



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

**Αποκεντρωμένος έλεγχος διαχείρισης διεσπαρμένων
ενεργειακών πόρων στα δίκτυα διανομής για παροχή
επικουρικών υπηρεσιών**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δέσποινα Ι. Κουκουλά

Αθήνα, Ιούνιος 2017



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

**Αποκεντρωμένος έλεγχος διαχείρισης διεσπαρμένων
ενεργειακών πόρων στα δίκτυα διανομής για παροχή
επικουρικών υπηρεσιών**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δέσποινα Ι. Κουκουλά

Συμβουλευτική Επιτροπή: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Σταύρος Παπαθανασίου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 6^η Ιουνίου 2017.

Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Παύλος Γεωργιάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ανδρέας Σταφυλοπάτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γρηγόρης Παπαγιάννης
Καθηγητής Α.Π.Θ.

Αθήνα, Ιούνιος 2017

.....

Δέσποινα Ι. Κουκουλά

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

Copyright © Δέσποινα Ι. Κουκουλά, 2017

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

Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάστηκε με πρωταρχικό του στόχο την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή στην κατανάλωση. Το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ως υποσύνολο του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί ουσιαστικά το τμήμα εκείνο που είναι πιο κοντά προς τους καταναλωτές. Την τελευταία δεκαετία παρατηρείται μεγάλη διαφοροποίηση στη λειτουργία των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ιδίως λόγω της μεγάλης διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες μπορούν να συνδεθούν και στο επίπεδο χαμηλής τάσης πολύ κοντά στο σημείο ζήτησης/κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η τρέχουσα δομή και λειτουργία των δικτύων διανομής αναθεωρείται και μετασχηματίζεται συνεχώς εκμεταλλευόμενη την ευελιξία των ενεργειακών πόρων και την εξέλιξη των τεχνολογιών πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής οι κόμβοι του δικτύου διανομής θεωρούνται ως ομότιμοι κόμβοι, οι οποίοι επεξεργάζονται δεδομένα και επικοινωνούν μεταξύ τους με στόχο την παροχή ενεργειακών επικουρικών υπηρεσιών.

Συγκεκριμένα i) εισάγεται η θεωρία ομότιμων κόμβων στα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και προσεγγίζεται η κατάλληλη μαθηματική ανάλυση με στόχο την επιτάχυνση της σύγκλισης των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, ii) προτείνονται αλγόριθμοι ομότιμων κόμβων για αποκεντρωμένους υπολογισμούς ροών φορτίου στα δίκτυα διανομής, iii) σχεδιάζονται και αναπτύσσονται αλγόριθμοι ομότιμων κόμβων για κατανεμημένη διαχείριση συμφορήσεων στα δίκτυα διανομής, iv) σχεδιάζεται και υλοποιείται ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων με στόχο την κατανεμημένη διαχείριση ενεργειακών πόρων στα δίκτυα διανομής, και v) προτείνεται η αξιοποίηση των ηλεκτρονικών μετρητών και άλλων συσκευών ICT, ώστε να δημιουργηθούν υπερκείμενα δίκτυα με στόχο τη διακίνηση πληροφοριών και την εφαρμογή κατανεμημένων αλγορίθμων για τη διαχείριση των δικτύων διανομής.

Μετά από τη βιβλιογραφική επισκόπηση του υφιστάμενου τρόπου λειτουργίας και διαχείρισης των δικτύων διανομής, καθώς και μίας σειράς από αλγορίθμους κατανεμημένης βελτιστοποίησης, περιγράφεται η θεωρία ομότιμων κόμβων. Στη συνέχεια, με βάση τη φασματική θεωρία γράφων επιλέγονται κατάλληλα βάρη για την εξασφάλιση και την επιτάχυνση της σύγκλισης των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων. Η γενική διατύπωση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων επεκτείνεται και προσαρμόζεται για υπολογισμούς ροής φορτίου σε ακτινικά δίκτυα διανομής. Οι Αλγόριθμοι Ομότιμων Κόμβων αποτελούν στη συνέχεια τη βάση για την ανάπτυξη του κατάλληλου πλαισίου για την κατανεμημένη διαχείριση συμφορήσεων. Οι κόμβοι του δικτύου αντιλαμβάνονται την παραβίαση των περιορισμών σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου και αναλαμβάνουν μόνοι τους δράση για την επίλυση του προβλήματος σε ένα απόλυτα κατανεμημένο περιβάλλον υπολογισμών και λήψης αποφάσεων. Οι εφαρμογές και τα αποτελέσματα ενισχύονται με την ιεραρχική διατύπωση της κατανεμημένης διαχείρισης συμφορήσεων και την τοπική εξισορρόπηση ζήτησης-παραγωγής. Ακολούθως πραγματοποιείται μία παραμετρική ανάλυση της αποτίμησης του τηλεπικοινωνιακού φόρτου.

Στο επόμενο τμήμα της διατριβής, σχεδιάζεται ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων για παροχή επικουρικών υπηρεσιών από τους ενεργειακούς πόρους, μέσω των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων που έχουν προταθεί στην παρούσα διατριβή. Τέλος, αφού διερευνηθούν οι τρόποι κωδικοποίησης και μετάδοσης των πληροφοριών στους ηλεκτρονικούς μετρητές ενέργειας, προτείνεται η κατάλληλη αξιοποίηση και η απαιτούμενη επέκταση των κλάσεων του προτύπου DLMS/COSEM ώστε να υποστηριχθούν οι αλγόριθμοι ομότιμων κόμβων για κατανεμημένη διαχείριση.

Λέξεις κλειδιά: έλεγχος δικτύων διανομής, κατανεμημένη βελτιστοποίηση, αλγόριθμοι ομότιμων κόμβων, διαχείριση, συστήματα πολλαπλών πρακτόρων

Abstract

Electrical grids have been primarily designed to transfer electricity mainly produced in large generation sites, and deliver it to consumers. Distribution grids constitute the subset of electrical grids, which is closer to consumption. During the last decade the operation of distribution grids has been facing a major transformation, so as to accommodate high RES penetration both at medium and low voltage grids. The operational framework of distribution grids is continuously updated and transformed exploiting the potential of Information and Telecommunication Technologies (ICT) and the newly introduced flexibility of energy resources. In the context of the thesis, nodes of distribution grids have been considered as peers, which process data locally and communicate in order to provide ancillary services.

Specifically, the thesis focuses on the following topics: i) the theory of peers and gossip algorithms have been introduced into electricity distribution grids, and the acceleration of gossip algorithms' convergence has been approached via the mathematical graph analysis, ii) gossip algorithms have been proposed for decentralized calculations of power flows in distribution networks, iii) gossip algorithms have been designed and developed for distributed congestion management, iv) a multi agent system, which integrates the proposed algorithms, has been designed and developed, v) the exploitation of smart meters and other ICT devices is proposed in order to create overlay networks towards the exchange of information and the application of distributed algorithms in distribution network management. The expansion of smart meters' protocols has been examined and proposed.

The thesis begins with a bibliographic review of the current operational and management framework of distribution grids and a detailed review of distributed optimization algorithms, followed by a description of gossip algorithm theory. Based on graph spectral analysis optimal weights are selected to accelerate the convergence of gossip algorithms. Generic gossip algorithms have been extended to calculate power flow equations for radial distribution grids. The proposed gossip algorithms are the core of a distributed framework for congestion management. Nodes are sensing the constraints' violation at any part of the network by exchanging information within their neighborhood and they are self-triggered to resolve the violation by participation in a totally distributed optimization framework. Applications of gossip algorithms are also applied at the various voltage levels for coordinated congestion management and for local balancing of production-consumption. Moreover, a parametric estimation of telecommunication and calculation load of gossip algorithms is presented.

In the second part of the thesis, a multi-agent system is designed and applied for ancillary services provision by distributed energy resources based on the proposed gossip algorithms. Finally, techniques for information coding applied in electronic meters are investigated and an expansion of DLMS/COSEM classes is proposed, in order to enable the application of gossip algorithms for decentralized management of distribution grids through electronic meters.

Key words: management of distribution grids, distributed optimization, gossip algorithms, multi-agent systems

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διδακτορική μου διατριβή θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της, είτε σε ερευνητικό είτε σε προσωπικό επίπεδο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα της εργασίας, καθηγητή κ. Ν. Χατζηαργυρίου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την άριστη καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, καθηγητές κ. Κ. Βουρνά και κ. Στ. Παπαθανασίου, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, καθηγητές κ. Γ. Κορρέ, κ. Α. Σταφυλοπάτη, κ. Π. Γεωργιάκη και κ. Γ. Παπαγιάννη, για τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους φίλους και τους συναδέλφους για την αμέριστη συμπαράσταση, την υποστήριξη και την κατανόησή τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής μου.

Αντί προλόγου

Βλέπω τα δέντρα που ξέρω τη σύστασή τους, το νερό που δοκιμάζω τη γεύση του. Πώς ν' αρνηθώ αυτό τον κόσμο αφού υφίσταμαι την επίδρασή του, πώς ν' αρνηθώ το άρωμα της χλόης και των άστρων, πώς ν' αρνηθώ τη νύχτα και τις λίγες βραδιές που χαρίζουν στην καρδιά γαλήνη; Κι όμως ολόκληρη η επιστήμη αυτής της γης δε θα με πείσει ποτέ για το ότι αυτός ο κόσμος μου ανήκει. Μου τον περιγράφετε και με μαθαίνετε πού να τον κατατάξω. Απαριθμείτε τους νόμους του και διψώντας για γνώση συμφωνώ πως είναι αληθινοί. Διαλύετε το μηχανισμό του κι η ελπίδα μου μεγαλώνει. Μου μαθαίνετε, τέλος, πως αυτός ο γοητευτικός και πολύχρωμος κόσμος ξεκινάει απ' το άτομο κι αυτό απ' το ηλεκτρόνιο. Όλα αυτά είναι πολύ ωραία και περιμένω να συνεχίσετε. Εσείς όμως μου μιλάτε για ένα αόρατο πλανητικό σύστημα όπου τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από έναν πυρήνα. Μου εξηγείτε αυτόν τον κόσμο με μια εικόνα. Αναγνωρίζω τότε πως φτάσατε στο σημείο να κάνετε ποίηση: Δε θα μάθω ποτέ. Προτού προλάβω να μάθω την προέλευσή μου αλλάζετε θεωρία. Έτσι, η επιστήμη που ήταν υποχρεωμένη να μου μάθει τα πάντα καταλήγει στην υπόθεση, η σαφήνεια βυθίζεται στην αλληγορία, η αβεβαιότητα αναλύεται σ' έργο τέχνης. Για ποιο λόγο τόσες προσπάθειες; Οι απαλές γραμμές των λόφων και το χέρι της νύχτας πάνω σ' αυτήν τη βασανισμένη καρδιά, μου μαθαίνουν πιο πολλά. Ξαναγυρίζω εκεί που βρισκόμουν στην αρχή. Καταλαβαίνω πως η επιστήμη με βοηθάει στο να συλλάβω και ν' απαριθμήσω τα φαινόμενα. Δε μπορεί όμως να με βοηθήσει στο να εννοήσω τον κόσμο. Ακόμα κι αν είχα αγγίξει ολόκληρο το περίγραμμά του με το δάκτυλο, πάλι δε θα 'ξερα τίποτε.

Απόσπασμα από το βιβλίο του Αλμπέρ Καμύ, Ο μύθος του Σίσυφου

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	1
1.1.	Εισαγωγή τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών στα δίκτυα διανομής	1
1.1.1.	Ευφυή Δίκτυα.....	1
1.1.2.	Έξυπνοι μετρητές.....	2
1.2.	Σύγκριση κεντρικών και αποκεντρωμένων τεχνικών βελτιστοποίησης και εφαρμογών σε δίκτυα διανομής.....	3
1.3.	Νέα προβλήματα-νέες υπηρεσίες στη λειτουργία δικτύων διανομής με αφορμή την αύξηση σύνδεσης διεσπαρμένων πηγών.....	5
1.4.	Επισκόπηση Αλγορίθμων Κατανεμημένης Βελτιστοποίησης	7
1.4.1.	Αλγόριθμοι Sub-gradients.....	8
1.4.2.	Κατανεμημένος αλγόριθμος με βάση το Nesterov gradient	9
1.4.3.	Αλγόριθμος Dual Averaging	10
1.4.4.	Αλγόριθμος ADMM	11
1.5.	Συμπεράσματα από την ανάλυση των αλγορίθμων	13
1.6.	Σύνοψη και συμπεράσματα	14
1.7.	Αντικείμενο και δομή της διατριβής	15
2	Περί ομότιμων κόμβων.....	17
2.1.	Μοντέλο δικτύου.....	17
2.2.	Γράφος μεταφοράς πληροφορίας.....	17
2.3.	Φασματική θεωρία γράφων.....	18
2.4.	Θεωρία Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων.....	18
2.4.1.	Ορισμός και κατηγοριοποίηση.....	18
2.4.2.	Γενική διατύπωση Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων	21
2.4.3.	Σύγκλιση στο ντετερμινιστικό Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων.....	22
2.4.4.	Επιτάχυνση ταχύτητας σύγκλισης για τον υπολογισμό του μέσου όρου	23
2.4.5.	Αποτελέσματα ρυθμού σύγκλισης.....	27
2.5.	Υπολογισμός γραμμικών συναρτήσεων μέσω Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων	30
2.5.1.	Διαχωρίσιμα προβλήματα	31
2.6.	Στοχαστικός Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων	31
2.6.1.	Πιθανότητες μετάδοσης πληροφορίας.....	31
2.6.2.	Στοχαστικός Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων	32
2.6.3.	Σύγκλιση στο στοχαστικό Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων.....	32
2.6.4.	Αποτελέσματα στοχαστικού αλγορίθμου	33
2.7.	Σύνοψη και συμπεράσματα	34
3	Αλγόριθμοι ομότιμων κόμβων για υπολογισμούς ροών φορτίου σε δίκτυα διανομής.....	37
3.1.	Γενικά.....	37
3.2.	Απλοποίηση συναρτήσεων ροής φορτίου για τα δίκτυα διανομής	38
3.3.	Αρίθμηση κόμβων σε δίκτυα διανομής και μήτρα αθροιστικής σύνθετης αντίστασης	39

3.4.	Κατανεμημένος υπολογισμός τάσεων σε ακτινικό δίκτυο	40
3.5.	Κατανεμημένος υπολογισμός ρευμάτων κλάδων και απωλειών	41
3.6.	Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων για τον υπολογισμό της συνολικής ζήτησης και της τάσης κάθε κόμβου	41
3.7.	Υπολογισμοί ροής φορτίου μέσω Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων	43
3.8.	Αποτελέσματα ροής φορτίου μέσω Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων	44
3.8.1.	Ακτινικό δίκτυο 9 κόμβων	44
3.8.2.	Τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 κόμβων	52
3.9.	Σύνοψη και συμπεράσματα	63
4	Αλγόριθμοι ομότιμων κόμβων για κατανεμημένη διαχείριση συμφορήσεων.....	65
4.1.	Βασική διατύπωση προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου	65
4.2.	Διατύπωση προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου για διαχείριση ροών σε δίκτυα διανομής.....	67
4.2.1.	Διαχείριση ζήτησης και συναρτήσεις χρησιμότητας για τη διαχείριση των ευέλικτων φορτίων	67
4.3.	Διατύπωση προβλήματος αντιμετώπισης συμφόρησης μέσω περικοπής φορτίου ..	70
4.4.	Κατανεμημένος αλγόριθμος για εφαρμογή αποκεντρωμένης κατανομής πόρων	71
4.5.	Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων για υπολογισμό της μικρότερης προσφοράς.....	74
4.6.	Αλγόριθμος ομότιμων κόμβων για διαχείριση συμφορήσεων.....	74
4.7.	Αποτελέσματα εφαρμογής αλγορίθμου ομότιμων κόμβων για διαχείριση συμφορήσεων	76
4.7.1.	Ακτινικό δίκτυο 9 κόμβων	76
4.7.2.	Τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 κόμβων	81
4.8.	Εκτεταμένος Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων για διαχείριση συμφορήσεων	90
4.8.1.	Ποιοτικά αποτελέσματα εκτεταμένου αλγορίθμου	92
4.9.	Σύνοψη και συμπεράσματα	93
5	Περαιτέρω διερεύνηση εφαρμογών αποκεντρωμένου ελέγχου σε δίκτυα διανομής μέσω αλγορίθμων ομότιμων κόμβων.....	95
5.1.	Ιεραρχική διατύπωση αλγορίθμου ομότιμων κόμβων διαχείρισης συμφορήσεων ...	95
5.2.	Αποτελέσματα ιεραρχικής διατύπωσης σε ακτινικό δίκτυο 101 κόμβων	98
5.3.	Διατύπωση προβλήματος τοπικής εξισορρόπησης ζήτησης και παραγωγής σε δίκτυα διανομής.....	101
5.4.	Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων για τοπική εξισορρόπηση ζήτησης και παραγωγής σε δίκτυα διανομής.....	103
5.5.	Αποτελέσματα εφαρμογής αλγορίθμου ομότιμων κόμβων για τοπική εξισορρόπηση ζήτησης και παραγωγής	103
5.5.1.	Ακτινικό δίκτυο 9 κόμβων	103
5.5.2.	Τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 κόμβων	105
5.6.	Αποτίμηση τηλεπικοινωνιακού φόρτου Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων.....	108
5.6.1.	Αποτίμηση υπολογιστικού χρόνου	108
5.6.2.	Αποτίμηση χρόνου μετάδοσης μηνυμάτων.....	109
5.6.3.	Αποτίμηση συνολικού χρόνου σύγκλισης.....	110
5.7.	Σύνοψη και συμπεράσματα	112

6	Σύστημα πολλαπλών πρακτόρων για κατανεμημένη διαχείριση δικτύων διανομής	113
6.1.	Σύστημα πολλαπλών πρακτόρων για κατανεμημένη διαχείριση δικτύων διανομής	113
6.1.1.	Ευφυής πράκτορας λογισμικού και συστήματα πολλαπλών πρακτόρων	114
6.2.	Σχεδίαση συστήματος πολλαπλών πρακτόρων	115
6.2.1.	Λειτουργικά διαγράμματα και σενάρια κατανεμημένου ελέγχου	115
6.2.2.	Διερεύνηση των αρχικών τύπων ευφύων πρακτόρων	117
6.2.3.	Χαρακτηριστικά και αρμοδιότητες (ρόλοι) των διαφόρων τύπων πρακτόρων .	118
6.2.4.	Συνεργασίες και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τύπων πρακτόρων	120
6.2.5.	Τελικοί τύποι πρακτόρων	120
6.2.6.	Βασικοί τύποι πρακτόρων για υποστήριξη των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων....	121
6.3.	Υλοποίηση συστήματος πολλαπλών πρακτόρων (JADE)	121
6.3.1.	Εσωτερικές λειτουργίες πρακτόρων	122
6.4.	Εφαρμογή σε δίκτυο 6 κόμβων (Μελτέμι)	127
6.4.1.	Σενάριο διαχείρισης συμφόρησης	128
6.5.	Σύνοψη και συμπεράσματα	130
7	Έξυπνοι μετρητές ως δομικό στοιχείο αλγορίθμων ομότιμων κόμβων	131
7.1.	Οι έξυπνοι μετρητές ως βασικό στοιχείο των κατανεμημένων εφαρμογών σε δίκτυα διανομής.....	131
7.2.	Τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών για τις εφαρμογές διαχείρισης των δικτύων διανομής	132
7.2.1.	Πρότυπα, πρωτόκολλα και τεχνολογίες επικοινωνιών.....	133
7.3.	Το πρότυπο DLMS/COSEM	134
7.3.1.	Το πλαίσιο επικοινωνίας COSEM	134
7.3.2.	Η μοντελοποίηση δεδομένων μέσω του COSEM.....	135
7.3.3.	Το σύστημα ταυτοποίησης αντικειμένων OBIS	135
7.3.4.	Μετάδοση δεδομένων – Επικοινωνία	136
7.3.5.	Προφίλ επικοινωνιών ανάλογα με το μέσο	137
7.4.	Εξομοιωτές έξυπνων μετρητών μέσω λογισμικό ανοιχτού κώδικα.....	137
7.5.	Αξιολόγηση της τρέχουσας κατάστασης ηλεκτρονικών μετρητών προς την επιθυμητή μετάβαση στους έξυπνους.....	138
7.5.1.	Υπολογιστική ισχύς και χώρος αποθήκευσης	138
7.5.2.	Τηλεπικοινωνιακή σύνδεση	138
7.5.3.	Ελεγχόμενοι ηλεκτρονόμοι εξόδου.....	138
7.6.	Λογισμικό ανοιχτού κώδικα για δημιουργία πελάτη.....	139
7.6.1.	Επικοινωνία με πραγματικό μετρητή μέσω DLMS/COSEM	139
7.6.2.	Λογισμικό ανοιχτού κώδικα για εικονικό μετρητή	140
7.7.	Απαιτήσεις επέκτασης προς την επιθυμητή μετάβαση στους έξυπνους μετρητές για κατανεμημένες εφαρμογές.....	141
7.8.	Σύνοψη και συμπεράσματα	141
8	Ανακεφαλαίωση, συμπεράσματα, συμβολή και προοπτικές	143

8.1. Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα	143
8.2. Πρωτοτυπία - Συμβολή.....	148
8.3. Μελλοντικές προεκτάσεις	149
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Σχεδίαση πλαισίου προσομοίωσης τηλεπικοινωνιακού φόρτου από τις κατανεμημένες εφαρμογές διαχείρισης του δικτύου διανομής.....	151
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Δεδομένα δικτύων	155
Βιβλιογραφία	163
Δημοσιεύσεις	169

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Τα πέντε επίπεδα του Smart Grid	2
Σχήμα 2.1: Εξέλιξη ιδιοτιμών κατά την ελαχιστοποίηση της φασματικής ακτίνας (δίκτυο 9 κόμβων).....	29
Σχήμα 2.2: Τοπολογία δικτύου 9 κόμβων και στοχαστικός επικοινωνιακός γράφος	34
Σχήμα 3.1: Υπολογισμοί ροής φορτίου με αλγόριθμους ομότιμων κόμβων	43
Σχήμα 3.2: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο ζήτησης)	45
Σχήμα 3.3: Υπολογισμοί συνολικής αέργου ισχύος (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο ζήτησης).....	45
Σχήμα 3.4: Υπολογισμοί μέτρου τάσης (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο ζήτησης).....	46
Σχήμα 3.5: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος (δίκτυο 9 κόμβων- μικτό σενάριο).....	47
Σχήμα 3.6: Υπολογισμοί μέτρου τάσης (δίκτυο 9 κόμβων- μικτό σενάριο)	48
Σχήμα 3.7: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο μηδενικής ροής).....	49
Σχήμα 3.8: Υπολογισμοί μέτρου τάσης (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο μηδενικής ροής)	49
Σχήμα 3.9: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο παραγωγής) 51	
Σχήμα 3.10: Υπολογισμοί μέτρου τάσης (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο παραγωγής).....	51
Σχήμα 3.11: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος σε ενδεικτικούς κόμβους (δίκτυο IEEE 123 κόμβων- σενάριο ζήτησης)	52
Σχήμα 3.12 α-γ : Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο ζήτησης).....	53
Σχήμα 3.13 α-γ : Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο ζήτησης).....	54
Σχήμα 3.14 α-γ : Υπολογισμοί μέτρου τάσης μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο ζήτησης)	55
Σχήμα 3.15 α-γ: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο παραγωγής).....	58
Σχήμα 3.16 α-γ: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο παραγωγής).....	59
Σχήμα 3.17 α-γ: Υπολογισμοί μέτρου τάσης μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο παραγωγής).....	60
Σχήμα 3.18 α-γ: Υπολογισμοί μέτρου τάσης μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο παραγωγής).....	61
Σχήμα 4.1: Τμηματικά γραμμική συνάρτηση χρησιμότητας	69
Σχήμα 4.2: Η αντικειμενική συνάρτηση με τις κλίσεις σε αύξουσα διάταξη	73
Σχήμα 4.3 : Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος για τη διαχείριση της συμφόρησης στο δίκτυο 9 κόμβων	77
Σχήμα 4.4: Περικοπή ανά κόμβο κατά τη διάρκεια των σταδίων του Αλγορίθμου 3 για το δίκτυο 9 κόμβων	80
Σχήμα 4.5: Σύγκλιση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων στον περιορισμό συνολικής ζήτησης για το δίκτυο 9 κόμβων.....	80
Σχήμα 4.6 : Υπολογισμοί μέτρου τάσης για το δίκτυο 9 κόμβων	81
Σχήμα 4.7 α-β: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος σε ενδεικτικούς κόμβους (δίκτυο IEEE 123 κόμβων).....	82

Σχήμα 4.8: Περικοπή ανά κόμβο κατά τη διάρκεια των σταδίων του Αλγορίθμου 3 για το δίκτυο IEEE 123 κόμβων.....	83
Σχήμα 4.9: Σύγκλιση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων στον περιορισμό συνολικής ζήτησης για το δίκτυο IEEE 123 κόμβων.....	86
Σχήμα 4.10 α-γ: Υπολογισμοί μέτρου τάσης μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο διαχείρισης συμφόρησης)	87
Σχήμα 4.11 α-γ: Υπολογισμοί μέτρου τάσης μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο διαχείρισης συμφόρησης)	88
Σχήμα 5.1: Ιεραρχική δομή Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων	97
Σχήμα 5.2: Περικοπή ανά κόμβο κατά τη διάρκεια των σταδίων του Αλγορίθμου 3	99
Σχήμα 5.3: Γύροι Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων σε κάθε στάδιο του Αλγορίθμου 3.....	99
Σχήμα 5.4: Γύροι Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων κατά το δεύτερο στάδιο του Αλγορίθμου 3	100
Σχήμα 5.5: Γύροι Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων στον κόμβο 84 (συντονισμός μεταξύ δικτύων MT και XT)	101
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα ροής Αλγορίθμου 5	102
Σχήμα 5.7: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος (δίκτυο 9 κόμβων- τοπική εξισορρόπηση ζήτησης/παραγωγής).....	104
Σχήμα 5.8 : Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος σε ενδεικτικούς κόμβους (δίκτυο IEEE 123 κόμβων).....	106
Σχήμα 6.1: Συσχέτιση ιδιοτήτων των Πρακτόρων [61]	115
Σχήμα 6.2: Σενάρια σχεδιασμού συστήματος πολλαπλών πρακτόρων	117
Σχήμα 6.3: Σχηματική απεικόνιση αρχιτεκτονικής συστήματος πολλαπλών πρακτόρων	122
Σχήμα 6.4: Διάγραμμα δομής του πράκτορα ΥΣ.....	122
Σχήμα 6.5: Διάγραμμα δομής του πράκτορα Κόμβου	123
Σχήμα 6.6: Διάγραμμα ροής Αλγορίθμου 1 ως Cyclic Behavior του πράκτορα Κόμβου	125
Σχήμα 6.7 : Διάγραμμα ροής στοχαστικού αλγορίθμου ομότιμων κόμβων	126
Σχήμα 6.8: Τοπολογία δικτύου 6 κόμβων στο Μελτέμι	128
Σχήμα 6.9: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος για τη διαχείριση της συμφόρησης στο δίκτυο 6 κόμβων (Μελτέμι)	129
Σχήμα 7.1: Διάγραμμα διασύνδεσης εικονικού μετρητή	141
Σχήμα ΠΒ.0.1: Τοπολογία δικτύου 9 κόμβων και επικοινωνιακός γράφος	155
Σχήμα ΠΒ.0.2: Τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 κόμβων	156
Σχήμα ΠΒ.0.3: Δίκτυο 101 ζυγών	158

Συντμήσεις & Αντιστοιχίες αγγλικών-ελληνικών όρων

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΜΤ	Μέση Τάση
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΥΣ	Υποσταθμός
ΥΤ	Υψηλή Τάση
ΧΤ	Χαμηλή Τάση

CIM	Common Information Model
COSEM	Companion Specification for Energy Metering
DLMS	Device Language Message Specification
DSL	Digital Subscriber Line
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
HSPA	High Speed Packet Access
IED	Intelligent Electronic Devices
JADE	Java Agent Development Framework
LTE	Long Term Evolution
OBIS	OBject Identification System
OSI	Open Systems Interconnection
PLC	Power Line Communication /Carrier
RF	Radio Frequency
SGAM	Smart Grid Architecture Model

AP	Application Process	Διεργασία εφαρμογής
ICT	Information and Communication Technology	Τεχνολογία πληροφορικής και επικοινωνιών
MAS	Multi Agent System	Σύστημα πολλαπλών πρακτόρων
OPF	Optimal Power Flow	Βέλτιστη Ροή φορτίου
PF	Power Flow	Ροή φορτίου
RTU	Remote terminal unit	Τερματική συσκευή
SCADA	Supervisory, Control and Data Acquisition	Σύστημα εποπτείας και ελέγχου

Agent	Πράκτορας λογισμικού
Aggregation	Άθροιση με ομαδοποίηση
Anti-entropy	Μείωσης εντροπίας
Application data model	Μοντελοποίηση εφαρμογής
Attribute	Χαρακτηριστικό
Client	Πελάτης
Congestion	συμφόρηση
Consensus	Συμφωνία
Dispatchable loads	ευέλικτα φορτία
Distributed consensus	Κατανεμημένη συμφωνία
Gossip Algorithm	Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων
Load shedding	Περικοπή φορτίου
Messaging	Δημιουργία μηνυμάτων
Node	Κόμβος
Peer	Ομότιμος Κόμβος
Real-time	Πραγματικός χρόνος
Register	Καταχωρητής
Relaxation	Χαλάρωση (περιορισμών)
Relays	Ηλεκτρονόμοι
Resource allocation	Κατανομή πόρων
Rumor-mongering	Φημολογίας
Separable function	Διαχωρίσιμη συνάρτηση
Server	Εξυπηρετητής
Smart Grid	Ευφυές Δίκτυο
Transporting	Μετάδοση μηνυμάτων
Utility function	Συνάρτηση χρησιμότητας

1

Εισαγωγή

1.1. Εισαγωγή τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών στα δίκτυα διανομής

Η τρέχουσα υποδομή των δικτύων διανομής βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη λογική και τις τεχνολογίες των προηγούμενων δεκαετιών, όταν βασικός στόχος των δικτύων διανομής ήταν η ασφαλής και αξιόπιστη τροφοδότηση των καταναλωτών Μέσης Τάσης (ΜΤ) και Χαμηλής Τάσης (ΧΤ) μεταφέροντας και διανέμοντας την ηλεκτρική ενέργεια που παραδοσιακά παραγόταν σε μεγάλα κέντρα παραγωγής σε μεγάλη απόσταση από τους καταναλωτές. Η σταδιακά αυξημένη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και άλλων μικροπηγών συνδεδεμένων απευθείας στα δίκτυα διανομής, καθώς και η πρόοδος των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών (Information and Communication Technology- ICT), μετασχηματίζουν συνεχώς το παθητικό δίκτυο διανομής σε ενεργό δίκτυο με πολλαπλά επίπεδα εποπτείας και ελέγχου.

Στην παρούσα διατριβή, η αντικατάσταση των κλασικών μετρητών με ηλεκτρονικούς και έξυπνους μετρητές στη συνέχεια, θεωρείται ο κινητήριος μοχλός για την εφαρμογή αλγορίθμων εποπτείας και ελέγχου των δικτύων διανομής ακόμη και σε επίπεδο ΧΤ. Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στην αποκεντρωμένη συλλογή κι επεξεργασία δεδομένων και φυσικών μεγεθών, και στη συνέχεια σε κατανεμημένες λογικές ελέγχου και βελτιστοποίησης, προκειμένου η λειτουργία του δικτύου διανομής να ανταποκρίνεται στα πρότυπα και στις νέες υπηρεσίες στα πλαίσια των ευφυών δικτύων.

1.1.1. Ευφυή Δίκτυα

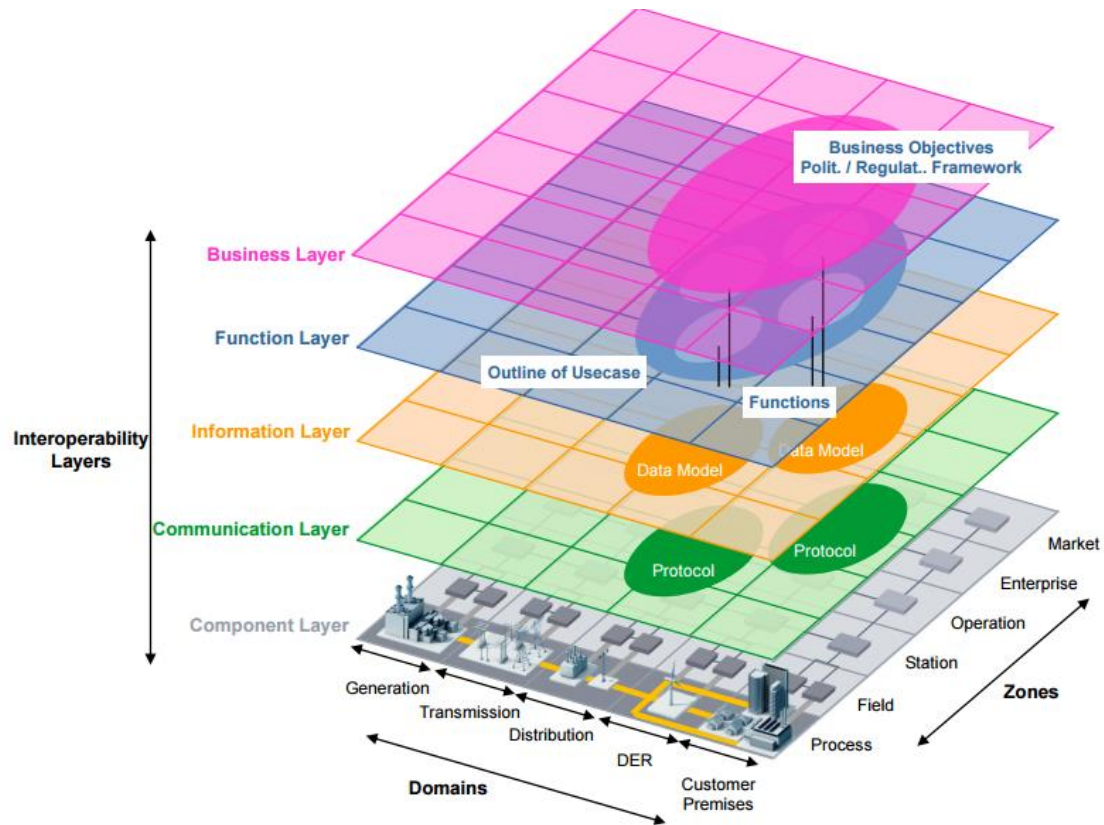
Ο όρος ευφύες δίκτυο (Smart Grid) επιδέχεται διάφορους ορισμούς, οι περισσότεροι από τους οποίους σχετίζονται με τις ιδιότητες που αυτό διαθέτει. Ένας αρκετά σαφής ορισμός είναι ο ακόλουθος:

Το “Smart Grid” είναι ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο είναι σε θέση να δημιουργήσει ένα πλαίσιο με τις κατάλληλες τεχνοοικονομικά συνθήκες, έτσι ώστε όλοι οι

χρήστες (παραγωγοί και καταναλωτές) του δικτύου να μπορούν να προωθήσουν τις δράσεις τους και να καλύψουν τις ανάγκες τους υπό αυτό το πλαίσιο, με πρωταρχικό στόχο να διασφαλίζεται η αξιόπιστη, αποδοτική και ασφαλής λειτουργία του δικτύου.[1]

Σε κάποιες περιπτώσεις, το ευφυές δίκτυο χαρακτηρίζεται από το είδος των τεχνολογιών που ενσωματώνει για να επιτύχει τους παραπάνω σκοπούς. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η αναπαράσταση των λειτουργιών και των πολύπλευρων επιπέδων του έξυπνου δικτύου, όπως έχει αποδοθεί από το Smart Grid Architecture Model (SGAM) της CENELEC, είναι αρκετά επεξηγηματική.[3]

Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζονται τα πέντε επίπεδα ελέγχου και λογικής του SGAM, τα οποία σε συνδυασμό συνθέτουν την κατά το δυνατό πληρέστερη εικόνα του έξυπνου δικτύου.



Σχήμα 1.1: Τα πέντε επίπεδα του Smart Grid

1.1.2. Έξυπνοι μετρητές

Η εξέλιξη και η ευρεία διάδοση των ηλεκτρονικών μετρητών ηλεκτρικής ενέργειας έχει συμβάλει στο μετασχηματισμό της αγοράς και των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, στο βαθμό που θέτει στη διάθεση των διαχειριστών του δικτύου λεπτομερείς πληροφορίες για τη λειτουργία του δικτύου, αλλά και τη δυνατότητα να συλλέγουν αυτές τις πληροφορίες απομακρυσμένα.

Επιπλέον, οι έξυπνοι μετρητές ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν, πέραν της καταγραφής και αποστολής μετρήσεων, και στην επιτήρηση της ποιότητας ισχύος, καθώς διαθέτουν τη δυνατότητα καταγραφής διαφόρων συμβάντων και σχετικών μεγεθών. Ακόμη, συμβάλλουν στη δημιουργία υποδομής, η οποία επιτρέπει τη συμμετοχή διαφόρων τύπων παικτών, και ιδιαίτερα καταναλωτών, στα πλαίσια μίας απελευθερωμένης αγοράς ενέργειας.

Ο ηλεκτρονικός μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από ένα σύνολο καταχωρητών, μετρά και αποθηκεύει ηλεκτρικά μεγέθη (ρεύμα, τάση, συχνότητα), καθώς και μία πληθώρα από δευτερογενή δεδομένα και πληροφορίες. Ο ηλεκτρονικός μετρητής διαθέτει υπολογιστική ισχύ και μέσω προκαθορισμένων αλγορίθμων και λογικών ελέγχων μπορεί να επεξεργαστεί τις μετρήσεις που λαμβάνει, δημιουργώντας πιο ευφυή πληροφόρηση για γεγονότα (διακοπή ρεύματος, απώλεια μίας φάσης, παραβίαση μετρητή), την οποία και πάλι έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει εσωτερικά. Εκτός των παραπάνω, ο μετρητής διαθέτει διεπαφή επικοινωνίας, όπου συνήθως συνδέεται το κατάλληλο μόντεμ για τη μετάδοση των πληροφοριών που βρίσκονται αποθηκευμένες, δια μέσου κάποιου τηλεπικοινωνιακού μέσου.

Ουσιαστικά κάθε ηλεκτρονικός μετρητής παίζει το ρόλο του εξυπηρετητή (server), ο οποίος ανατρέχει στην εσωτερικά αποθηκευμένη πληροφορία και αποστέλλει την εκάστοτε ζητούμενη πληροφορία προς έναν πελάτη (client), ο οποίος συνήθως βρίσκεται σε ένα κέντρο συλλογής μετρήσεων.

Η εσωτερική κωδικοποίηση/αναπαράσταση της πληροφορίας και ο τρόπος μετάδοσής της γίνεται προσπάθεια να προτυποποιηθεί με διάφορα ευρωπαϊκά και διεθνή στάνταρ, έτσι ώστε να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ των διαφόρων κατασκευαστών. Ένα ευρέως διαδεδομένο διεθνές πρότυπο που αφορά τους ηλεκτρονικούς μετρητές είναι το DLMS/COSEM [4]. Η αρχική έννοια της συντόμευσης DLMS ήταν Distribution Line Message Specification, αλλά στην πορεία της αποδόθηκε ο όρος Device Language Message Specification, έτσι ώστε να είναι πιο σαφές ότι πλέον πρόκειται για ένα πρότυπο το οποίο μοντελοποιεί την ίδια την πληροφορία των μετρητών. Οι βασικές ιδιότητες του προτύπου DLMS/COSEM είναι η ανεξαρτησία κωδικοποίησης και τηλεπικοινωνιακού μέσου, η δυνατότητα των ίδιων των μετρητών να γνωρίζουν και να περιγράφουν την κωδικοποίηση των διαθέσιμων σε αυτούς δεδομένων και η λογική της στοίβας επικοινωνιών τύπου Open Systems Interconnection (OSI), η οποία υποστηρίζει διάφορα τηλεπικοινωνιακά μέσα (PSTN, GSM, Internet, GPRS, PLC, MBus).

1.2. Σύγκριση κεντρικών και αποκεντρωμένων τεχνικών βελτιστοποίησης και εφαρμογών σε δίκτυα διανομής

Κάνοντας πιο συγκεκριμένα όσα αναφέρθηκαν ήδη, η υπάρχουσα διαχείριση του δικτύου διανομής χρησιμοποιεί σε μεγάλο βαθμό επεκτάσεις των υφιστάμενων συστημάτων εποπτείας και ελέγχου (Supervisory, Control and Data Acquisition - SCADA), τα οποία προφανώς είχαν σχεδιαστεί με προδιαγραφές κεντρικών εφαρμογών και η αρχιτεκτονική τους βασίζεται στη λογική διασύνδεσης μεγάλου πλήθους τερματικών συσκευών (remote terminal units - RTU) με ένα κεντρικό σημείο ελέγχου. Ωστόσο, λόγω της γεωγραφικής διασποράς των τερματικών συσκευών, συχνά συνυπάρχουν αρκετά ανομοιογενή συστήματα υποδομής, κυρίως όσον αφορά τις τεχνολογίες επικοινωνιών που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία με το κεντρικό σημείο εποπτείας και ελέγχου. Σε κάθε περίπτωση, τα πρότυπα για τις επικοινωνίες των συστημάτων αυτών δεν εξασφαλίζουν μεγάλη αξιοπιστία στη μετάδοση της πληροφορίας, ενώ πολύ συχνά οι επεκτάσεις τους με στόχο την επέκταση των εφαρμογών διαχείρισης του δικτύου διανομής και σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης είναι αρκετά δυσχερείς, καθώς τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται είναι στην πλειοψηφία τους βασισμένα στις ιδιότητες των συγκεκριμένων συσκευών που χρησιμοποιούνται ήδη.

Σε αντίθεση με τις κεντρικές λογικές ελέγχου και διαχείρισης, σε ερευνητικό επίπεδο έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες εισαγωγής αποκεντρωμένων και κατανεμημένων αλγορίθμων για την αντιμετώπιση μίας πληθώρας προβλημάτων, τα οποία σχετίζονται με τη λειτουργία των δικτύων διανομής. Ακολουθεί μία σύντομη αναφορά σε αυτές τις προσπάθειες. Σε όλες τις εργασίες είναι προφανές ότι το στοιχειώδες πλαίσιο για την αποκεντρωμένη διαχείριση των δικτύων διανομής αποτελούν τα υπερκείμενα δίκτυα συνεργαζόμενων αισθητήρων και ελεγκτών, οι οποίοι τοποθετούνται σε διάφορα σημεία του δικτύου ως συσκευές συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων. Επιπλέον η χρήση των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων (Multi-Agent Systems - MAS) έχει προταθεί ευρέως για εφαρμογές αποκεντρωμένου ελέγχου, καθώς είναι συνυφασμένη με μία αποκεντρωμένη οργάνωση [5][6]. Πιο συγκεκριμένα, η δημιουργία συνεργαζόμενων ευφυών πρακτόρων λογισμικού με βάση διεθνή πρότυπα και έννοιες, μπορεί να θέσει τις βάσεις για ένα αποδοτικό πλαίσιο διαχείρισης του δικτύου [6]. Επίσης, αποκεντρωμένες εφαρμογές διαχείρισης του δικτύου έχουν προταθεί για επιτήρηση και εκτίμηση της κατάστασής του [7][8], για έλεγχο της τάσης και ταυτόχρονα περιορισμό των υπερεντάσεων [9]-[11], καθώς επίσης και για προγραμματισμό της λειτουργίας [12]-[18]. Στην επόμενη παράγραφο δίνονται περισσότερες λεπτομέρειες για κάποιες από τις προαναφερθείσες ομάδες δημοσιεύσεων.

Στη δημοσίευση [12] προτείνεται μία ιεραρχική δομή MAS με στόχο τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός μικροδικτύου με όρους αγοράς και συγκεκριμένα προτείνεται ένας αλγόριθμος μειοδοσίας και συμμετρικής ανάθεσης. Η δημοσίευση [13] προτείνει επίσης μία οργάνωση πολλαπλών πρακτόρων, η οποία στοχεύει στην διαχείριση του δικτύου με ικανοποίηση των λειτουργικών του ορίων, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί το κόστος λειτουργίας και μεγιστοποιεί τη συμμετοχή των τοπικών φορτίων. Επισημαίνεται ότι το πρόβλημα το οποίο καταστρώνεται με βάση τους παραπάνω στόχους, επιλύεται κεντρικά μέσω υπολογισμού των κρίσιμων μεγεθών που σχετίζονται με την τοπική απόδοση και τελικά εφαρμόζεται ένα αποκεντρωμένο σύστημα λήψης αποφάσεων, ώστε να εφαρμοστούν τα αποτελέσματα του κεντρικού υπολογισμού. Στη δημοσίευση [14] επιλύεται μία κατάστρωση της βέλτιστης ροής φορτίου με εν μέρει αποκεντρωμένο τρόπο, προτείνοντας αποσύνθεση των πολλαπλασιαστών Lagrange. Στη δημοσίευση [15] αξιολογούνται ταυτόχρονα ο έλεγχος συχνότητας και η οικονομική κατανομή σε μία προσπάθεια κατάστρωσης αποκεντρωμένου αλγορίθμου, ωστόσο η διαφορά μεταξύ ζήτησης και παραγωγής λαμβάνεται υπόψη μόνο συγκεντρωτικά. Στη δημοσίευση [16] προτείνεται ένα τριεπίπεδο ιεραρχικό σχήμα οργάνωσης πολλαπλών πρακτόρων για τη διαχείριση ενέργειας σε ένα μικροδίκτυο, με τους πράκτορες να αναλαμβάνουν δράση σε ένα αποκεντρωμένο πρωτόκολλο προσφορών στο κατώτατο επίπεδο της ιεραρχίας. Στις δημοσιεύσεις [17] και [18] περιγράφεται ένα σχήμα διαχείρισης ενέργειας για τα επόμενα χρονικά διαστήματα σε κλίμακα λίγων λεπτών ή ωρών, με βάση ένα πρόβλημα που μοιάζει με τη βέλτιστη ροή φορτίου χωρίς τους περιορισμούς, ουσιαστικά προτείνοντας επαναληπτικούς αλγορίθμους οι οποίοι είναι αποκεντρωμένοι ως ένα βαθμό, αλλά εμπλέκουν και έναν κεντρικό συντονιστή για την ανανέωση των πολλαπλασιαστών Lagrange.

Τέλος, έχει προταθεί ήδη η χρήση μίας συγκεκριμένης κατηγορίας κατανεμημένων αλγορίθμων, των αλγορίθμων ομότιμων κόμβων, για εφαρμογές εκτίμησης κατάστασης και εποπτείας [19][20]. Στη συνέχεια της διατριβής, θεωρείται ότι η δυνατότητα χρήσης αυτών

των αλγορίθμων για την επίλυση προβλημάτων διαχείρισης ροών σε δίκτυα διανομής βασίζεται στις κατ' εξοχήν εφαρμογές των αλγορίθμων αυτών σε δίκτυα αισθητήρων [19]-[22]. Ακολουθεί μία μικρή αναφορά στη βιβλιογραφία που σχετίζεται με την εκτίμηση κατάστασης σε δίκτυα αισθητήρων. Συγκεκριμένα, στη δημοσίευση [19] χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα συμφωνίας για κατανεμημένο υπολογισμό εκτιμήσεων μεταβλητών που αφορούν την κατάσταση ενός δικτύου αισθητήρων, με βάση κάποια τοπικά μετρούμενα μεγέθη. Στη δημοσίευση [20] προτείνεται ένα σύνολο από αυτοοργανωνόμενους αισθητήρες, οι οποίοι υπολογίζουν με κατανεμημένο τρόπο τις απώλειες ενεργού ισχύος σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω πρωτοκόλλων συμφωνίας.

1.3. Νέα προβλήματα-νέες υπηρεσίες στη λειτουργία δικτύων διανομής με αφορμή την αύξηση σύνδεσης διεσπαρμένων πηγών

Η διαρκώς αυξανόμενη σύνδεση διεσπαρμένων πηγών ενέργειας, μη σταθερής παραγωγής, κυρίως στα δίκτυα διανομής, αυξάνει τη μεταβλητότητα των ροών ισχύος καθώς και τη συχνότητα εμφάνισης συμφορήσεων σε διάφορα σημεία του δικτύου [23]. Ωστόσο η αυξανόμενη μεταβλητότητα στις ροές ισχύος μειώνει το συντελεστή χρησιμοποίησης του δικτύου και κατ' επέκταση καθιστά μη συμφέρουσες και αναποτελεσματικές τις λύσεις που βασίζονται σε επενδύσεις για επαυξήσεις των υποδομών του δικτύου [24]. Οι τεχνολογίες των ευφυών δικτύων είναι σε θέση να προτείνουν εναλλακτικές λύσεις αποδοτικότερης χρησιμοποίησης των υποδομών του δικτύου, εξαντλώντας τις δυνατότητες ευελιξίας και ελαστικότητας στη ζήτηση και στην κατανεμημένη παραγωγή υπό το πρίσμα της διαχείρισης των πόρων αυτών κατά τη λειτουργία του δικτύου. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, ο όρος της ευελιξίας ορίζεται ως η δυνατότητα προσαρμογής στις μεταβλητές και μη προβλέψιμες καταστάσεις του δικτύου. Οι υπηρεσίες διάθεσης της ευελιξίας είναι δυνατό να παρέχονται από τους παραγωγούς, τους καταναλωτές ή τους αντιπροσώπους των καταναλωτών, ενώ οι ίδιοι οι διαχειριστές δικτύων διανομής ενδέχεται να αναζητούν αυτές τις υπηρεσίες διάθεσης ευελιξίας στα πλαίσια της διαχείρισης των δικτύων τους, όταν αντιμετωπίζουν θέματα συμφορήσεων ή επιθυμούν να επιτύχουν τοπική εξισορρόπηση ζήτησης-παραγωγής. Επιπλέον, οι διαχειριστές δικτύων διανομής ενδέχεται να ζητούν αυτές τις υπηρεσίες, έτσι ώστε κι αυτοί με τη σειρά τους να παρέχουν επικουρικές υπηρεσίες ή υπηρεσίες εφεδρείας προς το διαχειριστή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας[25][26].

Καθώς μεταβαίνουμε λοιπόν από την εποχή της κεντρικής παραγωγής ενέργειας, προς την αποκεντρωμένη παραγωγή και την ενσωμάτωση νέων τύπων καταναλωτών στα δίκτυα, παράλληλα προχωρούν οι τεχνολογικές εξελίξεις και ταυτόχρονα μεταβάλλονται οι ανάγκες των χρηστών του δικτύου. Τελικά, ο δρόμος προς την ενοποίηση διαφόρων τεχνολογικών επιτευγμάτων προκειμένου να επιτευχθεί μία πιο ολοκληρωμένη διαχείριση ενεργού τύπου, οδηγεί επίσης στη διερεύνηση νέων απαιτήσεων και στην ανίχνευση νέων υπηρεσιών που θα μπορούσαν να προσφέρουν τα δίκτυα διανομής τόσο στους χρήστες τους όσο και στα υπόλοιπα επίπεδα οργάνωσης του Smart Grid, καθώς δεν αρκούμαστε πλέον μόνο στην ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία των δικτύων. Βέβαια προκειμένου να ακολουθήσουν τις εξελίξεις, οι διαχειριστές των δικτύων αλλά και όλοι οι συμμετέχοντες οφείλουν να εντοπίσουν και να αντιμετωπίσουν τις τιθέμενες προκλήσεις και περιορισμούς. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εξής θεματικές ενότητες:

- Απαιτείται θεσμοθέτηση για το ρόλο και τη συμμετοχή των διαφόρων πιθανών συμμετεχόντων
- Απαιτείται θέσπιση κινήτρων για τις επενδύσεις σε εξοπλισμό, αλλά και για τη συμμετοχή γενικότερα
- Απαιτείται σκιαγράφηση του γενικότερου πλαισίου τυποποίησης και μηχανισμών εφαρμογής
- Απαιτείται εμβάθυνση σε τεχνικά ζητήματα με στόχο την ωρίμανση της τεχνολογίας και την απόκτηση τεχνογνωσίας

Προφανώς, η παρούσα διατριβή επιδιώκει να συμβάλει κυρίως στον τελευταίο στόχο, προτείνοντας μία σειρά από καταναμημένες λογικές ελέγχου των δικτύων διανομής σε συνδυασμό με τεχνολογίες ICT για την εφαρμογή και την αξιολόγησή τους, αφού προηγουμένως πραγματοποιηθεί μία ανάλυση της κατάστασης του γενικότερου πλαισίου τυποποίησης και πώς αυτό θα μπορούσε να αξιοποιηθεί και να επεκταθεί κατάλληλα.

Επισημαίνεται ότι είναι κυρίως ζήτημα των διαχειριστών δικτύου αλλά και των ρυθμιστικών αρχών να προωθήσουν και να επιλύσουν θέματα όπως η επέκταση των υπάρχοντων προτύπων ώστε να καλύπτουν τις τεχνολογίες που απαιτεί το Smart Grid. Εκτός των άλλων, βασική προϋπόθεση είναι η δημιουργία νέου ρυθμιστικού πλαισίου που να επιτρέπει και να ενθαρρύνει τη δημιουργία νέων υπηρεσιών με βάση τις νέες ανάγκες, η παροχή δυνατότητας ευελιξίας στους διαχειριστές να χειρίζονται το δίκτυο τους με πιο αποδοτικό τρόπο αποκομίζοντας οικονομικά οφέλη, αλλά και πιο τεχνικά θέματα όπως η διερεύνηση της ασφάλειας δεδομένων και η αξιοπιστία από τη διαχείριση του δικτύου μέσω τεχνολογιών ICT.

Οι ρυθμιστικές αρχές παίζουν συνήθως περισσότερο το ρόλο του εκπροσώπου για τους καταναλωτές και κατά συνέπεια προσδίδουν μία προσέγγιση με κέντρο τον καταναλωτή στα θέματα ανάπτυξης του Smart Grid. Οι ανάγκες των χρηστών του δικτύου δεν μεταβάλλονται εμφανώς με τόσο γρήγορο ρυθμό, για παράδειγμα όπως και παλαιότερα οι καταναλωτές συνεχίζουν να επιδιώκουν μία ανταγωνιστική τιμή για να αγοράζουν την ενέργεια και απαιτούν ένα αποδεκτό επίπεδο ποιότητας ισχύος χωρίς διακοπές και διακυμάνσεις. Οι πραγματικά νέες ανάγκες για υπηρεσίες υπαγορεύονται κατά βάση από τους νέους τύπους χρηστών, διεσπαρμένους παραγωγούς, αυτοπαραγωγούς και νέους τύπους φορτίων (όπως τα ηλεκτρικά οχήματα), οι οποίοι αναζητούν τη δυνατότητα να συνδεθούν στα δίκτυα και ζητούν τη συμμετοχή τους σε αγορές επικουρικών υπηρεσιών και διάφορες υπηρεσίες νέου τύπου, όπως για παράδειγμα η τοπική εξισορρόπηση ζήτησης-παραγωγής, με στόχο να εξασφαλίσουν οι ίδιοι τη δυνατότητα σύνδεσής τους στο δίκτυο, ώστε να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες τους.

Αυτό που αναμένουμε για τις προσεχείς δεκαετίες είναι να επεκταθεί προς τα δίκτυα διανομής, ακόμη και σε επίπεδο χαμηλής τάσης, η λογική εποπτείας και ελέγχου που υπάρχει ήδη στα δίκτυα μεταφοράς. Εξάλλου η επαρκής πληροφόρηση για την κατάσταση του εξοπλισμού του δικτύου διανομής μπορεί από μόνη της να βελτιώσει τις παρεχόμενες υπηρεσίες, ενώ αν συνυπολογίσει κανείς την ευρύτερη διάδοση συσκευών που επιτρέπουν τον αυτοματισμό και τον έλεγχο στα δίκτυα διανομής, τότε είναι δεδομένο ότι θα είμαστε ένα βήμα πιο κοντά προς το όραμα του Smart Grid.

1.4. Επισκόπηση Αλγορίθμων Κατανεμημένης Βελτιστοποίησης

Οι κατανεμημένοι αλγόριθμοι εμφανίστηκαν κατά τη δεκαετία του 1980 ως εργαλεία βελτιστοποίησης με εφαρμογές στον αποκεντρωμένο εντοπισμό, τη συμφωνία (consensus) και την ελαχιστοποίηση. Οι δημοσιεύσεις [27][28] εισάγουν αλγόριθμους, οι οποίοι ελαχιστοποιούν μία συνεχή συνάρτηση, η οποία είναι δεδομένη και γνωστή σε περισσότερους κόμβους και αυτό που προτείνεται ουσιαστικά αποτελεί την παράλληλη επεξεργασία διαφόρων συνιστωσών ενός βοηθητικού κοινού διανύσματος. Η πιο πρόσφατη βιβλιογραφία εστιάζει σε προβλήματα, στα οποία κάθε επεξεργαστής διαθέτει μία δική του τοπική αντικειμενική συνάρτηση (συνήθως κυρτή αλλά όχι απαραίτητα παραγωγίσμη) [30]-[33].

Συνήθως χαρακτηρίζουμε πλήρως κατανεμημένο έναν αλγόριθμο σε σχέση με το γράφο αναπαράστασης ενός δικτύου κόμβων εφόσον κάθε κόμβος του δικτύου συμμετέχει σε αυτόν χρησιμοποιώντας πληροφορίες αποκλειστικά από τους κόμβους με τους οποίους γειτνιάζει σύμφωνα με το γράφο. Η μεγάλη διαφοροποίηση των πλήρως κατανεμημένων αλγορίθμων σε σχέση με άλλους αποκεντρωμένους αλγόριθμους είναι ο όγκος της πληροφορίας που συγκεντρώνεται και επεξεργάζεται σε κάθε κόμβο του δικτύου, καθώς σε κάποιες περιπτώσεις αποκεντρωμένων αλγορίθμων συγκεντρώνεται κάποιου είδους καθολική πληροφορία σε καθέναν από τους κόμβους και κατά συνέπεια εκτελούνται κεντρικοί υπολογισμοί, απλώς σε τοπικό επίπεδο.

Για τη διατύπωση ενός τυπικού προβλήματος που θα επιλυθεί με τη βοήθεια κατανεμημένων αλγορίθμων, θεωρούμε ένα σύνολο από N πράκτορες λογισμικού (agents), οι οποίοι συνεργάζονται για να επιλύσουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης που περιλαμβάνει το άθροισμα των δικών τους εσωτερικών αντικειμενικών συναρτήσεων ως εξής:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N f_i(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{x} \in \mathbf{X} \subset \mathbb{R}^m \end{aligned} \quad (1.1)$$

Οι συναρτήσεις $f_i(\mathbf{x}) : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ είναι κυρτές συναρτήσεις, οι οποίες είναι γνωστές μόνο σε τοπικό επίπεδο από κάθε κόμβο και δεν κοινοποιούνται προς το δίκτυο.

Υπόθεση 1 Θεωρούμε ότι το σύνολο βέλτιστων λύσεων $\mathbf{X}^* = \arg \min_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} f(\mathbf{x})$ δεν είναι το κενό σύνολο ή αλλιώς ότι υφίσταται βέλτιστη λύση $\mathbf{x}^* \in \mathbb{R}^m$ με $f(\mathbf{x}^*) = \inf_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m} f(\mathbf{x}) =: f^*$. Επιπλέον, το σύνολο των μερικών παραγώγων των επιμέρους αντικειμενικών συναρτήσεων $f_i(\mathbf{x})$ είναι φραγμένο άνω στο πεδίο ορισμού των συναρτήσεων, δηλαδή υπάρχει C_g τέτοιο ώστε $\forall i \in N, \|g\| \leq C_g, \forall g \in \partial f_i(\mathbf{x}), \forall \mathbf{x} \in \mathbf{X}$.

Υπόθεση 2 Θεωρούμε ότι ο γράφος (V, E_∞) είναι συνδεδεμένος, όπου E_∞ αποτελεί το σύνολο των ακμών (i, j) , οι οποίες αντιπροσωπεύουν τα ζεύγη κόμβων που επικοινωνούν αρκούντως πολλές φορές μεταξύ τους, δηλαδή $E_\infty = \{(i, j) \in E_k \text{ για αρκετά } k\}$.

Υπόθεση 3 Θεωρούμε ότι υπάρχει ακέραιος αριθμός $B \geq 1$ τέτοιος ώστε για κάθε $(i, j) \in E_\infty$, ο κόμβος i να στέλνει τις τοπικές του πληροφορίες προς τον γειτονικό κόμβο j το αργότερο κάθε B συνεχόμενα χρονικά διαστήματα, δηλαδή σε χρόνο t_k ή σε χρόνο t_{k+1} ή το αργότερο σε χρόνο $t_{k+B-1} \quad \forall k \geq 0$

Η υπόθεση αυτή είναι ισοδύναμη με την απαίτηση για ύπαρξη $B \geq 1$ τέτοιου ώστε $(i, j) \in E_k \cup E_{k+1} \cup \dots \cup E_{k+B-1} \quad \forall (i, j) \in E_\infty \text{ και } k \geq 0$.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι για κατανεμημένη βελτιστοποίηση, όπως αυτοί έχουν παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια.

1.4.1. Αλγόριθμοι Sub-gradients

1.4.1.1. Ο αλγόριθμος subgradient [30]

Θεωρώντας ότι η συνάρτηση $f: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ είναι κυρτή, ακολουθούμε επαναληπτικά βήματα της παρακάτω μορφής με στόχο την ελαχιστοποίηση της f .

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - \alpha_k \cdot \mathbf{g}^{(k)} \quad (1.2)$$

Όπου $\mathbf{x}^{(k)}$ είναι η επανάληψη k , $\mathbf{g}^{(k)}$ είναι μία μερική παράγωγος της f στο $\mathbf{x}^{(k)}$ και $\alpha_k > 0$ αποτελεί το μέγεθος του βήματος k .

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου οδεύουμε προς την αρνητική κατεύθυνση σε σχέση με τη μερική παράγωγο. Επειδή σε αυτό τον αλγόριθμο δεν πλησιάζουμε κατ' ανάγκη πιο κοντά προς τη βέλτιστη τιμή με κάθε επανάληψη, οφείλουμε να καταγράφουμε σε κάθε βήμα την καλύτερη τιμή ως εξής $f_{best}^{(k)} = \min\{f_{best}^{(k-1)}, f(\mathbf{x}^{(k)})\}$ και να θέτουμε $i_{best}^{(k)} = k$, αν $f(\mathbf{x}^{(k)}) = f_{best}^{(k)}$. Οπότε $f_{best}^{(k)}$ είναι η καλύτερη αποτίμηση της αντικειμενικής συνάρτησης που υπολογίστηκε στις k επαναλήψεις.

Προκειμένου να έχουμε σύγκλιση, το μέγεθος του βήματος μπορεί να ακολουθεί έναν από τους εξής κανόνες:

- Σταθερό βήμα $\alpha_k = h$ ανεξαρτήτως k
- Σταθερά μεταβαλλόμενο βήμα $\alpha_k = \frac{h}{\|\mathbf{g}^{(k)}\|_2}$ με $\|\mathbf{x}^{(k+1)} - \mathbf{x}^{(k)}\|_2 = h$
- Βήμα με πεπερασμένο άθροισμα τετραγώνων της σταθεράς α_k . Συγκεκριμένα

$$\sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k^2 < \infty, \quad \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k = \infty . \text{ Μία τυπική επιλογή αυτού του τύπου αποτελεί το}$$

$$\text{βήμα της μορφής } \alpha_k = \frac{a}{(b+k)} \text{ με } a > 0 \text{ και } b \geq 0 .$$

- Απομειούμενο βήμα μη πεπερασμένου αθροίσματος, δηλαδή

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \alpha_k = 0, \quad \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k = \infty. \quad \text{Ένα ευρέως διαδεδομένο παράδειγμα αποτελεί η}$$

επιλογή του απομειούμενου βήματος της μορφής $\alpha_k = \frac{a}{\sqrt{k}}$ με $a > 0$.

1.4.1.2. Κατανεμημένος αλγόριθμος sub-gradient

Στην περίπτωση του κατανεμημένου αλγορίθμου sub-gradient [31] θεωρούμε ότι κάθε κόμβος διαθέτει γνώση μόνο για μία συνιστώσα της συνάρτησης f και ότι προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει αυτή τη συνιστώσα ανταλλάσσοντας πληροφορίες με τους κόμβους στη γειτονιά του. Συνεπώς όλοι οι κόμβοι μαζί συνεργάζονται ώστε να επιλύσουν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης της μορφής (1.1), όπου κάθε κόμβος i διαθέτει ως τοπική πληροφορία μία εκτίμηση για τη βέλτιστη λύση του συνολικού προβλήματος. Συμβολίζουμε με $x_i^{(k)} \in \mathbb{R}^n$ την τοπική εκτίμηση στον κόμβο i κατά τη χρονική στιγμή t_k . Στον κατανεμημένο αλγόριθμο sub-gradient θεωρείται ότι κάθε κόμβος i ανανεώνει την εκτίμησή του ακολουθώντας μία σχέση της μορφής:

$$x_i^{(k+1)} = \sum_{j=1}^N w_{ij}^{(k)} x_j^{(k)} - \alpha_i^{(k)} \cdot d_i^{(k)} \quad (1.3)$$

όπου το διάνυσμα βαρών $w_{ij}^{(k)} = [w_{i1}^{(k)} \dots w_{iN}^{(k)}]^T$ περιέχει μη μηδενικά στοιχεία στις θέσεις ii και στις θέσεις ij εφόσον οι κόμβοι i και j επικοινωνούν κατά το χρονικό διάστημα (t_k, t_{k+1}) . Οι τιμές των βαρών κυμαίνονται στο διάστημα $(0,1)$. Όλα τα υπόλοιπα βάρη είναι μηδενικά. Επίσης το διάνυσμα $w_{ij}^{(k)}$ είναι στοχαστικό, δηλαδή διαθέτει την ιδιότητα

$$\sum_{j=1}^N w_{ij}^{(k)} = 1 \quad \forall i, \forall k. \quad \text{Ένα παράδειγμα αποδεκτής τιμής βαρών είναι } w_{ij}^{(k)} = \frac{1}{N_i^{(k)} + 1}$$

εφόσον $(i, j) \in E^{(k)}$. Στην εξίσωση ανανέωσης (1.3) όπου $\alpha_i^{(k)} > 0$ είναι το μέγεθος του βήματος που χρησιμοποιεί τοπικά ο κόμβος και $d_i^{(k)}$ είναι μία μερική παράγωγος της τοπικής συνιστώσας της αντικειμενικής συνάρτησης $f_i(x)$ στο σημείο $x = x_i^{(k)}$, όπως εκτιμάται από τον κόμβο i κατά την επανάληψη k . Συχνά θεωρείται ένα σταθερό βήμα α για όλους τους κόμβους και για όλες τις επαναλήψεις. Προφανώς η επιλογή του βήματος α και των βαρών $w_{ij}^{(k)}$ παίζει σημαντικό ρόλο στο ρυθμό σύγκλισης αλλά και στο σφάλμα κατά την προσέγγιση της βέλτιστης λύσης.

1.4.2. Κατανεμημένος αλγόριθμος με βάση το Nesterov gradient

Ο αλγόριθμος αυτός είναι αρκετά όμοιος με τον κοινό sub-gradient με τη διαφοροποίηση ότι λαμβάνει υπόψη του σε μεγαλύτερο βαθμό τη διαφοροποίηση της τοπικής εκτίμησης κάθε κόμβου σε κάθε επανάληψη. Οι κόμβοι ακολουθούν τον κανόνα ανανέωσης [32]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i^{(k+1)} &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \in N_i}}^N \mathbf{w}_{ij}^{(k)} \mathbf{x}_j^{(k)} - \alpha^{(k)} \cdot \nabla f_i(\mathbf{y}_i^{(k)}) \\ \mathbf{y}_i^{(k+1)} &= \mathbf{x}_i^{(k+1)} + \beta^{(k)} \cdot (\mathbf{x}_i^{(k+1)} - \mathbf{x}_i^{(k)}) \end{aligned} \quad (1.4)$$

Ο πίνακας των βαρών θεωρείται σταθερός μεταξύ των επαναλήψεων και ακολουθεί τη λογική των μη μηδενικών στοιχείων για τα ζεύγη κόμβων που έχουν επικοινωνιακή σύνδεση, καθώς και ότι $w_{ii} = 1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N w_{ij}$. Τα μεγέθη βήματος μπορούν να επιλεχθούν ως

εξής: $\alpha^{(k)} = \frac{c}{k+1}$, $c > 0$ $\beta^{(k)} = \frac{k}{k+3}$. Η επιλογή του βήματος ως απομειούμενο εξασφαλίζει τη σύγκλιση στη βέλτιστη τιμή, σε αντίθεση με την κλασική επιλογή ενός σταθερού $\alpha^{(k)} = \alpha$, ενώ η επιλογή της θετικής σταθεράς c μπορεί να γίνει αυθαίρετα.

1.4.3. Αλγόριθμος Dual Averaging

Ακολουθεί περιγραφή μίας παραλλαγής του αλγορίθμου dual averaging [32] για εφαρμογές σε καταμεμημένο περιβάλλον. Έστω ότι σε κάθε επανάληψη κάθε κόμβος διατηρεί ένα ζεύγος τιμών $(\mathbf{x}_i^{(k)}, \mathbf{z}_i^{(k)})$, υπολογίζει ένα στοιχείο της μερικής παραγώγου $\mathbf{g}_i^{(k)} \in \partial f_i(\mathbf{x}_i^{(k)})$ και λαμβάνει από τους κόμβους στη γειτονιά του τις δικές τους εκτιμήσεις για την παράμετρο $\{\mathbf{z}_j^{(k)}, j \in N_i\}$. Στη συνέχεια ο κόμβος i ανανεώνει τη δική του εκτίμηση για τη βέλτιστη λύση σαν έναν κυρτό συνδυασμό όλων των παραμέτρων αυτών. Προκειμένου να αναπαρασταθεί η διαδικασία ανανέωσης θεωρείται και πάλι ένας διπλά στοχαστικός πίνακας βαρών, με μη μηδενικά στοιχεία στις θέσεις που αντιπροσωπεύουν τις επικοινωνιακές συνδέσεις μεταξύ των κόμβων. Κάθε κόμβος λοιπόν ακολουθεί βήματα ανανέωσης της μορφής:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_i^{(k+1)} &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \in N_i}}^N \mathbf{w}_{ij}^{(k)} \mathbf{z}_j^{(k)} - \mathbf{g}_i^{(k)} \\ \mathbf{x}_i^{(k+1)} &= \prod_X^\psi(\mathbf{z}_j^{(k+1)}, \alpha^{(k)}) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Όπου $\{\alpha^{(k)}\}_{k=0}^\infty$ είναι μία ακολουθία θετικών βημάτων (σταθερών ή απομειούμενων) και

$\prod_X^\psi(\mathbf{z}_j^{(k+1)}, \alpha^{(k)})$ μία προβολή για τον προσδιορισμό της ελάχιστης τιμής της f σε κάθε

επανάληψη, ως εξής : $\prod_X^\psi(\mathbf{z}, \alpha) := \arg \min_{\mathbf{x} \in X} \left\{ \mathbf{z} + \frac{1}{\alpha} \cdot \psi(\mathbf{x}) \right\} \alpha^{(k)}$. Η συνάρτηση

προσέγγισης $\psi : X \rightarrow \mathbb{R}$ είναι βασική παράμετρος του αλγορίθμου dual averaging και υποτίθεται ότι είναι κυρτή σύμφωνα με κάποιο μέτρο ως εξής:

$\psi(\mathbf{y}) \geq \psi(\mathbf{x}) + (\mathbf{y} - \mathbf{x}) + \frac{1}{2} \cdot \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2$, $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in X$. Παραδείγματα επιλογών για τη

συνάρτηση αυτή αποτελούν η ορθογωνική συνάρτηση της μορφής $\psi(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \cdot \|\mathbf{x}\|_2^2$ και η

συνάρτηση εντροπίας της μορφής $\psi(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^N x_j \cdot \log x_j - x_j$. Μία συνηθισμένη επιλογή

για την ακολουθία $\alpha^{(k)}$ είναι αυτή να εξελίσσεται αναλόγως του $\frac{1}{\sqrt{k}}$.

1.4.4. Αλγόριθμος ADMM

Ο αλγόριθμος ADMM [33] αποτελεί ουσιαστικά συνδυασμό των μεθόδων αποσύνθεσης και πολλαπλασιαστών. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς που επιλύει είναι της μορφής:

$$\begin{aligned} \min \quad & \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{z}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{z} = \mathbf{c} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Οι συναρτήσεις \mathbf{f} και \mathbf{g} είναι κυρτές και η μοναδική διαφοροποίηση σε σχέση με την κλασική διατύπωση του προβλήματος που έχουμε δώσει έως τώρα είναι ότι το πεδίο ορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης χωρίζεται σε δύο τμήματα, έστω \mathbf{x} και \mathbf{z} , ενόσω η αντικειμενική συνάρτηση παραμένει διαχωρίσιμη και στα δύο επιμέρους τμήματα.

Προφανώς η βέλτιστη λύση στο συνολικό πρόβλημα ορίζεται ως $\mathbf{p}^* = \inf\{\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{z}) \mid \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{z} = \mathbf{c}\}$. Σχηματίζεται η επαυξημένη συνάρτηση Lagrange

$$L_\rho(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \lambda) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{z}) + \lambda^T (\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{z} - \mathbf{c}) + (\rho / 2) \|\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{z} - \mathbf{c}\|_2^2.$$

Οι ανανεώσεις του αλγορίθμου ADMM πραγματοποιούνται μέσω των εξής σχέσεων:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \arg \min_{\mathbf{x}} L_\rho(\mathbf{x}, \mathbf{z}^{(k)}, \lambda^{(k)}) \quad (1.7)$$

$$\mathbf{z}^{(k+1)} = \arg \min_{\mathbf{z}} L_\rho(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{z}, \lambda^{(k)}) \quad (1.8)$$

$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \rho \cdot (\mathbf{A}\mathbf{x}^{(k+1)} + \mathbf{B}\mathbf{z}^{(k+1)} - \mathbf{c}) \quad (1.9)$$

Όπου $\rho > 0$, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο πιο μεγάλη η ακρίβεια κατά τη σύγκλιση. Ουσιαστικά ο διαχωρισμός του πεδίου ορισμού επιτρέπει το διαχωρισμό της ελαχιστοποίησης κατά \mathbf{x} και κατά \mathbf{z} με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η αποσύνθεση του δυϊκού προβλήματος εφόσον οι συναρτήσεις \mathbf{f} και \mathbf{g} είναι διαχωρίσιμες. Οι μεταβλητές \mathbf{x} και \mathbf{z} ανανεώνονται εναλλάξ ή σε αλληλουχία, εξ' ου και το όνομα του αλγορίθμου. Κάθε επανάληψη του αλγορίθμου χαρακτηρίζεται μόνο από τις τιμές των $\mathbf{z}^{(k)}$ και $\lambda^{(k)}$ με την έννοια ότι οι μεταβλητές $(\mathbf{z}^{(k+1)}, \lambda^{(k+1)})$ είναι συνάρτηση μόνο των $(\mathbf{z}^{(k)}, \lambda^{(k)})$, ενώ η τιμή $\mathbf{x}^{(k)}$ αποτελεί μόνο ενδιάμεσο αποτέλεσμα που προκύπτει από την προηγούμενη επανάληψη με βάση τα $(\mathbf{z}^{(k-1)}, \lambda^{(k-1)})$.

Για τη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης (1.1) είναι δυνατό να εξαχθούν τις αποκεντρωμένες λύσεις μέσω του ADMM ως εξής. Το πρόβλημα (1.1) γράφεται κατά την έννοια του ADMM

$$\begin{aligned} \min \quad & \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{z}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{x} - \mathbf{z} = 0 \end{aligned} \quad (1.10)$$

Όπου \mathbf{g} πρόκειται για ενδεικτική συνάρτηση των περιορισμών \mathbf{X} , τέτοια ώστε

$$\mathbf{g}(\mathbf{z}) = \begin{cases} 0, & \text{if } \mathbf{z} \in \mathbf{X} \\ \infty, & \text{if } \mathbf{z} \notin \mathbf{X} \end{cases} \quad (1.11)$$

Η επαυξημένη συνάρτηση Lagrange είναι

$$\mathbf{L}_\rho(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \lambda) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{z}) + \lambda^T(\mathbf{x} - \mathbf{z}) + (\rho / 2) \|\mathbf{x} - \mathbf{z}\|_2^2 \quad (1.12)$$

Και επομένως τα βήματα ανανέωσης έχουν τη μορφή

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \arg \min_x \mathbf{L}_\rho(\mathbf{x}, \mathbf{z}^{(k)}, \lambda^{(k)}) \quad (1.13)$$

$$\mathbf{z}^{(k+1)} = \arg \min_z \mathbf{L}_\rho(\mathbf{x}^{(k+1)}, \mathbf{z}, \lambda^{(k)}) = \pi_C(\mathbf{x}^{(k+1)} + \lambda^{(k)} / \rho) \quad (1.14)$$

$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \rho \cdot (\mathbf{x}^{(k+1)} - \mathbf{z}^{(k+1)}) \quad (1.15)$$

Όπου π_C είναι η ευκλείδεια προβολή της καθολικής μεταβλητής \mathbf{z} επί του συνόλου των περιορισμών \mathbf{X}

Οι ανανεώσεις των \mathbf{x} και λ μπορούν να πραγματοποιηθούν αποκλειστικά σε τοπικό επίπεδο εντός κάθε κόμβου, ενώ η ανανέωση του \mathbf{z} απαιτεί γνώση όλης της πληροφορίας των κόμβων και ενώ πραγματοποιείται τοπικά, αποτελεί έναν υπολογισμό κεντρικού τύπου. Ουσιαστικά πρόκειται για κάτι σαν το μέσο όρο της τρέχουσας εκτίμησης όλων των κόμβων σχετικά με τη βέλτιστη λύση. Στη συνέχεια δίνονται δύο ειδικές περιπτώσεις, στις οποίες ο αλγόριθμος μπορεί να γίνει καταναμημένος.

Καταρχήν θεωρούμε ότι το πρόβλημα είναι διαχωρίσιμο ως προς τις μεταβλητές x_i , αλλά ταυτόχρονα εισάγουμε την κοινή μεταβλητή z , έτσι ώστε όλοι οι κόμβοι να συνεργαστούν ώστε να ελαχιστοποιήσουν την αθροιστική αντικειμενική συνάρτηση συμφωνώντας ταυτόχρονα για την κοινή μεταβλητή.

Έστω ότι οι κόμβοι συνεργάζονται για να επιλύσουν το πρόβλημα της ανταλλαγής πόρων μεταξύ τους (resource allocation)

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^N f_i(\mathbf{x}_i) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_i = 0 \end{aligned} \quad (1.16)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω πρόκειται για ένα πρόβλημα όπου η ενδεικτική συνάρτηση \mathbf{g} δείχνει προς το σύνολο $\{0\}$.

Τα βήματα ανανέωσης είναι τα ακόλουθα

$$\mathbf{x}_i^{(k+1)} = \arg \min_x (f_i(\mathbf{x}_i) + \lambda^{(k)T} \mathbf{x}_i + (\rho / 2) \|\mathbf{x}_i - (\mathbf{x}_i^{(k)} - \bar{\mathbf{x}}^{(k)})\|_2^2) \quad (1.17)$$

$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \rho \cdot \bar{\mathbf{x}}^{(k+1)} \quad (1.18)$$

Η ανανέωση της μεταβλητής \mathbf{x} περιέχει έναν όρο ποινής ανάλογο της διαφοράς από την προηγούμενη εκτίμηση της μεταβλητής \mathbf{x} και μπορεί να γίνει αποκεντρωμένα. Η ανανέωση

της βοηθητικής μεταβλητής λ απαιτεί τον υπολογισμό του μέσου όρου των τιμών x_i^{k+1} και έπειτα τη μετάδοση των λ^{k+1} προς όλους τους κόμβους.

