



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

**ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΖΩΝΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΓΙΑ
ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βλαχοκυριάκου Α. Όλγα

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014



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

**ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΖΩΝΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΓΙΑ
ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βλαχοκυριάκου Α. Όλγα

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2014.

.....
.....
.....
Χατζηαργυρίου Νικόλαος Παπαθανασίου Σταύρος Γεωργιλάκης Παύλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π Αναπ.Καθηγητής Ε.Μ.Π Επικ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

.....
Βλαχοκυριάκου Όλγα

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

Copyright © Όλγα Βλαχοκυριάκου, 2014

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.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Με την ευκαιρία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Τράκα, για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η συνεχής βοήθεια του καθώς και οι καίριες υποδείξεις και η υπομονετική καθοδήγηση του με βοήθησαν να ολοκληρώσω την εργασία αυτή.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου , οι οποίοι με στήριξαν και με ενθάρρυναν καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη αλγορίθμων με σκοπό τον αποκεντρωμένο έλεγχο για ρύθμιση της τάσης των ζυγών ενός ηλεκτρικού συστήματος. Πραγματοποιείται διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες και κάθε ζώνη πραγματοποιεί ελέγχους ανεξάρτητα και παράλληλα με τις άλλες ζώνες ώστε να περιορίσει την διαταραχή της τάσης των ζυγών που περιέχονται σε αυτή.

Πιο συγκεκριμένα, η εργασία αναπτύσσεται σε τρία κυρίως μέρη:

Το πρώτο μέρος αποτελεί μία εισαγωγή στην έννοια της ομαδοποίησης δεδομένων και στα κυριότερα είδη και αλγόριθμους ομαδοποίησης που υπάρχουν. Περιγράφονται οι λόγοι για τους οποίους είναι απαραίτητη η ανάπτυξη και η βελτιστοποίηση του ελέγχου των σημερινών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αναφέρονται τα πλεονεκτήματα του διαχωρισμού του δικτύου σε επιμέρους υπο-περιοχές καθώς επίσης, περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας του κεντρικού και του αποκεντρωμένου ελέγχου και γίνεται μία σύντομη σύγκριση των δύο αυτών μεθόδων ελέγχου.

Στο δεύτερο μέρος πραγματοποιείται ο σχεδιασμός αλγορίθμων-μεθόδων διαχωρισμού ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε ζώνες. Ο διαχωρισμός έχει ως στόχο τη δημιουργία ζωνών με την μικρότερη ανταλλαγή ισχύος και αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα, σε περίπτωση εμφάνισης διαταραχής σε μία ζώνη, η διάδοση της στις υπόλοιπες ζώνες θα είναι ασθενής. Επίσης, οι ζυγοί μιας ζώνης παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στους ελέγχους που πραγματοποιούνται μέσα στην ζώνη σε σχέση με τους ελέγχους που πραγματοποιούνται εκτός αυτής. Οι αλγόριθμοι διαχωρισμού εφαρμόζονται στο δίκτυο 118 ζυγών της IEEE.

Στο τρίτο μέρος της εργασίας χρησιμοποιείται ο διαχωρισμός του δικτύου που πραγματοποιήθηκε με σκοπό την ανάπτυξη ελέγχου του δικτύου, σε πραγματικό χρόνο. Ο έλεγχος έχει ως στόχο την εξάλειψη της παραβίασης των ορίων της τάσης των ζυγών ενός δικτύου σε περίπτωση διαταραχής. Στην εργασία αυτή οι διαταραχές που εξετάζονται είναι η αύξηση των φορτίων και η απώλεια γραμμών. Κάθε ζώνη πραγματοποιεί έλεγχο μέσα σε αυτή, χρησιμοποιώντας τη διαθέσιμη άεργο ισχύ των γεννητριών της ζώνης καθώς και τους διαθέσιμους πυκνωτές. Τέλος, για τον έλεγχο της τάσης χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization Technique) ανεξάρτητα για κάθε ζώνη.

Συμπερασματικά, με το διαχωρισμό του δικτύου σε ζώνες είναι δυνατή η απλοποίηση μεγάλων δικτύων καθιστώντας τον έλεγχο του δικτύου πιο αποτελεσματικό και πιο εφικτή τη ρύθμιση της τάσης των ζυγών, αποτρέποντας έτσι τη διάδοση των διαταραχών μεταξύ διαφορετικών ζωνών του δικτύου.

Λέξεις κλειδιά: ομαδοποίηση δεδομένων, αλγόριθμοι ομαδοποίησης, ηλεκτρικό δίκτυο, διαχωρισμός, ζυγός, διαταραχή, ζώνες, τάση, ρύθμιση τάσης, κεντρικός έλεγχος, αποκεντρωμένος έλεγχος, γεννήτριες, πυκνωτές, άεργος ισχύς

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to develop techniques in order to control the voltage of buses in a decentralized manner. A partitioning is applied and each zone makes corrective actions parallel to and independently from other zones, for voltage regulation in case of disturbances in the network.

More specifically, this thesis is divided into three main parts.

The first part is a small introduction on the notion of clustering and on the most important clustering algorithms that are used today. In this introduction, it is analyzed why it is necessary to develop and optimize the control in today's power systems. This chapter describes the reasons for separating a power system into zones. Furthermore, there is a presentation and a comparison between centralized and decentralized control in power systems.

In the second part, different algorithms-methods are developed in order to divide IEEE 118 - bus network into bus groups. The purpose of this partitioning is to create zones with the minimum power exchange. As a result, when a disturbance occurs in a zone, it will have limited impact on other zones and furthermore, corrective actions will have higher effect on the buses of the same zone.

In the third part, the partitioning which has been applied is used to control the power system, in real time. The purpose of this control is to limit the voltage disturbance which has occurred from load augmentation or the opening of branches and to regulate the voltage in specific limits. When a disturbance occurs in a zone, the control is activated by using the reactive power reserve of the generators in the zone or by injecting reactive power with capacitors in specific buses in the zone. Finally, for the voltage control, Particle Swarm Optimization Technique is used.

In conclusion, the partitioning of the power network in different groups can be used for the reduction of the complexity of big power systems. As a result, the control and the regulation of voltage can be more efficient, thus avoiding the propagation of a disturbance in different groups.

Key words: clustering, clustering algorithms, power system, partitioning, buses, disturbance, regions, zones, voltage, voltage regulation, centralized control, decentralized control, generators, capacitors, reactive power

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

A ΜΕΡΟΣ: Εισαγωγή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	13
A 1.1 Γενικά	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο - Εισαγωγή στην ομαδοποίηση δεδομένων και στον έλεγχο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας	14
A 2.1 Ομαδοποίηση Δεδομένων	14
A 2.2 Διαχωρισμός του δικτύου	17
A2.3 Αποκεντρωμένος-Κεντρικός Έλεγχος	18

B ΜΕΡΟΣ: Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο - Θεωρία γράφων και φασματική ομαδοποίηση	24
B 3.1 Εισαγωγή στη θεωρία των γράφων	24
B 3.2 Εισαγωγή στην Φασματική Ομαδοποίηση	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο - Διαχωρισμός του δικτύου – Αλγόριθμοι k-means και k-medoids	27
B 4.1 Αλγόριθμος k-means	27
B 4.2 Αλγόριθμος k-medoids	29
B 4.3 Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες με τη χρήση του k-means και του k-medoids	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο - Διαχωρισμός του δικτύου – Αλγόριθμος mincut	37
B 5.1 Ο αλγόριθμος minimum cut	37
B 5.2 Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες με τη χρήση του minimum cut	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο - Αλγόριθμος συνημιτόνου	41
B 6.1 Διαχωρισμός του δικτύου – Αλγόριθμος με τη χρήση συνημιτόνου	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ^ο – Αλγόριθμος Peer to Peer	44
B 7.1 Διαχωρισμός του δικτύου – Αλγόριθμος P2P	44
B 7.2 Αλγόριθμος P2P και ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $Ncut$	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ^ο	50
B 8.1 Αποτελέσματα-Σχολιασμός	50

B 8.2 Επιλογή ‘πιλοτικών ζυγών’ (pilot buses).....	56
--	----

Γ ΜΕΡΟΣ: Έλεγχος Τάσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ^ο - Θεωρία συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων.....	59
Γ 9.1 Ο ευφυής πράκτορας.....	59
Γ 9.2 Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων.....	61
Γ 9.3 Επικοινωνία των Πρακτόρων.....	63
Γ 9.4 Αλληλεπίδραση των Πρακτόρων	64
Γ 9.5 Μέθοδοι συνεργασίας των πρακτόρων	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 ^ο - ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	67
Γ 10.1 Εισαγωγή.....	67
Γ 10.2 Ιακωβιανή Μήτρα – Ευαισθησίες	68
Γ 10.3 Υλοποίηση Αλγορίθμου Αποκεντρωμένου Ελέγχου	71
Γ 10.4 Αποτελέσματα Αλγορίθμου Αποκεντρωμένου Ελέγχου.....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11 ^ο - PARTICLE SWARM OPTIMIZATION	87
Γ 11.1 Εισαγωγή.....	87
Γ 11.2 PSO Αλγόριθμος	88
Γ 11.3 Χρήση αλγορίθμου PSO για ρύθμιση τάσης.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΑΟ 12 ^ο	102
Γ 12.1 Σύγκριση μεθόδων ελέγχου.....	102
Γ 12.2 Συμπεράσματα.....	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	106

A Μέρος

Εισαγωγή

Στο πρώτο μέρος της εργασίας περιγράφεται η αναγκαιότητα ελέγχου των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και γίνεται μία εισαγωγή στην έννοια ομαδοποίησης δεδομένων, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό του δικτύου σε ζώνες προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματικός έλεγχος τάσης. Επιπλέον, περιγράφεται η έννοια του αποκεντρωμένου ελέγχου του δικτύου, ο οποίος θα εφαρμοστεί για τη ρύθμιση της τάσης των ζυγών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

A 1.1 Γενικά

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται με σκοπό τη παροχή ηλεκτρικής ενέργεια στις εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Για να θεωρηθεί πως ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί καλά θα πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε οποιοδήποτε σημείο υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και με τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζονται σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης. Επιπλέον, επειδή δεν είναι εύκολη η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να παράγεται τη στιγμή που καταναλώνεται.

Για την τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια απαραίτητες λειτουργίες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς και από εκεί ξεκινούν τα δίκτυα διανομής που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης.

Με τον όρο μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας εννοούμε το σύνολο διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τη έξοδο των σταθμών παραγωγής μέχρι τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης και από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής. Επίσης τροφοδοτούν τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης, που κατασκευάζουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού υψηλής σε μέση τάση και είναι κυρίων μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Το σύστημα μεταφοράς αποτελείται από τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διάφορων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μεταφοράς. Το σύστημα μεταφοράς θα πρέπει να παρέχει σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) τάση και οι τάσεις των τριών φάσεων να είναι συμμετρικές. Επίσης, η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε υψηλή τάση προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες και συνεπώς να πραγματοποιείται οικονομικότερη λειτουργία.[1]

Τα τελευταία χρόνια αναδεικνύεται όλο και περισσότερο η ανάγκη δημιουργίας ενός αξιόπιστου ελέγχου στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η αύξηση της ζήτησης που παρατηρείται καθώς και η μεγάλη διεύθυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προκαλούν την εισαγωγή αβεβαιότητας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ενώ ταυτόχρονα το σύστημα λειτουργεί κοντά στις οριακές συνθήκες. Για τους λόγους αυτούς τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχουν γίνει πλέον αρκετά ευάλωτα σε διαταραχές.

Η εισαγωγή διαταραχών στο δίκτυο μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στις τάσεις των ζυγών, οι οποίες αν δεν ρυθμιστούν με κάποιο έλεγχο μπορεί να μεταβληθούν έξω από τα αποδεκτά όρια. Η ξαφνική αύξηση του φορτίου ή η απώλεια γραμμών μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη μείωση της τάσης σε διάφορους ζυγούς του δικτύου. Το γεγονός αυτό μπορεί να είναι καταστροφικό για την ασφάλεια και την αξιοπιστία των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόσφατα παραδείγματα όπως black out σε Ευρωπαϊκές χώρες αλλά και στην Αμερική αποδεικνύουν την ανάγκη προστασίας των δικτύων από τις διαταραχές που μπορεί να προκληθούν και τις καταστάσεις που αυτές μπορούν να δημιουργήσουν. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ελέγχου των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλα αυτά, η αυξημένη πολυπλοκότητα των σημερινών δικτύων απαιτούν νέες καινοτόμες μεθόδους προστασίας έναντι των κρίσιμων καταστάσεων λόγω διαταραχών. Έτσι πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί νέες μέθοδοι ελέγχου όπως ο διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες, η ελεγχόμενη νησιδοποίηση και η εισαγωγή έξυπνων πρακτόρων στο σύστημα, οι οποίες θα πρέπει να είναι ικανές να ανταποκρίνονται με μεγάλη ταχύτητα και αποτελεσματικότητα σε κατάσταση εκδήλωσης κάποιας διαταραχής στο δίκτυο. Έτσι, μπορεί να γίνει εφικτή η ρύθμιση της τάσης και ο περιορισμός διάδοσης των διαταραχών μέσα στο δίκτυο αποφεύγοντας κρίσιμες και επικίνδυνες καταστάσεις για την ασφάλεια και την αξιοπιστία του δικτύου.[2]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - Εισαγωγή στην ομαδοποίηση δεδομένων και στον έλεγχο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

A 2.1 Ομαδοποίηση Δεδομένων

Παρακάτω περιγράφεται η τεχνική της ομαδοποίησης και οι βασικοί αλγόριθμοι ομαδοποίησης δεδομένων καθώς στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί η διαδικασία αυτή για το διαχωρισμό του δικτύου ηλεκτρικής ενέργεια σε ομάδες-ζώνες.

Τεχνική Ομαδοποίησης (Clustering)

Ομαδοποίηση είναι η διαδικασία δημιουργίας συνόλων που αποτελούνται από αντικείμενα, τα οποία παρουσιάζουν περισσότερες ομοιότητες μεταξύ τους σε σχέση με αυτές που παρουσιάζουν με αντικείμενα άλλων ομάδων σύμφωνα με κάποιο κριτήριο. Σκοπός είναι να προσδιοριστούν οι ομάδες που ανήκουν διάφορες ποσότητες δεδομένων, με βάση κάποια κριτήρια ομοιογένειας. Η τεχνική της ομαδοποίησης υπάγεται στην ευρύτερη κατηγορία των τεχνικών μάθησης χωρίς επίβλεψη. Η διαφορά της ομαδοποίησης δεδομένων (data clustering) από την ταξινόμηση δεδομένων (data classification) είναι ότι, στην ταξινόμηση οι ομάδες στις οποίες θα τοποθετηθούν τα δεδομένα είναι προκαθορισμένες. Αυτό σημαίνει, ότι είναι εκ των προτέρων γνωστός ο αριθμός των ομάδων, τα ονόματα και οι ταυτότητες τους. Αντίθετα, στην ομαδοποίηση δεδομένων τονίζεται ιδιαίτερα ότι οι ομάδες δεν προϋπάρχουν αλλά αποφασίζονται από τον αλγόριθμο κατά δυναμικό τρόπο. Στην ομαδοποίηση δεδομένων δηλαδή, υπάρχει ένα

σύνολο δεδομένων το οποίο πρέπει να διαχειριστεί ώστε από αυτό να προκύψουν δυναμικά οι ομάδες. Σκοπός είναι να δημιουργηθούν ομάδες, που η καθεμία από αυτές θα συγκεντρώνει ομοιογενή στοιχεία. Κάθε μία από αυτές τις ομάδες διατηρεί ένα κέντρο, συνήθως το πιο κεντρικό στοιχείο της.

Η διαδικασία της ομαδοποίησης μπορεί να περιγραφεί από τα ακόλουθα βήματα:

- **Επιλογή χαρακτηριστικών γνωρισμάτων.** Ο στόχος είναι να επιλεγούν τα καταλληλότερα γνωρίσματα σύμφωνα με τα οποία πρόκειται να εφαρμοστεί η ομαδοποίηση με στόχο την επίτευξη της βέλτιστης ομοιογένειας σε κάθε ομάδα. Έτσι η προ επεξεργασία των δεδομένων πριν την εφαρμογή της ομαδοποίησης είναι ιδιαίτερα σημαντική.
- **Επιλογή αλγόριθμου ομαδοποίησης.** Σε αυτό το στάδιο γίνεται η επιλογή ενός αλγόριθμου που θα οδηγήσει σε μία καλή ομαδοποίηση για ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων. Για τη επιλογή του αλγόριθμου χρησιμοποιείται το μέτρο γειτνίασης και το κριτήριο ομαδοποίησης τα οποία ορίζουν απόλυτα τον αλγόριθμο.
 1. Το μέτρο γειτνίασης αναφέρεται στην ομοιότητα δύο αντικειμένων (δηλαδή διανύσματα γνωρισμάτων). Η επιλογή των γνωρισμάτων πρέπει να γίνεται προσεχτικά ώστε η συμβολή τους να είναι ίση κατά τον υπολογισμό του μέτρου γειτνίασης και να μην υπερिशύει το ένα έναντι του άλλου. Η γειτνίαση των αντικειμένων συνήθως μετριέται με βάση μία συνάρτηση απόστασης που ορίζεται για ζεύγη αντικειμένων. Η πιο απλή συνάρτηση απόστασης είναι η Ευκλείδεια.
 2. Το κριτήριο ομαδοποίησης εκφράζεται συνήθως βάση μιας συνάρτησης κόστους.
- **Επικύρωση αποτελεσμάτων.** Σε αυτή τη φάση αξιολογούνται τα αποτελέσματα του αλγόριθμου ομαδοποίησης σύμφωνα με συγκεκριμένα κριτήρια ορθότητας. Η ποιότητα της ομαδοποίησης που έχει δημιουργηθεί εξαρτάται από την ομοιότητα (δηλαδή μεγάλη ομοιότητα εντός της ομάδας - μικρή ομοιότητα μεταξύ των ομάδων) και την μέθοδο υλοποίησης της ομαδοποίησης.
- **Ερμηνεία των αποτελεσμάτων.** Αποτελεί το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας, όπου θα πρέπει να εκτιμηθούν τα αποτελέσματα συνδυάζοντας και άλλα στοιχεία με σκοπό την παραγωγή του εγκυρότερου αποτελέσματος.

