevo, 2018, pp. 1-6.

Anastasiou A., Kouveliotis-Lysikatos I., Karakitsios I. and Hatziargyriou N., "Comparing a Simplified Decentralized with an Optimal Centralized Technique for After Fault Reconfiguration of Radial Distribution Grids", *11th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, November 2018, Dubrovnik.

I. Kouveliotis-Lysikatos, D. Koukoula, I. Vlachos, A. Dimeas, N. Hatziargyriou and S. Makrynikas, "Decentralised distribution system operation techniques: results from the Meltemi community smart grids pilot site," in *CIREC - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 1673-1677, 10 2017.

I. Kouveliotis-Lysikatos and N. Hatziargyriou, "Distributed economic dispatch considering transmission losses," *2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, 2017, pp. 1-6.

Kouveliotis-Lysikatos, I.; Koukoula, D.; Dimeas, A.; Hatziargyriou, N.; Makrynikas, S.: 'Overview of Decentralized Distribution System Operation Techniques', *IET Conference Proceedings*, 2016, p. 215 (4.) -215 (4.).

N. Hatziargyriou, A. Dimeas, I. Vlachos, I. Kouveliotis-Lysikatos, D. Koukoula, S. Makrynikas, M. Kouveletsou, "MAGIC – A Microgrid AGent Intelligent Control Device ", *CIGRE Session 2016*, Paris, France.

I. Kouveliotis-Lysikatos and N. Hatziargyriou, "Decentralized economic dispatch of distributed generators based on population dynamics," *2015 18th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP)*, Porto, 2015, pp. 1-6.

I. Kouveliotis-Lysikatos, P. Kotsampopoulos and N. Hatziargyriou, "Harmonic Study in LV networks with high penetration of PV systems," *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, 2015, pp. 1-6.

Messinis, G.; Kleftakis, V.; Kouveliotis-Lysikatos, I.; Rigas, A.; Vassilakis, A.; Kotsampopoulos, P.; Hatziargyriou, N.: 'Multi-microgrid laboratory infrastructure for smart grid applications', *IET Conference Proceedings*, 2014, p. 37 (6.) - 37 (6.).

Kleftakis, V., G. Messinis, A. Vassilakis, P. Kotsampopoulos, A. Rigas, I. Kouveliotis-Lysikatos, V. Paspiliotopoulos, G. Korres, and N. Hatziargyriou. "The NTUA Microgrid Laboratory", *Symposium on Microgrids*, Tianjin 2014.

Παράρτημα

Συμβόλαιο παρόχου συστήματος μετρήσεων:

```
pragma solidity >=0.4.25 <0.6.0;

contract smartMeters {
    address owner;
    struct meter {
        bool isRegistered;
        // other relevant parameters
    }
    mapping (address => meter) meters;

    constructor () public {
        owner = msg.sender;
    }

    function registerMeter(address meter_) public onlyOwner {
        require(!meters[meter_].isRegistered, "Meter already subscribed.");
        meters[meter_].isRegistered = true;
    }

    function unregisterMeter(address meter_) public onlyOwner {
        require(meters[meter_].isRegistered, "Meter isn't subscribed.");
        meters[meter_].isRegistered = false;
    }

    function isValidMeter(address meter_) public view returns (bool) {
        return meters[meter_].isRegistered;
    }

    function destroy() public onlyOwner {
        selfdestruct(msg.sender);
    }

    modifier onlyOwner {
        require(msg.sender == owner, "Only Meter Provider can modify!");
        _;
    }
}
```