Η δεύτερη περίπτωση είναι το πρόβλημα της συμφωνίας (consensus)

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^N f_i(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{x}_i - \mathbf{z} = 0 \end{aligned} \quad (1.19)$$

Η επαυξημένη συνάρτηση Lagrange προκύπτει ως

$$L_\rho(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N, \mathbf{z}, \lambda) = \sum_{i=1}^N (f_i(\mathbf{x}) + \lambda_i^T (\mathbf{x}_i - \mathbf{z})) + (\rho / 2) \|\mathbf{x}_i - \mathbf{z}\|_2^2 \quad (1.20)$$

Με το σύνολο περιορισμών να είναι το $\mathbf{X} = \{(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N) \mid \mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_2 = \dots = \mathbf{x}_N\}$

Τα βήματα ανανέωσης προκύπτουν ως εξής

$$\mathbf{x}_i^{(k+1)} = \arg \min_{\mathbf{x}} (f_i(\mathbf{x}) + \lambda_i^{(k)T} (\mathbf{x}_i - \mathbf{z}^{(k)}) + (\rho / 2) \|\mathbf{x}_i - \mathbf{z}^{(k)}\|_2^2) \quad (1.21)$$

$$\mathbf{z}^{(k+1)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_i^{(k+1)} + \frac{\lambda_i^{(k)}}{\rho}) \quad (1.22)$$

$$\lambda_i^{(k+1)} = \lambda_i^{(k)} + \rho \cdot (\mathbf{x}_i^{(k+1)} - \mathbf{z}^{(k+1)}) \quad (1.23)$$

Αντικαθιστώντας

$$\mathbf{x}_i^{(k+1)} = \arg \min_{\mathbf{x}} (f_i(\mathbf{x}) + \lambda_i^{(k)T} (\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}^{(k)}) + (\rho / 2) \|\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}^{(k)}\|_2^2)$$

λαμβάνουμε

$$\lambda_i^{(k+1)} = \lambda_i^{(k)} + \rho \cdot (\mathbf{x}_i^{(k+1)} - \bar{\mathbf{x}}^{(k+1)})$$

$$\mathbf{z}^{(k+1)} = \bar{\mathbf{x}}^{(k+1)} + \frac{\bar{\lambda}^{(k)}}{\rho} \text{ και } \bar{\lambda}^{(k+1)} = \bar{\lambda}^{(k)} + \rho(\bar{\mathbf{x}}^{(k+1)} - \mathbf{z}^{(k+1)})$$

1.5. Συμπεράσματα από την ανάλυση των αλγορίθμων

Συμπερασματικά, από την εφαρμογή των αλγορίθμων της ενότητας 1.4 παρατηρήθηκαν τα εξής σε σχέση με τους προτεινόμενους στην παρούσα διατριβή Αλγόριθμους Ομοτίμων Κόμβων:

- Οι αλγόριθμοι τύπου sub-gradient απαιτούν μικρότερο πλήθος επαναλήψεων, χωρίς ωστόσο να συγκλίνουν στη βέλτιστη λύση. Για την ακρίβεια ο αλγόριθμος τερματίζεται χωρίς να έχουμε εγγύηση για τη σύγκλιση, απλώς και μόνο επειδή δε βελτιώνεται πλέον ή βελτιώνεται ελάχιστα η αποτίμηση της αντικειμενικής συνάρτησης.
- Ο αλγόριθμος τύπου dual averaging απαιτεί επίσης σημαντικά μικρότερο πλήθος επαναλήψεων, αλλά απαιτεί τον υπολογισμό του ορίσματος που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση προβολής Π , κάτι το οποίο θα επέβαλε στους κόμβους έναν αρκετά πιο περίπλοκο υπολογισμό κατά τη διάρκεια κάθε βήματος ανανέωσης. Επίσης ο αλγόριθμος δεν είναι απαραίτητο ότι συγκλίνει προς τη βέλτιστη τιμή, αλλά την προσεγγίζει πολύ καλύτερα σε σχέση με τον sub-gradient

• Ο αλγόριθμος ADMM απαιτεί εσωτερικούς και εξωτερικούς κύκλους επαναλήψεων, καθώς ο υπολογισμός της δυικής μεταβλητής $\lambda^{(k)}$ αποτελεί πληροφορία η οποία απαιτεί κεντρικό συντονισμό και κατά συνέπεια ο αλγόριθμος αυτός δεν είναι πλήρως κατανεμημένος. Ωστόσο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον προτεινόμενο στο Κεφάλαιο 4 Αλγόριθμο 2 ως μία κατανεμημένη λύση για τον

υπολογισμό του μέσου όρου $\frac{\sum_{i=1}^n P_i^{(k+1)}}{n}$, ο οποίος και αποτελεί την πληροφορία που

πρέπει να έχουν υπόψη τους όλοι οι κόμβοι πριν μεταβούν στην ανανέωση της επόμενης επανάληψης. Μετά από αυτή την παρέμβαση ο ADMM απαιτεί το ίδιο περίπου πλήθος επαναλήψεων σε σχέση με τον προτεινόμενο αλγόριθμο κι επιπλέον, όπως και ο αλγόριθμος Dual Averaging, απαιτεί τον υπολογισμό του ορίσματος P_i έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η συνάρτηση Lagrange. Η προσέγγιση της βέλτιστης λύσης γίνεται με μεγάλη ακρίβεια.

Επισημαίνεται ότι σε κάθε περίπτωση οι αλγόριθμοι αυτοί απαιτούν μία αρχικοποίηση με μία εφικτή λύση, έτσι ώστε στη συνέχεια να προσεγγιστεί η βέλτιστη λύση μεταβάλλοντας αυτή την αρχική κατανομή των πόρων, σε αντίθεση με τους προτεινόμενος αλγόριθμος στην παρούσα διατριβή, όπου οι κόμβοι συμμετέχουν στα αποκεντρωμένα σχήματα διαχείρισης με μόνη γνώση την πραγματική αρχική τους τιμή για τις μεταβλητές ελέγχου.

Επιπλέον, θα πρέπει να αναφέρουμε την αδυναμία κάποιων από τους αλγόριθμους να χειριστούν την τυπική κατάστρωση των προβλημάτων διαχείρισης, καθώς δεν είναι σε θέση να λάβουν υπόψη τους λειτουργικούς περιορισμούς των δικτύων.

Τέλος, σημειώνεται ότι από τη βιβλιογραφική επισκόπηση των κεντρικών και αποκεντρωμένων τεχνικών βελτιστοποίησης στα δίκτυα διανομής, αλλά και την ανασκόπηση των διαφόρων αλγορίθμων κατανεμημένης βελτιστοποίησης γενικότερα, είναι φανερό ότι υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για εφαρμογές ελέγχου σε τοπικό επίπεδο λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών λειτουργίας των δικτύων διανομής, χωρίς ωστόσο να έχει προσεγγιστεί το θέμα ως αυτούσιο πρόβλημα αμιγώς κατανεμημένης βελτιστοποίησης.

1.6. Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαφαινόμενη αλλαγή στον τρόπο λειτουργίας και στο γενικότερο πλαίσιο διαχείρισης των δικτύων διανομής, λόγω της εισαγωγής νέων παικτών σε αυτά αλλά και λόγω της εφαρμογής των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών. Ιδιαίτερη αναφορά πραγματοποιείται στους έξυπνους μετρητές ως δομικό στοιχείο προς τη διαφαινόμενη μετάβαση από τα ενεργά στα ευφυή δίκτυα. Στη συνέχεια, συγκρίνονται οι κεντρικές και οι αποκεντρωμένες τεχνικές βελτιστοποίησης με εκτενή βιβλιογραφική αναφορά στους αλγορίθμους και τις εφαρμογές που βρίσκονται αυτή τη στιγμή στο επίκεντρο του ερευνητικού ενδιαφέροντος και αναλύονται ρυθμιστικά-θεσμικά ζητήματα, καθώς επίσης και τεχνικές προκλήσεις προς την κατεύθυνση της μεταβολής του τρόπου λειτουργίας και ελέγχου των δικτύων διανομής, σε επίπεδο κόμβου. Τέλος παρατίθεται μία επισκόπηση τεσσάρων αλγορίθμων κατανεμημένης βελτιστοποίησης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές. Ακολουθεί μία συμπερασματική ανάλυση των αλγορίθμων αυτών σε σχέση με τους

προτεινόμενους Αλγορίθμους Ομότιμων Κόμβων, οι οποίοι αποτελούν τη βασική συμβολή της διατριβής, από την οποία καταδεικνύεται η πρωτοτυπία της συμβολής της διατριβής όσον αφορά την πρόταση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων και την εφαρμογή τους για την πλήρως αποκεντρωμένη διαχείριση συμφορήσεων στα δίκτυα διανομής.

1.7. Αντικείμενο και δομή της διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται τον αποκεντρωμένο έλεγχο με στόχο τη διαχείριση διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων, οι οποίοι συνδέονται στα δίκτυα διανομής, για παροχή επικουρικών υπηρεσιών. Η βασική συνεισφορά της διατριβής αφορά την πλήρως αποκεντρωμένη αντιμετώπιση των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου διανομής μέσω της ανάπτυξης και εφαρμογής Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων.

Στη συνέχεια ακολουθεί ανάλυση της δομής της διδακτορικής διατριβής:

Το δεύτερο κεφάλαιο της διατριβής εισάγει τη θεωρία ομότιμων κόμβων με ιδιαίτερη αναφορά στον υπερκείμενο γράφο μετάδοσης των πληροφοριών, ο οποίος μπορεί να ταυτίζεται με το γράφο αναπαράστασης του δικτύου διανομής. Παρουσιάζονται χρήσιμες ιδιότητες από τη φασματική θεωρία γράφων και το μαθηματικό υπόβαθρο που σχετίζεται με τη διάδοση πληροφοριών σε γράφους και δέντρα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μία εκτενής βιβλιογραφική αναφορά στη θεωρία Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, στις ιδιότητές τους και στη γενική διατύπωσή τους, όσον αφορά την επιλογή ομότιμων κόμβων για ανταλλαγή πληροφοριών αλλά και όσον αφορά την τοπική επεξεργασία των πληροφοριών. Η συνεισφορά της διατριβής στο κεφάλαιο αυτό αφορά την ανάπτυξη αλγορίθμου για την επιλογή κατάλληλων βαρών, ώστε να εξασφαλίζεται και να επιταχύνεται η σύγκλιση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων. Ο αλγόριθμος επιλογής βαρών έχει υλοποιηθεί σε περιβάλλον Matlab και εφαρμόζεται κατά τη φάση ανάλυσης της τοπολογίας των εξεταζόμενων δικτύων, πριν την εφαρμογή των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων για διαχείριση. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται αποτελέσματα από την επιτάχυνση του ρυθμού σύγκλισης μέσω προσομοιώσεων, καθώς επίσης και μία συγκριτική αναφορά σε αποτελέσματα των στοχαστικών Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων.

Στο τρίτο κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάζεται το πρόβλημα ροής φορτίου στη γενική διατύπωσή του και στη συνέχεια αναλύεται και προσαρμόζεται ώστε να μπορεί να επιλυθεί σε μεγάλο βαθμό μέσω Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων. Η συμβολή της διατριβής στο κεφάλαιο αυτό σχετίζεται με την ανάπτυξη Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων για τον υπολογισμό της συνολικής ζήτησης και των τάσεων σε κάθε κόμβο του δικτύου διανομής. Επιπροσθέτως, υπολογίζονται τοπικά σε κάθε κόμβο, τα ρεύματα και οι απώλειες στους κλάδους, οι οποίοι τον συνδέουν με άλλους κόμβους. Τέλος, παρατίθενται εκτενή αποτελέσματα μέσω προσομοιώσεων των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων σε πειραματικά δίκτυα. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων συγκρίνεται με τα αποτελέσματα κεντρικής επίλυσης του προβλήματος ροής φορτίου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο προτείνονται και αναπτύσσονται αλγόριθμοι ομότιμων κόμβων για κατανομημένη διαχείριση συμφορήσεων σε δίκτυα διανομής. Μετά την παρουσίαση της βασικής διατύπωσης του προβλήματος ροής φορτίου, αναλύεται η διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου με στόχο τη διαχείριση των ροών σε δίκτυα διανομής. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις συναρτήσεις χρησιμότητας των ευέλικτων

ενεργειακών πόρων, οι οποίες αντικαθιστούν τις συναρτήσεις κόστους των μονάδων παραγωγής της βασικής διατύπωσης του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου. Η βασική συμβολή της διατριβής στο κεφάλαιο αυτό είναι η ανάπτυξη αλγορίθμου ομότιμων κόμβων για τη διαχείριση των συμφορήσεων σε δίκτυα διανομής, θεωρώντας ότι το πρόβλημα διαχείρισης ως ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου και αναδιανομής πόρων. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος επεκτείνεται για να λάβει υπόψη τις απώλειες στους κλάδους του δικτύου, καθώς επίσης και για να αντιμετωπίσει ένα πιθανό επιπρόσθετο πρόβλημα συμφόρησης σε επίπεδο κλάδου.

Το πέμπτο κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάζει περαιτέρω διερεύνηση εφαρμογών αποκεντρωμένου ελέγχου για δίκτυα διανομής, καθώς επίσης και μία τηλεπικοινωνιακή αποτίμηση του χρόνου σύγκλισης των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων για τις εν λόγω εφαρμογές. Σε πρώτη φάση προτείνεται η ιεραρχική διατύπωση του αλγορίθμου ομότιμων κόμβων του Κεφαλαίου 4, έτσι ώστε να μπορεί να επιταχυνθεί η εφαρμογή του σε περιπτώσεις διαχείρισης δικτύων μέσης και χαμηλής τάσης ταυτόχρονα. Στη συνέχεια προτείνεται η επέκταση του αλγορίθμου του Κεφαλαίου 4, έτσι ώστε να υποστηριχθεί η κατανεμημένη επίλυση του προβλήματος εξισορρόπησης ζήτησης-παραγωγής σε δίκτυα διανομής, μέσω διαχείρισης των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας. Τέλος, παρουσιάζεται μία παραμετρική αποτίμηση του χρόνου σύγκλισης για όλες τις εφαρμογές κατανεμημένης διαχείρισης που προτείνονται στην διατριβή, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά των επιμέρους τεχνολογιών επικοινωνιών, με έμφαση στο PLC.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βασική θεωρία των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων και στη συνέχεια με βάση τη μεθοδολογία σχεδιασμού, αναπτύσσεται ένα σύνολο από κλάσεις, οι οποίες ενσωματώνουν τους προτεινόμενους αλγορίθμους ομότιμων κόμβων για εφαρμογές διαχείρισης συμφορήσεων. Η υλοποίηση του συστήματος πολλαπλών πρακτόρων πραγματοποιείται σε περιβάλλον JADE. Οι κλάσεις που δημιουργήθηκαν ενσωματώνονται σε μία πειραματική εφαρμογή μικρής κλίμακας, αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στο τέλος του κεφαλαίου.

Στο έβδομο κεφάλαιο έπειτα από μία ανασκόπηση των προτύπων που σχετίζονται με την κωδικοποίηση, την επεξεργασία και τη μετάδοση πληροφοριών από τους ηλεκτρονικούς μετρητές, παρουσιάζεται μία σειρά από παραδοχές και προτάσεις σχετικά με τη δυνατότητα ενσωμάτωσης των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων σε αυτούς. Συγκεκριμένα προτείνεται η χρήση των υπολογιστικών μεθόδων, των καταχωρητών και των διεργασιών αποθήκευσης και ανάκλησης πληροφοριών που διαθέτουν οι μετρητές, έτσι ώστε να πραγματοποιούνται οι βασικές διεργασίες των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρατίθενται τα κύρια συμπεράσματα της διατριβής, επισημαίνονται τα σημεία πρωτοτυπίας και παρατίθενται αντικείμενα μελλοντικής διερεύνησης και προεκτάσεων.

Τέλος, στα παραρτήματα δίνονται συγκεντρωτικά τα κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων δικτύων, καθώς και διάφορες τιμές παραμέτρων.

2

Περί ομότιμων κόμβων

2.1. Μοντέλο δικτύου

Τα ηλεκτρικά δίκτυα αναπαρίστανται για λόγους προσομοιώσεων με γράφους $G = (V, E)$, όπου V είναι το σύνολο των κόμβων και E το σύνολο των ακμών. Ως κόμβος στο ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί οποιοσδήποτε ζυγός, οποιοδήποτε σημείο διακλάδωσης και σημείο σύνδεσης τελικού καταναλωτή/παραγωγού. Οι ακμές του γράφου αντιστοιχούν με τις γραμμές μεταφοράς και διανομής με βάση την ίδια την τοπολογία του δικτύου. Ακολουθώντας την ακτινική τοπολογία των δικτύων διανομής, μπορούμε να τα αναπαραστήσουμε μέσω γράφων τα οποία είναι δέντρα. Ουσιαστικά θεωρούμε ένα αραιό δίκτυο N κόμβων (αισθητήρες, πράκτορες, στοιχεία του δικτύου), οι οποίοι είναι ηλεκτρολογικά συνδεδεμένοι μεταξύ τους μέσω των $N - 1$ ακμών, λόγω της ακτινικής τοπολογίας του δικτύου διανομής. Ο γράφος είναι συνδεδεμένος, μη κατευθυντικός και απλός, δηλαδή δεν υπάρχει κόμβος χωρίς σύνδεση, ενώ ταυτόχρονα δεν υπάρχουν διπλές ακμές μεταξύ κόμβων, ούτε και μία μόνο επιτρεπτή κατεύθυνση ροής από κόμβο σε κόμβο. Μοντελοποιούμε το δίκτυο διανομής ως ένα δέντρο θεωρώντας ως κόμβο με δείκτη 0 (τη ρίζα του δέντρου) τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ που τροφοδοτεί το εν λόγω δέντρο. Από εκεί και μετά οι κόμβοι αριθμούνται συνεχόμενα προς τα φύλλα του δέντρου. Κάθε κόμβος i χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα τάσης V_i και μία έγχυση/απορρόφηση ισχύος $S_i = P_i + j \cdot Q_i$. Μεταξύ δύο κόμβων i και j εφόσον υφίσταται ηλεκτρική σύνδεση υπάρχει μία ακμή στο γράφο αναπαράστασης του δικτύου με σύνθετη αντίσταση $z_{ij} = r_{ij} + j \cdot x_{ij}$.

Ο γράφος του δικτύου αναπαρίσταται επίσης μέσω του πίνακα γειτνίασης A , ο οποίος έχει διαστάσεις $N \times N$ και αποτελείται από 1 στις θέσεις ij , εφόσον υπάρχει σύνδεση μεταξύ των κόμβων i και j . Στις υπόλοιπες θέσεις περιέχει μηδενικά.

2.2. Γράφος μεταφοράς πληροφορίας

Οι κόμβοι του δικτύου διανομής είναι πλέον εξοπλισμένοι με κάποιου είδους υπολογιστική ικανότητα και δυνατότητα αποστολής και λήψης δεδομένων όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή. Οι τηλεπικοινωνιακές συνδέσεις μεταξύ των κόμβων που διαθέτουν αυτή τη δυνατότητα αναπαρίστανται επίσης μέσω γράφων. Θεωρούμε την ίδια αρίθμηση κόμβων με την αρίθμηση που θεωρήσαμε στο γράφο αναπαράστασης του

δικτύου διανομής. Η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση εξαρτάται από το είδος της τεχνολογίας τηλεπικοινωνιών που έχει επιλεγεί σε κάθε περιοχή του δικτύου διανομής.

Στην παρούσα διατριβή, η βασική θεώρηση τηλεπικοινωνιακής υποδομής αναφέρεται σε τεχνολογίες εντός του δικτύου διανομής και συγκεκριμένα στην τεχνολογία Power Line Communication (PLC). Σε αυτή την τεχνολογία η μετάδοση της πληροφορίας πραγματοποιείται μέσω του ίδιου φυσικού μέσου που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος, δηλαδή μέσω των αγωγών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, θεωρούμε ότι το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο ταυτίζεται τοπολογικά με το δίκτυο διανομής και κατ' επέκταση ισχύει ο ίδιος πίνακας γειτνίασης A . Επιπλέον του πίνακα γειτνίασης θεωρούμε και έναν πίνακα βαρών W , οποίος είναι ίδιων διαστάσεων με τον πίνακα γειτνίασης και περιέχει μηδενικά στις ίδιες θέσεις με τον πίνακα A . Στις υπόλοιπες θέσεις μπορούμε να θεωρήσουμε ότι περιέχει μη μηδενικά στοιχεία ακολουθώντας τις ιδιότητες που περιγράφονται στη συνέχεια. Ο πίνακας βαρών W απεικονίζει την επικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ των κόμβων. Συγκεκριμένα θεωρούμε έναν πίνακα W διαστάσεων $N \times N$, τέτοιο ώστε $W_{ij} \neq 0$ εφόσον $(i, j) \in E$ και επιπλέον για τα διαγώνια στοιχεία ισχύει η ιδιότητα $W_{ii} = 1 - \sum_{i \neq j} W_{ij}$ [34].

2.3. Φασματική θεωρία γράφων

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται κάποιοι όροι και ορισμοί, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την ανάλυση του γράφου αναπαράστασης των δικτύων. Το φάσμα ενός πεπερασμένου γράφου G είναι εξ ορισμού το φάσμα της μήτρας πρόσπτωσης A , και αποτελείται από τις ιδιοτιμές με την αντίστοιχη πολλαπλότητα.

Υποθέτοντας ότι ο γράφος είναι μη κατευθυντικός και διαθέτει N κόμβους, τότε η μήτρα A είναι πραγματική και συμμετρική. Κατά συνέπεια όλες οι ιδιοτιμές είναι πραγματικές. Επιπλέον για κάθε ιδιοτιμή, η αλγεβρική της πολλαπλότητα συμπίπτει με τη γεωμετρική και συνεπώς μπορούμε να μιλάμε απλώς για πολλαπλότητα. Εφόσον ο πίνακας A έχει μηδενικά στοιχεία στη διαγώνιο, το ίχνος του είναι μηδενικό. Επίσης το άθροισμα των ιδιοτιμών είναι μηδέν. Κατ' αντιστοιχία ο πίνακας Laplace είναι πραγματικός και συμμετρικός, δηλαδή και το φάσμα του είναι πραγματικό. Συγκεκριμένα έχουμε ότι ο πίνακας L είναι θετικά ημισορισμένος και ιδιόμορφος (singular). Έστω $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ οι ιδιοτιμές του L , τότε έχουμε $0 \geq \lambda_1 > \dots > \lambda_n$ και το άθροισμα τους είναι όσο το ίχνος του L και διπλάσιο από το πλήθος των ακμών του γράφου G .

Η μεγαλύτερη ιδιοτιμή του γράφου είναι επίσης γνωστή με το όνομα φασματική ακτίνα ή φασματικό περιεχόμενο του γράφου. Το θεώρημα Perron-Frobenius καλύπτει το μεγαλύτερο εύρος των ιδιοτήτων της φασματικής ακτίνας. Επίσης υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία για τη δεύτερη μεγαλύτερη ιδιοτιμή ενός κανονικού γράφου. Εάν η απόσταση μεταξύ της μεγαλύτερης και της δεύτερης μεγαλύτερης ιδιοτιμής είναι μεγάλη, τότε ο γράφος παρουσιάζει σημαντικές ιδιότητες σχετικές με την επεκτασιμότητα και την τυχαιότητα [35].

2.4. Θεωρία Αλγόριθμων Ομότιμων Κόμβων

2.4.1. Ορισμός και κατηγοριοποίηση

Οι Αλγόριθμοι Ομότιμων Κόμβων (Gossip Algorithms) περιγράφηκαν για πρώτη φορά το 1987 υπό τον όρο επιδημιολογικοί αλγόριθμοι, ως ένα εργαλείο για γρήγορη ανανέωση στοιχείων μεταξύ αντιγράφων βάσεων δεδομένων. Η βασική ιδέα των Αλγορίθμων

Ομότιμων Κόμβων είναι η διάδοση πληροφοριών και δεδομένων μεταξύ των μελών μίας ομάδας κόμβων, ακριβώς όπως μία φήμη (κοινωνικό σχόλιο) μεταδίδεται σε ένα κοινωνικό δίκτυο ή όπως ένας ιός μολύνει μία ομάδα ανθρώπων [36]. Οι Αλγόριθμοι Ομότιμων Κόμβων έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολυποίκιλες εφαρμογές διαφόρων τομέων όπως για παράδειγμα στη δρομολόγηση σε δίκτυα ad-hoc, στην ομαδοποίηση (aggregation) δεδομένων, στη δειγματοληψία. Οι αλγόριθμοι αυτοί ενδέχεται να μην παρέχουν τη βέλτιστη λύση σε όλα τα είδη προβλημάτων, ωστόσο είναι δεδομένο ότι προσφέρουν στα διεσπαρμένα από τη φύση τους συστήματα ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την αποκεντρωμένη επίλυση προβλημάτων και λήψη αποφάσεων. Στα ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, υποψήφια συσκευή για συμμετοχή σε Αλγόριθμους Ομότιμων Κόμβων αποτελεί οποιοδήποτε στοιχείο του δικτύου, το οποίο διαθέτει κάποιο δεδομένο μέτρησης, καθώς και τη δυνατότητα επικοινωνίας με άλλα στοιχεία του δικτύου.

Η κλασική διατύπωση ενός Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων αποτελείται από μία αλληλουχία βημάτων, τα οποία εκτελούνται περιοδικά από όλους τους ομότιμους κόμβους και αποτελούν ένα γύρο (ή μία ανακύκλωση) του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων. Ο στόχος της όλης διαδικασίας είναι η διάδοση νέων πληροφοριών με έναν ταχύ ρυθμό (για παράδειγμα με εκθετικό ρυθμό στο στοχαστικό Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων). Μία τυπική διαμόρφωση των βημάτων ενός γύρου είναι η ακόλουθη:

- Επιλογή ομότιμου κόμβου (peer) για επικοινωνία
- Επιλογή δεδομένων προς μετάδοση
- Επεξεργασία των δεδομένων προς αποστολή μέσω μίας στρατηγικής ανανέωσης και τοπικών υπολογισμών

Καθένα από τα παραπάνω βήματα περιλαμβάνει μία συγκεκριμένη διαδικασία απόφασης ή υπολογισμών, η οποία ενδέχεται να είναι ντετερμινιστική ή στοχαστική. Ειδικά το βήμα της επιλογής ομότιμου κόμβου βασίζεται είτε σε πιθανοτικά μοντέλα ή σε μία προκαθορισμένη συνάρτηση μέτρου, όπως για παράδειγμα η απόσταση. Σε κάθε περίπτωση ο κόμβος που ξεκινά τη μετάδοση της πληροφορίας γνωρίζει τους γειτνιάζοντες ομότιμους κόμβους, οι οποίοι βρίσκονται εντός της τηλεπικοινωνιακής του εμβέλειας. Η επιλογή των υποψήφιων κόμβων μπορεί να βασίζεται σε κάποιο είδος λίστας προτεραιότητας μεταξύ του συνόλου των γειτνιαζόντων κόμβων ή εναλλακτικά ο κόμβος που ξεκινά τη μετάδοση ενδέχεται να διαθέτει ένα σύστημα τυχαίας επιλογής μέσω συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας μεταξύ των υποψήφιων κόμβων εντός της εμβέλειάς του. Η κατηγοριοποίηση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων με βάση τον τρόπο επιλογής κόμβων για μετάδοση της πληροφορίας παρουσιάζεται στη συνέχεια, αφού πρώτα αναλυθούν και τα υπόλοιπα δύο βήματα.

Κατά το δεύτερο στάδιο του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων έχουμε την απόφαση για το είδος των δεδομένων που πρόκειται να αποσταλούν. Στην πραγματικότητα το περιεχόμενο του μηνύματος καθορίζεται από τον τελικό σκοπό του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων, δηλαδή εφόσον επιθυμούμε την ομαδοποίηση (aggregation), τότε η πληροφορία που μεταδίδεται είναι ο μέσος όρος. Από την άλλη εάν ο στόχος του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων είναι ο έλεγχος ενός συγκεκριμένου μεγέθους, τότε το μήνυμα θα περιέχει τις μετρούμενες τιμές του μεγέθους αυτού. Το τρίτο βήμα της επεξεργασίας δεδομένων περιλαμβάνει ένα σύνολο ελέγχων και τοπικών υπολογισμών (σε επίπεδο κόμβου) και είναι εμφανώς συνδεδεμένο με το δεύτερο, καθώς σχετίζονται και τα δύο αυτά στάδια με τον

απώτερο στόχο του αλγορίθμου. Η κατηγοριοποίηση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων με βάση το στόχο και τις υπολογιστικές διεργασίες παρουσιάζεται επίσης στη συνέχεια.

Όπως είναι φανερό οι Αλγόριθμοι Ομότιμων Κόμβων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον τρόπο επικοινωνίας (τον τρόπο επιλογής ομότιμου κόμβου για ανταλλαγή πληροφοριών) καθώς και με βάση τον αλγόριθμο επεξεργασίας της πληροφορίας κατά το στάδιο υπολογισμών.

Η κατηγοριοποίηση σε σχέση με τον τρόπο επικοινωνίας χωρίζει τους Αλγόριθμους Ομότιμων Κόμβων σε σύγχρονους και ασύγχρονους όσον αφορά την ανάγκη χρονισμού μεταξύ των γύρων Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων. Μια περαιτέρω κατηγοριοποίηση των αλγορίθμων τους κατατάσσει σε αλγορίθμους “pull” ή “push”, με τη διαφοροποίηση να έγκειται στο γεγονός ότι στη μία περίπτωση οι κόμβοι ζητούν από τους γείτονες τους την επιθυμητή πληροφορία ενώ στη δεύτερη περίπτωση η πληροφορία απλώς μεταβιβάζεται στους γείτονες χωρίς να προηγείται ερώτηση. Μεταξύ αυτών των δύο κατηγοριών αλγορίθμων υπάρχει και μία υβριδική διατύπωση αλγορίθμου (τύπου push-pull), η οποία περιλαμβάνει ταυτόχρονη προώθηση της πληροφορίας αλλά και αναζήτησή της μεταξύ των ομότιμων κόμβων. Αυτός ο συνδυασμός συνήθως αποδεικνύεται να παρουσιάζει ταχύτερη σύγκλιση προς τον τελικό στόχο του αλγορίθμου.

Κατά μία έννοια η δεύτερη κατηγοριοποίηση σχετίζεται με τον τελικό στόχο του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων, ο οποίος μπορεί να είναι απλός και να αποσκοπεί απλώς στη διάδοση της πληροφορίας και την απλή ομαδοποίηση της, ή σύνθετος και να περιλαμβάνει τον υπολογισμό (διαχωρίσιμων – separable) συναρτήσεων.

Μια επιπλέον ενδιαφέρουσα κατάταξη των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων αφορά το κριτήριο σύγκλισης και τερματισμού του αλγορίθμου [37][38], και μπορεί να είναι τύπου μείωσης της εντροπίας (anti-entropy) ή τύπου φημολογίας (rumor-mongering). Στην πρώτη περίπτωση η πληροφορία μεταδίδεται συνεχώς έως ώτου να μην υπάρχουν περαιτέρω τοπικές ανανεώσεις της πληροφορίας στους ομότιμους κόμβους (peers), ενώ στη δεύτερη περίπτωση η πληροφορία συνεχίζει να μεταδίδεται μέχρι να θεωρηθεί ότι όλοι οι κόμβοι έχουν την ανανεωμένη έκδοση της πληροφορίας με μεγάλη πιθανότητα.

Σύμφωνα με τη δημοσίευση [36] μία επίσημη διατύπωση του ορισμού των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων μπορεί να δοθεί εφόσον ορίσουμε τις θεμελιώδεις ιδιότητες που θα πρέπει να ικανοποιούν όλοι οι ομότιμοι κόμβοι που συμμετέχουν στον αλγόριθμο. Έστω ότι το πλήθος των κόμβων που συμμετέχουν στον αλγόριθμο είναι N . Ακολουθούν οι χαρακτηριστικές ιδιότητες:

1. Ο αλγόριθμος πρέπει να χρησιμοποιεί αποκλειστικά πληροφορίες από τη γειτονιά του.
2. Ο αλγόριθμος οφείλει να εκτελεί το πολύ $O(\log N)$ υπολογισμούς στη μονάδα του χρόνου.
3. Εάν οι τοπικοί υπολογισμοί απαιτούν τοπική μνήμη $|F_i|$, τότε η εκτέλεση του αλγορίθμου πρέπει να απαιτεί το πολύ $O(\text{poly}(\log N) + |F_i|)$
4. Δεν απαιτείται συγχρονισμός.
5. Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου δεν επηρεάζεται από αλλαγές μικρής κλίμακας στη γειτονιά.

Οι Αλγόριθμοι Ομότιμων Κόμβων λοιπόν συγκεντρώνουν εξ ορισμού μία πληθώρα χαρακτηριστικών που τους καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμους για αποκεντρωμένες εφαρμογές μέσα στο πλαίσιο ενός συνεχώς μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος, όπως ακριβώς συμβαίνει

στα ηλεκτρικά δίκτυα. Συγκεκριμένα, οι αλγόριθμοι αυτοί είναι εξ ορισμού καταναμημένοι και δεν υπάρχει η έννοια του κεντρικού συντονιστή, δεν εξαρτώνται από μία εντελώς στατική εικόνα του δικτύου και παρουσιάζουν ανοχή σε επικοινωνιακά σφάλματα, σε λογικά πλαίσια. Επιπλέον είναι εύκολα επεκτάσιμοι και παρουσιάζουν γρήγορη σύγκλιση σε μεγάλα συστήματα, καθώς υποστηρίζουν την αποκεντρωμένη λήψη αποφάσεων και τον καταναμημένο υπολογισμό λύσεων σε προβλήματα τα οποία είναι από τη φύση τους τοπικά.

2.4.2. Γενική διατύπωση Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων

Η γενική διατύπωση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων περιλαμβάνει ένα σετ από δύο διεργασίες, οι οποίες εκτελούνται τοπικά σε καθέναν από τους ομότιμους κόμβους που συμμετέχουν στον αλγόριθμο ανάλογα με την κατηγοριοποίηση τους σε ενεργού ή παθητικού τύπου.

Πίνακας 2-1: Διεργασίες Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων

Διεργασία ενεργού τύπου	Διεργασία παθητικού τύπου
εκτέλεση μία φορά κάθε T χρονικές στιγμές εκκίνηση p = Επιλογή Ομότιμου() αποστολή Αποστολή Πληροφορίας (<i>state</i>) προς τον p λήψη $info_p$ από τον p $state$ = Επεξεργασία($info_p$) τέλος	εκτέλεση συνεχώς εκκίνηση λήψη $info_p$ από τον p αποστολή Αποστολή Πληροφορίας (<i>state</i>) προς τον q $state$ = Επεξεργασία($info_q$) τέλος

Στις διεργασίες ενεργού τύπου ο κάθε κόμβος παίζει ενεργό ρόλο κατά τη διαδικασία επιλογής των ομότιμων κόμβων, στους οποίους θα αποστείλει την πληροφορία. Αντιθέτως, στην περίπτωση των διεργασιών παθητικού τύπου οι κόμβοι απλώς αντιδρούν όταν λαμβάνουν μία νέα πληροφορία. Στη δεύτερη περίπτωση, απαιτείται η εκκίνηση του Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων από κάποιον κόμβο, ο οποίος να εκτελεί μία διεργασία ενεργού τύπου.

Στη συνέχεια παρατίθεται η γενικευμένη έκφραση του σταδίου επεξεργασίας της πληροφορίας και αναλύεται μία εφαρμογή ανανέωσης της πληροφορίας μέσω γραμμικών επαναλήψεων.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, η τηλεπικοινωνιακή τοπολογία ενός συστήματος N διεσπαρμένων αισθητήρων μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω ενός γράφου $G = (V, E)$, όπου V είναι το σύνολο των κόμβων και $E \subseteq V \times V$ το σύνολο των ακμών. Επιπλέον θεωρούμε έναν πίνακα βαρών πίνακα W διαστάσεων $N \times N$, τέτοιο ώστε $W_{ij} \neq 0$ εφόσον $(i, j) \in E$. Όλοι οι κόμβοι j που έχουν τηλεπικοινωνιακή σύνδεση με τον κόμβο i , ονομάζονται γείτονες του κόμβου i και συμβολίζονται με N_i . Το πλήθος των κόμβων αυτών ονομάζεται βαθμός του κόμβου i και συμβολίζεται με d_i .

Υποθέτουμε ότι κατά το χρόνο εκκίνησης του Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων κάθε κόμβος i διαθέτει μία τοπική αρχική τιμή ενός μεγέθους X , η οποία συμβολίζεται με x_i^0 . Σε καθέναν από τους επόμενους γύρους (ή ανακυκλώσεις) r του Αλγορίθμου Ομότιμων

Κόμβων, όλοι οι κόμβοι ανανεώνουν και ανταλλάσσουν αυτή την αρχική πληροφορία με βάση κάποια στρατηγική. Η στρατηγική ανανέωσης και ανταλλαγής της αρχικής πληροφορίας υπόκειται στους περιορισμούς που θέτει η τοπολογία του δικτύου, η οποία θεωρείται μη μεταβαλλόμενη χρονικά, τουλάχιστον μέχρι την ολοκλήρωση του αλγορίθμου ομότιμων κόμβων.

Μία γενικευμένη διατύπωση του σταδίου επεξεργασίας μέσω γραμμικών επαναλήψεων μπορεί να αποδοθεί ως εξής:

Σε κάθε γύρο r του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων, κάθε κόμβος χρησιμοποιεί την ακόλουθη σχέση για την επεξεργασία της πληροφορίας που έχει λάβει από τους γείτονές του, πριν προχωρήσει σε εκ νέου προώθηση της πληροφορίας αυτής κατά τον επόμενο γύρο Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων. Συγκεκριμένα κάθε κόμβος μετασχηματίζει τις τοπικές πληροφορίες της γειτονιάς N_i αλλά και του ίδιου του κόμβου i μέσω του ακόλουθου γραμμικού μετασχηματισμού:

$$x_i^{r+1} = w_{ii} \cdot x_i^r + \sum_{j \in N_i} w_{ij} \cdot x_j^r \quad (2.1)$$

Συμβολίζοντας με έντονη γραφή το διάνυσμα των καταστάσεων όλων των κόμβων του δικτύου σε κάθε δεδομένο γύρο r του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων, έχουμε $\mathbf{x}^r = [x_1^r \ \dots \ x_N^r]$, οπότε η στρατηγική για την επεξεργασία της πληροφορίας ολόκληρου του δικτύου ομότιμων κόμβων είναι

$$\mathbf{x}^{r+1} = W_{ij} \cdot \mathbf{x}^r \quad (2.2)$$

2.4.3. Σύγκλιση στο ντετερμινιστικό Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων

Η ταχύτητα σύγκλισης του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων εξαρτάται από την τοπολογία του δικτύου και από την επιλογή των βαρών που σχετίζονται με τις ακμές του γράφου που συνδέει τους κόμβους. Στο ντετερμινιστικό Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων υποθέτουμε ότι η τοπολογία του δικτύου παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του αλγορίθμου και ότι η ανταλλαγή και η ανανέωση των πληροφοριών πραγματοποιείται μέσω ενός διπλά στοχαστικού πίνακα βαρών W . Η διπλή στοχαστικότητα του πίνακα σημαίνει ότι η μεγαλύτερη ιδιοτιμή του πίνακα είναι ίση με τη μονάδα. Το μέτρο της ταχύτητας σύγκλισης λοιπόν είναι η απόσταση μεταξύ της φασματικής ακτίνας (το φασματικό περιεχόμενο ταυτίζεται με τη μεγαλύτερη ιδιοτιμή) και της δεύτερης μεγαλύτερης ιδιοτιμής του πίνακα των βαρών. Η εξάρτηση αυτή από το μέγεθος $1 - \lambda_{\max}(W)$ είναι αναμενόμενη, αφού η απόσταση αποτελεί ένα ευρέως διαδεδομένο μέτρο για το ρυθμό ανάμιξης σε τυχαίες διαδρομές σε γράφους. Εξάλλου η ίδια η φύση του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων μοιάζει με τη μετάδοση της πληροφορίας κατά μήκος τέτοιων τυχαίων διαδρομών επί του γράφου. Τα βάρη του πίνακα W υποδηλώνουν κι αυτά το ρυθμό με τον οποίο η πληροφορία «αναμιγνύεται» έως ότου ομογενοποιηθεί.

Ακολουθούν τρεις ορισμοί εννοιών, οι οποίοι είναι χρήσιμοι για τη συνέχεια:

Ορισμός 1 (Εφικτή συνάρτηση) Έστω η συνάρτηση $f: R_N \rightarrow R_m$ επί των αρχικών τιμών των κόμβων. Θα θεωρούμε ότι η συνάρτηση f είναι εφικτή για τον κόμβο i εφόσον είναι δυνατό να υπολογιστεί τοπικά έπειτα από έναν ικανό αριθμό γραμμικών επαναλήψεων της μορφής (2.1). Η συνάρτηση f λέγεται γραμμική εφόσον υπάρχει $m \times N$ πίνακας Q ώστε $Q \cdot \mathbf{x}^0$

Ορισμός 2 (Καταναεμημένη συμφωνία και υπολογισμός μέσου όρου) Ένα δίκτυο κόμβων μπορεί να πετύχει καταναεμημένη συμφωνία (distributed consensus), εφόσον κάθε κόμβος είναι σε θέση να υπολογίσει την ίδια τιμή της συνάρτησης $f(x_1^r, x_2^r, \dots, x_N^r)$, δηλαδή «συμφωνεί» σε αυτή την τιμή. Στην περίπτωση που η τιμή της συνάρτησης που υπολογίζεται είναι μονάδα, δηλαδή $f(x_1^r, x_2^r, \dots, x_N^r) = 1$, τότε πρόκειται για υπολογισμό του μέσου όρου των αρχικών τιμών όλων των κόμβων.

Ορισμός 3 (Ασυμπτωτική σύγκλιση προς τη συμφωνία) Το δίκτυο κόμβων θεωρείται ότι προσεγγίζει την ασυμπτωτική συμφωνία εφόσον το όριο της τοπικά υπολογιζόμενης εσωτερικής τιμής σε κάθε κόμβο προσεγγίζει την επιθυμητή τιμή της συνάρτησης f , δηλαδή έχουμε ότι $\lim_{r \rightarrow \infty} x_i^r = f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0)$.

2.4.4. Επιτάχυνση ταχύτητας σύγκλισης για τον υπολογισμό του μέσου όρου

Η κατάλληλη επιλογή του πίνακα των βαρών W εγγυάται ότι ο προτεινόμενος Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων συγκλίνει έπειτα από έναν πεπερασμένο αριθμό γύρων r , δηλαδή ότι κάθε κόμβος τείνει οριακά προς στην επιθυμητή τιμή (π.χ. συμφωνία στο μέσο όρο) καθώς το πλήθος των γύρων τείνει στο άπειρο. Συγκεκριμένα για τον καταναεμημένο υπολογισμό του μέσου όρου των τιμών του αρχικού διανύσματος, απαιτούμε

$$\lim_{r \rightarrow \infty} x_{AV,r}^{est,i} = x_{AV} \text{ για κάθε κόμβο } i \quad (2.3)$$

Η σύγκλιση όχι απλώς είναι εγγυημένη αλλά επιταχύνεται, εφόσον κατασκευάσουμε τον πίνακα βαρών W με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιήσουμε τη φασματική ακτίνα του αντίστοιχου γράφου. Πρόκειται για το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της δεύτερης μεγαλύτερης ιδιοτιμής του πίνακα W και είναι τύπου semi-definite[39]. Η διατύπωση του προβλήματος επιλογής βαρών παρουσιάζεται στη συνέχεια μαζί με δύο αλγορίθμους που υλοποιήθηκαν, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, για το σκοπό αυτό.

Θεωρούμε έναν συμμετρικό πίνακα βαρών (απαιτώντας ουσιαστικά οι κλάδοι του δικτύου να έχουν το ίδιο βάρος και για τους δύο κόμβους, οι οποίοι συνδέονται μέσω ενός συγκεκριμένου κλάδου). Η μορφή του πίνακα είναι η ακόλουθη $W \in \mathcal{L}$, όπου $\mathcal{L} = \{W \in \mathcal{R}^{N \times N}, W_{ij} = 0, \forall j \notin \mathcal{E} \text{ και } i \neq j, W_{ij} = W_{ji}\}$.

Η ικανή συνθήκη για την σύγκλιση του αλγορίθμου σχετίζεται με την πιο σημαντική ιδιότητα που πρέπει να διαθέτει ο W και αναλύεται μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$x_{AV} = \frac{\sum_{i=0}^n x_{i,0}}{N} = \frac{\mathbf{1}^T \cdot \mathbf{x}_{r=0}}{N} \cdot \mathbf{1} = \frac{\mathbf{1}^T \cdot \mathbf{1}}{N} \cdot \mathbf{x}_{r=0} \quad (2.4)$$

όπου $\mathbf{x}_{r=0}$ είναι το διάνυσμα διάστασης N , που απαρτίζεται από τα αρχικώς μετρούμενα μεγέθη σε κάθε κόμβο i , δηλαδή περιέχει τα $x_{i,0}$. Τα διανύσματα $\mathbf{1}$ είναι διανύσματα γραμμής διάστασης N με όλα τα στοιχεία τους ίσα με ένα. Σημειώνεται ότι λόγω της συμμετρίας και της διπλής στοχαστικότητας του W τα ιδιοδιανύσματά του ταυτίζονται με τα μοναδιαία διανύσματα του.

Η διατύπωση του ορίου, το οποίο ουσιαστικά καθορίζει και την απαιτούμενη σύγκλιση του αλγορίθμου, έχει ως εξής:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} x_{AV,t}^{est} = \lim_{r \rightarrow \infty} W_r \cdot \mathbf{x}_{r=0} = \mathbf{x}_{r=0} \cdot \lim_{r \rightarrow \infty} W_r \quad (2.5)$$

Συνδυάζοντας τις (2.4) και (2.5) παίρνουμε:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} W_r = \frac{\mathbf{1}^T \cdot \mathbf{1}}{n} \quad (2.6)$$

Η ιδιότητα αυτή μεταφράζεται στους εξής περιορισμούς για τον πίνακα των βαρών:

$$\begin{aligned} \mathbf{1}^T \cdot W &= \mathbf{1}^T \\ W \cdot \mathbf{1} &= \mathbf{1} \\ \rho\left(W - \frac{\mathbf{1}^T \cdot \mathbf{1}}{n}\right) &< 1 \end{aligned}$$

Όπου $\rho(\cdot)$ είναι η φασματική ακτίνα του πίνακα.

Οι παραπάνω ιδιότητες ακολουθούν το **θεώρημα** [36]:

Η εσωτερική ανανέωση της πληροφορίας τείνει ασυμπτωτικά προς τη συμφωνία σε ένα σταθερό διάνυσμα $c^T \cdot x^0$ (υπό την προϋπόθεση ότι $c^T \cdot \mathbf{1} = 1$) αν και μόνο αν ο πίνακας W ικανοποιεί τις εξής συνθήκες:

1. Διαθέτει μία απλή (μονή) ιδιοτιμή στο 1, με το αριστερό ιδιοδιάνυσμα να είναι c^T και το δεξί $\mathbf{1}$.
2. Όλες οι άλλες ιδιοτιμές του W είναι μικρότερες από το 1.

Η ιδιότητα (2.6) αποτελεί αναγκαία συνθήκη για την απαιτούμενη σύγκλιση. Επιπλέον, οι ιδιότητες $\mathbf{1}^T \cdot W = \mathbf{1}^T$ και $W \cdot \mathbf{1} = \mathbf{1}$, δηλώνουν ότι ο πίνακας είναι διπλά στοχαστικός. Τέλος, η ιδιότητα που σχετίζεται με τη φασματική ακτίνα ρ δηλώνει ότι η αντίστοιχη αλυσίδα Markov είναι μη μειούμενη και μη περιοδική.

Ακολουθώς ορίζεται ο ρυθμός σύγκλισης ως εξής:

$$rate_{conv} = \lim_{r \rightarrow \infty} \left(\frac{\|x_{AV,r}^{est} - x_{AV}\|_2}{\|x_{r=0} - x_{AV}\|_2} \right)^{1/r} = \rho\left(W - \frac{\mathbf{1}^T \cdot \mathbf{1}}{n}\right) \quad (2.7)$$

Για τις εφαρμογές της διαχείρισης δικτύου, είναι λογικό να απαιτούμε την επιτάχυνση της σύγκλισης, ουσιαστικά απαιτώντας να ελαχιστοποιήσουμε τον εν λόγω ρυθμό σύγκλισης, ώστε τα προβλήματα επιλύουμε με καταναμημένο τρόπο μέσω των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, να επιλύονται κατά τα δυνατόν ταχύτερα.

Η επιλογή του πίνακα βέλτιστων βαρών ώστε αυτά να χρησιμοποιηθούν εντός των ανακυκλώσεων του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων, βασίζεται στο ακόλουθο semi-definite πρόβλημα, το οποίο αφορά την ελαχιστοποίηση του φασματικού περιεχομένου του W .

Από τις σχέσεις (2.6) και (2.7) έχουμε την ακόλουθη κατάστρωση του προβλήματος επιτάχυνσης του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων:

$$\begin{aligned} \text{ελαχιστοποίηση } rate_{conv}(W) &= \rho\left(W - \frac{\mathbf{1}^T \cdot \mathbf{1}}{n}\right) \\ \text{υπό τον περιορισμό } W &\in \mathcal{L}, \lim_{r \rightarrow \infty} W_r = \frac{\mathbf{1}^T \cdot \mathbf{1}}{n} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Καθώς ο ρυθμός σύγκλισης συνδέεται με τη φασματική ακτίνα του πίνακα βαρών και τη δεύτερη μεγαλύτερη ιδιοτιμή του, το πρόβλημα (2.8) παρουσιάζει ομοιότητες με τη μέγιστη ταχύτητα ανάμιξης στις αλυσίδες Markov για το γράφο G του δικτύου. Η βασική διαφοροποίηση ωστόσο, είναι η απουσία της απαίτησης για μη αρνητικά στοιχεία στον πίνακα βαρών, απαίτηση η οποία υπάρχει στο πρόβλημα ανάμιξης στις αλυσίδες Markov. Τελικά αυτή ακριβώς η απουσία επιτρέπει την εξεύρεση λύσεων, οι οποίες περιέχουν αρνητικά βάρη σε συγκεκριμένες θέσεις του πίνακα W , και με αυτόν τον τρόπο επιταχύνεται ακόμη περισσότερο η σύγκλιση του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων προς την επιθυμητή τιμή.

Το πρόβλημα (2.8) μπορεί να αναδιατυπωθεί χρησιμοποιώντας τη μήτρα πρόσπτωσης A του γράφου G του δικτύου, καθώς και έναν μοναδιαίο πίνακα I (eyematrix) των ίδιων διαστάσεων με τον A . Ο πίνακας W ισούται λοιπόν με $W = I - A \cdot \text{diag}(w) \cdot A^T$, και το πρόβλημα ελαχιστοποίησης επαναδιατυπώνεται ως εξής:

$$\text{ελαχιστοποίηση } R(w) = \left\| I - A \cdot \text{diag}(w) \cdot A^T - \frac{\mathbf{1}^T \cdot \mathbf{1}}{N} \right\|_2 \quad (2.9)$$

,όπου ο πίνακας $w \in \mathbb{R}^m$ περιέχει αποκλειστικά τα βάρη που σχετίζονται με τους κλάδους του δικτύου και αποτελεί τη μεταβλητή του προβλήματος (2.9).

Για την επίλυση του προβλήματος (2.9) και τον επιλογή των κατά το δυνατό βέλτιστων βαρών, υλοποιήθηκαν δύο επαναληπτικοί προσεγγιστικοί αλγόριθμοι σε περιβάλλον Matlab. Η αναλυτική λύση του προβλήματος είναι εξαιρετικά δύσκολη λόγω του ότι πρόκειται για NP-hard πρόβλημα. Παρόλο που οι περιορισμοί του προβλήματος είναι γραμμικοί, το ίδιο το πρόβλημα είναι πολύ δύσκολο επιλύσιμο λόγω της αντικειμενικής του συνάρτησης (ελαχιστοποίηση ιδιοτιμών), η οποία είναι μη κυρτή. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία τα προβλήματα ελαχιστοποίησης της φασματικής ακτίνας είναι NP-hard [35].

Για την αρχικοποίηση των επαναληπτικών μεθόδων επιθυμούμε να προσδιορίσουμε μία αποδεκτή επιλογή για τα στοιχεία του πίνακα των βαρών, η οποία εγγυάται τη σύγκλιση αλλά προφανώς δεν είναι η απόλυτα βέλτιστη λύση.

2.4.4.1. Καλύτερη λύση με σταθερά βάρη

Η αρχικοποίηση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των βέλτιστων σταθερών βαρών λαμβάνοντας υπόψη τις φασματικές ιδιότητες του γράφου και συγκεκριμένα υπολογίζοντας τη μικρότερη και τη δεύτερη μεγαλύτερη ιδιοτιμή του πίνακα Laplace L , που προκύπτει από τον πίνακα πρόσπτωσης. Η σταθερή τιμή α^* που θα χρησιμοποιούμε κατά την κατασκευή των βέλτιστων σταθερών βαρών προκύπτει από τη σχέση

$$\alpha^* = \frac{2}{\lambda_1(L) + \lambda_{N-1}(L)} \quad (2.10)$$

Χρησιμοποιούμε τις οριακές ιδιοτιμές του πίνακα Laplace, γιατί είναι ίδιες με τις ιδιοτιμές του πίνακα των βαρών W , αλλά με αντίστροφη σειρά κατάταξης. Αφού υπολογιστεί αυτή η σταθερή τιμή ο βέλτιστος πίνακας σταθερών βαρών διαμορφώνεται ως εξής:

$$W_{ij} = \begin{cases} \alpha^* , & \text{για κάθε } \{i, j\} \in \mathcal{E} \\ 1 - d_i \cdot \alpha^* & , \text{ για } i = j \\ 0 & \end{cases} \quad (2.11)$$

όπου d_i είναι ο βαθμός κάθε κόμβου (πλήθος των κόμβων με τους οποίους επικοινωνεί).

Μία διαφορετική αποδεκτή αρχικοποίηση του πίνακα W είναι η κατασκευή επίσης σταθερών βαρών σε αντίστροφο συσχετισμό με το μέγιστο βαθμό καθεμίας από τις ακμές, ως εξής:

$$w_{ij} = \frac{1}{\max\{d_i, d_j\}} \quad (2.12)$$

Μετά την κατάλληλη αρχικοποίηση μπορούμε να προσεγγίσουμε την προσεγγιστική βέλτιστη λύση για τον πίνακα των βαρών επιλύοντας το πρόβλημα (2.9) είτε με τη μέθοδο sub-gradient είτε μέσω της *fminsearch* στο εργαλείο βελτιστοποίησης του Matlab, χρησιμοποιώντας αλγορίθμους interior-point. Η επίλυση οδηγεί σε επιλογή πίνακα βαρών

για ταχύτερη σύγκλιση προς την επιθυμητή τιμή του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων. Μέτρο της ποιότητας της λύσης αποτελεί η δεύτερη μεγαλύτερη ιδιοτιμή του εκάστοτε υπολογισθέντος πίνακα W , που προκύπτει από τη βελτιστοποίηση, κατ' εφαρμογή της σχέσης (2.7).

Ακολουθεί παρουσίαση των προσεγγιστικών αλγορίθμων που υλοποιήθηκαν, καθώς και μία συγκριτική αποτίμηση μεταξύ των διαφόρων επιλογών για τον πίνακα βαρών (καλύτερη λύση με σταθερά βάρη, sub-gradient, interior point)

2.4.4.2. Πίνακας βαρών μέσω αλγορίθμου sub-gradient

Ορίζουμε μία μερική παράγωγο της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (2.9) στο σημείο w ως ένα διάνυσμα της μορφής $g \in \mathbb{R}^m$ τέτοιο ώστε να ικανοποιεί την ανισότητα $R(\tilde{w}) \geq R(w) + g^T(\tilde{w} - w)$ για κάθε διάνυσμα $\tilde{w} \in \mathbb{R}^m$.

Το διάνυσμα g έχει μη μηδενικά στοιχεία στις θέσεις που αντιστοιχούν σε ακμές του γράφου, δηλαδή στις θέσεις $l \sim \{i, j\}$. Έστω u το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην $\lambda_2(W)$ και v το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην $\lambda_n(W)$. Κάθε στοιχείο του διανύσματος g προκύπτει από τα αντίστοιχα στοιχεία των ιδιοδιανυσμάτων του W σύμφωνα με τη σχέση:

$$g_l = \begin{cases} -(u_i - u_j)^2, & \alpha\nu R(w) = \lambda_2(W) \\ (v_i - v_j)^2, & \alpha\nu R(w) = \lambda_n(W) \end{cases} \quad (2.13)$$

Επιλέγοντας ένα αρχικό διάνυσμα βαρών σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, επαναλαμβάνουμε για k επαναλήψεις διαδοχικά τα εξής :

1: Υπολογισμός μίας μερικής παραγώγου από τη σχέση (2.13)

2: Θέτουμε $w^{(k+1)} = w^{(k)} - \frac{\beta_k \cdot g^{(k)}}{\|g^{(k)}\|}$

Το βήμα απομείωσης β_k πρέπει να είναι μη αρνητικό και να πληροί τις ακόλουθες ιδιότητες

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \beta_k = 0, \quad \sum_{k=1}^{\infty} \beta_k = \infty. \text{ Στην παρούσα διατριβή επιλέχθηκε } \beta_k = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{k}}$$

2.4.4.3. Πίνακας βαρών μέσω αλγορίθμου Interior point

Με βάση την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος (2.9) επιλέγουμε μία συνάρτηση barrier της μορφής

$$\varphi(s, w) = \mu \cdot s - \log \det(sI + W - 11^T / n) - \log \det(sI - W + 11^T / n), \quad \mu > 0$$

όπου W αναλύεται ως εξής $W = I - A \text{diag}(w) A^T$

Ακολουθεί ο αλγόριθμος:

1. Υπολογίζουμε τους ενδιάμεσους πίνακες

$$V = sI - W + 11^T / n \quad (2.14)$$

$$U = sI + W - 11^T / n \quad (2.15)$$

2. Υπολογίζουμε τη μερική παράγωγο και τη μήτρα Hessian για τη συνάρτηση barrier φ ως εξής:

$$g_0 = \mu - \text{trace}(U) - \text{trace}(V) \quad (2.16)$$

$$g_l = (U_{ii} + U_{jj} - 2U_{ij}) - (V_{ii} + V_{jj} - 2V_{ij}) \quad (2.17)$$

$$H_{00} = \text{trace}(U^2) - \text{trace}(V^2) \quad (2.18)$$

$$H_{0l} = -(U_{ii}^2 + U_{jj}^2 - 2 \cdot U_{ij}^2) - (V_{ii}^2 + V_{jj}^2 - 2 \cdot V_{ij}^2) \quad (2.19)$$

$$H_{ll'} = -(U_{ii'} + U_{jj'} - U_{ij'} - U_{i'j}) - (V_{ii'} + V_{jj'} - V_{ij'} - V_{i'j}) \quad (2.20)$$

3. Τελικά υπολογίζουμε την ανανεωμένη τιμή του διανύσματος βαρών ως εξής:

$$w_{k+1} = w_k - H^{-1} \cdot g^T \quad (2.21)$$

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο βελτιστοποίησης του Matlab και συγκεκριμένα η συνάρτηση $y = \text{fminsearch}(@(\text{w})\text{normfun}(\text{w}, \text{A}, \text{l}, \text{fixedpoint}), \text{x0}, \text{options})$.

Προφανώς θέτουμε όπου $f = \|I - A * \text{diag}(w) * A' - \text{fixedpoint}\|$ και σημείο εκκίνησης x_0 ορίζεται το κατάλληλο διάνυσμα βαρών ανάλογα με την αρχικοποίηση που επιλέγουμε.

Επισημαίνεται ότι το σημείο $\text{fixedpoint} = \frac{11^T}{N}$ είναι το εσωτερικό γινόμενο των δύο

μοναδιαίων ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα W (αριστερό και δεξί) και ουσιαστικά πρόκειται για το σταθερό σημείο αναφοράς γύρω από το οποίο κινούνται οι προσεγγιστικές επαναλήψεις τόσο στον αλγόριθμο interior point όσο και στον αλγόριθμο sub-gradient.

2.4.5. Αποτελέσματα ρυθμού σύγκλισης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται, μέσω πειραματικών δικτύων, οι επιπτώσεις στην ταχύτητα σύγκλισης των διάφορων τρόπων υπολογισμού των βαρών.

2.4.5.1. Ακτινικό δίκτυο 9 κόμβων

Έστω το ακτινικό δίκτυο 9 κόμβων και ο αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης του δικτύου όπως φαίνονται στο Σχήμα ΠΒ.1 του Παραρτήματος Β1. Με βάση την τοπολογία κατασκευάζουμε τη μήτρα πρόσπτωσης και υπολογίζουμε τους πίνακες Laplace και μέγιστου βαθμού, L και D αντίστοιχα. Από εκεί μπορούμε να υπολογίσουμε τη σταθερά α , για τον καλύτερο δυνατό υπολογισμό βαρών βασισμένο σε σταθερές τιμές. Συγκεκριμένα, έχουμε ότι η μεγαλύτερη και η δεύτερη μικρότερη ιδιοτιμή του πίνακα Laplace εξασφαλίζουν τη σύγκλιση με σταθερά βάρη, εφόσον κατασκευάσουμε τον πίνακα βαρών χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σταθερά $\alpha^* = \frac{2}{\lambda_1(L) + \lambda_{n-1}(L)} = \frac{2}{5,4495 + 0,2679} = 0,3498$. Μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε από τις σχέσεις (2.11) και (2.12) δύο πίνακες βαρών που ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος βελτιστοποίησης (2.9), και μπορούν να αποτελέσουν αρχικοποίηση για τους αλγόριθμους sub-gradient και interior point.

Επίσης όπως αναφέρθηκε ήδη μία επιλογή αρχικών τιμών για τον πίνακα των βαρών μπορεί να δημιουργηθεί λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό (πλήθος γειτόνων) κάθε κόμβου. Ακολουθούν οι πίνακες βαρών για το δίκτυο 9 κόμβων όπως προσδιορίστηκαν μέσω του συντελεστή α και στη συνέχεια μέσω των αλγορίθμων sub-gradient και interior point.

$$W_{ij}^{const} =$$

0,6502	0,3498	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,3498	-0,0494	0,3498	0,0000	0,3498	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,3498	-0,3992	0,3498	0,0000	0,3498	0,3498	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	0,3498	0,6502	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,3498	0,0000	0,0000	0,6502	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	0,3498	0,0000	0,0000	0,6502	0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	0,3498	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0494	0,3498	0,3498
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3498	0,6502	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3498	0,0000	0,6502

$$W_{ij}^{subgr} =$$

0.6665	0.3335	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.3335	-0.1338	0.4669	0.0000	0.3335	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.4669	-0.1667	0.1165	0.0000	0.1165	0.4669	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.1165	0.8835	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.3335	0.0000	0.0000	0.6665	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.1165	0.0000	0.0000	0.8835	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.4669	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1338	0.3335	0.3335
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3335	0.6665	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3335	0.0000	0.6665

$$W_{ij}^{interior\ point} =$$

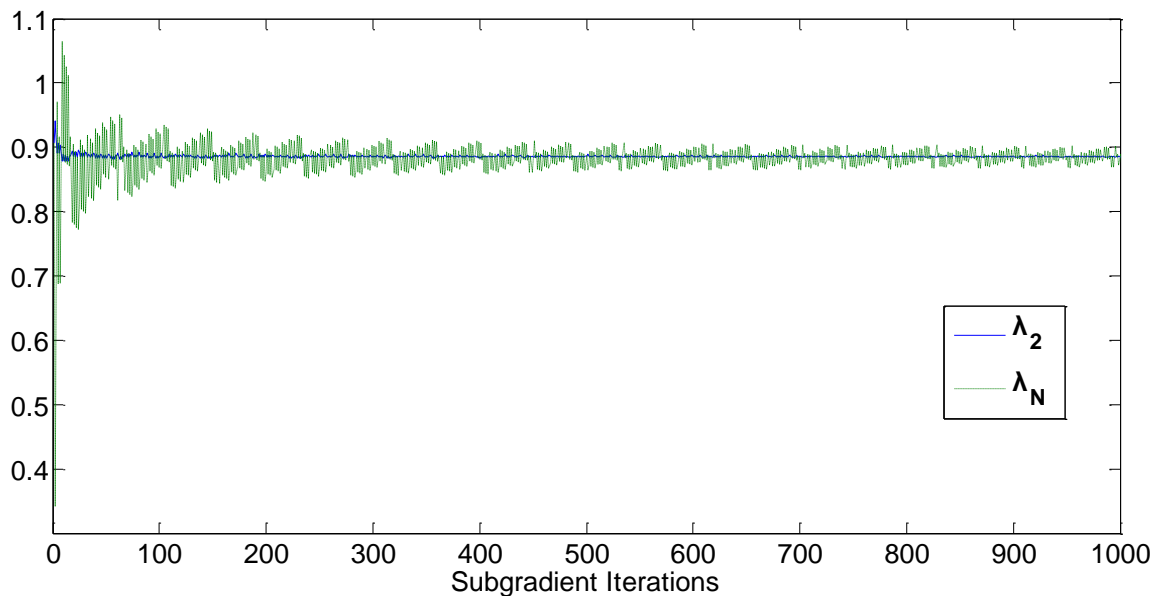
0.6059	0.3941	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.3941	-0.2250	0.4205	0.0000	0.4104	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.4205	-0.1233	0.1216	0.0000	0.1491	0.4320	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.1216	0.8784	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.4104	0.0000	0.0000	0.5896	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.1491	0.0000	0.0000	0.8509	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.4320	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1690	0.4064	0.3305
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4064	0.5936	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3305	0.0000	0.6695

Αφού προσδιοριστούν τα κατάλληλα βάρη, καθένας από τους πίνακες W δοκιμάζεται και σε μία σχέση υπολογισμού του μέσου όρου των αρχικών τιμών που διαθέτουν οι κόμβοι, ώστε να μετρήσουμε το πλήθος των απαιτούμενων επαναλήψεων του κατανεμημένου αλγορίθμου με ακρίβεια 10^{-5} .

Πίνακας 2-2 : Ταχύτητα σύγκλισης στο ακτινικό δίκτυο 9 κόμβων

Επιλογή βαρών μέσω:	Δεύτερη ιδιοτιμή	μεγαλύτερη	Πλήθος γύρων Ομότιμων Κόμβων
Καλύτερης σταθεράς	0,9063		109
Sub-gradient - 840 iterations	0,8913		91
Sub-gradient - 1000 iterations	0,8886		87
Interior point	0,8865		76

Επισημαίνεται ότι αρκετές θέσεις του πίνακα βαρών εμπεριέχουν και αρνητικές τιμές, οι οποίες μάλιστα επιταχύνουν τη σύγκλιση. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι για τον αλγόριθμο sub-gradient δεν υπάρχει συνθήκη τερματισμού, οπότε έπειτα από κάποιες επαναλήψεις απλώς τερματίζουμε τον αλγόριθμο θεωρώντας ότι έχουμε προσεγγίσει μία καλύτερη λύση σε σχέση με την αρχική. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη των ιδιοτιμών $\lambda_2(W)$ και $\lambda_N(W)$ καθώς προχωρούν οι επαναλήψεις του αλγορίθμου sub-gradient.



Σχήμα 2.1: Εξέλιξη ιδιοτιμών κατά την ελαχιστοποίηση της φασματικής ακτίνας (δίκτυο 9 κόμβων)

2.4.5.2. Τροποποιημένο δίκτυο 9 κόμβων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το δίκτυο 9 κόμβων προσθέτοντας 2 και 4 επιπλέον ακμές αντίστοιχα, έτσι ώστε το δίκτυο να μην έχει πλέον ακτινική διαμόρφωση.

Πίνακας 2-3: Ταχύτητα σύγκλισης στο δίκτυο 9 κόμβων και 10 ακμών

Επιλογή πίνακα βαρών μέσω:	Δεύτερη μεγαλύτερη ιδιοτιμή	Πλήθος γύρων Ομότιμων Κόμβων
Καλύτερης σταθεράς	0,8981	100
Subgradient iterations 840	0,8738	78
Subgradient iterations 1000	0,8724	67
Interior point	0,8758	80

Πίνακας 2-4: Ταχύτητα σύγκλισης στο δίκτυο 9 κόμβων και 12 ακμών

Επιλογή πίνακα βαρών μέσω:	Δεύτερη μεγαλύτερη ιδιοτιμή	Πλήθος γύρων Ομότιμων Κόμβων
Καλύτερης σταθεράς	0,8247	55
Subgradient 840 iterations	0,7973	46
Subgradient 1000 iterations	0,7799	42
Interior point	0,7814	43

2.4.5.3. Δίκτυο 118 κόμβων

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το ρυθμό σύγκλισης για ένα μεγαλύτερο δίκτυο. Συγκεκριμένα η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε για το δίκτυο 118 ζυγών της IEEE, το οποίο δεν είναι ακτινικό.

Πίνακας 2-5: Ταχύτητα σύγκλισης στο δίκτυο 118 κόμβων και 186 ακμών

Επιλογή πίνακα βαρών μέσω:	Δεύτερη μεγαλύτερη ιδιοτιμή	Πλήθος γύρων Ομότιμων Κόμβων
Καλύτερης σταθεράς	0,9961	1858
Μέγιστου βαθμού	0,9949	1363
Subgradient 395 iterations	0,9913	983
Interior point	0,9913	983

2.5. Υπολογισμός γραμμικών συναρτήσεων μέσω Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων

Οι Αλγόριθμοι Ομότιμων Κόμβων παρέχουν επίπεδα υπερκείμενων υπολογισμών επάνω σε ένα δίκτυο. Η βασική αιτία ύπαρξης αυτών των επιπέδων ενυπάρχει στη δυνατότητα αποσύνθεσης και διαχωρισμού πολλών τύπων προβλημάτων με τη βοήθεια διαχωρίσιμων συναρτήσεων. Η χρήση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων ως πυρήνα υπολογισμού διαχωρίσιμων συναρτήσεων διευκολύνει και απλοποιεί την επίλυση αρκετών προβλημάτων τα οποία είναι φαινομενικά πολύπλοκα όταν αντιμετωπίζονται σε κεντρικό επίπεδο [40].

Ορισμός Έστω V το σύνολο όλων των ακμών ενός γράφου και $X = [x_i] \in \mathbb{R}^N$ ένα διάνυσμα διάστασης N . Ονομάζουμε διαχωρίσιμη μία συνάρτηση $f: \mathbb{R}^N \rightarrow V$ εφόσον υπάρχουν συναρτήσεις f_1, \dots, f_n έτσι ώστε για όλα τα διανύσματα $X \in \mathbb{R}^N$ να ισχύει $f(X) = \sum f_i(x_i)$.

Οι Αλγόριθμοι Ομότιμων Κόμβων μπορούν να αξιοποιηθούν για τον υπολογισμό διαχωρίσιμων συναρτήσεων, εισάγοντας τες στην πολιτική ανανέωσης της τοπικής πληροφορίας κάθε κόμβου ως γραμμικό συνδυασμό $f(x^{r+1}) = W_{ij} \cdot f(x^r)$.

2.5.1. Διαχωρίσιμα προβλήματα

Θεωρούμε ένα πρόβλημα της μορφής

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^m f_i(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^m g_{ij}(\mathbf{x}_i) \leq x_j, \mathbf{x}_i \in \mathbf{X}_i \subset \mathbb{R}^{N_i} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Όπου $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_m)$, τα \mathbf{x}_i διανύσματα διάστασης N_i το καθένα και $f_i : \mathbb{R}^{N_i} \rightarrow \mathbb{R}$ $g_{ij} : \mathbb{R}^{N_i} \rightarrow \mathbb{R}$. Αντιστοιχίζοντας μία δυϊκή μεταβλητή μ_j για καθέναν από τους περιορισμούς, έχουμε την αντικειμενική συνάρτηση του δυϊκού προβλήματος:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^m q_i(\boldsymbol{\mu}) \\ \text{s.t.} \quad & \boldsymbol{\mu} \geq 0 \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$q_i(\boldsymbol{\mu}) = \inf_{\mathbf{x}_i \in \mathbf{X}_i} \{f_i(\mathbf{x}_i) + \sum_j \mu_j \cdot g_{ij}(\mathbf{x}_i)\} \quad (2.24)$$

Το εν λόγω πρόβλημα είναι διαχωρίσιμο [41] αφού η ελαχιστοποίηση μέσω του δυϊκού προβλήματος περιλαμβάνει τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης Lagrange. Ο υπολογισμός αυτός έχει αποσυντεθεί σε m απλούστερα προβλήματα, τα οποία μπορούν να επιλυθούν τοπικά σε κάθε κόμβο με βάση έναν κανόνα ανανέωσης της μορφής (2.2).

2.6. Στοχαστικός Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων

Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, αυτοί διακρίνονται σε ντετερμινιστικούς και στοχαστικούς ανάλογα με τον τρόπο επιλογής ομότιμων κόμβων για ανταλλαγή της τοπικής πληροφορίας σε κάθε γύρο.

Παρόλο που στις εφαρμογές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, η τοπολογία του δικτύου είναι αναμενόμενο να θεωρείται εκ των προτέρων δεδομένη και σταθερή, και κατ'επέκταση οδηγούμαστε περισσότερο προς την κατηγορία του ντετερμινιστικού Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων, αξίζει μία αναφορά στους στοχαστικούς Αλγόριθμους Ομότιμων Κόμβων. Εξάλλου η εφαρμογή ασύρματων μέσων μετάδοσης και τρόπων επικοινωνιών στα πλαίσια εγκατάστασης των έξυπνων μετρητών, θα επιτρέψει τη δημιουργία υποδομής για εφαρμογές με μεταβλητό υπερκείμενο γράφο επικοινωνιών. Οι ιδιότητες σύγκλισης των στοχαστικών Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε εφαρμογές με μεγάλο αριθμό κόμβων, οπότε και οι δυνατότητες επέκτασής τους είναι μεγαλύτερες σε αυτή την περίπτωση.

2.6.1. Πιθανότητες μετάδοσης πληροφορίας

Σε αντίθεση με το ντετερμινιστικό Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων που η επιλογή των ομότιμων κόμβων είναι δεδομένη και η σύγκλιση σχετίζεται με την επιλογή του πίνακα βαρών W , στο στοχαστικό Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων οφείλουμε να αξιολογήσουμε τον πίνακα πιθανοτήτων για επικοινωνία μεταξύ των ομότιμων κόμβων. Ορίζουμε λοιπόν έναν πίνακα P διαστάσεων $N \times N$ με στοιχεία P_{ij} την πιθανότητα ανταλλαγής πληροφορίας μεταξύ των κόμβων i και j . Εξ' ορισμού ο πίνακας πιθανοτήτων μετάδοσης θα πρέπει να πληροί την

ιδιότητα $\sum_{j=1}^N P_{ij} = 1, \forall (i, j) \in V$. Επιπλέον ορίζουμε μία στατική κατανομή

$\pi = [\pi_i] \in \mathbf{R}_+^N$ του πίνακα πιθανοτήτων έτσι ώστε $\pi^T \cdot \mathbf{P} = \pi^T$, δηλαδή

$\pi_j = \sum_{i=1}^N \pi_i \cdot P_{ij}, \forall (i, j) \in V$. Τέλος ορίζουμε ως «δυνατότητα μεταγωγής»

(“conductance”) του πίνακα πιθανοτήτων ως $\Phi(\mathbf{P}) = \min_{S \subset V} \frac{\sum_{i \in S, j \in V \setminus S} \pi_i \cdot P_{ij}}{\pi(S) \cdot \pi(V \setminus S)}$.

2.6.2. Στοχαστικός Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων

Σε αυτή την ενότητα θα περιγράψουμε επί της αρχής έναν Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων για υπολογισμό του αθροίσματος επί του αρχικού διανυσμάτων των τοπικών μεταβλητών $\mathbf{x}^0 = [x_1^0 \dots x_N^0]$ ενός δικτύου N κόμβων, ο οποίος διαφοροποιείται σε σχέση με την πολιτική ανανέωσης της τοπικής πληροφορίας μέσω γραμμικών σχέσεων (ενότητα 2.3.2). Έστω λοιπόν ότι επιθυμούμε κάθε κόμβος να υπολογίσει με ακρίβεια δ μία εκτίμηση της μεταβλητής x^0 και επίσης έστω ότι υποθέτουμε ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου διαθέτουν τη σωστή εκτίμηση με πιθανότητα $1-\varepsilon$ για ένα δεδομένο $\varepsilon \in (0, \frac{1}{2})$. Επιτρέπουμε λοιπόν στους κόμβους να κατασκευάσουν θ τυχαίους αριθμούς γύρο από την τοπική του τιμή x_i^0 με τυπική απόκλιση ε και διασπορά δ , έτσι ώστε καθένας από αυτούς να έχει ένα διάνυσμα τοπικών μεταβλητών $\mathbf{y}_i = [y_i(1) \dots y_i(\theta)]$. Το πλήθος των απαιτούμενων τυχαίων αριθμών

για να επιτύχουμε σύγκλιση αποδεικνύεται ότι είναι ίσο με $\theta = 3 \cdot \delta^{-2} \cdot \ln(\frac{4}{\varepsilon})$. Στη

συνέχεια επιτρέπουμε στους κόμβους να επιλέξουν ομότιμο κόμβο για αμοιβαία ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με τις θ τοπικές μεταβλητές \mathbf{y}_i με στόχο να υπολογίσουν τις ελάχιστες τιμές $\mathbf{y}_{\min}^\theta = \min_i \mathbf{y}_i^\theta$ για καθεμία από αυτές και τελικά να υπολογίσουν την

εκτίμηση τους για το άθροισμα χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση εκτίμησης $\sum_{l=1}^{\theta} \hat{\mathbf{y}}_i(\theta)$, όπου

$\hat{\mathbf{y}}_i$ αποτελεί την εκτίμηση του κόμβου i για τα θ ελάχιστα.

2.6.3. Σύγκλιση στο στοχαστικό Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων

Προκειμένου να υπολογιστεί τοπικά η ελάχιστη τιμή ενός μεγέθους μέσω του στοχαστικού Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων, οι κόμβοι επικοινωνούν ανά δύο με τυχαίο τρόπο και ανανεώνουν την τοπική τους πληροφορία συγκρίνοντας τη δική τους τιμή με την

τιμή του γείτονα. Αποδεικνύεται [36] ότι απαιτούνται $O(\frac{\log N + \log \varepsilon^{-1}}{\Phi(\mathbf{P})})$ γύροι μέχρι όλοι

οι κόμβοι να συγκλίνουν στο καθολικό ελάχιστο με πιθανότητα $1-\varepsilon$. Χρησιμοποιώντας αυτή την ιδιότητα και επεκτείνοντας τη σύγκλιση στα θ ελάχιστα που εισάγαμε για τον υπολογισμό του αθροίσματος έχουμε ότι οι κόμβοι του γράφου έχουν με πιθανότητα $1-\varepsilon$

μία εκτίμηση του αθροίσματος με ακρίβεια δ , έπειτα από $O\left(\frac{\log N + \log \varepsilon^{-1} + \log \delta^{-1}}{\delta^2 \cdot \Phi(\mathbf{P})}\right)$ γύρους.

2.6.4. Αποτελέσματα στοχαστικού αλγόριθμου

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται κάποιες σημαντικές ιδιότητες του στοχαστικού Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων υπό το πρίσμα των δικτύων αισθητήρων που επικοινωνούν με την έννοια του ad-hoc.