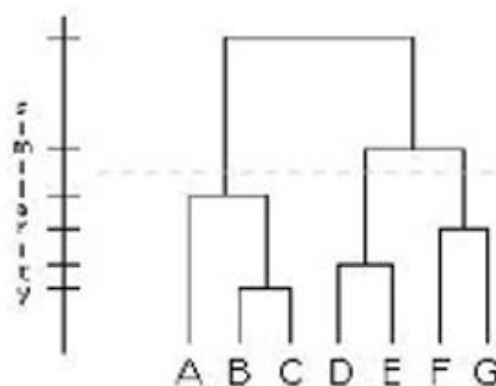
Η διαδικασία της ομαδοποίησης είναι μία διαδικασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς καθώς αποτελεί μία τεχνική που βοηθάει σημαντικά στη λήψη αποφάσεων. Η χρήση της πραγματοποιείται στη στατιστική ανάλυση δεδομένων, στην επεξεργασία εικόνας, στην πληροφορική, στην αναγνώριση προτύπων και σε διάφορους άλλους επιστημονικούς τομείς. Για την ομαδοποίηση δεδομένων υπάρχουν διάφοροι

αλγόριθμοι και μέθοδοι οι οποίοι διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον ορισμό των συνόλων καθώς και την αποδοτικότητα εύρεσης αυτών. Η επιλογή τους εξαρτάται από τη μορφή του προβλήματος που καλείται να επιλυθεί, το είδος των δεδομένων και τον χρήστη.

Οι κύριες κατηγορίες ομαδοποίησης είναι δύο, οι διαμεριστικές και οι ιεραρχικές.

- **Ιεραρχική ομαδοποίηση:** Στην ιεραρχική ομαδοποίηση οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται δημιουργούν μία ιεραρχία μεταξύ των σημείων τα οποία πρόκειται να ομαδοποιηθούν. Συνήθως δημιουργούν ένα δενδρόγραμμα που υποδηλώνει το μέγεθος και τον αριθμό των ομάδων που δημιουργήθηκαν. Οι ιεραρχικοί αλγόριθμοι μπορούν να διαιρεθούν σε δύο επιπλέον κατηγορίες, τους συσσωρευτικούς και τους διαιρετικούς.

Οι συσσωρευτικοί ξεκινάνε με n ομάδες. Σε κάθε βήμα του αλγορίθμου, το πλήθος των ομάδων μειώνεται κατά ένα συγχωνεύοντας δύο σε μία ομάδα έως φτάσουμε σε μία μοναδική που να εμπεριέχει όλα τα διανύσματα. Η εξέλιξη του αλγορίθμου μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά με ένα δενδρόγραμμα ανομοιότητας. Το δενδρόγραμμα περιέχει $n-1$ επίπεδα με το κάθε επίπεδο να αποτελεί ένα βήμα του αλγορίθμου. Επιπλέον περιλαμβάνει και την ποσότητα ανομοιότητας μεταξύ των ομάδων που συγχωνεύονται. Οι διαιρετικοί αλγόριθμοι ακολουθούν αντίστροφη διαδικασία. Ξεκινούν από μία ομάδα η οποία εμπεριέχει όλα τα διανύσματα και σε κάθε βήμα μία ομάδα διασπάται σε δύο μέχρι να καταλήξουμε σε N ομάδες. Η πολυπλοκότητα τους είναι μεγαλύτερη από τους συσσωρευτικούς. Στην πράξη αυτό που γίνεται ότι ο αλγόριθμος σε κάθε βήμα διασπά μία ομάδα αλλά όχι κατά βέλτιστο τρόπο.



Σχήμα 2.1.1: Ιεραρχική ομαδοποίηση[3]

- **Διαμεριστική ομαδοποίηση:** Στη διαμεριστική ομαδοποίηση οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται λειτουργούν ως εξής: αρχικά χωρίζουν τα αντικείμενα-δεδομένα σε ομάδες και στη συνέχεια έχουν ως στόχο τη βελτιστοποίηση του αποτελέσματος. Πιο συγκεκριμένα αν υπάρχει ένα σύνολο N πλήθους δεδομένων τότε κατασκευάζονται k

ομάδες και στη συνέχεια ελέγχεται η δυνατότητα βελτιστοποίησης. Γνωστοί αλγόριθμοι αυτού του είδους είναι οι centroids αλγόριθμοι, όπου κάθε ομάδα αναπαρίσταται με το κέντρο μάζας της. Στους αλγόριθμους αυτούς το κέντρο μάζας μπορεί να είναι ένα κεντρικό διάνυσμα το οποίο δεν χρειάζεται να ανήκει πάντα στην ομάδα-σύνολο. Μόλις δημιουργηθεί ο αριθμός των ομάδων k , γίνεται η προσπάθεια βελτιστοποίησης του εξής προβλήματος: εύρεση των k κέντρων κάθε ομάδας και στη συνέχεια εισαγωγή κάθε αντικειμένου στην ομάδα με το πλησιέστερο κέντρο, με σκοπό την ελαχιστοποίηση κάποιας συνάρτησης απόστασης. Παράδειγμα centroid αλγορίθμων είναι οι k -means και k -medoids οι οποίοι θα αναλυθούν εκτενέστερα στη συνέχεια της εργασίας καθώς θα χρησιμοποιηθούν για το διαχωρισμό-ομαδοποίηση του δικτύου σε ζώνες.[4]

- **Φασματική ομαδοποίηση:** Η φασματική ομαδοποίηση (*spectral clustering*) είναι μια σχετικά πιο νέα τεχνική ομαδοποίησης η οποία σαν είσοδο του αλγορίθμου χρησιμοποιεί α) έναν συμμετρικό πίνακα με στοιχεία τις εγγύτητες (*similarities*) μεταξύ των σημείων που πρόκειται να ομαδοποιηθούν και β) τον αριθμό των ομάδων που πρέπει να προκύψουν. Ένας τρόπος με τον οποίο συνήθως αναπαρίσταται διαισθητικά η φασματική ομαδοποίηση είναι η χρήση γράφων. Σε αυτήν την αναπαράσταση, τα σημεία τα οποία πρόκειται να ομαδοποιηθούν αναπαρίστανται σαν τις κορυφές (*vertices*) του γράφου ενώ οι μεταξύ τους εγγύτητες με τις ακμές (*edges*) αυτού. Οι ακμές εμφανίζονται με βάρη, οι τιμές των οποίων αναπαριστούν τις αντίστοιχες τιμές εγγύτητας μεταξύ των δύο σημείων τα οποία ενώνει η αντίστοιχη ακμή.[5]

Συνοπτικά αναφέρεται ότι και άλλες μέθοδοι ομαδοποίησης που διαφέρουν από τις κλασικές ομαδοποιήσεις δεδομένων, όπως η ασαφής ομαδοποίηση (Fuzzy clustering) .

Στην ασαφή ομαδοποίηση, σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους ομαδοποίησης όπου κάθε πρότυπο ανήκει σε μία μόνο ομάδα (hard clustering), κάθε δεδομένο ανήκει σε όλες τις ομάδες σε κάποιο βαθμό. Κάθε αντικείμενο έχει τη δυνατότητα να ανήκει σε δύο ή και παραπάνω ομάδες και ορίζεται μία συνάρτηση συμμετοχής η οποία υποδηλώνει το βαθμό συμμετοχής κάθε αντικειμένου σε κάθε ομάδα. Όσο πιο κοντά στο ένα είναι ο βαθμός συμμετοχής ενός στοιχείου σε μια ομάδα, τόσο πιο μεγάλη πιθανότητα είναι η πιθανότητα συμμετοχή αυτού του αντικειμένου στη συγκεκριμένη ομάδα. Αντίθετα, όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι ο βαθμός συμμετοχής, μειώνεται η πιθανότητα για τη συμμετοχή του.

A 2.2 Διαχωρισμός του δικτύου

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι ομαδοποίησης με σκοπό τη δημιουργία ομάδων σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Για το διαχωρισμό του δικτύου σε ζώνες υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι και επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου είναι πολύ σημαντική καθώς θα πρέπει να δημιουργηθούν στιβαρές ομάδες-σύνολα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την απλοποίηση του δικτύου και την επίτευξη ενός πιο εύκολου και αποτελεσματικού ελέγχου τάσης. Έτσι μια ζώνη ενός δικτύου, θα μπορούσε να θεωρηθεί μια φυσική συλλογή ηλεκτρικών στοιχείων τα οποία αποτελούν μια ενότητα η οποία επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από δράσεις που συμβαίνουν μέσα σε αυτήν και κατ' επέκταση επηρεάζεται χαλαρά από δράσεις που συμβαίνουν εκτός των συνόρων της, χωρίς όμως να αποτελεί μια ηλεκτρική νησίδα.[6]

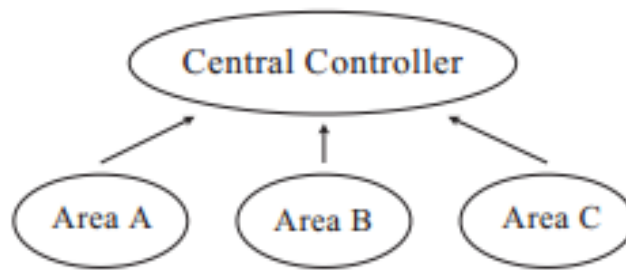
Για την επίτευξη ενός αποτελεσματικού διαχωρισμού του δικτύου ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η θεωρία των γράφων η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση και την υλοποίηση μεγάλων και σύνθετων ηλεκτρικών δικτύων. Συνοπτικά αναφέρεται ότι οι κόμβοι των γράφων αντιπροσωπεύουν τους ζυγούς του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, οι κλάδοι τις γραμμές μεταφοράς ενώ τα βάρη των κλάδων αντιστοιχούν στη ροή φαινόμενης ισχύος. Τα παραπάνω περιγράφονται πιο αναλυτικά στο κεφάλαιο που ακολουθεί σχετικά με τη θεωρία των γράφων.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι ιδιαίτερης σημασίας για τον έλεγχο του δικτύου και τη ρύθμιση της τάσης στα αποδεκτά όρια είναι και η επιλογή κατάλληλων 'πυλοτικών' ζυγών κάθε ζώνης, οι οποίοι μπορούν να χαρακτηριστούν ως pilot buses. Στην εργασία αυτή ως pilot buses επιλέγονται οι ζυγοί με τη μεγαλύτερη μεταβολή της τάσης σε περιπτώσεις διαταραχής σε σχέση με τους υπόλοιπους ζυγούς που ανήκουν στην ίδια ζώνη. Οι λόγοι επιλογής 'πυλοτικών'-ζυγών και η χρησιμότητα τους για τον έλεγχο της τάσης θα αναδειχθούν στη συνέχεια της εργασίας.

A2.3 Αποκεντρωμένος - Κεντρικός Έλεγχος

Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα η ο σχεδιασμός αποτελεσματικού ελέγχου στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντικός ειδικά σε περιπτώσεις εκδήλωσης κάποιας διαταραχής σε κάποιο σημείο του δικτύου. Σήμερα εφαρμόζονται δύο κυρίως είδη ελέγχου στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας: ο κεντρικός και ο αποκεντρωμένος έλεγχος. Πιο αναλυτικά οι δύο τρόποι ελέγχου περιγράφονται παρακάτω:

Κεντρικός Έλεγχος: Σε ένα σύστημα κεντρικού ελέγχου οι πολλαπλές περιοχές δεν αντιμετωπίζονται ως μεμονωμένες οντότητες αλλά ως συνορεύουσες περιοχές. Έτσι επιλύεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για όλη την περιοχή από έναν κεντρικό ελεγκτή. Προκειμένου να είναι δυνατός ο συγχρονισμός, όλες οι περιοχές στέλνουν τα δεδομένα τους στον κεντρικό ελεγκτή, και αφού αυτός υπολογίσει τη βέλτιστη λύση για όλο το σύστημα, αναδιανέμει τα υπολογισμένα αποτελέσματα σε κάθε περιοχή.



Σχήμα 2.3.1: Κεντρικός έλεγχος

Αποκεντρωμένος Έλεγχος: Στον αποκεντρωμένο έλεγχο το συνολικό πρόβλημα βελτιστοποίησης διαιρείται σε υποπροβλήματα που αντιστοιχούν σε κάθε περιοχή-ζώνη. Σε αντίθεση με το σχεδιασμό κεντρικού ελέγχου, κάθε περιοχή διαθέτει ένα σύνολο πρακτόρων, που επιλύουν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ξεχωριστά για την δική τους περιοχή. Για τη λήψη της συνολικής λύσης χρειάζεται ο συντονισμός μεταξύ των πρακτόρων κάθε περιοχής όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.3.2: Αποκεντρωμένος έλεγχος

Η οργάνωση μιας ελεγχόμενης ευφυούς οντότητας η οποία αποτελείται από αρκετές λιγότερο ευφυείς οντότητες (τους τοπικούς ελεγκτές) μπορεί να βασιστεί σε ένα σύστημα πολλαπλών ευφύων πρακτόρων (Multi-Agent System – MAS). Η τεχνολογία πολλαπλών πρακτόρων αποτελεί εξέλιξη της τεχνολογίας που βασίζεται στην κατανεμημένη νοημοσύνη, κι έχει ήδη προταθεί για τον έλεγχο μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και για τον έλεγχο μηχανών.

Όμως τι ακριβώς είναι ο ευφυής πράκτορας και γιατί να επιλέξουμε να υλοποιήσουμε τον έλεγχο ενός δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας βασιζόμενοι στην τεχνολογία πολλαπλών πρακτόρων, και μάλιστα ακολουθώντας το μοντέλο του κατανεμημένου ελέγχου; Αναλυτική περιγραφή αυτής της τεχνολογίας θα γίνει στο τρίτο μέρος της εργασίας, όμως ορισμένοι λόγοι χρήσης της τεχνολογίας πολλαπλών πρακτόρων αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

Ο πράκτορας είναι μία οντότητα λογισμικού που έχει δύο βασικές ιδιότητες, αυτήν της ευφυΐας αλλά και εκείνη της ικανότητας να επικοινωνεί με άλλους πράκτορες. Οι δύο αυτές ιδιότητες του δίνουν τη δυνατότητα να συνεργάζεται ή να ανταγωνίζεται με άλλους πράκτορες και όλοι μαζί να διαμορφώνουν μία κοινωνία πρακτόρων. Ο βασικός στόχος της αρχιτεκτονικής αυτής είναι να δώσει ένα μοντέλο ανάπτυξης λογισμικού το οποίο θα μπορεί να αντιμετωπίσει επιτυχώς την πολυπλοκότητα των προβλημάτων. Όταν

υιοθετούμε μία λογική χρήση ευφυών πρακτόρων στο σύστημά μας γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι απαιτείται η παρουσία πλέον του ενός πρακτόρων. Το γεγονός αυτό είναι αποτέλεσμα της λογικής της διάσπασης (decomposition), όπου το κεντρικό σύνθετο πρόβλημα διασπάται σε πολλά υπο-προβλήματα και προφανώς ο κάθε πράκτορας αναλαμβάνει ένα αντίστοιχο κομμάτι.

Οι πράκτορες λοιπόν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους προκειμένου είτε να ικανοποιήσουν τους εσωτερικούς τους στόχους είτε τους στόχους του συστήματος συνολικά. Ωστόσο υπάρχουν δύο βασικά χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν την προσέγγιση αυτή από τις παραδοσιακές αντιλήψεις. Το πρώτο χαρακτηριστικό είναι ότι οι πράκτορες μπορούν να χρησιμοποιήσουν μία υψηλού επιπέδου γλώσσα προκειμένου να επικοινωνήσουν. Με τον τρόπο αυτό η επικοινωνία των πρακτόρων γίνεται σε επίπεδο γνώσης, δηλαδή δεν ανταλλάσσουν προσυμφωνημένες εντολές και δεδομένα, αλλά πραγματοποιούν διαλόγους καθορίζοντας για παράδειγμα τι θέλει ο καθένας και πότε. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι ότι οι πράκτορες ουσιαστικά καλούνται να επιλύσουν το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν για το τμήμα εκείνο του περιβάλλοντος που αντιλαμβάνονται. Η τοπική αυτονομία αλλά και η ευφυΐα είναι δυνατόν να τους δώσει την δυνατότητα να επιλύσουν καταστάσεις οι οποίες πιθανόν να μην είχαν προβλεφθεί ή να μην μπορούσαν να προβλεφθούν κατά την διάρκεια της σχεδίασης.

Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται η χρήση ενός αποκεντρωμένου σχεδιασμού δίνοντας στις μονάδες τοπική ευφυΐα μέσω των τοπικών ελεγκτών και των πρακτόρων ελέγχου καθώς ο κεντρικός έλεγχος παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα.

- Αρχικά στον κεντρικό έλεγχο θα πρέπει να γίνει ανταλλαγή ενός μεγάλου πλήθους δεδομένων καθώς σε κάθε επαναληπτικό βήμα κάθε περιοχή θα πρέπει να στέλνει τα τρέχοντα δεδομένα της στον κεντρικό ελεγκτή και μετά τον υπολογισμό των βέλτιστων αποτελεσμάτων από τον ελεγκτή, αυτά θα πρέπει να μεταφέρονται ξανά στην αντίστοιχη περιοχή. Το γεγονός αυτό, μπορεί να εισάγει σημαντικές καθυστερήσεις λόγω τηλεπικοινωνιακού φόρτου του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Αντίθετα, στον αποκεντρωμένο έλεγχο, ανταλλαγή δεδομένων μπορεί να χρειαστεί μόνο σε γειτονικές περιοχές, με αποτέλεσμα η καθυστέρηση στο σύστημα ελέγχου να είναι σημαντικά μικρότερη. Συνεπώς γίνεται κατανοητό ότι ιδιαίτερα σε περιπτώσεις πολλαπλών διαταραχών, όπου πρέπει να παρέχεται μια γρήγορη ικανότητα λήψης αποφάσεων για την εύρεση της κατάλληλης λύσης με σκοπό τη διόρθωση της αστάθειας που προκαλείται στο σύστημα, είναι απαραίτητη η χρήση μιας αποκεντρωμένης στρατηγικής ελέγχου.
- Ο κεντρικός σχεδιασμός ελέγχου δεν είναι αρκετά στιβαρός, καθώς σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου μπορεί να υπάρξει αποτυχία στη λειτουργία του κεντρικού ελεγκτή, προκαλείται απώλεια δυνατότητας ελέγχου σε όλες τις περιοχές. Η αδυναμία ελέγχου ενός μεγάλου μέρους του δικτύου μπορεί να οδηγήσει στη διάδοση των διαταραχών και σε μεγάλα προβλήματα στη λειτουργία του συστήματος. Στον αποκεντρωμένο έλεγχο, η διακοπή δυνατότητας ελέγχου σε μια περιοχή, δεν καθιστά αδύνατο τον έλεγχο στις υπόλοιπες περιοχές.

- Κάθε περιοχή σε ένα μεγάλο ηλεκτρικό δίκτυο συχνά βασίζει την βελτιστοποίηση των προβλημάτων της σε διαφορετικά κριτήρια, με διαφορετικούς στόχους και περιορισμούς. Σε ένα σύστημα με αποκεντρωμένο έλεγχο οι στόχοι κάθε περιοχής μπορούν να επιτευχθούν ξεχωριστά από τους αντίστοιχους πράκτορες ελέγχου, γεγονός που δεν μπορεί να υλοποιηθεί σε έναν κεντρικό σχεδιασμό.
- Τέλος, στον κεντρικό έλεγχο το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι αρκετά μεγάλο και σύνθετο με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πολυπλοκότητα και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος. Αντίθετα στον αποκεντρωμένο έλεγχο το κύριο πρόβλημα βελτιστοποίησης αναλύεται σε επιμέρους υποπροβλήματα και συνεπώς η πολυπλοκότητα και ο χρόνος επίλυσης των απαραίτητων υπολογισμών μειώνεται σημαντικά. Έτσι στον αποκεντρωμένο σχεδιασμό ελέγχου υπάρχει η δυνατότητα παράλληλων διαδικασιών ελέγχου, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της ταχύτητας των υπολογισμών και του ελέγχου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. [7]

Για τους παραπάνω λόγους γίνεται φανερό ότι η χρήση αποκεντρωμένου ελέγχου προτιμάται σε μεγάλα και σύνθετα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στο τρίτο μέρος της εργασίας αναπτύσσεται αναλυτικά ένας αλγόριθμος αποκεντρωμένου ελέγχου για τη ρύθμιση τάσης του δικτύου 118 ζυγών της IEEE και σχολιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα.

B Μέρος

Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας πραγματοποιείται ο διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες με τη χρήση διαφορετικών αλγορίθμων ομαδοποίησης. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι βασικές αρχές στη θεωρία των γράφων, οι οποίες χρησιμοποιούνται από τους αλγόριθμους ομαδοποίησης δεδομένων και εισάγεται η έννοια της φασματικής ομαδοποίησης. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του διαχωρισμού του δικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - Θεωρία γράφων και φασματική ομαδοποίηση

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, σε περίπτωση εμφάνισης πολλαπλών διαταραχών στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζεται παραβίαση των ορίων της τάσης ορισμένων ζυγών. Για το λόγο αυτό απαιτείται ο έλεγχος του συστήματος και συγκεκριμένα απαιτείται αποκεντρωμένος έλεγχος καθώς είναι απαραίτητη η γρήγορη έγχυση ισχύος στα σημεία όπου παρουσιάζεται το πρόβλημα. Για την υλοποίηση αποτελεσματικού αποκεντρωμένου ελέγχου το δίκτυο διασπάται σε ζώνες, έτσι ώστε οι ενέργειες ελέγχου που συμβαίνουν μέσα στη ζώνη που εμφανίζεται η διαταραχή να έχουν μεγαλύτερη επιρροή στη ρύθμιση της τάσης των ζυγών με πρόβλημα, από ενέργειες έξω από τη ζώνη.

Προκειμένου να διαχωριστεί το δίκτυο σε ζώνες, εφαρμόζονται διάφοροι αλγόριθμοι ομαδοποίησης που βασίζονται στη θεωρία των γράφων και στη φασματική ομαδοποίηση.

B 3.1 Εισαγωγή στη θεωρία των γράφων

Βασικές έννοιες:

Η θεωρία των γράφων είναι ένα πεδίο των μαθηματικών με εφαρμογές σε μία πληθώρα επιστημονικών πεδίων όπως είναι η πληροφορική, η χημεία, η επιστήμες μηχανικών, η κοινωνιολογία κ.α.

- Γράφος θα μπορούσε να ορισθεί η οπτική αναπαράσταση των σχέσεων που αναπτύσσουν ορισμένες ποσότητες ή αντικείμενα, σχεδιασμένα σύμφωνα με ένα σύνολο αξόνων. Ένας γράφος $G=(V,E)$ αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων (vertices ή nodes) V και ένα σύνολο ακμών (edges) E .
- Κάθε ακμή θα μπορούσε να οριστεί ως ένα μη διατεταγμένο ζεύγος δύο κόμβων $E \subseteq V \times V$.
- $n=|V|$, συμβολίζουμε το πλήθος των κορυφών
- $m=|E|$, συμβολίζουμε το πλήθος των πλευρών
- $e=(u,v) \in E$, συμβολίζουμε μία πλευρά
- Ένας γράφος $G=(V,E)$ μπορεί εναλλακτικά να αναπαρασταθεί από έναν **πίνακα γειτνίασης** (adjacency matrix). Ο πίνακας αυτός έχει μέγεθος $|V|^2$ και κάθε στοιχείο του πίνακα $a_{i,j}$ (όπου $i,j < |V|$) ορίζεται ως

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{αν } (i,j) \in E \\ 0 & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (3.1.1)$$

- Ως απόσταση δύο κόμβων ορίζεται το συντομότερο μονοπάτι που υπάρχει ανάμεσα τους. Ένα μονοπάτι είναι απλό όταν περνάει ακριβώς μία φορά από κάθε κόμβο ενώ κυκλικό, ονομάζεται όταν έχει ως αρχή και τέλος τον ίδιο κόμβο.
- **Μη κατευθυνόμενος γράφος** (undirected graph) είναι ο γράφος για τον οποίο ισχύει (u,v) αν και μόνο αν (v,u)

Οι κορυφές u και v λέγονται άκρα της (u,v)
 Οι κορυφές u και v λέγονται γείτονες αν υπάρχει η (u,v) .
 Αν η u έχει d γείτονες τότε λέμε πως έχει βαθμό d

- Σε έναν **κατευθυνόμενο γράφο** (*directed graph*) τα (u,v) και (v,u) δεν είναι ισοδύναμα.
 Στην κατευθυνόμενη πλέον πλευρά (u,v) η κορυφή u λέγεται πηγή(*origin*) και η v προορισμός (*destination*)
- Γράφος με βάρη: Σε έναν γράφο με βάρη θεωρούμε μία συνάρτηση βάρους $w : E \rightarrow \mathcal{R}$
 Το w μπορεί να μοντελοποιεί βάρος, απόσταση, μήκος, χρόνο, κόστος, χωρητικότητα κ.α. (γενικά επιτρέπονται και αρνητικά βάρη). [8]

Στα παρακάτω θεωρούμε ότι ο γράφος G που θα χρησιμοποιηθεί είναι γράφος με βάρη, και κάθε πλευρά του έχει ένα βάρος το οποίο δεν έχει αρνητική τιμή δηλαδή $w_{ij} \geq 0$. Ο πίνακας γειτνίασης με βάρη (*adjacency matrix*) ή αλλιώς *πίνακας βαρών* (ή *ομοιότητας*) ορίζεται ο πίνακας $W = (w_{ij})_{i,j=1,\dots,n}$. Αν $w_{ij} = 0$ τότε σημαίνει ότι οι κορυφές v_i και v_j δεν συνδέονται με κάποια πλευρά μεταξύ τους. Επίσης, επειδή θεωρήσαμε ότι ο γράφος που χρησιμοποιούμε είναι μη κατευθυνόμενος (*undirected graph*) θα πρέπει να ισχύει ότι $w_{ij} = w_{ji}$.

Ο **βαθμός** (*degree*) μιας κορυφής $v_i \in V$ ορίζεται ως εξής:

$$d_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (3.1.2)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το παραπάνω άθροισμα αναφέρεται στις κορυφές που είναι γειτονικές με την κορυφή v_i καθώς για τις κορυφές που δεν είναι γειτονικές η ποσότητα w_{ij} είναι μηδενική.

Στη συνέχεια μπορεί να οριστεί ο πίνακας βαθμών D (**degree matrix**) ο οποίος είναι ένας διαγώνιος πίνακας και έχει ως στοιχεία της διαγωνίου του τα μεγέθη d_1, \dots, d_n .

Θεωρούμε ένα υποσύνολο A του συνόλου V των κορυφών του γράφου $A \subset V$. Για συντομία συμβολίζεται με $i \in A$ όταν θέλουμε να αναπαραστήσουμε το σύνολο των κορυφών για τις οποίες ισχύει ότι $\{i | v_i \in A\}$ (αυτή η συντόμευση χρησιμοποιείται κυρίως όταν χρησιμοποιούνται αθροίσματα).

Έτσι για δύο υποσύνολα του συνόλου των κορυφών του γράφου V ορίζεται το εξής άθροισμα:

$$W(A,B) = \sum_{i \in A, j \in B} w_{ij} \quad (3.1.3)$$

Επιπλέον αναφέρονται δύο τρόποι ορισμού του **μεγέθους** (*size*) ενός υποσυνόλου $A \subset V$. Σύμφωνα με τον πρώτο ορισμό, το μέγεθος του υποσυνόλου A ισούται με τον αριθμό των

κορυφών τις οποίες αυτό περιλαμβάνει και συμβολίζεται $|A|$: αριθμός κορυφών του υποσυνόλου A .

Σύμφωνα με τον δεύτερο ορισμό το μέγεθος του υποσυνόλου A είναι το άθροισμα από όλα τα βάρη των πλευρών που καταλήγουν στις κορυφές που ανήκουν στο A . Το μέγεθος του A συμβολίζεται με $vol(A)$ υπολογίζεται ως εξής:

$$vol(A) = \sum_{i \in A} d_i \quad (3.1.4)$$

[9]

B 3.2 Εισαγωγή στην Φασματική Ομαδοποίηση

Η μέθοδος της Φασματικής ομαδοποίησης (Spectral Clustering) χρησιμοποιείται το φάσμα του πίνακα ομοιότητας των σημείων, δηλαδή αντλεί πληροφορία από τα ιδιοδιανύσματα και τις ιδιοτιμές των πινάκων ομοιότητας. Η φασματική ομαδοποίηση αποτελεί μία προσέγγιση της διαμέρισης γράφου (graph partitioning). Η διαμέριση γράφου υλοποιείται με το διαχωρισμό του γράφου με τέτοιο τρόπο ώστε οι ακμές μεταξύ διαφορετικών ομάδων να έχουν μικρό βάρος ενώ οι ακμές μεταξύ σημείων της ίδιας ομάδας να έχουν μεγάλο βάρος. Στη φασματική ομαδοποίηση χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι οι οποίοι βασίζονται στα ιδιοδιανύσματα των πινάκων *Laplace* και τις βασικές ιδιότητες τους. Παρακάτω περιγράφονται σύντομα οι έννοιες των ιδιοδιανυσμάτων και των ιδιοτιμών καθώς και οι βασικές ειδικότητες των πινάκων *Laplace*.

Ιδιοδιανύσματα και Ιδιοτιμές

Σε ένας γραμμικό μετασχηματισμό, που αναπαρίσταται μέσω ενός τετραγωνικού πίνακα A , ένα μη μηδενικό διάνυσμα x ορίζεται ως ιδιοδιάνυσμα του A αν ικανοποιεί την εξίσωση:

$$Ax = \lambda x \quad (3.2.1)$$

όπου λ είναι ένα βαθμωτό μέγεθος που καλείται ιδιοτιμή του A και αντιστοιχεί στο διάνυσμα x . Δεδομένου ότι υπάρχει ο αντίστροφος πίνακας του A , μπορούμε να υπολογίσουμε τις ιδιοτιμές του επιλύοντας της παρακάτω εξίσωση:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (3.2.2)$$

όπου I είναι ο ταυτοτικός πίνακας. Τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές είναι γραμμικά ανεξάρτητα, δηλαδή, σε ένα n -διάστατο χώρο ο γραμμικός μετασχηματισμός A δεν μπορεί να έχει παραπάνω από n ιδιοδιανύσματα με διαφορετικές ιδιοτιμές. Η πολλαπλότητα μιας ιδιοτιμής είναι ο αριθμός των γραμμικά ανεξάρτητων ιδιοδιανυσμάτων που έχουν την ίδια ιδιοτιμή. Ένα ιδιοδιάνυσμα ενός γράφου G ορίζεται ως ένα ιδιοδιάνυσμα του πίνακα ομοιότητας του γράφου ή ως ένα ιδιοδιάνυσμα του πίνακα *Laplace* του γράφου αυτού.

Πίνακας Laplace

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στην φασματική ομαδοποίηση βασίζονται στα ιδιοδιανύσματα των πινάκων Laplace, που ουσιαστικά αποτελούν ένα συνδυασμό των πινάκων βαθμών D και των πινάκων ομοιότητας W .