Συμβόλαιο προμηθευτή:

```
pragma solidity >=0.4.25 <0.6.0;

import "./smartMeters.sol";

contract retailer {
    address owner;
    // consumer data
    struct consumer {
        address consumer_;
        uint256 activeConsumption;
        address meter;
        uint256 deposit;
        bool isSubscribed;
        bool hasDeclared;
        bool hasPayed;
    }
    address[] users; ///
    mapping (address => consumer) consumers;

    // UC related parameters
    uint256 t0;
    uint256 t1;
    uint256 t2;
    uint256 t3;
    uint256 t4;
    uint256 price;
    uint256 deposit;

    // smart meters
    smartMeters smartMeterContract;

    // event to inform smart meters for declaring energy consumption
    event subscription(address meter, address user, uint256 t2, uint256 t3);

    //retailer deploys contract and defines the various parameters
    constructor (address meterProvider, uint256 t1_, uint256 t2_, uint256 t3_,
uint256 t4_, uint256 price_, uint256 deposit_) public {
        owner = msg.sender;
        t0 = getBlockNumber();
        t1 = t0 + t1_;
        t2 = t0 + t2_;
        t3 = t0 + t3_;
        t4 = t0 + t4_;
```

```

    price = price_;
    deposit = deposit_;
    smartMeterContract = smartMeters(meterProvider);
}

// subscribe new users only in timeframe between t0 and t1
function subscribeUser (address meterID_) public onlySubscription payable {
    require(msg.value >= deposit, "Insufficient deposit.");
    require(isValidMeter(meterID_), "Meter not valid.");
    consumers[msg.sender] = consumer(msg.sender, 0, meterID_, msg.value, true,
false, false);
    emit subscription(meterID_, msg.sender, t2, t3);
}

// smart meters declare autonomously their consumption
function declarePeriod (address user, uint256 activeP_) public onlyDeclare {
    require(!consumers[user].hasDeclared, "Meter has already declared.");
    require(consumers[user].meter == msg.sender, "Address of meter is different
from the one initially declared.");
    consumers[user].activeConsumption = activeP_;
    consumers[user].hasDeclared = true;
}

// users pay correct amount in order to receive their initial deposits
function paymentPeriod () public onlyPayment {
    require(!consumers[msg.sender].hasPaid, "User has already payed.");
    require(consumers[msg.sender].deposit >= consumers[msg.sender].activeConsump-
tion * price, "Consumer consumption larger than initial deposit.");
    consumers[msg.sender].hasPaid = true;
    //return deposit to user
    msg.sender.transfer(consumers[msg.sender].deposit - consumers[msg.sender].ac-
tiveConsumption * price);
}

// the retailer can acquire the users payments after t4 and destruct the con-
tract
function finalize() public onlyOwner {
    require(getBlockNumber() >= t4, "Period for finalization has not been reached
yer.");
    selfdestruct(msg.sender);
}

function isValidMeter(address meter) internal view returns(bool) {
    return smartMeterContract.isValidMeter(meter);
}

```

```

// boolean functions for checking the differnt time periods
function isSubscriptionPeriod() internal view returns (bool) {
    return (getBlockNumber() < t1) && (getBlockNumber() >= t0);
}

function isDeclarationPeriod() internal view returns (bool) {
    return (getBlockNumber() < t3) && (getBlockNumber() >= t2);
}

function isPaymentPeriod() internal view returns (bool) {
    return (getBlockNumber() < t4) && (getBlockNumber() >= t3);
}

function getBlockNumber() internal view returns (uint256) {
    return block.number;
}

//modifiers
modifier onlySubscription {
    require(isSubscriptionPeriod(), "Subscription period has not started or has
already ended.");
    require(!consumers[msg.sender].isSubscribed, "User already subscribed!");
    _;
}

modifier onlyDeclare {
    require(isDeclarationPeriod(), "Declaration period has not started or has al-
ready ended.");
    require(isValidMeter(msg.sender), "Not a valid smart meter");
    _;
}

modifier onlyPayment {
    require(isPaymentPeriod(), "Payment period has not started or has already
ended.");
    require(consumers[msg.sender].isSubscribed, "User is not subscribed!");
    _;
}

modifier onlyOwner {
    require(msg.sender == owner, "Only retailer can modify!");
    _;
}
}