2.6.4.1. Τυχαίος γεωμετρικός γράφος επικοινωνίας

Πολύ συχνά σε εφαρμογές ad-hoc υποθέτουμε ότι ένα δίκτυο N κόμβων συνδέεται μέσω ενός γράφου, η τοπολογία του οποίου υπαγορεύεται από μία ακτίνα μετάδοσης $Range$, κάτι σαν την εμβέλεια του επικοινωνιακού μέσου. Μπορούμε να ορίσουμε τον τυχαίο γράφο $G(N, Range)$, έτσι ώστε να έχουμε ένα πλέγμα N κόμβων με επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων αν αυτοί απέχουν το πολύ απόσταση $Range$. Για να είναι συνδεδεμένος ο γράφος προφανώς θα πρέπει να επιλεγθεί κατάλληλο επικοινωνιακό μέσο με εμβέλεια $Range$ έτσι ώστε $\frac{N \cdot Range}{\log N} > 0$. Μπορούμε να κατασκευάσουμε τον πίνακα πιθανοτήτων για τη μετάδοση κάποιας πληροφορίας στον τυχαίο γράφο ως εξής:

$$\mathbf{P}_{ij} = \begin{cases} 0.5, & i = j \\ 0.5 \cdot d_i^{-2}, & j \in N_i \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

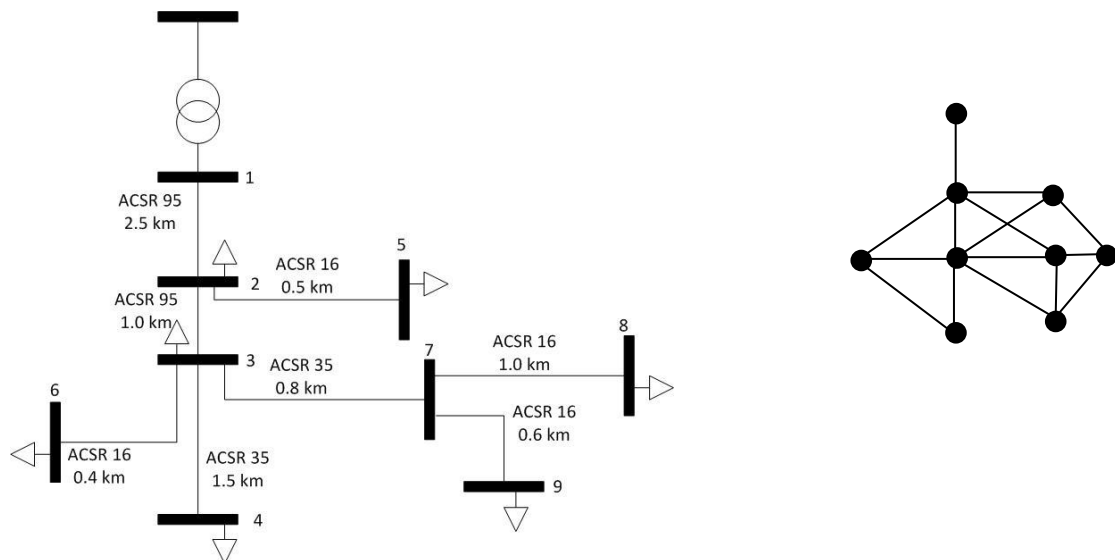
Τελικώς μέσω του ορισμού των ιδιοτήτων του πίνακα \mathbf{P} και της στατικής κατανομής π , προκύπτει ότι για την ανάμιξη της πληροφορίας από τυχαίες διαδρομές επί ενός τυχαίου γράφου απαιτούνται $O(Range^{-2} \cdot \log N)$ γύροι.

2.6.4.2. Εφαρμογή στοχαστικού Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων στο δίκτυο 9 κόμβων

Θεωρώντας το ακτινικό δίκτυο 9 κόμβων, κατασκευάζουμε τον αντίστοιχο γράφο αναπαράστασης του επικοινωνιακού δικτύου υπό το πρίσμα των στοχαστικών Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.

Οι επικοινωνιακές συνδέσεις δεν αποτελούν πλέον ντετερμινιστικές επιλογές των κόμβων κατά το στάδιο ανταλλαγής πληροφοριών, αλλά ουσιαστικά αποτελούν ένα σύνολο πιθανών γειτόνων για ανταλλαγή της πληροφορίας, σύμφωνα με το σχήμα του γεωμετρικού γράφου.

Έστω ότι σε αυτά τα πλαίσια επιθυμούμε να υπολογίσουμε το άθροισμα των αρχικών τιμών όλων των κόμβων, δηλαδή το μέγεθος $\sum x_i$. Αρχικά οι κόμβοι υπολογίζουν τυχαίες μεταβλητές με μέση τιμή το x_i . Εάν υποθέσουμε ακρίβεια 10^{-2} το πλήθος των τυχαίων μεταβλητών που απαιτούνται για τη σύγκλιση είναι $\theta = 3 \cdot \delta^{-2} \cdot \ln\left(\frac{4}{\varepsilon}\right)$, εν προκειμένω είναι της τάξης των $45 \cdot 10^3$.



Σχήμα 2.2: Τοπολογία δικτύου 9 κόμβων και στοχαστικός επικοινωνιακός γράφος

Στη συνέχεια κάθε κόμβος ανταλλάσσει αμοιβαία με κάποιον από τους πιθανούς γείτονες την πληροφορία για τις $45 \cdot 10^3$ τυχαίες μεταβλητές και σταδιακά υπολογίζεται η ελάχιστη τιμή καθεμίας από αυτές τις τυχαίες μεταβλητές. Για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής χρησιμοποιείται η λογική της διάδοσης πληροφορίας με τυχαίο τρόπο μεταξύ των γειτονικών κόμβων, οι οποίοι βρίσκονται εντός της εμβέλειας του γεωμετρικού γράφου με κέντρο καθέναν από τους κόμβους. Τελικά έπειτα από 6-9 ανακυκλώσεις όλοι οι κόμβοι γνωρίζουν μία εκτίμηση της ελάχιστης τιμής καθεμίας από τις $45 \cdot 10^3$ τυχαίες μεταβλητές και είναι σε θέση να υπολογίσουν την εκτίμησή τους για το άθροισμα. Είναι φανερό ότι στην περίπτωση του στοχαστικού Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων απαιτείται πολύ μεγαλύτερος όγκος ανταλλαγής πληροφοριών σε σχέση με το ντετερμινιστικό, αλλά ταυτόχρονα απαιτείται πολύ μικρότερο πλήθος επαναλήψεων. Σε περιπτώσεις μεγάλων δικτύων, και ειδικά όταν η τηλεπικοινωνιακή τοπολογία δεν είναι προκαθορισμένη, η επιλογή του στοχαστικού αλγορίθμου ενδεχομένως να αποτελεί μία πιο αποδοτική επιλογή. Ωστόσο η αξιοπιστία του επικοινωνιακού μέσου και η τηλεπικοινωνιακή καθυστέρηση λόγω του μεγάλου όγκου πληροφοριών αποτελεί έναν παράγοντα που θα πρέπει να συνεκτιμηθεί σε αυτή την επιλογή.

2.7. Σύνοψη και συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο της διατριβής εισάγεται η θεωρία ομότιμων κόμβων και πραγματοποιείται ένας πρώτος συσχετισμός με τον αποκεντρωμένο έλεγχο δικτύων διανομής. Ιδιαίτερη αναφορά πραγματοποιείται στον υπερκείμενο γράφο μετάδοσης των πληροφοριών, ο οποίος μπορεί να ταυτίζεται με το γράφο αναπαράστασης του δικτύου διανομής, ιδίως εάν η τεχνολογία επικοινωνιών είναι το PLC. Παρουσιάζονται χρήσιμες ιδιότητες από τη φασματική θεωρία γράφων και το μαθηματικό υπόβαθρο που σχετίζεται με τη διάδοση πληροφοριών σε γράφους και δέντρα, έτσι ώστε να θεμελιωθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης που σχετίζεται με την επιλογή των κατάλληλων βαρών. Σύμφωνα με τη θεωρία Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων και τις βασικές ιδιότητές τους, κάθε κόμβος που μετέχει σε αυτούς οφείλει να ανταλλάσσει πληροφορίες με τους κόμβους στη γειτονιά του, να τις επεξεργάζεται και εν τέλει όλοι οι κόμβοι να αποκτούν πρόσβαση σε μία κοινή γνώση, με αποκεντρωμένο τρόπο. Οι υπολογισμοί κατά το στάδιο της επεξεργασίας της

πληροφορίας οφείλουν να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα πολυπλοκότητας. Οι αλγόριθμοι ομότιμων κόμβων είναι δυνατό να κατηγοριοποιηθούν σε ντετερμινιστικούς και στοχαστικούς, καθώς επίσης και σε ενεργούς ή παθητικού τύπου, λαμβάνοντας υπόψη κυρίως τον τρόπο επιλογής των ομότιμων κόμβων γειτονιάς. Μια επιπλέον σημαντική συνιστώσα αποτελούν οι τοπικοί υπολογισμοί, που πραγματοποιεί κάθε κόμβος.

Η συνεισφορά της διατριβής αφορά την ανάπτυξη αλγορίθμου για την επιλογή κατάλληλων βαρών, ώστε να εξασφαλίζεται και να επιταχύνεται η σύγκλιση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων. Ο αλγόριθμος έχει υλοποιηθεί σε περιβάλλον Matlab και εφαρμόζεται κατά τη φάση ανάλυσης της τοπολογίας των εξεταζόμενων δικτύων, πριν την εφαρμογή των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων για διαχείριση.

Από τα αποτελέσματα για την επιτάχυνση του ρυθμού σύγκλισης μέσω προσομοιώσεων σε πειραματικά δίκτυα, είναι εμφανής η επίπτωση της επιλογής του πίνακα βαρών στο πλήθος των γύρων Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων και μάλιστα παρατηρείται μία μείωση κατά 30-50% στις απαιτούμενες ανακυκλώσεις.

Εφόσον η τοπολογία του δικτύου διανομής θεωρείται σταθερή για μεγάλα χρονικά διαστήματα, στη συνέχεια της διατριβής επιλέγονται ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι ομότιμων κόμβων για τις εφαρμογές των δικτύων διανομής, με την επιλογή των κατάλληλων βαρών να πραγματοποιείται ως αποτέλεσμα των αλγορίθμων του παρόντος κεφαλαίου, πριν από την εφαρμογή του αποκεντρωμένου ελέγχου.

Στη συνέχεια της διατριβής προχωρούμε προς την πρόταση Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, αναλύοντας τα προβλήματα βελτιστοποίησης για τον αποκεντρωμένο έλεγχο των δικτύων διανομής, με τέτοιο τρόπο, ώστε οι εξισώσεις που προκύπτουν αφενός να μπορούν να ενσωματωθούν στους εσωτερικούς υπολογισμούς των ομότιμων κόμβων και αφετέρου να εξασφαλίζουν ότι έπειτα από ένα πεπερασμένο πλήθος γύρων θα έχουμε σύγκλιση στη βέλτιστη λύση.

3

Αλγόριθμοι ομότιμων κόμβων για υπολογισμούς ροών φορτίου σε δίκτυα διανομής

3.1. Γενικά

Τα δίκτυα διανομής και η ενεργή διαχείρισή τους με βάση τους λειτουργικούς περιορισμούς αποκτούν τα τελευταία χρόνια συνεχώς αυξανόμενη σημασία, καθώς η ένταξη νέων τύπων φορτίων και διεσπαρμένων πηγών ακόμη και σε κόμβους ΧΤ εισάγει επιπλέον πολυπλοκότητα και νέες προκλήσεις, αλλά και νέες προοπτικές ελέγχου και διαχείρισης. Επιπρόσθετα, οι εξελίξεις των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών ενσωματώνονται πλέον ταχύτατα και σε επίπεδο δικτύων διανομής επιτρέποντας την εκτέλεση υπολογισμών τοπικά καθώς και την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ γειτονικών κόμβων του δικτύου. Με αφορμή αυτές τις νέες δυνατότητες είναι δυνατό να σχεδιαστούν και να εφαρμοστούν μία πληθώρα από εφαρμογές, οι οποίες υλοποιούνται σε τοπικό επίπεδο προς αντιμετώπιση των νέων προκλήσεων-προβλημάτων, τα οποία παρουσιάζουν συνήθως τοπικό χαρακτήρα και απαιτούν άμεση δράση προκειμένου να μην έχουν ευρύτερες επιπτώσεις σε μεγαλύτερη έκταση του δικτύου διανομής.

Ο σχεδιασμός των εν λόγω εφαρμογών και αλγορίθμων προϋποθέτει τη διερεύνηση κατανεμημένων λύσεων της ροής φορτίου, ώστε να γίνουν γνωστά σε τοπικό επίπεδο τα ηλεκτρικά μεγέθη που είναι απαραίτητα για την έναρξη και την υλοποίηση των εφαρμογών διαχείρισης των δικτύων.

Το πρόβλημα της ροής φορτίου, δηλαδή η κατάσταση και η επίλυση εξισώσεων που περιγράφουν πλήρως την κατάσταση ενός δικτύου αποτελεί ένα θεμελιώδες πρόβλημα στη θεωρία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Η κλασική διατύπωση του προβλήματος είναι μη γραμμική, καθώς οι εξισώσεις που περιγράφουν το ΣΗΕ και την κατάσταση των φορτίων και των πηγών έχουν μη γραμμική εξάρτηση. Η συνηθισμένη

τακτική επίλυσή του είναι οι επαναληπτικές μέθοδοι μέσω αριθμητικών μεθόδων, είτε για χρήση σε εφαρμογές ανάλυσης (offline) είτε σε εφαρμογές εποπτείας σε πραγματικό χρόνο (real-time). Μία συνηθισμένη παραδοχή απλοποίησης των εξισώσεων ροής φορτίου δημιουργεί προσεγγιστικές σχέσεις μεταξύ των τάσεων στους ζυγούς του δικτύου, αμελώντας είτε την αντίσταση είτε την αντίδραση των γραμμών του δικτύου αναλόγως εάν πρόκειται για δίκτυο μεταφοράς ή διανομής.

Η παρούσα διατριβή εστιάζει σε δίκτυα διανομής, τα οποία παρουσιάζουν κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες που θα χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια για να προτείνουμε την εφαρμογή Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων για τον υπολογισμό προσεγγιστικών αποτελεσμάτων της ροής φορτίου.

Τα συμμετρικά δίκτυα διανομής με ακτινική τοπολογία θεωρούμε ότι, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, έχουν ένα κοινό σημείο σύνδεσης με το δίκτυο μεταφοράς και ότι οι ροές στους κλάδους τους ενδέχεται να είναι και προς τις δύο κατευθύνσεις, καθώς σε αυτά συνδέονται διαφόρων τύπων φορτία και διεσπαρμένες πηγές παραγωγής. Κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από την τάση V_i και το ρεύμα έγχυσης/απορρόφησης I_i , καθώς επίσης και από μία σχέση μεταξύ τους. Ο κόμβος κοινής σύνδεσης με το δίκτυο μεταφοράς χαρακτηρίζεται ως κόμβος τύπου PQ. Θεωρούμε όλους τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου ως κόμβους PQ, αφού υποθέτουμε ότι οι μεταβολές της ενεργού και αέργου ισχύος τους είναι ανεξάρτητες από τη μεταβολή στην τάση. Η φαινόμενη ισχύς που εγχέεται/απορροφάται σε κάθε κόμβο i θεωρούμε ότι περιγράφεται με μία σχέση της μορφής $S_i = V_i \cdot \bar{I}_i$, όπου $S_i = P_i + j \cdot Q_i$. Καθώς οι εγχύσεις των κόμβων θεωρούνται δεδομένες, οι τάσεις σε όλους τους κόμβους του δικτύου προσδιορίζονται με τις εξισώσεις ροής φορτίου:

$$P_i = V_i \cdot \sum_{j=1}^N V_j \cdot (G_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (3.1)$$

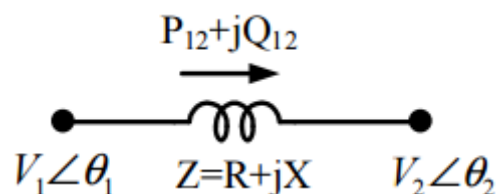
$$Q_i = V_i \cdot \sum_{j=1}^N V_j \cdot (G_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j)) \quad (3.2)$$

Όπου G_{ij} και B_{ij} είναι το πραγματικό και φανταστικό μέρος του αντίστοιχου στοιχείου της μήτρας αγωγιμοτήτων Y_{ij} του δικτύου.

3.2. Απλοποίηση συναρτήσεων ροής φορτίου για τα δίκτυα διανομής

Η πιο συνηθισμένη απλοποίηση του προβλήματος ροής φορτίου είναι η αγνόηση των άεργων εγχύσεων στους διάφορους κόμβους, κατάστρωση που ονομάζεται DC ροή φορτίου. Ωστόσο μία τέτοια απλοποίηση ενδέχεται να δημιουργεί μεγάλα σχετικά σφάλματα όταν η άεργος ισχύς παίζει σημαντικό ρόλο. Στη συνέχεια ακολουθεί μία ανάλυση της απλοποίησης των εξισώσεων θεωρώντας ότι οι γραμμές στα δίκτυα διανομής παρουσιάζουν κυρίως ωμικό χαρακτήρα, δηλαδή ότι $R \gg X$.

Έστω το δίκτυο δύο κόμβων:



Η ροή μεταξύ των κόμβων αυτών υπολογίζεται ως

$$P_{12} = \frac{R}{Z^2} \cdot (V_1^2 - V_1 \cdot V_2 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2)) + \frac{X}{Z^2} \cdot V_1 \cdot V_2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (3.3)$$

$$Q_{12} = \frac{X}{Z^2} \cdot (V_1^2 - V_1 \cdot V_2 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2)) + \frac{R}{Z^2} \cdot V_1 \cdot V_2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (3.4)$$

Θεωρώντας ότι οι κόμβοι έχουν πολύ μικρή διαφορά φάσης υποθέτουμε ότι $\sin \theta_{12} \cong \theta_1 - \theta_2$ και ότι $\cos \theta_{12} \cong 1$. Επίσης στα δίκτυα διανομής έχουμε ότι $R \gg X$ που σημαίνει ότι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι $Z \cong R$ και $X \cong 0$. Με βάση τις υποθέσεις αυτές έχουμε τις παρακάτω απλοποιημένες σχέσεις:

$$P_{12} = \frac{V_1}{R} \cdot (V_1 - V_2) \quad (3.5)$$

$$Q_{12} = -\frac{V_1 \cdot V_2}{R} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (3.6)$$

Επίσης από τις εξισώσεις ροής φορτίου θεωρώντας τις επαγωγικές αντιδράσεις των κλάδων αμελητέες, έχουμε

$$P_k^G - P_k^L = \sum_{i=1}^N V_k V_i [G_{ki} \cos(\theta_k - \theta_i)] \quad (3.7)$$

$$Q_k^G - Q_k^L = \sum_{i=1}^N V_k V_i [G_{ki} \sin(\theta_k - \theta_i)] \quad (3.8)$$

Επιπλέον θεωρώντας ότι οι διαφορές φάσης μεταξύ γειτονικών κόμβων είναι μικρές, θέτουμε $\cos(\theta_k - \theta_i) \cong 0$ και $\sin(\theta_k - \theta_i) \cong \theta_k - \theta_i$ σε ακτίνια. Κατά συνέπεια μπορούμε να έχουμε μία ακόμη απλοποιημένη εκδοχή των εξισώσεων:

$$P_k^G - P_k^L = \sum_{i=1}^N V_k V_i G_{ki} \quad (3.9)$$

$$Q_k^G - Q_k^L = \sum_{i=1}^N V_k V_i [G_{ki} \cdot (\theta_k - \theta_i)] \quad (3.10)$$

3.3. Αρίθμηση κόμβων σε δίκτυα διανομής και μήτρα αθροιστικής σύνθετης αντίστασης

Σε ένα ακτινικό δίκτυο διανομής με N κόμβους και $N-1$ κλάδους, οι κόμβοι μπορούν να αριθμηθούν με βάση τον κανόνα ότι η αφετηρία ή κόμβος με την αρίθμηση «0» θεωρείται η αρχή του δέντρου (συνήθως ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ) και οι υπόλοιποι κόμβοι αριθμούνται συνεχόμενα με την αρίθμηση να αυξάνεται όσο οι κόμβοι βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από την αφετηρία [42][43]. Στην πραγματικότητα αυτή η θεώρηση της αύξουσας αρίθμησης έδειχνε τη ροή της ισχύος κατά την έννοια των κλασικών δικτύων διανομής, όταν ο κόμβος αφετηρία ήταν η μοναδική πηγή τροφοδότησης. Η αρίθμηση των κλάδων ακολουθεί την αρίθμηση των κόμβων και συγκεκριμένα κάθε κλάδος έχει τον ίδιο αριθμό με τον μεγαλύτερο σε αριθμό κόμβο. Η συγκεκριμένη μέθοδος αρίθμησης διευκολύνει την αναπαράσταση του δικτύου με έναν και μόνο πίνακα πρόσπτωσης A , διαστάσεων $M \times M$, στον οποίο οι γραμμές αντιστοιχούν στους M κλάδους και οι στήλες στους M κόμβους, με μηδενικά στοιχεία παντού εκτός από κάποιες θέσεις (i, j) που περιέχουν «1» όταν ο κόμβος

j τροφοδοτείται μέσω του κλάδου i . Η λογική αυτής της αναπαράστασης διευκολύνει επιπλέον τον υπολογισμό των ρών στους κλάδους και τις αντίστοιχες πτώσεις τάσης, και μάλιστα με εξισώσεις οι οποίες είναι δυνατό να υλοποιηθούν αποκεντρωμένα ως διαχωρίσιμες συναρτήσεις κατά τον ορισμό της ενότητας 2.5 .

Θεωρούμε, επιπρόσθετα, ότι ο γράφος G χαρακτηρίζεται από έναν πίνακα αγωγιμοτήτων Y και έναν πίνακα σύνθετης αντίστασης $Z_b \in \mathbb{R}^{M \times 1}$, όπου M είναι το πλήθος των κλάδων. Προφανώς στην ακτινική διαμόρφωση του δικτύου διανομής έχουμε $M = N - 1$. Αμελώντας τις εγκάρσιες αγωγιμότητες έχουμε ότι ο πίνακας αγωγιμοτήτων ικανοποιεί τη σχέση $Y \cdot \mathbf{1} = 0$, όπου το « $\mathbf{1}$ » εδώ είναι διάνυσμα διάστασης ίσης με το πλήθος των κλάδων του δικτύου και με όλα στοιχεία του διανύσματος ίσα με ένα. Από τη σχέση $Y \cdot \mathbf{1} = 0$ και τη μορφή του πίνακα Laplace του γράφου αναπαράστασης του δικτύου, προκύπτει ότι η μήτρα αγωγιμοτήτων Y έχει όμοια μορφή με τον πίνακα Laplace, με τη διαφορά ότι τα μη μηδενικά στοιχεία είναι οι τιμές των αγωγιμοτήτων των αντίστοιχων κλάδων και όχι απλώς η ένδειξη ότι επικοινωνούν οι κόμβοι που σχετίζονται με το συγκεκριμένο στοιχείο του πίνακα. Επίσης σύμφωνα με την τοπολογία του δικτύου και με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γραμμών, κατασκευάζεται ο πίνακας αθροιστικών σύνθετων αντιστάσεων $Z \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ως εξής

$$z_{ij} = \begin{cases} \sum_{l \in \text{path}(i)} z_b(l), & \text{για } i = j \\ \sum_{l \in \{\text{path}(i) \cap \text{path}(j)\}} z_b(l), & \text{για } i \neq j \end{cases} \quad (3.11)$$

, όπου $\text{path}(i)$ υποδηλώνει την αλληλουχία κόμβων, οι οποίοι σχηματίζουν ένα αγωγίμο μονοπάτι μεταξύ του κόμβου αφετηρία και του κόμβου i . Ο πίνακας Z μπορεί να παίξει το ρόλο του πίνακα βαρών για υπολογισμό πολλών μεγεθών του δικτύου μέσω γραμμικών εξισώσεων της μορφής (2.2) της ενότητας 2.4.3.

3.4. Κατανεμημένος υπολογισμός τάσεων σε ακτινικό δίκτυο

Με βάση το [43] η τάση στον κόμβο i του δικτύου διανομής, είναι δυνατό να υπολογιστεί από την ακόλουθη γραμμική σχέση:

$$V_i = V_{feeder} - \sum_{j=1}^n z_{ij} \cdot I_{load,j} \quad (3.12)$$

Όπου το $I_{load,j}$ είναι το ρεύμα που εγχέεται στον κόμβο j .

Θεωρώντας δε παραγωγούς και καταναλωτές με σταθερό συντελεστή ισχύος η παραπάνω σχέση γράφεται ως εξής:

$$V_i = V_{feeder} - \sum_{j=1}^n z_{ij} \cdot \frac{P_j - i \cdot Q_j}{(V_j)^*} \quad (3.13)$$

όπου $(V_j)^*$ είναι ο συζυγής για την τάση στον κόμβο j .

Η θεώρηση του σταθερού συντελεστή ισχύος είναι ικανοποιητική για τις περιπτώσεις φορτίων P-Q και για μικροπηγές που συνδέονται στο δίκτυο διανομής και δεν έχουν υποχρέωση παροχής αέργου ισχύος, οπότε κατά μία έννοια μοιάζουν με αρνητικά φορτία P-Q. Συνεπώς η τάση σε κάθε κόμβο i μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (3.13).

Καθώς η σχέση (3.13) περιλαμβάνει μία άθροιση, οι κόμβοι μπορούν να κάνουν χρήση του Αλγορίθμου 1, που παρουσιάζεται στην ενότητα 3.6, έτσι ώστε με κατάλληλη αρχικοποίηση να υπολογιστεί με κατανεμημένο τρόπο η τάση καθενός από αυτούς, χρησιμοποιώντας ως κανόνα ανανέωσης της τοπικής πληροφορίας έναν σταθμισμένο μέσο όρο των πτώσεων τάσης στη γειτονιά τους. Συγκεκριμένα κάθε κόμβος $j \in V$ συμμετέχει στον υπολογισμό της (3.13), για τον κόμβο i θέτοντας σαν αρχική τιμή τη μεταβολή της τάσης που προκαλεί η απορρόφηση ή η έγχυση ισχύος στον κόμβο j επί το συντελεστή αθροιστικής αγωγιμότητας z_{ij} , όπως αυτός έχει οριστεί στη σχέση (3.11).

3.5. Κατανεμημένος υπολογισμός ρευμάτων κλάδων και απωλειών

Στο πλαίσιο των υπολογισμών των ρών φορτίου απαιτείται επίσης ο υπολογισμός των ρευμάτων σε όλους τους κλάδους του δικτύου καθώς επίσης και των απωλειών. Θεωρώντας τις τάσεις δύο γειτονικών κόμβων V_i και V_j γνωστές έχουμε ότι το ρεύμα του συγκεκριμένου κλάδου μπορεί να υπολογιστεί ως

$$I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{z_{ij}} \quad (3.14)$$

Οι απώλειες στον κλάδο αυτό υπολογίζονται ως

$$Losses_{ij} = I_{ij}^2 \cdot z_{ij} \quad (3.15)$$

Σύμφωνα με την ενότητα 3.4 οι τάσεις των κόμβων είναι δυνατό να υπολογιστούν με κατανεμημένο τρόπο ως σταθμισμένα αθροίσματα. Συνεπώς κάθε κόμβος έχει πρόσβαση στον υπολογισμό αυτό και επικοινωνώντας με τους γειτονικούς του κόμβους είναι σε θέση να υπολογίσουν από κοινού τα ρεύματα και τις απώλειες των κλάδων χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.14) και (3.15).

3.6. Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων για τον υπολογισμό της συνολικής ζήτησης και της τάσης κάθε κόμβου

Ο υπολογισμός αθροίσματος επί των τιμών ενός φυσικού μεγέθους $x_{i,0}$, το οποίο σχετίζεται με τον κόμβο i , είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί μέσω μίας τροποποιημένης εκδοχής του Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων τύπου “push”, ο οποίος αναλύεται παρακάτω ως Αλγόριθμος 1. Έστω ότι έχουμε αρχικοποιήσει κατάλληλα ένα βοηθητικό διάνυσμα s_0 έτσι ώστε $s_0 \in S$, όπου $S = \{s \in \mathcal{R}^N, s_{0,i} = 0, \forall i \in V \text{ and } i \neq 1, s_{0,i} = 1 \text{ for } i = 1\}$.

Έστω ότι συμβολίζουμε με r έναν γύρο ή μία ανακύκλωση του Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων. Με x_{AV} συμβολίζουμε ένα διάνυσμα διάστασης $1 \times N$, το οποίο περιέχει τη μέση τιμή όλων των αρχικών τιμών του φυσικού μεγέθους x . Με $x_{i,0}$, $x_{AV,r}^{est,i}$ και $x_{MIN,r}^{est,i}$ συμβολίζουμε τις τοπικές τιμές που διαθέτει ο κόμβος i για το μέγεθος x κατά τον πρώτο γύρο $r = 0$, καθώς και τη μέση και ελάχιστη τιμή αντίστοιχα. Τέλος, συμβολίζουμε με $v_{q,r+1}^{est,i}$ οποιαδήποτε τοπικά υπολογισμένη τιμή στον κόμβο i με βάση μια συνάρτηση q , κατά το γύρο $r + 1$.

Αλγόριθμος 1 Υπολογισμός αθροίσματος μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων

```

1: procedure GOSSIP( $x_i, w_{ii}, w_{ij} \in W: j \in N_i, threshold$ )
2: round  $r=0$ 
3:  $x_{AV,r}^{est,i} \leftarrow x_{i,0}$ 
4:  $s_r^{est,i} \leftarrow s_{i,0}$  // initialization varies according to the function
5: sends to all nodes  $j \in N_i$  the pair of values  $(x_{AV,r}^{est,i}, s_r^{est,i})$ 
6:  $error \leftarrow 1$ 
7: while  $error > threshold$ 
8:   round  $r=r+1$ 
9:   receives from all nodes  $j \in N_i$  their pair of values  $(x_{AV,r}^{est,j}, s_r^{est,j})$ 
10:  calculates  $x_{AV,r+1}^{est,i} = w_{ii} \cdot x_{AV,r}^{est,i} + \sum_{j \in N_i} w_{ij} \cdot x_{AV,r}^{est,j}$ 
11:              $s_{AV,r+1}^{est,i} = w_{ii} \cdot s_{AV,r}^{est,i} + \sum_{j \in N_i} w_{ij} \cdot s_{AV,r}^{est,j}$ 
12:              $v_{SUM,r+1}^{est,i} = x_{AV,r+1}^{est,i}$ 
13:   if  $s_{AV,r+1}^{est,i} > 0$  then
14:      $v_{SUM,r+1}^{est,i} = \frac{x_{AV,r+1}^{est,i}}{s_{AV,r+1}^{est,i}}$ 
15:   end if
16:    $error = |v_{SUM,r+1}^{est,i} - v_{SUM,r}^{est,i}|$ 
17:   sends to all nodes  $j \in N_i$  the pair of values  $(x_{AV,r+1}^{est,i}, s_{r+1}^{est,i})$ 
18: end while
19: return  $v_{AV,r+1}^{est,i}$ 
20: end procedure
    
```

Η απόδειξη ότι ο Αλγόριθμος 1 συγκλίνει προς το άθροισμα προκύπτει από την κατάλληλη επιλογή των στοιχείων του πίνακα των βαρών W , σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.4.3, ώστε να επιτύχουμε σύγκλιση του βήματος 10 του Αλγορίθμου 1 προς το μέσο όρο x_{AV} έπειτα από έναν πεπερασμένο αριθμό γύρων Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων. Το ίδιο ισχύει και για το βήμα 11, οπότε τελικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι μετά από κάποιους γύρους καθένας από τους κόμβους διαθέτει μία καλή εκτίμηση της μέσης τιμής των αρχικών ποσοτήτων, καθώς και του βοηθητικού διανύσματος. Εν προκειμένω η μέση τιμή του βοηθητικού διανύσματος είναι $s_{AV} = \underline{1}^T \cdot s_0 = \sum_{i=1}^n s_{i,0} = \frac{1}{n}$. Φτάνοντας λοιπόν στο βήμα 14, και εφόσον έχουμε εξασφαλίσει τη σύγκλιση στα βήματα 10 και 11 προς τις ποσότητες των συναρτήσεων x_{AV} και s_{AV} αντιστοίχως, το όριο της υπολογιζόμενης ποσότητας, καθώς εξελίσσονται οι ανακυκλώσεις του αλγορίθμου, είναι το εξής

$$\lim_{r \rightarrow \infty} v_{SUM,r}^{est} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{x_{AV,r}^{est}}{s_{AV,r}^{est}} = \frac{\lim_{r \rightarrow \infty} x_{AV,r}^{est}}{\lim_{r \rightarrow \infty} s_{AV,r}^{est}} = \frac{x_{AV}}{s_{AV}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_{i,0} \cdot \left(\frac{1}{n}\right)^{-1} = \sum_{i=1}^n x_{i,0}.$$

Συνεπώς μετά το βήμα 14 και έπειτα από έναν ικανό αριθμό γύρων Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων, καθένας από τους ομότιμους κόμβους, ο οποίος συμμετέχει στον Αλγόριθμο 1, διαθέτει τη δική του τοπικά υπολογισμένη εκτίμηση για το άθροισμα των αρχικών τιμών όλων των κόμβων, δηλαδή μία εκτίμηση της ποσότητας $x_{SUM} = \sum_{i=1}^n x_{i,0}$.

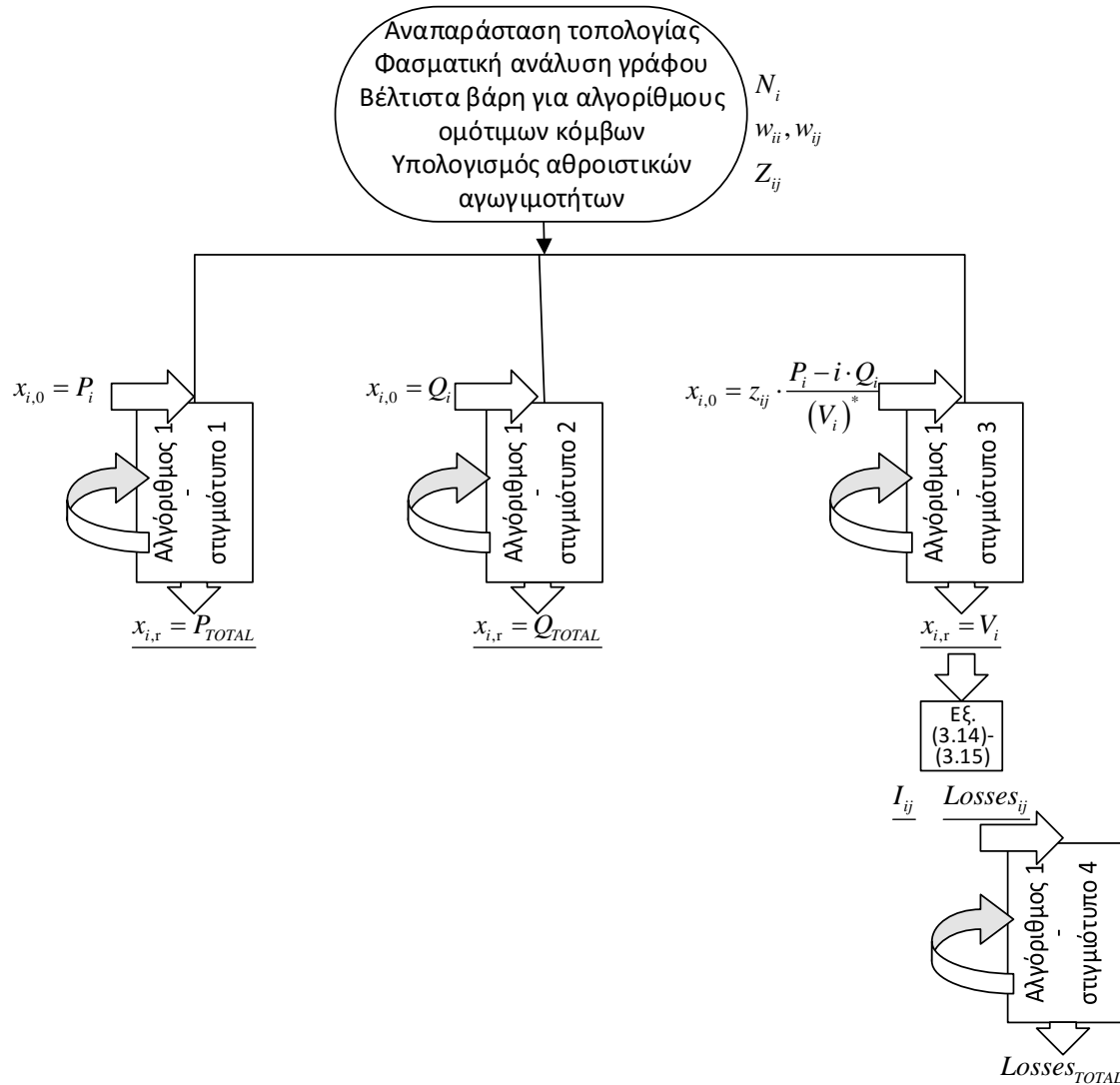
Ο Αλγόριθμος 1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση ροής φορτίου για τον υπολογισμό της συνολικής ζήτησης στην αρχή του δικτύου καθώς και για τις τάσεις, με τις κατάλληλες αρχικοποιήσεις.

Για τον υπολογισμό της συνολικής ζήτησης ως αρχικοποίηση θέτουμε $x_{i,0} = P_{i,0}$ ή $x_{i,0} = S_{i,0}$ αναλόγως εάν θέλουμε να υπολογίσουμε την ενεργό ή τη φαινόμενη ισχύ.

Ο υπολογισμός της τάσης προκύπτει από την εξίσωση (3.13) οπότε κάθε κόμβος προκειμένου να υπολογίσει το άθροισμα θέτει ως αρχική τιμή $x_{i,0} = z_{ij} \cdot \frac{P_i - i \cdot Q_i}{(V_i)^*}$.

3.7. Υπολογισμοί ροής φορτίου μέσω Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων

Στην ενότητα αυτή συνδυάζονται οι Αλγόριθμοι Ομότιμων Κόμβων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, με στόχο τον αποκεντρωμένο υπολογισμό των εξισώσεων (3.13)-(3.15). Επιπρόσθετα κάθε κόμβος του δικτύου υπολογίζει με αποκεντρωμένο τρόπο τη συνολική ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος, με στόχο τον προσδιορισμό της ροής φορτίου στην αρχή του δικτύου διανομής.



Σχήμα 3.1: Υπολογισμοί ροής φορτίου με αλγόριθμους ομότιμων κόμβων

3.8. Αποτελέσματα ροής φορτίου μέσω Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού των τάσεων, των ρευμάτων και των απωλειών σε δυο ακτινικά δίκτυα διανομής. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιείται ο πίνακας βέλτιστων βαρών W που έχει προσδιοριστεί μέσω των αλγορίθμων ελαχιστοποίησης της μεγαλύτερης ιδιοτιμής της μήτρας πρόσπτωσης (ενότητα 2.4.4) και εξαρτάται αποκλειστικά από την τοπολογία του δικτύου. Σε καθένα από τα δίκτυα που παρουσιάζονται δίνονται διαφορετικοί συνδυασμοί ζήτησης και παραγωγής, ως σενάρια, και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με την επίλυση κεντρικής ροής φορτίου (Power Flow – PF) του matpower. [58]

3.8.1. Ακτινικό δίκτυο 9 κόμβων

Θεωρούμε το ακτινικό δίκτυο 9 κόμβων, το οποίο έχει ήδη εξεταστεί στο Κεφάλαιο 2. Τα ανά μονάδα δεδομένα των αγωγιμοτήτων των κλάδων του δικτύου, ο γράφος αναπαράστασης και η επιλογή του βέλτιστου πίνακα βαρών δίνονται στο Παράρτημα Β1.

3.8.1.1. Σενάριο ζήτησης

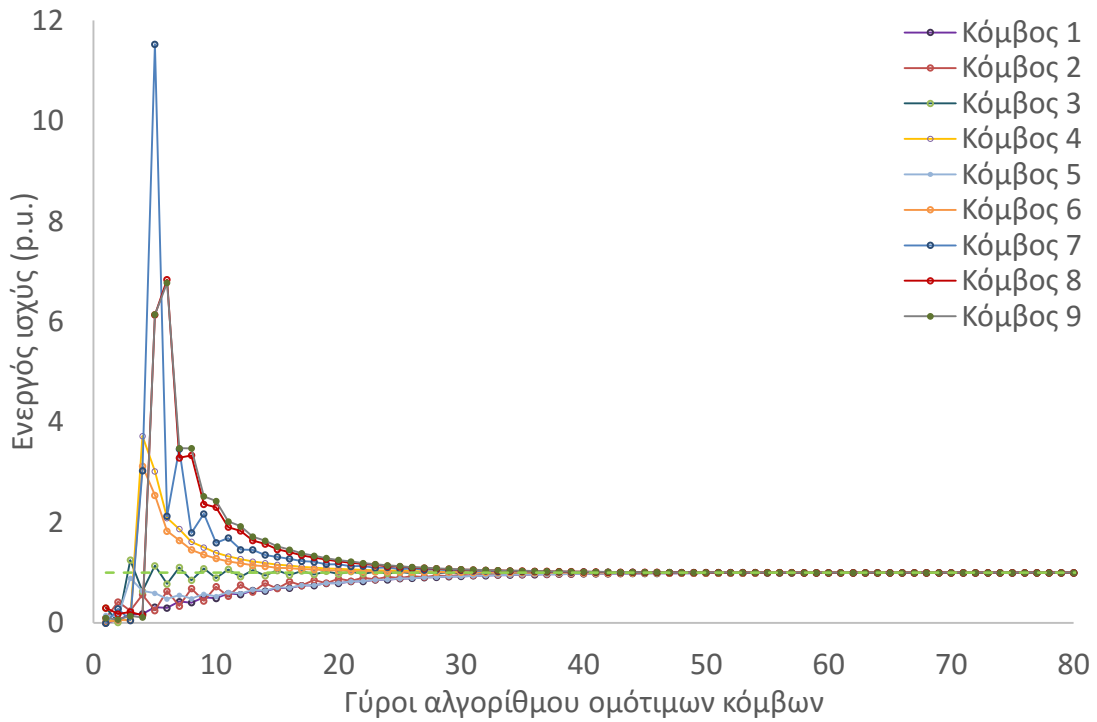
Για το πρώτο σενάριο, θεωρούμε ότι στο δίκτυο συνδέονται μόνο φορτία με το ακόλουθο προφίλ ζήτησης:

Πίνακας 3-1: Προφίλ ζήτησης στο δίκτυο 9 κόμβων (σενάριο ζήτησης)

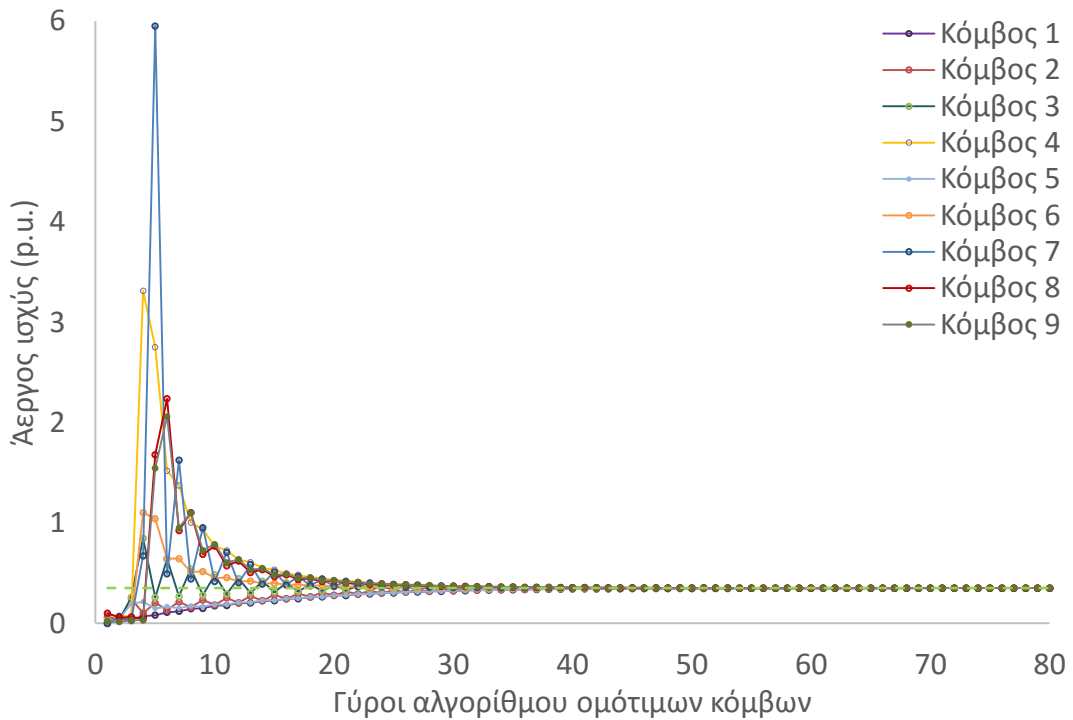
Κόμβος	P (p.u.)	Q (p.u.)
1	0,000	0,000
2	0,100	0,060
3	0,300	0,040
4	0,030	0,080
5	0,150	0,030
6	0,020	0,020
7	0,000	0,000
8	0,300	0,100
9	0,100	0,020

Στα Σχήματα 3.3 και 3.4 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ανανέωσης της τοπικής πληροφορίας σε καθέναν από τους κόμβους του δικτύου, καθώς εξελίσσονται οι γύροι του Αλγορίθμου 1, έως ότου έπειτα από περίπου 80 ανακυκλώσεις κάθε κόμβος συγκλίνει στον υπολογισμό της συνολικής ενεργού και αέργου ισχύος αντίστοιχα.

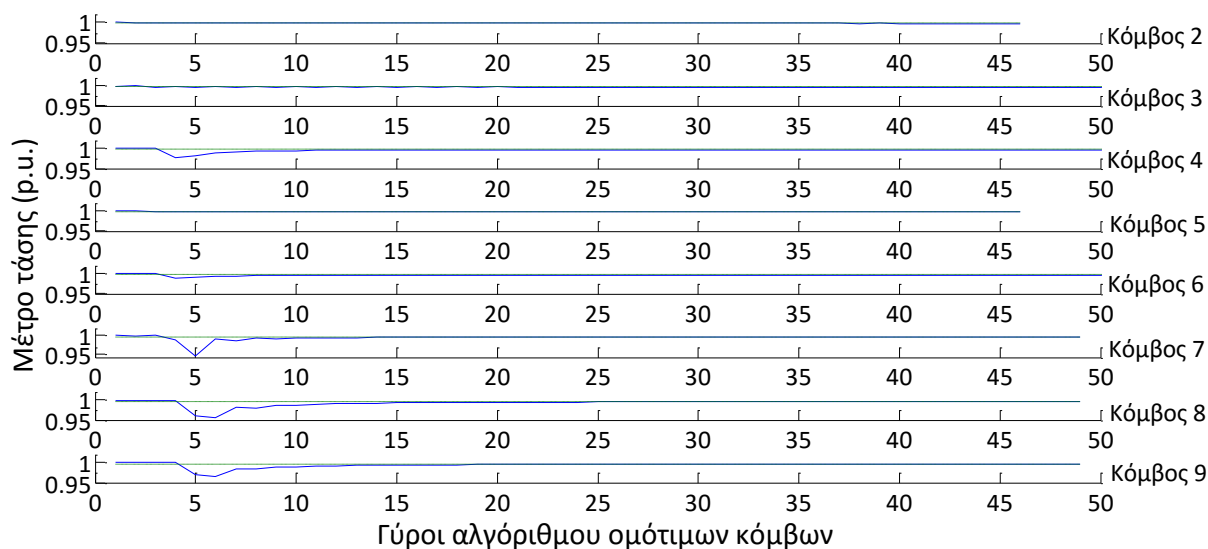
Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται για καθέναν από τους κόμβους σε ξεχωριστό γράφημα η εξέλιξη των τοπικών υπολογισμών στα πλαίσια των γύρων του Αλγορίθμου 1, έτσι ώστε έπειτα από 46-50 ανακυκλώσεις να διαθέτουν όλοι την εκτίμηση για την τάση τους. Με την πράσινη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται για λόγους σύγκρισης το μέτρο της τάσης όπως έχει υπολογισθεί από τον κεντρικό αλγόριθμο ροής φορτίου.



Σχήμα 3.2: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο ζήτησης)



Σχήμα 3.3: Υπολογισμοί συνολικής αεργού ισχύος (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο ζήτησης)



Σχήμα 3.4: Υπολογισμοί μέτρου τάσης (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο ζήτησης)

Στον Πίνακα 3-2 παρουσιάζεται το σχετικό σφάλμα των υπολογιζόμενων μεγεθών της ροής φορτίου μέσω του προτεινόμενου Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων σε σχέση με τα αποτελέσματα από το κεντρικό PF.

Πίνακας 3-2: Σφάλματα κατανεμημένων υπολογισμών σε σχέση με τον κεντρικό υπολογισμό μέσω matpower (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο ζήτησης)

Κόμβος/ Κλάδος	Σφάλμα μέτρου τάσης (%)	Σφάλμα γωνίας τάσης (ακτίνια)	Σφάλμα ρεύματος (%)	Σφάλμα απωλειών (%)
2	-0,202	-0,0016	1,251	1,854
3	-0,265	-0,0021	-0,309	-0,713
4	-0,283	-0,0020	0,303	0,515
5	-0,227	-0,0016	-0,870	-2,498
6	-0,268	-0,0021	-0,486	-1,209
7	-0,318	-0,0023	-0,613	-1,602
8	-0,421	-0,0023	-0,771	-2,135
9	-0,338	-0,0023	-0,845	-2,403

3.8.1.2. Μικτό σενάριο

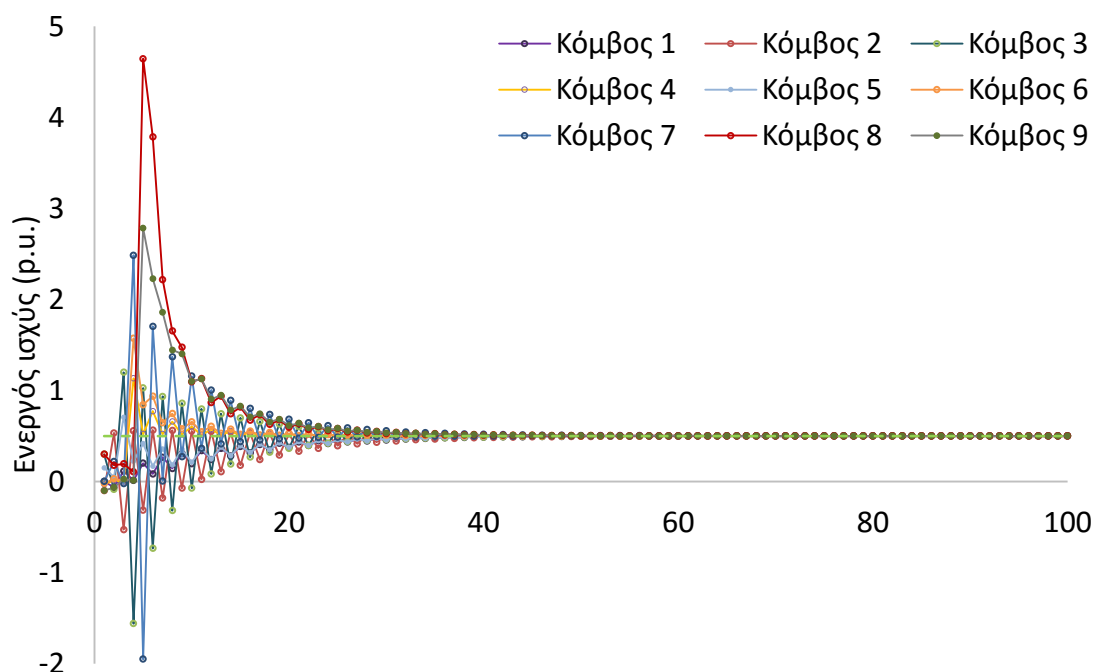
Για το δεύτερο σενάριο, θεωρούμε ότι στο δίκτυο συνδέονται τόσο φορτία όσο και διεσπαρμένες πηγές παραγωγής, με το ακόλουθο προφίλ ζήτησης/παραγωγής:

Πίνακας 3-3: Προφίλ ζήτησης/παραγωγής στο δίκτυο 9 κόμβων (μικτό σενάριο)

Κόμβος	P (p.u.)	Q (p.u.)
1	0,000	0,000
2	-0,100	0,060
3	0,300	0,040
4	-0,030	0,080
5	0,150	0,030
6	-0,020	0,020
7	0,000	0,000
8	0,300	0,100
9	-0,100	0,020

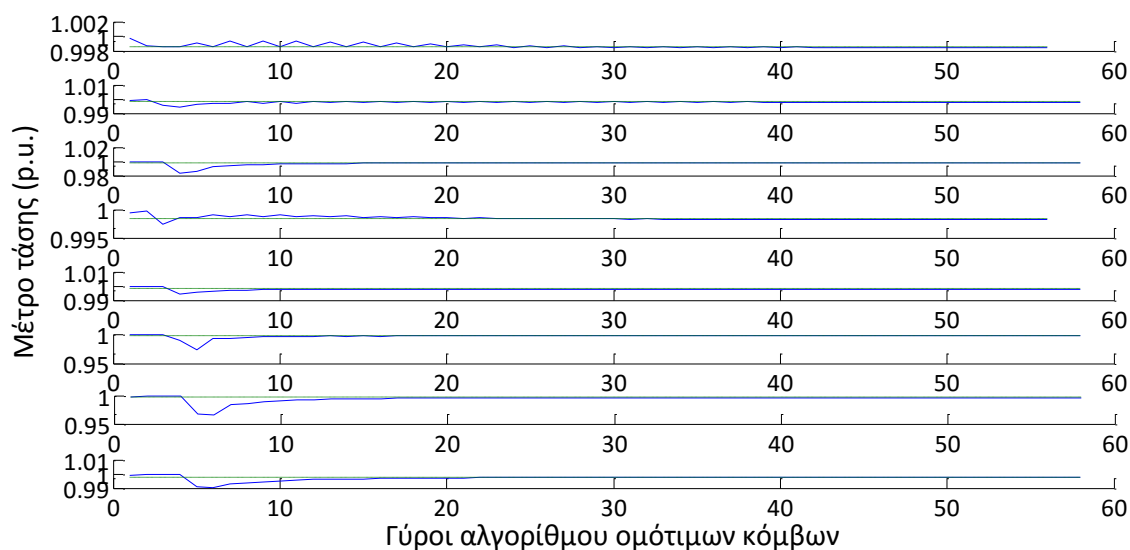
Ομοίως στα Σχήματα 3.5 και 3.6 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ανανέωσης της τοπικής πληροφορίας σε καθέναν από τους κόμβους του δικτύου, καθώς εξελίσσονται οι γύροι του Αλγορίθμου 1, έως ότου έπειτα από περίπου 100 ανακυκλώσεις κάθε κόμβος συγκλίνει στον υπολογισμό της συνολικής ενεργού ισχύος και έπειτα από περίπου 55 ανακυκλώσεις εκτιμά το μέτρο της τάσης του.

Επίσης, στον Πίνακα 3-4 παρουσιάζεται το σχετικό σφάλμα των υπολογιζόμενων μεγεθών της ροής φορτίου μέσω του προτεινόμενου Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων σε σχέση με τα αποτελέσματα από το κεντρικό PF.



Γύροι αλγορίθμου ομότιμων κόμβων

Σχήμα 3.5: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος (δίκτυο 9 κόμβων- μικτό σενάριο)



Σχήμα 3.6: Υπολογισμοί μέτρου τάσης (δίκτυο 9 κόμβων- μικτό σενάριο)

Πίνακας 3-4: Σφάλματα κατανεμημένων υπολογισμών (δίκτυο 9 κόμβων- μικτό σενάριο)

Κόμβος	Σφάλμα μέτρου τάσης (%)	Σφάλμα γωνίας τάσης (ακτίνια)	Σφάλμα ρεύματος (%)	Σφάλμα απωλειών (%)
2	-0,139	-0,0006	-0,547	-0,873
3	-0,185	-0,0008	-0,050	-0,102
4	-0,190	-0,0006	0,337	-0,464
5	-0,164	-0,0006	-0,872	-2,504
6	-0,183	-0,0008	-1,985	-2,120
7	-0,217	-0,0008	-0,404	-0,971
8	-0,322	-0,0008	-0,787	-2,193
9	-0,199	-0,0007	-1,129	-3,533

3.8.1.3. Σενάριο μηδενικής ροής

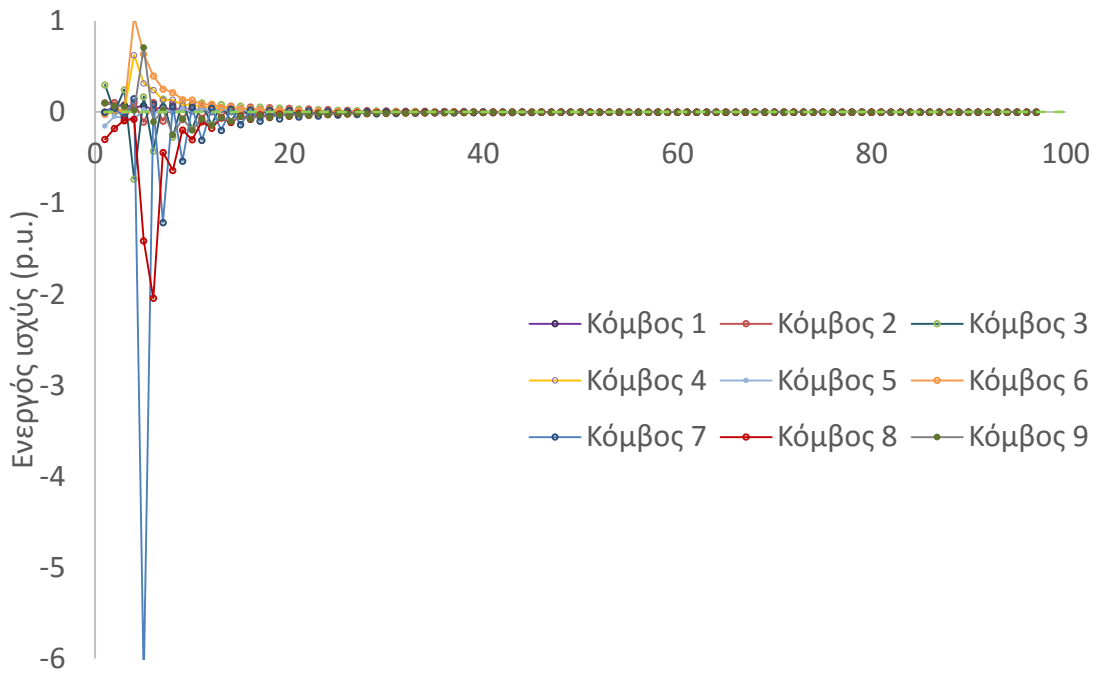
Για το τρίτο σενάριο, θεωρούμε ότι στο δίκτυο συνδέονται τόσο φορτία όσο και διεσπαρμένες πηγές παραγωγής, μηδενικής συνολικής ζήτησης, με το ακόλουθο προφίλ ζήτησης/παραγωγής ανά κόμβο:

Πίνακας 3-5: Προφίλ ζήτησης/παραγωγής στο δίκτυο 9 κόμβων (σενάριο μηδενικής ροής)

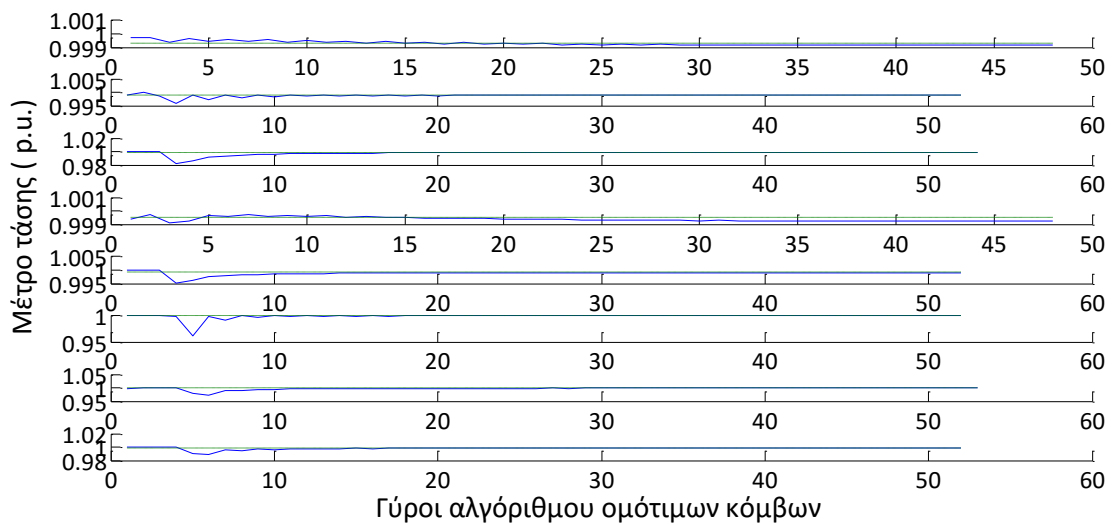
Κόμβος	P (p.u.)	Q (p.u.)
1	0,000	0,000
2	0,100	0,060
3	0,300	0,040
4	-0,030	0,080
5	-0,150	0,030
6	-0,020	0,020
7	0,000	0,000
8	-0,300	0,100
9	0,100	0,020

Ομοίως, στα Σχήματα 3.7 και 3.8 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ανανέωσης της τοπικής πληροφορίας σε καθέναν από τους κόμβους του δικτύου, καθώς εξελίσσονται οι γύροι του Αλγορίθμου 1, έως ότου έπειτα από περίπου 95 ανακυκλώσεις κάθε κόμβος συγκλίνει στον υπολογισμό της συνολικής ενεργού ισχύος και έπειτα από 45-52 ανακυκλώσεις εκτιμά το μέτρο της τάσης του.

Επίσης στον Πίνακα 3-6 παρουσιάζεται το σχετικό σφάλμα των υπολογιζόμενων μεγεθών της ροής φορτίου μέσω του προτεινόμενου Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων σε σχέση με τα αποτελέσματα από το κεντρικό PF.



Σχήμα 3.7: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο μηδενικής ροής)



Σχήμα 3.8: Υπολογισμοί μέτρο τάσης (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο μηδενικής ροής)

Πίνακας 3-6: Σφάλματα κατανεμημένων υπολογισμών (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο μηδενικής ροής)

Κόμβος	Σφάλμα μέτρου τάσης (%)	Σφάλμα γωνίας τάσης (ακτίνια)	Σφάλμα ρεύματος (%)	Σφάλμα απωλειών (%)
2	-0,139	-0,0006	0,745	1,563
3	-0,185	-0,0008	0,781	0,952
4	-0,190	-0,0006	0,332	-0,436
5	-0,164	-0,0006	-1,141	-2,585
6	-0,183	-0,0008	-1,980	-2,788
7	-0,217	-0,0008	-1,392	-2,506
8	-0,322	-0,0008	-1,230	-2,974
9	-0,199	-0,0007	-0,857	-2,448

3.8.1.4. Σενάριο παραγωγής

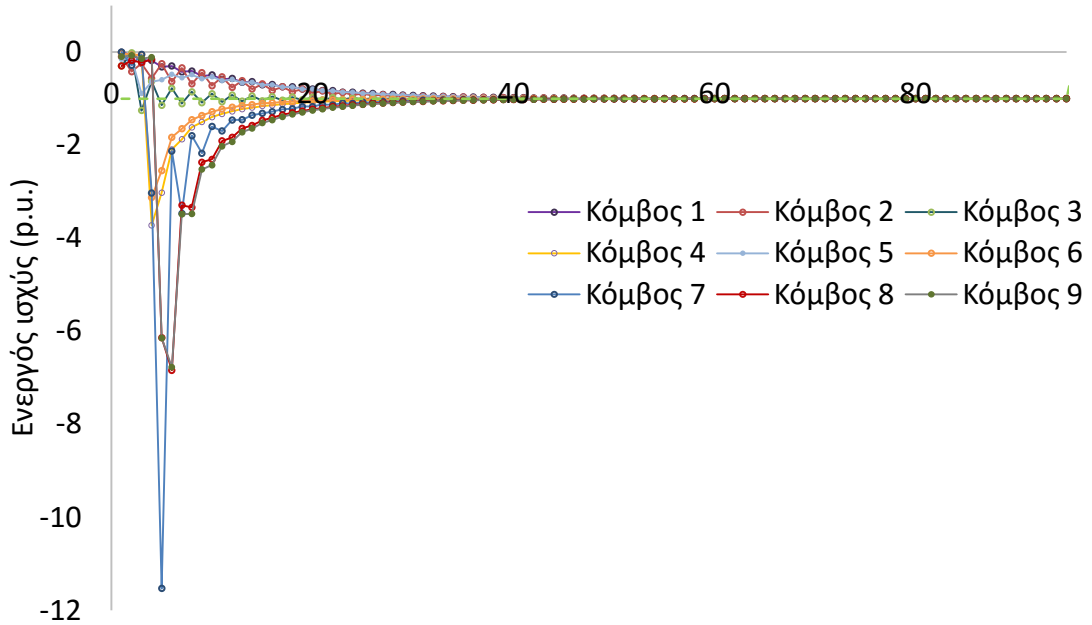
Για το τέταρτο σενάριο, θεωρούμε ότι στο δίκτυο συνδέονται τόσο φορτία όσο και διεσπαρμένες πηγές παραγωγής με συνολικά αναστροφή της ροής. Το προφίλ των κόμβων είναι το ακόλουθο:

Πίνακας 3-7: Προφίλ ζήτησης/παραγωγής στο δίκτυο 9 κόμβων (σενάριο παραγωγής)

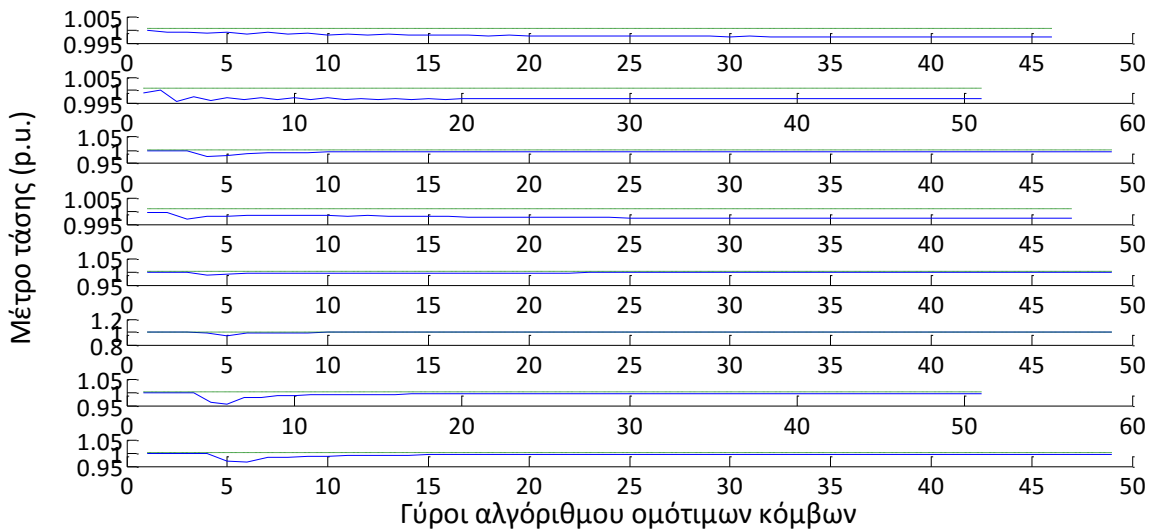
Κόμβος	P (p.u.)	Q (p.u.)
1	0,000	0,000
2	0,100	0,060
3	0,300	0,040
4	-0,030	0,080
5	-0,150	0,030
6	-0,020	0,020
7	0,000	0,000
8	-0,300	0,100
9	0,100	0,020

Ομοίως στα Σχήματα 3.9 και 3.10 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ανανέωσης της τοπικής πληροφορίας σε καθέναν από τους κόμβους του δικτύου, καθώς εξελίσσονται οι γύροι του Αλγορίθμου 1, έως ότου έπειτα από περίπου 95 ανακυκλώσεις κάθε κόμβος συγκλίνει στον υπολογισμό της συνολικής ενεργού ισχύος και έπειτα από 45-52 ανακυκλώσεις εκτιμά το μέτρο της τάσης του.

Επίσης στον Πίνακα 3-8 παρουσιάζεται το σχετικό σφάλμα των υπολογιζόμενων μεγεθών της ροής φορτίου μέσω του προτεινόμενου Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων σε σχέση με τα αποτελέσματα από το κεντρικό PF.



Σχήμα 3.9: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο παραγωγής)



Σχήμα 3.10: Υπολογισμοί μέτρου τάσης (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο παραγωγής)

Πίνακας 3-8: Σφάλματα κατανεμημένων υπολογισμών (δίκτυο 9 κόμβων- σενάριο παραγωγής)

Κόμβος	Σφάλμα μέτρου τάσης (%)	Σφάλμα γωνίας τάσης (ακτίνια)	Σφάλμα ρεύματος (%)	Σφάλμα απωλειών (%)
2	0,062	0,0000	1,045	1,746
3	0,082	0,0025	-1,340	-1,838
4	0,077	0,0033	1,324	-1,400
5	0,085	0,0035	-1,175	-2,733
6	0,083	0,0026	-1,659	-1,607
7	0,118	0,0033	-1,479	-2,514
8	0,202	0,0037	-1,242	-3,027
9	0,135	0,0043	-1,118	-3,486

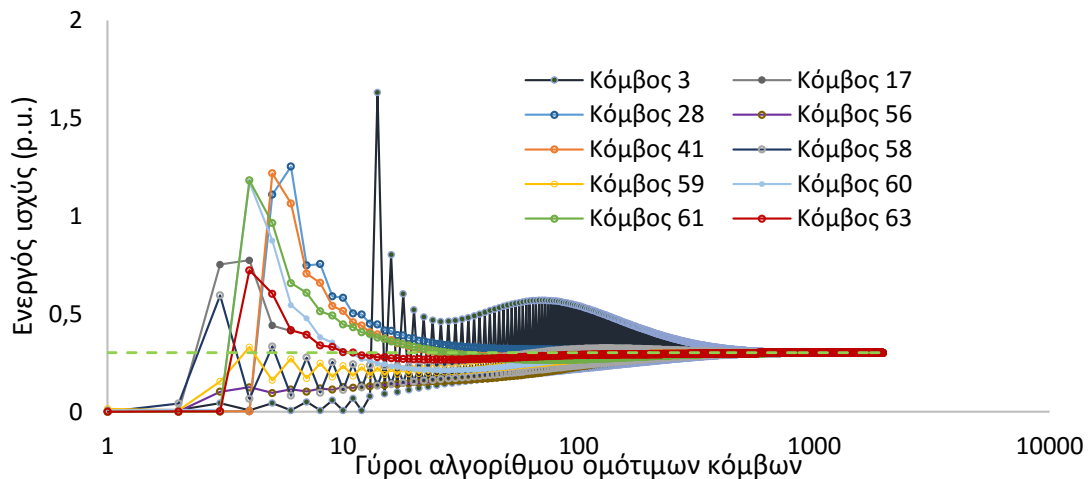
3.8.2. Τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 κόμβων

Με βάση το δίκτυο IEEE 123 θεωρούμε μία ακτινική τοπολογία, η οποία περιλαμβάνει 65 κόμβους. Λαμβάνουμε υπόψη μας μόνο τα συμμετρικά φορτία κι επιπλέον προσθέτουμε ένα σύνολο από διεσπαρμένες πηγές παραγωγής σε κάποιους από τους κόμβους του δικτύου. Η τοπολογία, ο αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης του δικτύου και ο πίνακας βέλτιστων βαρών για τους αλγορίθμους ομότιμων κόμβων δίνονται στο Παράρτημα Β2.

3.8.2.1. Σενάριο Ζήτησης

Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει αποκλειστικά ένα προφίλ συμμετρικών φορτίων, το οποίο δίνεται στο παράρτημα.

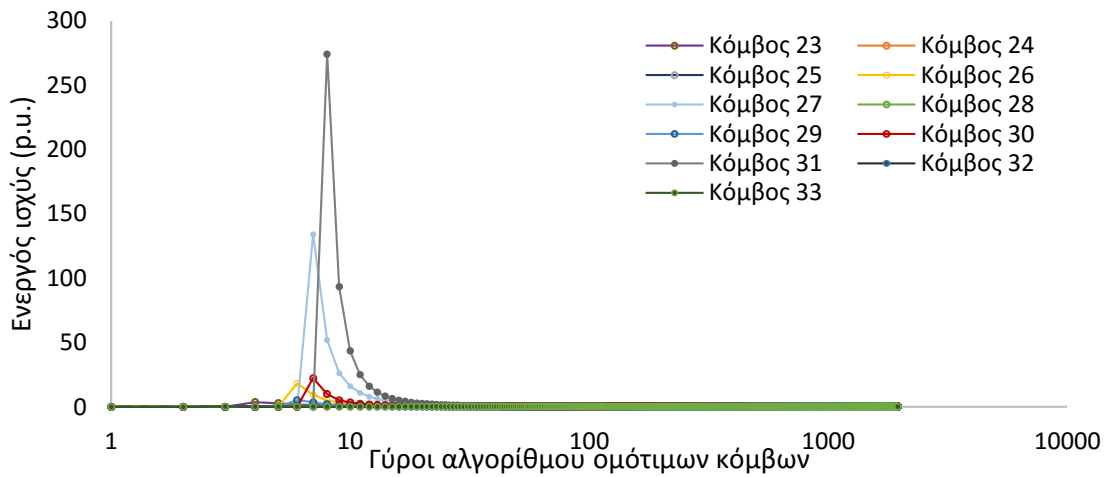
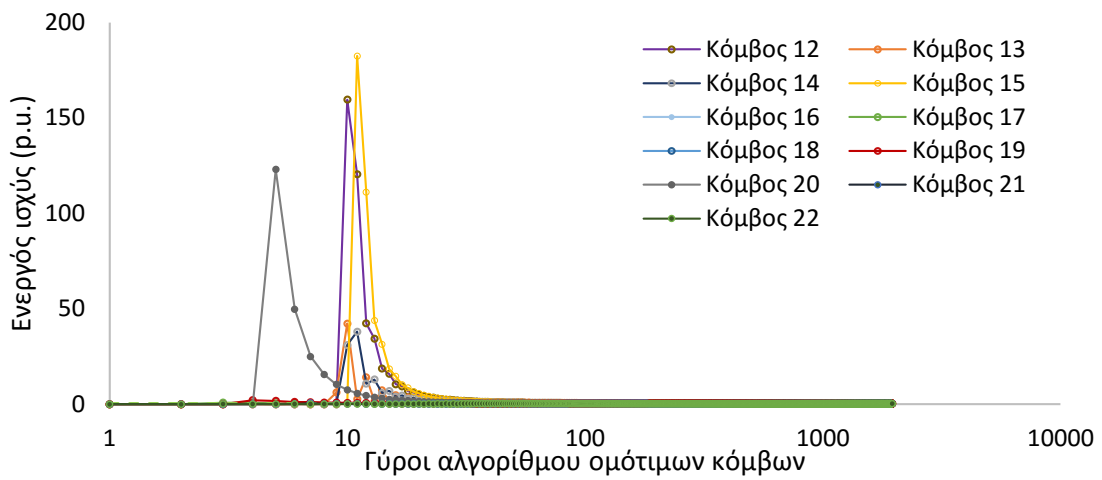
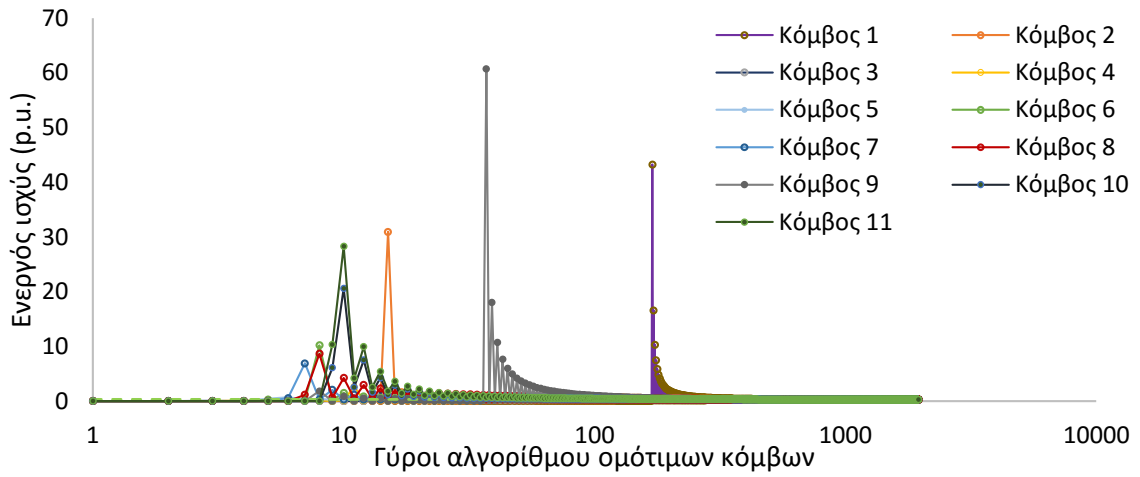
Στο επόμενο γράφημα παρουσιάζεται η διαδικασία των κατανεμημένων υπολογισμών της συνολικής ενεργού ισχύος, σε ενδεικτικούς κόμβους, ώστε να αποτυπωθεί σε μεγέθυνση η διαδικασία ανανέωσης της πληροφορίας κατά τη διάρκεια του Αλγορίθμου 1.



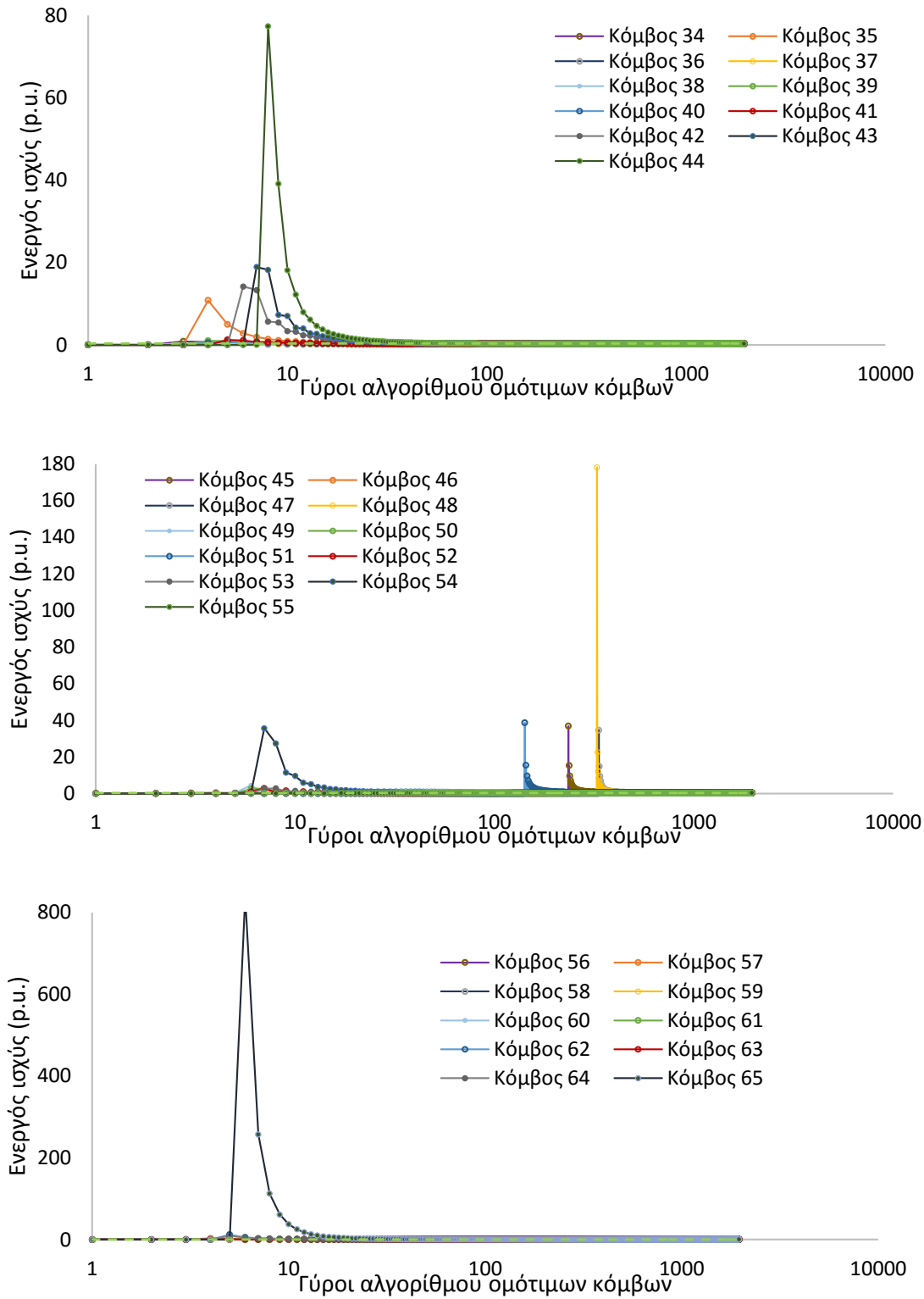
Σχήμα 3.11: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος σε ενδεικτικούς κόμβους (δίκτυο IEEE 123 κόμβων- σενάριο ζήτησης)

Στα Σχήματα 3.12 και 3.13 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ανανέωσης της τοπικής πληροφορίας για τη συνολική ενεργό ισχύ σε καθέναν από τους κόμβους του δικτύου, καθώς εξελίσσονται οι γύροι του Αλγορίθμου 1, έως ότου έπειτα από περίπου 1900 ανακυκλώσεις κάθε κόμβος συγκλίνει στον υπολογισμό της συνολικής ενεργού ισχύος του δικτύου. Παρατηρούμε ότι οι κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται σε σημεία διακλαδώσεων καθυστερούν να ανανεώσουν την τοπική τους πληροφορία.