Ο μη-κανονικοποιημένος πίνακας Laplace προκύπτει ως εξής :

$$L = D - W \quad (3.2.3)$$

Δοθέντος του γράφου G και του πίνακα Laplace με ιδιοτιμές $\lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \dots \leq \lambda_{n-1}$ ισχύουν οι παρακάτω ιδιότητες:

- Ο πίνακας L είναι συμμετρικός και πάντα θετικά ημιορισμένος (δηλαδή, όλες οι ιδιοτιμές του είναι πραγματικές με θετικές ή ίσες με μηδέν τιμές).
- Ο αριθμός των φορών που εμφανίζεται η ιδιοτιμή 0 ισούται με τον αριθμό των συνδεδεμένων συνιστωσών του γράφου. Ο γράφος G είναι συνδεδεμένος αν δύο οποιοσδήποτε κορυφές του μπορούν να συνδεθούν μέσω ενός μονοπατιού όπου όλοι οι ενδιάμεσοι σταθμοί ανήκουν και αυτοί στον G .
- Η ιδιοτιμή λ_i είναι μεγαλύτερη από το 0 αν και μόνο αν ο γράφος G είναι συνδεδεμένος
- Η μικρότερη ιδιοτιμή του είναι η μηδενική

Ο κανονικοποιημένος πίνακας Laplace ορίζεται με δύο διαφορετικούς τρόπους:

$$\begin{aligned} L_{sym} &= D^{-1/2} L D^{-1/2} = I - D^{-1/2} W D^{-1/2} \\ L_{rw} &= D^{-1} L = I - D^{-1} W \end{aligned} \quad (3.2.4)$$

Δοθέντος γράφου G και του πίνακα Laplace ισχύουν οι παρακάτω ιδιότητες:

- Οι L_{sym}, L_{rw} είναι πάντα θετικά ημιορισμένοι και έχουν n πραγματικές, μη αρνητικές ιδιοτιμές
- Ο αριθμός των φορών που εμφανίζεται η ιδιοτιμή 0 στους L_{sym}, L_{rw} είναι ίσος με τον αριθμό των συνδεδεμένων συνιστωσών του γράφου. [10]

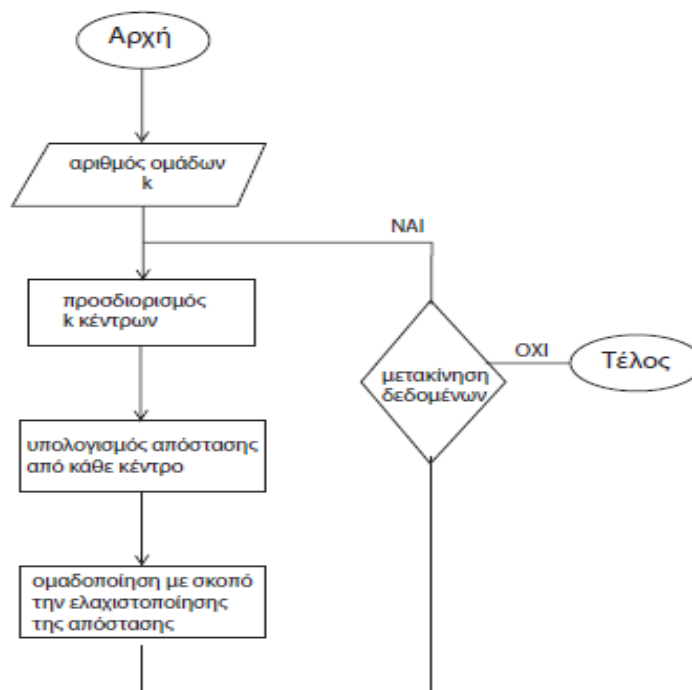
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - Διαχωρισμός του δικτύου – Αλγόριθμοι k-means και k-medoids

B 4.1 Αλγόριθμος k-means

Ο διαμεριστικός αλγόριθμος k-means είναι ένας από τους πιο απλούς και δημοφιλέστερους αλγόριθμους ομαδοποίησης λόγω της απλότητας τους και της γραμμικής πολυπλοκότητας του. Για την υλοποίηση ομαδοποίησης ενός συνόλου δεδομένων με τη χρήση του αλγορίθμου αυτού απαιτείται να είναι καθορισμένος εκ των προτέρων ο

αριθμός k των ομάδων που πρόκειται να δημιουργηθούν. Η κύρια ιδέα του αλγόριθμου είναι η εξής: αρχικά προσδιορίζονται k κεντροειδή (centroids), ένα για κάθε ομάδα (cluster). Η επιλογή των centroids πρέπει να είναι επιδέξια καθώς για διαφορετικές αρχικές τους θέσεις των κεντροειδών έχουμε διαφορετικά αποτελέσματα. Έτσι συχνά επιλέγεται τα centroids να απέχουν μεταξύ τους όσο το δυνατόν περισσότερο. Στη συνέχεια, κάθε στοιχείο από το σύνολο των δεδομένων, συσχετίζεται με το κοντινότερο σε αυτό centroid. Ουσιαστικά ο αλγόριθμος στοχεύει στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, τη συνάρτηση τετραγωνικού λάθους η οποία ορίζεται ως: $J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\|^2$ όπου $\|x_i^{(j)} - c_j\|^2$ ένα μέτρο απόστασης που χρησιμοποιείται για να μετρά την απόσταση μεταξύ κάθε στοιχείου και του κέντρου κάθε ομάδας. Επιπλέον σαν μέτρο απόστασης μεταξύ των στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η Ευκλείδεια απόσταση ή άλλα δημοφιλή μέτρα απόστασης. Δηλαδή σε κάθε βήμα το στοιχείο x θα μπαίνει στην ομάδα i , εάν η Ευκλείδεια απόσταση του από το centroid της i ομάδας είναι η μικρότερη σε σχέση με όλες τις άλλες αποστάσεις του από τα centroids των άλλων ομάδων. Έτσι προκύπτει μια πρώτη πρόχειρη ομαδοποίηση. Αμέσως μετά επιλέγονται ξανά k νέα centroids και ακολουθείται πάλι η διαδικασία ανάθεσης κάθε στοιχείου στο πλησιέστερο σε αυτό centroid. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να σταματήσει η μετακίνηση δεδομένων, όπου τερματίζει ο αλγόριθμος και έχουμε την τελική ομαδοποίηση των δεδομένων σε k ομάδες (clusters).

Παρακάτω φαίνονται σχηματικά τα βήματα του αλγόριθμου k-means:



Σχήμα 4.1.1: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου k-means

Ο αλγόριθμος k-means αν και από τους πιο δημοφιλείς αλγόριθμους ομαδοποίησης παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο τρόπος με τον οποίο επιλέγονται τα αρχικά centroids δεν είναι σαφώς καθορισμένος, ενώ συχνά επιλέγονται με τυχαίο τρόπο, και επειδή ο τελικός διαχωρισμός των δεδομένων σε ομάδες εξαρτάται από την επιλογή των αρχικών κεντροειδών, πολλές φορές δεν προκύπτει βέλτιστη ομαδοποίηση δεδομένων. Ο αριθμός των ομάδων που πρόκειται να δημιουργηθούν πρέπει να δίνεται ως είσοδος του αλγορίθμου, γεγονός που αποτελεί ένα ακόμα βασικό μειονέκτημα του. Επιπλέον, πολύ συχνά τα αποτελέσματα εξαρτώνται από το μέτρο της απόστασης το οποίο θα εφαρμοστεί.[11]

B 4.2 Αλγόριθμος k-medoids

Ο αλγόριθμος k-medoids είναι και αυτός ένας δημοφιλής αλγόριθμος ομαδοποίησης δεδομένων, ο οποίος παρουσιάζει αρκετά κοινά σημεία λειτουργίας με τον k-means. Η χρήση του προτιμάται κυρίως σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν αρκετά ακραίες τιμές και στις περιπτώσεις αυτές ο αλγόριθμος k-means δεν δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα. Ο λόγος για τον οποίο ο k-medoids είναι πιο στιβαρός σε ακραίες περιπτώσεις από τον k-means είναι ότι στόχος του είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του βαθμού ανομοιότητας μεταξύ ζευγών και όχι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των ευκλείδειων αποστάσεων.

Συγκεκριμένα ο k-medoids χρησιμοποιεί 'medoids' αντί για 'centroids', το οποίο μπορεί να ορισθεί ως το σημείο κάθε ομάδας του οποίου η μέση τιμή ανομοιότητας με τα υπόλοιπα σημεία της ομάδας είναι ελάχιστη. Ουσιαστικά το σημείο αυτό είναι το πιο κεντρικό σημείο της ομάδας δεδομένων στην οποία ανήκει.

Τα βήματα του αλγορίθμου περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

1. Αρχή: επιλέγονται αυθαίρετα k αντικείμενα από το σύνολο των αντικειμένων ως τα αρχικά κέντρα- medoids
2. Επαναληπτική διαδικασία:

Κάθε αντικείμενο τοποθετείται στην ομάδα του medoid στο οποίο βρίσκεται κοντινότερα σε σχέση με τα υπόλοιπα medoids που έχουν ορισθεί στο προηγούμενο βήμα (η απόσταση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μπορεί να είναι η Ευκλείδεια απόσταση, η απόσταση Manhattan κ.α.)

Επιλέγεται ένα στοιχείο το οποίο δεν έχει ορισθεί ως medoid (nonmedoid) που συμβολίζεται ως o_{random}

Υπολογίζεται το συνολικό κόστος S της ανταλλαγής του o_j με κάθε ένα από τα medoids

Εάν το $S < 0$ τότε γίνεται η αντιμετάθεση του o_{random} με το medoid m έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα νέο σύνολο medoids

3. Η επαναληπτική διαδικασία ολοκληρώνεται όταν δεν πραγματοποιηθεί καμία αλλαγή [12]

B 4.3 Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες με τη χρήση του k-means και του k-medoids

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν αρχικά οι αλγόριθμοι k-means και k-medoids για την υλοποίηση ομαδοποίησης - διαχωρισμού του δικτύου 118 ζυγών της IEEE σε ζώνες με σκοπό την εφαρμογή αποκεντρωμένου ελέγχου για τη ρύθμιση της τάσης που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια της εργασίας.

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε φασματική ομαδοποίηση σε συνδυασμό με τους αλγόριθμους k-means και k-medoids.

Αρχικά το δίκτυο των 118-ζυγών της IEEE αναπαρίσταται με έναν γράφο στον οποίο ισχύουν τα ακόλουθα

- οι κόμβοι των γράφων αντιπροσωπεύουν τους ζυγούς του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας
- οι κλάδοι τις γραμμές μεταφοράς
- τα βάρη των κλάδων αντιστοιχούν στη ροή φαινόμενης ισχύος.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε ο πίνακας γειτνίασης W (adjacency matrix) του γράφου του δικτύου που όπως έχει αναφερθεί, αν $w_{ij} = 0$ τότε σημαίνει ότι οι κορυφές (δηλαδή οι αντιστοιχεί ζυγοί) v_i και v_j δεν συνδέονται με κάποια πλευρά (γραμμή μεταφοράς) μεταξύ τους. Επίσης, επειδή θεωρήσαμε ότι ο γράφος που χρησιμοποιούμε είναι μη κατευθυνόμενος (undirected graph) θα πρέπει να ισχύει ότι $w_{ij} = w_{ji}$.

Μετά την κατασκευή του πίνακα γειτνίασης W υπολογίστηκε ο μη-κανονικοποιημένος πίνακας Laplace καθώς και τα k πρώτα ιδιοδιανύσματα του πίνακα Laplace (όπου k ο αριθμός των ομάδων που πρόκειται να δημιουργηθούν στον γράφο) και υλοποιείται ομαδοποίηση με τη χρήση του αλγόριθμου k-means. Τα βήματα που εφαρμόστηκαν φαίνονται παρακάτω:

Είσοδος: γράφος του δικτύου και k αριθμός των ομάδων (clusters) που πρόκειται να δημιουργηθούν

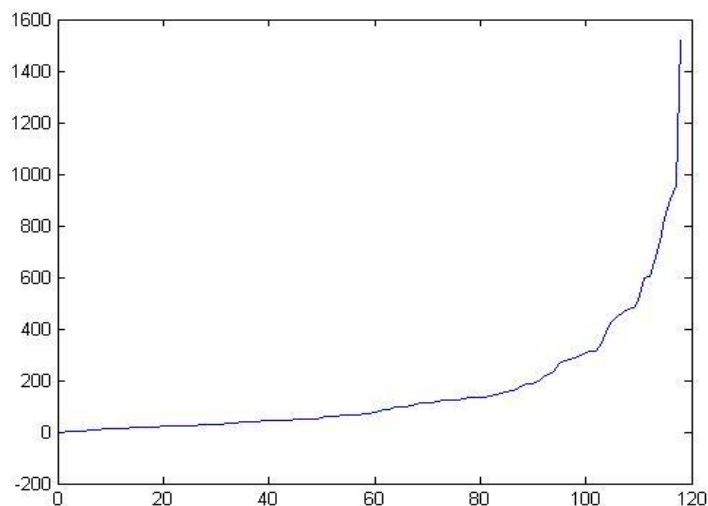
- Υπολογισμός του πίνακα γειτνίασης με βάρη, W ο οποίος έχει διαστάσεις $n \times n$ όπου n ο αριθμός των δεδομένων – ζυγών του δικτύου.
- Υπολογισμός του μη κανονικοποιημένου πίνακα Laplace, L
- Υπολογισμός των πρώτων k ιδιοδιανυσμάτων u_1, \dots, u_k του L
- Έστω $U (n \times k)$ ο πίνακας που περιέχει τα ιδιοδιανύσματα u_1, \dots, u_k ως στήλες
- Για $i=1, \dots, n$, έστω y_i το διάνυσμα που αντιστοιχεί στη i γραμμή του U .
- Ομαδοποίηση των $(y_i)_{i=1, \dots, n}$ σε k ομάδες με τη χρήση του k-means αλγόριθμου.

Έξοδος: Ομάδες : A_1, \dots, A_k

Παρακάτω περιγράφονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του παραπάνω αλγόριθμου στο δίκτυο των 118-ζυγών της IEEE.

Το δίκτυο αποτελείται από 54 γεννήτριες, 99 φορτία, 118 ζυγούς και 186 γραμμές μεταφορά (πλευρές του γράφου). Για τη δημιουργία του πίνακα W με βάρη (adjacency matrix) χρησιμοποιήθηκε η φαινόμενη ισχύς μεταξύ των ζυγών.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι ιδιοτιμές που υπολογίστηκαν από τον πίνακα Laplace. Όπως ήταν αναμενόμενο οι ιδιοτιμές είναι θετικές και η μικρότερη ιδιοτιμή είναι η μηδενική.

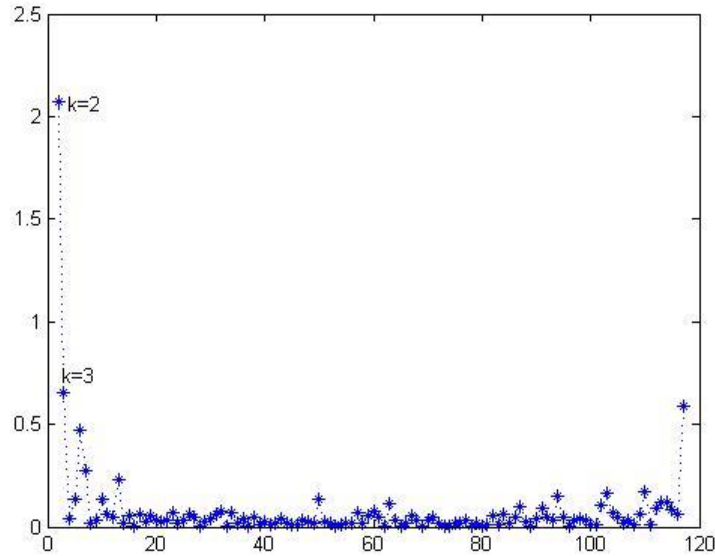


Σχήμα 4.3.1: Ιδιοτιμές πίνακα Laplace

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, οι αλγόριθμοι k-means και k-medoids απαιτούν ως είσοδο τον αριθμό k των ομάδων που πρόκειται να δημιουργηθούν. Ένα κριτήριο με βάση το οποίο μπορεί να γίνει η επιλογή του αριθμού k είναι η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών ιδιοτιμών. Συγκεκριμένα, αν με v_k συμβολίζεται η ιδιοτιμή k , τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση :

$$\gamma_k = \frac{v_{k+1} - v_k}{v_k} \quad (k \geq 2) \quad (4.3.1)$$

Μεγάλη τιμή γ_k δηλώνει ότι θεωρείται καλός διαχωρισμός του δικτύου σε τουλάχιστον k ομάδες. Παρακάτω φαίνεται γραφικά η τιμή του γ_k για $k \geq 2$



Σχήμα 4.3.2: Διαφορά διαδοχικών ιδιοτιμών γ_k

Για την συγκεκριμένη περίπτωση, που ζητείται διαχωρισμός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, θα θεωρήσουμε ότι το εύρος τιμών του k είναι $[3,7]$ καθώς ο διαχωρισμός του δικτύου σε λιγότερες από 3 ζώνες δεν θα συμβάλλει αποτελεσματικά στην πραγματοποίηση αποκεντρωμένου ελέγχου.

Συνεπώς προκύπτει ότι στο συγκεκριμένο δίκτυο μπορεί να προκύψει καλή ομαδοποίηση για $k=3$.