```

Συμβόλαιο ενεργειακής κοινότητας:

```
pragma solidity >=0.4.25 <0.6.0;

import "./smartMeters.sol";

contract doubleAuction {
    address owner;
    uint256 constant INITIAL_DEPOSIT = 0;
    uint256 market_price;

    // sellers data
    struct seller {
        bytes32 bidValue;
        uint256 energy;
        address meter;
        uint256 deposit;
        bool isSubscribed;
        bool isTrading;
        uint256 volToTrade;
        uint256 measuredVol;
        bool hasDeclared;
        bool hasBeenPayed;
    }
    mapping(address => seller) sellers;
    address[] sellersArr;
    uint256[] sellBids;
    uint256 sellVolume = 0;

    // buyers data
    struct buyer {
        bytes32 bidValue;
        uint256 energy;
        address meter;
        uint256 deposit;
        bool isSubscribed;
        bool isTrading;
        uint256 volToTrade;
        uint256 measuredVol;
        bool hasDeclared;
        bool hasPayed;
    }
    mapping(address => buyer) buyers;
    address[] buyersArr;
    uint256[] buyBids;
```

```

uint256 buyVolume = 0;

// smart meters
smartMeters smartMeterContract;

// UC related parameters
uint256 t0;
uint256 t1;
uint256 t2;
uint256 t3;
uint256 t4;
uint256 t5;
uint256 t6;
uint256 deposit;
uint256 public price;

// event to inform smart meters for declaring energy consumption
event subscriptionBuyer(address meter, address user, uint256 t3, uint256 t4,
uint256 t5);
event subscriptionSeller(address meter, address user, uint256 t3, uint256 t4,
uint256 t5);

// inform potential buyers and sellers for trading
event tradeEnergyBuyer(address buyer, uint256 energyVolume);
event tradeEnergySeller(address seller, uint256 energyVolume);

constructor (address meterProvider, uint256 t1_, uint256 t2_, uint256 t3_,
uint256 t4_,
uint256 t5_, uint256 t6_, uint256 market_price_, uint256 deposit_) public payable {
    require(msg.value >= INITIAL_DEPOSIT, "Contract instantiation requires INITIAL_DEPOSIT.");
    owner = msg.sender;
    t0 = getBlockNumber();
    t1 = t0 + t1_;
    t2 = t0 + t2_;
    t3 = t0 + t3_;
    t4 = t0 + t4_;
    t5 = t0 + t5_;
    t6 = t0 + t6_;
    deposit = deposit_;
    market_price = market_price_;
    smartMeterContract = smartMeters(meterProvider);
}

```



```

//make bids
function bidSeller(bytes32 bid, address meter, uint256 energy) public onlyBidding payable {
    require(msg.value >= deposit, "Insufficient deposit.");
    require(isValidMeter(meter), "Meter not valid.");
    sellers[msg.sender] = seller(bid, energy, meter, msg.value, true, false, 0, 0, false, false);
    sellersArr.push(msg.sender);
}

function bidBuyer(bytes32 bid, address meter, uint256 energy) public onlyBidding payable {
    require(msg.value >= deposit, "Insufficient deposit.");
    require(isValidMeter(meter), "Meter not valid.");
    buyers[msg.sender] = buyer(bid, energy, meter, msg.value, true, false, 0, 0, false, false);
    buyersArr.push(msg.sender);
}

// reveal bids
function revealSeller(bytes32 nonce, uint256 bidValue) public onlyReveal {
    require(sellers[msg.sender].isSubscribed, "Seller has not committed bid.");
    require(makeCommitment(nonce, bidValue) == sellers[msg.sender].bidValue, "Invalid sell bid.");
    sellBids.push(bidValue);
    (sellBids, sellersArr) = bidSortAscending(sellBids, sellersArr);
    // calculate total energy volume
    sellVolume += sellers[msg.sender].energy;
}

function revealBuyer(bytes32 nonce, uint256 bidValue) public onlyReveal {
    require(buyers[msg.sender].isSubscribed, "Buyer has not committed bid.");
    require(makeCommitment(nonce, bidValue) == buyers[msg.sender].bidValue, "Invalid buy bid.");
    buyBids.push(bidValue);
    (buyBids, buyersArr) = bidSortDescending(buyBids, buyersArr);
    // calculate total energy volume
    buyVolume += buyers[msg.sender].energy;
}

// clear the market
function clearMarket() public onlyMatching {

    // construct demand and supply curves
    uint256 maxVol = max(buyVolume, sellVolume);

```

```

uint256 i;
uint256 tempVol;

uint256[] memory buyPrices = new uint[](maxVol);
uint256 j_buy = 0;
for (i = 0; i < buyBids.length; i++) {
    tempVol = buyers[buyersArr[i]].energy;
    while (tempVol > 0) {
        buyPrices[j_buy] = buyBids[i];
        tempVol--;
        j_buy++;
    }
}

uint256[] memory sellPrices = new uint[](maxVol);
uint256 j_sell = 0;
for (i = 0; i < sellBids.length; i++) {
    tempVol = sellers[sellersArr[i]].energy;
    while (tempVol > 0) {
        sellPrices[j_sell] = sellBids[i];
        tempVol--;
        j_sell++;
    }
}

// calculate the market clearing price
for (i = 0; i < buyPrices.length; i++) {
    if (buyPrices[i] < sellPrices[i]) {
        price = (buyPrices[i-1] + sellPrices[i-1])/2;
        break;
    } else if (buyPrices[i] == sellPrices[i]) {
        price = buyPrices[i];
    }
}

// find eligible buy bids
buyVolume = 0;
for (i = 0; i < buyBids.length; i++) {
    if (buyBids[i] >= price) {
        buyVolume += buyers[buyersArr[i]].energy;
    }
}

// find eligible sell bids
sellVolume = 0;