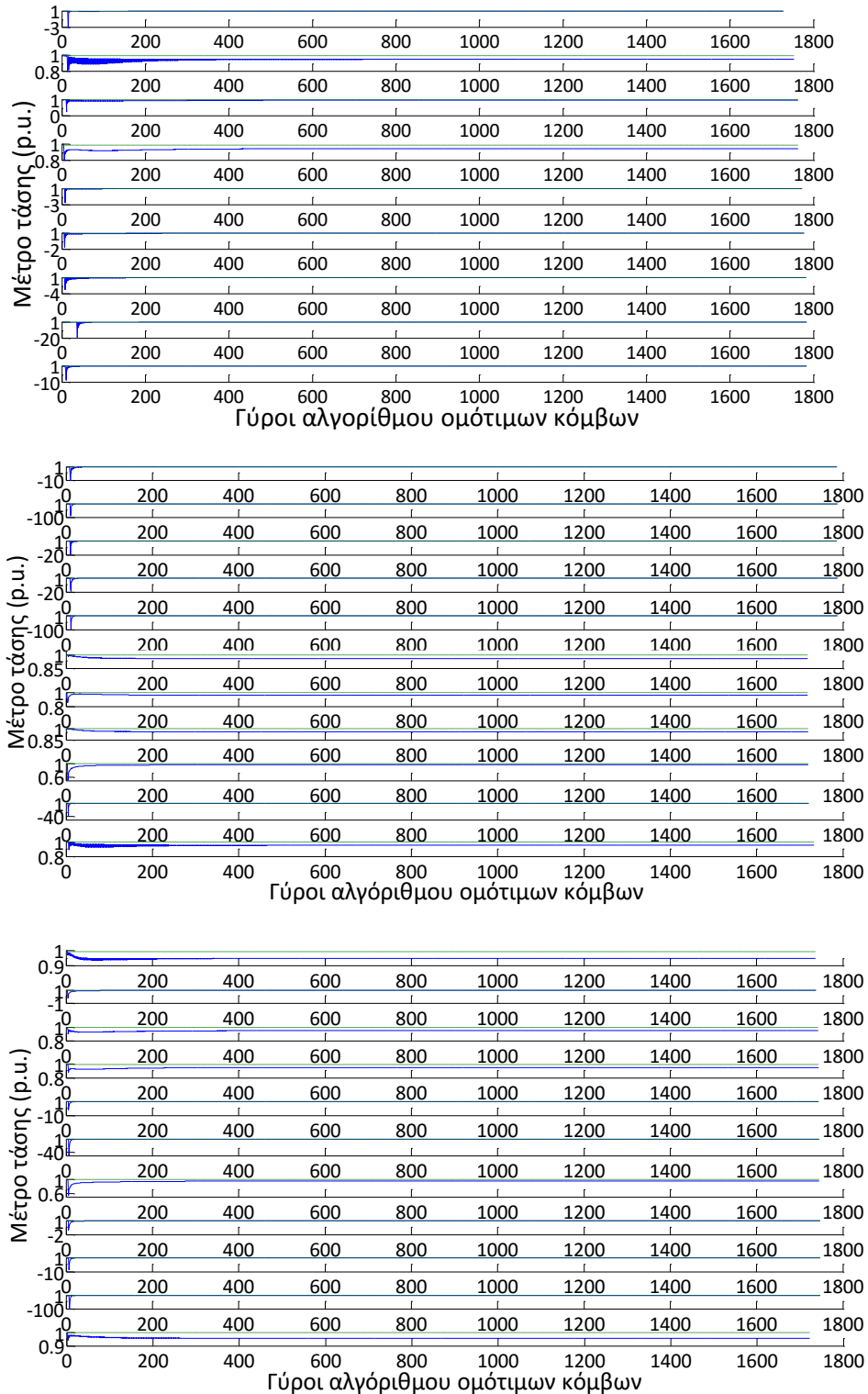
Επίσης στον Πίνακα 3-9 παρουσιάζεται το σχετικό σφάλμα των υπολογιζόμενων μεγεθών της ροής φορτίου μέσω του προτεινόμενου Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων σε σχέση με τα αποτελέσματα από το κεντρικό PF.



Σχήμα 3.12 α-γ : Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο ζήτησης)



Σχήμα 3.13 α-γ : Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο ζήτησης)



Σχήμα 3.14 α-γ : Υπολογισμοί μέτρου τάσης μέσω αλγόριθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο ζήτησης)

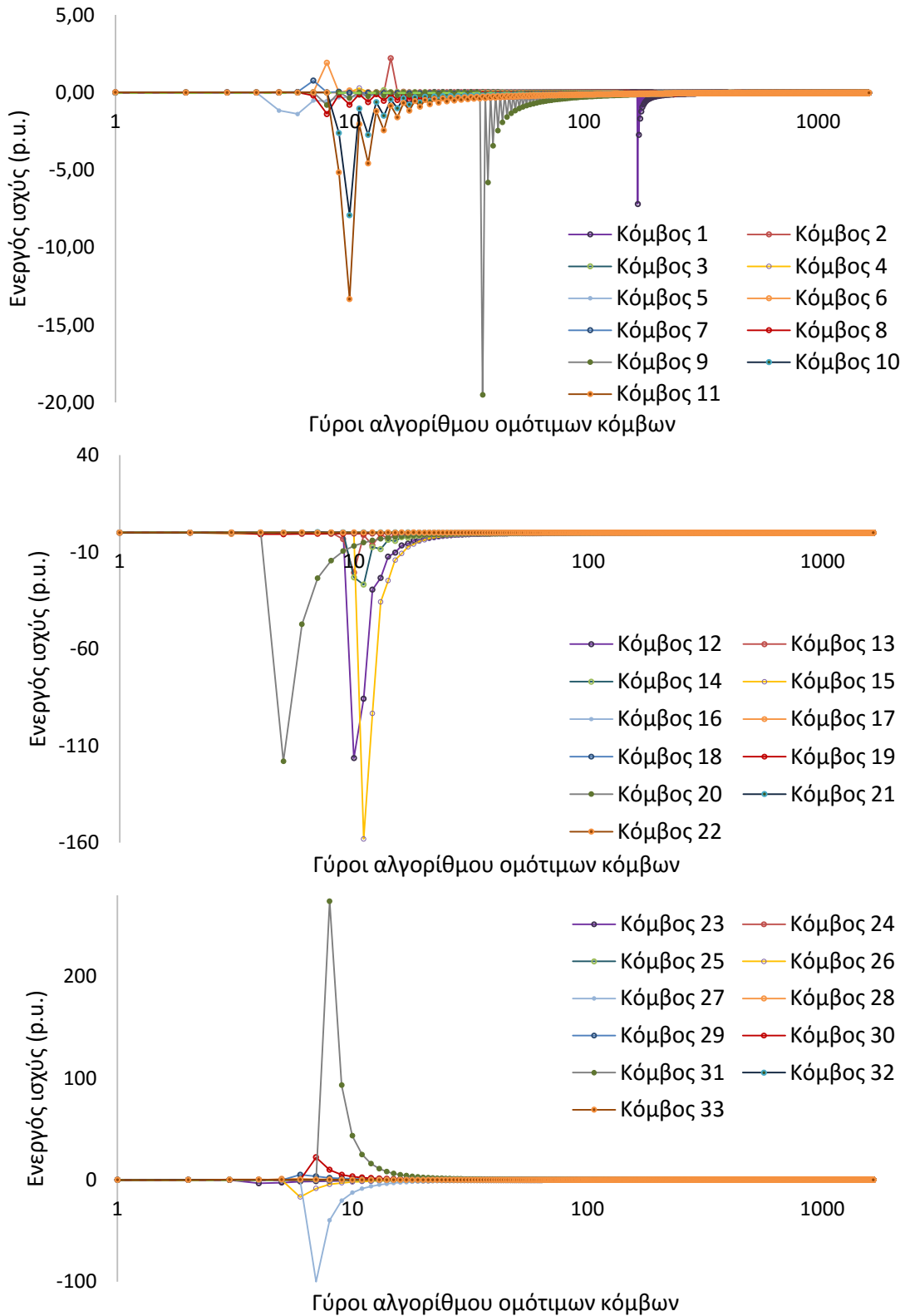
Πίνακας 3-9: Σφάλματα κατανεμημένων υπολογισμών (δίκτυο 123 κόμβων - σενάριο ζήτησης)

Κόμβος	Σφάλμα μέτρου τάσης (%)	Σφάλμα γωνίας τάσης (ακτίνια)	Σφάλμα ρεύματος (%)	Σφάλμα απωλειών (%)
2	0,365	0,0015	2,30	0,030
3	0,288	0,0008	2,20	0,079
4	0,269	0,0004	2,55	0,025
5	0,269	0,0004	2,67	0,000
6	0,249	0,0000	2,44	0,023
7	0,237	-0,0002	2,26	0,012
8	0,228	-0,0004	2,38	0,008
9	0,222	-0,0005	2,36	0,004
10	0,222	-0,0005	2,35	0,000
11	0,219	-0,0006	2,35	0,001
12	0,217	-0,0007	3,01	0,000
13	0,218	-0,0006	2,35	0,001
14	0,217	-0,0007	3,26	0,000
15	0,217	-0,0007	3,30	0,000
16	0,390	0,0017	1,20	0,000
17	0,390	0,0017	-0,05	0,000
18	0,387	0,0017	0,73	0,000
19	0,386	0,0017	-1,90	0,000
20	0,383	0,0016	0,68	0,000
21	0,362	0,0013	0,72	0,022
22	0,351	0,0012	0,76	0,007
23	0,348	0,0012	-0,05	0,000
24	0,339	0,0010	0,83	0,006
25	0,336	0,0010	-0,21	0,001
26	0,333	0,0010	0,77	0,001
27	0,333	0,0010	1,40	0,000
28	0,335	0,0009	0,84	0,001
29	0,331	0,0009	0,82	0,001
30	0,330	0,0009	0,83	0,000
31	0,330	0,0009	0,51	0,000
32	0,381	0,0017	-0,24	0,001
33	0,380	0,0017	-0,02	0,000
34	0,380	0,0016	-0,12	0,000
35	0,380	0,0016	-0,22	0,000
36	0,367	0,0016	1,34	0,012
37	0,365	0,0016	1,62	0,000
38	0,361	0,0015	0,84	0,002
39	0,360	0,0015	-0,18	0,000
40	0,357	0,0015	0,44	0,001
41	0,354	0,0014	-0,26	0,000
42	0,352	0,0014	1,37	0,000
43	0,349	0,0014	-0,12	0,000
44	0,347	0,0013	1,72	0,000
45	2,246	0,0070	0,08	0,008
46	2,246	0,0070	-0,18	0,000
47	-0,887	-0,0026	1,87	0,008
48	0,110	0,0005	0,89	0,004
49	0,542	0,0015	1,78	0,000
50	0,542	0,0015	0,56	0,000
51	0,111	0,0005	0,57	0,001
52	0,111	0,0005	0,57	0,000
53	0,111	0,0005	0,42	0,000
54	0,111	0,0005	2,44	0,000

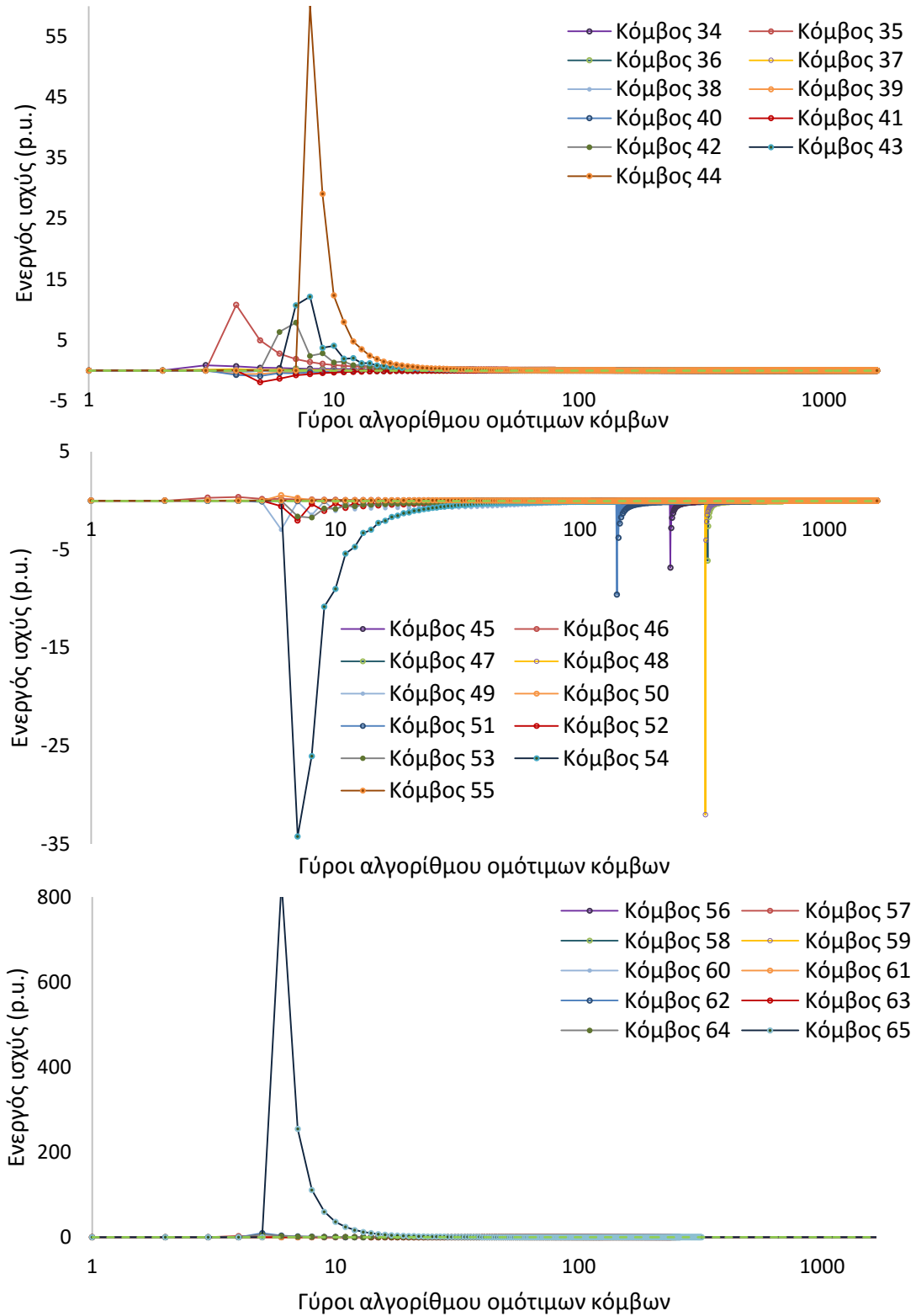
55	0,387	0,0017	2,56	0,000
56	0,385	0,0017	-1,09	0,000
57	0,383	0,0016	0,90	0,000
58	0,376	0,0016	1,87	0,006
59	0,369	0,0016	-0,13	0,003
60	0,367	0,0016	1,85	0,000
61	0,368	0,0016	0,19	0,000
62	0,367	0,0016	0,20	0,000
63	0,364	0,0016	0,34	0,001
64	0,361	0,0015	1,34	0,000
65	0,358	0,0015	-0,71	0,000

3.8.2.2. Σενάριο παραγωγής

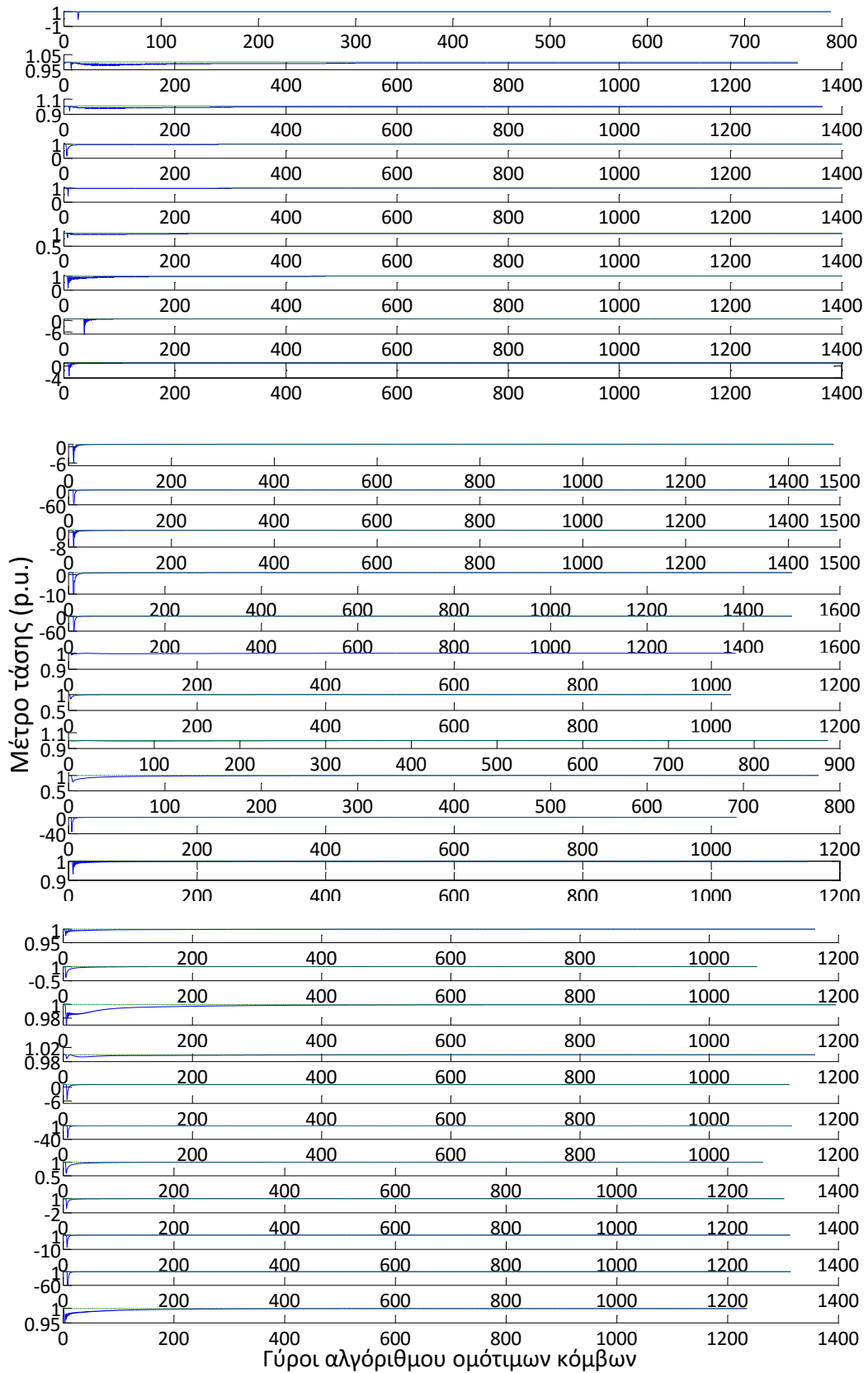
Το δεύτερο σενάριο περιλαμβάνει τόσο κόμβους με φορτία όσο και κόμβους με έγχυση παραγωγής. Οι τιμές ζήτησης/παραγωγής για το σενάριο δίνονται στο Παράρτημα Β2.



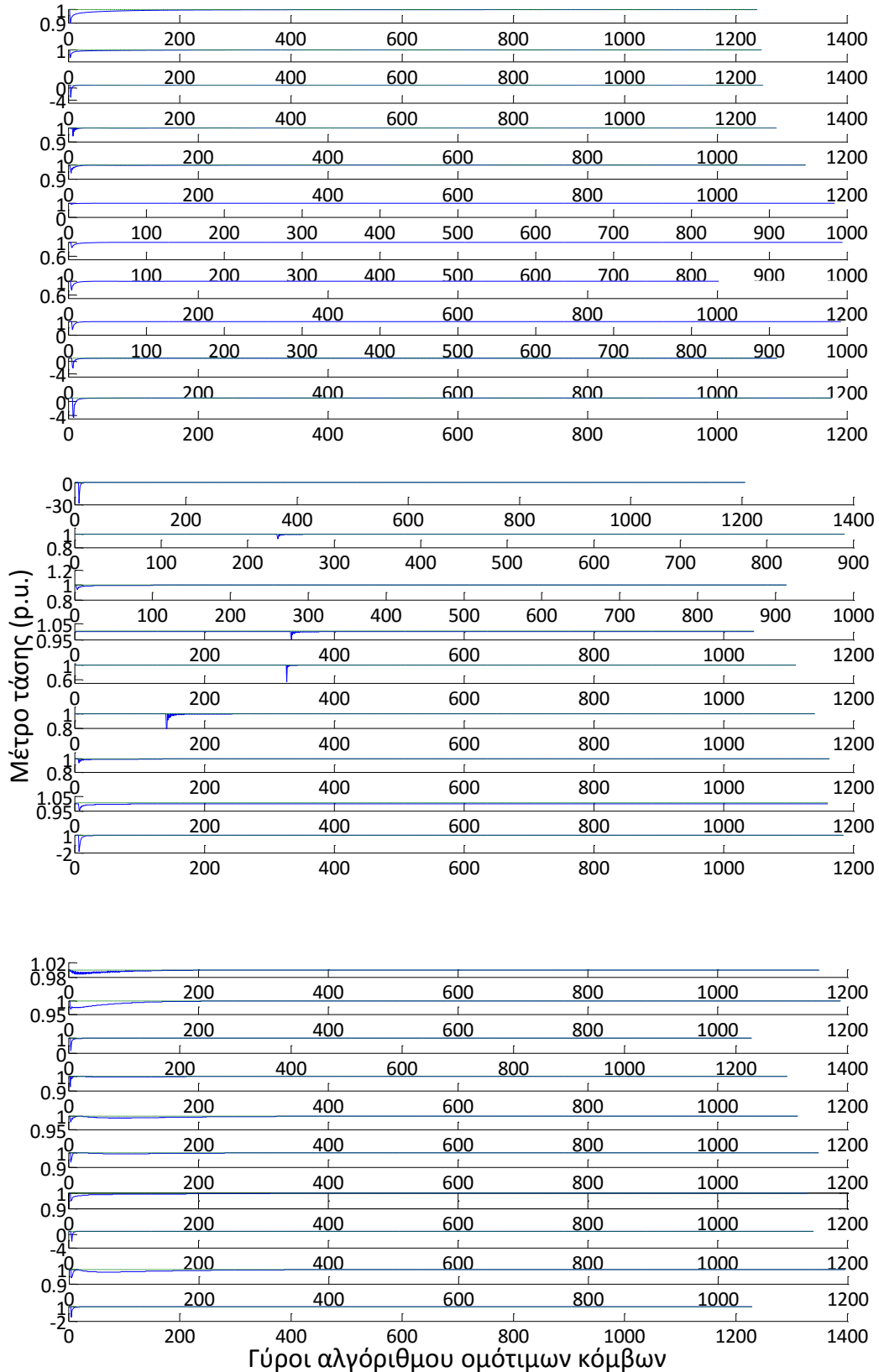
Σχήμα 3.15 α-γ: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο παραγωγής)



Σχήμα 3.16 α-γ: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο παραγωγής)



Σχήμα 3.17 α-γ: Υπολογισμοί μέτρου τάσης μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο παραγωγής)



Σχήμα 3.18 α-γ: Υπολογισμοί μέτρου τάσης μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο παραγωγής)

Πίνακας 3-10: Σφάλματα κατανεμημένων υπολογισμών (δίκτυο 123 κόμβων - σενάριο παραγωγής)

Κόμβος	Σφάλμα μέτρου τάσης (%)	Σφάλμα γωνίας τάσης (ακτίνια)	Σφάλμα ρεύματος (%)	Σφάλμα απωλειών (%)
2	0,000	-0,0004	0,47	-1,589
3	0,099	-0,0022	-1,31	-2,635
4	0,448	-0,0036	-1,75	-3,521
5	0,549	-0,0047	-0,73	-1,470
6	0,764	-0,0051	-1,40	-2,811
7	0,661	-0,0065	-1,14	-2,292
8	0,764	-0,0083	-0,79	-1,591
9	0,895	-0,0094	-1,36	-2,736
10	0,974	-0,0094	1,52	-2,645
11	0,974	-0,0097	-0,95	-1,915
12	0,992	-0,0102	-0,28	-0,567
13	1,031	-0,0103	-0,55	-1,111
14	1,037	-0,0107	-1,00	-2,009
15	1,065	-0,0107	1,20	-1,478
16	1,065	0,0000	1,47	1,368
17	0,028	0,0000	1,24	-1,268
18	0,031	-0,0004	0,65	1,288
19	0,056	-0,0005	1,99	3,948
20	0,066	-0,0012	-1,03	-2,070
21	0,111	0,0006	1,17	2,863
22	-0,021	0,0007	0,79	1,580
23	-0,032	0,0001	0,13	0,265
24	0,011	0,0010	0,62	1,240
25	-0,054	0,0009	0,06	0,119
26	-0,026	0,0008	0,06	0,121
27	0,004	0,0008	-0,17	-0,350
28	0,001	0,0020	0,22	0,439
29	-0,121	0,0027	0,20	0,393
30	-0,172	0,0029	1,73	3,435
31	-0,190	0,0030	-0,10	-2,147
32	-0,193	0,0007	0,15	-1,879
33	-0,098	0,0007	-0,10	-0,187
34	-0,102	0,0008	-2,44	-4,931
35	-0,110	0,0009	6,94	1,340
36	-0,113	0,0001	1,45	1,887
37	0,008	0,0002	-1,18	-2,367
38	-0,018	-0,0001	1,11	2,215
39	0,044	0,0000	-0,14	-0,284
40	0,042	0,0000	0,25	0,498
41	0,040	-0,0001	0,34	0,680
42	0,043	0,0003	0,28	0,551
43	0,014	0,0010	0,11	0,216
44	-0,030	0,0012	0,09	0,179
45	-0,054	-0,0003	0,56	-0,063
46	-0,113	-0,0003	0,54	1,086
47	-0,116	-0,0008	0,91	0,992
48	-0,237	-0,0011	0,85	0,987
49	-0,300	-0,0010	1,10	2,350
50	-0,370	-0,0010	1,47	2,224
51	-0,367	-0,0013	0,61	1,207
52	-0,268	-0,0014	-0,40	-0,798
53	-0,253	-0,0014	-0,63	-1,263

54	-0,254	-0,0015	-0,43	-0,861
55	-0,235	0,0003	-0,58	1,478
56	-0,030	0,0006	-1,09	-2,188
57	-0,053	0,0011	0,11	0,229
58	-0,085	0,0001	1,58	2,389
59	0,001	0,0002	0,33	0,661
60	-0,007	0,0003	0,11	0,220
61	-0,028	0,0002	0,05	0,102
62	-0,016	0,0002	0,07	0,143
63	-0,022	0,0004	0,17	0,346
64	-0,061	0,0005	1,15	2,285
65	-0,094	0,0007	-0,91	-1,838

3.9. Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό με βάση τις ιδιότητες των δικτύων διανομής δημιουργούνται οι κατάλληλες εξισώσεις, οι οποίες μπορούν να ενσωματωθούν σε Αλγορίθμους Ομότιμων Κόμβων, ως στρατηγική ανανέωσης της πληροφορίας. Η συμβολή της διατριβής σχετίζεται με την πρόταση και την ανάπτυξη Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων για τον υπολογισμό της συνολικής ζήτησης και των τάσεων σε κάθε κόμβο του δικτύου διανομής. Ακολούθως υπολογίζονται, τοπικά σε κάθε κόμβο, τα ρεύματα στους κλάδους μέσω των οποίων συνδέεται με άλλους κόμβους και οι απώλειες στους κλάδους αυτούς. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων σε πειραματικά δίκτυα αποδεικνύεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της κεντρικής επίλυσης του προβλήματος ροής φορτίου.

Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι σε διάφορες διαμορφώσεις και σημεία λειτουργίας ακτινικών δικτύων διανομής, μπορούμε να υπολογίσουμε με μεγάλη ακρίβεια και με κατανομημένο τρόπο, μέσω Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, διάφορα μεγέθη της ροής φορτίου. Συγκεκριμένα κάθε κόμβος που συμμετέχει σε αυτούς είναι σε θέση να υπολογίσει τη συνολική ενεργό και άεργο ισχύ (aggregated net demand), την τάση κατά μέτρο και γωνία, καθώς επίσης και το ρεύμα στους κλάδους με τους οποίους συνδέεται. Τέλος, εκτιμώνται οι απώλειες στους κλάδους.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι όλα τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημεία εκκίνησης για τους κατανομημένους αλγόριθμους διαχείρισης του δικτύου διανομής που παρουσιάζονται στη συνέχεια της διατριβής. Αυτό σημαίνει ότι οι αλγόριθμοι εκκινούν οι ίδιοι χωρίς την ανάγκη εξωτερικού ερεθίσματος, το οποίο θα φτάσει σε αυτούς με τη μορφή εντολής από κάποιο κεντρικό σημείο.

Ειδικότερα η συνολική ενεργός ισχύς (φαινόμενη) χρησιμοποιείται ως έναυση για τον αλγόριθμο διαχείρισης συμφόρησης στο επίπεδο του Υποσταθμού (ΥΣ). Τα ρεύματα που ρέουν στους κλάδους αποτελούν έναυση για τον αλγόριθμο διαχείρισης υπερφορτίσεων σε επίπεδο κλάδων. Ενώ μια τροποποιημένη εκδοχή του αλγορίθμου συνολικής ισχύος μας δίνει το έναυση για τον αλγόριθμο τοπικής εξισορρόπησης ζήτησης-παραγωγής.

4

Αλγόριθμοι ομότιμων κόμβων για κατανεμημένη διαχείριση συμφορήσεων

4.1. Βασική διατύπωση προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου

Οι ροές φορτίου και οι βέλτιστες ροές φορτίου χρησιμοποιούνται κατά πάγια τακτική ως εργαλεία μελετών για σχεδιαστικούς σκοπούς στα δίκτυα διανομής. Ωστόσο οι νέες συνθήκες λειτουργίας επιβάλλουν την προσαρμογή των αλγορίθμων επίλυσης τους και την ενσωμάτωσή τους σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, με στόχο την καλύτερη διαχείριση των ροών και του δικτύου, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και όχι μόνο με βάση κάποια στατικά στιγμιότυπα λειτουργίας. Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν οι ροές φορτίου σε εφαρμογές δικτύων διανομής, όπου η ακτινική διαμόρφωσή τους επιτρέπει την απλοποίηση της μαθηματικής διατύπωσης του εκάστοτε προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου. Η απλοποίηση αυτή καθιστά δυνατή την ταχύτατη επίλυση των προβλημάτων αυτών, και μάλιστα με αποκεντρωμένο τρόπο, ώστε να είναι εφικτή η κατανεμημένη εφαρμογή των αποτελεσμάτων από την επίλυση των εν λόγω αλγορίθμων με στόχο τη διαχείριση των ενεργειακών πόρων.

Η βέλτιστη ροή φορτίου διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς. Ο στόχος της βελτιστοποίησης και συνεπώς η διατύπωση της αντικειμενικής συνάρτησης συνήθως σχετίζεται με την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ή τη μεγιστοποίηση του κοινωνικού οφέλους, πάντα υπό τους λειτουργικούς περιορισμούς που επιβάλλει το ίδιο το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα η τήρηση του ισοζυγίου ισχύος και οι περιορισμοί επάρκειας ικανότητας των στοιχείων του δικτύου. Ωστόσο η κατάστρωση της αντικειμενικής

συνάρτησης μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με τους επιθυμητούς στόχους. Παραδείγματα του στόχου της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση αποκλίσεων και η τήρηση διμερών συμβολαίων ισχύος μέσω περικοπών. Τα τελευταία χρόνια η βέλτιστη ροή φορτίου χρησιμοποιήθηκε επίσης σε μεγάλο βαθμό ως εργαλείο για την αξιολόγηση της μέγιστης δυνατότητας των δικτύων να υποδεχθούν σταθμούς ΑΠΕ, λαμβάνοντας υπόψη τις ακραίες συνθήκες λειτουργίας (ελάχιστη ζήτηση-μέγιστη παραγωγή).

Στην τυπική έκφραση της βέλτιστης ροής φορτίου η αντικειμενική συνάρτηση σχετίζεται με την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους των ενεργειακών πόρων. Σε μία καθετοποιημένη λογική λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος σχετίζεται με το πραγματικό κόστος λειτουργίας των μονάδων παραγωγής. Αντίστοιχα, εάν υποθέσουμε ότι το ΣΗΕ λειτουργεί υπό το πλαίσιο αγορών ενέργειας, τότε η ελαχιστοποίηση του κόστους αφορά τις προσφορές κόστους που καταθέτουν οι μονάδες σε μία κεντρική αγορά ενέργειας.

Ακολουθεί μία τυπική κατάσρωση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους:

$$\text{ελαχιστοποίηση της } F = \sum_{i=1}^N \text{Cost}_i^G(P_i^G) \quad (4.1)$$

υπό τους περιορισμούς

- Ισοζυγίου ισχύος:

$$P_i^G - P_i^L = V_i \cdot \sum_{j=1}^N V_j \cdot (G_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (4.2)$$

$$Q_i^G - Q_i^L = V_i \cdot \sum_{j=1}^N V_j \cdot (G_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j)) \quad (4.3)$$

Τεχνικών περιορισμών μονάδων παραγωγής:

$$P_{i,\min}^G \leq P_i^G \leq P_{i,\max}^G \quad (4.5)$$

$$Q_{i,\min}^G \leq Q_i^G \leq Q_{i,\max}^G \quad (4.6)$$

- Θερμικών ορίων γραμμών:

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{MAX} \quad (4.7)$$

- Ορίων διακύμανσης τάσης:

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (4.8)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (4.1) αφορά στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής από τις μονάδες, και συγκεκριμένα προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους συναρτήσεων κόστους Cost_i^G των κόμβων i . Οι συναρτήσεις κόστους εξαρτώνται από το σημείο λειτουργίας των μονάδων παραγωγής, δηλαδή από την έξοδο ενεργού ισχύος P_i^G .

Οι λειτουργικοί περιορισμοί χωρίζονται σε δύο ευρύτερες κατηγορίες περιορισμών, ισότητας και ανισότητας. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι εξισώσεις ισοζυγίου ενεργού και αέργου ισχύος, οι οποίες αποτυπώνονται στις εξισώσεις ροών στους κλάδους του

δικτύου και σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά σύνθετης αντίστασης του αγωγού, G_{ki} και B_{ki} , καθώς και με το μέτρο και τη γωνία των τάσεων στους δύο κόμβους τους οποίους συνδέει ο εκάστοτε κλάδος. Οι περιορισμοί ανισότητας αφορούν τα τεχνικά μέγιστα και ελάχιστα των μονάδων παραγωγής, το θερμικό όριο (ικανότητα) των κλάδων και τα άνω και κάτω αποδεκτά όρια της τάσης. Επιπλέον οι περιορισμοί ανισότητας ενδέχεται να περιλαμβάνουν και οποιονδήποτε άλλο περιορισμό επιβάλλεται από τις μεταβλητές ελέγχου, όπως για παράδειγμα τις επιτρεπτές κινήσεις των tap changers.

4.2. Διατύπωση προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου για διαχείριση ροών σε δίκτυα διανομής

Η τυπική διατύπωση (4.1)-(4.8) του προβλήματος βέλτιστων ροών φορτίου χρησιμοποιείται στα δίκτυα μεταφοράς με μεγάλες θερμικές, κατά βάση, μονάδες παραγωγής και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αγωγών. Είναι εμφανώς ένα περίπλοκο πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού με μία πληθώρα μεταβλητών ελέγχου, για το οποίο έχουν προταθεί αρκετές αναλυτικές και προσεγγιστικές μέθοδοι επίλυσης. Ωστόσο η διαχείριση των δικτύων διανομής διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από τα δίκτυα μεταφοράς. Επιπλέον η ακτινική διαμόρφωση των δικτύων διανομής σε συνδυασμό με την αυξημένη ωμική αντίσταση έναντι της επαγωγικής αντίστασης των αγωγών, μπορούν να οδηγήσουν σε εξαιρετικά χρήσιμες προσεγγιστικές διατυπώσεις του προβλήματος των βέλτιστων ροών φορτίου, προσαρμοσμένες στις ανάγκες των δικτύων διανομής.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι, οι προσπάθειες για διαχείριση των ροών και προς τις δύο κατευθύνσεις στα δίκτυα διανομής, η διαχείριση της αυξημένης διείσδυσης στην παραγωγή των ΑΠΕ, καθώς και η ενσωμάτωση νέων τύπων ευέλικτων φορτίων, αποτυπώνονται επίσης υπό το πρίσμα μίας νέας διατύπωσης του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου, όπου γίνεται προσπάθεια να ενσωματωθούν οι νέες τάσεις για παροχή επικουρικών υπηρεσιών από τα ίδια τα δίκτυα διανομής στα πλαίσια της διατήρησης της ασφαλούς λειτουργίας τους. Σε αυτό το πλαίσιο, η αντικειμενική συνάρτηση θα αναδιατυπωθεί έτσι ώστε να ενταχθούν οι πολιτικές για την περικοπή της παραγωγής των ΑΠΕ και τη διαχείριση της ζήτησης των ευέλικτων φορτίων, ενώ οι περιορισμοί (4.2)-(4.8) συνεχίζουν να ισχύουν αυτούσιοι ή προσαρμόζονται ανάλογα με τη θεώρηση ελέγχου και άλλων ενεργειακών πόρων εκτός των μονάδων παραγωγής.

4.2.1. Διαχείριση ζήτησης και συναρτήσεις χρησιμότητας για τη διαχείριση των ευέλικτων φορτίων

Οι πολιτικές διαχείρισης της ζήτησης των ευέλικτων φορτίων προέκυψαν ως ανάγκη των διαχειριστών των δικτύων διανομής και μεταφοράς, κυρίως με αφορμή τη μείωση της αιχμής και την εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης μέσα στην ημέρα, ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1970. Το πιο απλό σχήμα για την παθητική διαχείριση της ζήτησης είναι η χρήση μεταβλητής τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με την ώρα της ημέρας, ουσιαστικά επιδιώκοντας την αποτίμηση της μεταβολής της οριακής τιμής συστήματος. Στην Ελλάδα η χρήση του νυχτερινού τιμολογίου είναι μια τέτοια προσπάθεια, προκειμένου να μετακινηθεί η ζήτηση προς τις νυχτερινές ώρες. Γενικότερα στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά σχήματα διαχείρισης της ζήτησης.

Οι τεχνικές διαχείρισης της ζήτησης περιλαμβάνουν το συστηματικό σχεδιασμό δράσεων από τις ρυθμιστικές αρχές και από τους διαχειριστές των δικτύων έτσι ώστε να μεταβληθεί το μέγεθος ή ο χρονισμός της ζήτησης από τους καταναλωτές με γνώμονα το γενικότερο όφελος της κοινωνίας, των ίδιων των καταναλωτών αλλά και του δικτύου. Οι συνήθειες μεταβολές που επιδιώκονται στη μορφή της καμπύλης ζήτησης είναι η αποκοπή των αιχμών, η συμπλήρωση των κοιλάδων και η χρονική μετατόπιση συγκεκριμένων φορτίων. Αν και η διαχείριση φορτίων σε αυτό το επίπεδο δεν έχει ακόμα τύχει ιδιαίτερης αποδοχής, ειδικά στην Ελλάδα, θα μπορούσε να εφαρμοστεί με τους εξής τρόπους:

- Περικοπές φορτίων για μείωση των αιχμών σε κάποιες κρίσιμες περιόδους .
- Δυναμική τιμολόγηση της ενέργειας, έτσι ώστε να παρέχεται το κίνητρο στους καταναλωτές να περιορίζουν τη ζήτησή τους σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές με οικονομικό όφελος στο λογαριασμό τους.

Αυτές οι δύο τεχνικές διαχείρισης της ζήτησης σχεδιάστηκαν για να μειώσουν την αιχμή της ζήτησης κάθε συστήματος, έτσι ώστε να περιορίζεται η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς στο σύστημα αυτό. Σήμερα ωστόσο οι ίδιες αρχές διαχείρισης της ζήτησης μπορούν να εφαρμοστούν και για τη διαχείριση των καταναλώσεων εντός ενός νέου πλαισίου λειτουργίας των δικτύων, σύμφωνα με όσα έχουμε ήδη περιγράψει.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής η διαχείριση της ζήτησης εξετάζεται ως προς τη δυνατότητα συμβολής στην υποστήριξη του δικτύου διανομής, είτε για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών είτε για την εξασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας του (για παράδειγμα για τη διαχείριση συμφορήσεων). Η διαχείριση των ευέλικτων φορτίων υπόκειται σε όρους αποτίμησης της όχλησης, η οποία δημιουργείται στους καταναλωτές, μέσω συναρτήσεων χρησιμότητας. Συγκεκριμένα θεωρούμε ότι τα ευέλικτα φορτία συμμετέχουν στους αλγορίθμους βέλτιστης ροής φορτίου μέσω συναρτήσεων κόστους ή χρησιμότητας, οι οποίες αντικατοπτρίζουν είτε την αποζημίωση είτε την όχληση από την εκάστοτε περικοπή φορτίου.

Οι συναρτήσεις χρησιμότητας είναι μαθηματικές εκφράσεις χωρίς διάσταση, δεν εκφράζουν πραγματικό κόστος ενέργειας και μπορούν να είναι είτε τμηματικά γραμμικές (με σταθερούς συντελεστές), είτε εξαρτώμενες από την ίδια τη ζήτηση του εκάστοτε κόμβου. Η έκφρασή τους μπορεί να της μορφής $Cost_i = \pi_i \cdot P_{i,k}$, όπου $P_{i,k}$ διαφορετικές βαθμίδες στην καμπύλη ζήτησης. Οι συντελεστές π_i εκφράζουν κάτι σαν σειρά προτεραιότητας στην περικοπή ζήτησης. Οι βαθμίδες φορτίου ή τα φορτία με μεγαλύτερο συντελεστή π_i θα είναι υποψήφια για περικοπή μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις. Ο συντελεστής π_i προκύπτει από τις ιδιαίτερες ανάγκες του καταναλωτή. Ωστόσο σε κάποιες θεωρήσεις μπορούμε να δημιουργήσουμε κατάλληλους συντελεστές π_i ανάλογα με την αποτελεσματικότητα για την αντιμετώπιση κάποιου από τους περιορισμούς του δικτύου. Στην περίπτωση περικοπής στην παραγωγή των ΑΠΕ (και όχι των ευέλικτων φορτίων) για υποστήριξη της τάσης, οι συντελεστές π_i μπορούν να αποτιμηθούν με βάση τις ευαισθησίες της τάσης ως προς τη ζήτηση.

Κάθε κόμβος του δικτύου διανομής, στον οποίο συνδέεται ένας ευέλικτος ενεργειακός πόρος, σχετίζεται με μία συνάρτηση χρησιμότητας $u_i(P_i)$, η οποία αποτυπώνει το βαθμό ευελιξίας όσον αφορά την περικοπή ζήτησης ή παραγωγής από ΑΠΕ. Η συνάρτηση αυτή

εκφράζει τη σειρά προτεραιότητας για την ικανοποίηση της ζήτησης του καταναλωτή που είναι συνδεδεμένος στον κόμβο i και βασίζεται σε οικονομικά ή άλλα κίνητρα, τα οποία παρέχονται μέσω των πολιτικών διαχείρισης. Οι συναρτήσεις χρησιμότητας είναι γνησίως αύξουσες, κυρτές συναρτήσεις, συγκεκριμένα θεωρείται ότι η οριακή χρησιμότητα μειώνεται καθώς η ζήτηση αυξάνεται [49][51]. Συνηθισμένες μαθηματικές διατυπώσεις των συναρτήσεων χρησιμότητας είναι οι ακόλουθες:

$$A) \quad u_i(P_i) = a_{i,1} \cdot P_i^{\frac{1}{a_{i,2}}} + a_{i,3} \quad (4.9)$$

όπου $a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,3}$ είναι παράμετροι που σχετίζονται με τις προτιμήσεις του κόμβου i και έχουν τις εξής ιδιότητες $a_{i,1}, a_{i,3} > 0$ και $a_{i,2} \geq 1$.

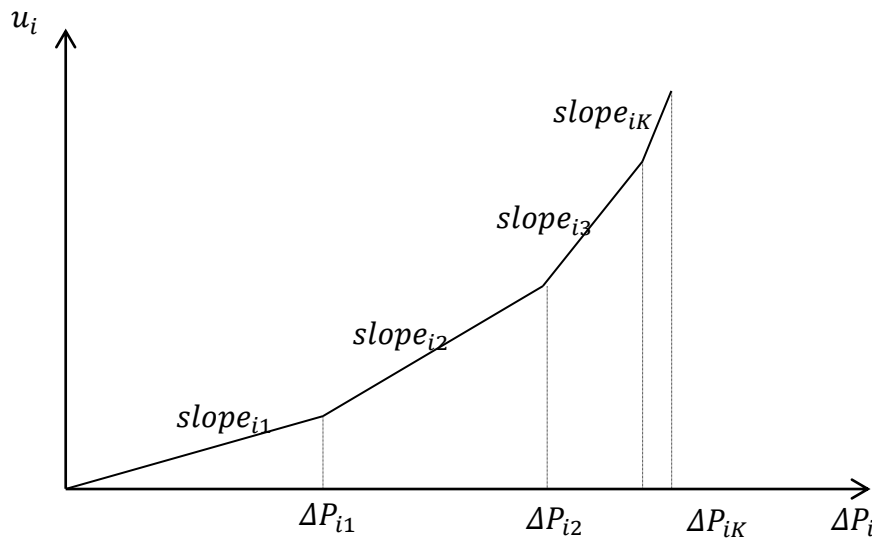
B) Οι συναρτήσεις χρησιμότητας μπορούν επίσης να εκφραστούν με βάση τη περικοπτόμενη ισχύ ως τετραγωνικές συναρτήσεις της μορφής

$$u_i(\Delta P_i) = a \cdot \Delta P_i^2 + \beta \cdot \Delta P_i + \gamma \quad (4.10)$$

Γ) ή να προσεγγιστούν μέσω τμηματικά γραμμικών συναρτήσεων με αυξανόμενες κλίσεις [51], δηλαδή με συναρτήσεις της μορφής:

$$u_i(\Delta P_i) = \sum_{k=1}^K (\text{slope}_{ik} \cdot \Delta P_{ik} + \beta_k) \quad (4.11)$$

όπου ΔP_{ik} είναι η βαθμίδα περικοπής και $\text{slope}_{ik}, \beta_k$ είναι παράμετροι που σχετίζονται με κάθε βαθμίδα k . Θεωρούμε ότι $\text{slope}_{i1} < \dots < \text{slope}_{iK}$. Η μορφή (4.11) της τμηματικά γραμμικής συνάρτησης χρησιμότητας απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Τμηματικά γραμμική συνάρτηση χρησιμότητας

Αντίστοιχα με τις συναρτήσεις κόστους για τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα, έχουμε τις συναρτήσεις χρησιμότητας για την περικοπή ή την αύξηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος των ελεγχόμενων διεσπαρμένων πηγών (π.χ. γεννήτριες diesel, μικροτουρμπίνες, κτλ.). Εκφράζουν το κόστος καυσίμου από την αύξηση της παραγωγής και συνήθως είναι τετραγωνικής μορφής. Κατά συνέπεια μπορούν και αυτές να προσεγγιστούν από τμηματικά γραμμικές συναρτήσεις όμοιας μορφής με αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1 για τις συναρτήσεις χρησιμότητας [52][54][55]. Οι

διεσπαρμένες πηγές ΑΠΕ λαμβάνονται υπόψη ως αρνητικά φορτία και συνεπώς η παραγωγή τους αφαιρείται από τη ζήτηση κατά τον υπολογισμό της καθαρής ζήτησης του δικτύου. Θεωρούμε ότι δεν είναι εφικτή η αύξηση της παραγωγής τους. Για την περικοπή της παραγωγής τους μπορούμε να θεωρήσουμε έναν σταθερό συντελεστή π_i , ο οποίος αποτιμά την απώλεια των εσόδων από τη μη πώληση της ενέργειας που απορρίπτεται, δηλαδή η συνάρτηση χρησιμότητας είναι γραμμική με μία μόνο βαθμίδα.

4.3. Διατύπωση προβλήματος αντιμετώπισης συμφόρησης μέσω περικοπής φορτίου

Επιδιώκουμε να λύσουμε ένα πρόβλημα της μορφής

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n f_i(x_i) \\ \text{υπό περιορισμό } & \sum_{i=1}^n x_i = X \end{aligned} \quad (4.12)$$

Έπειτα από μία αρχική κατανομή των πόρων μεταξύ των κόμβων x_i^0 , αυτοί υπολογίζουν την «σκιώδη τιμή» τους στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας ως $f_i'(x_i^0)$ και ξαναμοιράζονται τους πόρους αναλογικά με αυτή την τιμή. Πρόκειται για μία αναδιατύπωση της τυπικής διατύπωσης του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου [44].

Έστω ότι κατά τη χρονική στιγμή t η κατάσταση κάθε κόμβου i του δικτύου περιγράφεται από την τριάδα μεταβλητών $\langle P_i^t, Q_i^t, V_i^t \rangle$, δηλαδή από την ενεργό ισχύ, την άεργο ισχύ και το μέτρο της τάσης αντίστοιχα. Θεωρούμε επιπλέον ότι ο κόμβος i χαρακτηρίζεται από τις οριακές τιμές P_{min}, P_{max} όσον αφορά τη δυνατότητα μεταβολής της ενεργού ισχύος του. Τέλος ο κόμβος σχετίζεται με μία συνάρτηση χρησιμότητας $u_i(P_i)$, η οποία όπως περιγράψαμε ήδη αντικατοπτρίζει την ευελιξία του ενεργειακού πόρου στη μεταβολή της ισχύος του. Η μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας έχει περιγραφεί στην ενότητα 4.2.1.

Σχεδιάζοντας μία εφαρμογή αντιμετώπισης συμφόρησης ενός δικτύου διανομής θεωρούμε μία αναχώρηση ενός υποσταθμού με μέγιστη ικανότητα (ή μέγιστη επιθυμητή ροή) S_{max} . Το πρόβλημα το οποίο επιθυμούμε να αντιμετωπίσουμε σχετίζεται με την επαναφορά της συνολικής ροής στη γραμμή εντός των αποδεκτών ορίων, διαχειριζόμενοι τα ευέλικτα φορτία κατά μήκος του δικτύου, έπειτα από μία παραβίαση του περιορισμού. Όταν η ροή στην αναχώρηση ξεπεράσει το όριο S_{max} , οι κόμβοι έχουν ένα εύλογο χρονικό διάστημα να επιλύσουν το πρόβλημα της συμφόρησης, κατανέμοντας την απαιτούμενη διαφορά μεταξύ τους με βέλτιστο τρόπο.

Η συνολική φαινόμενη ισχύς του δικτύου υπολογίζεται ως άθροισμα ισχύος των κόμβων του δικτύου, από τη σχέση

$$S_{TOT}^{t_0} = \sum_{i=1}^n S_i^{t_0} = \sum_{i=1}^n \sqrt{P_i^{t_0^2} + Q_i^{t_0^2}} \quad (4.13)$$

Οι απώλειες της ροής φορτίου θα πρέπει να προστεθούν στον υπολογισμό της $S_{TOT}^{t_0}$ ώστε να έχουμε τον πλήρη θερμικό περιορισμό στην αρχή της αναχώρησης. Μία προσέγγιση των απωλειών ως ποσοστό της συνολικής ζήτησης απλοποιεί τον έλεγχο της τήρησης του συνολικού περιορισμού σε τοπικό επίπεδο. Προκειμένου να απλοποιήσουμε περαιτέρω τους τοπικούς υπολογισμούς, θεωρούμε έναν σταθερό συντελεστή ισχύος για κάθε κόμβο του δικτύου. Συνεπώς, απαιτείται μόνο ο υπολογισμός της συνολικής ενεργού ισχύος του δικτύου, η οποία σε κάθε χρονική στιγμή t οφείλει να είναι μικρότερη από τον

περιορισμό, δηλαδή:

$$P_{TOT}^t = \sum_{i=1}^n P_i^t \leq P_{max} \quad (4.14)$$

Σε περίπτωση παραβίασης του περιορισμού (4.14), η διαφορά μεταξύ της συνολικής ενεργού ισχύος του δικτύου και του τιθέμενου περιορισμού, δηλαδή η ποσότητα

$\Delta P^{t_0-t} = \sum_{i=1}^n P_i^{t_0} - \sum_{i=1}^n P_i^t = \sum_{i=1}^n (P_i^{t_0} - P_i^t)$ κατανέμεται μεταξύ των κόμβων με βέλτιστο τρόπο, ελαχιστοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση, η οποία ομοιάζει με συνάρτηση κόστους σχετιζόμενη με την ευελιξία (cost-like function):

$$F = \sum_{i=1}^n u_i(\Delta P_i) \quad (4.15)$$

Ακολουθεί η τυπική κατάστρωση του προβλήματος διαχείρισης της ροής φορτίου:

$$\text{Minimize } F = \sum_{i=1}^n u_i(\Delta P_i) \quad (4.16)$$

$$\text{υπό περιορισμούς } \sum_{i=1}^n P_i \leq P_{max} \quad (4.17)$$

$$0 \leq P_i \leq P_i^{t_0} \quad \text{εάν το } i \text{ είναι φορτίο} \quad (4.18)$$

$$P_{G,max} \leq P_i \leq P_i^{t_0} \quad \text{εάν το } i \text{ είναι γεννήτρια} \quad (4.19)$$

4.4. Κατανεμημένος αλγόριθμος για εφαρμογή αποκεντρωμένης κατανομής πόρων

Η διατύπωση του προβλήματος διαχείρισης συμφορήσεων αποτελεί ένα είδος βέλτιστης ροής φορτίου (optimal power flow - OPF), στην οποία η αντικειμενική συνάρτηση αφορά την ελαχιστοποίηση της όχλησης από τη μεταβολή στο επίπεδο ζήτησης/παραγωγής κάθε κόμβου. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα πρόβλημα κατανομής πόρων (resource allocation) μεταξύ όμοιων και ανταγωνιστικών κόμβων θεωρώντας μία διαχωρίσιμη (separable) αντικειμενική συνάρτηση (ενότητα 2.5) υπό τον περιορισμό των συνολικά διαθέσιμων πόρων. Το πρόβλημα κατατάσσεται στα μονοτροπικά προβλήματα βελτιστοποίησης, δηλαδή βελτιστοποίησης ενός αθροίσματος τμηματικώς γραμμικών συναρτήσεων μίας μοναδικής μεταβλητής [45].

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι κυρτή (convex) και το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να επιλυθεί με χρήση της χαλάρωσης των περιορισμών μέσω συνάρτησης Lagrange (relaxation).

Έστω ότι η αντικειμενική συνάρτηση του δυϊκού προβλήματος είναι η $L(\lambda, P_1, P_2, \dots, P_n) =$

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^n u_i(P_i^{t_0} - P_i) - \lambda \cdot \left(\sum_{i=1}^n P_i - P_{max} \right) - \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot (P_i - P_i^{t_0}) - \sum_{i=1}^n \kappa_i \cdot P_i \\ &\quad - \sum_{i=1}^n \zeta_i \cdot (P_i + P_{G,max}) \end{aligned} \quad (4.20)$$

,όπου λ , μ_i , κ_i και ζ_i πρόκειται για μη αρνητικούς πολλαπλασιαστές Lagrange. Σύμφωνα με τις συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker (KKT), θα πρέπει οι μερικές παράγωγοι της (4.20) να είναι μηδενικές, ώστε να πάρουμε τη βέλτιστη λύση του δυϊκού και του αρχικού προβλήματος.

Συνεπώς θέτουμε $\frac{dL}{dP_i} = 0$, δηλαδή έχουμε $\frac{du_i}{dP_i} = \lambda + \mu_i + \kappa_i + \zeta_i$.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι τελεστές είναι μη αρνητικοί, δηλαδή $\mu_i \geq 0$, $\kappa_i \geq 0$ και $\zeta_i \geq 0$, το άθροισμά τους στην προηγούμενη εξίσωση είναι δυνατό να αντικατασταθεί από μία ενιαία μη αρνητική ποσότητα, έστω $\delta \geq 0$

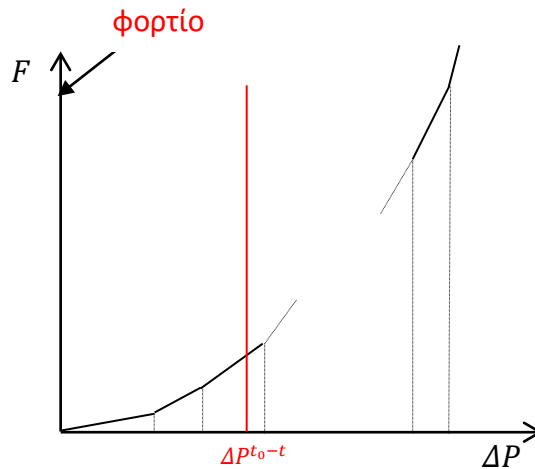
$$\frac{du_i}{dP_i} = \lambda + \delta \quad (4.21)$$

Είναι φανερό ότι η ποσότητα δ είναι θετική, $\delta > 0$, μόνο για εκείνους τους κόμβους του δικτύου, οι οποίοι παραβιάζουν έναν από τους δύο τοπικούς τους περιορισμούς (4.18)-(4.19). Σε κάθε άλλη περίπτωση η ποσότητα δ ισούται με μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι εάν κατά το πρώτο στάδιο αγνοήσουμε τους τοπικούς περιορισμούς, τότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι $\delta = 0$ και $\frac{du_i}{dP_i} = \lambda$ για κάθε κόμβο. Στο επόμενο στάδιο, αφού έχει ήδη προκύψει μία αρχική κατανομή των συνολικά διαθέσιμων πόρων (4.17), κάθε κόμβος επιτελεί έναν τοπικό έλεγχο για παραβίαση των περιορισμών του (4.18)-(4.19). Εάν εντοπιστεί παραβίαση κάποιου περιορισμού, ο κόμβος τίθεται στην οριακά αποδεκτή τιμή (upper $P_i^{t_0}$ /lower 0) και το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται εκ νέου εξαιρώντας τους συγκεκριμένους κόμβους από την διαδικασία, δηλαδή μειώνοντας το σύνολο μεταβλητών του προβλήματος. Η νέα διαδικασία ανακατανομής πόρων περιλαμβάνει την ίδια υπόθεση ($\delta = 0$ και $\frac{du_i}{dP_i} = \lambda$) για τους εναπομείναντες κόμβους.

Συνεπώς η επίλυση του προβλήματος (4.16)-(4.19) έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακά βέλτιστη κατανομή του συνόλου των πόρων (4.17), εν προκειμένω της συνολικής ενεργού ισχύος, έτσι ώστε $\sum_{i=1}^n (P_i^t)^* = P_{max}$ και $\frac{du_i}{dP_i^*} = \lambda^*$ για όλους τους κόμβους στους οποίους το επίπεδο ενεργού ισχύος τους παραμένει εντός των αποδεκτών ορίων (4.18)-(4.19). Επίσης έχουμε $\frac{du_i}{dP_i^*} = \lambda^* + \delta$, όπου $\delta > 0$ για όλους τους υπόλοιπους κόμβους οι οποίοι δε συμμετέχουν στο αποτέλεσμα του σχήματος διαχείρισης, δηλαδή δε μεταβάλλουν την ενεργό ισχύ τους, είτε επειδή έχουν εξαντλήσει τα όρια της ευελιξίας τους ($P_i^* = 0/P_i^* = P_{G,max}$), είτε επειδή δεν απαιτήθηκε. Με λ^* συμβολίζουμε τον καθολικό πολλαπλασιαστή Lagrange ο οποίος σχετίζεται με τον συνολικό περιορισμό ισότητας, δηλαδή με τον περιορισμό μέγιστης συνολικής ισχύος P_{max} , ο οποίος καθορίζει το αποδεκτό επίπεδο των συνολικών πόρων στο σύστημά μας.

Οι συναρτήσεις χρησιμότητας προσεγγίζονται μέσω τμηματικά γραμμικών σχέσεων με αυξανόμενες κλίσεις όσο η μεταβολή της ενεργού ισχύος αυξάνεται. Η αντικειμενική συνάρτηση (4.16) αποτελεί εξ' ορισμού μία άθροιση επί των συναρτήσεων χρησιμότητας. Κατά συνέπεια, η αντικειμενική συνάρτηση έχει τη μορφή μίας τμηματικά γραμμικής συνάρτησης με τα ίδια σημεία αλλαγής κλίσεων με τις επιμέρους συνιστώσες (Σχήμα 4.2). Η τοποθέτηση των κλίσεων σε αυξανόμενη διάταξη, έχει ως αποτέλεσμα μία κυρτή τμηματικά γραμμική αντικειμενική συνάρτηση. Η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα (4.16)-(4.19) θα είναι δυνατό να προσδιοριστεί κεντρικά, χρησιμοποιώντας τον περιορισμό των πόρων $\sum_{i=1}^n P_i^t = P_{max}$ ώστε να προσδιορίσουμε τη συνολική απαίτηση για μεταβολή της ενεργού ισχύος, ως $\Delta P^{t_0-t} = \sum_{i=1}^n (P_i^{t_0} - P_i^t)$. Η συνολική περικοπή φορτίου ΔP^{t_0-t} απεικονίζεται στο ίδιο Σχήμα 4.2 μαζί με την αντικειμενική συνάρτηση με την κόκκινη γραμμή. Η βέλτιστη λύση βρίσκεται στο σημείο τομής της αντικειμενικής συνάρτησης με την ευθεία ΔP^{t_0-t} . Ωστόσο η παραπάνω ανάλυση καταδεικνύει ότι η βέλτιστη λύση μπορεί να προσδιοριστεί και με αποκεντρωμένο τρόπο. Στη συνέχεια δημιουργείται ένας Αλγόριθμος Ομότιμων

Κόμβων με κατάλληλο συνδυασμό των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων για υπολογισμούς ροών φορτίου, όπως αυτοί παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3, με στόχο τη διαχείριση των συμφορήσεων.



Σχήμα 4.2: Η αντικειμενική συνάρτηση με τις κλίσεις σε αύξουσα διάταξη

Ο προτεινόμενος Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων περιλαμβάνει στάδια (συμβολίζονται στο εξής ως stages ή st). Σε κάθε στάδιο, μειώνεται η υπολειπόμενη συνολική περικοπή που απαιτείται προς ικανοποίηση του περιορισμού (4.17), έως ότου φτάσουμε στη συνολική περικοπή ΔP^{t_0-t} . Κατά τη διάρκεια κάθε σταδίου, υπολογίζονται οι οριακές χρησιμότητες των διαθέσιμων ευέλικτων κόμβων και αυτές ταξινομούνται αποκεντρωμένα μέσω του αποκεντρωμένου αλγορίθμου υπολογισμού ελάχιστης τιμής, όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 4.5. Τελικώς ο κόμβος με την χαμηλότερη οριακή χρησιμότητα επιλέγει, με δική του πρωτοβουλία, να προσφέρει ολόκληρη την ευελιξία που διαθέτει σε αυτή τη βαθμίδα ζήτησης. Η μορφή των τμηματικά γραμμικών συναρτήσεων χρησιμότητας με αυξανόμενες κλίσεις (εξίσωση 4.11), έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη χρήση της εκάστοτε επιλεγμένης βαθμίδας περικοπής/ αύξησης ζήτησης. Αυτό συμβαίνει σε όλα τα στάδια του αλγορίθμου, εκτός ίσως από το τελευταίο, οπότε και χρησιμοποιείται μόνο εκείνο το τμήμα της προσφερόμενης περικοπής που απαιτείται ώστε να καλυφθεί ο περιορισμός των συνολικών πόρων (4.17). Η συνολική λύση στο αρχικό πρόβλημα προκύπτει ως υπέρθεση των επιμέρους λύσεων κατά τα διάφορα στάδια του αλγορίθμου και το οριακό κόστος λ^* της συνολικής λύσης είναι ίσο με $\frac{du_i}{dP_i^*}$.

Εάν οι συναρτήσεις χρησιμότητας είναι χρονικά μεταβαλλόμενες, το πρόβλημα διαχείρισης συμφορήσεων ανάγεται στο πρόβλημα της χρονικής μετάθεσης της ζήτησης (load shifting). Θέτοντας πιο απότομες κλίσεις έπειτα από μία περικοπή, δεν θα πραγματοποιηθεί εκ νέου περικοπή από τον ίδιο τον ευέλικτο πόρο στα αμέσως επόμενα χρονικά στάδια του αλγορίθμου.

Εξάλλου κάθε συνιστώσα της αντικειμενικής συνάρτησης F στο πρόβλημα (4.16) αντικατοπτρίζει την ευελιξία καθενός από τους κόμβους για να συμμετάσχουν στο σχήμα μεταβολής της ενεργού ισχύος (περικοπής ζήτησης/ αύξησης παραγωγής). Η επιλογή μεγάλων τιμών για τις κλίσεις των συναρτήσεων χρησιμότητας πρακτικά εξαιρεί τους κόμβους με τα κρίσιμα φορτία, εκτός εάν η συμμετοχή τους είναι επιβεβλημένη λόγω σοβαρής υπέρβασης του τιθέμενου ορίου για τη συμφόρηση.

4.5. Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων για υπολογισμό της μικρότερης προσφοράς

Προκειμένου να είναι επιλυθεί το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου με αποκεντρωμένο τρόπο, προτείνεται ο παρακάτω κατανεμημένος αλγόριθμος για τον κατανεμημένο υπολογισμό της ελάχιστης τιμής επί των αρχικών τιμών μίας ποσότητας. Διευκρινίζεται ότι ο υπολογισμός πραγματοποιείται μόνο τοπικά, στη γειτονιά κάθε κόμβου. Η στρατηγική ανανέωσης της πληροφορίας και συνέχισης του αλγορίθμου ακολουθεί τη λογική των αλγορίθμων τύπου φημολογίας (rumor-mongering).

Αλγόριθμος 2 Υπολογισμός ελαχίστου μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων

```

1: round  $r=0$ 
2:  $x_{MIN,r}^{est,i} \leftarrow x_{i,0}$ 
3: sends to all nodes  $j \in N_i$  the value  $x_{MIN,r}^{est,i}$ 
4: while  $r < r_{max}$ 
5:   round  $r=r+1$ 
6:   receives from all nodes  $j \in N_i$  their values  $x_{MIN,r}^{est,j}$ 
6:   calculates  $x_{MIN,r+1}^{est,i} = \min\{x_{MIN,r}^{est,i}, x_{MIN,r}^{est,j}\}$ 
7:   if  $x_{MIN,r+1}^{est,i} < x_{MIN,r}^{est,i}$  then
8:     sends to all nodes  $j \in N_i$  the value  $x_{AV,r+1}^{est,i}$ 
9:   end if
11: end while

```

Ο Αλγόριθμος 2 συγκλίνει έπειτα από $O(N^2 \log N)$ γύρους [36], όπου N το πλήθος των κόμβων που συμμετέχουν. Λαμβάνοντας υπόψη την τοπολογία του γράφου του δικτύου, μπορούμε να προσδιορίσουμε επακριβώς το μέγιστο πλήθος γύρων που απαιτούνται ώστε κάθε κόμβος να έχει δεχτεί την πληροφορία για την ελάχιστη τιμή. Αυτό το μέγιστο πλήθος γύρων εισάγεται στο βήμα 4 του Αλγορίθμου 2, ως r_{max} , και αποτελεί το κριτήριο τερματισμού του.

4.6. Αλγόριθμος ομότιμων κόμβων για διαχείριση συμφορήσεων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ολοκληρωμένα ο Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων για τη διαχείριση συμφορήσεων.

Ο αλγόριθμος που υλοποιείται τοπικά σε κάθε ομότιμο κόμβο περιλαμβάνει τις ακόλουθες διαδικασίες:

1. Κατανεμημένος υπολογισμός της συνολικής ενεργού ισχύος P_{TOT}
2. Τοπικός προσδιορισμός της παραβίασης του ορίου των ροών, συγκρίνοντας την P_{TOT} με τη μέγιστη P_{max} .
3. Οποτεδήποτε από τη σύγκριση προκύπτει ότι $P_{TOT}^{t_0} > P_{max}$, εκκινεί ο Αλγόριθμος 3.
4. Επιστροφή στο πρώτο βήμα και αναμονή.

Αλγόριθμος 3 Διαχείριση συμφόρησης από τον κόμβο i

```

1: stage st=0
2:  $P_{i,st}^t \leftarrow P_i^{t_0}$ 
3:  $P_{TOT,st}^{est,i} \leftarrow P_{TOT}^{t_0}$ 
4: calculates  $\lambda_{i,1} = \frac{du_i}{dP_i}$ 
5: if  $P_i^{t_0} = 0$  then  $\lambda_{i,1} = \lambda_{i,1} + \delta$ 
6: sends to all nodes  $j \in N_i$  the value  $\lambda_{i,1}$ 
7: stage st=st+1
8: while  $P_{TOT,st}^{est,i} > P_{max}$  do
9:   receives from all nodes  $j \in N_i$  their values  $\lambda_{i,st}$ 
10:   uses Algorithm 2 to calculate the global  $\lambda_{min,st}$ 
11:   if  $\lambda_{i,st} = \lambda_{min,st}$  then
12:      $P_{i,st+1}^t = P_{i,st}^t - \Delta P_{ik}$ 
13:     else  $P_{i,st+1}^{t_1} = P_{i,st}^{t_1}$ 
14:   end if
15:   calculates  $\lambda_{i,st+1} = \frac{du_i}{dP_i}$ 
16:   if  $P_{i,st+1}^t = 0$  or  $P_{i,st+1}^t = P_{G,max}$  then  $\lambda_{i,st+1} = \lambda_{i,st+1} + \delta$ 
17:   sends to all nodes  $j \in N_i$  the value  $\lambda_{i,st+1}$ 
18:   uses Algorithm 1 to calculate  $P_{TOT,st+1}^{est,i}$ 
19:   stage st=st+1
20: end while

```

Οι περιορισμοί του προβλήματος (4.17)-(4.19) έχουν εισαχθεί με αναλυτικό τρόπο στις γραμμές 8 και 16, ενώ ο περιορισμός $P_i^t \leq P_i^{t_0}$ τηρείται πάντα, εφόσον προχωράμε μόνο προς βαθμιαίες απομειώσεις της ενεργού ισχύος $P_i^{t_0}$ σε κάθε στάδιο του αλγορίθμου (γραμμή 12). Η απόφαση για συμμετοχή στο σχήμα περικοπής λαμβάνεται τοπικά σε κάθε ομότιμο κόμβο, ακριβώς μετά την εκτέλεση του Αλγορίθμου 1, εφόσον το αποτέλεσμα του αθροίσματος καταδεικνύει την υπέρβαση του συνολικού περιορισμού $P_{TOT}^{t_0} > P_{max}$, δηλαδή εφόσον ο περιορισμός (4.17) είναι ενεργός.

Η νέα κατανομή των ενεργειακών πόρων μετά τη συνολική περικοπή ζήτησης, μειώνει τις ροές στους κλάδους του δικτύου και κατά συνέπεια το προφίλ των τάσεων βελτιώνεται εμμέσως, καθώς οι τάσεις προσεγγίζουν πιο κοντά στη μονάδα. Για λόγους πληρότητας αλλά και επέκτασης του προτεινόμενου αλγορίθμου και σε προβλήματα υπέρβασης των θερμικών ορίων των επιμέρους κλάδων, παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα η δυνατότητα του κατανομημένου υπολογισμού των τάσεων και των ρευμάτων των κλάδων σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.7.

4.7. Αποτελέσματα εφαρμογής αλγόριθμου ομότιμων κόμβων για διαχείριση συμφορήσεων

4.7.1. Ακτινικό δίκτυο 9 κόμβων

Τα αποτελέσματα των εφαρμογών καταναεμημένου ελέγχου και διαχείρισης παρουσιάζονται, καταρχήν, σε ένα ακτινικό δίκτυο 9 κόμβων, για λόγους επεξήγησης των βασικών Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων. Από πλευράς τοπολογίας πρόκειται για το ίδιο δίκτυο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, και κατά συνέπεια έχουμε ήδη υπολογίσει τα βέλτιστα βάρη για τον Αλγόριθμο 1, τα οποία εξασφαλίζουν και επιταχύνουν τη σύγκλιση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων. Τα χαρακτηριστικά του δικτύου και η επιλογή του πίνακα βέλτιστων βαρών παρατίθενται στο Παράρτημα Β1. Οι περισσότεροι κόμβοι του δικτύου διαθέτουν ένα ευέλικτο φορτίο ή μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, σύμφωνα με τον Πίνακα 4-1. Επίσης κάθε ευέλικτο φορτίο/διεσπαρμένη μονάδα παραγωγής χαρακτηρίζεται από μία τμηματικά γραμμική συνάρτηση χρησιμότητας, της μορφής που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2.1. Τα σημεία αλλαγής της κλίσης των ευθειών υποθέτουμε ότι βρίσκονται στα ίδια σημεία της καμπύλης για καθέναν από τους κόμβους και συγκεκριμένα θεωρούμε ότι κάθε συνάρτηση χρησιμότητας διαθέτει 4 βαθμίδες ως εξής: η πρώτη βαθμίδα είναι από το μηδέν έως ισχύ P_{i1} (ίση με 10% της ονομαστικής ισχύος του κόμβου i , P_{iK}), στη συνέχεια οι ισχύεις P_{i2} και P_{i3} αντιστοιχούν σε 30% και 75% της P_{iK} , αντιστοίχως. Ο ρυθμός της συνάρτησης χρησιμότητας του Πίνακα 4-1 δηλώνει την κλίση της πρώτης βαθμίδας της συνάρτησης χρησιμότητας, η οποία συμβολίζεται ως $slope_{i1}$, ενώ για τις κλίσεις των υπόλοιπων βαθμίδων, με βάση την ιδιότητα αυξανόμενων κλίσεων, υποθέτουμε ότι $slope_{i2} = 2 \cdot slope_{i1}$, $slope_{i3} = 3 \cdot slope_{i1}$ και $slope_{i4} = 5 \cdot slope_{i1}$.

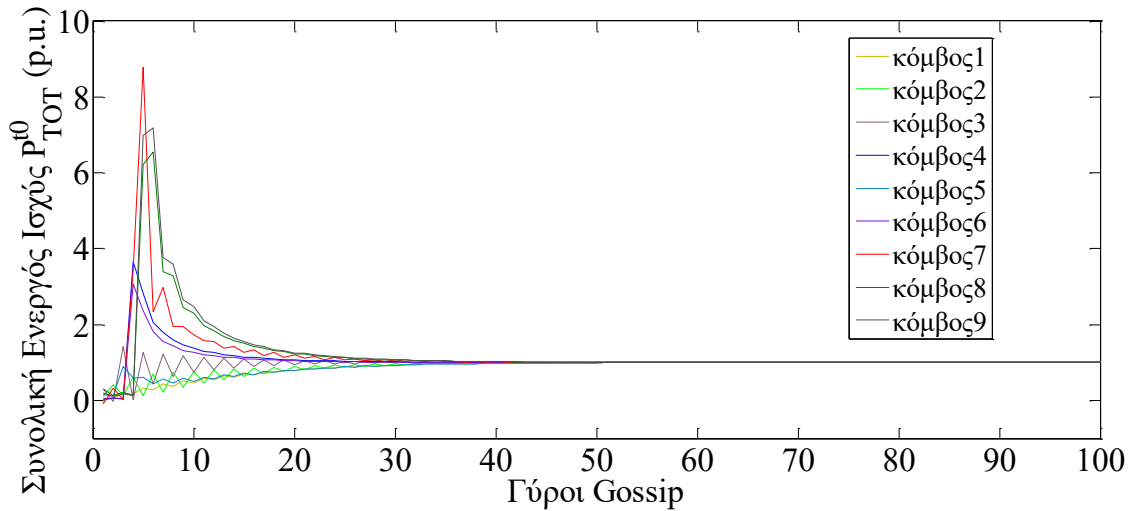
Πίνακας 4-1: Στοιχεία ζήτησης και ευελιξίας δικτύου 9 κόμβων

Κόμβος	$P_i^{t=0}$ (p.u.)	$slope_{i1}$
1	0,000	20,00
2	0,100	3,57
3	0,300	20,00
4	0,030	20,00
5	0,150	3,74
6	0,020	3,61
7	-0,100	3,33
8	0,300	3,85
9	0,100	3,48

Υποθέτουμε ότι η ροή στην αρχή της αναχώρησης τελεί υπό τον συνολικό περιορισμό $P_{max}=0.75$ p.u. Είναι εμφανές ότι το άθροισμα της καθαρής ζήτησης κατά τη χρονική στιγμή έναρξης του αλγορίθμου t_0 παραβιάζει τον εν λόγω περιορισμό αφού $P_{TOT}^{t_0} = \sum_{i=1}^9 P_i^{t_0} = 1.00$ p.u. $> P_{max}$.

Κατά τη χρονική στιγμή t_0 κάθε κόμβος εντοπίζει τοπικά τη συμφόρηση (congestion) εφαρμόζοντας τον Αλγόριθμο 1, δηλαδή ανταλλάσσοντας διαδοχικά πληροφορίες με τους ομότιμους κόμβους στη γειτονιά του και ανανεώνοντας την εσωτερική του πληροφορία, κατά τη διάρκεια ενός πεπερασμένου αριθμού γύρων. Το Σχήμα 4.3 παρουσιάζει τους γύρους του Αλγορίθμου 1 και πώς μέσω αυτών ανανεώνεται η πληροφορία έως ότου κάθε

κόμβος να προσεγγίσει το άθροισμα $\sum_{i=1}^9 P_i^{t_0} = 1.00 p.u.$, μέσω τοπικών υπολογισμών. Το πλήθος των γύρων Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων είναι περίπου 80, όπως είχαμε ήδη διαπιστώσει στο κεφάλαιο 3, για το δίκτυο 9 κόμβων στο σενάριο ζήτησης.



Σχήμα 4.3 : Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος για τη διαχείριση της συμφόρησης στο δίκτυο 9 κόμβων

Ο Πίνακας 4-2 παρουσιάζει ένα δείγμα των ανανεώσεων που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια των ανακυκλώσεων του Αλγόριθμου 1, τοπικά στον κόμβο 7. Ο συγκεκριμένος κόμβος επιλέγεται, επειδή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις κατά τους υπολογισμούς στους πρώτους γύρους Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων. Εντός κάθε γύρου υπολογίζεται η τιμή $v_{7,r+1}$ ως σταθμισμένος μέσος όρος του ζεύγους $(x_{AV,r}^{est,j}, s_r^{est,j})$, όπου $j \in N_7 = \{3,8,9\}$. Η μεγαλύτερη διακύμανση εμφανίζεται κατά τον τέταρτο γύρο και αιτιολογείται από το γεγονός ότι η βοηθητική παράμετρος s του Αλγόριθμου 1 λαμβάνει μη μηδενική τιμή για πρώτη φορά, καθώς η πληροφορία του γράφου για αυτή την παράμετρο φτάνει στον κόμβο 7 για πρώτη φορά μέσω των κόμβων 8 και 9, οι οποίοι ουσιαστικά παρέλαβαν αυτή την πληροφορία στον ακριβώς προηγούμενο γύρο.