Ένας άλλος τρόπος για την εύρεση του βέλτιστου αριθμού ομάδων, είναι ο παρακάτω:

Έστω $S \subset G$ υπογράφοι του γράφου $G=(V,E)$ που αναπαριστά το δίκτυο των 118 ζυγών της IEEE. Τις κορυφές του γράφου G που ανήκουν στον υπογραφο S τις συμβολίζουμε ως $i \in S$. Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα ισχύει ότι το μέγεθος του S μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τη σχέση :

$$vol(S) = \sum_{i \in S} d_i \quad (4.3.2)$$

Επίσης, ορίζεται το άθροισμα από τα βάρη των πλευρών που συνδέουν τον υπογράφο S με τον υπόλοιπο γράφο, ως εξής:

$$\partial(S) = \sum_{i \in S, j \notin S} w_{ij} \quad (4.3.3)$$

Έτσι ορίζεται το μέγεθος:

$$\varphi(S) = \frac{\partial(S)}{vol(S)} \quad (4.3.4)$$

Όσο μικρότερη η τιμή του $\varphi(S)$ τόσο καλύτερος είναι ο διαχωρισμός του δικτύου καθώς μεγάλη τιμή του $vol(S)$ ισοδυναμεί με μεγάλη αλληλεπίδραση μεταξύ των κόμβων που ανήκουν στον S , ενώ μικρή τιμή του $\partial(S)$ ισοδυναμεί με μικρή αλληλεπίδραση μεταξύ κόμβων που ανήκουν στον S και κόμβων που δεν ανήκουν σε αυτόν. Έτσι αν k ο αριθμός

των ομάδων που δημιουργήθηκαν μετά το διαχωρισμό του δικτύου και $G=S_1US_2U \dots US_k$ όπου S_1, S_2, \dots, S_k τα υποσύνολα που προκύπτουν μετά το διαχωρισμό, υπολογίζεται η τιμή:

$$\max_{1 \leq i \leq k} \varphi(S_i) \quad (4.3.5)$$

Ο καλύτερος k διαχωρισμός του δικτύου είναι αυτός για τον οποίο γίνεται ελάχιστη η παραπάνω τιμή, δηλαδή για τον οποίο ισχύει:

$$\rho_G(k) = \min_{\emptyset \neq S_1, \dots, S_k \in G} (\max_{1 \leq i \leq k} \varphi(S_i)) \quad (4.3.6)$$

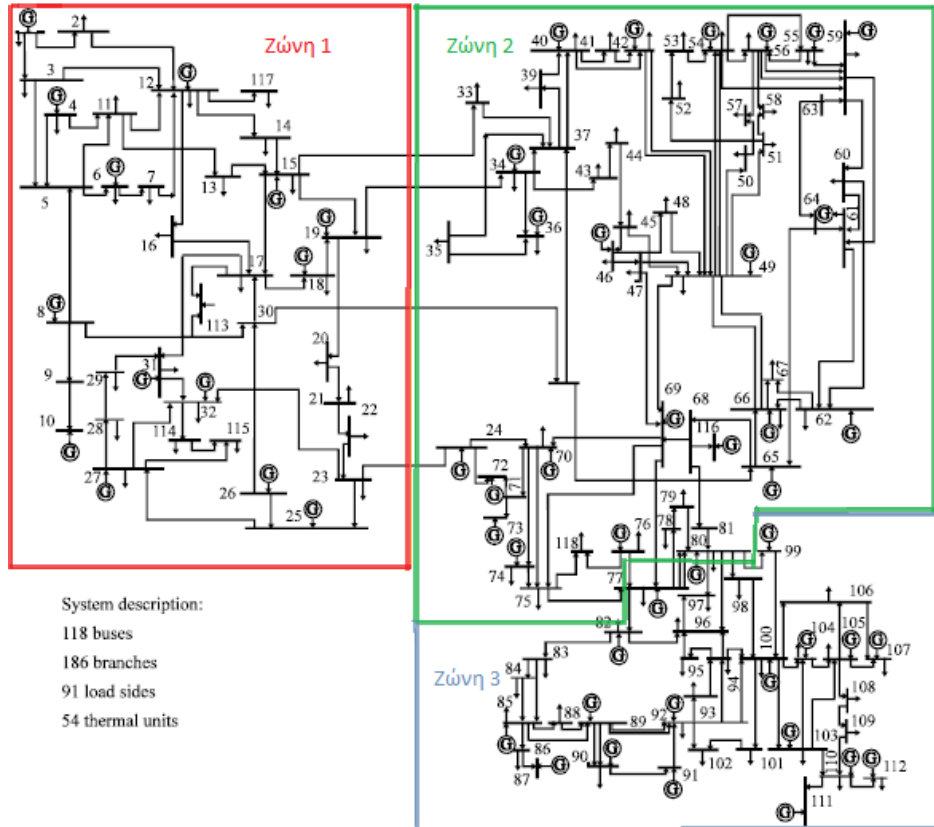
[13]

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η τιμή του $\varphi(S_i)$ για $i=1, \dots, k$ όπου $k=7$. Συνεπώς και με αυτόν τον τρόπο αποδεικνύεται ότι καλύτερος διαχωρισμός προκύπτει για **k=3**

Πίνακας 4.3.1: Τιμή της συνάρτησης $\varphi(S)$ για διάφορες τιμές του k

Αριθμός ομάδων	$\varphi(S)_1$	$\varphi(S)_2$	$\varphi(S)_3$	$\varphi(S)_4$	$\varphi(S)_5$	$\varphi(S)_6$	$\varphi(S)_7$	$\max \varphi(S)$
k=3	0.028972	0.038041	0.014353					0.038041
k=4	0.038261	0.090691	0.020033	0.081925				0.090691
k=5	0.066584	0.098335	0.099494	0.022482	0.400161			0.400161
k=6	0.028439	0.369699	0.082227	0.036259	0.028775	0.066269		0.369699
k=7	0.037927	0.369699	0.400161	0.096188	0.06326	0.028775	0.066269	0.400161

Έτσι, με τη χρήση του αλγόριθμου που περιγράφηκε παραπάνω, το δίκτυο των 118 ζυγών της IEEE χωρίζεται σε 3 ζώνες. Ο διαχωρισμός του δικτύου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και ακολουθεί και ο πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό κάθε ζυγού και τη ζώνη που ανήκει κάθε ένας από αυτούς (η ροή ισχύος πραγματοποιήθηκε με το Matpower).



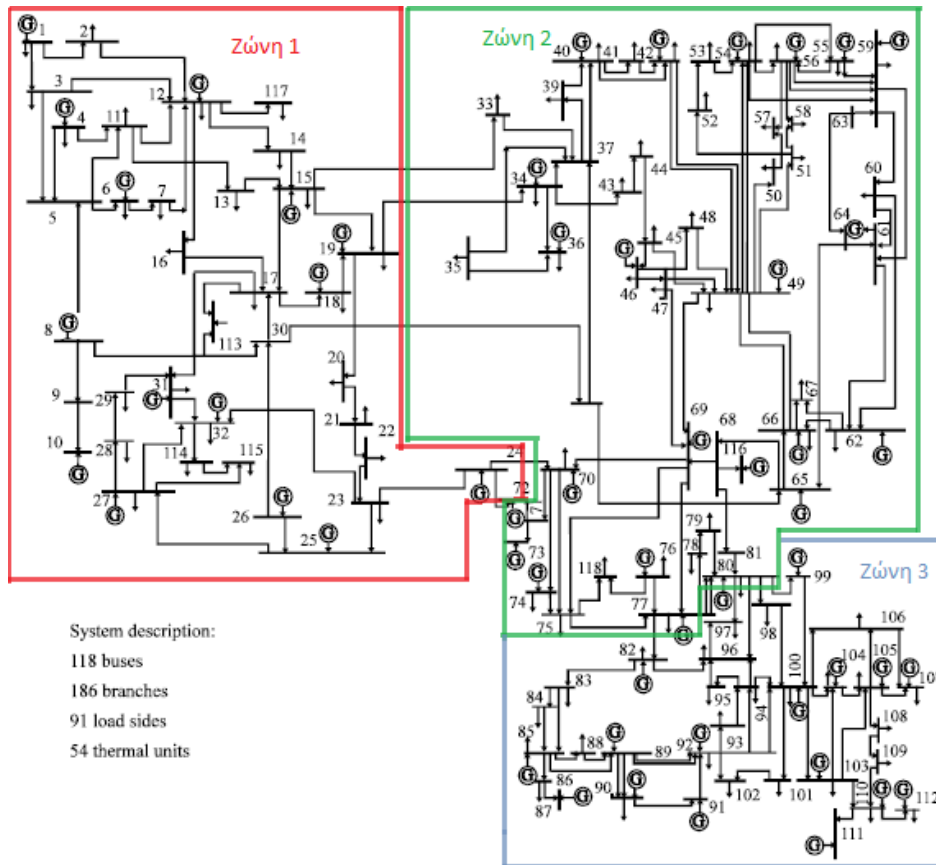
Σχήμα 4.3.3: Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες με χρήση του αλγόριθμου *k-means*

Πίνακας 4.3.2: Αποτελέσματα διαχωρισμού με χρήση του αλγόριθμου *k-means*

Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3
Αριθμός ζυγών	Αριθμός ζυγών	Αριθμός ζυγών
1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12, 13,14,15,16,17,18,19,20,21 22,23,25,26,27,28,29,30,31, 32,113,114,115,117	24,33,34,35,36,37,38,39, 40,41,42,43,44,45,46,47,48 49,50,51,52,53,54,55,56,57 57,58,59,60,61,62,63,64,65, 66,67,68,69,70,71,72,73,74, 75,76,77,78,79,80,81,116,118	82,83,84,85,86,87,88, 89,90,91,92,93,94,94,95, 96,97,98,99,100,101,102, 103,104,105,106,107,108, 109,110,111,112

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε ο ίδιος αλγόριθμος φασματικής ομαδοποίησης που αναφέρθηκε παραπάνω αλλά με τη χρήση του αλγόριθμου *k-medoids* στο τελευταίο βήμα αντί του αλγόριθμου *k-means*. Έτσι πραγματοποιήθηκε ο διαχωρισμός του δικτύου σε τρεις ομάδες.

Ο διαχωρισμός του δικτύου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.3.4: Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες με χρήση του αλγόριθμου *k-medoids*

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, ο διαχωρισμός που προκύπτει με τη χρήση του αλγόριθμου *k-medoids* είναι σχεδόν ο ίδιος με αυτόν που προκύπτει με τη χρήση του *k-means*. Η μόνη διαφορά παρατηρείται στο ζυγό 24 που τώρα τοποθετείται στη ζώνη 1 ενώ με τη χρήση του *k-means* τοποθετείται στη ζώνη 2.

Πίνακας 4.3.3: Αποτελέσματα διαχωρισμού με χρήση του αλγόριθμου *k-medoids*

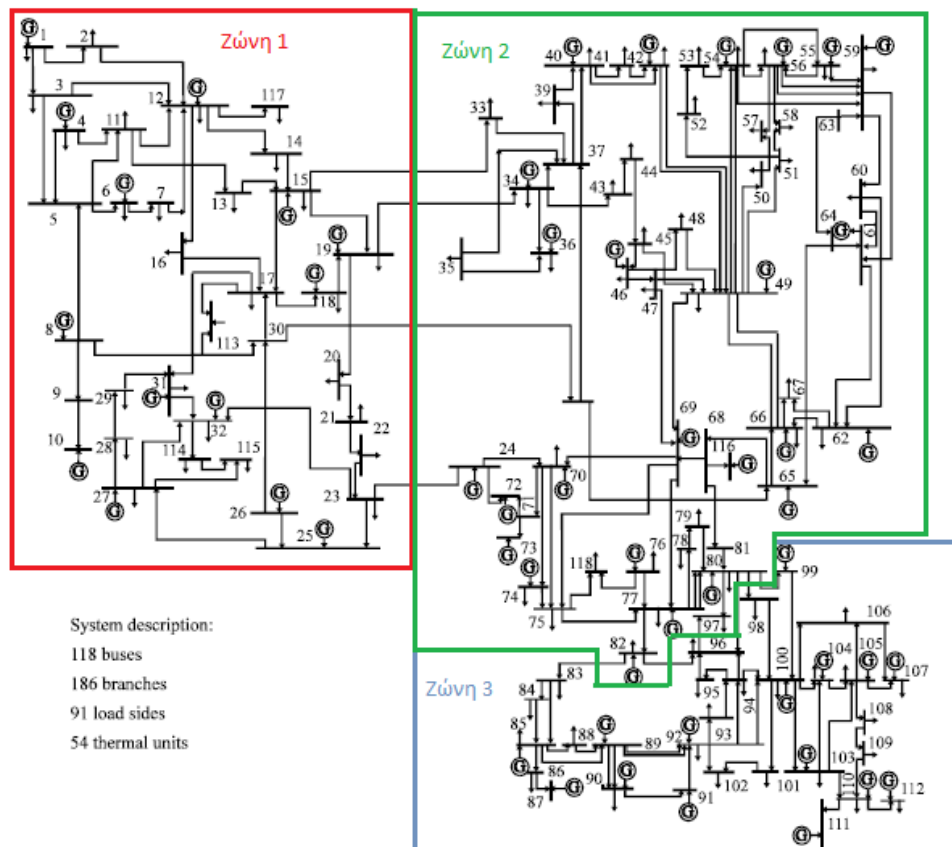
Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3
Αριθμός ζυγών	Αριθμός ζυγών	Αριθμός ζυγών
1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12, 13,14,15,16,17,18,19,20,21 22,23,24,25,26,27,28,29,30, 31,32,113,114,115,117	33,34,35,36,37,38,39, 40,41,42,43,44,45,46,47,48 49,50,51,52,53,54,55,56,57 57,58,59,60,61,62,63,64,65, 66,67,68,69,70,71,72,73,74, 75,76,77,78,79,80,81,116,118	82,83,84,85,86,87,88, 89,90,91,92,93,94,94,95, 96,97,98,99,100,101,102, 103,104,105,106,107,108, 109,110,111,112

Με τη χρήση της φασματικής ομαδοποίησης και των αλγορίθμων *k-means* και *k-medoids* έγινε ο διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες. Για τον έλεγχο της στιβαρότητας της αποτελεσματικότητας των αλγορίθμων ομαδοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν εφαρμόστηκαν οι παρακάτω διαταραχές στο δίκτυο των 118-ζυγών της IEEE :

- Απώλεια γραμμών στο δίκτυο: οι πλευρές του γράφου που δημιουργήθηκε και που συνδέουν τις κορυφές 4-11 και 21-22 στη ζώνη 1, 35-36 και 60-62 στη ζώνη 2, 82-83 και 100-106 διακόπηκαν με σκοπό την αλλαγή της δομής του δικτύου.
- Αύξηση του φορτίου: Πραγματοποιήθηκε αύξηση της ενεργού και αέργου ισχύος όλων των φορτίων κάθε ζώνης. Διαταραχές 5%,10% και 20% πραγματοποιήθηκαν στα φορτία κάθε ζώνης

Με τη διακοπή των πλευρών που συνδέουν τους ζυγούς 4 και 11, 21 και 22 στη ζώνη 1 και εφαρμογή του αλγορίθμου ομαδοποίησης παρατηρούμε ότι ο ζυγός 24 μεταφέρεται στη ζώνη 1 ενώ όλοι οι υπόλοιποι ζυγοί παραμένουν στις ομάδες που βρίσκονταν και πριν τη διαταραχή. Με τη διακοπή των πλευρών που συνδέουν τους ζυγούς 35 και 36, 60 και 62 στη ζώνη 2 παρατηρούμε ότι και πάλι η ομαδοποίηση προκύπτει όπως πριν. Τέλος με τη διακοπή των γραμμών που συνδέουν τους ζυγούς 82 και 83, 100 και 106 μεταφέρονται οι ζυγοί 82 και 97 από τη ζώνη 3 που βρίσκονταν πριν την απώλεια των γραμμών, στη ζώνη 2.

Παρακάτω φαίνεται ο διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες μετά την απώλεια κάποιων γραμμών



Σχήμα 4.3.5: Διαχωρισμός του δικτύου μετά την απώλεια γραμμών (*k-means*)

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, δεν έχουμε σημαντική διαφορά στις ομάδες που προκύπτουν από την ομαδοποίηση παρόλο που διακόπτονται οι συνδέσεις μεταξύ ορισμένων ζυγών.

Κατά την αύξηση των φορτίων σε κάθε ζώνη κατά 5%,10% και 20% και εφαρμογή του αλγόριθμου ομαδοποίησης παρατηρήθηκαν μικρές αλλαγές στα σύνορα των ζωνών 2 και 3. Πιο συγκεκριμένα για αύξηση του φορτίου κατά 20% οι ζυγοί 82,96,97,98,99 μεταφέρθηκαν από τη ζώνη 3 στη ζώνη 2.

Όπως και κατά την απώλεια γραμμών, οι διαφορές που παρατηρούνται στις ομάδες που δημιουργούνται είναι πολύ μικρές και πραγματοποιούνται στα σύνορα μεταξύ διαφορετικών ομάδων. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την ομαδοποίηση είναι στιβαρός και ομαδοποιεί τα δεδομένα με επιθυμητό τρόπο.

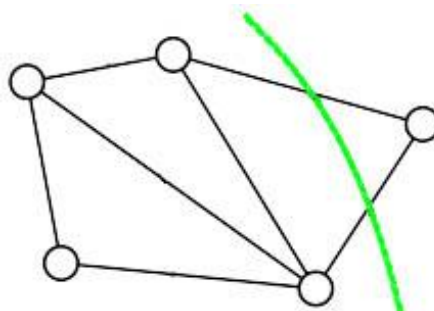
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - Διαχωρισμός του δικτύου – Αλγόριθμος mincut

Β 5.1 Ο αλγόριθμος minimum cut

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σκοπός του διαχωρισμού ενός συνόλου δεδομένων σε ομάδες είναι η δημιουργία συνόλων στα οποία ανήκουν δεδομένα με μεγαλύτερο βαθμό ομοιότητας σε σχέση με δεδομένα άλλων ομάδων. Όταν τα δεδομένα, όπως στην περίπτωση αυτής της εργασίας, δίνονται σε μορφή γράφου σκοπός είναι η δημιουργία ενός διαχωρισμού στο γράφο τέτοια ώστε οι πλευρές μεταξύ διαφορετικών ομάδων να έχουν πολύ μικρό βάρος, που σημαίνει ότι τα δεδομένα διαφορετικών ομάδων παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό ανομοιότητας, και οι πλευρές στο εσωτερικό μιας ομάδας να έχουν μεγάλο μέγεθος βάρος, δηλαδή σημεία μέσα στο ίδιο σύνολο παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό ομοιότητας.

Στη θεωρία των γράφων ο αλγόριθμος minimum cut είναι ουσιαστικά ο διαχωρισμός των κορυφών του γράφου σε δύο υποσύνολα, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με τουλάχιστον μία πλευρά. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό, στην περίπτωση γράφου χωρίς βάρη, ο αριθμός των ακμών που ενώνουν τις δύο ομάδες που δημιουργούνται πρέπει να είναι ο ελάχιστος, ενώ στην περίπτωση γράφου με βάρη, το άθροισμα των βαρών θα πρέπει να είναι το ελάχιστο δυνατό.