```

```

for (i = 0; i < sellBids.length; i++) {
    if (sellBids[i] <= price) {
        sellVolume += sellers[sellersArr[i]].energy;
    }
}

// volume that will be traded
uint256 vol = min(buyVolume, sellVolume);

// trade: find matching buy bids
i = 0;
tempVol = vol;
while (tempVol > 0) {
    if (buyers[buyersArr[i]].energy <= tempVol) {
        tempVol -= buyers[buyersArr[i]].energy;
        buyers[buyersArr[i]].isTrading = true;
        buyers[buyersArr[i]].volToTrade = buyers[buyersArr[i]].energy;
        emit tradeEnergyBuyer(buyersArr[i], buyers[buyersArr[i]].energy);
        emit subscriptionBuyer(buyers[buyersArr[i]].meter, buyersArr[i], t3, t4,
t5);
        i++;
    } else {
        buyers[buyersArr[i]].isTrading = true;
        buyers[buyersArr[i]].volToTrade = buyers[buyersArr[i]].energy;
        emit tradeEnergyBuyer(buyersArr[i], tempVol);
        emit subscriptionBuyer(buyers[buyersArr[i]].meter, buyersArr[i], t3, t4,
t5);
        break;
    }
}

// trade: find matching selling bids
i = 0;
tempVol = vol;
while (tempVol > 0) {
    if (sellers[sellersArr[i]].energy <= tempVol) {
        tempVol -= sellers[sellersArr[i]].energy;
        sellers[sellersArr[i]].isTrading = true;
        sellers[sellersArr[i]].volToTrade = sellers[sellersArr[i]].energy;
        emit tradeEnergySeller(sellersArr[i], sellers[sellersArr[i]].energy);
        emit subscriptionSeller(sellers[sellersArr[i]].meter, sellersArr[i], t3,
t4, t5);
        i++;
    } else {
        sellers[sellersArr[i]].isTrading = true;

```

```

        sellers[sellersArr[i]].volToTrade = tempVol;
        emit tradeEnergySeller(sellersArr[i], tempVol);
        emit subscriptionSeller(sellers[sellersArr[i]].meter, sellersArr[i], t3,
t4, t5);
        break;
    }
}
}
}

```

```

function energyDeclarationsBuyers(address buyer_, uint256 volume) public only-
Declare {
    require(!buyers[buyer_].hasDeclared, "Buyer has already declared.");
    require(isValidMeter(msg.sender), "Not a valid smart meter");
    require(buyers[buyer_].meter == msg.sender, "Address of meter is different
than the one initially declared.");
    buyers[buyer_].measuredVol = volume;
    buyers[buyer_].hasDeclared = true;
}

```

```

function energyDeclarationsSellers(address seller_, uint256 volume) public on-
lyDeclare {
    require(!sellers[seller_].hasDeclared, "Seller has already declared.");
    require(isValidMeter(msg.sender), "Not a valid smart meter");
    require(sellers[seller_].meter == msg.sender, "Address of meter is different
than the one initially declared.");
    sellers[seller_].measuredVol = volume;
    sellers[seller_].hasDeclared = true;
}

```

```

// buyers
function sendPayment() public onlyPay {
    require(buyers[msg.sender].isSubscribed, "Buyer is not subscribed!");
    require(buyers[msg.sender].hasDeclared, "Buyer has not declared consump-
tion!");
    require(!buyers[msg.sender].hasPaid, "Buyer has paid.");
    if (buyers[msg.sender].isTrading) {
        // refund user
        uint256 refund = buyers[msg.sender].deposit - price*buy-
ers[msg.sender].volToTrade;
        if (buyers[msg.sender].measuredVol > buyers[msg.sender].volToTrade) {
            // check if user has consumed more than he bought locally and charge him
with the market_price
            refund -= market_price*(buyers[msg.sender].measuredVol - buy-
ers[msg.sender].volToTrade);
        }
    }
}