Συνεχίζουμε την ανάλυση των αποτελεσμάτων, επισημαίνοντας ότι μετά τον κατανεμημένο υπολογισμό της συνολικής ζήτησης και τον τοπικό προσδιορισμό της παραβίασης του περιορισμού P_{max} , οι κόμβοι συμμετέχουν στον Αλγόριθμο 3 ώστε να λύσουν το πρόβλημα ανακατανομής πόρων υπό τον περιορισμό (4.17). Διαδοχικά κάθε κόμβος συγκρίνει τοπικά την υπολογισθείσα με αποκεντρωμένο τρόπο $P_{TOT}^{t_0}$ με το καθολικό όριο P_{max} , υπολογίζει την οριακή του χρησιμότητα για περικοπή φορτίου και μεταδίδει το λ_i προς τους γείτονές του. Στη συνέχεια οι κόμβοι χρησιμοποιούν τον Αλγόριθμο 2, προκειμένου να υπολογίσουν την ελάχιστη τιμή μεταξύ των οριακών χρησιμοτήτων και να προσδιορίσουν την προσφορά ευελιξίας με τη μικρότερη τιμή. Αυτό επαναλαμβάνεται για κάθε στάδιο του Αλγόριθμου 3, για όσα στάδια απαιτούνται μέχρι να καλυφθεί ο περιορισμός (4.17), δηλαδή όταν $P_{TOT}^t = P_{max}$. Στον Πίνακα 4-3 απεικονίζονται οι γύροι Αλγόριθμου 2, και ο τρόπος ανανέωσης της πληροφορίας, τοπικά σε κάθε κόμβο, κατά τη διάρκεια του υπολογισμού του ελαχίστου.

Πίνακας 4-2: Ενδεικτικές ανανεώσεις του Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων για τον κόμβο $i=7$ (Αλγόριθμος 1)

	$v_{7,r}$ (p.u.)	$x_{3,r}$	$s_{3,r}$	$x_{8,r}$	$s_{8,r}$	$x_{9,r}$	$s_{9,r}$
$v_{7,r=0}$	-0,1000	0,3000	0,0000	0,3000	0,0000	0,2000	0,0000
$v_{7,r=1}$	0,3345	-0,0315	0,0000	0,1374	0,0000	0,1008	0,0000
$v_{7,r=2}$	0,0191	1,4165	0,1657	0,2175	0,0000	0,1780	0,0000
$v_{7,r=3}$	3,4285	0,0080	0,0427	0,1368	0,0000	0,1255	0,0000
$v_{7,r=4}$	8,7822	1,2743	0,1614	6,2204	0,0291	6,9802	0,0237
$v_{7,r=5}$	2,3509	0,4266	0,0575	6,5535	0,0199	7,1911	0,0179
$v_{7,r=6}$	2,9715	1,2187	0,1519	3,3897	0,0477	3,7622	0,0412
$v_{7,r=7}$	1,9547	0,6236	0,0689	3,2828	0,0380	3,5861	0,0355

Πίνακας 4-3: Ενδεικτικές ανανεώσεις Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων (Αλγόριθμος 2)

Γύρος Αριθμός Κόμβου	1	2	3	4	5	6
1	20,00	7,14	3,74	3,74	3,48	3,48
2	7,14	3,74	3,74	3,48	3,48	3,48
3	20,00	6,66	3,48	3,48	3,48	3,48
4	60,00	20,00	6,66	3,48	3,48	3,48
5	3,74	3,74	3,74	3,74	3,48	3,48
6	10,83	10,83	6,66	3,48	3,48	3,48
7	6,66	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48
8	3,85	3,85	3,48	3,48	3,48	3,48
9	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48

Μετά από έξι γύρους του Αλγορίθμου 2, κάθε κόμβος διαθέτει τοπικά την πληροφορία για την ελάχιστη προσφορά από όλους τους κόμβους του δικτύου, στα πλαίσια της διαδικασίας περικοπής. Η σύγκριση της ελάχιστης προσφοράς με την εσωτερική οριακή χρησιμότητα, επιτρέπει στους κόμβους να αυτοπροσδιορίζονται ως «νικητές» και να αντιδρούν περικόπτοντας τη βαθμίδα του ευέλικτου φορτίου/παραγωγής τους, η οποία σχετίζεται με τη συγκεκριμένη τιμή οριακής χρησιμότητας. Στον Πίνακα 4-4 παρουσιάζονται οι τιμές για τις προσφερόμενες βαθμίδες περικοπών ή αλλιώς οι οριακές χρησιμότητες, ανά στάδιο του Αλγορίθμου 3.

Ο «νικητής» στο πρώτο στάδιο του Αλγορίθμου 3 είναι ο κόμβος 9, ο οποίος αποφασίζει να μειώσει τη ζήτηση του ευέλικτου φορτίου του σε P_{93} , αφού η αρχική του ζήτηση ήταν $P_9^{t=0} \in [P_{93} P_{9K}]$. Τα στάδια του Αλγορίθμου 3 συνεχίζονται έως ότου φτάσουμε στη συνολική επιθυμητή περικοπή φορτίου, ώστε να έχουμε συνολική ζήτηση, η οποία να ικανοποιεί τον συνολικό περιορισμό P_{max} . Η τελική κατανομή της διαφοράς πόρων ΔP^{t_0-t} μεταξύ των κόμβων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-5.

Πίνακας 4-4: Προσφορές για περικοπή κατά τα στάδια του Αλγόριθμου 3

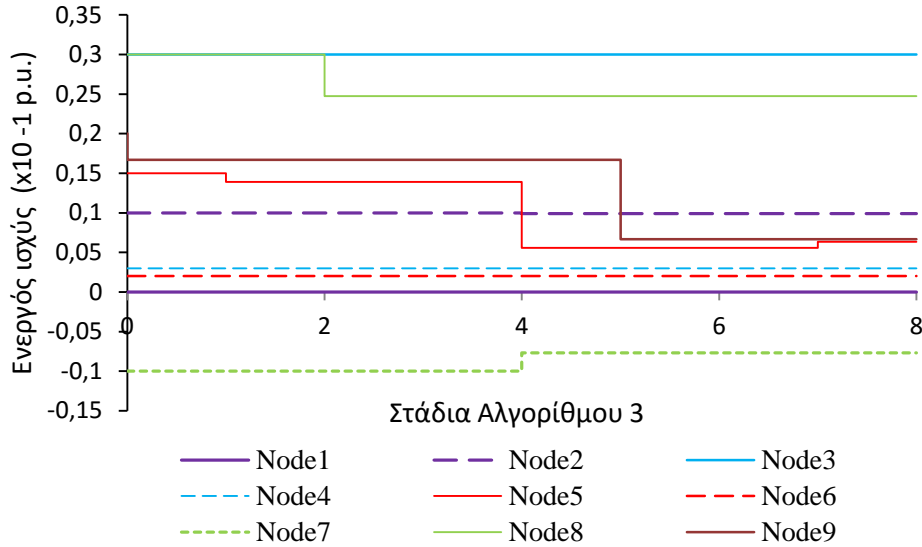
Στάδιο Αριθμός Κόμβου	1	2	3	4	5	6
1	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
2	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14
3	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
4	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
5	3,74	3,74	7,48	7,48	7,48	7,48
6	10,83	10,83	10,83	10,83	10,83	10,83
7	6,66	6,66	6,66	6,66	9,99	9,99
8	3,85	3,85	3,85	7,70	7,70	7,70
9	3,48	6,96	6,96	6,96	6,96	10,44

Πίνακας 4-5: Επιμερισμός της διαφοράς ΔP^{t_0-t}

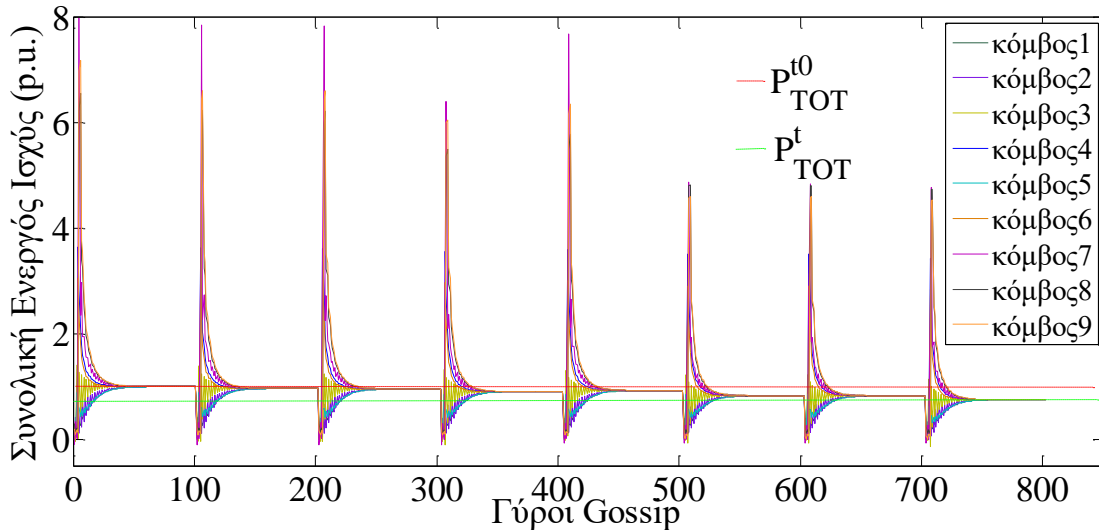
Κόμβος	P_i^t (ρ.υ.)
1	0,0000
2	0,0992
3	0,3000
4	0,0300
5	0,0636
6	0,0200
7	-0,0770
8	0,2475
9	0,0667

Επιπλέον, στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η κατανομή της διαφοράς ΔP^{t_0-t} βήμα προς βήμα, για καθένα από τα επτά στάδια του Αλγόριθμου 3, οπότε και τελικά έχουμε συμφωνία (consensus) στο $P_{TOT}^t = P_{max}$. Διευκρινίζεται ότι η αναπαράσταση της ζήτησης για τον κόμβο 1 συμπίπτει με τον οριζόντιο άξονα, καθώς αυτή παραμένει μηδενική καθ' όλη τη διάρκεια της εκτέλεσης του Αλγορίθμου 3. Εξάλλου η αρχική τιμή $P_1^{t_0}$ είναι ίση με μηδέν και αυτό ακριβώς αποτελεί τον τοπικό περιορισμό για τον κόμβο 1 κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης ($P_1^{t_0} \leq 0$).

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η εξέλιξη των υπολογισμών εντός των στιγμιότυπων του Αλγορίθμου 1 κατά τα διαφορετικά στάδια του Αλγορίθμου 3, μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση προς το P_{TOT}^t . Κάθε στάδιο του Αλγορίθμου 3 περιλαμβάνει κατά μέσο όρο 80 γύρους του Αλγορίθμου 1 (υπολογισμός συνολικής ζήτησης) και έξι γύρους του Αλγορίθμου 2 (υπολογισμός ελάχιστης προσφοράς για περικοπή).



Σχήμα 4.4: Περικοπή ανά κόμβο κατά τη διάρκεια των σταδίων του Αλγορίθμου 3 για το δίκτυο 9 κόμβων

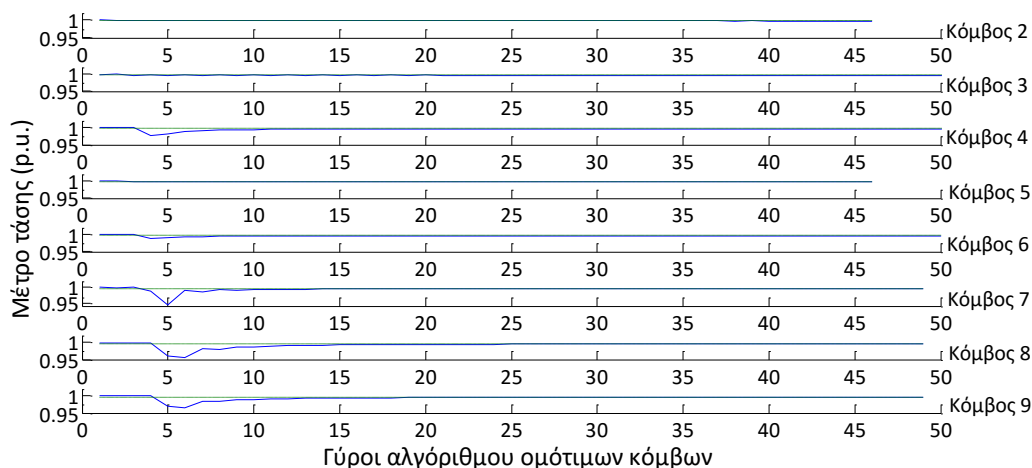


Σχήμα 4.5: Σύγκλιση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων στον περιορισμό συνολικής ζήτησης για το δίκτυο 9 κόμβων

Κατανεμημένος υπολογισμός τάσεων

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.7 μετά την επίλυση της συμφόρησης μέσω του Αλγορίθμου 3 μπορούμε να υπολογίσουμε επίσης με κατανεμημένο τρόπο τις τάσεις στους κόμβους, ώστε να επιβεβαιώσουμε ότι βρίσκονται εντός ορίων μετά την αναδιανομή των πόρων. Στην πραγματικότητα είναι αναμενόμενο οι τάσεις να έχουν προσεγγίσει ακόμη περισσότερο προς τη μονάδα, καθώς οι περικοπές στα φορτία ή στις διεσπαρμένες πηγές τελικά έχουν ως αποτέλεσμα την ελάττωση του φαινομένου πτώσης ή ανύψωσης τάσης κατά μήκος του ακτινικού δικτύου διανομής. Ωστόσο για την πληρότητα της παρουσίασης των αποτελεσμάτων, οι εν λόγω τάσεις υπολογίζονται κατανεμημένα και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του κεντρικού OPF.

Στο επόμενο γράφημα παρουσιάζεται η εξέλιξη της ανανέωσης της πληροφορίας κατά τους γύρους του Αλγορίθμου 1, ο οποίος από έπειτα περίπου 50 γύρους συγκλίνει στην τιμή της τάσης του εκάστοτε κόμβου.



Σχήμα 4.6 : Υπολογισμοί μέτρου τάσης για το δίκτυο 9 κόμβων

Τα αποτελέσματα του κατανεμημένου υπολογισμού τάσεων συγκρίνονται με έναν τυπικό αλγόριθμο OPF και τα αποτελέσματα της σύγκρισης σε σχέση με την ακρίβεια παρατίθενται στον Πίνακα 4-6.

Πίνακας 4-6: Υπολογισμός Τάσεων μέσω Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων

Κόμβος	Μέτρο τάσης (p.u.) πριν τη διαδικασία διαχείρισης	Μέτρο τάσης (p.u.) /υπολογισμός μέσω ροής φορτίου	Μέτρο τάσης (p.u.) /υπολογισμός μέσω Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων	Σχετικό σφάλμα (%)
1	1,0000	1,0000	1,0000	0,00%
2	0,9979	0,9983	0,9981	0,02%
3	0,9973	0,9979	0,9979	0,00%
4	0,9971	0,9977	0,9978	-0,01%
5	0,9976	0,9983	0,9980	0,03%
6	0,9973	0,9979	0,9979	0,00%
7	0,9967	0,9976	0,9974	0,01%
8	0,9957	0,9963	0,9969	-0,06%
9	0,9965	0,9974	0,9974	0,00%

4.7.2. Τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 κόμβων

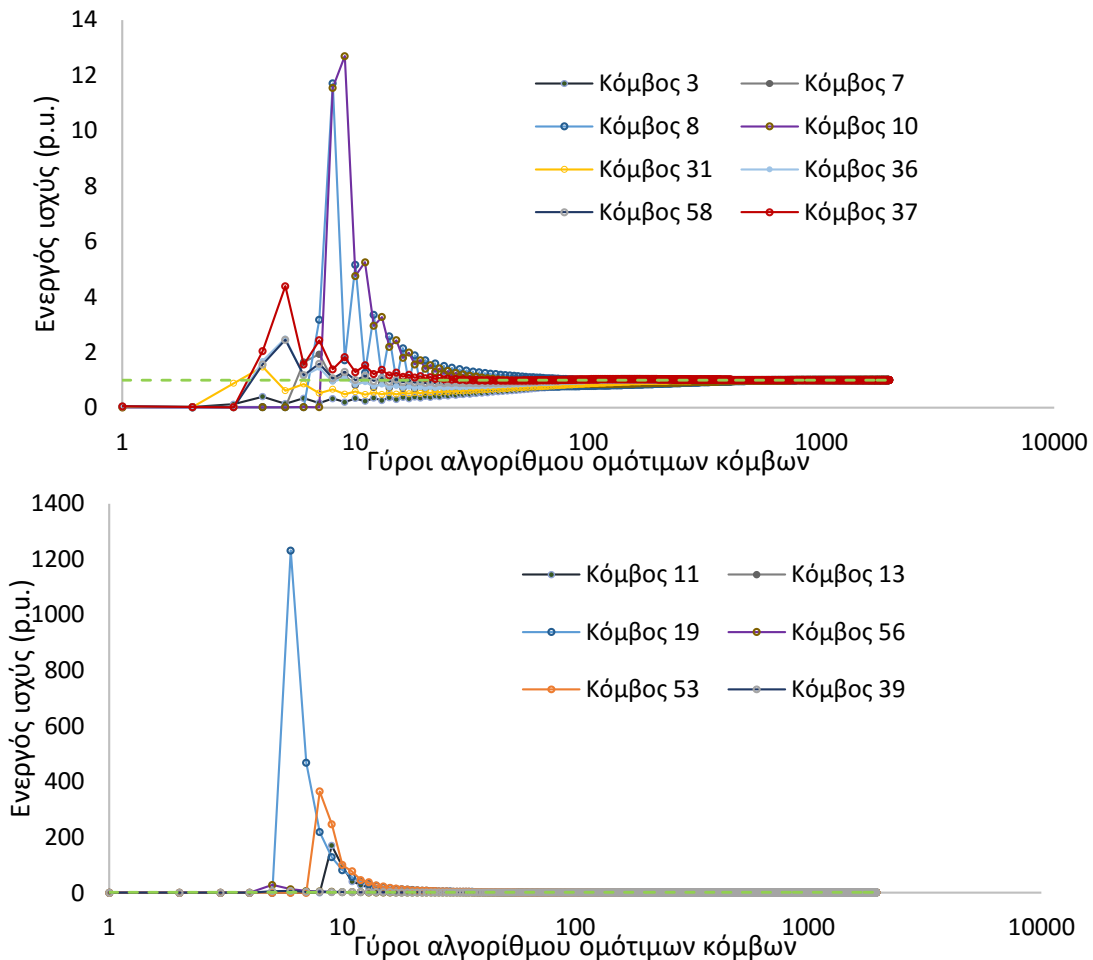
Η εφαρμογή κατανεμημένου ελέγχου και διαχείρισης συμφορήσεων παρουσιάζεται, στη συνέχεια, στο ακτινικό δίκτυο 65 κόμβων της ενότητας 3.8.2, το οποίο έχει προκύψει με βάση το δίκτυο IEEE 123, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα συμμετρικά φορτία και προσθέτοντας επιπλέον ένα σύνολο από διεσπαρμένες πηγές παραγωγής σε κάποιους από τους κόμβους του δικτύου. Στο Παράρτημα Β2 δίνονται η τοπολογία, ο αντίστοιχος γράφος αναπαράστασης του δικτύου, ο πίνακας βέλτιστων βαρών για τους αλγόριθμους ομότιμων κόμβων και το προφίλ ζήτησης/παραγωγής για το εξεταζόμενο σενάριο συμφόρησης.

Θεωρούμε ότι οι περισσότεροι κόμβοι διαθέτουν ένα ευέλικτο φορτίο, σύμφωνα με τον Πίνακα ΠΒ-3 του Παραρτήματος Β2. Κάθε ευέλικτο φορτίο χαρακτηρίζεται από μία τμηματικά γραμμική συνάρτηση χρησιμότητας, της μορφής που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2.1, με όμοια λογική με αυτή των συναρτήσεων χρησιμότητας του δικτύου 9 κόμβων, όσον αφορά το συσχετισμό των κλίσεων μεταξύ των βαθμίδων. Ο ρυθμός της

συνάρτησης χρησιμότητας (Cost Rate) του Πίνακα ΠΒ-3 υποδηλώνει την κλίση της πρώτης βαθμίδας της συνάρτησης χρησιμότητας.

Η συνολική ροή του δικτύου τελεί υπό τον περιορισμό $P_{max}=0.75$ p.u. Είναι εμφανές ότι το άθροισμα της καθαρής ζήτησης κατά τη χρονική στιγμή έναρξης του αλγορίθμου t_0 παραβιάζει τον εν λόγω περιορισμό αφού $P_{TOT}^{t_0} = \sum_{i=1}^{65} P_i^{t_0} = 1.00$ p.u. $> P_{max}$.

Κατά τη χρονική στιγμή αφετηρίας του αλγορίθμου t_0 κάθε κόμβος εντοπίζει τοπικά την συμφόρηση (congestion) εφαρμόζοντας τον Αλγόριθμο 1. Τα Σχήμα 4.7 α-β παρουσιάζουν τους γύρους Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων και πώς μέσω αυτών ανανεώνεται τοπικά η πληροφορία έως ότου κάθε κόμβος να προσεγγίσει το άθροισμα συνολικής ζήτησης, μέσω καταναμημένου υπολογισμού. Το απαιτούμενο πλήθος των γύρων Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων είναι περίπου 1.700, σε κάθε κόμβο.



Σχήμα 4.7 α-β: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος σε ενδεικτικούς κόμβους (δίκτυο IEEE 123 κόμβων)

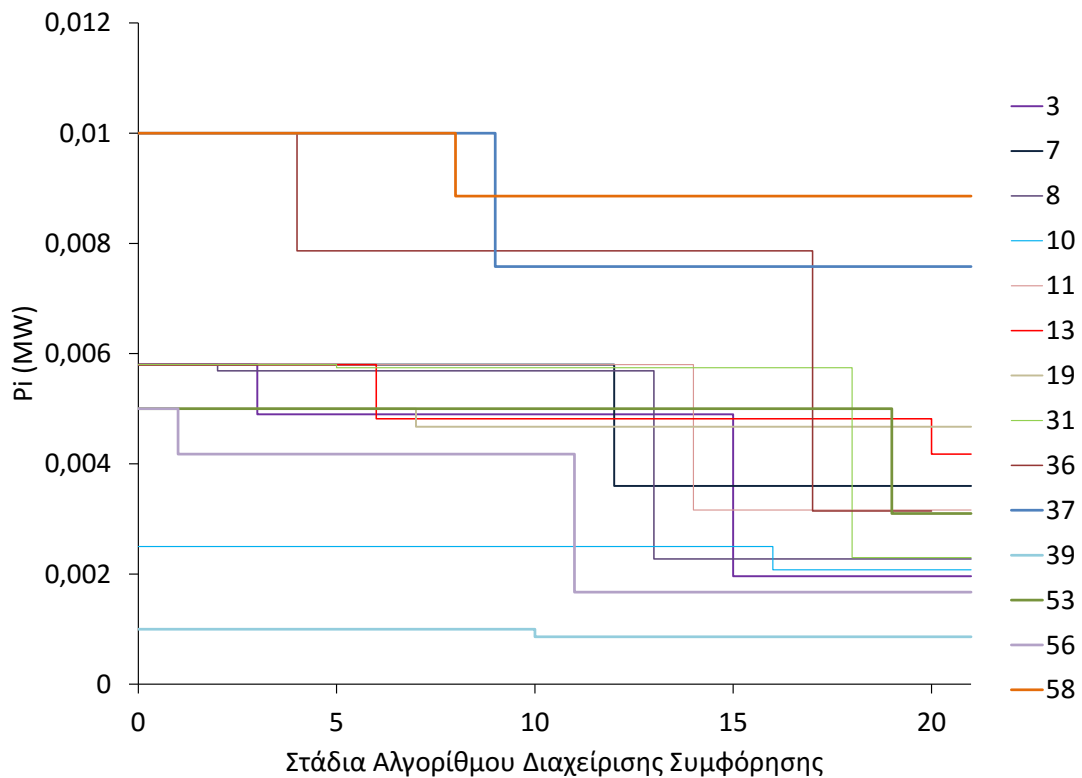
Συνεχίζουμε την ανάλυση των αποτελεσμάτων, επισημαίνοντας ότι μετά τον υπολογισμό της συνολικής καθαρής ζήτησης και τον προσδιορισμό της παραβίασης του περιορισμού P_{max} , οι κόμβοι συμμετέχουν στον Αλγόριθμο 3 ώστε να λύσουν το πρόβλημα ανακατανομής υπό τον περιορισμό (4.17). Διαδοχικά κάθε κόμβος συγκρίνει τοπικά την υπολογισθείσα με αποκεντρωμένο τρόπο $P_{TOT}^{t_0}$ με το όριο P_{max} , υπολογίζει την οριακή του χρησιμότητα για περικοπή φορτίου και μεταδίδει το λ_i προς τους γείτονές του. Κατόπιν, οι κόμβοι συμμετέχουν στον Αλγόριθμο 2, προκειμένου να υπολογίσουν την ελάχιστη τιμή μεταξύ των οριακών χρησιμότητων και να προσδιορίσουν την προσφορά με τη μικρότερη

τιμή για την παροχή ευελιξίας. Αυτό επαναλαμβάνεται για κάθε στάδιο του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων (Αλγόριθμος 3), για όσα στάδια απαιτούνται μέχρι να ικανοποιηθεί ο περιορισμός $P_{TOT}^t = P_{max}$. Στον Πίνακα 4-7 απεικονίζονται οι γύροι Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων, και ο τρόπος ανανέωσης της πληροφορίας κατά τη διάρκεια του υπολογισμού του ελαχίστου, εσωτερικά σε κάθε κόμβο.

Μετά από κατά μέγιστο 18 γύρους του Αλγορίθμου 2, κάθε κόμβος διαθέτει τοπικά την πληροφορία για την ελάχιστη προσφορά στα πλαίσια της διαδικασίας περικοπής. Η σύγκριση του ελαχίστου με την εσωτερική οριακή χρησιμότητα κάθε κόμβου, επιτρέπει στους κόμβους να αυτοπροσδιορίζονται ως «νικητές» και να αντιδρούν, περικόπτοντας τη βαθμίδα του ευέλικτου φορτίου/παραγωγής, η οποία σχετίζεται με τη συγκεκριμένη οριακή χρησιμότητα. Στον Πίνακα 4-7 παρουσιάζονται οι τιμές για τις προσφερόμενες βαθμίδες περικοπών ή αλλιώς οι οριακές χρησιμότητες ανά στάδιο του Αλγορίθμου 3.

Ο «νικητής» στο πρώτο στάδιο του Αλγορίθμου 3 είναι ο κόμβος 56, ο οποίος αποφασίζει να μειώσει τη ζήτηση του ευέλικτου φορτίου του. Τα στάδια του Αλγορίθμου 3 συνεχίζονται έως ότου πραγματοποιηθεί η συνολικά απαιτούμενη περικοπή φορτίου, ώστε η συνολική ζήτηση να ικανοποιεί το συνολικό περιορισμό P_{max} . Η τελική κατανομή της διαφοράς πόρων ΔP^{t_0-t} μεταξύ των κόμβων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-7.

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η κατανομή της διαφοράς ΔP^{t_0-t} , βήμα προς βήμα, για καθένα από τα 21 στάδια του Αλγορίθμου 3, οπότε και τελικά έχουμε συμφωνία (consensus) στο $P_{TOT}^t = P_{max}$.



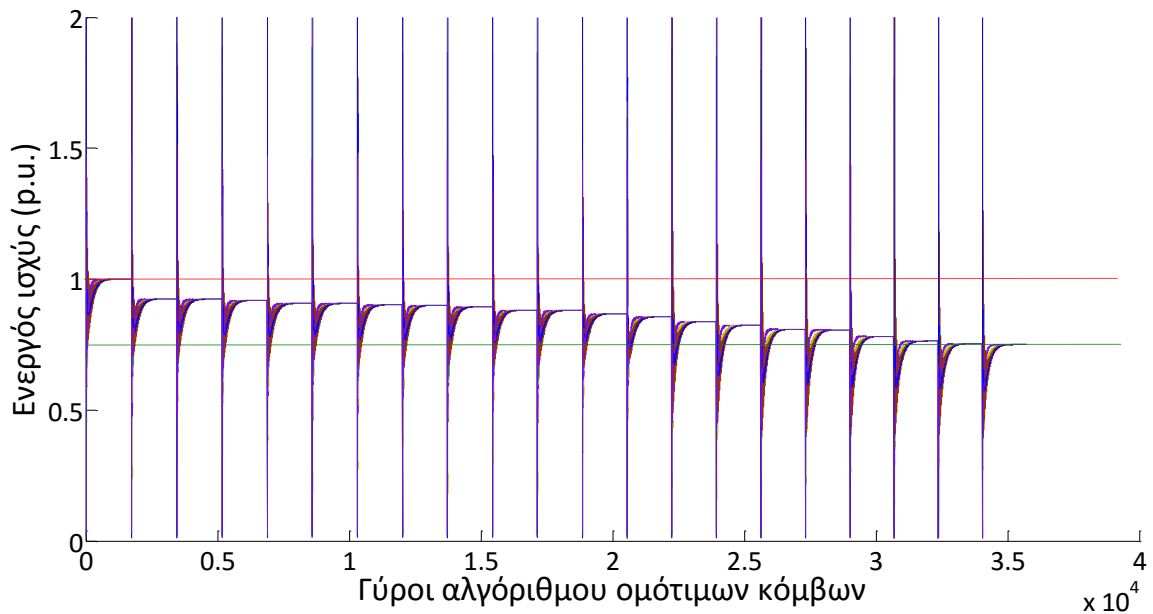
Σχήμα 4.8: Περικοπή ανά κόμβο κατά τη διάρκεια των σταδίων του Αλγορίθμου 3 για το δίκτυο IEEE 123 κόμβων

Πίνακας 4-7 : Προσφορές για περικοπή κατά τα στάδια του Αλγόριθμου 3 & Επιμερισμός της διαφοράς ΔP^{t_0-t}

Γύρος Αριθμός Κόμβου	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	P_i^t (p.u.)
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0305
2	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	0,0305
3	3,18	3,18	3,18	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37	9,56	9,56	9,56	9,56	9,56	0,0103
4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0000
5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0305
6	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	0,0305
7	6,16	6,16	6,16	6,16	6,16	6,16	6,16	6,16	6,16	6,16	6,16	6,16	9,24	9,24	9,24	9,24	9,24	9,24	9,24	9,24	0,0189
8	3,08	3,08	6,17	6,17	6,17	6,17	6,17	6,17	6,17	6,17	6,17	6,17	6,17	9,26	9,26	9,26	9,26	9,26	9,26	9,26	0,0119
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0000
10	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	9,61	9,61	9,61	9,61	0,0109
11	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	9,42	9,42	9,42	9,42	9,42	0,0166
12	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	0,0305
13	3,49	3,49	3,49	3,49	3,49	3,49	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	0,0219
14	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0000
15	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0021
16	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0052
17	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	0,0021
18	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	0,0021
19	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	7,27	7,27	7,27	7,27	7,27	7,27	7,27	7,27	7,27	7,27	7,27	7,27	7,27	0,0246
20	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	9,90	0,0021
21	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0263
22	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0263
23	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	0,0021
24	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	0,0021
25	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0526
26	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0021
27	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0021
28	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	0,0052
29	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0526
30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0021
31	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	6,66	9,99	9,99	0,0121
32	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	9,14	0,0021

33	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68	0,0052
34	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	0,0021
35	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	6,99	0,0021
36	3,20	3,20	3,20	3,20	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	6,41	9,62	9,62	9,62	0,0165
37	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	0,0399
38	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	0,0021
39	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	3,88	7,76	7,76	7,76	7,76	7,76	7,76	7,76	7,76	7,76	7,76	0,0045
40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0000
41	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0052
42	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0021
43	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	7,25	0,0263
44	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	9,53	0,0052
45	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	9,40	0,0021
46	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	0,0052
47	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0526
48	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	0,0052
49	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	0,0021
50	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	7,96	0,0263
51	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0021
52	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	0,0021
53	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	6,95	10,4	0,0163
54	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0021
55	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	0,0021
56	3,06	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	0,0087
57	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	9,36	0,0021
58	3,72	3,72	3,72	3,72	3,72	3,72	3,72	3,72	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45	7,45	0,0466
59	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0263
60	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0021
61	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	9,15	0,0052
62	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	9,09	0,0021
63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0021
64	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	7,86	0,0263
65	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,0000

Επιπλέον, στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η εξέλιξη των τοπικών υπολογισμών εντός των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, μέχρι τη σύγκλιση προς το απαιτούμενο P_{TOT}^t . Κάθε στάδιο του Αλγορίθμου 3 περιλαμβάνει κατά μέσο όρο 1.700 γύρους Αλγορίθμου 1 (συνολική ζήτηση) και 15 γύρους Αλγορίθμου 2 (υπολογισμός ελάχιστης προσφοράς για περικοπή).



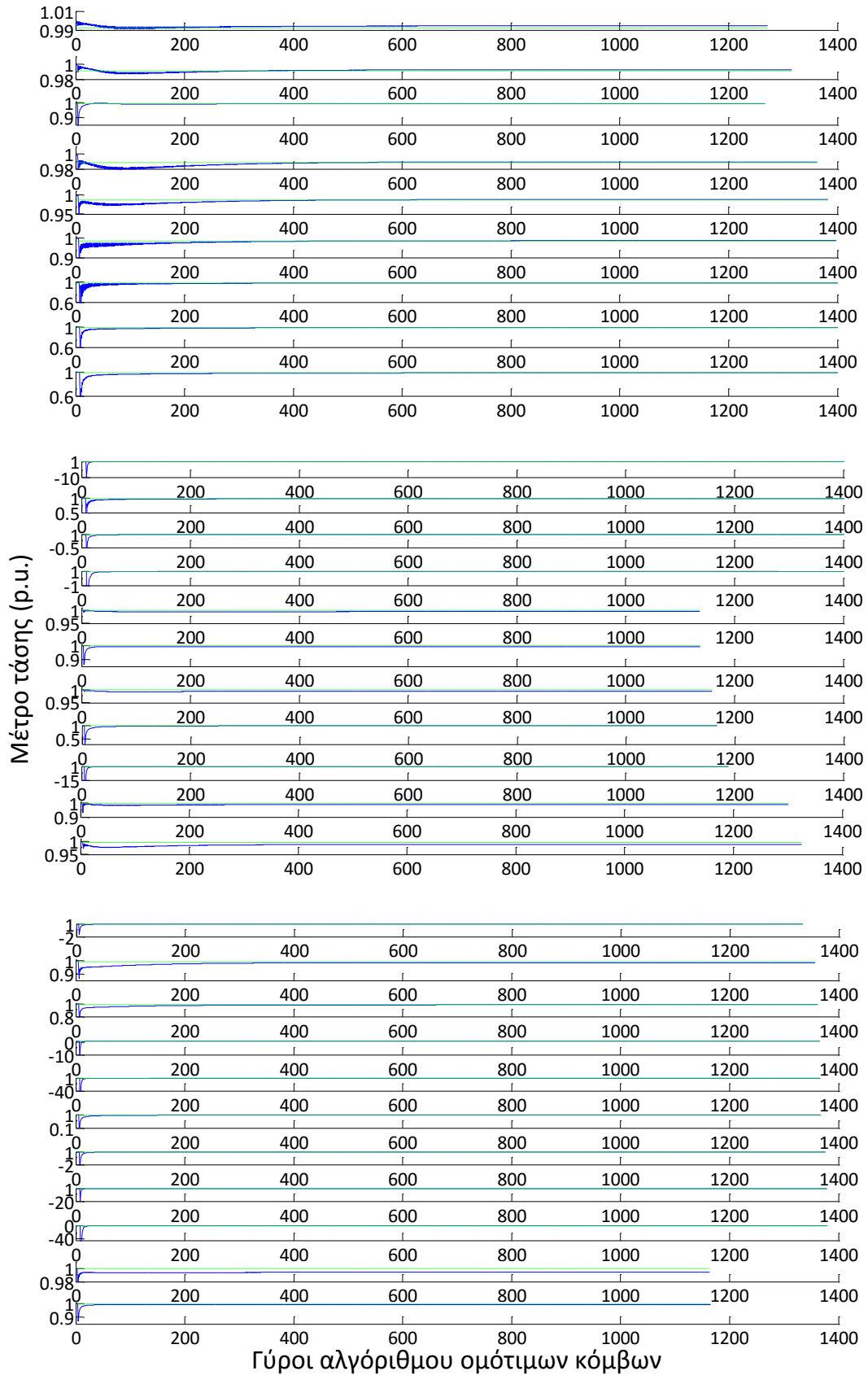
Σχήμα 4.9: Σύγκλιση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων στον περιορισμό συνολικής ζήτησης για το δίκτυο IEEE 123 κόμβων

Καταναμημένος υπολογισμός τάσεων

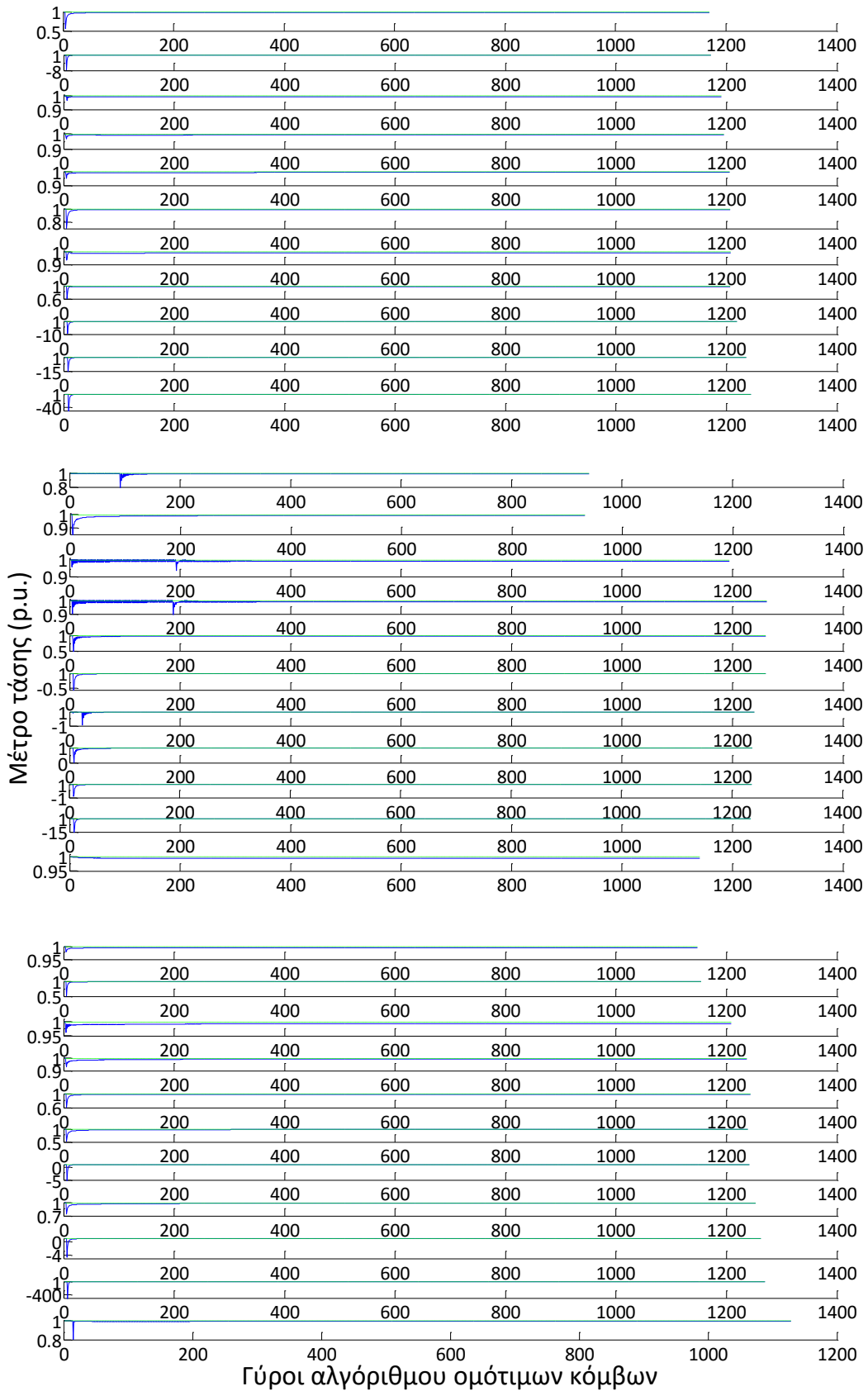
Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.8 μετά την επίλυση της συμφόρησης μέσω του Αλγορίθμου 3 μπορούμε να υπολογίσουμε με καταναμημένο τρόπο τις τάσεις στους κόμβους, ώστε να επιβεβαιώσουμε ότι βρίσκονται εντός ορίων μετά την αναδιανομή των πόρων. Αναμένεται οι τάσεις να έχουν προσεγγίσει ακόμη περισσότερο προς τη μονάδα, καθώς οι περικοπές στα φορτία ή στις διεσπαρμένες πηγές έχουν ως αποτέλεσμα την ελάττωση του φαινομένου πώσης ή ανύψωσης τάσης κατά μήκος του ακτινικού δικτύου διανομής. Ωστόσο για την πληρότητα της παρουσίασης των αποτελεσμάτων, οι εν λόγω τάσεις υπολογίζονται καταναμημένα και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του κεντρικού OPF.

Στα Σχήμα 4.10-4.11 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ανανέωσης της πληροφορίας κατά τον Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων, ο οποίος έπειτα από περίπου 1.200-1.400 γύρους συγκλίνει στην τιμή της τάσης του εκάστοτε κόμβου.

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης του καταναμημένου υπολογισμού τάσεων με έναν τυπικό αλγόριθμο OPF παρατίθενται στον Πίνακα 4-8.



Σχήμα 4.10 α-γ: Υπολογισμοί μέτρου τάσης μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο διαχείρισης συμφορήσης)



Σχήμα 4.11 α-γ: Υπολογισμοί μέτρου τάσης μέσω αλγορίθμου ομότιμων κόμβων (δίκτυο 123 κόμβων- σενάριο διαχείρισης συμφορήσης)

Πίνακας 4-8: Υπολογισμός Τάσεων μέσω Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων

Κόμβος	Μέτρο τάσης (ρ.υ.) πριν τη διαδικασία διαχείρισης	Μέτρο τάσης (ρ.υ.) /υπολογισμός μέσω ροής φορτίου	Μέτρο τάσης (ρ.υ.) /υπολογισμός μέσω Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων	Σχετικό σφάλμα (%)
2	0,9973	0,9980	0,9946	0,34%
3	0,9895	0,9926	0,9929	-0,03%
4	0,9868	0,9908	0,9951	-0,43%
5	0,9890	0,9930	0,9905	0,25%
6	0,9835	0,9883	0,9892	-0,08%
7	0,9816	0,9870	0,9881	-0,11%
8	0,9800	0,9859	0,9875	-0,16%
9	0,9791	0,9853	0,9875	-0,22%
10	0,9791	0,9853	0,9872	-0,19%
11	0,9786	0,9850	0,9870	-0,20%
12	0,9782	0,9848	0,9869	-0,22%
13	0,9784	0,9847	0,9867	-0,20%
14	0,9781	0,9845	0,9867	-0,22%
15	0,9781	0,9845	0,9948	-1,03%
16	0,9999	0,9999	0,9948	0,51%
17	0,9999	0,9999	0,9944	0,55%
18	0,9995	0,9995	0,9943	0,52%
19	0,9994	0,9994	0,9939	0,55%
20	0,9989	0,9990	0,9908	0,83%
21	0,9958	0,9958	0,9895	0,64%
22	0,9946	0,9946	0,9891	0,55%
23	0,9941	0,9941	0,9878	0,64%
24	0,9928	0,9928	0,9875	0,54%
25	0,9925	0,9925	0,9872	0,54%
26	0,9922	0,9922	0,9871	0,51%
27	0,9921	0,9921	0,9871	0,51%
28	0,9922	0,9922	0,9866	0,56%
29	0,9916	0,9916	0,9865	0,52%
30	0,9915	0,9915	0,9864	0,51%
31	0,9914	0,9914	0,9943	-0,29%
32	0,9988	0,9994	0,9942	0,52%
33	0,9988	0,9993	0,9941	0,52%
34	0,9987	0,9992	0,9941	0,52%
35	0,9987	0,9992	0,9938	0,55%
36	0,9979	0,9989	0,9937	0,52%
37	0,9977	0,9988	0,9934	0,54%
38	0,9975	0,9985	0,9934	0,51%
39	0,9975	0,9985	0,9934	0,51%
40	0,9975	0,9985	0,9934	0,51%
41	0,9975	0,9985	0,9931	0,54%
42	0,9972	0,9982	0,9927	0,56%
43	0,9967	0,9978	0,9924	0,54%
44	0,9965	0,9975	0,9929	0,46%
45	0,9978	0,9980	0,9929	0,51%
46	0,9978	0,9980	0,9910	0,70%
47	0,9957	0,9961	0,9900	0,61%
48	0,9946	0,9950	0,9900	0,51%
49	0,9946	0,9950	0,9899	0,51%
50	0,9946	0,9950	0,9897	0,54%
51	0,9942	0,9947	0,9895	0,53%
52	0,9940	0,9946	0,9895	0,51%
53	0,9940	0,9946	0,9894	0,52%
54	0,9938	0,9945	0,9947	-0,02%

55	0,9995	0,9998	0,9946	0,52%
56	0,9993	0,9997	0,9945	0,52%
57	0,9989	0,9996	0,9933	0,63%
58	0,9983	0,9984	0,9925	0,59%
59	0,9975	0,9976	0,9923	0,53%
60	0,9973	0,9974	0,9924	0,50%
61	0,9974	0,9975	0,9924	0,52%
62	0,9973	0,9975	0,9920	0,55%
63	0,9969	0,9971	0,9917	0,55%
64	0,9966	0,9967	0,9913	0,54%
65	0,9963	0,9964	0,9949	0,15%

4.8. Εκτεταμένος Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων για διαχείριση συμφορήσεων

Σε συνέχεια του αρχικού προβλήματος συμφόρησης που ορίστηκε στην ενότητα 4.3, παρατίθεται το πρόβλημα διαχείρισης συμφορήσεων σε εκτεταμένη μορφή, έτσι ώστε να περιλαμβάνει τον κατανεμημένο υπολογισμό τάσεων και τις τοπικές συμφορήσεις σε επίπεδο κλάδων του δικτύου. Επιπλέον στους υπολογισμούς συμπεριλαμβάνονται πλέον και οι απώλειες.

$$\text{Minimize } F \quad (4.22)$$

$$\text{υπό περιορισμούς} \quad \sum_{i=1}^n S_i \leq S_{max} \quad (4.23)$$

$$Q_i^{t_1} = \varphi_i(P_i^{t_1}) \quad (4.24)$$

$$S_i^{t_1} = \sum_{i=1}^n \sqrt{P_i^{t_1^2} + Q_i^{t_1^2}} \quad (4.25)$$

$$0 \leq P_i \leq P_i^{t_0} \quad \text{εάν το } i \text{ είναι φορτίο} \quad (4.26)$$

$$P_{G,max} \leq P_i \leq P_i^{t_0} \quad \text{εάν το } i \text{ είναι γεννήτρια} \quad (4.27)$$

$$I_{ij} \leq I_{ij}^{max} \quad (4.28)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο εκτεταμένος Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων για τη διαχείριση συμφορήσεων, ο οποίος εκτελείται τοπικά σε κάθε ομότιμο κόμβο και περιλαμβάνει τις ακόλουθες διαδικασίες:

1. Κατανεμημένος υπολογισμός της συνολικής φαινόμενης ισχύος S_{TOT}
2. Τοπικός προσδιορισμός της παραβίασης του ορίου των ροών, συγκρίνοντας την S_{TOT} με τη μέγιστη S_{max} .
3. Οποτεδήποτε από τη σύγκριση προκύπτει ότι $S_{TOT}^{t_0} > S_{max}$, εκκινεί ο Αλγόριθμος 4.
4. Οι ομότιμοι κόμβοι στέλνουν την αποτίμηση της ευελιξίας τους στους γείτονες τους.
5. Οι ευελιξίες κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά, με κατανεμημένο τρόπο, και συμμετέχουν στην περικοπή οι πιο ευέλικτοι κόμβοι.
6. Υπολογίζονται με κατανεμημένο τρόπο οι τάσεις, οι ροές στους κλάδους και οι απώλειες.
7. Ελέγχεται από κάθε ομότιμο κόμβο ο περιορισμός (4.28) και εφόσον υπάρχει παραβίαση του εκκινεί περαιτέρω περικοπή στο κατάντι δίκτυο.
8. Επιστροφή στο πρώτο βήμα και αναμονή.

Αλγόριθμος 4 Congestion management gossip algorithm for node i
(including voltages and currents calculation)

```

1: round r=0
2:  $P_{i,r}^{t_1} \leftarrow P_i^{t_0}$ 
3:  $S_{TOT,r}^{est,i} \leftarrow S_{TOT}^{t_0}$ 
4: calculates  $u_i'(P_{i,r}^{t_1} - \Delta P_i)$ 
5: sends to all nodes  $j \in N_i$  the value  $u_i'(P_{i,r}^{t_1} - \Delta P_i)$ 
6: round r>0
7: while  $S_{TOT,r}^{est,i} > S_{max}$  do
8:   receives from all nodes  $j \in N_i$  their values  $u_i'(P_{i,r}^{t_1} - \Delta P_i)$ 
9:   uses Algorithm 2 to calculate the global  $u'_{min,r}$ 
10:  if  $u_i'(P_{i,r}^{t_1} - \Delta P_i) = u'_{min,r}$  then
11:     $P_{i,r+1}^{t_1} = P_{i,r}^{t_1} - \Delta P_i$ 
12:     $Q_{i,r+1}^{t_1} = \varphi(P_{i,r+1}^{t_1})$ 
12:  else  $S_{i,r+1}^{t_1} = S_{i,r}^{t_1}$ 
13:  end if
14:  if  $(P_{i,r}^{t_1} - \Delta P_i) > P_{i,min}$  then
15:    calculates  $u_i'(P_{i,r}^{t_1} - \Delta P_i)$ 
16:  else  $u_i'(P_{i,r+1}^{t_1} - \Delta P_i) = \max(u_i)$  //large value
17:  end if
18:  sends to all nodes  $j \in N_i$  the value  $u_i'(P_{i,r+1}^{t_1} - \Delta P_i)$ 
19:  uses Algorithm 1 to calculate  $S_{TOT,r+1}^{est,i}$ 
20: end while
21: uses Algorithm 1 to calculate  $V_{i,r+1}^{est,i}$ 
22: calculates  $I_{ij,r+1}^{est,i} = \frac{V_{i,r+1}^{est,i} - V_{j,r+1}^{est,j}}{z_{ij}}$ 
23: calculates  $Losses_{ij,r+1}^{est,i} = (I_{ij,r+1}^{est,i})^2 \cdot Real(z_{ij})$ 
23:  if  $I_{ij,r+1}^{est,i} > I_{ij}^{max}$  then
24:     $\Delta P_{extra} = (I_{ij,r+1}^{est,i} - I_{ij}^{max})V_{i,r+1}^{est,i}$ 
25:    if  $P_{i,r+1}^{t_1} - \Delta P_{extra} > 0$  then
26:       $P_{i,r+1}^{t_1} = P_{i,r+1}^{t_1} - \Delta P_{extra}$ 
27:    else sends to all nodes the value  $\Delta P_{extra}$ 
28:      every node k with  $z_{kk}$  equal to  $z_{ik}$  bids again
      within Algorithm 4
29:    end if
30:  end if

```

Έπειτα από τον καταναμημένο υπολογισμό των τάσεων στη γραμμή 21, τα ρεύματα των κλάδων και οι απώλειες των τροφοδοτούμενων κλάδων υπολογίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.13)-(3.15) ακολουθώντας τη λογική της ενότητας 3.7. Οι απώλειες των κλάδων

προστίθενται στην εκτίμηση που έχει κάθε κλάδος για τη συνολική φαινόμενη ισχύ $S_{TOT}^{t_0}$.

Ο Αλγόριθμος 4 μεταξύ των γραμμών 23 και 29 επιλύει ένα επιπρόσθετο πρόβλημα υπερφόρτισης μεμονωμένων κλάδων του δικτύου. Η κατανεμημένη επίλυση του προβλήματος αυτού επιτυγχάνεται αξιοποιώντας τη δομή του πίνακα αθροιστικών αγωγιμοτήτων Z . Συγκεκριμένα οι κόμβοι που βρίσκονται σε κοινούς κλάδους με αυτόν που παρουσιάζει την παραβίαση του περιορισμού, καλούνται να συμμετέχουν εκ νέου σε μία εσωτερική ανακύκλωση περικοπών. Αυτή η νέα απαίτηση για περικοπές ύψους ΔP_{extra} προστίθεται στη συνολική απαίτηση περικοπών, αλλά στη διαδικασία «μειοδοσίας» για την εν λόγω περικοπή συμμετέχουν αποκλειστικά οι κόμβοι k , οι οποίοι τροφοδοτούνται μέσω του συγκεκριμένου κλάδου που ξεκινάει από τον κόμβο i . Η απόφαση για συμμετοχή ή μη στη διαδικασία είναι επίσης κατανεμημένη, καθώς όλοι οι κόμβοι μπορούν να συγκρίνουν το z_{ik} με το z_{ii} . Η τιμή της z_{ii} αποτελεί μία επιπρόσθετη πληροφορία, η οποία πρέπει να μεταδοθεί μέσω του γράφου προς όλους τους κόμβους του δικτύου μετά τον εντοπισμό της υπερφόρτισης του κλάδου.

Ομοίως, οι παραβιάσεις των επιθυμητών ορίων της τάσης υπολογίζονται από τον Αλγόριθμο 2 ή μετρώνται τοπικά και κάθε φορά που εντοπίζεται μία παραβίαση εκκινεί ο Αλγόριθμος 3 ή 4. Όταν εντοπίζεται μία παραβίαση του άνω ή του κάτω ορίου της τάσης που έχουμε θέσει, όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται ανάντι του συγκεκριμένου κόμβου (στο ίδιο μονοπάτι αλλά πιο κοντά προς το ζυγό της αναχώρησης) συμμετέχουν στον Αλγόριθμο 4 και προσφέρουν την ευελιξία τους για μεταβολή της ισχύος τους έως ότου η τάση επανέλθει εντός των αποδεκτών ορίων. Επισημαίνεται ότι οι περικοπές, οι οποίες προκύπτουν ως αποτέλεσμα του αλγορίθμου, προτείνεται να εφαρμόζονται συνολικά και όχι σταδιακά, δηλαδή μετά το πέρας όλων των γύρων και των σταδίων των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, οπότε όλοι οι κόμβοι γνωρίζουν ότι το πρόβλημα έχει επιλυθεί, είτε συμμετείχαν ενεργά στην επίλυση είτε όχι. Ο απαιτούμενος χρόνος από τον εντοπισμό του προβλήματος μέχρι τη σύγκλιση του αλγορίθμου παίζει σημαντικό ρόλο. Μία παραμετρική ανάλυση της ταχύτητας σύγκλισης παρατίθεται στην ενότητα 5.6. Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι τα όρια που έχουμε θέσει για την εκκίνηση του αλγορίθμου είναι πιο αυστηρά σε σχέση με τα αποδεκτά όρια σε σχέση με το πρότυπο EN50160, έτσι ώστε ο αλγόριθμος να λειτουργεί σε προληπτικό επίπεδο.

4.8.1. Ποιοτικά αποτελέσματα εκτεταμένου αλγορίθμου

Ο Αλγόριθμος 4 εφαρμόστηκε στο ακτινικό δίκτυο 9 κόμβων και στο τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 κόμβων. Τα αποτελέσματα είναι όμοια με τα αποτελέσματα του Αλγορίθμου 3 με τις εξής διαφοροποιήσεις/παρατηρήσεις:

- Ο λεπτομερής υπολογισμός της φαινόμενης ισχύος (έναντι της ενεργού όπως συμβαίνει στον Αλγόριθμο 3) οδηγεί ταχύτερα στην έναυση του αλγορίθμου διαχείρισης συμφόρησης σε κάποια από τα εξεταζόμενα σενάρια προσομοιώσεων, εφόσον ο περιορισμός (4.23) περιλαμβάνει στο άθροισμα των επιμέρους κόμβων επιπρόσθετως την άεργο ισχύ και τις απώλειες των κλάδων.
- Το επιπρόσθετο πρόβλημα υπερφόρτισης μεμονωμένων κλάδων του δικτύου, το οποίο επιλύει ο Αλγόριθμος 4 μεταξύ των γραμμών 23 και 29, δεν παρατηρήθηκε να ενεργοποιείται σε καμία από τις διαμορφώσεις των εξεταζόμενων δικτύων.

- Το πλήθος των γύρων αλγόριθμου ομότιμων κόμβων που απαιτείται για τους επιμέρους υπολογισμούς είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το αντίστοιχο πλήθος του Αλγορίθμου 3.
- Στον εκάστοτε γύρο παρατηρήθηκε συστηματική επιβάρυνση στον χρόνο που απαιτείται για τους υπολογισμούς, όπως αναλύεται στην ενότητα 5.6.

Συμπερασματικά, ο Αλγόριθμος 3, ο οποίος ουσιαστικά αποτελεί μια απλοποιημένη εκδοχή του Αλγορίθμου 4, θεωρείται καταλληλότερος για τις αποκεντρωμένες εφαρμογές διαχείρισης συμφορήσεων, εάν λάβουμε υπόψη μας τα ακόλουθα:

- Εισάγοντας στο άθροισμα της γραμμής 18 του Αλγορίθμου 3 μία εκτίμηση των απωλειών, ως ποσοστό της συνολικής ενεργού ισχύος (της τάξης του 2-3%) εξασφαλίζεται η έγκαιρη έναυση του Αλγορίθμου 3.
- Η συνολική χρονική καθυστέρηση στη σύγκλιση των αλγορίθμων για τη διαχείριση της συμφόρησης και η πολυπλοκότητα των υπολογισμών σε κάθε κόμβο δεν δικαιολογούνται από κάποια ουσιαστική διαφοροποίηση στο αποτέλεσμα.
- Η διαχείριση των συμφορήσεων μεμονωμένων κλάδων, εφόσον δεν είναι συχνή απαίτηση, μπορεί να ενσωματωθεί στη λογική του Αλγορίθμου 5, ο οποίος παρουσιάζεται στην ενότητα 5.4 και αφορά ένα άλλο πρόβλημα διαχείρισης, την τοπική εξισορρόπηση ζήτησης-παραγωγής. Επισημαίνεται ότι η συχνή υπερφόρτιση μεμονωμένων κλάδων είναι πιθανότερο να ανάγεται σε σχεδιαστικό ζήτημα (ανάγκη για αναβάθμιση, αναδιάταξη τοπολογίας, κ.τ.λ.) ή να αποτελεί δεδομένο λειτουργίας που οφείλεται σε μεταβατικές καταστάσεις λόγω σφαλμάτων.

4.9. Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό προτείνονται και αναπτύσσονται Αλγόριθμοι Ομότιμων Κόμβων για κατανεμημένη διαχείριση συμφορήσεων σε δίκτυα διανομής. Αναλύεται η διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου με στόχο τη διαχείριση των ροών σε δίκτυα διανομής. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις συναρτήσεις χρησιμότητας των ευέλικτων ενεργειακών πόρων, οι οποίες αντικαθιστούν τις συναρτήσεις κόστους των μονάδων παραγωγής που εμφανίζονται στη βασική διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου.

Η βασική συμβολή της διατριβής στο κεφάλαιο αυτό είναι η ανάπτυξη Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων για τη διαχείριση των συμφορήσεων, θεωρώντας ότι το πρόβλημα είναι ένα είδος βέλτιστης ροής φορτίου και αναδιανομής πόρων. Συγκεκριμένα οι κόμβοι του δικτύου διανομής θεωρούνται ομότιμοι κόμβοι, οι οποίοι διαθέτουν ευέλικτους ενεργειακούς πόρους. Οι ομότιμοι κόμβοι συμμετέχουν περιοδικά σε αλγόριθμους ομότιμων κόμβων με στόχο τον κατανεμημένο υπολογισμό της συνολικής ροής στο δίκτυο στο οποίο ανήκουν. Ανά πάσα στιγμή βρίσκονται σε ετοιμότητα να αναγνωρίσουν ότι ο περιορισμός της συνολικής ροής παραβιάζεται και αναλαμβάνουν δράση. Ακολούθως συμμετέχουν σε πολλαπλούς γύρους Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, γνωστοποιώντας την αποτίμηση της ευελιξίας τους προς τους γειτονικούς ομότιμους κόμβους. Στο τελικό στάδιο, αποδεικνύεται ότι το αρχικό πρόβλημα συμφόρησης έχει επιλυθεί κατά βέλτιστο τρόπο, μέσω της αποκεντρωμένης λογικής ελέγχου που προτείνεται στο παρόν κεφάλαιο.

Αποτελέσματα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στο δίκτυο 9 κόμβων και στο τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 κόμβων.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος επεκτείνεται για να λάβει υπόψη του της απώλειες στους κλάδους του δικτύου, καθώς επίσης και για να αντιμετωπίσει ένα πιθανό επιπρόσθετο πρόβλημα συμφόρησης σε επίπεδο κλάδου. Ωστόσο η αύξηση της πολυπλοκότητας των υπολογισμών και κυρίως η έλλειψη αιτιολόγησης από τα αποτελέσματα, καθιστούν την επέκταση του αλγορίθμου προς αυτή την κατεύθυνση μη πρακτική.

5

Περαιτέρω διερεύνηση εφαρμογών αποκεντρωμένου ελέγχου σε δίκτυα διανομής μέσω αλγορίθμων ομότιμων κόμβων

5.1. Ιεραρχική διατύπωση αλγορίθμου ομότιμων κόμβων διαχείρισης συμφορήσεων

Η εφαρμογή των αλγορίθμων των Κεφαλαίων 3 και 4 είναι δυνατό να επεκταθεί σε εφαρμογές δικτύων διανομής, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τους ενεργειακούς πόρους στη μέση και στη χαμηλή τάση ταυτόχρονα. Εισάγοντας μάλιστα δύο επίπεδα ελέγχου μπορούμε να επιταχύνουμε τη σύγκλιση και να διευκολύνουμε την επεκτασιμότητα των εφαρμογών.

Στο κάτω λογικό επίπεδο ελέγχου, καθένας από τους κόμβους κάθε γραμμής χαμηλής τάσης πραγματοποιεί τοπικά υπολογισμό της συνολικής ζήτησης του συγκεκριμένου τμήματος του δικτύου, ως άθροισμα των επιμέρους τιμών ζήτησης των ομότιμων κόμβων. Σε αυτή την περίπτωση ως ομότιμοι κόμβοι θεωρούνται όλοι οι κόμβοι του συγκεκριμένου δικτύου χαμηλής τάσης, συμπεριλαμβανομένου του κόμβου στον υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ. Ο συγκεκριμένος κόμβος συμμετέχει παράλληλα και στο επάνω λογικό επίπεδο ελέγχου για τον υπολογισμό της συνολικής ζήτησης στο επίπεδο της μέσης τάσης.

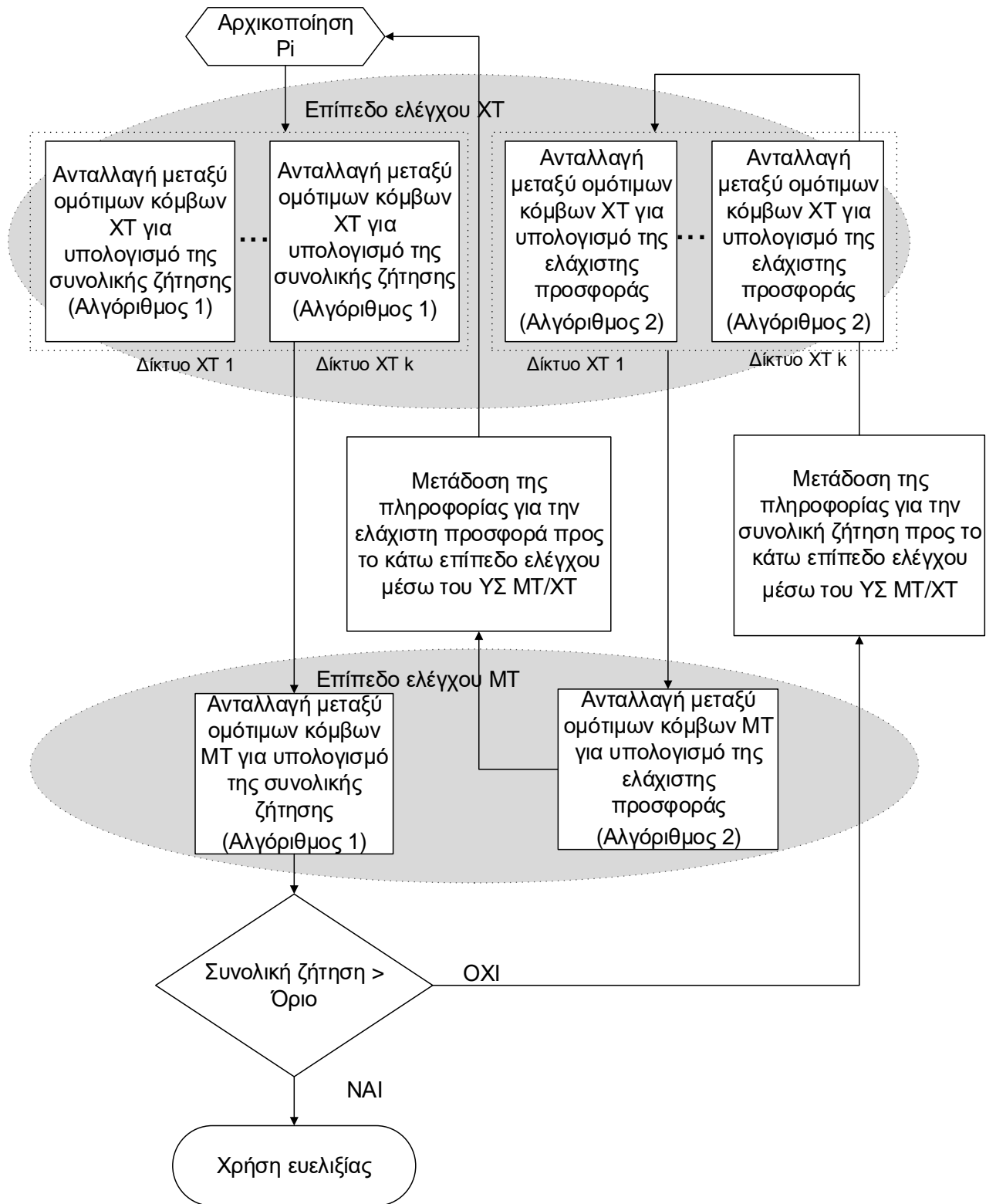
Οποτεδήποτε η συνολική ζήτηση ολόκληρου του δικτύου, όπως υπολογίζεται τοπικά από

κάθε κόμβο, υπερβαίνει τα προκαθορισμένα όρια των ροών, αρχικά κάθε κόμβος κάθε γραμμής ΧΤ υπολογίζει και στέλνει την οριακή χρησιμότητά του προς τους γείτονές. Χρησιμοποιώντας τον Αλγόριθμο 2 όλοι οι κόμβοι του ίδιου δικτύου ΧΤ υπολογίζουν την ελάχιστη τιμή για μεταβολή της ενεργού ισχύος. Με αυτό τον τρόπο, όλοι οι ομότιμοι κόμβοι σε αυτό το λογικό επίπεδο ελέγχου, συμπεριλαμβανομένου του κόμβου στον ΥΣ ΜΤ/ΧΤ, γνωρίζουν ποια είναι η τιμή ευελιξίας που θα εκπροσωπήσει καθένα από τα επιμέρους δίκτυα ΧΤ. Στη συνέχεια κάθε κόμβος ΜΤ/ΧΤ συμμετέχει στον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής μεταξύ όλων των ομότιμων κόμβων ΜΤ και ΜΤ/ΧΤ. Προφανώς με αυτό τον τρόπο όλοι οι κόμβοι στο ίδιο επίπεδο, σε αυτό της ΜΤ, έπειτα από συγκεκριμένο αριθμό ανακυκλώσεων πληροφορούνται την ελάχιστη τιμή. Ο κόμβος με τη χαμηλότερη προσφορά αναλαμβάνει δράση, μεταβάλλοντας την ισχύ του. Εάν ο «νικητής» είναι ένας κόμβος, ο οποίος αντιστοιχεί σε υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ, τότε απαιτείται ένα επιπλέον στάδιο ανακυκλώσεων Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων με στόχο τη διάδοση της πληροφορίας της ελάχιστης τιμής προς τους κόμβους κατάντι του ΥΣ, έτσι ώστε ο κόμβος ΧΤ που έδωσε τη χαμηλότερη προσφορά να αντιληφθεί ότι πρέπει να δράσει.

Στον υπολογισμό της συνολικής ζήτησης, κάθε κόμβος ΧΤ και ΜΤ εκκινεί τον Αλγόριθμο 1 έχοντας ως αρχική τιμή τη δική του ζήτηση. Οι κόμβοι ΜΤ/ΧΤ εκκινούν τον Αλγόριθμο 1 με αρχική τιμή τη συνολική ζήτηση του κατάντι δικτύου ΧΤ. Αντίστοιχα στον υπολογισμό της ελάχιστης προσφοράς για τη μεταβολή της ισχύος κάθε κόμβος ΧΤ και ΜΤ αρχικοποιείται με τη δική του προσφορά ευελιξίας, η οποία έχει υπολογιστεί τοπικά, ενώ καθένας από τους κόμβους ΜΤ/ΧΤ ξεκινά τον Αλγόριθμο 2 αφού έχει πληροφορηθεί την αντιπροσωπευτική ελάχιστη προσφορά των κόμβων ΧΤ στο κατάντι δίκτυο.

Η ιεραρχική δομή που προτείνεται επιτρέπει τον παράλληλο υπολογισμό εντός κάθε δικτύου ΧΤ ανεξάρτητα. Ο τοπικός προσδιορισμός της παραβίασης της συνολικής ζήτησης αποτελεί το έναυσμα για τη μετάβαση από τον Αλγόριθμο 1 στον Αλγόριθμο 2. Η σύγκριση για τον προσδιορισμό της παραβίασης του περιορισμού (4.17) πραγματοποιείται τοπικά σε κάθε κόμβο. Αντίστοιχα η απόφαση για τη μεταβολή της ισχύος είναι καθαρά τοπική και το έναυσμα προέρχεται από τη σύγκριση της ελάχιστης προσφοράς με την προσφορά του ίδιου του κόμβου. Προφανώς η ιεραρχική δομή εισάγει ένα ενδιάμεσο στάδιο, όπου απαιτείται η διάδοση της πληροφορίας από το επίπεδο ΜΤ προς το επίπεδο ΧΤ κάθε φορά που έχουμε σύγκλιση του Αλγορίθμου 3 στο επάνω λογικό επίπεδο. Αυτή η διάδοση της πληροφορίας πραγματοποιείται επίσης με έναν απλό Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων, όμοιο με τον Αλγόριθμο 2, δηλαδή τύπου διάδοσης της πληροφορίας.

Ο κόμβος στον ΥΣ ΥΤ/ΜΤ γνωρίζει την τοπολογία του γράφου επικοινωνίας του δικτύου ΜΤ. Με βάση την τοπολογία, πραγματοποιείται η φασματική ανάλυση (ενότητα 2.4.4) με σκοπό την επιλογή των βέλτιστων βαρών για τους Αλγόριθμους Ομότιμων Κόμβων, έτσι ώστε να επιταχύνουμε τη σύγκλιση. Ομοίως, κάθε κόμβος ΜΤ/ΧΤ πραγματοποιεί την ίδια ανάλυση για το δίκτυο ΧΤ, έχοντας διαθέσιμη την τοπολογία του εκάστοτε δικτύου ΧΤ. Διευκρινίζεται ότι ο κόμβος ΜΤ/ΧΤ παίζει κατά μία έννοια έναν συντονιστικό ρόλο και ουσιαστικά διαθέτει εσωτερικά δύο διαφορετικά στιγμιότυπα (instances) ομότιμων κόμβων, με το ένα στιγμιότυπο συμμετέχει στο επίπεδο ΜΤ και με το άλλο στο επίπεδο ΧΤ.



Σχήμα 5.1: Ιεραρχική δομή Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων

5.2. Αποτελέσματα ιεραρχικής διατύπωσης σε ακτινικό δίκτυο 101 κόμβων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αποτελέσματα από την εφαρμογή της ιεραρχικής λογικής της ενότητας 5.1 σε ένα πραγματικό δίκτυο διανομής 20kV. Στο Παράρτημα Β3 φαίνεται η τοπολογία των κόμβων ΜΤ, ενώ για τα δίκτυα ΧΤ θεωρούμε 42 υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ με 35 έως 80 κόμβους ΧΤ ο καθένας, προφανώς σε ακτινική τοπολογία. Οι υπερκείμενοι επικοινωνιακοί γράφοι ταυτίζονται με την ηλεκτρολογική τοπολογία των δικτύων και στα δύο επίπεδα τάσης. Το δίκτυο βρίσκεται στην αγροτική περιοχή της Σπερχειάδας στην Κεντρική Ελλάδα και περιλαμβάνει 101 ζυγούς ΜΤ. Θεωρούμε ότι υπάρχουν 3 ευέλικτα φορτία ΜΤ και 24 ευέλικτα φορτία στη ΧΤ. Τα δεδομένα του δικτύου παρατίθενται στο Παράρτημα Β3.

Με βάση όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.4.4 πραγματοποιείται φασματική ανάλυση του γράφου των κόμβων ΜΤ και των επιμέρους γράφων των κόμβων ΧΤ, έτσι ώστε σε καθεμία από τις περιπτώσεις να εξαχθεί ο πίνακας βέλτιστων βαρών.

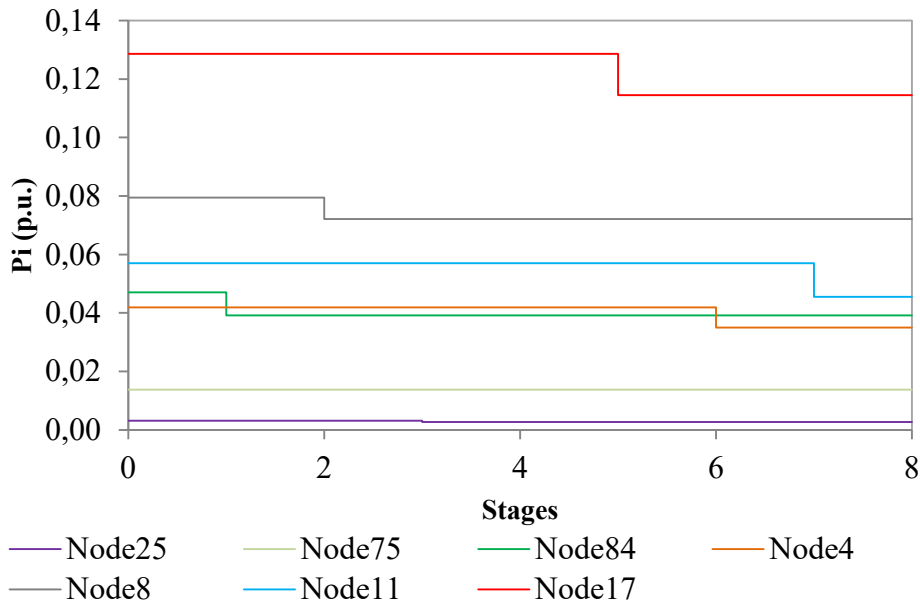
Η μέγιστη συνολική ισχύς στο δίκτυο είναι $P_{max} = 1.00 p.u.$. Κατά τη φάση εκκίνησης του αλγορίθμου συνολική ζήτηση του δικτύου είναι ίση με $P_{TOT}^{t_0} = \sum_{i=1}^{101} P_i^{t_0} = 1.052 p.u.$, δηλαδή 5.2% πάνω από τον υφιστάμενο περιορισμό για τη μέγιστη ροή. Το επίπεδο ελέγχου της ΜΤ εκκινεί κάθε φορά ακριβώς μετά την επίτευξη σύγκλισης των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων στα κατάντι δίκτυα ΧΤ. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το εκάστοτε δίκτυο ΧΤ με τη μικρότερη ταχύτητα σύγκλισης καθορίζει και τη συνολική ταχύτητα σύγκλισης. Στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το συσχετισμό του πλήθους των γύρων Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων (Αλγόριθμος 1) με το πλήθος των κόμβων του γράφου. Η φασματική ακτίνα του πίνακα των βαρών, όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 2, αποτελεί μέτρο της ταχύτητας σύγκλισης.

Πίνακας 5-1: Απαιτούμενοι γύροι Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων για σύγκλιση στα δίκτυα ΧΤ

Πλήθος Κόμβων	56	65	80
Φασματική ακτίνα πίνακα βαρών W	0,993078	0,993638	0,995097
Πλήθος γύρων Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων	1206	1583	2205

Οι κόμβοι μετά τον εντοπισμό της παραβίασης του περιορισμού συνολικής ισχύος, εφαρμόζουν επαναληπτικά το προτεινόμενο ιεραρχικό σχήμα ελέγχου και τους Αλγόριθμους Ομότιμων Κόμβων. Έπειτα από επτά στάδια του Αλγορίθμου 3, έχουμε επίτευξη συμφωνίας (global consensus) σε συνολική ζήτηση ίση με $P_{TOT}^t = 1.00 p.u.$. Το Σχήμα 5.2 απεικονίζει την εξέλιξη της ανανέωσης της πληροφορίας για τη συνολική ενεργό ισχύ κατά τη διάρκεια των γύρων Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων, επιλεκτικά για τους κόμβους 4, 8, 11, 17, 25, 75 και 84, ως αποτέλεσμα της συμμετοχής τους στο ιεραρχικό σχήμα διαχείρισης συμφορήσεων. Οι υπόλοιποι κόμβοι του δικτύου ουσιαστικά επέλεξαν να μη συμμετέχουν ενεργά στις περικοπές, προφανώς εξαιτίας των υψηλότερων τιμών στις συναρτήσεις χρησιμότητάς τους. Διευκρινίζεται ωστόσο, ότι όλοι οι κόμβοι συμμετέχουν στον Αλγόριθμο 3, κατά την έννοια ότι συμμετέχουν στους γύρους Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων προκειμένου να ανανεώσουν την εκάστοτε τοπική εκτίμηση τους κατά το γύρο r , σχετικά με τη συνολική ζήτηση στο δίκτυο P_{TOT}^r . Προφανώς η όλη διαδικασία και η

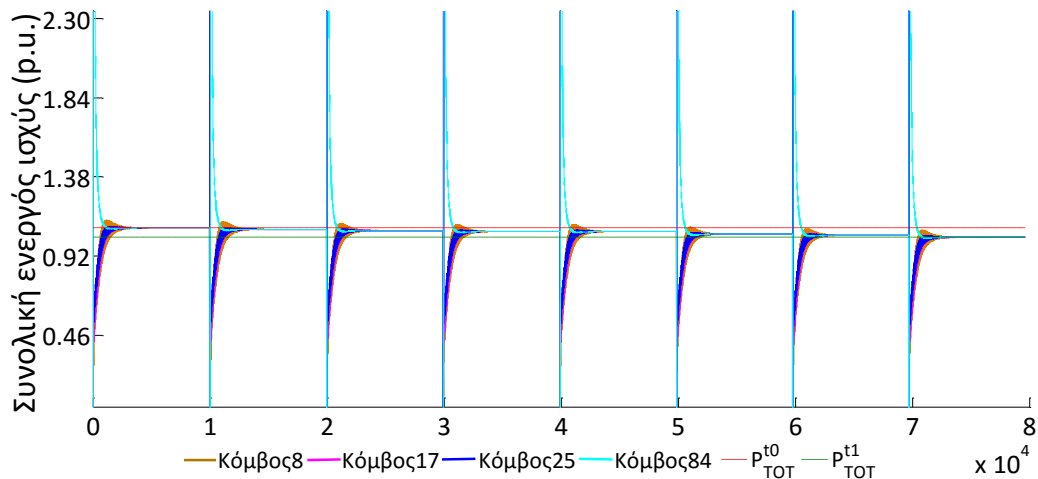
συμμετοχή τους συνεχίζεται μέχρι τη σύγκλιση των τοπικά υπολογιζόμενων τιμών στην τιμή που αντιστοιχεί στον περιορισμό συνολικής ζήτησης P_{TOT}^t .