Παρακάτω φαίνεται ο διαχωρισμός ενός γράφου με τη χρήση της μεθόδου minimum cut



Σχήμα 5.1.1: minimum cut

Ο αλγόριθμος minimum cut μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον διαχωρισμό ενός γράφου σε περισσότερες από δύο ομάδες. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ενός πίνακα γειτνίασης W και k ο αριθμός των ομάδων που πρόκειται να δημιουργηθούν, η επίλυση του minimum cut προβλήματος είναι ουσιαστικά η επιλογή των υποσυνόλων A_1, A_2, \dots, A_k που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση:

$$\mathit{cut} (A_1, A_2, \dots, A_k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k W(A_i, \bar{A}_i) \quad (5.1.1)$$

(έχει αναφερθεί στα προηγούμενα ο ορισμός του : $W(A,B)=\sum_{i \in A, j \in B} w_{ij}$ ενώ το \bar{A}_i αποτελεί το συμπλήρωμα του A_i)

Πολλές φορές η επίλυση του αλγόριθμου για ελαχιστοποίηση της παραπάνω συνάρτησης οδηγεί σε όχι ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει γιατί, σε πολλές περιπτώσεις, το min cut πρόβλημα απλά διαχωρίζει έναν κόμβο από τον υπόλοιπο γράφο. Ο διαχωρισμός αυτός προφανώς και δεν είναι ικανοποιητικός καθώς τα υποσύνολα που θέλουμε να δημιουργήσουμε, δε θα πρέπει να έχουν μεγάλη διαφορά ως προς το πλήθος των στοιχείων που τα αποτελούν, ή διαφορετικά, να είναι 'ικανοποιητικώς μεγάλα' υποσύνολα. Για το λόγο αυτό, συχνά χρησιμοποιούνται παραλλαγές του minimum cut αλγόριθμου ώστε να λαμβάνονται τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Οι πιο γνωστές συναρτήσεις προς ελαχιστοποίηση που χρησιμοποιούνται αντί της συνάρτησης cut είναι η **RatioCut** και η *normalized cut*, **Ncut**.

Η συνάρτηση **RatioCut** για τον υπολογισμό του μεγέθους κάθε υποσυνόλου χρησιμοποιεί το πλήθος των κορυφών που το αποτελούν και συμβολίζεται με $|A|$.

Η συνάρτηση **Ncut** για τον υπολογισμό του μεγέθους κάθε υποσυνόλου χρησιμοποιεί το άθροισμα από όλα τα βάρη των πλευρών που καταλήγουν στις κορυφές που ανήκουν στο A και συμβολίζεται με $\mathit{vol}(A)$.

[14]

Παρακάτω φαίνονται οι ορισμοί των δύο συναρτήσεων:

$$\mathbf{RatioCut} (A_1, A_2, \dots, A_k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \frac{W(A_i, \bar{A}_i)}{|A_i|} = \sum_{i=1}^k \frac{\mathit{cut}(A_i, \bar{A}_i)}{|A_i|} \quad (5.1.2)$$

$$\mathbf{Ncut} (A_1, A_2, \dots, A_k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \frac{W(A_i, \bar{A}_i)}{\mathit{vol}(A_i)} = \sum_{i=1}^k \frac{\mathit{cut}(A_i, \bar{A}_i)}{\mathit{vol}(A_i)} \quad (5.1.3)$$

B 5.2 Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες με τη χρήση του minimum cut

Για τον διαχωρισμό του δικτύου των 118 ζυγών της IEEE σε ζώνες επιλέχθηκαν αρχικά τρία τυχαία σημεία - ζυγοί του δικτύου ως κέντρα. Στη συνέχεια κάθε ζυγός του δικτύου τοποθετήθηκε σε μία ομάδα ως εξής: αν υπήρχε γραμμή που συνδέει τον ζυγό με κάποιο κέντρο τότε το σημείο μπήκε στην ομάδα του κέντρου με το οποίο υπήρχε μεγαλύτερη ροή ισχύος (μεγαλύτερο βάρος στον πίνακα γειτνίασης W). Αν ο ζυγός δεν συνδέεται με κάποιο

από τα τρία κέντρα τότε θεωρούμε ροή ισχύος ίση με το μηδέν ($w_{ij}=0$). Σε περίπτωση που ο ζυγός δεν συνδέεται με κανένα από τα τρία κέντρα τότε υπολογίζεται η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του ζυγού και των τριών κέντρων και ο ζυγός μπαίνει στην ομάδα στην οποία κέντρο είναι ο ζυγός από τον οποίο απέχει τη μικρότερη απόσταση.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κέντρα κάθε ομάδας, όλους τους πιθανούς συνδυασμούς τριών ζυγών του δικτύου και τα αποτελέσματα ομαδοποίησης τοποθετούνται σε ένα συνολικό πίνακα (πίνακας Clusters). Τέλος για κάθε μία από τις πιθανές ομαδοποιήσεις που προέκυψαν, υπολογίζεται η συνάρτηση $Ncut$ και επιλέγεται ο διαχωρισμός του δικτύου για τον οποίο η συνάρτηση αυτή ελαχιστοποιείται. Συνοπτικά τα βήματα του αλγόριθμου που χρησιμοποιήθηκε είναι:

Είσοδος: Πίνακας γειτνίασης W του γράφου με βάρη που αναπαριστά το συγκεκριμένο δίκτυο

- Υπολόγισε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς 3 κέντρων για το δίκτυο των 118 ζυγών. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στον πίνακα centers ($m \times 3$ όπου m το πλήθος των συνδυασμών που προκύπτουν)
- Για κάθε συνδυασμό 3 σημείων ως κέντρα των ομάδων που πρόκειται να χωριστεί το δίκτυο:
 - Βάλε κάθε ένα από τα τρία κέντρα σε μία ομάδα
 - Βάλε κάθε ζυγό στην ομάδα που έχει ως κέντρο το σημείο με το οποίο η ροή ισχύος w_{ij} είναι η μέγιστη. Αν δεν υπάρχει σύνδεση του ζυγού με κάποιο κέντρο βάλε $w_{ij} = 0$.
 - Αν ο ζυγός δεν συνδέεται με γραμμή με κανένα από τα τρία κέντρα τότε:
 - Υπολόγισε την ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του ζυγού και κάθε κέντρου.
 - Βάλε τον ζυγό στην ομάδα που έχει κέντρο αυτό με το οποίο η Ευκλείδεια απόσταση γίνεται ελάχιστη.
 - Επανάλαβε τη διαδικασία για κάθε έναν από τους 118 ζυγούς
- Βάλε τα αποτελέσματα στον πίνακα clusters (ο πίνακας clusters περιλαμβάνει την ομαδοποίηση του δικτύου σε ζώνες για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς τριών κέντρων του δικτύου.
- Για όλους τους διαχωρισμούς του δικτύου που περιλαμβάνει ο πίνακας clusters υπολόγισε τη συνάρτηση $normalized\ cut$, $Ncut$
- Η ομαδοποίηση για την οποία η συνάρτηση $Ncut$ λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της είναι και η τελική ομαδοποίηση του δικτύου.

Έξοδος: ζώνες A_1, A_2, A_3 σύμφωνα με τις οποίες έγινε ο διαχωρισμός του δικτύου

Για το διαχωρισμό του δικτύου σε ζώνες δεν χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση cut γιατί όπως αναφέρθηκε, δεν δίνει επιθυμητά αποτελέσματα ομαδοποίησης. Για το λόγο αυτό

χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση $Ncut$ η οποία δίνει ως αποτέλεσμα επαρκώς μεγάλες ομάδες.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου με τη χρήση της συνάρτησης $Ncut$ για το δίκτυο των 118 ζυγών της ΙΕΕΕ φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.2.1: Αποτελέσματα διαχωρισμού με χρήση του $minimum\ cut$

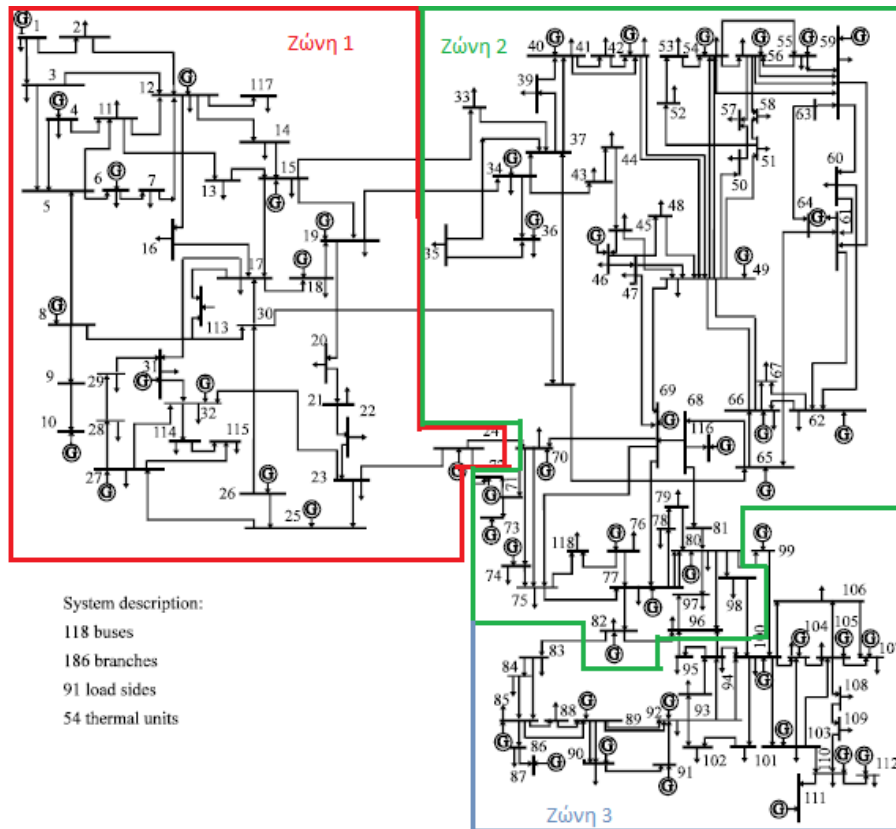
Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3
Αριθμός ζυγών	Αριθμός ζυγών	Αριθμός ζυγών
1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12, 13,14,15,16,17,18,19,20,21 22,23,24,25,26,27,28,29,30, 31,32,113,114,115,117	33,34,35,36,37,38,39, 40,41,42,43,44,45,46,47,48 49,50,51,52,53,54,55,56,57 57,58,59,60,61,62,63,64,65, 66,67,68,69,70,71,72,73,74, 75,76,77,78,79,80,81,97,98, 116,118	82,83,84,85,86,87,88, 89,90,91,92,93,94,94,95, 96,99,100,101,102, 103,104,105,106,107,108, 109,110,111,112

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, τα αποτελέσματα διαχωρισμού του δικτύου με τη χρήση αυτού του αλγόριθμου είναι σχεδόν ίδια με τα αποτελέσματα διαχωρισμού με τη χρήση του αλγόριθμου $k-means$ και $k-medoids$. Διαφορά παρατηρείται στους ζυγούς 97 και 98 που τώρα τοποθετούνται στην ζώνη 2 ενώ με τους αλγόριθμους $k-means$ και $k-medoids$ βρίσκονται στη ζώνη 3. Η διαφορά αυτή δεν είναι σημαντική και περιορίζεται μόνο στα σύνορα μεταξύ των ζωνών.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν διαταραχές στο δίκτυο με σκοπό τον έλεγχο της στιβαρότητας και της αποτελεσματικότητας του αλγόριθμου, όπως έγινε και με τη χρήση των προηγούμενων αλγόριθμων. Οι διαταραχές που εφαρμόστηκαν ήταν:

Απώλεια γραμμών στο δίκτυο: οι γραμμές 4-11 και 21-22 στη ζώνη 1, 35-36 και 60-62 στη ζώνη 2, 82-83 και 100-106 διακόπηκαν με σκοπό την αλλαγή της δομής του δικτύου.

Μετά την απώλεια των γραμμών ο διαχωρισμός του δικτύου παρέμεινε σχεδόν ίδιος με διαφορά μόνο τους ζυγούς 82 και 96 που μεταφέρθηκαν από τη ζώνη 3 στην ζώνη 2. Ο διαχωρισμός του δικτύου παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 5.2.1: Διαχωρισμός του δικτύου μετά την απώλεια γραμμών (Ncut)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο - Αλγόριθμος συνημιτόνου

Β 6.1 Διαχωρισμός του δικτύου – Αλγόριθμος με τη χρήση συνημιτόνου

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ένας ακόμα αλγόριθμος διαχωρισμού δεδομένων που βασίζεται στην φασματική ομαδοποίηση. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό, υπολογίζεται ο πίνακας Laplace του γράφου που αντιπροσωπεύει το δίκτυο των 118 ζυγών της IEEE και υπολογίζονται οι k μικρότερες ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις ιδιοτιμές αυτές, όπου k ο αριθμός των ομάδων που πρόκειται να δημιουργηθούν. Στη συνέχεια ο πίνακας διαχωρισμού P ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$P = Z(X) X X^T Z(X) \quad (6.1.1)$$

Όπου X ο πίνακας με τα k ιδιοδιανύσματα, X^T ο ανάστροφος πίνακας του X , και ο πίνακας Z είναι διαγώνιος και ορίζεται ως εξής:

$$Z_{ii} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{j=1}^k (X^T(j,i))^2}} \quad (6.1.2)$$

Ο πίνακας διαχωρισμού P είναι ένας τετραγωνικός πίνακας (στην περίπτωση που μελετάμε είναι διαστάσεων 118×118) και το στοιχείο του πίνακα P_{ij} είναι το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ των στοιχείων i και j και αντιπροσωπεύει το πόσο κοντά βρίσκονται οι ζυγοί αυτοί στο δίκτυο.

Για παράδειγμα παρακάτω φαίνεται ο πίνακας P για τους πρώτους 11 ζυγούς του δικτύου των 118 ζυγών της IEEE

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0.999882	0.999334	0.998052	0.996405	0.998554	0.999877	0.992336	0.992983	0.993293	0.998983
2	0.999882	1	0.998658	0.996979	0.994989	0.997613	0.999519	0.990325	0.991054	0.991404	0.998175
3	0.999334	0.998658	1	0.999664	0.998832	0.99985	0.999784	0.996183	0.996636	0.99685	0.999963
4	0.998052	0.996979	0.999664	1	0.999749	0.999963	0.998908	0.998112	0.998426	0.998572	0.99985
5	0.996405	0.994989	0.998832	0.999749	1	0.999518	0.997611	0.999237	0.999432	0.999518	0.999211
6	0.998554	0.997613	0.99985	0.999963	0.999518	1	0.999274	0.997544	0.997904	0.998073	0.999962
7	0.999877	0.999519	0.999784	0.998908	0.997611	0.999274	1	0.994151	0.994715	0.994984	0.999567
8	0.992336	0.990325	0.996183	0.998112	0.999237	0.997544	0.994151	1	0.999986	0.999968	0.996897
9	0.992983	0.991054	0.996636	0.998426	0.999432	0.997904	0.994715	0.999986	1	0.999996	0.997304
10	0.993293	0.991404	0.99685	0.998572	0.999518	0.998073	0.994984	0.999968	0.999996	1	0.997496
11	0.998983	0.998175	0.999963	0.99985	0.999211	0.999962	0.999567	0.996897	0.997304	0.997496	1

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα όσο μικρότερο είναι το συνημίτονο τόσο πιο μακριά βρίσκονται οι αντίστοιχες κορυφές του γράφου δηλαδή τόσο πιο μακριά βρίσκονται οι αντίστοιχοι ζυγοί του δικτύου.

Για την ομαδοποίηση των δεδομένων πρέπει να υπολογιστούν k κέντρα, ένα για κάθε ομάδα. Για το σκοπό αυτό αρχικά επιλέγεται τυχαία μια κορυφή του γράφου ως κεντρικός ζυγός για τη ζώνη 1 (c_1) και στη συνέχεια, για την εύρεση των υπόλοιπων $k-1$ κέντρων ελαχιστοποιείται η συνάρτηση:

$$\text{Min } Y = (1-P_{ic1}) + (1-P_{ic2}) + \dots + (1-P_{ick}) \quad (6.1.3)$$

[15]

Πιο αναλυτικά τα βήματα του αλγόριθμου είναι:

Είσοδος: Πίνακας γειτνίασης W του γράφου με βάρη που αναπαριστά το συγκεκριμένο δίκτυο και αριθμός των ομάδων που πρέπει να διαχωριστεί το δίκτυο k

Βήμα 1^ο: Υπολογισμός του διαγώνιου πίνακα Z και του πίνακα ομαδοποίησης P σύμφωνα με τις σχέσεις που ορίστηκαν παραπάνω.

Βήμα 2^ο: Επιλέγεται τυχαία μία κορυφή του γράφου ως κέντρο της ζώνης 1. Έστω center1 η κορυφή αυτή.

Βήμα 3^ο: Για την εύρεση του κέντρου της δεύτερης ομάδας βρίσκεται η κορυφή του γράφου c για την οποία το συννημίτονο $P_{c,center1}$ γίνεται ελάχιστο. Με τον τρόπο αυτό τα κέντρα των ομάδων που θα δημιουργηθούν δε θα βρίσκονται κοντά το ένα με το άλλο. Έστω center2 το κέντρο της δεύτερης ομάδας.

Βήμα 4^ο: Για την εύρεση του κέντρου της τρίτης ομάδας center3, αναζητάται η κορυφή του γράφου για την οποία το $P_{center3,center1} + P_{center3,center2}$ γίνεται ελάχιστο.