```

```

        msg.sender.transfer(refund);
    } else {
        // the user is paying the energy he consumed with the market_price
        msg.sender.transfer(buyers[msg.sender].deposit - market_price*buy-
ers[msg.sender].measuredVol);
    }
    buyers[msg.sender].hasPayed = true;
}

function receivePayment() public onlyPay {
    require(sellers[msg.sender].isSubscribed, "Seller is not subscribed!");
    require(sellers[msg.sender].hasDeclared, "Seller has not declared produc-
tion");
    require(!sellers[msg.sender].hasBeenPayed, "Seller has been payed.");
    if (sellers[msg.sender].isTrading) {
        // refund seller according to its actual production
        uint256 refund = price*min(sellers[msg.sender].measuredVol,
sellers[msg.sender].volToTrade);
        msg.sender.transfer(refund);
    }

    // return also initial deposit
    msg.sender.transfer(sellers[msg.sender].deposit);
    sellers[msg.sender].hasBeenPayed = true;
}

function getPrice() public view returns (uint256) {
    return price;
}

// Commitment utility
function makeCommitment(bytes32 nonce, uint256 bidValue) public pure re-
turns(bytes32) {
    return keccak256(abi.encodePacked(nonce, bidValue));
}

function isValidMeter(address meter) public view returns(bool) {
    return smartMeterContract.isValidMeter(meter);
}

// destroy contract
function finalize() public onlyOwner {
    require(isFinalizationPeriod(), "Finalization period has not yet arrived.");
    selfdestruct(msg.sender);
}

```

```

// sort bids as they are being revealed
function bidSortAscenting(uint[] memory arr, address[] memory bidders) private
pure returns (uint[] memory, address[] memory) {
    uint256 n = arr.length;
    uint256 i = n-1;
    uint256 key = arr[i];
    address temp = bidders[i];

    while (i > 0 && arr[i-1] > key) {
        arr[i] = arr[i-1];
        arr[i-1] = key;
        // sort bidders array
        bidders[i] = bidders[i-1];
        bidders[i-1] = temp;
        key = arr[i];
        temp = bidders[i];
        i--;
    }
    return (arr, bidders);
}

function bidSortDescenting(uint[] memory arr, address[] memory bidders) private
pure returns (uint[] memory, address[] memory) {
    uint256 n = arr.length;
    uint256 i = n-1;
    uint256 key = arr[i];
    address temp = bidders[i];

    while (i > 0 && arr[i-1] < key) {
        arr[i] = arr[i-1];
        arr[i-1] = key;
        // sort bidders array
        bidders[i] = bidders[i-1];
        bidders[i-1] = temp;
        key = arr[i];
        temp = bidders[i];
        i--;
    }
    return (arr, bidders);
}

function max(uint a, uint b) private pure returns (uint) {
    return a > b ? a : b;
}

```

```

function min(uint a, uint b) private pure returns (uint) {
    return a > b ? b : a;
}

// boolean functions for checking the different time periods
function isBiddingPeriod() private view returns (bool) {
    return (getBlockNumber() < t1) && (getBlockNumber() >= t0);
}

function isRevealPeriod() private view returns (bool) {
    return (getBlockNumber() < t2) && (getBlockNumber() >= t1);
}

function isMatchingPeriod() private view returns (bool) {
    return (getBlockNumber() < t3) && (getBlockNumber() >= t2);
}

function isDeclarationPeriod() private view returns (bool) {
    return (getBlockNumber() < t5) && (getBlockNumber() >= t4);
}

function isPaymentPeriod() private view returns (bool) {
    return (getBlockNumber() < t6) && (getBlockNumber() >= t5);
}

function isFinalizationPeriod() private view returns (bool) {
    return (getBlockNumber() >= t6);
}

function getBlockNumber() private view returns (uint256) {
    return block.number;
}

modifier onlyBidding {
    require(isBiddingPeriod(), "Bidding period has not started or has already
ended.");
    _;
}

modifier onlyReveal {
    require(isRevealPeriod(), "Reveal period has not started or has already
ended.");
    _;
}

```

```
modifier onlyMatching {
    require(isMatchingPeriod(), "Matching period has not started or has already
ended.");
    _;
}

modifier onlyDeclare {
    require(isDeclarationPeriod(), "Declaration period has not started or has al-
ready ended.");
    _;
}

modifier onlyPay {
    require(isPaymentPeriod(), "Payment period has not started or has already
ended.");
    _;
}

modifier onlyOwner {
    require(msg.sender == owner, "Only retailer can modify!");
    _;
}
}
```