Σχήμα 5.2: Περικοπή ανά κόμβο κατά τη διάρκεια των σταδίων του Αλγορίθμου 3

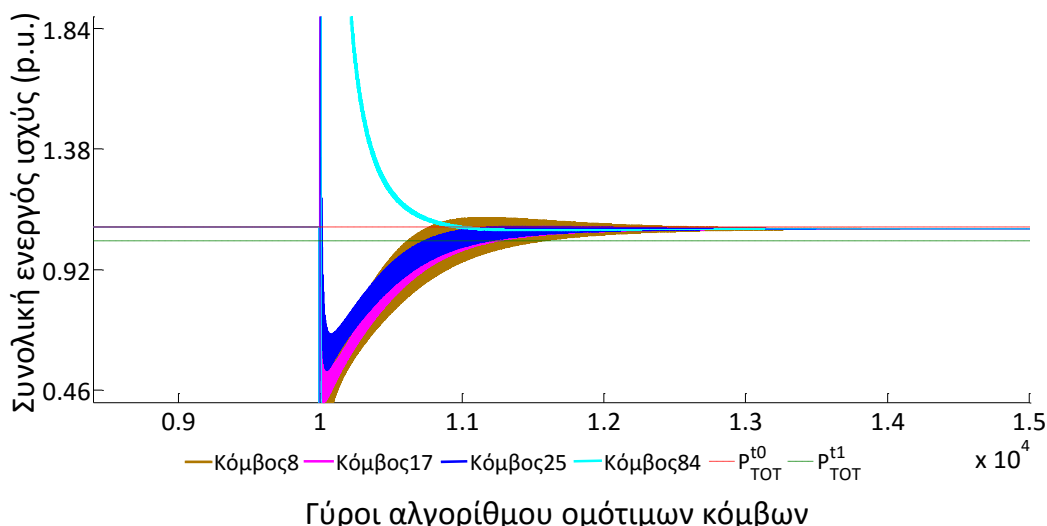
Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η εξέλιξη της περικοπής για τους ίδιους κόμβους. Το Σχήμα 5.4 εστιάζει σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια δείχνοντας μόνο το δεύτερο από τα στάδια του Αλγορίθμου 3.

Πραγματοποιήθηκε επίσης σύγκριση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων με έναν κλασικό αλγόριθμο βέλτιστης ροής φορτίου (OPF), θεωρώντας ευέλικτα φορτία (dispatchable loads) με τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά. Το μέγιστο σχετικό σφάλμα κατά τον υπολογισμό της συνολικής ζήτησης P_i^t ήταν 0.16%, ενώ το μέσο σφάλμα ήταν 0,02% σε σχέση με την κεντρική επίλυση OPF στο εργαλείο matpower [58].



Γύροι αλγόριθμου ομότιμων κόμβων

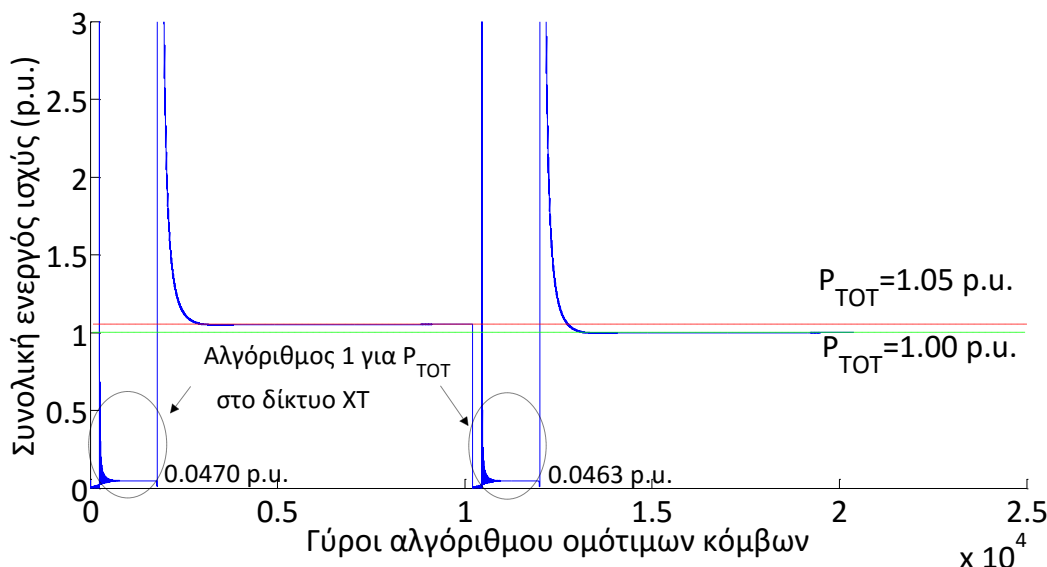
Σχήμα 5.3: Γύροι Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων σε κάθε στάδιο του Αλγορίθμου 3



Σχήμα 5.4: Γύροι Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων κατά το δεύτερο στάδιο του Αλγορίθμου 3

Στο Σχήμα 5.5 επιλέγεται προς παρουσίαση ο κόμβος 84, ο οποίος αποτελεί ΥΣ ΜΤ/ΧΤ και συνεπώς συμμετέχει και στα δύο ιεραρχικά επίπεδα, έτσι ώστε να παρουσιαστεί με περισσότερη λεπτομέρεια ο συντονισμός και η συνεργασία μεταξύ των δύο επιπέδων.

Αρχικά ο κόμβος 84 συμμετέχει στον Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων στο επίπεδο ΧΤ, μέχρι να προκύψει συμφωνία στην τοπικά εκτιμώμενη τιμή της συνολικής ζήτησης του δικτύου ΧΤ στα 0,047 p.u. Αυτή η τιμή χρησιμοποιείται ως αρχικοποίηση του διανύσματος αρχικών τιμών για τον κόμβο 84, προκειμένου αυτός να συμμετάσχει στον Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων στο επίπεδο ΜΤ για τον υπολογισμό της συνολικής ζήτησης. Προφανώς μετά τη σύγκλιση στην τιμή $P_{TOT}^{t_0} = 1.05$ p. u., ακολουθεί έναυση του Αλγορίθμου 2 για υπολογισμό της ελάχιστης προσφοράς για περικοπή. Η εξέλιξη της ανανέωσης της πληροφορίας στα πλαίσια του Αλγορίθμου 2, δεν είναι δυνατό να απεικονιστεί γραφικά, ωστόσο οι κόμβοι αποκτούν την τοπική γνώση ότι ο κόμβος με την ελάχιστη προσφορά είναι ένας από τους κόμβους ΧΤ του συγκεκριμένου δικτύου. Ο κόμβος ΧΤ, οποίος αναδεικνύεται «νικητής», περικόπτει την προσφερόμενη ισχύ του. Μετά την περιορισμό της ζήτησής του, όλοι οι κόμβοι υπολογίζουν τη νέα συνολική ζήτηση του αντίστοιχου δικτύου ΧΤ ως 0,0463 p.u, με ολόκληρο το δίκτυο να αθροίζει 1 p.u και να βρίσκεται πλέον εντός ορίων.



Σχήμα 5.5: Γύροι Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων στον κόμβο 84 (συντονισμός μεταξύ δικτύων MT και ΧΤ)

5.3. Διατύπωση προβλήματος τοπικής εξισορρόπησης ζήτησης και παραγωγής σε δίκτυα διανομής

Σε αυτή την ενότητα καταστρώνεται το πρόβλημα της τοπικής εξισορρόπησης της ζήτησης και της παραγωγής στα πλαίσια ενός δικτύου διανομής, με στόχο να μην υπάρχει ροή ενέργεια από/προς το δίκτυο μεταφοράς. Πρακτικά δεν υφίσταται η συγκεκριμένη λογική στις τρέχουσες πολιτικές διαχείρισης των δικτύων διανομής, ωστόσο θα μπορούσε να ιδωθεί ως μία διαδικασία για παροχή επικουρικών υπηρεσιών προς το ανάντι δίκτυο. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής η κατάσχεση του προβλήματος είναι όμοια με εκείνη του προβλήματος της αντιμετώπισης της συμφόρησης στην αρχή μίας γραμμής, με τη βασική διαφορά ότι ο περιορισμός της μέγιστης συνολικής ζήτησης αντικαθίσταται πλέον με τη μηδενική τιμή, δηλαδή ο περιορισμός για το άθροισμα της συνολικής ζήτησης ισούται με μηδέν. Κατά τα άλλα η διατύπωση του προβλήματος περιλαμβάνει την ίδια αντικειμενική συνάρτηση και τους ίδιους τοπικούς περιορισμούς, οι οποίοι απορρέουν από τα επιμέρους χαρακτηριστικά των ενεργειακών πόρων και τους λειτουργικούς περιορισμούς τους δικτύου.

Ακολουθεί η διατύπωση του προβλήματος και ένα διάγραμμα ροής επεκτείνοντας τους Αλγόριθμους Ομότιμων Κόμβων που προτάθηκαν στα Κεφάλαια 3 και 4. Η ουσιαστική διαφοροποίηση σε σχέση με το αποτέλεσμα είναι ότι πλέον η βέλτιστη λύση δεν είναι μοναδική, αλλά ένα σύνολο από λύσεις. Αυτό συμβαίνει διότι σε κάθε περίπτωση παραβίασης του συνολικού περιορισμού (ανισότητα μεταξύ ζήτησης και παραγωγής) έχουμε τη δυνατότητα να μεταβάλλουμε ταυτόχρονα και τη ζήτηση αλλά και την παραγωγή. Ωστόσο υπό συγκεκριμένες διαμορφώσεις του προβλήματος, η ίδια η φύση των τοπικών περιορισμών μας επιβάλλει την επιλογή μίας μοναδικής βέλτιστης λύσης. Εάν στο δίκτυο είναι συνδεδεμένες μόνο ΑΠΕ ως μονάδες παραγωγής, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι υπάρχει μοναδική βέλτιστη λύση και είναι προς την κατεύθυνση μείωσης της παραγωγής τους.

Η κατάσχεση του προβλήματος εξισορρόπησης της ζήτησης και της παραγωγής έχει ως

εξής:

$$\text{Minimize } F = \sum_{i=1}^n u_i(\Delta P_i) \quad (5.1)$$

$$\text{υπό περιορισμούς} \quad \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (5.2)$$

$$0 \leq P_i \leq P_i^{t_0} \quad \text{εάν το } i \text{ είναι φορτίο} \quad (5.3)$$

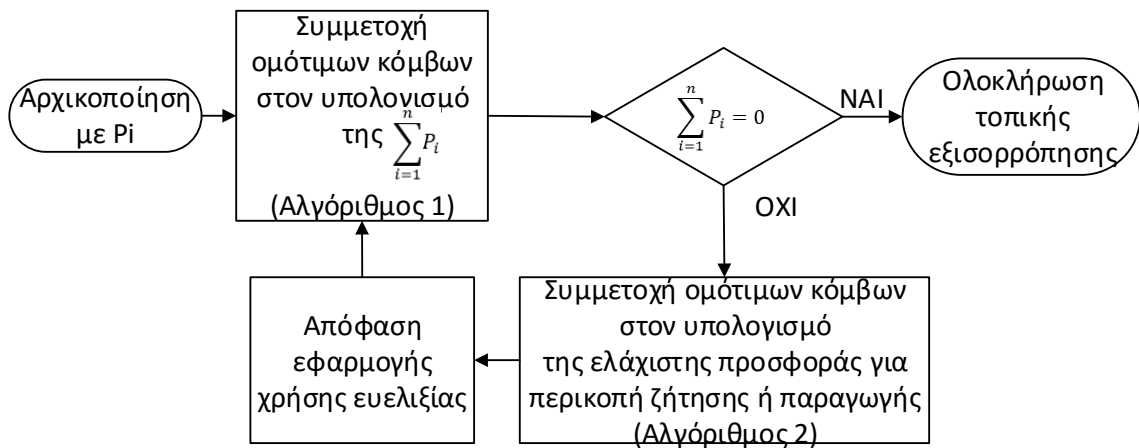
$$P_i^{t_0} \leq P_i \leq 0 \quad \text{εάν το } i \text{ είναι γεννήτρια} \quad (5.4)$$

Η μορφή των συναρτήσεων χρησιμότητας τόσο για τα ευέλικτα φορτία όσο και για τις διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής έχει περιγραφεί στην ενότητα 4.2.1. Η παραγωγή των διεσπαρμένων πηγών θεωρείται ως αρνητικό φορτίο κατά την κατάσταση του προβλήματος και κατά συνέπεια ο περιορισμός $\sum_{i=1}^n P_i = 0$ μπορεί να ικανοποιηθεί, εφόσον υπάρχουν επαρκείς πόροι.

Το πρόβλημα της εξισορρόπησης της ζήτησης και της παραγωγής σε τοπικό επίπεδο, μπορεί να επιλυθεί αποκεντρωμένα με όμοιο τρόπο με το πρόβλημα της διαχείρισης συμφορήσεων. Συνδυάζοντας τους βασικούς Αλγορίθμους 1 και 2, με τον τρόπο που παρουσιάζεται στο ακόλουθο λογικό διάγραμμα, προκύπτει ο Αλγόριθμος 5. Σημειώνεται ότι η απόφαση για χρήση της ευελιξίας ακολουθεί τα οριζόμενα στις προηγούμενες παραγράφους με την έννοια ότι οι κόμβοι που συμμετέχουν στον Αλγόριθμο 5, αυτοπροσδιορίζονται ως «νικητές» εφόσον συγκρίνοντας τη δική τους προσφορά για ευελιξία με την ελάχιστη, εντοπίσουν ότι αυτές οι δύο ταυτίζονται. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούν εξολοκλήρου τη βαθμίδα ευελιξίας που σχετίζεται με αυτή την προσφορά.

Κάθε όρος της αντικειμενικής συνάρτησης F στο πρόβλημα (5.1) αντικατοπτρίζει την ευελιξία καθενός από τους κόμβους για να συμμετάσχουν στο σχήμα μεταβολής της ενεργού ισχύος.

Στην εφαρμογή τοπικής εξισορρόπησης ζήτησης-παραγωγής θεωρούμε ότι η βασική ευελιξία όσον αφορά την απόρριψη παραγωγής ΑΠΕ είναι ίδια για όλους τους κόμβους που συμμετέχουν στο σχήμα διαχείρισης. Συγκεκριμένα, υποθέτουμε ότι η κατανομή της διαφοράς $\sum_{i=1}^n P_i$ μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα στάδιο του Αλγορίθμου 5, απορρίπτοντας ο κάθε κόμβος το δικό του μερίδιο παραγωγής αναλογικά με την εγκατεστημένη ισχύ του.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα ροής Αλγορίθμου 5

5.4. Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων για τοπική εξισορρόπηση ζήτησης και παραγωγής σε δίκτυα διανομής

Ο αλγόριθμος που υλοποιείται τοπικά σε κάθε ομότιμο κόμβο περιλαμβάνει τις ακόλουθες διαδικασίες:

1. Κατανομημένος υπολογισμός της συνολικής ενεργού ισχύος P_{TOT}
2. Τοπικός προσδιορισμός της παραβίασης του ορίου των ροών, συγκρίνοντας την P_{TOT} με το μηδέν.
3. Οποτεδήποτε από τη σύγκριση προκύπτει ότι $P_{TOT}^{t_0} < 0$, εκκινεί ο Αλγόριθμος 5.
4. Όσοι κόμβοι διαθέτουν ευέλικτη παραγωγή απορρίπτουν μέρος της ισχύος τους ως

$$\text{εξής } P_i^t = P_{G_i,max}^{t_0} \left(1 - \frac{P_{TOT}^{t_0}}{\sum_{i=1}^n P_{G_i,max}}\right)$$

5. Επιστροφή στο πρώτο βήμα και αναμονή.

Αλγόριθμος 5 Τοπική εξισορρόπηση από τον i

```

1: stage st=0
2:  $P_{i,st}^t \leftarrow P_i^{t_0}$ 
3:  $P_{TOT,st}^{est,i} \leftarrow P_{TOT}^{t_0}$ 
8: while  $P_{TOT,st}^{est,i} < 0$  do
11: if  $P_{i,st}^t < 0$  then
12:    $P_{i,st}^t = \min\left\{\left(P_{i,st}^{t_0} - P_{TOT}^{t_0} \frac{P_{G_i,max}}{\sum_{i=1}^n P_{G_i,max}}\right), 0\right\}$ 
13: else  $P_{i,st+1}^{t_1} = P_{i,st}^{t_1}$ 
14: end if
18: uses Algorithm 1 to calculate  $P_{TOT,st+1}^{est,i}$ 
19: stage st=st+1
20: end while

```

Οι περιορισμοί του προβλήματος (5.1)-(5.4) έχουν εισαχθεί με αναλυτικό τρόπο στις γραμμές 11 και 12. Ο περιορισμός $P_i^{t_0} < P_i^t$ τηρείται πάντα, εφόσον προχωράμε μόνο προς βαθμιαίες απομειώσεις της ενεργού ισχύος $P_i^{t_0}$ σε κάθε στάδιο του αλγορίθμου. Η απόφαση για συμμετοχή στο σχήμα απομείωσης λαμβάνεται τοπικά από κάθε ομότιμο κόμβο, ακριβώς μετά την εκτέλεση του Αλγορίθμου 1 και εφόσον το αποτέλεσμα του αθροίσματος αναδεικνύει την υπέρβαση του ορίου $P_{TOT}^{t_0} < 0$.

5.5. Αποτελέσματα εφαρμογής αλγορίθμου ομότιμων κόμβων για τοπική εξισορρόπηση ζήτησης και παραγωγής

5.5.1. Ακτινικό δίκτυο 9 κόμβων

Από πλευράς τοπολογίας πρόκειται για το ίδιο δίκτυο 9 κόμβων που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2, και κατά συνέπεια έχουμε ήδη υπολογίσει τα βέλτιστα βάρη για τον Αλγόριθμο 1, τα οποία εξασφαλίζουν και επιταχύνουν τη σύγκλιση. Θεωρούμε επιπλέον διεσπαρμένες πηγές και ένα σενάριο προφίλ ζήτησης και παραγωγής, σύμφωνα με τον Πίνακα 5-2.

Πίνακας 5-2: Στοιχεία ζήτησης/παραγωγής δικτύου 9 κόμβων

Κόμβος	$P_i^{t=0}$ (p.u.)
1	0,000
2	-0,100
3	-0,300
4	-0,030
5	0,150
6	-0,020
7	0,000
8	0,300
9	-0,100

Η ροή στην αρχή της αναχώρησης τελεί υπό τον περιορισμό (5.2). Το άθροισμα της καθαρής ζήτησης κατά τη χρονική στιγμή έναρξης του αλγορίθμου t_0 παραβιάζει τον εν λόγω περιορισμό αφού $P_{TOT}^{t_0} = \sum_{i=1}^9 P_i^{t_0} = -0.10 \text{ p.u.} < 0$.



Σχήμα 5.7: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος (δίκτυο 9 κόμβων- τοπική εξισορρόπηση ζήτησης/παραγωγής)

Η κατανομή της διαφοράς πόρων $P_{TOT}^{t_0}$ στους κόμβους παρουσιάζεται στον Πίνακα 5-3.

Πίνακας 5-3: Επιμερισμός του $P_{TOT}^{t_0}$

Κόμβος	P_i^t (p.u.)
1	0
2	-0,0778
3	0,2000
4	-0,0233
5	0,1500
6	-0,0156
7	0
8	-0,2333
9	0

Τα αποτελέσματα του κατανεμημένου υπολογισμού τάσεων συγκρίνονται με έναν κεντρικό αλγόριθμο OPF και τα αποτελέσματα της σύγκρισης σε σχέση με την ακρίβεια παρατίθενται στον Πίνακα 5-4.

Πίνακας 5-4: Υπολογισμός Τάσεων μέσω Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων

Κόμβος	Μέτρο τάσης (p.u.) πριν τη διαδικασία διαχείρισης	Μέτρο τάσης (p.u.) /υπολογισμός μέσω ροής φορτίου	Μέτρο τάσης (p.u.) /υπολογισμός μέσω Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων	Σχετικό σφάλμα (%)
1	1	1	1	0
2	0,9994	0,9993	0,9995	0,03
3	0,9992	0,9991	0,9994	0,04
4	0,9992	0,9990	0,9993	0,03
5	0,9991	0,9990	0,9992	0,02
6	0,9992	0,9991	0,9994	0,03
7	0,9995	0,9993	0,9995	0,03
8	1,0004	0,9999	0,9999	0,01
9	0,9995	0,9993	0,9995	0,03

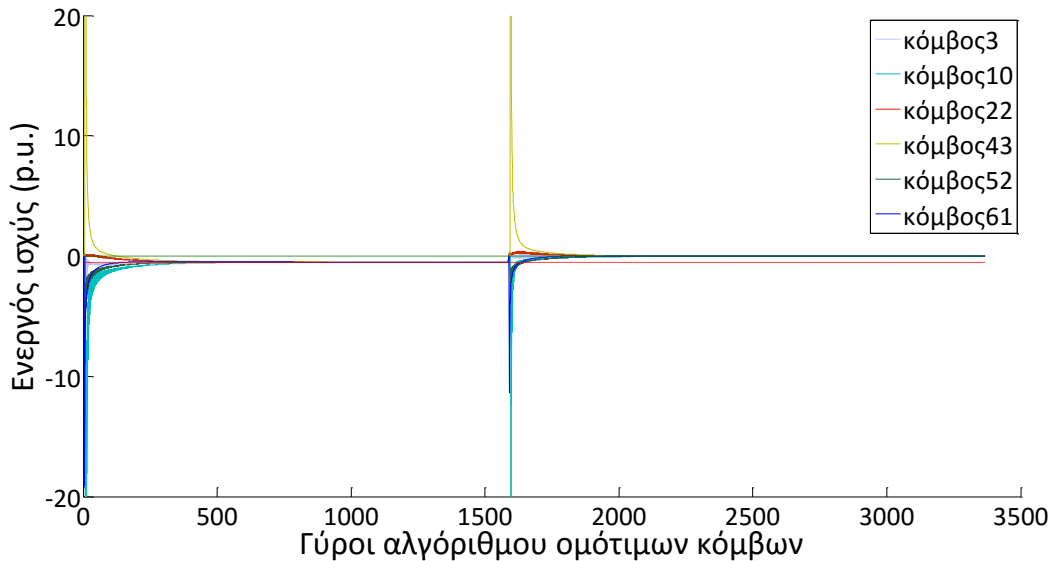
5.5.2. Τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 κόμβων

Στο ακτινικό δίκτυο 65 κόμβων της ενότητας 3.8.2, το οποίο έχει προκύψει με βάση το δίκτυο IEEE 123, θεωρούμε περισσότερους κόμβους να διαθέτουν ευέλικτη πηγή παραγωγής ΑΠΕ, σύμφωνα με τον πίνακα ΠΒ-2 του Παραρτήματος Β2. Στον ίδιο πίνακα δίνεται και το προφίλ ζήτησης και παραγωγής για το εξεταζόμενο σενάριο εξισορρόπησης.

Η ροή στην αρχή της αναχώρησης τελεί υπό τον περιορισμό $P_{TOT} = 0$ p.u. Το άθροισμα της καθαρής ζήτησης κατά τη χρονική στιγμή έναρξης του αλγορίθμου t_0 παραβιάζει τον εν λόγω περιορισμό, αφού $P_{TOT}^{t_0} = \sum_{i=1}^{65} P_i^{t_0} = -0,5 \text{ p.u.} < 0$.

Κατά τη χρονική στιγμή αφετηρίας του αλγορίθμου t_0 , κάθε κόμβος εντοπίζει την ανάγκη για εξισορρόπηση εφαρμόζοντας τον Αλγόριθμο 1. Το Σχήμα 5.8 παρουσιάζει τους γύρους Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων και πώς μέσω αυτών ανανεώνεται η πληροφορία έως ότου κάθε κόμβος να προσεγγίσει την τοπική εξισορρόπηση ζήτησης και παραγωγής. Το πλήθος των γύρων του Αλγορίθμου 1 είναι περίπου 1.700 σε καθένα από τα δύο στάδια.

Τα αποτελέσματα του κατανεμημένου υπολογισμού τάσεων συγκρίνονται με έναν κεντρικό αλγόριθμο OPF και τα αποτελέσματα της σύγκρισης σε σχέση με την ακρίβεια παρατίθενται στον Πίνακα 5-5.



Σχήμα 5.8 : Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος σε ενδεικτικούς κόμβους (δίκτυο IEEE 123 κόμβων)

Πίνακας 5-5: Υπολογισμός Τάσεων μέσω Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων

Κόμβος	Μέτρο τάσης (p.u.) πριν τη διαδικασία διαχείρισης	Μέτρο τάσης (p.u.) /υπολογισμός μέσω φοοτίου	Μέτρο τάσης (p.u.) /υπολογισμός μέσω Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων	Σχετικό σφάλμα (%)	P_i^t (p.u.)
2	1,0022	1,0003	0,9942	-0,62	0,0305
3	1,0102	1,0023	0,9962	-0,61	0,0305
4	1,0136	1,0034	0,9973	-0,61	0,0305
5	1,0158	1,0047	0,9986	-0,61	-0,0358
6	1,0177	1,0048	0,9988	-0,61	0,0305
7	1,0207	1,0061	1,0001	-0,60	0,0305
8	1,0217	1,0061	1,0001	-0,60	0,0305
9	1,0227	1,0064	1,0004	-0,60	0,0305
10	1,0227	1,0064	1,0004	-0,60	0,0000
11	1,0250	1,0077	1,0017	-0,60	-0,0132
12	1,0247	1,0073	1,0013	-0,60	0,0305
13	1,0220	1,0058	0,9997	-0,60	0,0305
14	1,0218	1,0055	0,9994	-0,60	0,0305
15	1,0218	1,0055	0,9994	-0,60	0,0000
16	1,0003	1,0001	0,9940	-0,62	-0,0021
17	1,0002	1,0001	0,9940	-0,62	0,0053
18	1,0010	1,0006	0,9945	-0,62	0,0021
19	1,0013	1,0008	0,9946	-0,62	0,0021
20	1,0017	1,0010	0,9949	-0,62	-0,0263
21	0,9967	0,9964	0,9903	-0,61	0,0021
22	0,9957	0,9953	0,9892	-0,61	0,0263
23	0,9953	0,9949	0,9888	-0,61	0,0263
24	0,9946	0,9939	0,9878	-0,61	0,0021
25	0,9944	0,9937	0,9876	-0,61	-0,0021
26	0,9941	0,9934	0,9873	-0,61	0,0527

27	0,9941	0,9934	0,9873	-0,61	0,0021
28	0,9939	0,9932	0,9872	-0,61	0,0021
29	0,9934	0,9927	0,9867	-0,61	0,0053
30	0,9932	0,9925	0,9865	-0,61	0,0527
31	0,9932	0,9925	0,9865	-0,61	0,0021
32	0,9994	0,9992	0,9931	-0,62	0,0305
33	0,9993	0,9992	0,9930	-0,62	0,0021
34	0,9995	0,9993	0,9932	-0,62	-0,0053
35	0,9995	0,9993	0,9931	-0,62	0,0021
36	0,9996	0,9988	0,9927	-0,62	0,0021
37	0,9999	0,9990	0,9929	-0,62	-0,0527
38	0,9991	0,9981	0,9920	-0,62	0,0527
39	0,9990	0,9981	0,9920	-0,62	0,0021
40	0,9989	0,9977	0,9916	-0,62	-0,0053
41	0,9981	0,9969	0,9908	-0,62	0,0358
42	0,9978	0,9966	0,9905	-0,62	0,0053
43	0,9973	0,9962	0,9901	-0,62	0,0021
44	0,9971	0,9959	0,9898	-0,62	0,0263
45	1,0058	1,0032	0,9971	-0,61	0,0053
46	1,0065	1,0036	0,9975	-0,61	-0,0021
47	1,0110	1,0061	1,0000	-0,61	-0,0053
48	1,0113	1,0062	1,0000	-0,61	-0,0527
49	1,0113	1,0061	1,0000	-0,61	0,0053
50	1,0113	1,0061	1,0000	-0,61	0,0021
51	1,0113	1,0061	0,9999	-0,61	0,0263
52	1,0115	1,0061	1,0000	-0,61	0,0021
53	1,0115	1,0061	1,0000	-0,61	0,0021
54	1,0116	1,0062	1,0001	-0,61	-0,0263
55	0,9995	0,9995	0,9934	-0,62	0,0021
56	0,9993	0,9993	0,9931	-0,62	0,0021
57	0,9989	0,9989	0,9928	-0,62	0,0263
58	1,0005	1,0000	0,9939	-0,62	0,0021
59	1,0008	1,0000	0,9939	-0,62	-0,0527
60	1,0006	0,9998	0,9937	-0,62	0,0263
61	1,0013	1,0003	0,9942	-0,62	-0,0021
62	1,0015	1,0004	0,9943	-0,62	-0,0053
63	1,0003	0,9994	0,9933	-0,62	0,0021
64	0,9999	0,9991	0,9930	-0,62	0,0021
65	0,9996	0,9988	0,9927	-0,62	0,0263

5.6. Αποτίμηση τηλεπικοινωνιακού φόρτου Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται μία αποτίμηση της τηλεπικοινωνιακής καθυστέρησης για τις αποκεντρωμένες εφαρμογές στα δίκτυα διανομής. Τα αποτελέσματα αφορούν μόνο την επιλογή βέλτιστων βαρών, όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2. Συνεπώς, έχουμε ήδη συμπίεσει την ταχύτητα σύγκλισης των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, εκμεταλλευόμενοι τις ιδιότητες των επικοινωνιακών γράφων των δικτύων.

Αν παρατηρήσει κανείς το Σχήμα 5.3, απαιτούνται περίπου 10^4 γύροι Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων σε κάθε στάδιο του αλγορίθμου διαχείρισης συμφορήσεων. Το πλήθος των γύρων ίσως φαντάζει μεγάλο, αλλά θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι όλη η επεξεργασία της πληροφορίας γίνεται τοπικά σε κάθε ομότιμο κόμβο και συνεπώς πραγματοποιείται εξαιρετικά γρήγορα. Εξάλλου οι τοπικοί υπολογισμοί είναι ιδιαίτερα απλοί και συνήθως πρόκειται για απλές συγκρίσεις ή γραμμικές σχέσεις που περιλαμβάνουν μόνο τοπικά μεγέθη από τη γειτονιά κάθε κόμβου, δηλαδή το πολύ 3 κόμβους λόγω της ακτινικής διαμόρφωσης. Συνεπώς η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι ανάλογη με το $\{N_i\}$.

Προκειμένου να αποτιμήσουμε το χρόνο σύγκλισης, t_{conv} , τον χωρίζουμε σε δύο συνιστώσες, οι οποίες αφορούν τον υπολογιστικό χρόνο εντός κάθε κόμβου, έστω t_{comp} , και το χρόνο μετάδοσης των μηνυμάτων μεταξύ των ομότιμων κόμβων, έστω t_{transf} , οπότε έχουμε

$$t_{conv} = t_{comp} + t_{transf} \quad (5.5)$$

Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι δοκιμάστηκαν σε περιβάλλον JADE σε έναν υπολογιστή Core i7-2600 [CPU@3.40GHz](#) με 4GB RAM. Μετρήθηκε ο χρόνος εκτέλεσης κάθε γύρου Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων και το αποτέλεσμα ήταν $t_{comp} = 0.05$ msec κατά μέσο όρο. Αξίζει να αναφερθεί ότι στη χειρότερη περίπτωση ένας γύρος διήρκεσε $t_{comp} = 1.52$ msec. Οι χρόνοι για τους γύρους όλων των Αλγορίθμων 3, 4 και 5 παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-6. Επιπλέον επιβεβαιώθηκε ότι ο χρόνος t_{comp} ανά γύρο είναι σταθερός ασχέτως πλήθους κόμβων, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της φύσης των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων. Ο συνολικός χρόνος σύγκλισης ωστόσο επηρεάζεται από το πλήθος των γύρων του εκάστοτε αλγορίθμου, μέγεθος το οποίο επηρεάζεται από το πλήθος των κόμβων που συμμετέχουν.

Για τις εφαρμογές που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή θεωρήσαμε ότι οι ίδιες οι γραμμές του δικτύου διανομής αποτελούν και τους επικοινωνιακούς δρόμους για τη μετάδοση των μηνυμάτων. Η επιλογή του PLC στενού εύρους ζώνης, αποτελεί την πιο αξιόπιστη λύση και την πιο αργή ταυτόχρονα, με ταχύτητες στα 200 kbps στη χειρότερη των περιπτώσεων. Ωστόσο, για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται η τηλεπικοινωνιακή αποτίμηση και για άλλες τεχνολογίες επικοινωνιών.

Στην ενότητα 5.6.2 παρουσιάζεται μία αποτίμηση του χρόνου μετάδοσης των απαιτούμενων πληροφοριών σε κάθε γύρο των Αλγορίθμων 3, 4 και 5, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ των ομότιμων κόμβων.

5.6.1. Αποτίμηση υπολογιστικού χρόνου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ο υπολογιστικός χρόνος που μετρήθηκε σε καθέναν από τους γύρους των βασικών Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, όπως διαμορφώθηκαν για τα πειραματικά δίκτυα που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή.

Στον Αλγόριθμο 1 οι υπολογισμοί σε κάθε ανακύκλωση περιλαμβάνουν το γραμμικό συνδυασμό μεταξύ των τιμών των γειτονικών κόμβων ώστε να προετοιμαστεί η ανανεωμένη πληροφορία για τον επόμενο γύρο. Ο Αλγόριθμος 1 χρησιμοποιείται για τρεις διαφορετικούς σκοπούς: για τον υπολογισμό της συνολικής ενεργού ισχύος, για τον υπολογισμό της συνολικής φαινόμενης ισχύος και για τον υπολογισμό των τάσεων. Οι χρόνοι που μετρήθηκαν είναι ίδιοι σε όλες τις περιπτώσεις δικτύων, ασχέτως του πλήθους των κόμβων.

Στον Αλγόριθμο 2 οι υπολογισμοί σε κάθε γύρο περιλαμβάνουν τη σύγκριση μεταξύ της τιμής που διαθέτει εσωτερικά κάθε κόμβος και της τιμής που λαμβάνει από τους γειτονικούς κόμβους, ώστε να προετοιμαστεί η ανανεωμένη πληροφορία για τον επόμενο γύρο. Ο Αλγόριθμος 2 χρησιμοποιείται κατά βάση για τον υπολογισμό της ελάχιστης προσφοράς για περικοπή, ενώ μία τροποποιημένη εκδοχή του χρησιμοποιείται για τη μετάδοση της πληροφορίας στα κατάντι δίκτυα ΧΤ στην ιεραρχική διατύπωση του αλγορίθμου διαχείρισης συμφορήσεων. Οι χρόνοι που μετρήθηκαν είναι και σε αυτό τον αλγόριθμο ίδιοι σε όλες τις περιπτώσεις δικτύων, ασχέτως του πλήθους των κόμβων.

Για λόγους πληρότητας αλλά και αναφοράς στις προεκτάσεις της παρούσας διατριβής, παρουσιάζεται επιπρόσθετα η αποτίμηση για το στοχαστικό αλγόριθμο ομότιμων κόμβων (ενότητα 2.6). Σημειώνεται ότι ο στοχαστικός αλγόριθμος περιλαμβάνει γύρους ανανέωσης όμοιους με τον Αλγόριθμο 2, ωστόσο ο στόχος είναι η εξεύρεση των ελαχίστων τιμών για ένα μεγάλο πλήθος τυχαίων μεταβλητών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για αυτή την περίπτωση έδειξαν ότι οι κόμβοι εξαντλούν την υπολογιστική τους ισχύ, με αποτέλεσμα ο υπολογιστικός χρόνος ανά γύρο να είναι αρκετά μεγαλύτερος από τις μετρήσεις του Αλγορίθμου 2.

Πίνακας 5-6: Παραμετρική αποτίμηση του χρόνου υπολογισμού

Υπολογιστικός χρόνος t_{comp} (mseconds) ανά γύρο	Μέση τιμή (ms)	Χειρότερη τιμή (ms)
Αλγόριθμου 1 για το P_{TOT}	0,05	0,09
Αλγόριθμου 1 για το V_i	0,06	0,10
Αλγόριθμου 1 για το S_{TOT}	0,08	0,10
Αλγόριθμου 2 για λ_{min}	0,02	0,04
Αλγόριθμου 2 για μετάδοση πληροφορίας	0,02	0,04
Στοχαστικού Αλγορίθμου	0,32	1,52

5.6.2. Αποτίμηση χρόνου μετάδοσης μηνυμάτων

Στον Αλγόριθμο 1 κάθε μήνυμα αποτελείται από τοπική πληροφορία για το υπολογιζόμενο μέγεθος και την τιμή του βοηθητικού διανύσματος $s_{AV,r}^{est,i}$, δηλαδή από δύο μεταβλητές. Το συνολικό μέγεθος του μηνύματος είναι περίπου 24 bytes. Στον Αλγόριθμο 2 τα μηνύματα περιλαμβάνουν πληροφορίες για μία μεταβλητή με το συνολικό μέγεθος του μηνύματος να είναι περίπου 16 bytes. Και στις δύο περιπτώσεις στο μέγεθος του μηνύματος έχει συμπεριληφθεί το overhead που σχετίζεται με την τοπολογία του δικτύου και αφορά τη γνώση για τους γειτονικούς κόμβους. Στο Στοχαστικό Αλγόριθμο τα μηνύματα έχουν αρκετά μεγαλύτερο μέγεθος, καθώς περιλαμβάνουν πληροφορίες για μεγάλο πλήθος μεταβλητών, και συγκεκριμένα για όσες τυχαίες μεταβλητές υπαγορεύει η ακρίβεια δ . Για

τις εφαρμογές του Κεφαλαίου 2 υπολογίσαμε ότι απαιτούνται $45 \cdot 10^3$ μεταβλητές, με το μέγεθος κάθε μηνύματος να είναι περίπου 360 kBytes.

Ανάλογα με την εξεταζόμενη τεχνολογία επικοινωνιών για την αρχικοποίηση της επικοινωνίας και την περαιτέρω δρομολόγηση θα πρέπει να προστεθεί το κατάλληλο μέγεθος overhead. Για την τεχνολογία PLC προσθέτουμε 12 bytes για την αρχικοποίηση της επικοινωνίας, καθώς επίσης και 1 msecond ως «νεκρό» διάστημα μεταξύ των μεταδόσεων πληροφορίας. Για την τεχνολογία overlay on ADSL/ GPRS, θα πρέπει να προστεθεί overhead 100 Bytes, εξαιτίας της δρομολόγησης.

Πίνακας 5-7: Παραμετρική αποτίμηση του χρόνου μετάδοσης πληροφορίας

Χρόνος (mseconds) μετάδοσης πληροφορίας t_{transf} ανά γύρο	PLC narrowband (200 kbps)	PLC broadband (3 Mbps)	Overlay on ADSL/ GPRS (24 Mbps)
Αλγόριθμος 1	2,44	1,10	0,04
Αλγόριθμος 2	2,12	1,08	0,01
Στοχαστικού Αλγορίθμου	1809,04	120,04	15,00

5.6.3. Αποτίμηση συνολικού χρόνου σύγκλισης

Συνδυάζοντας τους Πίνακες 5-6 έως 5-7 έχουμε το συνολικό χρόνο για κάθε ανακύκλωση.

Πίνακας 5-8: Παραμετρική αποτίμηση του συνολικού χρόνου ανά γύρο αλγόριθμου ομότιμων κόμβων

Συνολικός χρόνος t_{conv} (mseconds) ανά γύρο	PLC narrowband (200 kbps)		PLC broadband (3 Mbps)		Overlay on ADSL/ GPRS (24 Mbps)	
	Μέση τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Χειρότερη τιμή
Αλγόριθμος 1 για το P_{TOT}	2,49	2,53	1,15	1,19	0,09	0,13
Αλγόριθμος 1 για το V_i	2,5	2,54	1,14	1,18	0,07	0,11
Αλγόριθμος 1 για το S_{TOT}	2,52	2,54	1,18	1,2	0,12	0,14
Αλγόριθμος 2	2,18	2,16	1,1	1,12	0,03	0,05
Στοχαστικού Αλγορίθμου	1809,36	1810,56	120, 36	121,56	15,32	16,52

Από τον Πίνακα 5-8 και με βάση το πλήθος των γύρων μπορεί να αποτιμηθεί ο συνολικός χρόνος σύγκλισης για καθένα από τα πειραματικά δίκτυα και τις εφαρμογές που παρουσιάστηκαν στα Κεφάλαια 2 έως 5.

Για την εφαρμογή διαχείρισης συμφορήσεων μέσω του Αλγορίθμου 3 ο συνολικός χρόνος προκύπτει από τη σχέση:

$$t_{TOTAL} = \left[\overbrace{\left(\frac{N \text{ γύρων}}{\text{Αλγ.1}} \right) \cdot \left(\frac{t \text{ γύρου}}{\text{Αλγ.1}} \right)}^{\text{υπολογισμός } P_{TOT}} + \overbrace{\left(\frac{N \text{ γύρων}}{\text{Αλγ.2}} \right) \cdot \left(\frac{t \text{ γύρου}}{\text{Αλγ.2}} \right)}^{\text{υπολογισμός } \lambda_{\min}} \right] \cdot \left(\frac{N \text{ σταδίων}}{\text{Αλγ.3}} \right) + \underbrace{\left(\frac{N \text{ γύρων}}{\text{Αλγ.1}} \right) \cdot \left(\frac{t \text{ γύρου}}{\text{Αλγ.1}} \right)}_{\text{υπολογισμός } V_i}$$

Για την ιεραρχική διατύπωση της εφαρμογής διαχείρισης συμφορήσεων ο συνολικός χρόνος σύγκλισης εξαρτάται από το χρόνο σύγκλισης στο πιο «αργό» δίκτυο στο Επίπεδο ΧΤ και προκύπτει από τη σχέση:

$$t_{TOTAL} = \left[\overbrace{\left(\frac{N \text{ γύρων}}{\text{Αλγ.1}} \right) \cdot \left(\frac{t \text{ γύρου}}{\text{Αλγ.1}} \right)}^{\substack{\text{υπολογισμός } P_{TOT} \\ \text{στο πιο αργό δίκτυο Χ.Τ.}}} + \overbrace{\left(\frac{N \text{ γύρων}}{\text{Αλγ.1}} \right) \cdot \left(\frac{t \text{ γύρου}}{\text{Αλγ.1}} \right)}^{\substack{\text{υπολογισμός } P_{TOT} \\ \text{στο Επίπεδο Μ.Τ.}}} + \overbrace{\left(\frac{N \text{ γύρων}}{\text{Αλγ.2}} \right) \cdot \left(\frac{t \text{ γύρου}}{\text{Αλγ.2}} \right)}^{\substack{\text{υπολογισμός } \lambda_{\min} \\ \text{στο πιο αργό δίκτυο Χ.Τ.}}} + \overbrace{\left(\frac{N \text{ γύρων}}{\text{Αλγ.2}} \right) \cdot \left(\frac{t \text{ γύρου}}{\text{Αλγ.2}} \right)}^{\substack{\text{υπολογισμός } \lambda_{\min} \\ \text{στο Επίπεδο Μ.Τ.}}} + \underbrace{\left(\frac{N \text{ γύρων}}{\text{Αλγ.2}} \right) \cdot \left(\frac{t \text{ γύρου}}{\text{Αλγ.2}} \right)}_{\substack{\text{μετάδοση } \lambda_{\min} \\ \text{στο Επίπεδο Χ.Τ.}}} \right] \times \left(\frac{N \text{ σταδίων}}{\text{Αλγ.3}} \right)$$

Πίνακας 5-9: Παραμετρική αποτίμηση του συνολικού χρόνου σύγκλισης t_{conv} (seconds)

Εφαρμογή	Δίκτυο	PLC narrowband (200 kbps)		PLC broadband (3 Mbps)		Overlay on ADSL/GPRS (24 Mbps)	
		Μέση τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Χειρότερη τιμή
Διαχείριση συμφορήσεων	9 κόμβων	1,876	1,902	0,872	0,901	0,063	0,092
	IEEE 123	88,945	90,354	41,092	42,515	3,169	4,592
Ιεραρχική διατύπωση διαχείρισης συμφορήσεων	101 κόμβων	90,185	91,620	41,675	43,120	3,248	4,693
Τοπική Εξισορρόπηση	9 κόμβων	0,563	0,571	0,261	0,270	0,018	0,027
	IEEE 123	12,044	12,236	5,546	5,738	0,405	0,598
Στοχαστικός Αλγόριθμος	9 κόμβων	130,431	130,516	8,745	8,833	1,105	1,193

5.7. Σύνοψη και συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάζονται περαιτέρω θέματα σχετικά με την εφαρμογή αποκεντρωμένου ελέγχου για δίκτυα διανομής καθώς επίσης και μία αποτίμηση του τηλεπικοινωνιακού φόρτου και του χρόνου σύγκλισης των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων για τις εν λόγω εφαρμογές.

Σε πρώτη φάση προτείνεται η ιεραρχική διατύπωση του Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων του Κεφαλαίου 4, έτσι ώστε να μπορεί να επιταχυνθεί η εφαρμογή του σε περιπτώσεις διαχείρισης δικτύων μέσης και χαμηλής τάσης ταυτόχρονα.

Στη συνέχεια προτείνεται η επέκταση του αλγορίθμου του Κεφαλαίου 4, έτσι ώστε να υποστηριχθεί η κατανεμημένη επίλυση του προβλήματος εξισορρόπησης ζήτησης-παραγωγής σε δίκτυα διανομής, μέσω διαχείρισης των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας.

Τέλος, παρουσιάζεται μία παραμετρική αποτίμηση του χρόνου σύγκλισης για όλες τις εφαρμογές κατανεμημένης διαχείρισης που προτείνονται στην διατριβή, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά των επιμέρους τεχνολογιών επικοινωνιών, με έμφαση στο PLC.

Σε κάθε περίπτωση η ταχύτητα σύγκλισης των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων περιλαμβάνει ένα μέρος που σχετίζεται με το χρόνο των τοπικών υπολογισμών και ένα μέρος που σχετίζεται με το επικοινωνιακό μέσο για τη μεταφορά της πληροφορίας. Αποτιμώντας τον τηλεπικοινωνιακό φόρτο και το χρόνο υπολογισμού για καθένα από τα σενάρια προσομοιώσεων και για τα επιμέρους πειραματικά δίκτυα, κατέστη φανερό ότι οι Αλγόριθμοι Ομότιμων Κόμβων παρουσιάζουν συνολικούς χρόνους της τάξης του λεπτού για δίκτυα περίπου 100 κόμβων, χρόνος που είναι ικανοποιητικός για εφαρμογές διαχείρισης συμφορήσεων και τοπικής εξισορρόπησης ζήτησης-παραγωγής.

6

Σύστημα πολλαπλών πρακτόρων για κατανεμημένη διαχείριση δικτύων διανομής

6.1. Σύστημα πολλαπλών πρακτόρων για κατανεμημένη διαχείριση δικτύων διανομής

Οι αποκεντρωμένοι αλγόριθμοι στα πλαίσια των δικτύων διανομής μπορούν να εφαρμοστούν μέσω ενός συστήματος πολλαπλών ευφυών πρακτόρων λογισμικού, αξιοποιώντας κατά το μέγιστο δυνατό τις υπάρχουσες ή μελλοντικές υποδομές υλικού που εγκαθίστανται σε διάφορα σημεία του δικτύου, όπως για παράδειγμα τους έξυπνους μετρητές. Η απαίτηση για αντιμετώπιση προβλημάτων παραβίασης περιορισμών στα πλαίσια λειτουργίας του δικτύου και η δυνατότητα για παροχή πρόσθετων εξελιγμένων υπηρεσιών προς τα δίκτυα μεταφοράς μέσω ευφυών αντιδράσεων και μεταβολής στη λειτουργία των βασικών συνιστωσών του δικτύου καθιστά την υλοποίηση κατανεμημένων εφαρμογών μία πολύ καλή επιλογή. Στην πραγματικότητα οι ίδιοι οι καταναλωτές και οι παραγωγοί διεσπαρμένων πηγών που συνδέονται στο δίκτυο διανομής καλούνται να συνεργαστούν και να προσαρμόσουν την εκάστοτε λειτουργική τους κατάσταση υποστηρίζοντας την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου, το οποίο υφίσταται για να τους εξυπηρετήσει, διατηρώντας ωστόσο οι ίδιοι την πρωτοβουλία και την αυτονομία στη διαχείριση των πόρων τους. Κάτω από αυτό το πρίσμα είμαστε σε θέση να πραγματοποιήσουμε την αντιστοίχιση των επιμέρους συστημάτων του δικτύου με ευφυείς πράκτορες λογισμικού και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων μέσω ενός οργανωμένου συστήματος πολλαπλών πρακτόρων. Επισημαίνεται ότι τόσο οι εφαρμογές των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων όσο και η δυνατότητα επέκτασης των έξυπνων μετρητών ώστε να

συνεργάζονται στα πλαίσια διαχείρισης του δικτύου διανομής, ταιριάζουν σε μεγάλο βαθμό σε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων.

Χάριν πληρότητας αναφέρονται στη συνέχεια κάποιοι ορισμοί και χαρακτηριστικά της θεωρίας των πρακτόρων, μέσα από τα οποία αναδεικνύεται η χρησιμότητα και η καταλληλότητα των συστημάτων αυτών ως υπόβαθρο για την υποβοήθηση εφαρμογής των κατανεμημένων αλγορίθμων. Ο οργανισμός Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) διαθέτει την πιο ευρέως αποδεκτή προτυποποίηση για τη δημιουργία και το πλαίσιο λειτουργίας των πρακτόρων λογισμικού.

6.1.1. Ευφυής πράκτορας λογισμικού και συστήματα πολλαπλών πρακτόρων

Το λεξικό *Oxford English Dictionary* ορίζει τον πράκτορα ως «*κάποιον που δρα ή έχει τη δύναμη ή την αρμοδιότητα να δράσει εκπροσωπώντας κάποιον άλλο*» ή εναλλακτικά ως «*το μέσο με το οποίο πραγματοποιείται κάτι*» ή εναλλακτικά ως «*κάποιον ή κάτι που αναλαμβάνει έναν δραστικό ρόλο ή παράγει ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα*». Ο όρος στα αγγλικά “**agent**” προέρχεται ετυμολογικά από τη μετοχή ενεστώτα του λατινικού ρήματος “*agere*”, το οποίο σημαίνει «*οδηγώ, καθοδηγώ, δρω ή κάνω*».

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό είναι αναμενόμενο ένας πράκτορας λογισμικού να θεωρείται ότι δρα για λογαριασμό κάποιου άλλου με σκοπό να φέρει εις πέρας ένα συγκεκριμένο έργο ή υποχρέωση με την οποία και επιφορτίστηκε.[59]

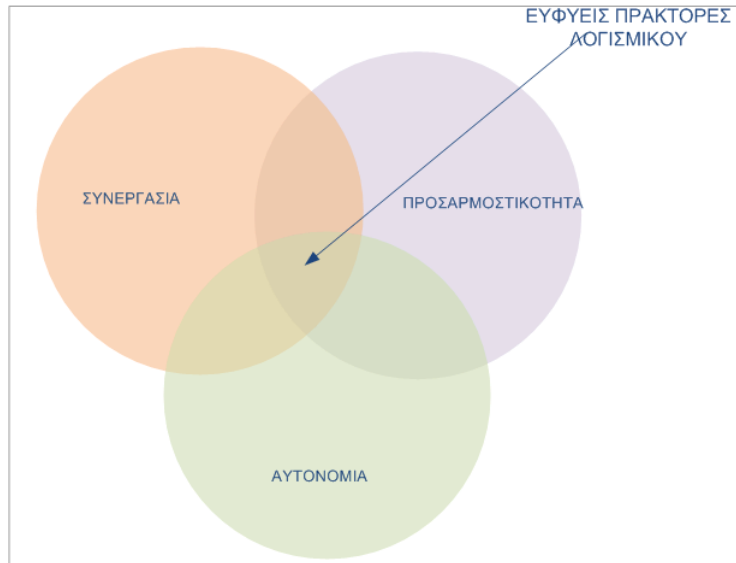
Βέβαια είναι εξαιρετικά δύσκολο να εξηγήει κανείς με κάθε λεπτομέρεια τους στόχους του και είναι λογικό να επιδιώκει οι Πράκτορες Λογισμικού που χρησιμοποιεί να έχουν την ικανότητα να αντιλαμβάνονται το περιεχόμενο των εντολών, δηλαδή να μπορούν να λάβουν υπόψη κάποιες μεταβλητές και ιδιαιτερότητες του περιβάλλοντός τους.[60]

Σε γενικές γραμμές και εφόσον ένας απόλυτος ορισμός της έννοιας του ευφυούς πράκτορα λογισμικού είναι εξαιρετικά δύσκολος, συνήθως αρκούμαστε στη περιγραφή των επιθυμητών ιδιοτήτων τους. Οι ευφυείς πράκτορες λογισμικού θα πρέπει να έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Να προσαρμόζονται ταχύτατα σε νέα δεδομένα και να μπορούν να υλοποιήσουν λύσεις για νέα προβλήματα όταν αυτά προκύπτουν
- Να δρουν και να λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο, συνδεδεμένοι σε δίκτυο
- Να μπορούν να αναλύουν τις συμπεριφορές, τα επιτυχή αποτελέσματα και τις αποτυχίες
- Να μαθαίνουν και να βελτιώνονται μέσα από την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον τους

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται το πεδίο ορισμού των ευφυών πρακτόρων, ως ένας συνδυασμός μεταξύ συνεργασίας, δυνατότητας προσαρμογής και αυτονομίας.

Οι ευφυείς πράκτορες λογισμικού θεωρείται ότι οργανώνονται σε ομάδες, οι οποίες ονομάζονται Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων (multi agent systems - MAS). Ένα Σύστημα Πολλαπλών Πρακτόρων ορίζεται ως ένα σύστημα κατανεμημένων στοιχείων, μέσα στο οποίο όλες οι επιμέρους δομές- Πράκτορες νοούνται ως αυτόνομα τμήματα λογισμικού, τα οποία επιλύουν ένα συγκεκριμένο πρόβλημα ή επιτελούν μία συγκεκριμένη διεργασία και συνεργάζονται αρμονικά για την επίτευξη ορισμένων πιο σύνθετων στόχων.[62]



Σχήμα 6.1: Συσχέτιση ιδιοτήτων των Πρακτόρων [61]

6.2. Σχεδίαση συστήματος πολλαπλών πρακτόρων

Έχουν προταθεί αρκετές μεθοδολογίες για την αποδοτική σχεδίαση συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων με στόχο να εκτελούν τις επιθυμητές λειτουργίες ακολουθώντας τους κανόνες της θεωρίας πρακτόρων. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία [63] οφείλουμε αρχικά να καταγράψουμε τις επιθυμητές λογικές διαχείρισης του δικτύου διανομής σε λειτουργικά διαγράμματα και να εξάγουμε οποιοδήποτε πιθανό ρόλο ή τύπο πράκτορα απορρέει από αυτά. Οι τύποι των πρακτόρων χωρίζονται σε δύο ευρύτερες κατηγορίες, εκείνους που διαθέτουν φυσική υπόσταση, αντιστοιχισμένη προς κάποια συσκευή του δικτύου, και εκείνους που αποτελούν εικονικούς πράκτορες και επιτελούν βοηθητικές λειτουργίες.

Συγκεκριμένα σύμφωνα με τη μεθοδολογία σχεδιασμού ακολουθούμε τα εξής στάδια:

1. Κατάστρωση των λειτουργικών διαγραμμάτων
2. Εξαγωγή των αρχικών τύπων πρακτόρων
3. Περιγραφή των ρόλων και των αρμοδιοτήτων τους
4. Περιγραφή των συνεργασιών και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους
5. Καθορισμός των τελικών τύπων πρακτόρων

6.2.1. Λειτουργικά διαγράμματα και σενάρια κατανεμημένου ελέγχου

Η περιγραφή των λειτουργιών που επιθυμούμε να επιτελεί ιδανικά το σύστημα πολλαπλών πρακτόρων αποτελεί μία επέκταση της λογικής των συστημάτων εποπτείας και ελέγχου στα δίκτυα διανομής. Η επέκταση της λογικής έγκειται στο γεγονός ότι περισσότερα τμήματα του δικτύου αποτελούν πλέον παίκτες με ενεργό ρόλο στη διαχείριση. Κατ' αυτή την έννοια στη φάση σχεδιασμού του MAS θα περιγράψουν λειτουργίες και λογικές ελέγχου, οι οποίες δεν έχουν κατ' ανάγκη εξεταστεί όλες σε βάθος στην παρούσα διατριβή. Ο λόγος είναι η όσο το δυνατό πληρέστερη διερεύνηση των τύπων πρακτόρων και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων, έτσι ώστε το MAS να σχεδιαστεί ως υπόβαθρο για την υλοποίηση διαφόρων επιπέδων κατανεμημένου ελέγχου και ευφυΐας στα δίκτυα διανομής. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι κάποιες από τις λειτουργίες εκτελούνται ήδη σε κάποιο βαθμό στα δίκτυα, αλλά σε κεντρικό επίπεδο, ενώ κάποιες

άλλες αποτελούν σενάρια ελέγχου και διαχείρισης στα πλαίσια της εξέλιξης του δικτύου στο μέλλον σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1. Διευκρινίζεται επίσης ότι θεωρείται δεδομένη η εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε διάφορα σημεία του δικτύου διανομής, με επιπρόσθετες δυνατότητες πέραν της μέτρησης μεγεθών, αυτές της επικοινωνίας, της επεξεργασίας και αποθήκευσης πληροφορίας, αλλά και του ελέγχου μέσω μετάδοσης εντολών σε ελεγχόμενους ηλεκτρονόμους.

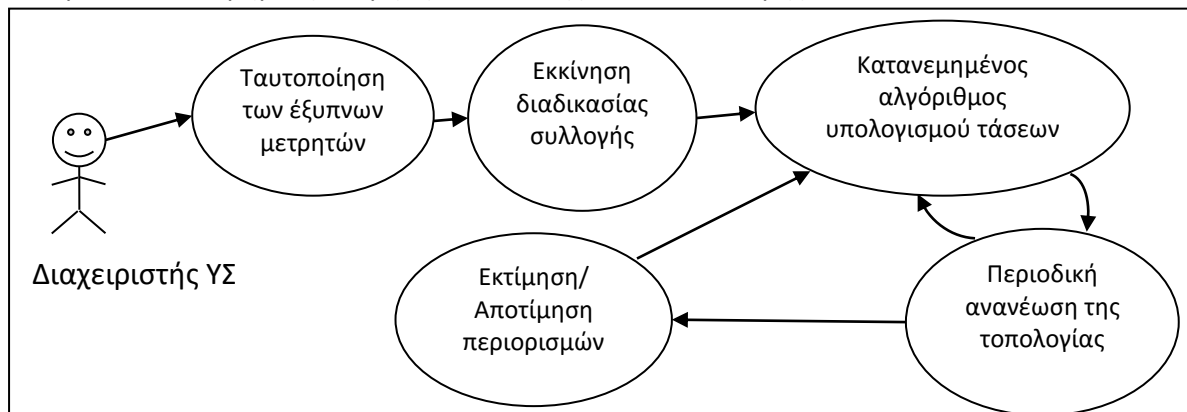
Η βασική ιδέα λοιπόν είναι η σχεδίαση ενός συστήματος πολλαπλών ευφυών πρακτόρων, το οποίο να υποστηρίζει ένα σύνολο από καταναμημένους αλγορίθμους με απώτερο στόχο την καλύτερη εποπτεία/γνώση της κατάστασης του δικτύου διανομής και την εφαρμογή πολιτικών ελέγχου/ τεχνικών για τη διαχείριση τυχόν παραβιάσεων περιορισμών ή βελτιστοποίησης της λειτουργίας του δικτύου. Οι στόχοι μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Καταναμημένη εκτίμηση της κατάστασης των δικτύων διανομής (προσδιορισμός τάσεων)
 - Υποβοήθηση στον καταναμημένο εντοπισμό παραβίασης περιορισμών (π.χ. υπερφόρτιση) και αντιμετώπισή τους
 - Καταναμημένες εφαρμογές διαχείρισης ζήτησης
 - Τοπική εξισορρόπηση ζήτησης και παραγωγής
 - Μείωση των απωλειών
 - Υπό συνθήκες αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής
 - Δυνατότητα δημιουργίας μικροδικτύων, δηλαδή νησίδων εντός του δικτύου διανομής, είτε για οικονομικούς είτε για τεχνικούς λόγους (π.χ. τροφοδότηση «υγειών» τμημάτων γραμμών διανομής κατά τη διάρκεια γενικευμένων σφαλμάτων στο δίκτυο μεταφοράς)

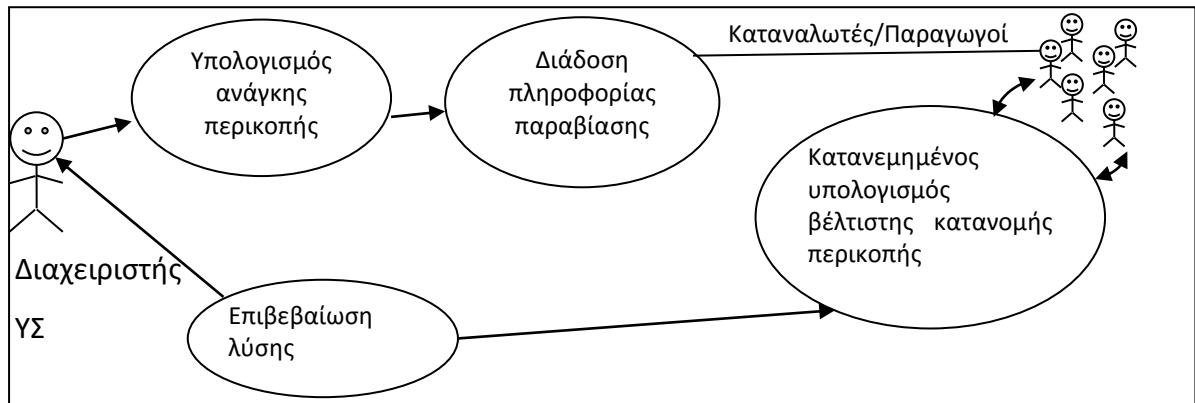
Είναι προφανές ότι κάποιοι από τους στόχους αυτούς είναι αλληλεξαρτώμενοι και μάλιστα υποβοηθούν ο ένας τον άλλο, ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις ανιχνεύονται και αντικρουόμενοι στόχοι. Το γεγονός αυτό αποτελεί μία εξαιρετική πρόκληση αλλά και δυνατότητα κατά το σχεδιασμό του συστήματος ευφυών πρακτόρων, με καταναμημένη λογική, αφού επιτρέπει σε μεγάλο βαθμό την αυτονομία στη δράση των πρακτόρων, οι οποίοι βρίσκονται σε χαμηλό επίπεδο ελέγχου.

Ακολουθούν τα λειτουργικά διαγράμματα των σεναρίων καταναμημένου ελέγχου και εποπτείας, κατά την έννοια της ακολουθούμενης μεθοδολογίας για το σχεδιασμό του συστήματος πολλαπλών πρακτόρων.

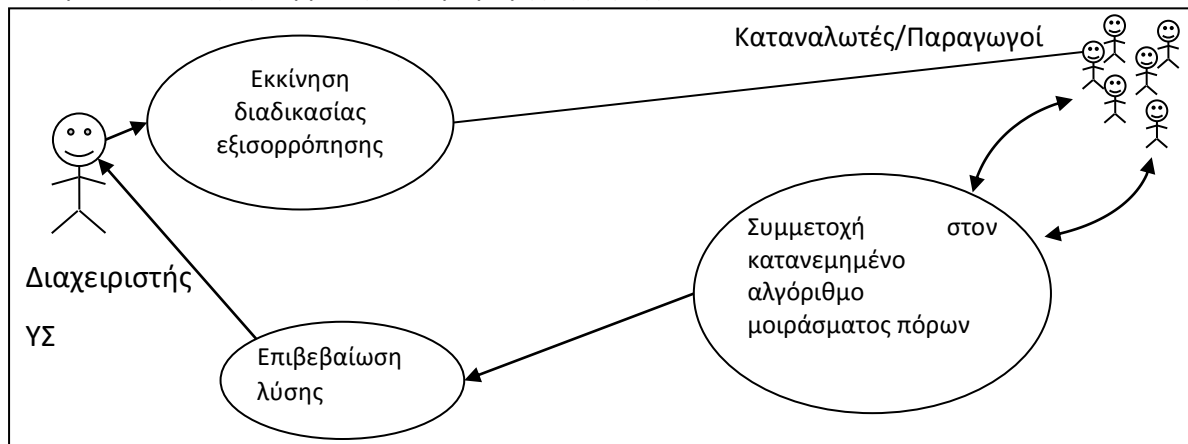
Σενάριο 1: Καταναμημένη εκτίμηση κατάστασης δικτύου διανομής



Σενάριο 2: Κατανεμημένη διαχείριση συμφορήσεων μέσω περικοπών



Σενάριο 3: Τοπική εξισορρόπηση παραγωγής/ ζήτησης



Σχήμα 6.2: Σενάρια σχεδιασμού συστήματος πολλαπλών πρακτόρων

6.2.2. Διερεύνηση των αρχικών τύπων ευφυών πρακτόρων

Μετά από ανάλυση των λειτουργικών διαγραμμάτων προσδιορίζουμε τους ακόλουθους τύπους Πρακτόρων σε συσχέτιση με φυσικές οντότητες (πραγματικές συσκευές του δικτύου διανομής):

- Υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ
- Υποσταθμός ΜΤ/ΧΤ
- Καταναλωτής (φορτίο ή μικροπηγή)
- Απλός κόμβος του δικτύου (σημείο διακλάδωσης)
- Έξυπνος μετρητής

Και τους εξής τύπους πρακτόρων χωρίς αντιστοίχιση με φυσική οντότητα, αλλά μόνο ως λογική υπόσταση:

- «Ευρετήριο» κόμβων με τοπολογικά δεδομένα του δικτύου διανομής και του υπερκείμενου τηλεπικοινωνιακού δικτύου
- Παίκτης αγοράς ενέργειας (Διαχειριστής δικτύου, Πάροχος ενέργειας)
- Μετατροπέας (transducer ή wrapper type) ενός τύπου πράκτορα με φυσική υπόσταση σε συμβατότητα με το πρότυπο DLMS/COSEM

6.2.3. Χαρακτηριστικά και αρμοδιότητες (ρόλοι) των διαφόρων τύπων πρακτόρων

Ακολουθούν πίνακες με τους ρόλους και τα χαρακτηριστικά των πρακτόρων όπως προέκυψαν από την ανάλυση των λειτουργικών διαγραμμάτων, κατά την έννοια της ακολουθούμενης μεθοδολογίας για το σχεδιασμό του συστήματος πολλαπλών πρακτόρων.

Πίνακας 6-1: Αρμοδιότητες και χαρακτηριστικά πράκτορα «Υποσταθμός (ΥΣ) ΜΤ/ΧΤ»

Αρμοδιότητες (Ρόλοι)	Χαρακτηριστικά/ πληροφορίες στο υπόβαθρο
Μέτρηση ηλεκτρικών μεγεθών στην αρχή των αναχωρήσεων στο ζυγό ΜΤ	Τοπολογικά χαρακτηριστικά δικτύου ΜΤ και ΧΤ (αντιδράσεις γραμμών, όρια φορτίσεων, θέσεις πυκνωτών, κτλ.)
Αποδοχή και διαχείριση εντολών από ανώτερα επίπεδα ελέγχου	Τεχνικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστή (ονομαστική ισχύς, τάσεις τυλιγμάτων, τοπολογία, θέσεις λήψεων tap, κτλ.)
Εκτίμηση κατάστασης	Πλήθος αναχωρήσεων
Ανίχνευση και προσδιορισμός παραβιάσεων περιορισμών και σφαλμάτων	Τεχνικά χαρακτηριστικά προστασιών
Διαχείριση των προστασιών του ΥΣ	Γεωγραφική θέση
Διαχείριση τοπικών πόρων εντός του ΥΣ (π.χ. taps, πυκνωτές)	Γνώση της ανάντι τοπολογίας του δικτύου ΜΤ (από ποιο ζυγό ΜΤ τροφοδοτείται)
Θέση σε λειτουργία προωθημένων τεχνικών για διαχείριση των κατάντι ζυγών χωρίς τροφοδότηση από τη ΜΤ (off-grid operation) και εκκίνηση μετά από διακοπή (black start)	Τεχνικά χαρακτηριστικά τηλεπικοινωνιακών υποδομών

Πίνακας 6-2: Αρμοδιότητες και χαρακτηριστικά πράκτορα «Έξυπνος μετρητής»

Αρμοδιότητες (Ρόλοι)	Χαρακτηριστικά/ πληροφορίες στο υπόβαθρο
Δυνατότητες μέτρησης και αποθήκευσης δεδομένων	Τεχνικά χαρακτηριστικά του καταναλωτή ή παραγωγού (ονομαστική ισχύς, χρήση τιμολογιακών ζωνών, ύπαρξη ελεγχόμενων ηλεκτρονόμων, κτλ.)
Απλοί υπολογισμοί (επεξεργασία της πληροφορίας)	Γεωγραφική θέση
Επικοινωνία	Τεχνικά χαρακτηριστικά τηλεπικοινωνιακών υποδομών
Αποδοχή και διαχείριση εντολών ελέγχου από ανώτερα επίπεδα ελέγχου ή έπειτα από τοπική απόφαση	

Πίνακας 6-3: Αρμοδιότητες και χαρακτηριστικά πράκτορα «Καταναλωτής (φορτίο ή μικροπηγή)»

Αρμοδιότητες (Ρόλοι)	Χαρακτηριστικά/ πληροφορίες στο υπόβαθρο
Έλεγχος ζήτησης παραγωγής μέσω relays ή μέσω διεπαφών με ηλεκτρονικά ισχύος (π.χ. inverter)	Τεχνικά χαρακτηριστικά (όπως εγκατεστημένη ισχύς και είδος φορτίων ή πηγών)
Εκτέλεση τοπικών υπολογισμών και λήψη τοπικών αποφάσεων με βάση την εσωτερική γνώση ή πληροφορίες από τη γειτονιά	Κανόνες, περιορισμοί και ειδική μεταχείριση της ζήτησης/παραγωγή (αποτύπωση σε συνάρτηση χρησιμότητας)
Επικοινωνία	Τεχνικά χαρακτηριστικά τηλεπικοινωνιακών υποδομών
Δυνατότητα αποδοχής και επεξεργασίας πληροφοριών	

Πίνακας 6-4: Αρμοδιότητες και χαρακτηριστικά πράκτορα «Απλός κόμβος του δικτύου (σημείο διακλάδωσης)»

Αρμοδιότητες (Ρόλοι)	Χαρακτηριστικά/ πληροφορίες στο υπόβαθρο
Δυνατότητα αποδοχής και επεξεργασίας πληροφοριών	Τεχνικά χαρακτηριστικά τηλεπικοινωνιακών υποδομών
Εκτέλεση τοπικών υπολογισμών και λήψη τοπικών αποφάσεων με βάση την εσωτερική γνώση ή πληροφορίες από τη γειτονιά	
Επικοινωνία	

Πίνακας 6-5: Αρμοδιότητες και χαρακτηριστικά πράκτορα «Παίκτης αγοράς ενέργειας (Διαχειριστής δικτύου, Πάροχος ενέργειας)»

Αρμοδιότητες (Ρόλοι)	Χαρακτηριστικά/ πληροφορίες στο υπόβαθρο
Εκτίμηση κατάστασης δικτύου	Τεχνικά χαρακτηριστικά τοπολογίας δικτύου
Εντοπισμός σφαλμάτων και παραβιάσεων περιορισμών	Τεχνικά χαρακτηριστικά τηλεπικοινωνιακών υποδομών
Αποστολή εντολών διαχείρισης	

Πίνακας 6-6: Αρμοδιότητες και χαρακτηριστικά ευρετηίου κόμβων με τοπολογικά δεδομένα του δικτύου διανομής και του υπερκείμενου τηλεπικοινωνιακού δικτύου

Αρμοδιότητες (Ρόλοι)	Χαρακτηριστικά/ πληροφορίες στο υπόβαθρο
Δημιουργία και ανανέωση ταυτότητας για κάθε κόμβο του δικτύου	Τεχνικά χαρακτηριστικά τοπολογίας δικτύου
Παροχή υπηρεσιών αναζήτησης	Τεχνικά χαρακτηριστικά τηλεπικοινωνιακών υποδομών

6.2.4. Συνεργασίες και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τύπων πρακτόρων

Ο πράκτορας «ΥΣ» επικοινωνεί με τους πράκτορες τύπου «έξυπνος μετρητής», «απλός κόμβος», «ΥΣ», «καταναλωτής (φορτίο ή μικροπηγή)». Η επικοινωνία είναι αμφίδρομη, στέλνει σήματα και λαμβάνει πληροφορίες από αυτούς για την κατάστασή τους και συνεργάζεται μαζί τους για την επίτευξη όλων των αρμοδιοτήτων του.

Ο πράκτορας «έξυπνος μετρητής» επικοινωνεί με έναν πράκτορα τύπου «ΥΣ», με άλλους πράκτορες τύπου «έξυπνος μετρητής» και «απλός κόμβος» στη γειτονία του και με έναν πράκτορα τύπου «καταναλωτής (φορτίο ή μικροπηγή)». Ο συσχετισμός ενός έξυπνου μετρητή με έναν ΥΣ και έναν καταναλωτή πραγματοποιείται μέσω της πληροφορίας που περιέχεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Ο πράκτορας «καταναλωτής» επικοινωνεί με έναν ΥΣ και έναν «έξυπνο μετρητή».

Ο πράκτορας «απλός κόμβος» επικοινωνεί με έναν πράκτορα τύπου «ΥΣ» και με άλλους πράκτορες τύπου «απλός κόμβος» και «έξυπνος μετρητής» στη γειτονιά του. Ο συσχετισμός ενός έξυπνου μετρητή με έναν ΥΣ και έναν καταναλωτή πραγματοποιείται επίσης μέσω της πληροφορίας που περιέχεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

6.2.5. Τελικοί τύποι πρακτόρων

Μετά την παραπάνω ανάλυση προκύπτει το συμπέρασμα ότι απαιτούνται δύο βασικοί τύποι πρακτόρων με φυσική υπόσταση, οι οποίοι προκύπτουν από συγχώνευση των τύπων πρακτόρων που εξερευνήθηκαν στο πρώτο στάδιο της σχεδίασης, καθώς κάτι τέτοιο απλοποιεί το σύστημά μας και το κάνει πιο αποδοτικό. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκε ο πράκτορας «ΥΣ» και ο πράκτορας «Κόμβος», με το δεύτερο να εμπεριέχει τους ρόλους και τα χαρακτηριστικά των έξυπνων μετρητών, των καταναλωτών και των απλών κόμβων. Οι δυνατότητες αυτές υλοποιούνται ως υπερσύνολο συναρτήσεων, συμπεριφορών και μεταβλητών και η ενεργοποίησή τους ή όχι εξειδικεύεται κατά περίπτωση εφαρμογής.

Σημειώνεται ότι οι ρόλοι και οι αρμοδιότητες των λογικών πρακτόρων «ευρετήριο» και «παικτής αγοράς ενέργειας» αντικατοπτρίζουν την ανάγκη για ένα σαφές πλαίσιο οργάνωσης και διαχείρισης των πολλαπλών δυνατοτήτων που προσφέρουν οι κατανεμημένοι αλγόριθμοι. Ωστόσο στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, θεωρείται χωρίς βλάβη της γενικότητας του σχεδιαζόμενου συστήματος, ότι οι συγκεκριμένοι ρόλοι ενσωματώνονται στον τύπο πράκτορα «ΥΣ» στο βαθμό που αυτός αναλαμβάνει εγγενώς το ρόλο του οργανωτή και διαχειριστή υπό το πρίσμα του υφιστάμενου θεσμικού πλαισίου. Επίσης δε θα ήταν σκόπιμο στη δεδομένη χρονική στιγμή να σχεδιαστεί ένα πλαίσιο οργάνωσης και διαχείρισης χωρίς να υφίσταται το αντίστοιχο θεσμικό πλαίσιο.

6.2.6. Βασικοί τύποι πρακτόρων για υποστήριξη των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων

Για την εφαρμογή του κατανεμημένου αλγορίθμου για τη διαχείριση συμφορήσεων αλλά και γενικότερα των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, απαιτείται ένας πράκτορας τύπου «ΥΣ», ο οποίος σε πρώτη φάση οφείλει να αναλύσει την τοπολογία του δικτύου, να πραγματοποιήσει τη φασματική ανάλυση του γράφου της τοπολογίας και να υπολογίσει τα βέλτιστα βάρη W και τον πίνακα αθροιστικών αγωγιμοτήτων Z , ακολουθώντας όσα αναφέρονται στις ενότητες 2.4.4 και 3.3. Επιπλέον απαιτούνται τόσοι πράκτορες τύπου «Κόμβος» όσοι οι κόμβοι του δικτύου, καθένας από τους οποίους πρέπει να γνωρίζει και να επικοινωνεί με τους άμεσα γειτονικούς του κόμβους (μέσω των πρακτόρων τους). Προφανώς θα πρέπει να έχει λάβει το κατάλληλο κομμάτι της πληροφορίας από τους πίνακες W και Z , δηλαδή τα στοιχεία των πινάκων που αφορούν τους κόμβους με τους οποίους συνδέεται. Συνήθως η πληροφορία αυτή δίνεται στον «Κόμβο» κατά τη δημιουργία του, αφού θεωρούμε ότι η τοπολογία δε μεταβάλλεται συχνά. Σε περίπτωση μεταβολής ωστόσο, η πληροφορία αυτή μπορεί να ανακτηθεί από τις υπηρεσίες ευρετηρίου του «ΥΣ».

Πίνακας 6-7: Ρόλοι και χαρακτηριστικά των πρακτόρων

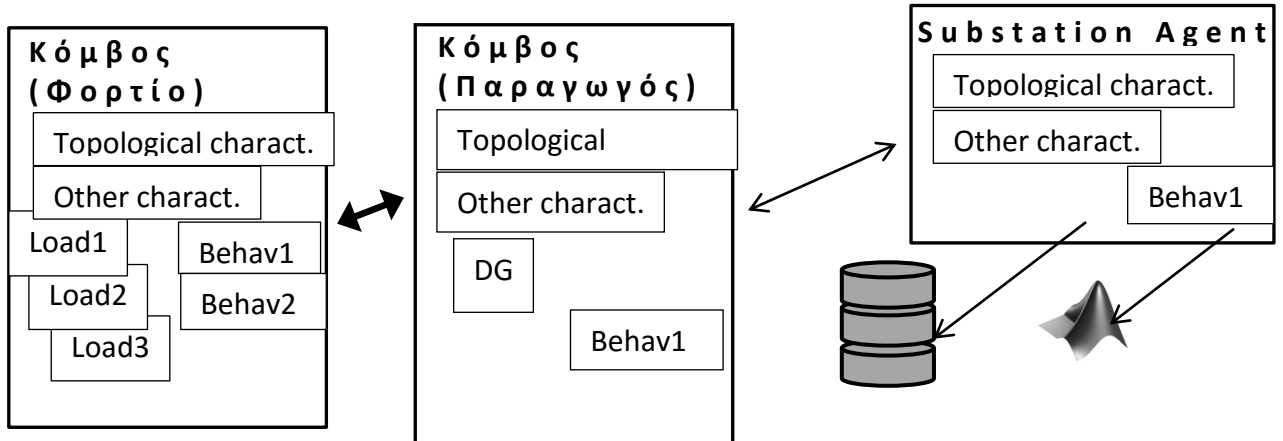
	Ρόλοι	Χαρακτηριστικά
Πράκτορας ΥΣ	Υπολογίζει μία φορά με κάθε αλλαγή τοπολογίας του δικτύου, τους πίνακες βαρών W , και συνολικής σύνθετης αντίστασης Z	S_{max}, W, Z
Πράκτορας Κόμβος	1) Μετρά τα μεγέθη P_i, V_i 2) Συμμετέχει στα σχήματα διαχείρισης του δικτύου ως εξής a. επικοινωνεί με τους κόμβους στη γειτονιά $j \in N_i$ b. ασκεί έλεγχο στα φορτία/ μονάδες τοπικής παραγωγής	$P_{max}, P_{min},$ $u_i(P_i), N_i,$ $w_{ii}, w_{ij} \forall j \in N_i,$ $z_{ij},$ $I_{ij}^{max}, V_{nom},$ S_{max}

6.3. Υλοποίηση συστήματος πολλαπλών πρακτόρων (JADE)

Στην συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται ο τρόπος υλοποίησης των τύπων ευφυών πρακτόρων, όπως αυτοί προσδιορίστηκαν κατά τη φάση σχεδιασμού. Η υλοποίηση είναι συμβατή με τα πρότυπα κωδικοποίησης της πληροφορίας κατά FIPA (Foundation of Intelligent Physical Agents), ώστε οι πράκτορες και τα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων να διαθέτουν τη δυνατότητα επικοινωνίας και συνεννόησης με άλλους πράκτορες ανεξαρτήτως πλατφόρμας υλοποίησης. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής το σύστημα πολλαπλών πρακτόρων δημιουργήθηκε με βάση την πλατφόρμα JADE (Java Agent Development Framework), η οποία παρέχει ένα σύνολο από βιβλιοθήκες συμπεριφορών αλλά και την απαραίτητη υποδομή που χρησιμοποιούν οι πράκτορες για να επικοινωνήσουν μεταξύ τους.