Βήμα 5^ο: Υπολογίζεται η συνάρτηση $Min Y = (1 - P_{icenter1}) + (1 - P_{icenter2}) + (1 - P_{icenter3})$

Βήμα 6^ο: Τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται για κέντρα της πρώτης ομάδας όλους τους ζυγούς του δικτύου.

Βήμα 7^ο: Ως κέντρα του δικτύου ορίζονται τα center1, center2, center3 για τα οποία η συνάρτηση MinY ελαχιστοποιείται.

Βήμα 8^ο: Κάθε ζυγός του δικτύου i τοποθετείται στην ομάδα που έχει ως κέντρο τον ζυγό με τον οποίο το συννημίτονο $P_{i,center}$ είναι μεγαλύτερο.

Έξοδος: ζώνες A_1, A_2, A_3 σύμφωνα με τις οποίες έγινε ο διαχωρισμός του δικτύου

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του παραπάνω αλγόριθμου στο δίκτυο των 118 ζυγών της IEEE. Το δίκτυο διαχωρίστηκε σε 3 ζώνες ως εξής:

Πίνακας 6.1.1: Αποτελέσματα διαχωρισμού με χρήση του αλγόριθμου συννημίτνου

Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3
Αριθμός ζυγών	Αριθμός ζυγών	Αριθμός ζυγών
1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12, 13,14,15,16,17,18,19,20,21 22,23,24,25,26,27,28,29,30, 31,32,33,113,114,115,117	34,35,36,37,38,39,40,41,42, 43,44,45,46,47,48,49,50,51, 52,53,54,55,56,57,58,59,60, 61,62,63,64,65,66,67,68,69, 70,71,72,73,74,75,76,77,78, 79,80,81,97,98,116,118	82,83,84,85,86,87,88, 89,90,91,92,93,94,94,95, 96,99,100,101,102,103 104,105,106,107,108, 109,110,111,112

Ο διαχωρισμός του δικτύου διαφέρει σε πολύ μικρό βαθμό από τις ομαδοποιήσεις που προκύπτουν με τη χρήση των προηγούμενων αλγόριθμων. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μια σύγκριση της ομαδοποίησης που προκύπτει με τη χρήση του αλγόριθμου k-means και του αλγόριθμου που περιγράφηκε σε αυτό το κεφάλαιο.

Πίνακας 6.1.2: Σύγκριση διαχωρισμού του δικτύου με χρήση του αλγόριθμου *k-means* και του αλγόριθμου συνημιτόνου

Δίκτυο 118 ζυγών	Αλγόριθμος <i>k-means</i>	Αλγόριθμος συνημιτόνου
Ζώνη 1 Κοινοί ζυγοί	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21 22,23,,25,26,27,28,29,30,31,32,113,114,115,117	
Ζώνη 1 Διαφορετικοί ζυγοί	24,33	
Ζώνη 2 Κοινοί ζυγοί	34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51, 52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69, 70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,97,98,116,118	
Ζώνη 2 Διαφορετικοί ζυγοί	24,33,97,98	
Ζώνη 3 Κοινοί ζυγοί	82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,94,95,96,99 100,101,102,103,104,105,106,107,108,109,110,111,112	
Ζώνη 3 Διαφορετικοί ζυγοί	97,98	

Για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του αλγόριθμου εφαρμόστηκαν διαταραχές στο δίκτυο και πραγματοποιήθηκε πάλι ο διαχωρισμός. Η ομαδοποίηση που προκύπτει μετά την εφαρμογή διαταραχών διαφέρει ελάχιστα από την ομαδοποίηση πριν εφαρμοστούν διαταραχές. Διαφορές παρατηρούνται μόνο στα σύνορα των ομάδων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για αύξηση 5% των φορτίων του δικτύου οι ζυγοί 24 και 33 μεταφέρονται στη ζώνη 2 και ο ζυγός 96 μεταφέρεται από τη ζώνη 3 στη ζώνη 2. Για αύξηση 10% των φορτίων μεταφέρεται επιπλέον ο ζυγός 19 από τη ζώνη 1 στη ζώνη 2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο – Αλγόριθμος Peer to Peer

Β 7.1 Διαχωρισμός του δικτύου – Αλγόριθμος P2P

Τα δίκτυα peer to peer τα οποία χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια σε διάφορους επιστημονικούς τομείς, είναι ουσιαστικά τα καταναμημένα συστήματα τα οποία παρουσιάζουν ως κύρια χαρακτηριστικά:

- 1) Αποκεντρωμένα συστήματα καθώς δεν απαιτείται η γνώση της συνολικής τοπολογίας του δικτύου, αλλά αντίθετα απαιτείται η γνώση μόνο των γειτονικών κόμβων.
- 2) Συστήματα με τη δυνατότητα προσαρμογής σε γρήγορες αλλαγές της τοπολογίας τους οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε απότομες/απρόβλεπτες μετακινήσεις κόμβων (από και προς το δίκτυο).

Και στην περίπτωση αυτή το δίκτυο μπορεί να αναπαρασταθεί από έναν μη κατευθυνόμενο γράφο που για το δίκτυο της εργασίας αυτής, οι κορυφές του γράφου είναι οι ζυγοί του δικτύου και οι πλευρές του γράφου αντιπροσωπεύουν τις γραμμές μεταξύ των ζυγών. Στον αλγόριθμο αυτό θα χρησιμοποιηθούν και δύο ακόμα έννοιες από τη θεωρία των γράφων, η έννοια του μονοπατιού ενός γράφου και η έννοια του συνεκτικού γράφου:

Μονοπάτι ενός γράφου $P=(v_0, v_1, \dots, v_k)$, μήκους k είναι μια ακολουθία από κορυφές έτσι ώστε να υπάρχει πλευρά (v_i, v_{i+1}) για $0 \leq i \leq k-1$ (με όλες τις πλευρές διαφορετικές)

Συνεκτικός λέγεται ο μη κατευθυνόμενος γράφος αν για κάθε ζεύγος κορυφών του υπάρχει μονοπάτι που τους συνδέει.

Η κεντρική ιδέα του αλγόριθμου αυτού είναι η εύρεση k κόμβων του δικτύου οι οποίοι ορίζονται ως 'δημιουργοί κόμβοι' (originators nodes), (ο τρόπος εύρεσης αυτών των κόμβων περιγράφεται παρακάτω), και στη συνέχεια η παραγωγή σημάτων από τους originators κόμβους τα οποία διαδίδονται στους γειτονικούς κόμβους τους. Στην επόμενη επανάληψη κάθε κόμβος που έλαβε σήμα, στέλνει ένα νέο στους γειτονικούς του και με αυτό τον τρόπο σήματα διαδίδονται σταδιακά σε όλο το δίκτυο. Κάθε κόμβος V_i κρατά σε k μεταβλητές τα το άθροισμα των σημάτων που έφτασαν στον V_i από τον Originator i . Έτσι κάθε κόμβος V_i μπαίνει στην ομάδα που έχει ως originator τον κόμβο από τον οποίο ξεκίνησαν τα περισσότερα σήματα που έλαβε. Με αυτό τον τρόπο το δίκτυο διαχωρίζεται σε k ομάδες.

Πιο αναλυτικά, τα βήματα του αλγόριθμου που χρησιμοποιήθηκε για τον διαχωρισμό του δικτύου των 118 της IEEE σε ζώνες, περιγράφονται παρακάτω:

Ο γράφος ο οποίος αναπαριστά το δίκτυο είναι με βάρη. Έστω W ο πίνακας γειτνίασης και V_i ο κόμβος i του γράφου.

1) Προσδιορισμός κόμβων 'Originators':

Ένας κόμβος V_i θεωρείται καλή επιλογή για να ορισθεί ως originator κόμβος όταν συγκεντρώνει μεγαλύτερο πλήθος σημάτων τα οποία ξεκίνησαν από αυτόν, σε σχέση με το πλήθος των σημάτων που συγκεντρώνει και τα οποία ξεκίνησαν από κάποιο άλλο κόμβο originator.

Όμως ο προσδιορισμός των Originator κόμβων δεν είναι εφικτός με αυτόν τον τρόπο, καθώς το άθροισμα των σημάτων που λαμβάνει κάθε κόμβος από κάθε originator δεν μπορεί να καθοριστεί πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται μια προσεγγιστική μέθοδος στην οποία για κάθε κόμβο V_i του γράφου υπολογίζεται η πιθανότητα επιστροφής στον κόμβο αυτό σε δύο βήματα αν ξεκινήσουμε μια τυχαία διαδρομή στον γράφο ξεκινώντας από τον κόμβο V_i .

Ο γράφος που αντιπροσωπεύει το ηλεκτρικό δίκτυο που μελετάται είναι γράφος με βάρη και η πιθανότητα που περιγράφηκε προηγουμένως δίνεται από τη σχέση:

$$Probability(V_l) = \sum_{V_i \in Nbr(V_l)} \left(\frac{W(V_l, V_i)}{\sum_{V_j \in Nbr(V_l)} W(V_l, V_j)} \times \frac{W(V_i, V_l)}{\sum_{V_h \in Nbr(V_i)} W(V_i, V_h)} \right)$$

=>

$$Probability(V_l) = \sum_{V_i \in Nbr(V_l)} \left(\frac{W(V_l, V_i)^2}{\sum_{V_j \in Nbr(V_l)} W(V_l, V_j) \times \sum_{V_h \in Nbr(V_i)} W(V_i, V_h)} \right) \quad (7.1.1)$$

Οι κόμβοι με μεγαλύτερη πιθανότητα **Probability (V_l)** από ένα κατώφλι (threshold), ορίζονται ως οι originators.

Στον αλγόριθμο που σχεδιάστηκε για τον διαχωρισμού του δικτύου των 118 ζυγών της IEEE, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι όλες οι ομάδες στις οποίες θα διαχωριστεί το δίκτυο θα περιλαμβάνουν τουλάχιστον ένα κόμβο με γεννήτρια καθώς και κάθε κόμβος που ορίζεται ως originator απέχει επαρκώς από τους άλλους κόμβους originators, ορίστηκαν ως originators buses οι κόμβοι που έχουν τη μεγαλύτερη Probability, διαθέτουν γεννήτρια και το ελάχιστο μονοπάτι μεταξύ τους δεν είναι μικρότερο των έξι πλευρών.

- 2) Έστω O_i με i=1,2,...,k οι originators κόμβοι που βρέθηκαν από την προηγούμενη διαδικασία. Στο βήμα αυτό, κάθε ένας από τους originators κόμβους στέλνει ένα σήμα στους γειτονικούς του. Κάθε κόμβος i λαμβάνει ένα σήμα από τον originator O_i που δίνεται από τη σχέση:

$$MSG_i = \frac{W(O_l, V_i)}{\sum_{V_j \in Nbr(O_l)} W(O_l, V_j)} \quad (7.1.2)$$

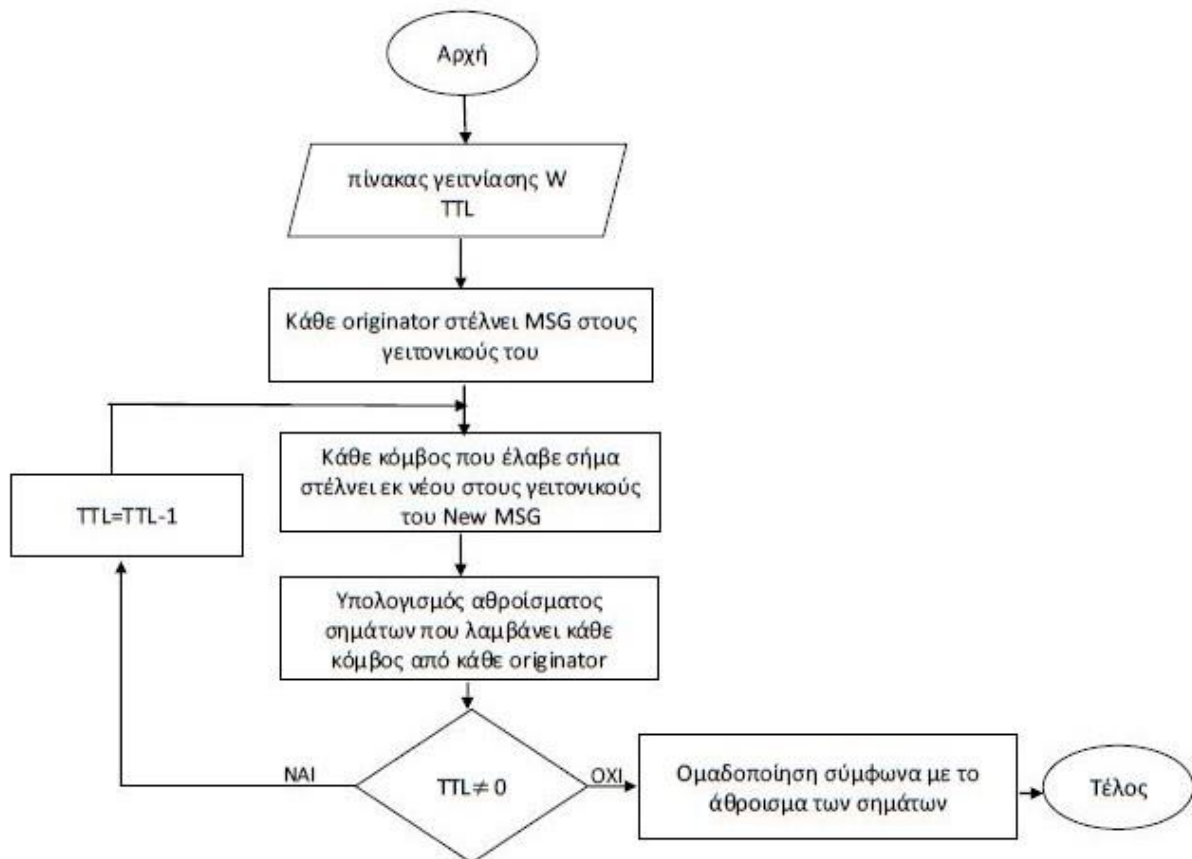
- 3) Με τον ίδιο τρόπο, ο κόμβος V_i που έλαβε σήμα MSG_i από κάποιον originator, στέλνει εκ νέου σήμα στους γειτονικούς τους, που δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$NewMSG_k = \frac{MSG_i \times W(V_i, V_k)}{\sum_{V_j \in Nbr(V_i)} W(V_i, V_j)} \quad (7.1.3)$$

- 4) Κάθε κόμβος υπολογίζει το άθροισμα των σημάτων που λαμβάνει από κάθε originator node.
- 5) Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το TTL να γίνει ίσο με το μηδέν. Η μεταβλητή TTL δίνεται ως είσοδος του αλγόριθμου και αντιπροσωπεύει τον αριθμό των επαναλήψεων που θα γίνουν στη μετάδοση σημάτων μέχρι τα σήματα που θα αναμεταδίδονται γίνουν πολύ μικρά.

- 6) Δημιουργία ομάδων κόμβων: Δημιουργούνται k ομάδες, όπου k ο αριθμός των κόμβων που έχουν ορισθεί ως originators nodes. Κάθε ένας από τους κόμβους του δικτύου μπαίνει στην ομάδα του originator για τον οποίο το άθροισμα που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα είναι μεγαλύτερο.[16]

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου P2P που χρησιμοποιήθηκε για το διαχωρισμό του δικτύου.



Σχήμα 7.1.1: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου P2P

Ο παραπάνω αλγόριθμος εφαρμόστηκε για τον διαχωρισμό του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας 118 ζυγών της IEEE. Ως 'originators' κόμβοι προέκυψαν οι κόμβοι 10,49 και 89 οι οποίοι διαθέτουν γεννήτρια και απέχουν αρκετή απόσταση μεταξύ τους. Στον πίνακα που παρουσιάζεται παρακάτω φαίνεται ο διαχωρισμός του δικτύου που προκύπτει με τον αλγόριθμο P2P:

Πίνακας 7.1.1: Αποτελέσματα διαχωρισμού με χρήση του αλγόριθμου P2P

Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3
Αριθμός ζυγών	Αριθμός ζυγών	Αριθμός ζυγών
1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12, 13,14,15,16,17,18,19,20,21 22,23,25,26,27,28,29,30, 31,32,113,114,115,117	24,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42, 43,44,45,46,47,48,49,50,51, 52,53,54,55,56,57,58,59,60, 61,62,63,64,65,66,67,68,69, 70,71,72,73,74,75,76,77,78, 79,81,97,98,116,118	80,82,83,84,85,86,87,88, 89,90,91,92,93,94,94,95, 96,99,100,101,102, 103,104,105,106,107,108, 109,110,111,112

Όπως γίνεται κατανοητό από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα, Οι διαφορές που παρατηρούνται σε σχέση με διαχωρισμούς του δικτύου με άλλους αλγόριθμους είναι πολύ μικρές και περιορίζονται μόνο σε ζυγούς που βρίσκονται σε σύνορα των ζωνών που προκύπτουν.