Επίσης δημιουργήθηκε η δυνατότητα διασύνδεσης με βάση δεδομένων με στόχο την ανάγνωση και εγγραφή δεδομένων για μελλοντικές εφαρμογές προσομοιώσεων ή πιο εξελιγμένες εφαρμογές διαχείρισης με χαρακτήρα ιστορικότητας και επιβεβαίωσης αποτελεσμάτων μέσω κεντρικών υπολογισμών ροών φορτίου απολογιστικά.

Ακολουθεί μία εποπτική εικόνα της αρχιτεκτονικής του συστήματος πολλαπλών πρακτόρων



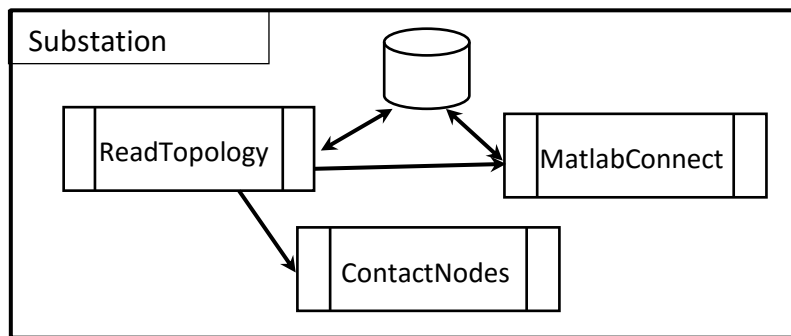
Σχήμα 6.3: Σχηματική απεικόνιση αρχιτεκτονικής συστήματος πολλαπλών πρακτόρων

6.3.1. Εσωτερικές λειτουργίες πρακτόρων

Κάθε τύπος πράκτορα περιλαμβάνει ένα σύνολο από συναρτήσεις και συμπεριφορές, οι οποίες του επιτρέπουν να αυτοπροσδιορίζεται αλλά και να συμμετέχει αποτελεσματικά στο σύστημα πολλαπλών πρακτόρων.

6.3.1.1. Πράκτορας «ΥΣ»

Ακολουθεί ένα δομικό διάγραμμα, στο οποίο απεικονίζονται οι βασικές αρμοδιότητες του πράκτορα «ΥΣ»



Σχήμα 6.4: Διάγραμμα δομής του πράκτορα ΥΣ

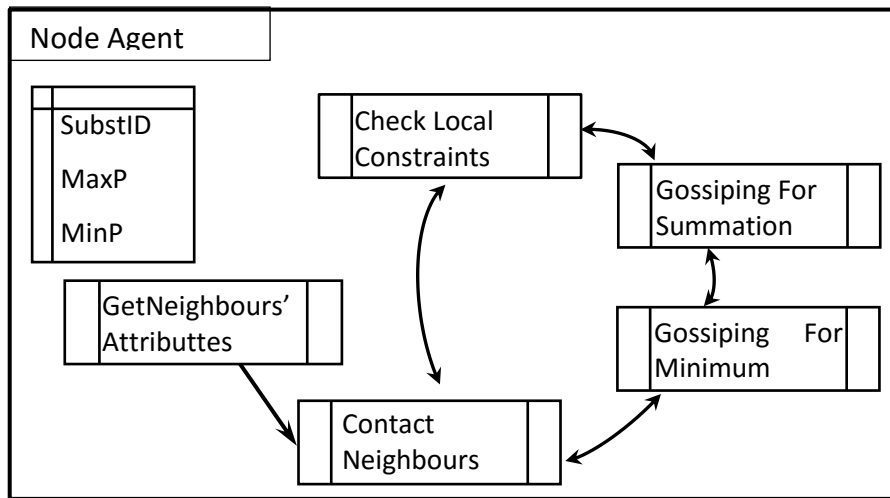
Ο Πράκτορας ΥΣ εκτελεί τις εξής λειτουργίες:

- Γνωρίζει την πλήρη τοπολογία του δικτύου MT – αποθηκευμένη σε βάση δεδομένων σε μορφή *pti*, πίνακες *buses*, *branches*
- Περιοδικά εκτελεί κεντρική ροή φορτίου και εκτίμηση κατάστασης με τις υπάρχουσες μετρήσεις – *εκκίνηση Matlab μέσω Cyclic Behavior*
- Πραγματοποιεί τη φασματική ανάλυση και στέλνει στους κόμβους τα ανανεωμένα βάρη– ανιχνεύει με αναζήτηση περιοδικά στον *Director Facilitator* ποιοι κόμβοι είναι ενεργοί στο δίκτυο

6.3.1.2. Πράκτορας «Κόμβος»

Εφόσον ο συγκεκριμένος τύπος πράκτορα προέκυψε έπειτα από συγχώνευση διάφορων αρχικά προσδιορισμένων τύπων, ενσωματώνει όλους τους ρόλους, τους οποίους αυτοί είχαν σχεδιαστεί να επιτελέσουν. Αυτό συνεπάγεται ότι ο τύπος πράκτορα «κόμβος» είναι ένας αρκετά γενικού σκοπού πράκτορας. Επισημαίνεται ότι οι θεμελιώδεις λειτουργίες του είναι η δυνατότητα επικοινωνίας με τους κόμβους στη γειτονιά του και η κατάλληλη επεξεργασία της πληροφορίας που ανταλλάσσεται. Οι θεμελιώδεις λειτουργίες είναι κοινές για όλους τους συγχωνευμένους τύπους πρακτόρων. Ουσιαστικά πρόκειται για τη δυνατότητα συμμετοχής στον Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων.

Ακολουθεί το δομικό διάγραμμα, στο οποίο απεικονίζονται οι βασικές λειτουργίες του πράκτορα «Κόμβος»



Σχήμα 6.5: Διάγραμμα δομής του πράκτορα Κόμβου

Ο Πράκτορας Κόμβος επιτελεί τις εξής λειτουργίες:

- Γνωρίζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, όπως:
 - Ισχύ
 - Από ποιο ΥΣ και ποια αναχώρηση του τροφοδοτείται
- Ανιχνεύει περιοδικά τους γείτονες του στο δίκτυο MT- με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά που έχουν δηλώσει στον DF ως Properties στο service description
- Κρατάει τις «μετρήσεις» του σε εικονικό μετρητή – εκτελείται ένα instance server του Gurux DLMS compliant
- Αναμένει μηνύματα από τους γείτονές του ή τον ΥΣ στα πλαίσια αντιμετώπισης κάποιου προβλήματος – για παράδειγμα να ξεκινά με CONGESTION εφόσον αφορά την αντιμετώπιση του προβλήματος της συμφόρησης
- Σε περίπτωση εντοπισμού προβλήματος πραγματοποιείται εκκίνηση αλγορίθμου επίλυσης του προβλήματος
 - Εσωτερικός υπολογισμός οριακής χρησιμότητας
 - Επιλογή γειτόνων και αποστολή εσωτερικής πληροφορίας
 - Υποδοχή μηνυμάτων και κατάταξη
 - Απόφαση για ίδια περικοπή ανάλογα με την οριακή του χρησιμότητα

Ένα σύνολο από μεταβλητές ορίστηκαν για να συμπεριλάβουν τα χαρακτηριστικά του κόμβου, τα οποία παρέχονται ως δεδομένα εισόδου κατά τη φάση δημιουργίας του instance (τη στιγμή που ο πράκτορας ζωντανεύει).

Επιπλέον απαιτείται η δημιουργία των εξής συναρτήσεων/κλάσεων:

BiddingFunction: Μέσω αυτής της συνάρτησης σχηματίζεται η τιμή της οριακής χρησιμότητας στο εκάστοτε σημείο λειτουργίας του κόμβου

CreateMessage: Δημιουργεί το μήνυμα με τους κατάλληλους παραλήπτες, το κατάλληλο περιεχόμενο και την κατάλληλη σήμανση περί οντολογίας (σε ποιο αλγόριθμο συμμετέχουν).

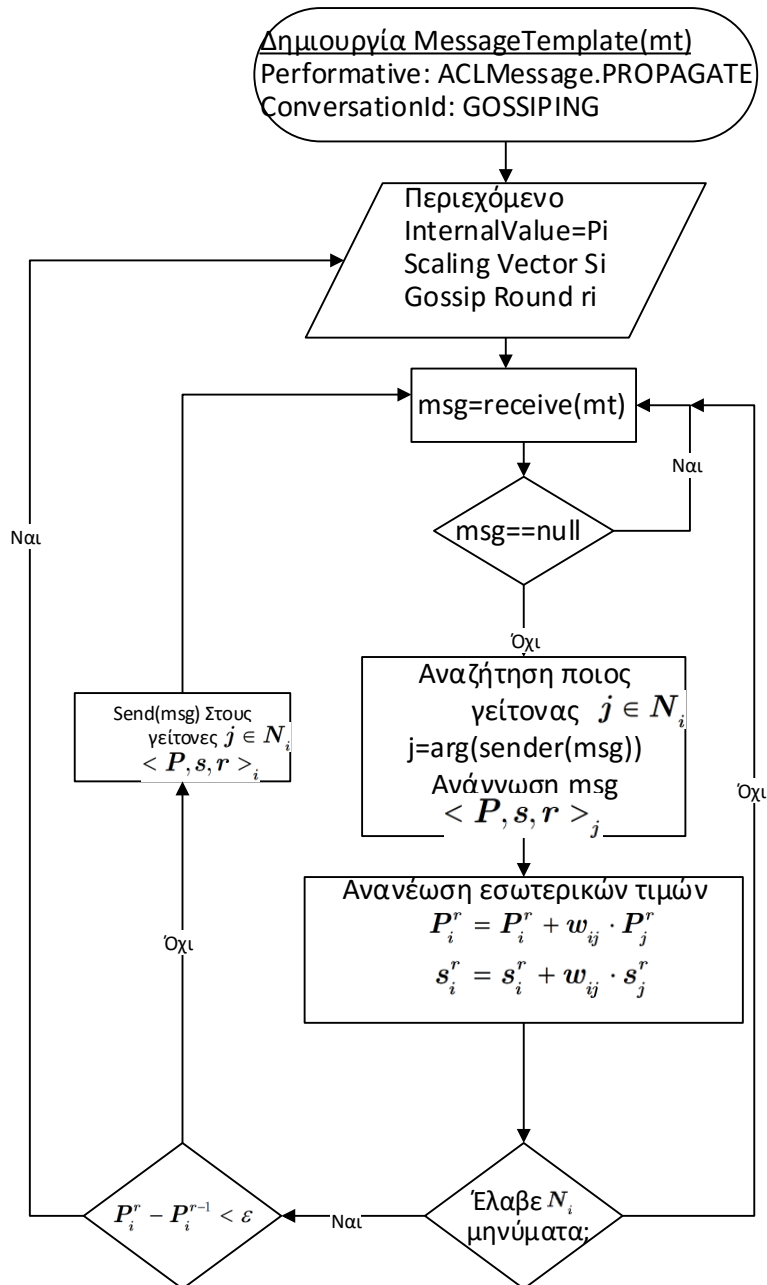
Loads: Ελέγχει την κατάσταση λειτουργίας των επιμέρους φορτίων και κατανέμει τη μεταβολή αναλόγως

DGs: Ελέγχει την κατάσταση λειτουργίας των μικροπηγών και κατανέμει τη μεταβολή αναλόγως

Στη συνέχεια θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά στην υλοποίηση του Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων (Αλγόριθμος 1) που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.6, με επέκταση της συμπεριφοράς ‘Cyclic Behavior’. Επίσης θα παρουσιαστεί η υλοποίηση του στοχαστικού Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων της ενότητας 2.6 μέσω επέκτασης της συμπεριφοράς ‘Cyclic Behavior’.

Στα πλαίσια της δημιουργίας του ευφυούς πράκτορα τύπου «Κόμβος» επεκτάθηκε μία λειτουργικότητα της πλατφόρμας JADE τύπου “Cyclic Behavior”. Η βασική εργασία που επιτελεί η συγκεκριμένη συμπεριφορά αφορά τον Αλγόριθμο 1, ο οποίος έπειτα από κατάλληλη αρχικοποίηση συγκλίνει με αποκεντρωμένο τρόπο στο άθροισμα των αρχικών τιμών. Το γενικότερο πλαίσιο συμπεριφοράς των πρακτόρων που διαθέτουν αυτή τη συνάρτηση περιλαμβάνει την αποστολή και την υποδοχή μηνυμάτων από και προς τους γειτονικούς κόμβους και στη συνέχεια την εσωτερική ανανέωση της πληροφορίας, πριν ξανασταλθούν τα μηνύματα στους γείτονες. Η όλη διαδικασία συνεχίζεται έως ότου έχουμε σύγκλιση, η οποία προφανώς καθορίζεται από μία τιμή ϵ . Ωστόσο η κυκλική συμπεριφορά συνεχίζει να υπάρχει έστω και σε λανθάνουσα μορφή. Έτσι με μία αλλαγή στην εσωτερική πληροφορία κάποιου κόμβου θα εκκινεί εκ νέου ένα πεπερασμένο πλήθος γύρων Αλγορίθμου Ομότιμων Κόμβων μέχρι να υπολογιστεί η νέα συνολική εκτίμηση του αθροίσματος.

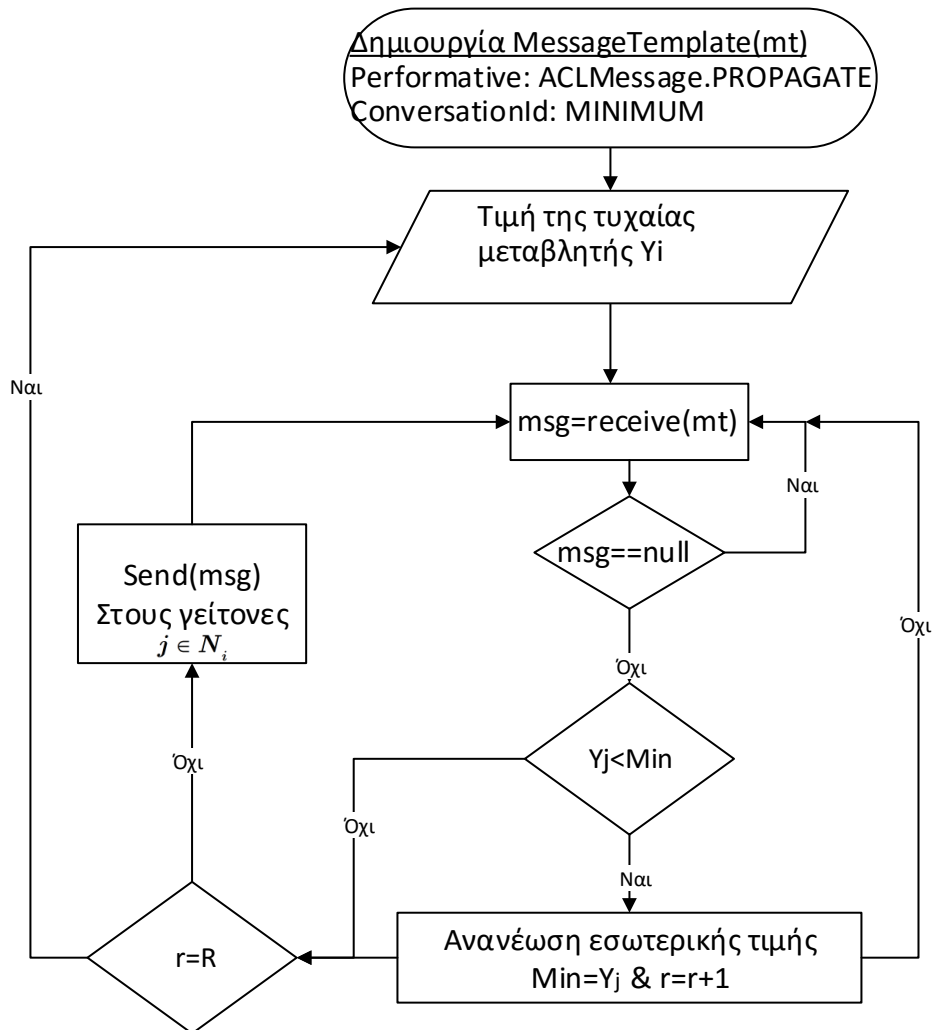
Ακολουθεί το λογικό διάγραμμα της μεθόδου action() της εν λόγω συμπεριφοράς του πράκτορα τύπου «Κόμβος».



Σχήμα 6.6: Διάγραμμα ροής Αλγορίθμου 1 ως Cyclic Behavior του πράκτορα Κόμβου

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον κατά την υλοποίηση του ευφυούς πράκτορα τύπου «Κόμβος» παρουσιάζει η συμπεριφορά, η οποία δημιουργήθηκε για το στοχαστικό Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων. Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 η προετοιμασία του στοχαστικού Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός συγκεκριμένου πλήθους τυχαίων μεταβλητών γύρω από την τρέχουσα τιμή της τοπικής πληροφορίας καθενός από τους κόμβους, ο οποίος πρόκειται να συμμετάσχει στο σχήμα υπολογισμού. Μετά τη συγκεκριμένη αρχικοποίηση οι κόμβοι ανταλλάσσουν μεταξύ τους μηνύματα προσπαθώντας να προσδιορίσουν την ελάχιστη τιμή για καθεμία από αυτές τις μεταβλητές. Ακολουθεί το λογικό διάγραμμα της συμπεριφοράς που δημιουργήθηκε για αυτό το σκοπό. Προφανώς η συμπεριφορά ενυπάρχει σε κάθε «Κόμβο» και ενεργοποιείται όσες φορές απαιτηθεί για τον υπολογισμό των ελάχιστων τιμών. Επισημαίνεται ότι η σύγκλιση επέρχεται έπειτα από $R = O(N^2 \log N)$ γύρους, αριθμό που γνωρίζουν όλοι οι

συμμετέχοντες a priori, καθώς αποτελεί πληροφορία η οποία είναι εγγενής με την τοπολογία του δικτύου.



Σχήμα 6.7 : Διάγραμμα ροής στοχαστικού αλγορίθμου ομότιμων κόμβων

6.4. Εφαρμογή σε δίκτυο 6 κόμβων (Μελτέμι)

Με βάση τον παραπάνω σχεδιασμό και την προτεινόμενη υλοποίηση του συστήματος πολλαπλών πρακτόρων σε JADE, αναπτύχθηκε μία εφαρμογή σε πραγματικό δίκτυο 6 κόμβων. Η εφαρμογή περιλαμβάνει την εγκατάσταση των απαραίτητων κλάσεων σε μορφή .jar σε καθέναν από τους 6 κόμβους, έτσι ώστε αυτοί να λειτουργούν ως ομότιμες οντότητες λογισμικού, οι οποίες διαθέτουν την ικανότητα να συμμετέχουν σε Αλγόριθμους Ομότιμων Κόμβων.

Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή της τοπολογίας του δικτύου και των ελεγχόμενων φορτίων σε κάθε κόμβο. Καταρχάς, θεωρούμε ότι κάθε χρήστης του δικτύου σχετίζεται με μία συνάρτηση χρησιμότητας της μορφής που έχει περιγραφεί στην ενότητα 4.2.1. Τα ελεγχόμενα φορτία του αποτιμώνται με βάση μία σχετική προτεραιότητα έναντι των φορτίων των υπόλοιπων χρηστών. Συγκεκριμένα θεωρήθηκαν τρία επίπεδα προτεραιοτήτων, ως εξής:

Πίνακας 6-8 : Προτεραιότητα ελεγχόμενων φορτίων για το σχήμα περικοπών

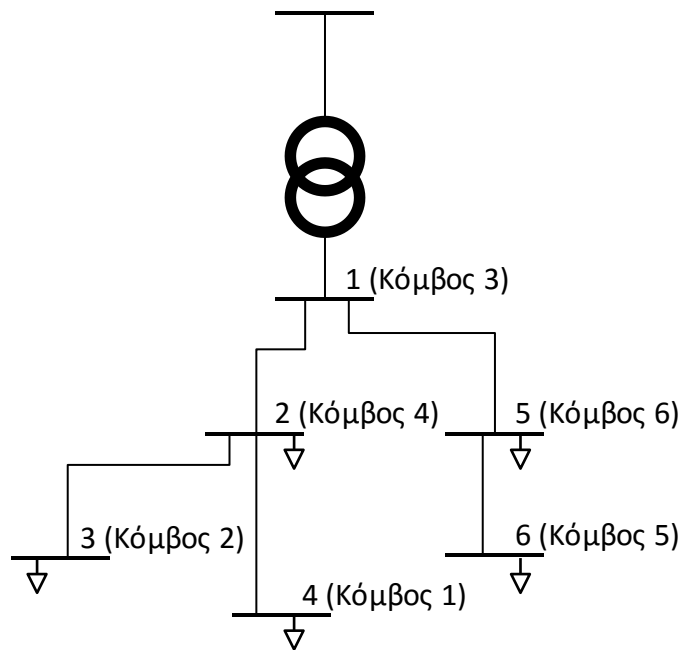
Προτεραιότητα	Επεξήγηση
Υψηλή	Το φορτίο περικόπτεται μόνο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης για το δίκτυο.
Μεσαία	Το φορτίο περικόπτεται σε περιπτώσεις μεγάλης ανάγκης και εφόσον έχουν εξαντληθεί οι δυνατότητες περικοπής των φορτίων χαμηλής προτεραιότητας.
Χαμηλή	Το φορτίο είναι ευέλικτο και υπόκειται σε περικοπή με στόχο την ενεργή διαχείριση του δικτύου.

Ακολουθεί το διάγραμμα με την τοπολογία του δικτύου ομότιμων κόμβων. Επισημαίνεται ότι στα πλαίσια των εφαρμογών που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή δεν υπάρχει ανάγκη συντονισμού και συνεπώς όλοι οι κόμβοι βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο ελέγχου. Καθένας από τους κόμβους επικοινωνεί με τους γειτονικούς του μέσω TCP/IP και κατά συνέπεια δεν ήταν δυνατό να δοκιμαστεί η τεχνολογία PLC που προτείνεται ως κυρίαρχη για εφαρμογές ομότιμων κόμβων στα δίκτυα διανομής, ώστε να έχουμε ταύτιση των δύο γράφων.

Ακολουθεί η ισχύς των ευέλικτων φορτίων σε κάθε κόμβο του δικτύου (Πίνακας 6-9) καθώς επίσης και η τοπολογία του δικτύου (Σχήμα 6.8).

Πίνακας 6-9 : Ισχύς ελεγχόμενων φορτίων ανά κόμβο

Κόμβος	Τύπος ελεγχόμενου φορτίου	Ενεργός ισχύς ευέλικτου φορτίου (kW)
1	Θερμοσίφωνας Φούρνος	2 2,5
2	Θερμοσίφωνας	2
3	A/C	3
4	Θερμοσίφωνας	2
5	Θερμοσίφωνας	2,5
6	Θερμοσίφωνας	2

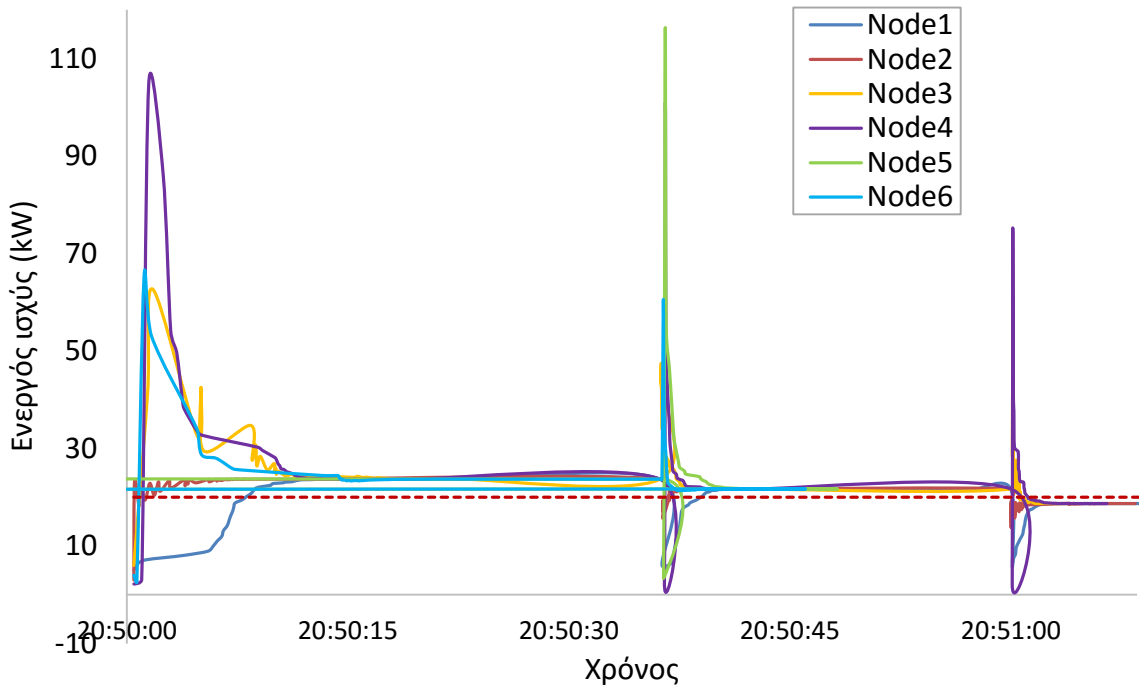


Σχήμα 6.8: Τοπολογία δικτύου 6 κόμβων στο Μελέμι

6.4.1. Σενάριο διαχείρισης συμφόρησης

Εφόσον η ροή στην αρχή μίας αναχώρησης υπερβαίνει το όριο της γραμμής ή του υποσταθμού, απαιτείται διαχείριση της συμφόρησης, σύμφωνα με όσα έχουν αναλυθεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Στην προκειμένη περίπτωση η διαχείριση της συμφόρησης πραγματοποιήθηκε σε πραγματικά πλαίσια, με το συνολικό περιορισμό να έχει τεθεί ίσος με $P_{TOT} = 20 \text{ kW}$. Η κατανεμημένη εφαρμογή διαχείρισης χρησιμοποιεί τους ευφυείς πράκτορες τύπου «Κόμβος», οι οποίοι βρίσκονται σε καθέναν από τους κόμβους του δικτύου. Οι «Κόμβοι» γνωρίζουν τους γείτονες τους, τα βέλτιστα βάρη για τη λειτουργία των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, την κατάσταση λειτουργίας των ελεγχόμενων φορτίων, που συνδέονται σε αυτούς, την ευελιξία τους για τη δεδομένη χρονική στιγμή, καθώς επίσης και το συνολικό όριο $P_{TOT} = 20 \text{ kW}$. Ανά πάσα στιγμή αλληλεπιδρούν με τους γειτονικούς τους κόμβους και διαπιστώνουν εάν υπάρχει παραβίαση του συνολικού περιορισμού και στη συνέχεια προχωρούν στην επίλυση του προβλήματος βέλτιστης κατανομής των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων, όπως διατυπώθηκε στην ενότητα 4.3. Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από πείραμα που εκτελέστηκε κατά τις βραδινές ώρες μίας καλοκαιρινής ημέρας, οπότε η συνολική ζήτηση ήταν $P_{TOT}^{t0} = 23 \text{ kW} > 20 \text{ kW}$.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι έπειτα από δύο στάδια του Αλγορίθμου 3 και σε σύνολο περίπου 80 δευτερολέπτων οι ευφυείς πράκτορες λογισμικού διαχειρίστηκαν τη συμφόρηση κάνοντας χρήση της διαθέσιμης ευελιξίας.



Σχήμα 6.9: Υπολογισμοί συνολικής ενεργού ισχύος για τη διαχείριση της συμφόρησης στο δίκτυο 6 κόμβων (Μελέτη)

Λόγω της διάρκειας των πειραμάτων δεν υπήρξε πραγματική μεταβολή στη ζήτηση των φορτίων και συνεπώς δεν είναι δυνατό να αποτυπωθεί η πραγματική επίπτωση στην τάση στους κόμβους του δικτύου, έτσι ώστε να συγκριθεί με τα αποτελέσματα των αποκεντρωμένων υπολογισμών ροής φορτίου.

Εστιάζουμε ωστόσο στους χρόνους που απαιτούνται για τη σύγκλιση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, καθώς πρόκειται για μία εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες και κατά συνέπεια υπεισέρχονται οι χρονικές καθυστερήσεις που οφείλονται στους υπολογισμούς και στο τηλεπικοινωνιακό μέσο, σε συνέχεια όσων αναλύθηκαν στην ενότητα 0.

Στον Πίνακα 6-10 παρουσιάζεται το πλήθος και ο χρόνος των γύρων Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων για καθέναν από τους κόμβους του δικτύου.

Πίνακας 6-10: Πλήθος γύρων και χρονική καθυστέρηση Αλγόριθμου 1 για το δίκτυο 6 κόμβων (Μελέτη)

Κόμβος	Στάδιο 1						Στάδιο 2					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Πλήθος γύρων	91	100	100	101	100	102	84	90	91	92	92	91
Χρόνος (seconds)	38	25	32	32	30	28	39	28	30	30	32	29

6.5. Σύνοψη και συμπεράσματα

Οι εφαρμογές Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων σε πραγματικό περιβάλλον καλούν τους ίδιους τους καταναλωτές και τους παραγωγούς διεσπαρμένων πηγών που συνδέονται στο δίκτυο διανομής να συνεργαστούν και να προσαρμόσουν την εκάστοτε λειτουργική τους κατάσταση, υποστηρίζοντας την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου, διατηρώντας ωστόσο την πρωτοβουλία και την αυτονομία στη διαχείριση των πόρων τους. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνουν εκ μέρους τους οι ευφυείς πράκτορες λογισμικού, οι οποίοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω ενός οργανωμένου συστήματος πολλαπλών πρακτόρων, ενσωματώνοντας τις λειτουργίες των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων. Σύμφωνα με την ανάλυση και το σχεδιασμό προκύπτουν δύο βασικοί τύποι πρακτόρων λογισμικού. Ο τύπος «Υποσταθμός» αναλαμβάνει κατά βάση την επιλογή και την κοινοποίηση των βέλτιστων βαρών για τους αλγόριθμους ομότιμων κόμβων. Ο τύπος «Κόμβος» συμμετέχει ως ομότιμος κόμβος σε οποιονδήποτε αλγόριθμο ομότιμων κόμβων απαιτηθεί ανάλογα με τη λογική ελέγχου που επιλέγεται ανά πάσα στιγμή. Η εφαρμογή σε ένα πραγματικό δίκτυο 6 κόμβων εκτός από τα αναμενόμενα αποτελέσματα στη διαχείριση της συμφόρησης, κατέδειξε και την πρακτική δυσκολία εφαρμογής όταν υπάρχει καθυστέρηση ή μη διαθεσιμότητα στην απόκριση κάποιου από τους ομότιμους κόμβους. Συνεπώς πριν την επέκταση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων και την εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες, απαιτείται η προσομοίωση του τηλεπικοινωνιακού φόρτου που επιφέρουν οι ίδιοι οι αλγόριθμοι καθώς και της επίπτωσης της αξιοπιστίας των τηλεπικοινωνιακών μέσων στην ταχύτητα σύγκλισής τους.

7

Έξυπνοι μετρητές ως δομικό στοιχείο αλγορίθμων ομότιμων κόμβων

7.1. Οι έξυπνοι μετρητές ως βασικό στοιχείο των κατανεμημένων εφαρμογών σε δίκτυα διανομής

Η διαφαινόμενη ευρεία διάδοση των έξυπνων μετρητών ηλεκτρικής ενέργειας μας επιτρέπει να υλοποιήσουμε μια πληθώρα «έξυπνων» εφαρμογών, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για εγκατάσταση επιπλέον εξοπλισμού στο δίκτυο. Αυτό καθίσταται δυνατό λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που διαθέτουν ήδη οι ηλεκτρονικοί μετρητές σήμερα, τα οποία εξασφαλίζουν ότι οι έξυπνοι μετρητές στο μέλλον θα επιτρέπουν απευθείας υλοποίηση αλγορίθμων διαχείρισης. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν τη δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων (μετρήσεων και άλλων πληροφοριών), πραγματοποίησης υπολογισμών απλών συναρτήσεων και αμφίδρομης επικοινωνίας.

Ωστόσο σύμφωνα με την υφιστάμενη κατάσταση στα δίκτυα διανομής δεν υπάρχουν θεσμοθετημένες λογικές ελέγχου και διαχείρισης των στοιχείων του δικτύου διανομής, ειδικά σε επίπεδο κόμβου. Είναι σαφές ότι η αδυναμία αυτή εκτός από την έλλειψη κατάλληλου θεσμικού πλαισίου, πηγάζει σε μεγάλο βαθμό από το γεγονός ότι οποιουδήποτε είδους διαχείριση προϋποθέτει την ύπαρξη δεδομένων σχετικά με την κατάσταση του δικτύου, σε επίπεδο κόμβου. Επιπλέον προϋποθέσεις προς αυτή την κατεύθυνση αποτελούν η ανταλλαγή πληροφοριών αλλά και η δυνατότητα άμεσης ή έμμεσης παρέμβασης στις ελεγχόμενες συσκευές και στοιχεία του δικτύου. Προφανώς οι έξυπνοι μετρητές είναι σε θέση να εκπληρώσουν τις περισσότερες από τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν μέσω των χαρακτηριστικών που διαθέτουν. Παρόλα αυτά ο πρωταρχικός

σκοπός των έξυπνων μετρητών είναι η μέτρηση ηλεκτρικών μεγεθών και η αποστολή τους σε κάποιο κεντρικό σημείο συλλογής μετρήσεων. Συνεπώς είτε θα απαιτηθεί η εγκατάσταση πρόσθετων συσκευών (τύπου ελεγκτή φορτίων/παραγωγής), είτε θα υιοθετηθεί μία πιο ευρεία εικόνα για το πεδίο εφαρμογών τους, πέραν της μέτρησης. Ουσιαστικά στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιείται μία διερεύνηση των υφιστάμενων τεχνολογιών ηλεκτρονικών μετρητών, όσον αφορά την κωδικοποίηση των δεδομένων στο εσωτερικό τους αλλά και των δυνατοτήτων επικοινωνίας τους, και στη συνέχεια προτείνονται επεκτάσεις/τροποποιήσεις προς την κατεύθυνση συμπερίληψης των επιθυμητών χαρακτηριστικών, που θα πρέπει να διαθέτουν οι έξυπνοι πλέον μετρητές ώστε να μην απαιτηθεί η εγκατάσταση πρόσθετων συσκευών στο μέλλον. Επισημαίνεται ότι πρόκειται για παραμετροποίηση λογισμικού και όχι για τροποποιήσεις υλικού.

Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί ότι αν επιτελούνταν σε κεντρικό επίπεδο, οι προτεινόμενες εφαρμογές διαχείρισης του δικτύου διανομής θα απαιτούσαν πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων και ενδέχεται να προκαλούσαν υπερφόρτωση των υφιστάμενων τηλεπικοινωνιακών υποδομών, οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για λόγους καταγραφής μετρήσεων.

7.2. Τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών για τις εφαρμογές διαχείρισης των δικτύων διανομής

Ένα δίκτυο αισθητήρων (απαρτιζόμενο συνήθως από φθηνές και όχι και τόσο αξιόπιστες συσκευές), συνήθως χρησιμοποιείται για λόγους μέτρησης ή εποπτείας συγκεκριμένων συμβάντων και μεγεθών. Τέτοια παραδείγματα συσκευών, πέρα από τους ηλεκτρονικούς μετρητές του δικτύου διανομής, αποτελούν οι αισθητήρες ανίχνευσης καπνού σε κτίρια και οι αισθητήρες θερμοκρασίας σε διάφορους τοπικούς μετεωρολογικούς σταθμούς. Στα δίκτυα διανομής άλλες συσκευές τέτοιου τύπου αποτελούν τα διάφορα καταγραφικά ηλεκτρικών μεγεθών, οι συσκευές μέτρησης στις αναχωρήσεις των Υ/Σ, και ασφαλώς οι ηλεκτρονικοί μετρητές.

Η ιδιότητα των δικτύων αισθητήρων να αποτελούν μία οικονομική επιλογή εποπτείας και μάλιστα να θεωρούνται υποδομή, τους καθιστά μία πολύ καλή επιλογή για χρήση ως υπόβαθρο στην ανάπτυξη αποκεντρωμένων αλγορίθμων, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια, παρόλο που ο πρωταρχικός στόχος των συστημάτων αυτών είναι η συλλογή συγκεκριμένων μεγεθών και όχι κατ' ανάγκη η επεξεργασία ή η μετάδοση αυτών των μετρούμενων μεγεθών. Κατ' αυτή την έννοια ενδέχεται να απαιτείται κάποιου είδους παραμετροποίηση της τηλεπικοινωνιακής διαμόρφωσης για τις ανάγκες των προτεινόμενων εφαρμογών.

Τα ομότιμα δίκτυα αισθητήρων δημιουργούνται καθορίζοντας τηλεπικοινωνιακούς δρόμους μεταξύ συσκευών διαφόρων τύπων σαν αυτές που αναφέρθηκαν ήδη, χρησιμοποιώντας κατά το δυνατό τις υφιστάμενες υποδομές δικτύων. Οι ομότιμοι κόμβοι (peers) ή γείτονες συνήθως διαθέτουν ήδη κάποιου είδους τηλεπικοινωνιακή σύνδεση, οπότε σίγουρα υπάρχει ένα πλεονέκτημα στην αποτελεσματικότητα της χρήσης των υφιστάμενων υποδομών έναντι του σχεδιασμού και της εγκατάστασης εξ ολοκλήρου νέων υποδομών. Ωστόσο η αξιοποίηση των τηλεπικοινωνιακών υποδομών προϋποθέτει την αξιολόγησή τους με όρους αξιοπιστίας και καθυστερήσεων.

Στους ηλεκτρονικούς μετρητές το πρότυπο DLMS/COSEM περιγράφει την υλοποίηση του επιπέδου εφαρμογών χωρίς να περιορίζει την επιλογή του φυσικού μέσου μετάδοσης. Στην περίπτωση των έξυπνων δικτύων οι επιλογές τηλεπικοινωνιακών μέσων συνοψίζονται στις

εξής: Power Line Communication (PLC), Radio Frequency (RF) (όπως ZigBee), 4G (συμπεριλαμβανομένου του WiMAX και του LTE – for Long Term Evolution).

7.2.1. Πρότυπα, πρωτόκολλα και τεχνολογίες επικοινωνιών

Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιείται μία απλή αναφορά στα σχετικά πρότυπα, τα οποία είναι σε ισχύ αυτή τη στιγμή και συμβάλλουν στην ομοιογένεια των διαφόρων τεχνολογικών λύσεων, κυρίως σε επίπεδο τηλεπικοινωνιών και μοντελοποίησης δεδομένων στα δίκτυα διανομής. Το Common Information Model (CIM) περιγράφεται από δύο πρότυπα IEC, τα 61970-301 και 61968-11 σε συνδυασμό, και χρησιμοποιείται για αναπαράσταση διαφόρων στοιχείων εξοπλισμού του δικτύου και των μεταξύ τους διασυνδέσεων και συσχετισμών, με βάση μία ιεραρχική δομή και Object-oriented σημειολογία. Το πρότυπο IEC61850 χρησιμοποιείται κυρίως για τους αυτοματισμούς σε επίπεδο υποσταθμού και εξασφαλίζει μία ομοιογένεια μεταξύ των διάφορων συσκευών Intelligent Electronic Devices (IEDs) του συστήματος εποπτείας, μοντελοποιώντας τον εξοπλισμό του υποσταθμού και των λειτουργιών του. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για εναρμόνιση και σύμπτυξη του 61850 με το CIM.

Το DLMS/COSEM αποτελεί ένα ανοιχτό πρότυπο βασισμένο στα IEC62056 και EN13757-1 για την κωδικοποίηση και τη μετάδοση δεδομένων στους ηλεκτρονικούς μετρητές, όπως περιγράφεται στην ενότητα 7.3.

Οι τεχνολογίες επικοινωνιών σε γενικές γραμμές χωρίζονται σε ενσύρματες και ασύρματες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι οπτικές ίνες και οι γραμμές Digital Subscriber Lines (DSLs), οι οποίες παρέχουν ένα μεγάλο εύρος ζώνης και αξιοπιστία, αλλά απαιτούν υψηλά κόστη εγκατάστασης, ιδιαίτερα εάν αφορούν εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Στις ενσύρματες τεχνολογίες ανήκει επίσης η τεχνολογία Power Line Carrier (PLC) για μετάδοση δεδομένων με χρήση των γραμμών μέσης και χαμηλής τάσης. Προφανώς πρόκειται για μία αρκετά οικονομική λύση για τους διαχειριστές των δικτύων αυτών, ωστόσο θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφορα θέματα περιορισμένης ταχύτητας και αξιοπιστίας. Οι ασύρματες τεχνολογίες επικοινωνιών μπορούν σε πολλές περιπτώσεις να αποδειχθούν επίσης οικονομικές λύσεις, αν και ενυπάρχουν ζητήματα παρεμβολών και ασφάλειας κατά τη μετάδοση.

Ακολουθεί μία εποπτική παρουσίαση των τηλεπικοινωνιακών μέσων.

7.2.1.1. Power Line Carrier (PLC)

Πρόκειται για μία ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία επικοινωνιών στα ηλεκτρικά δίκτυα, καθώς χρησιμοποιεί ως φορέα μετάδοσης δεδομένων τον ίδιο τον αγωγό που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της τεχνολογίας PLC είναι η επιλογή συχνότητας για το φερέσυχο σήμα, η ταχύτητα μετάδοσης, το επίπεδο τάσης των γραμμών, η απόσταση μεταξύ των σημείων που πρόκειται να επικοινωνήσουν και η ύπαρξη μετασχηματιστών στη διαδρομή. Συνήθως οι μετασχηματιστές παρεμποδίζουν και ανακόπτουν τη μετάδοση του σήματος, και συνεπώς σε αυτή την περίπτωση απαιτείται ο συνδυασμός με κάποια άλλη τεχνολογία επικοινωνιών για να ξεπεραστεί το εμπόδιο και να έχουμε μεγαλύτερο εύρος στη μετάδοση. Επιπλέον η τεχνολογία PLC συχνά αντιμετωπίζει προβλήματα όπως οι παρεμβολές από ηλεκτρικές συσκευές. Προφανώς η επιλογή του PLC δεν είναι η καλύτερη δυνατή από άποψη ταχύτητας μετάδοσης και αποστάσεων, αλλά όπως θα εξηγήσουμε στη συνέχεια είναι μια πολύ καλή επιλογή εφόσον παραμένουμε στο ίδιο επίπεδο

τάσης και τα δεδομένα που μεταδίδονται είναι πακέτα μικρού όγκου. Αξίζει να αναφερθεί βέβαια ότι οι τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις επιτρέπουν ταχύτητες μετάδοσης μέχρι 45 Mbps.

7.2.1.2. Ραδιοκύματα μικρής εμβέλειας (Short Range Radio Frequency)

Η τεχνολογία RF περιγράφει μία γκάμα συχνοτήτων μετάδοσης ραδιοκυμάτων μεταξύ 3 kHz και 300 GHz. Ως εξοπλισμό για τη λήψη τους τα ραδιοκύματα απαιτούν μία κατάλληλη κεραία και έναν δέκτη συντονισμένο στην κατάλληλη συχνότητα. Τα RF μπορούν να συνδυαστούν με τον εξοπλισμό των έξυπνων μετρητών και περιλαμβάνουν κατηγορίες τεχνολογιών όπως το Bluetooth και το Zigbee. Τα RF αποτελούν μία τεχνολογία ιδανική για τη δημιουργία δικτύων ομότιμων κόμβων, με μικρή σχετικά εμβέλεια.

7.2.1.3. Ασύρματες τεχνολογίες

Η ανάπτυξη ασύρματων τεχνολογιών επικοινωνιών με μεγάλο εύρος ζώνης και αξιοπιστία, έχει οδηγήσει σε εξελιγμένες ασύρματες τεχνολογίες όπως το Long Term Evolution (LTE), το High Speed Packet Access (HSPA) και το IEEE 802.16, γνωστό με το όνομα Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX).

Το WiMAX σε πρώτη φάση υποστήριζε μόνο σταθερού τύπου ασύρματη επικοινωνία, με την έννοια ότι υποστήριζε line-of-sight. Ωστόσο πλέον μέσω του IEEE802.16a καλύπτει γενικότερα την περίπτωση όπου ένας σταθμός βάσης εκπέμπει σε μία εμβέλεια της τάξης των 10 km. Επίσης οι σταθμοί βάσης μπορούν να διασυνδεθούν μεταξύ τους με χρήση μικροκυμάτων ή άλλων τεχνολογιών, έτσι ώστε να επιτευχθούν μεγαλύτερες αποστάσεις.

7.3. Το πρότυπο DLMS/COSEM

Το DLMS/COSEM αποτελεί ένα ανοιχτό πρότυπο βασισμένο στα IEC62056 και EN13757-1, το οποίο καλύπτει την κωδικοποίηση και τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ μετρητών ενέργειας οποιουδήποτε είδους (δεν αφορά μόνο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας). Η αφητηρία καθιέρωσής του βρίσκεται στις αρχές του 2000 με βασικό γνώμονα τη δημιουργία ενός υπόβαθρου για ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ μετρητών ασχέτως επικοινωνιακού μέσου μετάδοσης των δεδομένων αυτών.

Ο στόχος αυτός αντικατοπτρίζεται στην προσέγγιση 3 επιπέδων του, οι συνιστώσες των οποίων θα αναλυθούν στη συνέχεια:

- Πρώτο επίπεδο (**Μοντελοποίηση δεδομένων εφαρμογής- Application data model**): Περιλαμβάνει το αντικείμενο COSEM και το σύστημα ταυτοποίησης αντικειμένων OBIS.
- Δεύτερο επίπεδο (**Δημιουργία μηνυμάτων - Messaging**): Αφορά τις υπηρεσίες επικοινωνιών του μετρητή και τα πρωτόκολλα για τη μετατροπή των στοιχείων του πρώτου επιπέδου (εφαρμογής) σε κατάλληλα δεδομένα για μετάδοση (application protocol data units (APDU)). Αυτές οι υπηρεσίες καλύπτονται από το επίπεδο εφαρμογών του COSEM.
- Τρίτο επίπεδο (**Μετάδοση δεδομένων – Transporting**): Αποτελείται από ποικιλία υποστηριζόμενων προφίλ επικοινωνίας μέσω διαφόρων επικοινωνιακών μέσων και προτύπων.

7.3.1. Το πλαίσιο επικοινωνίας COSEM

Τα αρχικά COSEM προέκυψαν από τους όρους Companion Specification for Energy Metering. Η επικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ των μετρητών ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του

COSEM βασίζεται στη λογική πελάτη/εξυπηρετητή (client/server). Το κέντρο συλλογής δεδομένων παίζει το ρόλο του client ζητώντας τις υπηρεσίες από το μετρητή, ο οποίος παίζει το ρόλο του server. Είναι εμφανές ότι οι εφαρμογές client και server βρίσκονται σε απομακρυσμένες μεταξύ τους συσκευές και συνεπώς η ανταλλαγή των μηνυμάτων πραγματοποιείται μέσω ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας.

7.3.2. Η μοντελοποίηση δεδομένων μέσω του COSEM

Η αναπαράσταση των δεδομένων ακολουθεί την αντικειμενοστραφή λογική (object-oriented). Συγκεκριμένα το αντικείμενο μοντελοποίησης COSEM ορίζεται μέσω μίας βιβλιοθήκης κλάσεων (περίπου 100 έχουν οριστεί προς το παρόν). Κάθε κλάση διαθέτει ένα σύνολο από χαρακτηριστικά (attributes), μέσω των οποίων προσδιορίζεται επακριβώς το μοντέλο κάθε τύπου δεδομένων. Η πολυπλοκότητα των τύπων των δεδομένων που περιγράφονται μέσω των κλάσεων ποικίλει. Επιπλέον κάθε κλάση διαθέτει και ένα σύνολο μεθόδων (methods), οι οποίες ορίζουν τις επιτρεπτές λειτουργίες (π.χ. πράξεις) επί των χαρακτηριστικών (attributes) [2]. Κάθε χαρακτηριστικό έχει μία πολύ συγκεκριμένη και προκαθορισμένη φυσική ή λογική σημασία, μπορεί να είναι στατικό και να αφορά κάποια παράμετρο ρύθμισης του μετρητή, ή μεταβαλλόμενο κατά τη διαδικασία μέτρησης. Επίσης τα χαρακτηριστικά μπορεί να διαβάζονται ή να εγγράφονται μέσω των μεθόδων, οι οποίες εκκινούν απομακρυσμένα μέσω των διεπαφών επικοινωνίας ή τοπικά από τον ίδιο τον μετρητή μέσω της διεργασίας εφαρμογής Application Process (AP).

Παραδείγματα δεδομένων που μπορούν να μοντελοποιηθούν μέσω των κλάσεων του COSEM αποτελούν η ζήτηση ενέργειας και ισχύος ηλεκτρισμού, μετρήσεις στιγμιαίες ή σε ολοκλήρωση, μετρήσεις ποιότητας ισχύος, προφίλ ζήτησης και διαχείρισης φορτίων. Η μοντελοποίηση δεν αφορά μόνο δεδομένα από μετρούμενα μεγέθη αλλά δεδομένα που έχουν να κάνουν με διαμόρφωση των τηλεπικοινωνιακών μέσων, πληροφορίες του καταναλωτή, πληροφορίες διαχείρισης συμβάντων και παραβίασης ορίων.

Κλείνοντας την ενότητα της παρουσίας της μοντελοποίησης δεδομένων μέσω κλάσεων του COSEM, αξίζει μία ειδική αναφορά σε δύο πολύ σημαντικές κλάσεις του COSEM στα πλαίσια των εφαρμογών κατανεμημένων αλγορίθμων που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία. Η κλάση “Application” ελέγχει το βαθμό πρόσβασης/ελέγχου επί της ίδιας της συσκευής του μετρητή ανάλογα με το χρήστη. Επίσης η κλάση “Profile generic” επιτρέπει τη «συμπύεση» οποιουδήποτε συνόλου δεδομένων σε ένα μοναδικό αντικείμενο, το οποίο μάλιστα περιγράφει το ίδιο το περιεχόμενό του, και τελικά η ανάκτηση του περιεχομένου της πληροφορίας είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί μέσω μίας και μοναδικής εντολής.

7.3.3. Το σύστημα ταυτοποίησης αντικειμένων OBIS

Το OBIS (OBject Identification System) είναι ένας τρόπος ονοματολογίας με αρχικό στόχο να αποτελέσει μία κοινή βάση για την απεικόνιση των μετρητικών δεδομένων στην οθόνη του μετρητή, αλλά τελικά εδραιώθηκε ως τρόπος ονοματολογίας των δεδομένων που αποθηκεύονται στο εσωτερικό του. Η διάρθρωση του OBIS είναι ιεραρχική και περιλαμβάνει ένα σύνολο από έξι διαφορετικά πεδία. Τα πεδία συμβολίζονται με λατινικούς χαρακτήρες από το A έως το F, με το A να έχει την πρώτη θέση στην ιεραρχία. Συνήθως χρησιμοποιούνται τελείες μεταξύ των τιμών των έξι πεδίων.

Ακολουθεί η επεξήγηση του είδους της ταυτοποίησης που παρέχει καθένα από τα πεδία:

- Πεδίο A: προσδιορίζει το είδος της ενέργειας που μετράται. Για παράδειγμα η τιμή 1 στο πεδίο αυτό σημαίνει ηλεκτρική ενέργεια. Σημειώνεται ότι η τιμή 0 σε αυτό το πεδίο προσδιορίζει αφηρημένους τύπους δεδομένων που δε σχετίζονται με κάποιο είδος ενέργειας, αλλά ενδεχομένως με την ίδια τη συσκευή του μετρητή
- Πεδίο B: προσδιορίζει μία κατηγορία των ποσοτήτων, με συνηθισμένη κατηγοριοποίηση εκείνη του καναλιού μέτρησης
- Πεδίο C: κατηγοριοποιεί περαιτέρω τα μεγέθη, για παράδειγμα μας δίνει ταυτοποίηση εάν πρόκειται για τάση, ενεργό ή άεργο ισχύ, πίεση, όγκο ή άλλου τύπου πιο αφηρημένα αντικείμενα
- Πεδίο D: προσφέρει ακόμη περισσότερη εξειδίκευση κατηγοριοποίησης, για παράδειγμα εάν πρόκειται για μέσο όρο, ολοκλήρωμα ή απλώς για καταγεγραμμένη τιμή ενός μεγέθους
- Πεδίο E: προσδίδεται επιπλέον κατηγοριοποίηση εάν απαιτείται, όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις μεταβλητών ταριφών αγοράς ενέργειας
- Πεδίο F: προσδίδεται επιπλέον κατηγοριοποίηση εάν απαιτείται, όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις χρονοσειρών και ιστορικών τιμών δεδομένων

Το συνηθισμένο εύρος τιμών των πεδίων είναι [0,255], αλλά σε κάποια από τα πεδία υπάρχουν περιορισμοί του εύρους τιμών είτε από τους κατασκευαστές των μετρητών, είτε από τους φορείς που τους εγκαθιστούν στο δίκτυό τους. Προκειμένου να υπάρχει ομοιομορφία στη σημασία των κωδικών OBIS, διατίθενται από την DLMS User Association (UA) πίνακες με τους ορισμούς των OBIS codes, στους οποίους αναφέρονται εκτενώς οι σημασίες των επιτρεπτών συνδυασμών στις τιμές των έξι πεδίων. Παράλληλα γίνεται αναφορά στις εκάστοτε εφαρμοζόμενες κλάσεις και τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με καθέναν από αυτούς του συνδυασμούς δεδομένων-κλάσεων [3].

7.3.4. Μετάδοση δεδομένων – Επικοινωνία

Όπως αναφέρθηκε ήδη η μετάδοση δεδομένων του μετρητή καθίσταται εφικτή μέσω της μετατροπής τους σε κατάλληλη μορφή έτσι ώστε να μπορούν να μεταφερθούν μέσω των καναλιών επικοινωνίας. Το πρωτόκολλο DLMS/COSEM υποστηρίζει αποκλειστικά τη μετατροπή σε μορφή DLMS, ωστόσο είναι πιθανό να επεκταθεί συμπεριλαμβάνοντας και άλλου τύπου μορφές, όπως για παράδειγμα XML.

Το DLMS καθορίζει τις υπηρεσίες και τα πρωτόκολλα που απαιτούνται ώστε τα μηνύματα να έχουν την κατάλληλη μορφή και να περιέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες, πριν μεταδοθούν μέσω κάποιου συγκεκριμένου επικοινωνιακού μέσου. Το πρότυπο DLMS περιγράφεται από το IEC 61334-4-41, που είναι μέρος του στάνταρ για εφαρμογές αυτοματοποίησης και εποπτείας δικτύων διανομής χρησιμοποιώντας τα ίδια τα δίκτυα ως επικοινωνιακό μέσο, δηλαδή κάνοντας χρήση power line communication χαμηλού εύρους ζώνης. Το DLMS/COSEM ωστόσο αποτελεί υποσύνολο του DLMS και παρέχει απλώς κάποιες αναγκαίες επεκτάσεις στο COSEM. Προφανώς ο αρχικός ορισμός του DLMS μέσω του IEC 61334-4-41 δεν περιέχει την απαραίτητη κωδικοποίηση αντικειμένων, ούτε τη μοντελοποίηση των δεδομένων σε άλλα επικοινωνιακά μέσα εκτός του PLC και γι' αυτό το DLMS/COSEM θεωρείται κατά μία έννοια ανεξάρτητο πρωτόκολλο.

7.3.5. Προφίλ επικοινωνιών ανάλογα με το μέσο

Το DLMS/COSEM υποστηρίζει μία ποικιλία από προφίλ επικοινωνιών, τα οποία ορίζονται ως στρώματα επιπέδων αντίστοιχα με το OSI layers. Κάποιες συσκευές μετρητών ενδέχεται να υποστηρίζουν περισσότερα από ένα επικοινωνιακά μέσα (για παράδειγμα Ethernet και GSM). Τα μέσα που υποστηρίζονται αυτή τη στιγμή είναι:

- το πρωτόκολλο 3 επιπέδων HDLC (ISO/IEC 13239). Περιλαμβάνει μετάδοση δεδομένων μέσω των τοπικών θυρών επικοινωνίας του μετρητή (οπτική θύρα, RS232) και μέσω PSTN και GSM.
- Το προφίλ TCP/IP για μετάδοση δεδομένων μέσω GPRS και internet γενικότερα
- Το S-FSK PLC (IEC 61334-5-1)
- Το M-Bus (EN 13757)

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική επικοινωνία με έναν φυσικό μετρητή τοπικά μέσω της σειριακής θύρας, δηλαδή μέσω του πρωτοκόλλου HDLC και με εικονικούς μετρητές μέσω του προφίλ TCP/IP, με στόχο τον προσδιορισμό του όγκου των δεδομένων που απαιτούνται για εφαρμογές εγγραφής και ανάγνωσης δεδομένων.

7.4. Εξομοιωτές έξυπνων μετρητών μέσω λογισμικό ανοιχτού κώδικα

Θεωρούμε ότι στο μέλλον ένας έξυπνος μετρητής θα μπορεί να εμπεριέχει έναν ευφυή πράκτορα λογισμικού κατά την έννοια του Κεφαλαίου 6, έτσι ώστε να είναι σε θέση να αναλάβει ενεργό ρόλο και να δράσει ανάλογα με τις μεταβολές στην κατάσταση του δικτύου διανομής. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής υποθέτουμε ότι η φύση των προβλημάτων στα όποια θα κληθεί να συμμετάσχει θα είναι τύπου steady state. Εξάλλου ούτε η υπολογιστική ισχύς του μετρητή αλλά ούτε και οι υπό έλεγχο συσκευές θα μπορούσαν να συμμετέχουν αποτελεσματικά στην αντιμετώπιση δυναμικών διακυμάνσεων. Υποθέτουμε λοιπόν ότι σε κάθε κόμβο του δικτύου διανομής αντιστοιχεί ένας έξυπνος μετρητής με επαυξημένες δυνατότητες. Εκτός από τη χρήση της εγγενούς δυνατότητας μέτρησης και καταγραφής ηλεκτρικών δεδομένων, η οποία μας επιτρέπει κατά κάποιον τρόπο την εκτίμηση της κατάστασης του δικτύου, υποθέτουμε επιπλέον ότι κάθε μετρητής είναι σε θέση να γνωρίζει τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες ελέγχου των συσκευών που είναι συνδεδεμένες στους ελεγχόμενους ηλεκτρονόμους στην έξοδό του του καθώς και προφίλ/συναρτήσεις χρησιμότητας των καταναλωτών/παραγωγών σχετικά με τη χρήση και την ευελιξία διαχείρισης των συσκευών αυτών.

Συγκεκριμένα οι μετρητές ως συσκευές υποθέτουμε ότι μελλοντικά θα διαθέτουν:

- Υπολογιστική ισχύ για μικρούς υπολογισμούς ή και τη δυνατότητα να φιλοξενήσουν τους Πράκτορες λογισμικού αυτούσιους (java instances)
- Τηλεπικοινωνιακή διασύνδεση με κάποιο κεντρικό σημείο και μεταξύ τους (peer-to-peer)
- Ελεγχόμενους ηλεκτρονόμους εξόδου για υλοποίηση των εντολών ελέγχου/διαχείρισης, αλλά και τη δυνατότητα αναπαράστασης των απαιτούμενων δεδομένων στα πλαίσια της εποπτείας του αποτελέσματος διαχείρισης

7.5. Αξιολόγηση της τρέχουσας κατάστασης ηλεκτρονικών μετρητών προς την επιθυμητή μετάβαση στους έξυπνους

Όπως παρουσιάστηκε ήδη, αρκετοί από τους σύγχρονους ηλεκτρονικούς μετρητές έχουν σχεδιαστεί και λειτουργούν με βάση το πρότυπο DLMS/COSEM. Ακολουθεί μία περαιτέρω διερεύνηση των δυνατοτήτων τους όπως προκύπτουν από τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου προτύπου αλλά και ως συσκευές γενικότερα.

7.5.1. Υπολογιστική ισχύς και χώρος αποθήκευσης

Παρόλο που κάθε κατασκευαστής μετρητή ακολουθεί τη δική του λογική, μπορούμε να εξάγουμε κάποια γενικά συμπεράσματα σχετικά με την υπολογιστική ισχύ τους. Καταρχήν εξ' ορισμού ένας ηλεκτρονικός μετρητής περιλαμβάνει έναν μικροεπεξεργαστή, ο οποίος αποτελεί ουσιαστικά την καρδιά της συσκευής και αναλαμβάνει την επεξεργασία και αποθήκευση των μετρούμενων δεδομένων, τον προσδιορισμό συμβάντων και την καταγραφή τους καθώς επίσης και τη διαχείριση κάποιας οθόνης αλλά και της μονάδας επικοινωνιών. Οι μετρητές εφόσον είναι συμβατοί με το DLMS/COSEM θεωρούμε δεδομένο ότι αναλαμβάνουν την ολοκλήρωση (integration) μεγεθών από στιγμιαίες καταγραφές (π.χ. ενέργεια από ισχύ), την διατήρηση χρονικών σειρών από μεγέθη (προφίλ ζήτησης) και τον έλεγχο και λήψη απόφασης ανάλογα με εσωτερικά αποθηκευμένες τιμές (υπολογισμός χρεώσεων ανάλογα με ταρίφες). Κατ' αυτή την έννοια αν επιστρέψουμε στη λογική των κατανεμημένων αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι μικροεπεξεργαστές των ηλεκτρονικών μετρητών θα μπορούσαν να υποστηρίξουν τη βασική γραμμική σχέση ανανέωσης των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, αλλά και τον υπολογισμό των συναρτήσεων χρησιμότητας, χωρίς να υπάρχει ανάγκη αναβάθμισης του υλικού τους.

Επιπλέον σχετικά με το χώρο και τις δυνατότητες αποθήκευσης, εφόσον προβλέπεται αυτή τη στιγμή η δυνατότητα για χρονική παρακολούθηση και καταγραφή μεγεθών αλλά και για διαφορετικά προφίλ χρέωσης ζήτησης, μπορούμε με ασφάλεια να υποθέσουμε ότι η αποθήκευση της πληροφορίας των βέλτιστων βαρών για τον Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων, καθώς και των κατάλληλων στοιχείων του πίνακα Z είναι εφικτή.

7.5.2. Τηλεπικοινωνιακή σύνδεση

Από το ίδιο τον ορισμό και την περιγραφή του DLMS/COSEM είναι εμφανές ότι η επικοινωνία του μετρητή με το περιβάλλον του είναι μία βασική ιδιότητά του. Όλοι οι ηλεκτρονικοί μετρητές διαθέτουν δυνατότητα εγγραφής/ανάγνωσης δεδομένων και αποστολής/λήψης τους. Βέβαια όπως έχει ήδη περιγραφεί το COSEM βασίζεται στη λογική client/server και κατ' αυτή την έννοια ο μετρητής αποστέλλει δεδομένα μόνο μετά από απαίτηση του client, ή αλλιώς αφού ερωτηθεί. Ομοίως για να λάβει πακέτα δεδομένων απαιτείται η προηγούμενη ειδοποίηση του και η παραχώρηση άδειας εκ μέρους του.

7.5.3. Ελεγχόμενοι ηλεκτρονόμοι εξόδου

Η τρέχουσα έκδοση του DLMS/COSEM αλλά και τα εμπορικά διαθέσιμα μοντέλα μετρητών διαθέτουν έναν ενσωματωμένο ελεγχόμενο ηλεκτρονόμο, ο οποίος θέτει ολόκληρη την τροφοδότηση του μετρούμενου καταναλωτή εκτός λειτουργίας και υποστηρίζουν τον έλεγχο προαιρετικών εξωτερικών ελεγχόμενων ηλεκτρονόμων, μέσω των

οποίων προβλέπεται έλεγχος μέρους των καταναλώσεων. Οι έλεγχοι αυτοί πραγματοποιούνται είτε μετά από τοπική απόφαση του μετρητή είτε μετά από υποδοχή κατάλληλου απομακρυσμένου αιτήματος μέσω της τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης. Παρόλο που η τρέχουσα εκδοχή χρησιμοποίησης της συγκεκριμένης δυνατότητας σχετίζεται με διακοπή ολόκληρης της ηλεκτροδότησης κυρίως για μη τεχνικούς λόγους, με πρωτοβουλία του διαχειριστή, διαφαίνεται ότι η εν λόγω δυνατότητα αναδεικνύει την ικανότητα του μετρητή να υποστηρίξει την απαίτηση για υλοποίηση ελέγχου των ενεργειακών πόρων όπως τέθηκε από τους καταναλωμένους αλγορίθμους που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή. Αξίζει να αναφερθούν εδώ δύο συναρτήσεις (κλάσεις COSEM) που αναδεικνύουν ακόμη περισσότερο τις δυνατότητες προς αυτή την κατεύθυνση. Πρόκειται για τη συνάρτηση “remote control command” και “contractual power exceeded”. Με την πρώτη ο μετρητής υποδέχεται ένα μήνυμα και στη συνέχεια αλλάζει κατάσταση στον εσωτερικά διαθέσιμο ηλεκτρονόμο του, ώστε να μην υπάρχει πλέον τροφοδότηση της εγκατάστασης του καταναλωτή. Με τη δεύτερη συνάρτηση, υλοποιείται μία αρκετά πιο πολύπλοκη διαδικασία, η οποία προϋποθέτει την παροχή μίας προσυμφωνημένης ποσότητας ενέργειας για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Εάν υπάρχει υπέρβαση αυτού του ορίου και πάλι ο μετρητής αναλαμβάνει να ενεργοποιήσει του εσωτερικού ηλεκτρονόμου, ωστόσο με δική του τοπική πρωτοβουλία και λήψη απόφασης.

Στα πλαίσια της διερεύνησης των δυνατοτήτων εφαρμογής των καταναλωμένων αλγορίθμων θεωρώντας τους μετρητές να αναλαμβάνουν τους ρόλους του πράκτορα τύπου «κόμβος» (όπως αυτός εισήχθη στο Κεφάλαιο 6 κατά τη σχεδίαση του MAS), πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με τη βοήθεια ενός πραγματικού (εμπορικά διαθέσιμου) μετρητή, και κάποιων instances εικονικών μετρητών.

7.6. Λογισμικό ανοιχτού κώδικα για δημιουργία πελάτη

Το λογισμικό ανοιχτού κώδικα της GURUX [64] διατίθεται δωρεάν για χρήση όλων των κλάσεων COSEM, των προφίλ επικοινωνίας DLMS/COSEM και την ονοματολογία κατά OBIS. Βασικός στόχος του είναι η δημιουργία μίας υποδομής συμβατών βιβλιοθηκών με το πρότυπο DLMS/COSEM, ώστε να είναι εφικτός ο έλεγχος της συμβατότητας των εμπορικά διαθέσιμων μετρητών αλλά και η περαιτέρω ανάπτυξη εφαρμογών στο πλαίσιο αυτό. Όπως αναφέρθηκε ήδη η επικοινωνία των μετρητών βασίζεται στη λογική server/client με το μετρητή να παίζει το ρόλο του client. Προκειμένου όμως να αναπτυχθούν εφαρμογές καταναλωμένων αλγορίθμων στα πλαίσια των ίδιων συσκευών, προτείνεται η ενσωμάτωση και μίας διεργασίας τύπου client σε κάθε μετρητή, η οποία θα επιτρέπει την έναρξη της επικοινωνίας με τους υπόλοιπους μετρητές, με τους οποίους γειτνιάζει, κατά την έννοια ενός δικτύου ομότιμων κόμβων. Προκειμένου να διερευνηθεί η προτεινόμενη ενσωμάτωση, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοιχτού κώδικα GURUX DLMS Director, ώστε να δημιουργηθεί επικοινωνία με μετρητές και να μελετηθούν οι απαιτήσεις.

7.6.1. Επικοινωνία με πραγματικό μετρητή μέσω DLMS/COSEM

Ένας τριφασικός μετρητής (τύπου ELGAMA GAMA300) συνθέθηκε μέσω RS485 στη σειριακή θύρα του υπολογιστή. Στην προσέγγιση client/server, το ρόλο του client έπαιξε ο υπολογιστής. Σε πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε διερευνητική σύνδεση με το μετρητή μέσω της εφαρμογής του κατασκευαστή, έτσι ώστε να καταγραφούν τα frames που ανταλλάσσονται κατά την επικοινωνία (επιλογές baud rate 9600, parity none, bit stop

one) και να προσδιοριστούν τα αντικείμενα που έχουν υλοποιηθεί στο συγκεκριμένο μετρητή (δέντρο objects με τους αντίστοιχους κωδικούς OBIS). Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η εφαρμογή της GURUXDLMSDirector για την επικοινωνία με το μετρητή. Ακολουθεί ένα απόσπασμα από τις διαδικασίες που πραγματοποιούνται για την αρχικοποίηση της ανάγνωσης δεδομένων:

```
2:29:24 μμ Initializing serial connection.
2:29:24 μμ Send SNRM request.
2:29:25 μμ Received data
2:29:25 μμ Parsing UA reply.
2:29:25 μμ Parsing UA reply succeeded.
2:29:25 μμ Send AARQ request
2:29:25 μμ Reading object System.Byte[] from interface None
2:29:25 μμ Received data
2:29:25 μμ Parsing AARE reply
2:29:25 μμ Parsing AARE reply succeeded.
2:29:30 μμ--- Collecting objects. ---
2:29:30 μμ Collecting objects
```

Τα frame που στέλνει η εφαρμογή προς το μετρητή για να πάρει αυτή την απάντηση είναι της μορφής 7EAO 0A 00 02 8CE1 23 93 D0 47 7E, με καθέναν από τους δεκαεξαδικούς αριθμούς να αποτελεί τη συγκεκριμένη κωδικοποίηση καθεμίας από της κλάσεις κατά COSEM μαζί με τα απαραίτητα attributes. Από την παραπάνω διερεύνηση καταγράφηκε ο όγκος των δεδομένων που απαιτούνται για την επικοινωνία και τις απλές διεργασίες της εγγραφής και ανάγνωσης, πληροφορία που αξιοποιήθηκε κατά τη φάση αποτίμησης της τηλεπικοινωνιακής καθυστέρησης των κατανεμημένων αλγορίθμων, ώστε να προσδιοριστεί το μέγεθος των δεδομένων.

Μελλοντικά θα μπορούσε να αξιοποιηθεί ένα Instance της εφαρμογής της GURUXDLMSDirector για να ζητάει δεδομένα από τους γειτονικούς μετρητές. Κοινώς προτείνεται η ενσωμάτωση ενός διπλού ρόλου σε κάθε μετρητή, client και server, έτσι ώστε κατά περίπτωση να μπορεί να συμμετέχει στον κατανεμημένο Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων.

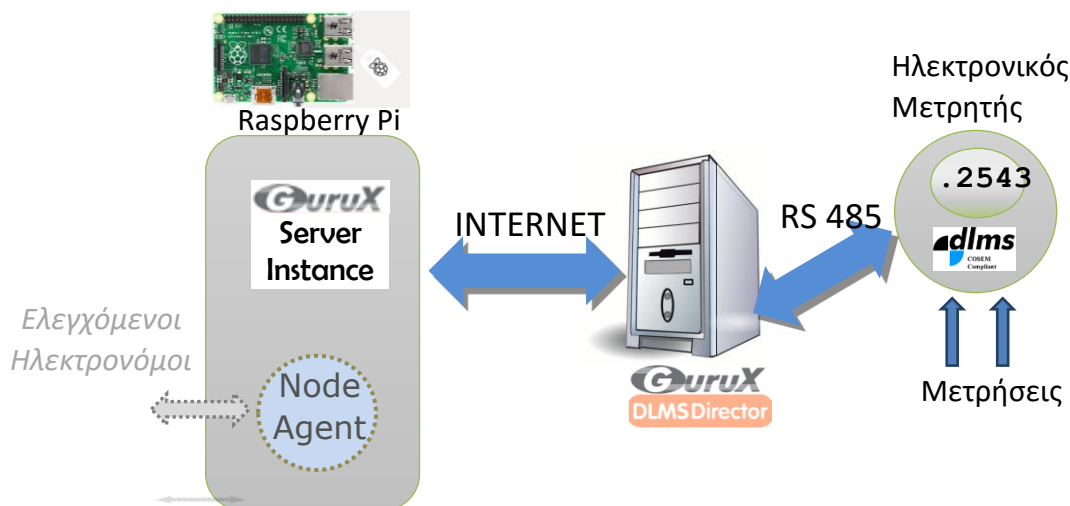
7.6.2. Λογισμικό ανοιχτού κώδικα για εικονικό μετρητή

Σε αυτό το σημείο επαναφέρουμε την πρόταση του Κεφαλαίου 6 για δημιουργία ενός πράκτορα λογισμικού τύπου wrapper ή transducer, ο οποίος να ενσωματώνει μέσα σε αντικείμενα COSEM τις λειτουργίες των πρακτόρων που απαιτούνται στα πλαίσια του Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανοιχτού κώδικα της GURUX ως πυρήνα, επεκτείνοντάς το με συναρτήσεις και κλάσεις που να σχετίζονται με τον Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων, είτε δημιουργώντας στην πλατφόρμα JADE έναν Πράκτορα λογισμικού με μία βασική συμπεριφορά τύπου ‘Cyclic Behaviour’, η οποία χρησιμοποιεί βιβλιοθήκες από τον κώδικα της GURUX για αναπαράσταση κατά COSEM.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής υλοποιήθηκε η ενσωμάτωση ενός τμήματος του λογισμικού ανοιχτού κώδικα σε ένα Java thread, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρθηκε σε ένα RaspberryPi. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε ένας απλός εικονικός μετρητής, ο

οποίος είναι σε θέση να επικοινωνεί και να ανταλλάσσει δεδομένα μέσω TCP/IP εφόσον του ζητηθεί από έναν client συμβατό με το DLMS/COSEM.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η λογική σύνδεση μεταξύ των επιμέρους τμημάτων λογισμικού και υλικού:



Σχήμα 7.1: Διάγραμμα διασύνδεσης εικονικού μετρητή

7.7. Απαιτήσεις επέκτασης προς την επιθυμητή μετάβαση στους έξυπνους μετρητές για καταναμημένες εφαρμογές

Προκειμένου να είναι εφικτό στο μέλλον να υποστηριχθούν καταναμημένοι αλγόριθμοι από τους έξυπνους μετρητές προτείνεται η επέκταση του προτύπου DLMS/COSEM σε τρία διαφορετικά επίπεδα με στόχο την ενσωμάτωση των απαιτήσεων, των λειτουργιών και των δυνατοτήτων, όπως αυτές περιγράφονται στο παρόν Κεφάλαιο. Συγκεκριμένα απαιτείται:

- Δημιουργία κλάσεων που να περιγράφουν την κατάλληλη συνάρτηση για την ανανέωση της πληροφορίας σε κάθε γύρο Αλγόριθμου Ομότιμων Κόμβων. Επίσης απαιτούνται κλάσεις για τον καθορισμό της λειτουργίας Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, με την έννοια ότι η τρέχουσα διαμόρφωση client/server με το μετρητή να παίζει το ρόλο του server δεν επαρκεί.

- Δημιουργία νέου προφίλ επικοινωνιών DLMS/COSEM, το οποίο να επιτρέπει την Peer-to-peer επικοινωνία μεταξύ γειτονικών μετρητών με ειδική εφαρμογή σε περιπτώσεις που το τηλεπικοινωνιακό μέσο είναι PLC ή ασύρματο δίκτυο τοπικής εμβέλειας (RF, WiMAX)

- Δημιουργία κωδικών OBIS για την ονοματολογία των νέων μεταβλητών και σταθερών που απαιτούνται για τον αλγόριθμο.

7.8. Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο έβδομο κεφάλαιο έπειτα από μία ανασκόπηση των προτύπων, που σχετίζονται με την κωδικοποίηση, την επεξεργασία και τη μετάδοση πληροφοριών από τους ηλεκτρονικούς μετρητές, παρουσιάζεται μία σειρά από παραδοχές και προτάσεις σχετικά με τη δυνατότητα ενσωμάτωσης των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων σε αυτούς. Συγκεκριμένα προτείνεται η χρήση των υπολογιστικών μεθόδων, των καταχωρητών και των διεργασιών αποθήκευσης και ανάκλησης πληροφοριών που διαθέτουν οι μετρητές, έτσι ώστε να

πραγματοποιούνται οι βασικές διεργασίες των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων. Τα συμπεράσματα από αυτή την ανάλυση δείχνουν ότι είναι απαραίτητη μία μικρή επέκταση του προτύπου DLMS/COSEM ώστε να κωδικοποιηθεί η κατάλληλη συνάρτηση για την ανανέωση της πληροφορίας σε κάθε γύρο αλγόριθμου ομότιμων κόμβων, να δημιουργηθεί ένα νέο προφίλ επικοινωνιών DLMS/COSEM, το οποίο να επιτρέπει την Peer-to-peer επικοινωνία μεταξύ γειτονικών μετρητών και να δοθούν νέοι κωδικοί OBIS για τις νέες μεταβλητές και σταθερές που απαιτούνται, όπως για παράδειγμα για τα βάρη και για τα βοηθητικά διανύσματα.

8

Ανακεφαλαίωση, συμπεράσματα, συμβολή και προοπτικές

8.1. Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

Την τελευταία δεκαετία και ειδικά με τη μεγάλη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες μπορούν να συνδεθούν και στο επίπεδο χαμηλής τάσης ακριβώς δίπλα στο σημείο ζήτησης/κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, παρατηρείται μεγάλη διαφοροποίηση στη λειτουργία των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το υφιστάμενο πλαίσιο λειτουργίας τους μετασχηματίζεται συνεχώς ενσωματώνοντας την εξέλιξη των τεχνολογιών πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών και την ευελιξία των ενεργειακών πόρων. Πλέον η λογική διαχείρισης αφορά εκτός από τα δίκτυα μεταφοράς και τα δίκτυα διανομής, εφαρμόζοντας τεχνικές βελτιστοποίησης των διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών. Η διαχείριση των δικτύων διανομής εκτείνεται σε δύο άξονες, αφενός στην αναβολή των επενδύσεων διατηρώντας την ποιότητα ισχύος και αφετέρου στην παροχή επικουρικών υπηρεσιών από τους ενεργειακούς πόρους που συνδέονται σε αυτά. Παρ' όλο που το ισχύον θεσμικό πλαίσιο και οι αγορές ενέργειας δεν έχουν προσαρμοστεί κατάλληλα προς την κατεύθυνση αυτή, προχωρούν οι τεχνολογικές εξελίξεις σε επίπεδο αλγορίθμων βελτιστοποίησης και κατανεμημένου ελέγχου.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των κεντρικών και αποκεντρωμένων τεχνικών βελτιστοποίησης με εφαρμογή στα δίκτυα διανομής, αλλά και από την ανασκόπηση των διαφόρων αλγορίθμων κατανεμημένης βελτιστοποίησης με ευρύτερες εφαρμογές, κατέστη φανερό ότι υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για εφαρμογές ελέγχου και κατανεμημένης διαχείρισης σε τοπικό επίπεδο λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών λειτουργίας των δικτύων διανομής χωρίς ωστόσο να έχει έως τώρα προσεγγιστεί το θέμα ως αυτούσιο πρόβλημα αμιγώς κατανεμημένης βελτιστοποίησης. Με την πρόταση των Αλγορίθμων Ομότιμων

Κόμβων για τη διαχείριση συμφορήσεων σε δίκτυα διανομής, πραγματοποιείται μία πρωτότυπη συμβολή στο χώρο της κατανεμημένης βελτιστοποίησης για τα δίκτυα διανομής. Συγκρίνοντας μάλιστα τους προτεινόμενους αλγορίθμους με αλγορίθμους τύπου sub-gradient και dual averaging, παρατηρήθηκε ότι οι τελευταίοι απαιτούν μεν μικρότερο πλήθος επαναλήψεων, χωρίς ωστόσο να είναι εξασφαλισμένη η σύγκλιση στη βέλτιστη λύση. Επιπλέον η σύγκριση με αλγορίθμους τύπου ADMM ανέδειξε την αδυναμία των συγκεκριμένων αλγορίθμων να καταστούν πλήρως αποκεντρωμένοι, εφόσον απαιτούν ένα ενδιάμεσο στάδιο κεντρικού συντονισμού. Ένα εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα των προτεινόμενων Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων σχετίζεται με την τοπικότητα του ερεθίσματος για την εκκίνηση της βελτιστοποίησης. Επισημαίνεται ότι συγκρινόμενοι αλγόριθμοι απαιτούν μία αρχικοποίηση με μία εφικτή λύση του προβλήματος, έτσι ώστε στη συνέχεια να προσεγγιστεί η βέλτιστη λύση μεταβάλλοντας αυτή την αρχική κατανομή των πόρων, σε αντίθεση με τους προτεινόμενους αλγόριθμους στην παρούσα διατριβή, όπου οι κόμβοι συμμετέχουν στα αποκεντρωμένα σχήματα διαχείρισης με μόνη γνώση την πραγματική αρχική τους τιμή για τις μεταβλητές ελέγχου.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, οι κόμβοι του δικτύου διανομής θεωρούνται ως ομότιμοι κόμβοι, οι οποίοι επεξεργάζονται δεδομένα και επικοινωνούν μεταξύ τους με στόχο την παροχή ενεργειακών επικουρικών υπηρεσιών. Τα ηλεκτρικά δίκτυα μπορούν να αναπαρασταθούν για λόγους προσομοιώσεων με γράφους. Χρησιμοποιώντας ως τηλεπικοινωνιακό μέσο για τις εφαρμογές διαχείρισης το PLC, θεωρούμε ότι η αναπαράσταση του τηλεπικοινωνιακού γράφου ταυτίζεται με το γράφο του ηλεκτρικού δικτύου. Συνεπώς, η φασματική ανάλυση του γράφου αφορά και τις δύο περιπτώσεις. Από τη θεωρία ομότιμων κόμβων διαφαίνεται ότι οι γενικές διατυπώσεις για την κατηγοριοποίηση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων ανάλογα με τον τρόπο επιλογής των γειτόνων, μας οδηγούν στην επιλογή ντετερμινιστικών Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων για τη διαχείριση των δικτύων διανομής, επιτρέποντας σε καθέναν από τους ομότιμους κόμβους να επικοινωνεί μόνο με τους κόμβους με τους οποίους συνδέεται. Μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες του γράφου αναπαράστασης είναι η δεύτερη μεγαλύτερη ιδιοτιμή της μήτρας πρόσπτωσης. Παρατηρώντας και αναλύοντας τη μορφολογία του γράφου, επιλέγουμε τα κατάλληλα βάρη μέσω ελαχιστοποίησης του φασματικού περιεχομένου του γράφου. Η επιλογή βαρών διαδραματίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα σύγκλισης των ντετερμινιστικών Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων. Μέσω των μεθόδων βελτιστοποίησης του πίνακα των βαρών, όπως προτείνεται στην παρούσα διατριβή, επιτυγχάνεται επιτάχυνση της ταχύτητας σύγκλισης, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 30-50% όπως δείχνουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε δίκτυα διαφόρων μεγεθών και διαμορφώσεων. Η επιλογή των βέλτιστων βαρών απαιτεί την κατάστρωση και επίλυση ενός NP-hard προβλήματος ελαχιστοποίησης της δεύτερης μεγαλύτερης ιδιοτιμής του πίνακα των βαρών. Το πρόβλημα επιλύεται μέσω επαναληπτικών μεθόδων, με τον αλγόριθμο εσωτερικού σημείου να αποδίδει τα καλύτερα αποτελέσματα. Η επιλογή του πίνακα των βαρών σχετίζεται με την τοπολογία του δικτύου διανομής και πραγματοποιείται εκ νέου κάθε φορά που μεταβάλλεται η τοπολογία. Όσον αφορά τους στοχαστικούς αλγόριθμους ομότιμων κόμβων, αυτοί διαφαίνεται ότι τυχάνουν ιδιαίτερης εφαρμογής σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων δικτύων και αποκλειστικής εφαρμογής σε περιπτώσεις δικτύων ad-hoc (για παράδειγμα σε δίκτυα με μετακινούμενους ενεργειακούς πόρους, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα). Η σύγκλιση των στοχαστικών αλγορίθμων επιτυγχάνεται με ένα πολύ

μικρό πλήθος ανακυκλώσεων, απαιτείται ωστόσο ένα πολύ μεγάλο πλήθος μεταβλητών, το οποίο δε μεταβάλλεται με το πλήθος των κόμβων του δικτύου, ενώ οι ανακυκλώσεις μεταβάλλονται σχεδόν γραμμικά με το πλήθος των κόμβων.

Ο πυρήνας των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων αποτελείται από τον κανόνα τοπικής ανανέωσης-επεξεργασίας της πληροφορίας από καθέναν από τους ομότιμους κόμβους που συμμετέχουν στον αλγόριθμο. Διερευνώντας τις εξισώσεις ροών φορτίου σε δίκτυα διανομής, είναι δυνατό να δημιουργήσουμε διαχωρισμένες προσεγγιστικές σχέσεις με ακριβή αποτελέσματα, οι οποίες καταλήγουν σε Αλγόριθμους Ομότιμων Κόμβων, με βάση τη θεωρία ομότιμων κόμβων και τις γενικευμένες διατυπώσεις των διεργασιών Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων. Η αρίθμηση των κόμβων με αύξουσα διάταξη από την αφετηρία της αναχώρησης προς τα φύλλα του δέντρου αναπαράστασης του δικτύου, μας επιτρέπει να εκφράσουμε την τάση κάθε κόμβου ως μία γραμμική προσεγγιστική σχέση και συγκεκριμένα ως σταθμισμένο άθροισμα των εγχύσεων από όλους τους κόμβους του δικτύου διανομής. Η στάθμιση πραγματοποιείται με βάση τον πίνακα σύνθετης αθροιστικής αγωγιμότητας του δικτύου. Ο προτεινόμενος στην παρούσα διατριβή Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων για υπολογισμό αθροισμάτων ενσωματώνει τη συνιστώσα του σταθμισμένου αθροίσματος που αφορά καθέναν από τους ομότιμους κόμβους στον κανόνα τοπικής ανανέωσης-επεξεργασίας της πληροφορίας, απαιτώντας ουσιαστικά ότι κάθε κόμβος γνωρίζει μόνο την τιμή της δικής του έγχυσης ισχύος. Οι προσομοιώσεις στα πειραματικά δίκτυα 9 κόμβων και στο τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 κόμβων, σε πολλαπλά σενάρια ζήτησης και παραγωγής, δείχνουν μεγάλη ακρίβεια των υπολογιζόμενων μεγεθών συγκριτικά με τον κεντρικό αλγόριθμο ροής φορτίου, με σφάλματα της τάξης του 1-2% και κατά μέγιστο 3,5%. Η σύγκλιση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων σχετίζεται μόνο με το πλήθος των κόμβων και την τοπολογία, και συγκεκριμένα στο δίκτυο 9 κόμβων εξασφαλίζεται μετά από 50-80 ανακυκλώσεις και στο τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 μετά από 1.200-1.700 ανακυκλώσεις. Κατά τις πρώτες ανανεώσεις παρατηρείται αρκετά μεγάλη διακύμανση στις υπολογιζόμενες τιμές, ωστόσο καθώς οι γύροι εξελίσσονται η διάδοση της πληροφορίας προσομοιάζει με μία αποσβενύμενη ταλάντωση προς την αναμενόμενη τιμή. Οι κόμβοι που βρίσκονται αρκετά μακριά από διακλαδώσεις παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια των αρχικών ανανεώσεων. Το πλήθος των απαιτούμενων γύρων Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων συμπιέζεται λόγω της κατάλληλης επιλογής του πίνακα βαρών, η οποία προηγείται των προσομοιώσεων.

Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι σε διάφορες διαμορφώσεις και σημεία λειτουργίας ακτινικών δικτύων διανομής, μπορούμε να υπολογίσουμε με μεγάλη ακρίβεια και με πλήρως κατανεμημένο τρόπο, με τη χρήση Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, διάφορα μεγέθη της ροής φορτίου. Συγκεκριμένα κάθε κόμβος που συμμετέχει σε αυτούς είναι σε θέση να υπολογίσει τη συνολική ενεργό και άεργο ισχύ του δικτύου, την τάση του κατά μέτρο και γωνία, καθώς επίσης και το ρεύμα στους κλάδους με τους οποίους συνδέεται, καθώς επίσης και τις απώλειες στους κλάδους αυτούς.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι όλα τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημεία έναυσης για τον αποκεντρωμένο έλεγχο διαχείρισης του δικτύου διανομής. Αυτό σημαίνει ότι η διαχείριση είναι σε θέση να εκκινεί χωρίς εξωτερικό ερέθισμα (κάποια εντολή ελέγχου) προερχόμενο από κάποιο κεντρικό σημείο. Ειδικότερα η συνολική ενεργός ισχύς (φαινόμενη) χρησιμοποιείται ως έναυσμα για τον αλγόριθμο διαχείρισης συμφόρησης στο επίπεδο του ΥΣ. Τα ρεύματα που διαρρέουν τους κλάδους αποτελούν

έναυσμα για τον αλγόριθμο διαχείρισης υπερφορτίσεων σε επίπεδο κλάδων. Ενώ μια τροποποιημένη εκδοχή του αλγορίθμου συνολικής ισχύος μας δίνει το έναυσμα για τον αλγόριθμο τοπικής εξισορρόπησης ζήτησης-παραγωγής.

Ο προτεινόμενος στην παρούσα διατριβή Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων για κατανεμημένη διαχείριση συμφορήσεων σε δίκτυα διανομής αποτελεί μία επέκταση της θεωρίας Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων για εφαρμογή στο πρόβλημα διαχείρισης της συμφόρησης. Το πρόβλημα αυτό καταστρώνεται ως ένα είδος βέλτιστης ροής φορτίου και αναδιανομής των ενεργειακών πόρων. Οι λειτουργικοί περιορισμοί του δικτύου (όρια τάσης και φόρτισης) και οι περιορισμοί των ίδιων των ενεργειακών πόρων (περιορισμοί μέγιστης/ελάχιστης ισχύος) εσωτερικεύονται στις διεργασίες του κανόνα τοπικής ανανέωσης-επεξεργασίας της πληροφορίας καθενός από τους ομότιμους κόμβους. Οι ομότιμοι κόμβοι σχετίζονται με ευέλικτους ενεργειακούς πόρους, οι οποίοι συμμετέχουν στον αλγόριθμο ομότιμων κόμβων μέσω μίας συνάρτησης χρησιμότητας. Η κλασική διατύπωση βέλτιστης ροής φορτίου αναδιαμορφώνεται αντιστοιχίζοντας τις συναρτήσεις χρησιμότητας με τις συναρτήσεις κόστους των μονάδων παραγωγής. Η μορφή και οι ιδιότητες των συναρτήσεων χρησιμότητας επιτρέπουν την περαιτέρω ανάλυση του δυϊκού προβλήματος, έτσι ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία διαχωρίσιμων συναρτήσεων για τον υπολογισμό της βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα της αναδιανομής πόρων με στόχο τη διαχείριση της συμφόρησης. Από την εφαρμογή του αλγορίθμου ομότιμων κόμβων στο δίκτυο 9 κόμβων και στο τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 κόμβων προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι ομότιμοι κόμβοι είναι σε θέση να αντιληφθούν τη συμφόρηση, χωρίς κάποιο εξωτερικό σήμα ελέγχου, και να εκκινήσουν τη διαδικασία διαχείρισής της. Ανάλογα με την ευελιξία των ενεργειακών πόρων, αλλά και ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου, οι ομότιμοι κόμβοι προχωρούν στην σταδιακή εξεύρεση της βέλτιστης λύσης, χρησιμοποιώντας έναν επιπλέον Αλγόριθμο Ομότιμων Κόμβων για τον κατανεμημένο προσδιορισμό της ελάχιστης όχλησης από την περικοπή.

Η επέκταση του αλγορίθμου ώστε να υπεισέρχεται ο λεπτομερής υπολογισμός της φαινόμενης ισχύος (έναντι της ενεργού) οδηγεί ταχύτερα στην εκκίνηση του αλγορίθμου διαχείρισης συμφόρησης σε κάποια από τα εξεταζόμενα σενάρια προσομοιώσεων. Εισάγοντας ωστόσο στο άθροισμα μία εκτίμηση των απωλειών, ως ποσοστό της ενεργού ισχύος (της τάξης του 2-3%), εξασφαλίζεται η έγκαιρη έναυση της διαχείρισης της συμφόρησης, χωρίς να απαιτείται ο ακριβής υπολογισμός των απωλειών.

Η εφαρμογή των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων για υπολογισμούς ροών φορτίου και για τη διαχείριση συμφορήσεων επεκτείνεται σε ένα δίκτυο διανομής αποτελούμενο από γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης, με την εισαγωγή δύο επίπεδων ελέγχου, για επιτάχυνση της σύγκλισης και διευκόλυνση της επεκτασιμότητας. Τα δύο λογικά επίπεδα ελέγχου δεν απαιτούν κεντρικό συντονισμό. Στο κάτω λογικό επίπεδο ελέγχου, καθένας από τους κόμβους μίας γραμμής χαμηλής τάσης πραγματοποιεί περιοδικά υπολογισμό της συνολικής ζήτησης ως άθροισμα των επιμέρους τιμών ζήτησης των ομότιμων κόμβων χαμηλής τάσης. Σε αυτή την περίπτωση στο κάτω λογικό επίπεδο ως ομότιμοι κόμβοι θεωρούνται όλοι οι κόμβοι του δικτύου χαμηλής τάσης συμπεριλαμβανομένου του κόμβου στον υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ. Ο συγκεκριμένος κόμβος συμμετέχει παράλληλα και στο επάνω λογικό επίπεδο ελέγχου για τον υπολογισμό της συνολικής ζήτησης στο επίπεδο της μέσης τάσης. Η συνολική ταχύτητα σύγκλισης εξαρτάται από τα μεγαλύτερα δίκτυα ΧΤ.

Σε κάθε περίπτωση η ταχύτητα σύγκλισης των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων περιλαμβάνει ένα μέρος που σχετίζεται με το χρόνο των τοπικών υπολογισμών και ένα μέρος που σχετίζεται με το επικοινωνιακό μέσο για τη μεταφορά της πληροφορίας. Αποτιμώντας τον τηλεπικοινωνιακό φόρτο και το χρόνο υπολογισμού για καθένα από τα σενάρια προσομοιώσεων και για τα επιμέρους πειραματικά δίκτυα, κατέστη φανερό ότι οι Αλγόριθμοι Ομότιμων Κόμβων παρουσιάζουν συνολικούς χρόνους της τάξης του λεπτού για δίκτυα περίπου 100 κόμβων, χρόνος που είναι ικανοποιητικός για εφαρμογές διαχείρισης συμφορήσεων και τοπικής εξισορρόπησης ζήτησης-παραγωγής.

Οι εφαρμογές Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων σε πραγματικό περιβάλλον καλούν τους ίδιους τους καταναλωτές και τους παραγωγούς διεσπαρμένων πηγών που συνδέονται στο δίκτυο διανομής να συνεργαστούν και να προσαρμόσουν την εκάστοτε λειτουργική τους κατάσταση υποστηρίζοντας την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου, διατηρώντας ωστόσο την πρωτοβουλία και την αυτονομία στη διαχείριση των πόρων τους. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνουν εκ μέρους τους ευφυείς πράκτορες λογισμικού, οι οποίοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω ενός οργανωμένου συστήματος πολλαπλών πρακτόρων, ενσωματώνοντας τις λειτουργίες των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων. Σύμφωνα με την ανάλυση και το σχεδιασμό στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, προέκυψαν δύο βασικοί τύποι πρακτόρων λογισμικού. Ο τύπος «Υποσταθμός» αναλαμβάνει κατά βάση την επιλογή των βέλτιστων βαρών για τους αλγόριθμους ομότιμων κόμβων. Ο τύπος «Κόμβος» συμμετέχει ως ομότιμος κόμβος σε οποιονδήποτε αλγόριθμο ομότιμων κόμβων απαιτηθεί ανάλογα με τη λογική ελέγχου που επιλέγεται ανά πάσα στιγμή. Η εφαρμογή σε ένα πραγματικό δίκτυο 6 κόμβων εκτός από τα αναμενόμενα αποτελέσματα στη διαχείριση της συμφόρησης, κατέδειξε και την πρακτική δυσκολία εφαρμογής όταν υπάρχει καθυστέρηση ή μη διαθεσιμότητα στην απόκριση κάποιου από τους ομότιμους κόμβους. Συνεπώς πριν την επέκταση των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων και την εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες, απαιτείται η προσομοίωση του τηλεπικοινωνιακού φόρτου που επιφέρουν οι ίδιοι οι αλγόριθμοι καθώς και της επίπτωσης της αξιοπιστίας των τηλεπικοινωνιακών μέσων στην ταχύτητα σύγκλισής τους.

Παράλληλα με το σχεδιασμό του συστήματος πολλαπλών πρακτόρων διερευνήθηκε η αξιοποίηση των έξυπνων μετρητών ως δομικών στοιχείων για τους αλγόριθμους ομότιμων κόμβων. Τα συμπεράσματα από αυτή την ανάλυση δείχνουν ότι είναι δυνατή μία επέκταση μικρής κλίμακας του προτύπου DLMS/COSEM ώστε να κωδικοποιηθεί η κατάλληλη συνάρτηση για την ανανέωση της πληροφορίας σε κάθε γύρο αλγόριθμου ομότιμων κόμβων, να δημιουργηθεί ένα νέο προφίλ επικοινωνιών DLMS/COSEM, το οποίο να επιτρέπει την Peer-to-peer επικοινωνία μεταξύ γειτονικών μετρητών και να δοθούν νέοι κωδικοί OBIS για τις νέες μεταβλητές και σταθερές που απαιτούνται, όπως για παράδειγμα για τα βάρη και για τα βοηθητικά διανύσματα.

8.2. Πρωτοτυπία - Συμβολή

Η συνεισφορά της παρούσας διατριβής έγκειται στους εξής τομείς:

- Προτάθηκε μία πρωτότυπη εφαρμογή της θεωρίας ομότιμων κόμβων για αποκεντρωμένο έλεγχο και διαχείριση ενεργειακών πόρων σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα σε δίκτυα διανομής. Συγκεκριμένα, προτάθηκαν Αλγόριθμοι Ομότιμων Κόμβων για αποκεντρωμένους υπολογισμούς ροών φορτίου στα δίκτυα διανομής, και για αποκεντρωμένο εντοπισμό και αντιμετώπιση συμφορήσεων στα δίκτυα διανομής.
- Στα πλαίσια της εφαρμογής της θεωρίας ομότιμων κόμβων στα δίκτυα διανομής πραγματοποιήθηκε μαθηματική ανάλυση του γράφου αναπαράστασης των δικτύων και προτάθηκαν αλγόριθμοι επιλογής κατάλληλων βαρών με στόχο την επιτάχυνση της σύγκλισης των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων, έτσι ώστε όχι μόνο να επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός του βέλτιστου σημείου λειτουργίας των ενεργειακών πόρων, αλλά να έχουμε μία κατά το δυνατό ταχύτερη απόκριση μειώνοντας τον απαιτούμενο αριθμό επαναλήψεων.
- Σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν νέοι κατανεμημένοι αλγόριθμοι για τη διαχείριση ενεργειακών πόρων που συνδέονται στα δίκτυα διανομής με στόχο την παροχή επικουρικών υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, πέραν της κατανεμημένης διαχείρισης συμφορήσεων, η εφαρμογή των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων εφαρμόστηκε με επιτυχία στην τοπική εξισορρόπηση ζήτησης-παραγωγής, εφαρμογή η οποία θα μπορούσε να επεκταθεί για εφαρμογές black-start και δημιουργίας νησίδων.
- Σχεδιάστηκε, υλοποιήθηκε και εφαρμόστηκε ένα πρωτότυπο σύστημα πολλαπλών πρακτόρων με στόχο την κατανεμημένη διαχείριση ενεργειακών πόρων στα δίκτυα διανομής. Οι Αλγόριθμοι Ομότιμων Κόμβων ενσωματώθηκαν σε συσκευές ICT και οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι εφαρμόστηκαν σε πραγματικές συνθήκες. Πραγματοποιήθηκε μία παραμετρική αποτίμηση του υπολογιστικού και του τηλεπικοινωνιακού φόρτου από αυτές τις εφαρμογές. Οι αλγόριθμοι μπορούν να επεκταθούν για να πραγματοποιηθεί μία πιο πλήρης αποτύπωση της επίδρασης των καθυστερήσεων στην απόδοσή τους.
- Προτάθηκε η επέκταση των κλάσεων του πρότυπου DLMS/COSEM που αφορά την κωδικοποίηση και τη μεταφορά των πληροφοριών στους ηλεκτρονικούς μετρητές με στόχο την αξιοποίηση τους ώστε να δημιουργηθούν υπερκείμενα δίκτυα διακίνησης πληροφοριών, λαμβάνοντας υπόψη τις εφαρμογές κατανεμημένων αλγορίθμων για τη διαχείριση των δικτύων διανομής.

8.3. Μελλοντικές προεκτάσεις

Από τη διατριβή διαφαίνονται κάποια σημεία, τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, καθώς και κάποιες μελλοντικές προεκτάσεις της έρευνας:

Ως πρώτη μελλοντική προέκταση, προτείνεται η διερεύνηση εφαρμογής των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων σε επιπρόσθετα προβλήματα διαχείρισης των δικτύων διανομής και στην παροχή επιπρόσθετων επικουρικών υπηρεσιών, πέραν της διαχείρισης συμφορήσεων. Η επέκταση της προτεινόμενης εφαρμογής τοπικής εξισορρόπησης ζήτησης-εφαρμογής θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για εφαρμογές black-start από τα δίκτυα διανομής, καθώς και δημιουργίας μικροδικτύων, δηλαδή νησίδων αυτόνομης λειτουργίας στα πλαίσια των δικτύων διανομής.

Επιπρόσθετα, ένα σημείο που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης είναι η μορφή και οι παράμετροι των συναρτήσεων χρησιμότητας. Προς αυτή την κατεύθυνση απαιτείται ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιώντας διάφορα προφίλ ευελιξίας των ενεργειακών πόρων στα πλαίσια της διαχείρισης των δικτύων διανομής, καθώς επίσης και διερεύνηση των σχημάτων παροχής κινήτρων και αποζημίωσης για συμμετοχή των ενεργειακών πόρων στους Αλγορίθμους Ομότιμων Κόμβων.

Η εφαρμογή των προτεινόμενων Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων σε μεγαλύτερη κλίμακα σε πραγματικά δίκτυα διανομής θα είναι εξαιρετικά χρήσιμη για να εκτιμηθεί η επεκτασιμότητα της μεθόδου και να διερευνηθούν περαιτέρω εφαρμογές κατανεμημένου ελέγχου διαχείρισης.

Στα πλαίσια της εφαρμογής των Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων σε μεγαλύτερη κλίμακα απαιτείται δοκιμή των αλγορίθμων με διάφορα τηλεπικοινωνιακά μέσα, έτσι ώστε να αποτυπωθεί η επίπτωση των χαρακτηριστικών των διαφόρων τηλεπικοινωνιακών μέσων στην απόδοση των αλγορίθμων διαχείρισης.

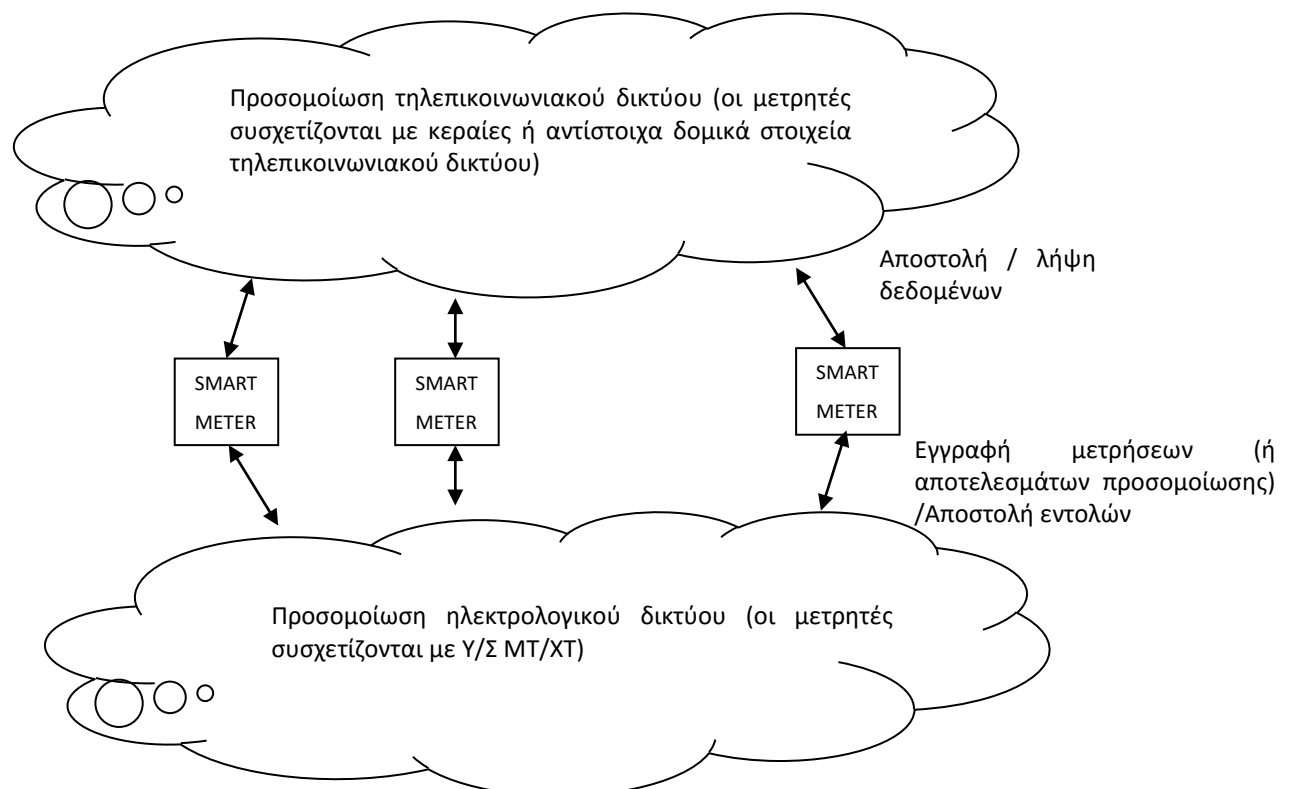
Επίσης η εφαρμογή σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας απαιτεί την επέκταση των αλγορίθμων επιλογής των κατάλληλων βαρών, αλλά και του τρόπου εξεύρεσης γειτονικών κόμβων σε περιπτώσεις διαφοροποίησης της τοπολογίας (reconfiguration). Ομοίως θα πρέπει να αξιολογηθεί η επίπτωση της μη τηλεπικοινωνιακής διαθεσιμότητας κάποιων κόμβων του δικτύου και να διερευνηθεί το ενδεχόμενο επέκτασης/τροποποίησης των προτεινόμενων Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων ώστε να προσαρμόζονται στις μεταβολές.

Προς αυτή την κατεύθυνση χρήζει διερεύνησης η εφαρμογή στοχαστικών Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων για ορισμένα από τα προβλήματα διαχείρισης των δικτύων διανομής, ιδίως εφόσον συμμετέχει μεγάλο πλήθος κόμβων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Σχεδίαση πλαισίου προσομοίωσης τηλεπικοινωνιακού φόρτου από τις καταναμημένες εφαρμογές διαχείρισης του δικτύου διανομής

Στο τέλος του Κεφαλαίου 5, παρουσιάστηκε μία παραμετρική ανάλυση αποτίμησης της τηλεπικοινωνιακής φόρτισης και καθυστέρησης στις εφαρμογές Αλγορίθμων Ομότιμων Κόμβων. Παρόλο που η συγκεκριμένη ανάλυση αποδεικνύει σε πρώτη φάση την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων αυτών για εφαρμογές steady state, μία περαιτέρω ανάλυση σε επίπεδο ταυτόχρονης προσομοίωσης του τηλεπικοινωνιακού δικτύου και του δικτύου διανομής θα μπορούσε να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για τους διαχειριστές των δικτύων αυτών, κατά τη διαδικασία απόφασης για την εγκατάσταση νέου εξοπλισμού προκειμένου να υποστηρίζονται οι μελλοντικές εφαρμογές στα πλαίσια του ευφυούς δικτύου.

Θεωρώντας ότι η βασική υποδομή για τους καταναμημένους αλγορίθμους θα είναι οι έξυπνοι μετρητές, η λογική για την ταυτόχρονη προσομοίωση εμπλέκει τους ίδιους τους μετρητές ως πιθανό σημείο σύζευξης των δύο προσομοιώσεων. Εξάλλου οι συσκευές αυτές αποτελούν και στην πραγματικότητα το σύνδεσμο μεταξύ των δύο γράφων, ηλεκτρολογικής και τηλεπικοινωνιακής τοπολογίας.



Προφανώς ανακύπτουν διάφορα πρακτικά ζητήματα προς διερεύνηση, όπως για παράδειγμα εάν η διασύνδεση των τριών επιπέδων θα πραγματοποιηθεί μέσω software ή hardware, πώς θα συγχρονιστούν οι δύο προσομοιώσεις και πόσους μετρητές μπορούμε να συμπεριλάβουμε στην προσομοίωση.

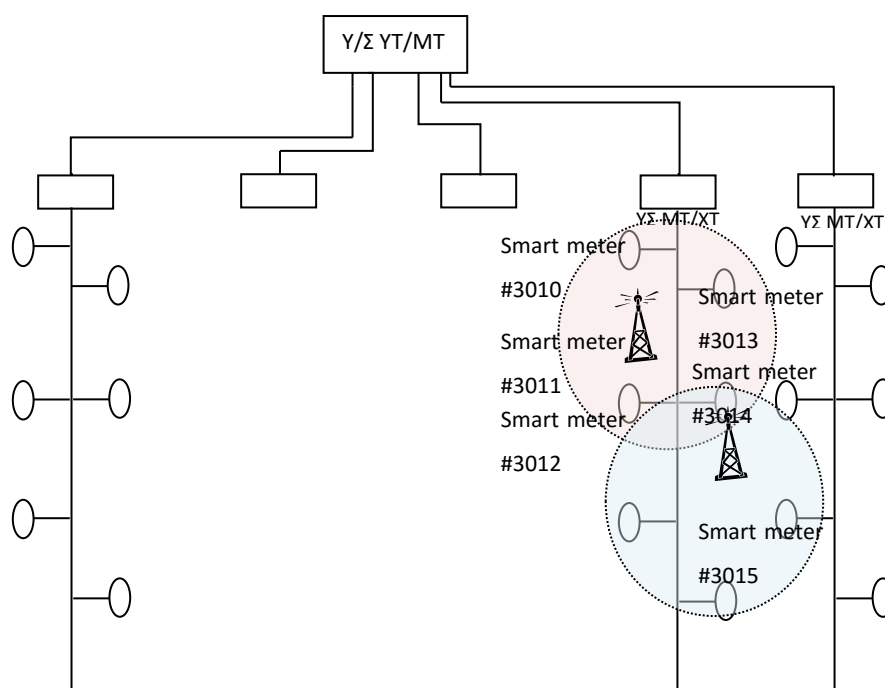
Δομή ηλεκτρολογικού δικτύου

Ο προσανατολισμός της συγκεκριμένης εργασίας είναι προς τα δίκτυα διανομής και κατά συνέπεια η διαμόρφωσή τους είναι ακτινική. Η μοντελοποίηση τους μέσω προγραμμάτων ροής φορτίου και με τη χρήση των προσεγγιστικών εξισώσεων έχει αναλυθεί εκτενώς.

Δομή τηλεπικοινωνιακού δικτύου

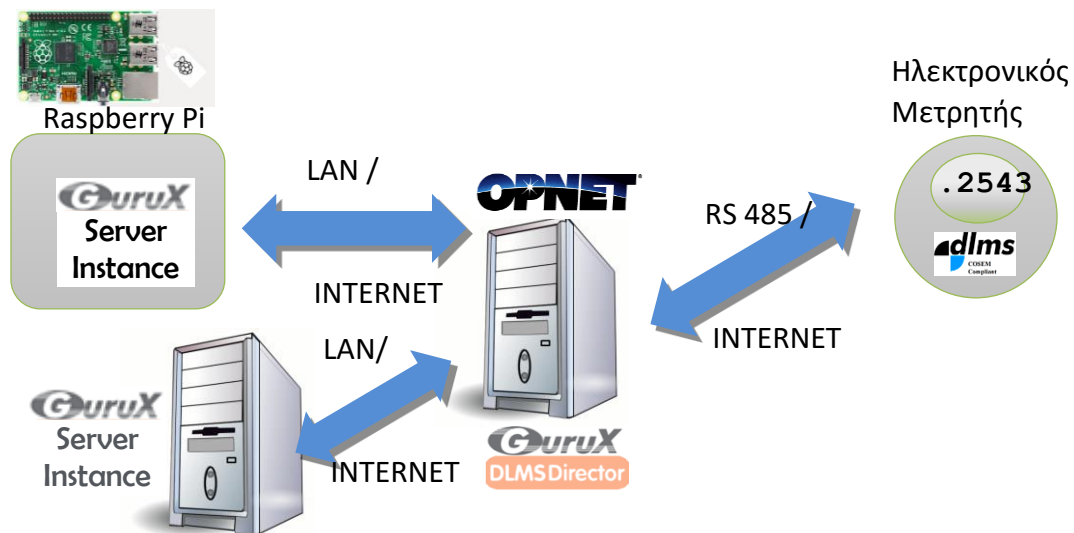
Η δομή του υπερκείμενου επικοινωνιακού γράφου, μπορεί να προσδιοριστεί εάν γνωρίζουμε το είδος του επικοινωνιακού μέσου. Όπως έχει ήδη αναλυθεί μία ικανοποιητική λύση είναι η επιλογή PLC, οπότε οι δύο γράφοι συμπίπτουν. Ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις η επικοινωνία είναι δυνατό να πραγματοποιείται μέσω ασύρματων δικτύων, η τοπολογία των οποίων τείνει προς τους γεωμετρικούς γράφους που περιγράψαμε στην ενότητα 2.6 (στοχαστικός Αλγόριθμος Ομότιμων Κόμβων). Σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή γιατί ενδέχεται γειτονικοί τηλεπικοινωνιακοί κόμβοι να μην τροφοδοτούνται από την ίδια αναχώρηση ή τον ίδιο ΥΣ και κατά συνέπεια να μη βρίσκονται στο πεδίο ορισμού του ίδιου προβλήματος.

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται ο γεωμετρικός γράφος με τους δύο κύκλους:



Λογισμικό τηλεπικοινωνιακής προσομοίωσης και δημιουργία εικονικών επικοινωνιακών μετατροπών

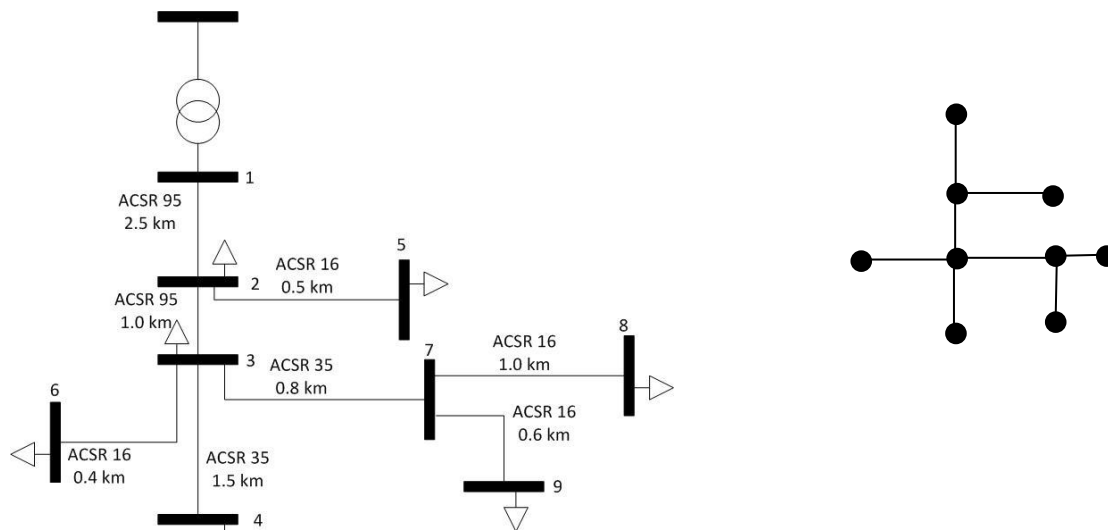
Το λογισμικό OPNET αφορά προσομοίωση τηλεπικοινωνιακών δικτύων με χρήση υποδομής και συσκευών που χρησιμοποιούνται σε πραγματικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δημιουργήθηκε μία απλή προσομοίωση τηλεπικοινωνιακού δικτύου (προσομοίωση διασύνδεσης μέσω internet) μεταξύ δύο εικονικών μετρητών (λογισμικό GURUX σε PC και σε RASPBERRY) και ενός client για την ανάγνωση δεδομένων.



Η διασύνδεση των δύο εικονικών μετρητών αλλά του πραγματικού ηλεκτρονικού μετρητή είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί είτε με τοπική σύνδεση είτε μέσω διαδικτύου. Στην πραγματικότητα εκείνο που απαιτείται είναι η δημιουργία εικονικών διεπαφών στην προσομοίωση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, μέσω των οποίων συνδέονται οι εξωτερικές συσκευές, οι οποίες αποστέλλουν και υποδέχονται δεδομένα. Υλοποιήθηκαν εικονικές διεπαφές δικτύου για τους διάφορους τύπους συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν. Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί ότι το λογισμικό OPNET μπορεί να υποστηρίξει τη δημιουργία τόσων ανεξάρτητων εικονικών διεπαφών με εξωτερικές συσκευές όσες οι θύρες επικοινωνίας, τις οποίες διαθέτει ως υλικό ο υπολογιστής στον οποίο βρίσκεται η προσομοίωση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Δεδομένα δικτύων

Β-1. Δίκτυο 9 κόμβων



Σχήμα ΠΒ.1: Τοπολογία δικτύου 9 κόμβων και επικοινωνιακός γράφος

Πίνακας ΠΒ-1 : Στοιχεία κλάδων δικτύου 9 κόμβων

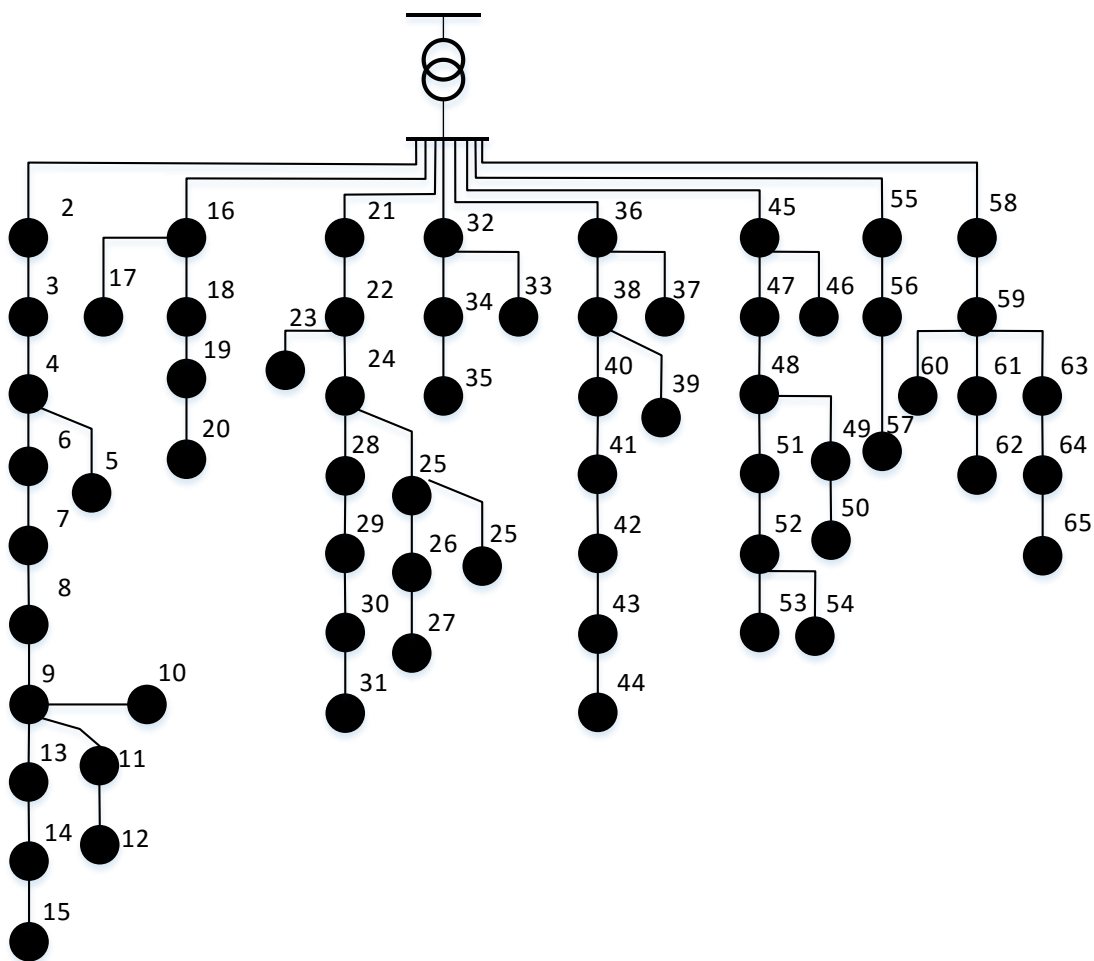
Κλάδος	Κόμβος έναρξης	Κόμβος τέλους	R (ρ.υ.)	X (ρ.υ.)
1	1	2	0,134375	0,208750
2	2	3	0,053750	0,083500
3	3	4	0,216000	0,148875
4	2	5	0,158500	0,052750
5	3	6	0,126800	0,042200
6	3	7	0,115200	0,079400
7	7	8	0,317000	0,105500
8	7	9	0,190200	0,063300

Πίνακας ΠΒ-2: Πίνακας βέλτιστων βαρών δικτύου 9 κόμβων

$$W_{ij}^{interior\ point} =$$

0.6059	0.3941	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.3941	-0.2250	0.4205	0.0000	0.4104	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.4205	-0.1233	0.1216	0.0000	0.1491	0.4320	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.1216	0.8784	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.4104	0.0000	0.0000	0.5896	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.1491	0.0000	0.0000	0.8509	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.4320	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1690	0.4064	0.3305
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4064	0.5936	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3305	0.0000	0.6695

B-2. Τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 κόμβων



Σχήμα ΠΒ.2: Τροποποιημένο δίκτυο IEEE 123 κόμβων (μετά την τροποποίηση 65 κόμβων)

Στη συνέχεια παρατίθεται για λόγους χώρου ο πίνακας βαρών w , από τον οποίο προκύπτει μονοσήμαντα ο πίνακας βέλτιστων βαρών από τη σχέση

$$W = I - A \cdot \text{diag}(w) \cdot A^T$$

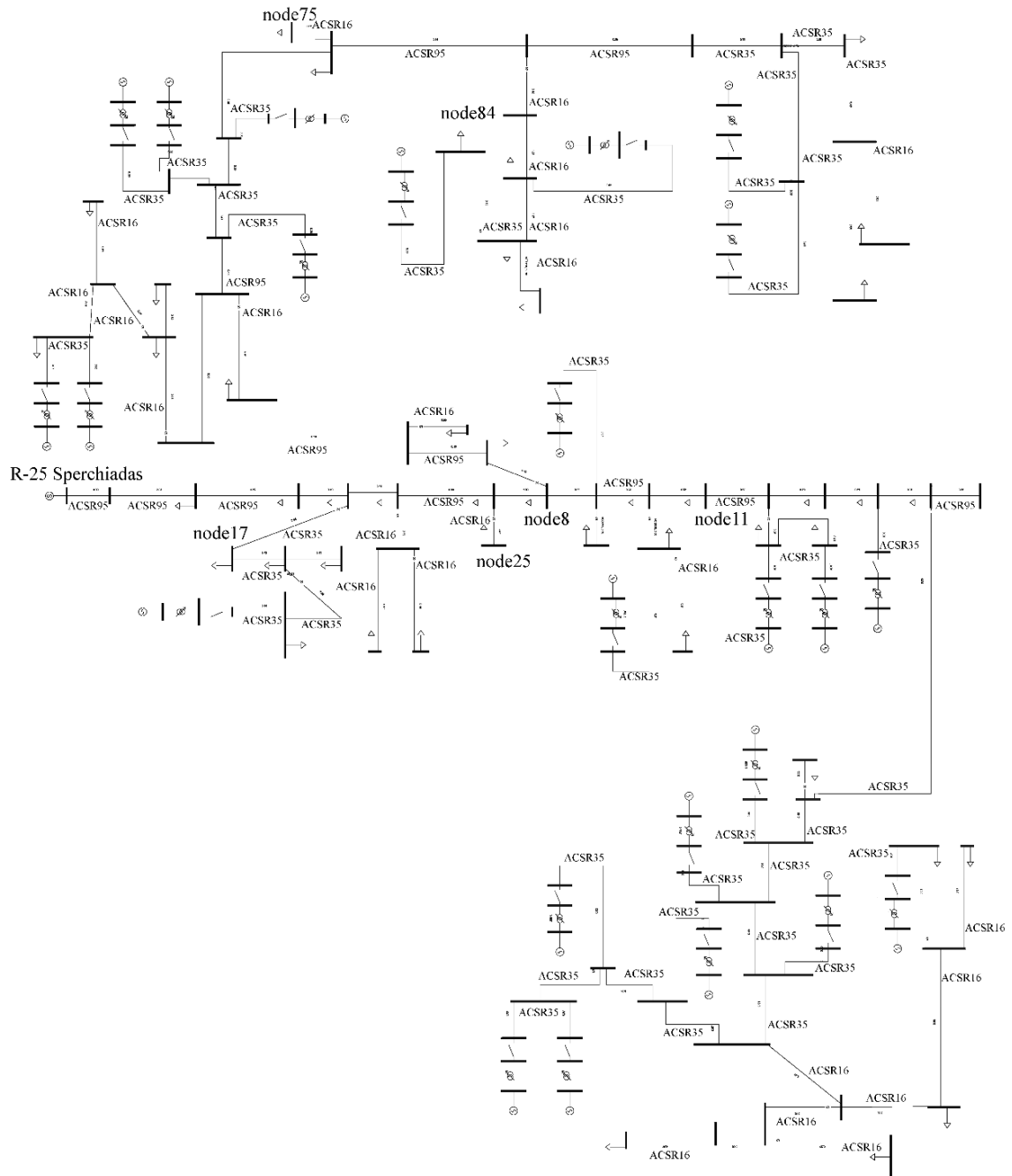
Πίνακας ΠΒ-3 : Δεδομένα τροποποιημένου δικτύου IEEE 123 και σεναρία

Στοιχείο Αριθμός Κόμβου /Κλάδου	Δεδομένα δικτύου					Χαρακτηριστικά ενεργειακών πόρων		Δεδομένα σεναρίων $P_i(\text{p.u.})$			
	Από	Προς	R (p.u.)	X (p.u.)	w	Cost rate	Pmax (p.u.)	Μόνο ζήτηση	Ανάστροφη ροή	Συμφόρηση $P_{\text{max}}=0,75 \text{ p.u.}$	Εξισορρόπηση ζήτησης- παραγωγής
1											
2	1	2	0,03119	0,00839	0,3175	3,6482	0,01137	0,0092	0,0058	0,0058	0,0058
3	2	3	0,10033	0,02630	0,5164	3,1891	0,00653	0,0092	-0,0058	0,0058	0,0058
4	3	4	0,03908	0,02746	0,4342	3,4460	0,01178	0,0092	0,0058	0,0058	0,0058
5	4	5	0,20066	0,05261	0,0803	0,0000	0,00915	0,0000	-0,0068	0,0000	-0,0070

6	4	6	0,04690	0,03296	0,4189	3,6664	0,01018	0,0092	0,0058	0,0058	0,0058
7	6	7	0,03126	0,02197	0,4628	3,0821	0,01200	0,0092	0,0058	0,0058	-0,0410
8	7	8	0,03126	0,02197	0,3857	3,0900	0,00758	0,0092	-0,0058	0,0058	0,0058
9	8	9	0,02345	0,01648	0,5238	3,3986	0,00497	0,0092	-0,0058	0,0058	0,0058
10	9	10	0,06849	0,01378	0,3655	3,2055	0,00692	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
11	9	11	0,03439	0,02417	0,2319	3,1420	0,01054	0,0040	0,0025	0,0025	-0,0500
12	11	12	0,04377	0,03076	0,0749	3,5134	0,01087	0,0092	-0,0058	0,0058	0,0058
13	9	13	0,03439	0,02417	0,3555	3,4952	0,00642	0,0092	-0,0058	0,0058	0,0058
14	13	14	0,03126	0,02197	0,1814	0,0000	0,00214	0,0092	-0,0058	0,0058	0,0058
15	14	15	0,05627	0,03955	0,1495	0,0000	0,00457	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
16	1	16	0,01040	0,00280	0,0704	0,0000	0,00162	0,0006	0,0004	0,0004	-0,0050
17	16	17	0,01566	0,00315	0,0289	3,5860	0,00645	0,0016	-0,0010	0,0010	0,0011
18	16	18	0,04193	0,02894	0,4446	3,8739	0,00430	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
19	18	19	0,01563	0,01099	0,0274	3,6352	0,00623	0,0006	0,0004	0,0004	-0,0068
20	19	20	0,05471	0,03845	0,0612	3,3013	0,00282	0,0079	-0,0050	0,0050	-0,0050
21	1	21	0,07816	0,05493	0,2699	0,0000	0,01134	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
22	21	22	0,02391	0,00643	0,3771	0,0000	0,00973	0,0079	0,0050	0,0050	0,0050
23	22	23	0,05471	0,03845	0,0209	3,8541	0,00583	0,0079	-0,0050	0,0050	0,0050
24	22	24	0,04690	0,03296	0,2169	3,6147	0,01098	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
25	24	25	0,01957	0,00394	0,4566	0,0000	0,01021	0,0006	0,0004	0,0004	-0,0068
26	25	26	0,01957	0,00394	0,0539	0,0000	0,00905	0,0159	-0,0100	0,0100	0,0100
27	26	27	0,05016	0,01315	0,0548	0,0000	0,00894	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
28	24	28	0,03595	0,02527	0,1592	3,6403	0,00718	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
29	28	29	0,02814	0,01977	0,3090	0,0000	0,01037	0,0016	0,0010	0,0010	0,0010
30	29	30	0,01094	0,00769	0,2618	0,0000	0,00733	0,0159	0,0100	0,0100	0,0100
31	30	31	0,04377	0,03076	0,0284	3,3329	0,00766	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
32	1	32	0,09875	0,02656	0,0836	3,0495	0,00196	0,0092	0,0058	0,0058	0,0058
33	32	33	0,05717	0,01538	0,0479	3,2278	0,00334	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
34	32	34	0,05159	0,03625	0,0263	3,9899	0,01078	0,0016	0,0010	0,0010	-0,0025
35	34	35	0,05940	0,04175	0,0310	3,4991	0,00123	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
36	1	36	0,06029	0,01621	0,1608	3,2094	0,01048	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
37	36	37	0,01559	0,00419	0,3588	3,8422	0,01011	0,0159	0,0100	0,0100	-0,0100
38	36	38	0,02599	0,00699	0,1852	3,6210	0,00552	0,0159	-0,0100	0,0100	0,0100
39	38	39	0,03595	0,02527	0,1161	3,8843	0,00115	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
40	38	40	0,03908	0,02746	0,2574	3,8654	0,01007	0,0016	0,0010	0,0010	-0,0100
41	40	41	0,03690	0,02547	0,3377	0,0000	0,00316	0,0000	-0,0068	0,0000	0,0068
42	41	42	0,02852	0,01968	0,0738	0,0000	0,00148	0,0016	0,0010	0,0010	0,0010
43	42	43	0,05200	0,03589	0,7995	3,6260	0,00715	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
44	43	44	0,03051	0,01582	0,2894	3,1771	0,00602	0,0079	0,0050	0,0050	0,0050
45	1	45	0,05509	0,01482	0,1719	3,1363	0,00158	0,0016	0,0010	0,0010	0,0010
46	45	46	0,04694	0,02433	0,0125	3,5386	0,01195	0,0006	0,0004	0,0004	-0,0100
47	45	47	0,05717	0,01538	0,5862	0,0000	0,01066	0,0016	0,0010	0,0010	-0,0500
48	47	48	0,03131	0,00915	0,5587	3,7287	0,00427	0,0159	-0,0100	0,0100	-0,0100
49	48	49	0,01370	0,00276	0,2572	3,8452	0,00112	0,0016	0,0010	0,0010	0,0010
50	49	50	0,04013	0,01052	0,0327	3,9823	0,00709	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
51	48	51	0,02237	0,00654	0,4270	0,0000	0,00094	0,0079	-0,0050	0,0050	0,0050
52	51	52	0,02237	0,00654	0,1729	3,8589	0,00626	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
53	52	53	0,01761	0,00354	0,2320	3,4795	0,01033	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
54	52	54	0,02237	0,00654	0,0453	0,0000	0,00772	0,0079	-0,0050	0,0050	-0,0050
55	1	55	0,05509	0,01482	0,2639	3,4843	0,00144	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
56	55	56	0,02657	0,01868	0,0728	3,0634	0,00557	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
57	56	57	0,04064	0,02856	0,1087	3,1209	0,00942	0,0079	0,0050	0,0050	0,0050
58	1	58	0,04678	0,01258	0,1285	3,7298	0,01181	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
59	58	59	0,02348	0,00473	0,3256	0,0000	0,00874	0,0159	-0,0100	0,0100	-0,0100
60	59	60	0,02599	0,00699	0,1749	0,0000	0,00167	0,0079	0,0050	0,0050	0,0050
61	59	61	0,03914	0,00788	0,0328	3,0521	0,01008	0,0006	0,0004	0,0004	-0,0058
62	61	62	0,03914	0,00788	0,0893	3,0309	0,00432	0,0016	0,0010	0,0010	-0,0025
63	59	63	0,05871	0,01181	0,0925	0,0000	0,00381	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
64	63	64	0,03914	0,00788	0,0544	3,9344	0,01022	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004
65	64	65	0,03914	0,00788	0,0382	0,0000	0,00012	0,0079	0,0050	0,0050	0,0050

B-3. Δίκτυο 101 κόμβων

Το δίκτυο βρίσκεται στην αγροτική περιοχή της Σπερχειάδας στην Κεντρική Ελλάδα και περιλαμβάνει 101 ζυγούς ΜΤ, 42 υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ και 6 ΜW φωτοβολταϊκών. Στα πλαίσια της εφαρμογής που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή, τα φωτοβολταϊκά λαμβάνονται υπόψη ως αρνητική ζήτηση.



Σχήμα ΠΒ.3: Δίκτυο 101 ζυγών

Στη συνέχεια παρατίθεται για λόγους χώρου ο πίνακας βαρών w , από τον οποίο προκύπτει μονοσήμαντα ο πίνακας βέλτιστων βαρών από τη σχέση

$$W = I - A \cdot \text{diag}(w) \cdot A^T$$

Πίνακας ΠΒ-4 : Δεδομένα δικτύου 101 κόμβων

Στοιχείο Αριθμός Κόμβου /Κλάδου			Δεδομένα δικτύου			Σενάριο ζήτησης	
	Από	Προς	R (p.u.)	X (p.u.)	w	Pi (p.u.)	Qi (p.u.)
1						0,00000	0,00000
2	1	2	0,00005	0,00008	0,5056	0,00000	0,00000
3	2	3	0,12389	0,19247	0,5712	0,01207	0,00075
4	3	4	0,01344	0,02088	0,4161	0,11710	0,00726
5	4	5	0,02623	0,04075	0,3047	0,17384	0,01078
6	5	17	0,13608	0,09379	0,4017	0,02414	0,00150
7	6	5	0,02714	0,04217	0,4112	0,07726	0,00479
8	6	7	0,01790	0,02781	0,2587	0,22213	0,01377
9	6	22	0,04184	0,01393	0,4552	0,00000	0,00000
10	7	25	0,14994	0,04990	0,2508	0,03622	0,00225
11	7	8	0,05375	0,08350	0,3754	0,15935	0,00988
12	8	9	0,02956	0,04593	0,2958	0,00000	0,00000
13	9	26	0,00962	0,01495	0,1532	0,01811	0,00112
14	9	27	0,00979	0,00675	0,3700	0,02414	0,00150
15	9	10	0,01301	0,02021	0,4055	0,06036	0,00374
16	10	11	0,02800	0,04350	0,2885	0,00000	0,00000
17	10	28	0,11507	0,03830	0,5976	0,35975	0,02230
18	11	12	0,03225	0,05010	0,1627	0,02414	0,00150
19	12	29	0,07133	0,02374	0,3801	0,08692	0,00539
20	12	13	0,01059	0,01645	0,4530	0,01207	0,00075
21	13	14	0,01118	0,01737	0,1956	0,00000	0,00000
22	14	30	0,00115	0,00079	0,4856	0,00000	0,00000
23	14	15	0,00032	0,00050	0,3430	0,19557	0,01213
24	15	16	0,01795	0,02789	0,3600	0,02414	0,00150
25	15	31	0,11304	0,07791	0,4422	0,09899	0,00614
26	17	18	0,34834	0,24009	0,4200	0,03863	0,00240
27	18	19	0,45000	0,31016	0,2789	0,00000	0,00000
28	18	20	0,03715	0,02561	0,2714	0,02414	0,00150
29	23	22	0,27611	0,09189	0,6712	0,03863	0,00240
30	22	24	0,04438	0,01477	0,3900	0,00000	0,00000
31	64	56	0,01634	0,02538	0,3932	0,00000	0,00000
32	64	65	0,09859	0,03281	0,3907	0,01207	0,00075
33	64	66	0,00581	0,00902	0,4174	0,00000	0,00000
34	66	68	0,06754	0,04655	0,2916	0,00000	0,00000
35	68	69	0,06696	0,04615	0,3230	0,00000	0,00000
36	68	72	0,03553	0,05519	0,1796	0,00000	0,00000
37	72	73	0,07200	0,04963	0,4906	0,00000	0,00000
38	72	74	0,02403	0,03732	0,0647	0,00000	0,00000
39	75	74	0,10334	0,03439	0,3653	0,00000	0,00000
40	76	77	0,00441	0,00685	0,3207	0,00000	0,00000
41	76	80	0,09510	0,03165	0,5376	0,00000	0,00000
42	76	74	0,01844	0,02864	0,3786	0,00000	0,00000
43	81	83	0,43271	0,14401	0,4074	0,00000	0,00000
44	81	82	0,00331	0,00228	0,4290	0,00000	0,00000

45	80	81	0,40418	0,13451	0,3050	0,00000	0,00000
46	83	85	0,01469	0,01012	0,3080	0,00000	0,00000
47	83	84	3,22738	1,07410	0,4173	0,00000	0,00000
48	77	78	0,11189	0,07712	0,3467	0,06036	0,00374
49	78	79	0,04118	0,02839	0,3337	0,03863	0,00240
50	78	90	0,10109	0,06967	0,3728	0,02414	0,00150
51	90	92	0,01094	0,00754	0,3930	0,00000	0,00000
52	90	91	0,05962	0,04109	0,0987	0,03863	0,00240
53	79	87	0,06955	0,04794	0,3531	0,03863	0,00240
54	87	89	0,09749	0,06719	0,4312	0,01811	0,00112
55	87	88	0,00444	0,00148	0,3748	0,00000	0,00000
56	54	8	0,02688	0,04175	0,5178	0,00000	0,00000
57	54	55	0,00538	0,00835	0,2795	0,06036	0,00374
58	95	55	0,20542	0,06836	0,4416	0,04225	0,00262
59	56	55	0,00538	0,00835	0,2409	0,00000	0,00000
60	56	57	0,05706	0,01899	0,2734	0,06036	0,00374
61	57	58	0,16611	0,05528	0,3838	0,09899	0,00614
62	57	59	0,05357	0,01783	0,4406	0,00000	0,00000
63	59	61	0,06974	0,02321	0,2529	0,00000	0,00000
64	59	60	0,00444	0,00148	0,4094	0,00000	0,00000
65	28	96	0,16072	0,05349	0,2126	0,02414	0,00150
66	28	97	0,00115	0,00079	0,3850	0,00000	0,00000
67	29	98	0,00144	0,00099	0,2065	0,00000	0,00000
68	99	100	0,00144	0,00099	0,4680	0,00000	0,00000
69	99	29	0,00144	0,00099	0,3664	0,00000	0,00000
70	33	31	0,06494	0,04476	0,4012	0,00000	0,00000
71	33	35	0,00619	0,00427	0,4673	0,00000	0,00000
72	35	37	0,06898	0,04754	0,2969	0,00000	0,00000
73	38	39	0,08222	0,05667	0,3877	0,00000	0,00000
74	38	37	0,00144	0,00099	0,3534	0,02414	0,00150
75	40	42	0,19930	0,13736	0,2720	0,03863	0,00240
76	40	41	0,00317	0,00218	0,1829	0,00000	0,00000
77	42	43	0,01080	0,00744	0,4599	0,00000	0,00000
78	39	40	0,03514	0,02422	0,3631	0,00000	0,00000
79	45	38	0,08432	0,02806	0,3821	0,05070	0,00314
80	45	46	0,12680	0,04220	0,4120	0,00000	0,00000
81	45	50	0,01902	0,00633	0,3387	0,01207	0,00075
82	47	48	1,57486	0,52412	0,1340	0,00000	0,00000
83	46	47	0,19020	0,06330	0,2514	0,04829	0,00299
84	49	46	0,07228	0,02405	0,3378	0,13159	0,00816
85	50	51	0,11380	0,03787	0,3963	0,02414	0,00150
86	51	52	0,00222	0,00074	0,4020	0,00000	0,00000
87	53	51	0,11666	0,03882	0,3835	0,00000	0,00000
88	31	32	0,00571	0,00190	0,5360	0,02414	0,00150
89	62	61	0,01008	0,00695	0,4050	0,01207	0,00075
91	63	61	0,02851	0,01965	0,4628	0,00000	0,00000
92	86	85	0,00014	0,00010	0,1121	0,00000	0,00000
93	93	39	0,00086	0,00060	0,3215	0,00000	0,00000
94	34	33	0,07013	0,04833	0,3097	0,00000	0,00000
95	21	20	0,02016	0,01390	0,5462	0,00000	0,00000
96	70	69	0,04291	0,02958	0,5125	0,13521	0,00838
97	71	69	0,00014	0,00010	0,4105	0,03863	0,00240
98	36	35	0,01800	0,01241	0,2792	0,00000	0,00000
99	67	66	0,03989	0,02749	0,1710	0,00000	0,00000
100	94	37	0,05126	0,03533	0,3372	0,06036	0,00374
101	44	42	0,18677	0,12873	0,1990	0,00000	0,00000

Πίνακας ΠΒ-5: Υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ δικτύου 101 κόμβων

Εγκατεστημένη ισχύς ΥΣ ΜΤ/ΧΤ (kVA)	Πλήθος ΥΣ	Πλήθος κόμβος ΧΤ
50-100	17	35-40
150-250	16	56-65
260-720	9	65-80

Α/Α Κόμβου	Τύπος Κόμβου	Εγκατεστημένη Ισχύς (kVA)	Πλήθος κόμβων ΧΤ
4	Υποσταθμός ΜΤ/ΧΤ	485	65
8	Φορτίο ΜΤ	920	
11	Υποσταθμός ΜΤ/ΧΤ	660	80
17	Φορτίο ΜΤ	1490	
25	Υποσταθμός ΜΤ/ΧΤ	410	65
75	Υποσταθμός ΜΤ/ΧΤ	160	56
84	Υποσταθμός ΜΤ/ΧΤ	545	65

Βιβλιογραφία

- [1] Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. (2012). Summary Report: 2012 DOE Microgrid Workshop. [Online]. Available: <http://energy.gov/sites/prod/files/2012%20Microgrid%20Workshop%20Report%2009102012.pdf>
- [2] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei and S. Bahramirad, "State of the Art in Research on Microgrids: A Review," in *IEEE Access*, vol. 3, no. , pp. 890-925,2015.doi: 10.1109/ACCESS.2015.2443119
- [3] Bruinenberg, J., et al. "CEN-CENELEC-ETSI smart grid co-ordination group smart grid reference architecture." *CEN, CENELEC, ETSI, Tech. Rep* (2012).
- [4] DLMS User Association. "DLMS/COSEM." *Architecture and Protocols*(2007).
- [5] "Microgrids: Architectures and Control", Ed. N. Hatziargyriou, Chapter 2, Book, Wiley-IEEE Press, February 2014
- [6] McArthur, S.D.J.; Davidson, E.M.; Catterson, V.M.; Dimeas, A.L.; Hatziargyriou, N.D.; Ponci, F.; Funabashi, T., "Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part I: Concepts, Approaches, and Technical Challenges," *IEEE Trans. onPWRS*, vol.22, no.4, pp.1743-52, Nov. 2007
- [7] Nordman, M.M.; Lehtonen, M., "Distributed agent-based State estimation for electrical distribution networks," *IEEE Trans. onPWRS*, vol.20, no.2, pp.652-8, May 2005
- [8] Le Xie; Dae-Hyun Choi; Kar, S.; Poor, H.V., "Fully Distributed State Estimation for Wide-Area Monitoring Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol.3, no.3, pp.1154,1169, Sept. 2012
- [9] 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
- [10] Loia, V.; Vaccaro, A.; Vaisakh, K., "A Self-Organizing Architecture Based on Cooperative Fuzzy Agents for Smart Grid Voltage Control," *IEEE Transactions onIndustrial Informatics*, vol.9, no.3, pp.1415,1422, Aug. 2013

- [11] Sansawatt, T.; Ochoa, L.F.; Harrison, G.P., "Smart Decentralized Control of DG for Voltage and Thermal Constraint Management," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.27, no.3, pp.1637,1645, Aug. 2012
- [12] Dimeas, A.L.; Hatziargyriou, N.D., "Operation of a Multiagent System for Microgrid Control", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 20, Issue 3, Aug. 2005 Page(s):1447 - 1455
- [13] C.M. Colson and M.H. Nehrir, "Algorithms for distributed decision-making for multi-agent microgrid power management", in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011.
- [14] 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
- [15] Mudumbai, R.; Dasgupta, S.; Cho, B.B., "Distributed control for optimal economic dispatch of power generators: The heterogeneous case," *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011*, vol., no., pp.7123,7128, 12-15 Dec. 2011
- [16] Meiqin Mao; Peng Jin; Hatziargyriou, N.D.; Liuchen Chang, "Multiagent-Based Hybrid Energy Management System for Microgrids," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol.5, no.3, pp.938,946, July 2014 doi: 10.1109/TSTE.2014.2313882
- [17] Y. Zhang, N. Gatsis, and G. B. Giannakis, "Robust Energy Management for Microgrids With High-Penetration Renewables," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 944-953, Oct. 2013.
- [18] Wenbo Shi, Xiaorong Xie, C-C Chu, Rajit Gadh, "Distributed Optimal Energy Management in Microgrids," *IEEE Trans. on Smart Grid*, May 2015.
- [19] S. Kar, J.M.F. Moura, and K. Ramanan, "Distributed parameter estimation in sensor networks: nonlinear observation models and imperfect communication", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 58, no. 6, pp. 3575 – 3605, June 2012
- [20] Iacoviello, A.; Loia, V.; Pietrosanto, A.; Vaccaro, A., "Decentralized Consensus Protocols: The Enabler for Smarter Grids Monitoring," *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2013 27th International Conference on*, vol., no., pp.1559,1564, 25-28 March 2013
- [21] Wuhib, F.; Dam, M.; Stadler, R., "A gossip protocol for detecting global threshold crossings," *Network and Service Management, IEEE Transactions on*, vol.7, no.1, pp.42,57, March 2010

- [22]Wuhib, F.; Stadler, R.; Spreitzer, M., "A Gossip Protocol for Dynamic Resource Management in Large Cloud Environments," *Network and Service Management, IEEE Transactions on* , vol.9, no.2, pp.213,225, June 2012
- [23]J.A. Peças Lopes, N. Hatziargyriou, J. Mutale, P. Djapic, N. Jenkins, Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities, *Electric Power Systems Research*, Volume 77, Issue 9, July 2007, Pages 1189-1203
- [24]European Distribution System Operators for Smart Grids, "Adapting distribution network tariffs to a decentralised energy future" *September 2015*
- [25]EURELECTRIC position paper, "The Role of DSOs on Smart Grids and Energy Efficiency", A, Jan 2012
- [26]Peter Bach Andersen, Junjie Hu, Kai Heussen, "Coordination strategies for distribution grid congestion management in a Multi-Actor, Multi-Objective Setting."in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe)*, 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on , vol., no., pp.1-8, 14-17 Oct. 2012
- [27]J. N. Tsitsiklis, D. P. Bertsekas, and M. Athans, Distributed asynchronous deterministic and stochastic gradient optimization algorithms, *IEEE Transactions on Automatic Control* 31 (1986), 803–812.
- [28]D. P. Bertsekas and J. N. Tsitsiklis, *Parallel and distributed computation: numerical methods*, Prentice-Hall, Inc., 1989
- [29]Mosk-Aoyama, Damon, Tim Roughgarden, and Devavrat Shah. "Fully distributed algorithms for convex optimization problems." *SIAM Journal on Optimization* 20.6 (2010): 3260-3279.
- [30]Boyd, Stephen, Lin Xiao, and AlmirMutapcic. "Subgradient methods." *lecture notes of EE392o, Stanford University, Autumn Quarter 2004* (2003): 2004-2005.
- [31]Nedic, Angelia, and AsumanOzdaglar. "Distributed subgradient methods for multi-agent optimization." *IEEE Transactions on Automatic Control* 54.1 (2009): 48-61.
- [32]Duchi, John C., Alekh Agarwal, and Martin J. Wainwright. "Dual averaging for distributed optimization: convergence analysis and network scaling." *IEEE Transactions on Automatic Control* 57.3 (2012): 592-606.
- [33]Boyd, Stephen, et al. "Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers." *Foundations and Trends® in Machine Learning* 3.1 (2011): 1-122.
- [34]Jakovetić, Dušan, Joao Xavier, and Jose MF Moura. "Fast distributed gradient methods." *IEEE Transactions on Automatic Control* 59.5 (2014): 1131-1146.

- [35] Introduction to Linear Optimization. by Dimitris Bertsimas and John N. Tsitsiklis. {Book}
- [36] Shah, Devavrat. Gossip algorithms. Now Publishers Inc, 2009.
- [37] Haridasan, Maya, and Robbert Van Renesse. "Gossip-based distribution estimation in peer-to-peer networks." *IPTPS*. 2008.
- [38] Jelasiy, M., Voulgaris, S., Guerraoui, R., Kermarrec, A.M. and Van Steen, M., 2007. Gossip-based peer sampling. *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*, 25(3), p.8.
- [39] Xiao, Lin, and Stephen Boyd. "Fast linear iterations for distributed averaging." *Systems & Control Letters* 53.1 (2004): 65-78.
- [40] Sundaram, Shreyas, and Christoforos N. Hadjicostis. "Distributed function calculation and consensus using linear iterative strategies." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 26.4 (2008): 650-660.
- [41] Bertsekas, Dimitri P., *Convex optimization algorithms*. Belmont: Athena Scientific, 2015.
- [42] Conti, S., S. Raiti, and G. Vagliasindi. "Voltage sensitivity analysis in radial mv distribution networks using constant current models." *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. IEEE, 2010.
- [43] "Graphics Aided Interactive Analysis of Radial Distribution Networks", M.Papadopoulos, N.D.Hatziargyriou, M.Papadakis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, Nr.4, October 1987.
- [44] "Electrical networks and resource allocation algorithms." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 10.12 (1980): 8
- [45] D. I. Koukoula and N. D. Hatziargyriou, "Gossip Algorithms for Decentralized Congestion Management of Distribution Grids," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 1071-1080, July 2016.
- [46] Sendin, A.; Berganza, I.; Arzuaga, A.; Pulkkinen, A.; Il Han Kim, "Performance results from 100,000+ PRIME smart meters deployment in Spain," *Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2012 *IEEE Third International Conference on* , vol., no., pp.145,150, 5-8 Nov. 2012
- [47] Lichtensteiger, B.; Bjelajac, B.; Müller, C.; Wietfeld, C., "RF Mesh Systems for Smart Metering: System Architecture and Performance," *Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2010 *First IEEE International Conference on* , vol., no., pp.379,384, 4-6 Oct. 2010
- [48] Kempe, D., Dobra, A., & Gehrke, J. (2003, October). Gossip-based computation of aggregate information. In *Foundations of Computer Science, 2003. Proceedings. 44th Annual IEEE Symposium on* (pp. 482-491). IEEE.

- [49]Gungor, V.C.; Sahin, D.; Kocak, T.; Ergut, S.; Buccella, C.; Cecati, C.; Hancke, G.P., "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on* , vol.7, no.4, pp.529,539, Nov. 2011 doi: 10.1109/TII.2011.2166794
- [50]Wang, Jing, Nuria Encinas Redondo, and Francisco D. Galiana. "Demand-side reserve offers in joint energy/reserve electricity markets." *Power Systems, IEEE Transactions on* 18.4 (2003): 1300-1306.
- [51]Fahrioglu, M.; Alvarado, F.L., "Using utility information to calibrate customer demand management behavior models," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.16, no.2, pp.317,322, May 2001
- [52]M. Roozbehani , M. Rinehart , M. A. Dahleh , S. K. Mitter , D. Obradovic and H. Mangesius "Analysis of competitive electricity markets under a new model of real-time retail pricing", *Proc. 8th Int. Conf. Eur. Energy Markets (EEM)*, 2011
- [53]Navid Rezaei, Mohsen Kalantar, Smart microgrid hierarchical frequency control ancillary service provision based on virtual inertia concept: An integrated demand response and droop controlled distributed generation framework, *Energy Conversion and Management*, Volume 92, 1 March 2015, Pages 287-301, ISSN 0196-8904
- [54]Qiaozhu Zhai, Xiaohong Guan, Jiping Yang, Fast unit commitment based on optimal linear approximation to nonlinear fuel cost: Error analysis and applications, *Electric Power Systems Research*, Volume 79, Issue 11, November 2009, Pages 1604-1613, ISSN 0378-7796
- [55]Ahmadi, H.; Marti, J.R.; Moshref, A., "Piecewise linear approximation of generators cost functions using max-affine functions," in *Power and Energy Society General Meeting (PES)*, 2013 IEEE , vol., no., pp.1-5, 21-25 July 2013
- [56]Bucher, Ch., and Andersson, G. "Generation of Domestic Load Profiles-an Adaptive Top-Down Approach." *Proceedings of PMAPS 2012* (2012): 10-14.
- [57]Koukoura, D., Hatziaargyriou, N., "Convergence Acceleration of Gossip Protocols Applied for Decentralized Distribution Grid Management" , *Proceedings of Powertech 2015*, Eindhoven, 29 June - 2 July 2015.
- [58]Zimmerman, R.D.; Murillo-Sánchez, C.E.; Thomas, R.J., "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.26, no.1, pp.12,19, Feb. 2011
- [59]Milewski, A. E., and Lewis, S. M. 1994. Design of Intelligent Agent User Interfaces: Delegation Issues. Technical Report, Oct. 20. AT&T Information Technologies Services.
- [60]Le Du, B, Issue 1309, 13 Mai, Les Agents, des Assistants dotés d'Intelligence. 01 Informatique, p. 13

- [61]Nwana, H. S., Software Agents: An Overview. Knowledge Engineering Review, 11(3): 205-244
- [62]Multi-agent Coordination as Distributed Logic Programming, David Robertson, Informatics, University of Edinburgh, B. Demoen and V. Lifschitz (Eds.): ICLP 2004, LNCS 3132, pp. 416–430, 2004, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [63]MagidNikraz, Giovanni Caire and Parisa A Bahri, “A methodology for the development of multi-agent systems using the JADE platform”, International Journal of Computer Systems Science & Engineering vol. 21 No 2, March 2006 Special issue: Software Engineering for Multi-Agent Systems
- [64]<https://www.gurux.fi/>

Δημοσιεύσεις

- D I Koukoula, A L Dimeas, N D Hatziargyriou, "Scheduling Algorithms for Agent Based Control and Scheduling of Microgrids", 16th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems, ISAP 2011
- D. Koukoula, N. D. Hatziargyriou, A. L. Dimeas, A. Krkoleva, "Gossip Algorithms for Smart Grids - Bibliographic Review" , 1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems (SMARTGREENS), Porto, Portugal, April 2012
- D. Koukoula, N. Hatziargyriou, A. Dimeas, "Communication for Smart Meters", 7th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES), Ohrid, FYROM, July, 2012
- D. Koukoula, G. Sideratos, A. Anastasiadis, D. Trakas, A. Dimeas, N. Hatziargyriou, M. Kouveletsou, K. Andreadis, E. Leonidaki, I. Vitellas, "Exploitation of AMR data for DMS functionalities", CIGRE 2014
- C. Pavlou, D. Koukoula, G. Korres, N. Hatziargyriou, "Observability Analysis and Distributed State Estimation", Medpower 2014, 2-5 November 2014
- Koukoula, D.I.; Hatziargyriou, N.D., "Convergence acceleration of gossip protocols applied for decentralized distribution grid management," in PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven , vol., no., pp.1-6, June 29 2015-July 2 2015
- Vlachokyriakou, O.; Mavrogenou, K.; Trakas, D.; Koukoula, D.; Sideratos, G.; Dimeas, A.; Hatziargyriou, N.; Kouveletsou, M.; Leonidaki, E.; Andreadis, K., "Probabilistic tools for DMS," in Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015 International Symposium on , vol., no., pp.189-194, 8-11 Sept. 2015
- Hatziargyriou, Nikos, E. Karfopoulos, A. Tsitsimelis, Despina Koukoula, M. Rossi, and V. Giacomo. "On the der hosting capacity of distribution feeders." CIRED 2015

- Barakou, F.; Koukoula, D.; Hatziargyriou, N.; Dimeas, A., "Fractal geometry for distribution grid topologies," in PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven , vol., no., pp.1-6, June 29 2015- July 2 2015
- D. I. Koukoula and N. D. Hatziargyriou, "Gossip Algorithms for Decentralized Congestion Management of Distribution Grids," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 3, pp. 1071-1080, July 2016.
- I. Kouveliotis-Lysikatos, D. Koukoula, A. Dimeas, N. Hatziargyriou and S. Makrýnikas, "Overview of decentralized distribution system operation techniques," CIRED Workshop 2016, Helsinki, 2016, pp. 1-4.