B 7.2 Αλγόριθμος P2P και ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $Ncut$

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε ο εξής αλγόριθμος:

- Αρχικά υπολογίστηκε για τον παραπάνω διαχωρισμό του δικτύου η συνάρτηση $Ncut$:

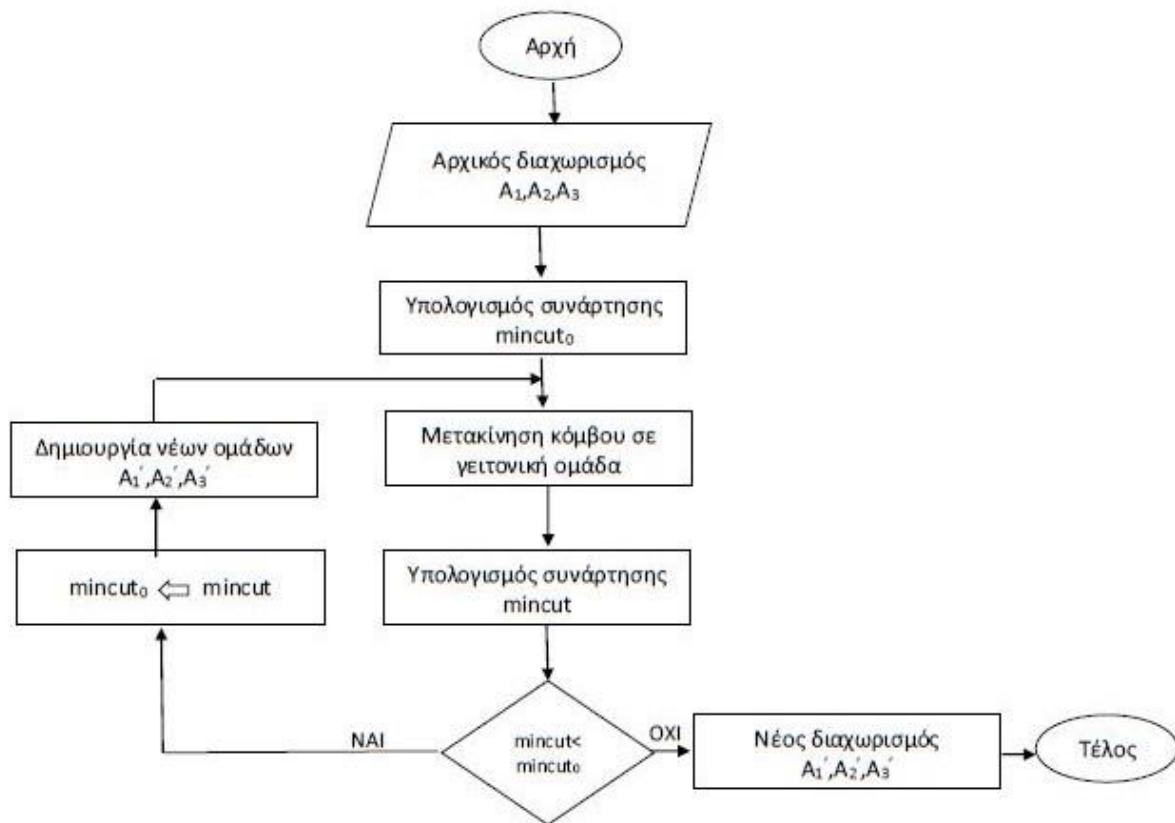
$$NCut(A_1, A_2, A_3) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \frac{W(A_i, \bar{A}_i)}{vol(A_i)} = \sum_{i=1}^k \frac{cut(A_i, \bar{A}_i)}{vol(A_i)}, \text{ όπου } k=3 \text{ καθώς έχουν}$$

δημιουργηθεί τρεις ομάδες δεδομένων.

- Έστω $Ncut_0$ η τιμή της συνάρτησης $Ncut$ που προκύπτει για αυτά τα δεδομένα.
- Έστω V_1, V_2, \dots, V_n οι κόμβοι που αλληλεπιδρούν με κόμβους άλλων ομάδων, δηλαδή ζυγοί οι οποίοι ενώνονται με κάποια γραμμή με ζυγούς γειτονικών ομάδων.
- Για κάθε έναν από τους ζυγούς V_1, V_2, \dots, V_n πραγματοποιείται μεταφορά του στην ομάδα με την οποία αλληλεπιδρά και υπολογίζεται εκ νέου η συνάρτηση $Ncut$. Σε κάθε περίπτωση πραγματοποιείται μόνο μία αλλαγή ομάδας κόμβου.
- Σκοπός είναι η μεταφορά ζυγών που αλληλεπιδρούν με γειτονικές ομάδες με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η ομαδοποίηση που θα προκύψει να ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση $Ncut$.

Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται η επαναλήψεις, που σε κάθε μια επανάληψη ένας ζυγός μεταφέρεται σε γειτονική ομάδα μέχρις ότου καμία αλλαγή να μην προκαλεί περαιτέρω μείωση της συνάρτησης $Ncut$.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου που σχεδιάστηκε με σκοπό την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $Ncut$.



Σχήμα 7.2.1: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου P2P-Ncut

Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτού, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση $minimincut$ ο ζυγός 24 μεταφέρεται από τη ζώνη 2 στη ζώνη 1 και οι ζυγοί 80,97,98 μεταφέρονται από τη ζώνη 3 στη ζώνη 2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

Β 8.1 Αποτελέσματα-Σχολιασμός

Ο διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες πραγματοποιήθηκε με διάφορους αλγόριθμους ομαδοποίησης και συνοπτικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 8.1.1: Αποτελέσματα διαχωρισμού του δικτύου με τη χρήση διάφορων αλγορίθμων ομαδοποίησης

Αλγόριθμος	Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3
k-means	1-23,25-32, 113,114,115,117	24,33-81,116,118	82-112
K-medoids	1-32, 113,114,115,117	33-81,116,118	82-112
Ncut	1-32, 113,114,115,117	33-81,97,98,116,118	82-96,99-112
συνημιτόνου	1-33, 113,114,115,117	32-81,97,98,116,118	82-96,99-112
P2P	1-23,25-32, 113,114,115,117	24, 33-81,116,118	80,82-112

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος P2P που εφαρμόστηκε για τον διαχωρισμό του δικτύου των 118 ζυγών της IEEE εμφανίζει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τους άλλους αλγόριθμους που υλοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος P2P χρησιμοποιεί αποκεντρωμένο σχεδιασμό σε αντίθεση με τους άλλους αλγόριθμους που υλοποιήθηκαν και χρησιμοποιούν κεντρικό σχεδιασμό. Έτσι, διαθέτει όλα τα πλεονεκτήματα του αποκεντρωμένου σχεδιασμού και ως αποτέλεσμα είναι ταχύτερος από τους άλλους αλγόριθμους που παρουσιάστηκαν στην εργασία αυτή.

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι ο διαχωρισμός του δικτύου δεν διαφέρει για εφαρμογή διαφορετικών αλγορίθμων ομαδοποίησης παρά μόνο για κάποιους ζυγούς στα σύνορα των ομάδων.

Για το λόγο αυτό θεωρούμε το διαχωρισμό

ζώνη 1: ζυγοί 1-33,113,114,115,117

ζώνη 2: ζυγοί 34-81,97,98,116,118

ζώνη 3: ζυγοί 82-96,99-112

Ο διαχωρισμός αυτός θα χρησιμοποιηθεί και στο τρίτο μέρος της εργασίας για τον έλεγχο της τάσης.

Για να διαπιστωθεί αν έχει γίνει σωστά ο διαχωρισμός του δικτύου των 118 ζυγών της IEEE σε ζώνες, εφαρμόστηκε αύξηση φορτίου κατά 5%, 10% και 20% ξεχωριστά στα φορτία κάθε

ζώνης με σκοπό τη μέτρηση της μεταβολής της τάσης των ζυγών και συνεπώς τη μέτρηση του βαθμού αλληλεπίδρασης μεταξύ των ζωνών.

Για το λόγο αυτό υπολογίστηκε η παρακάτω σχέση για κάθε ζώνη και για διαταραχές 5%,10%,20% στα φορτία κάθε ζώνης, όπως φαίνεται και στους πίνακες που ακολουθούν:

$$V_{var}(\%) = \frac{|v_{ad(avg)} - v_{bd(avg)}|}{v_{bd(avg)}} \quad (8.1.1)$$

Όπου V_{var} ο μέσος όρος μεταβολής της τάσης, $v_{ad(avg)}$ ο μέσος όρος τάσης μετά τη διαταραχή και $v_{bd(avg)}$ ο μέσος όρος της τάσης πριν την διαταραχή.

Για εφαρμογή διαταραχών στα φορτία της ζώνης 1 προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 8.1.2: μεταβολής της τάσης (μέσος όρος) για 5% αύξηση φορτίου στη ζώνη 1

5% αύξηση φορτίου ζώνης 1	μέσος όρος τάσεων πριν τη διαταραχή	μέσος όρος τάσεων μετά τη διαταραχή	V_{var} (%)
ζώνη 1	0.983913111	0.9835	0.040918065
ζώνη 2	0.988038935	0.987919496	0.01208851
ζώνη 3	0.984990083	0.984988677	0.000142684

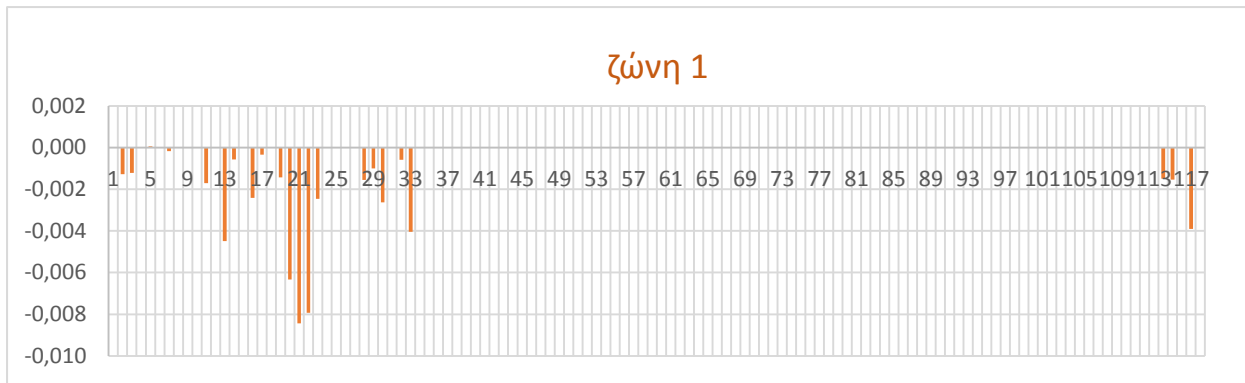
Πίνακας 8.1.3: μεταβολής της τάσης (μέσος όρος) για 10% αύξηση φορτίου στη ζώνη 1

10% αύξηση φορτίου ζώνης 1	μέσος όρος τάσεων πριν τη διαταραχή	μέσος όρος τάσεων μετά τη διαταραχή	V_{var} (%)
ζώνη 1	0.983913111	0.983128549	0.079738917
ζώνη 2	0.988038935	0.987772345	0.026981755
ζώνη 3	0.984990083	0.984987233	0.000289265

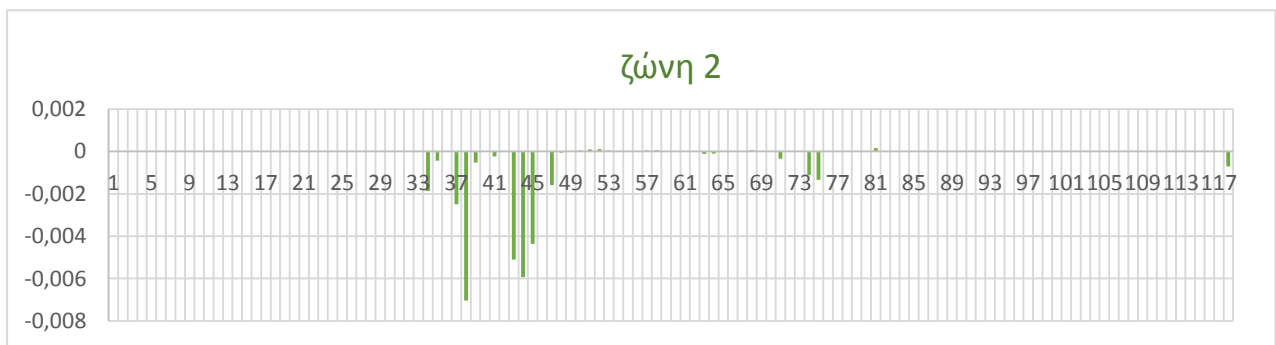
Πίνακας 8.1.4: μεταβολής της τάσης (μέσος όρος) για 20% αύξηση φορτίου στη ζώνη 1

20% αύξηση φορτίου ζώνης 1	μέσος όρος τάσεων πριν τη διαταραχή	μέσος όρος τάσεων μετά τη διαταραχή	V_{var} (%)
ζώνη 1	0.983913111	0.982415095	0.152250829
ζώνη 2	0.988038935	0.987410906	0.063563142
ζώνη 3	0.984990083	0.984984226	0.000594631

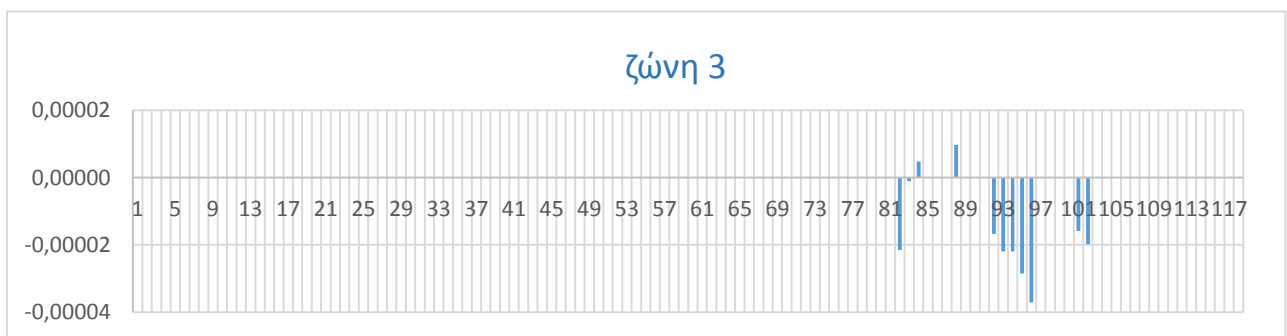
Όπως παρατηρείται από τους παραπάνω πίνακες η μεταβολή της ισχύος των φορτίων που ανήκουν στη ζώνη 1 επηρεάζει περισσότερο τις τάσεις των ζυγών της ζώνης 1 σε σχέση με τις τάσεις των ζυγών που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες. Γραφικά η μεταβολή των τάσεων των ζυγών για διαταραχή στα φορτία της ζώνης 1 κατά 20% φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 8.1.1: Μεταβολή της τάσης στη ζώνη 1 για αύξηση φορτίου στη ζώνη 1



Σχήμα 8.1.2: Μεταβολή της τάσης στη ζώνη 2 για αύξηση φορτίου στη ζώνη 1



Σχήμα 8.1.3: Μεταβολή της τάσης στη ζώνη 3 για αύξηση φορτίου στη ζώνη 1

Στους παρακάτω πίνακες φαίνεται η μεταβολή του μέσου όρου των τάσεων κάθε ζώνης μετά την αύξηση του φορτίου των ζυγών που ανήκουν στη ζώνη 2 κατά 5%, 10% και 20%

Πίνακας 8.1.5: μεταβολής της τάσης (μέσος όρος) για 5% αύξηση φορτίου στη ζώνη 2

5% αύξηση φορτίου ζώνης 2	μέσος όρος τάσεων πριν τη διαταραχή	μέσος όρος τάσεων μετά τη διαταραχή	V _{var} (%)
ζώνη 1	0.983913111	0.983860066	0.005391162
ζώνη 2	0.988038935	0.987537732	0.050727028
ζώνη 3	0.984990083	0.984974428	0.001589332

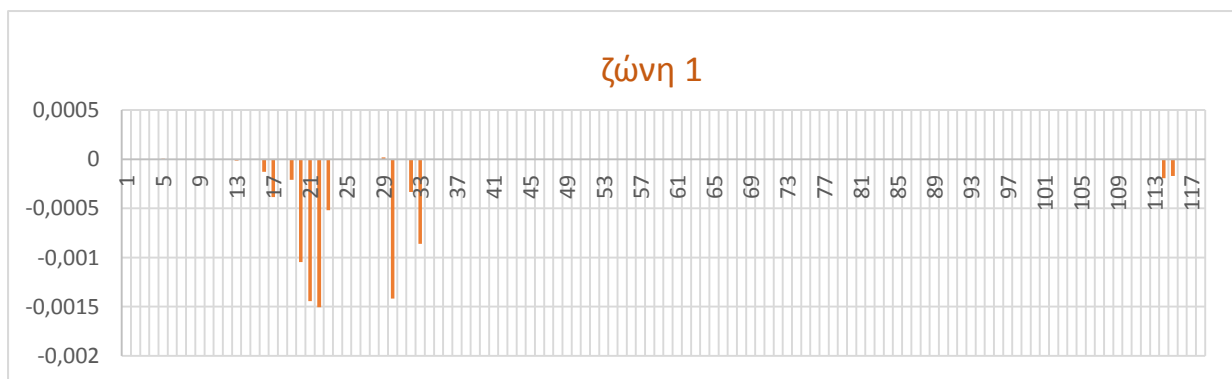
Πίνακας 8.1.6: μεταβολής της τάσης (μέσος όρος) για 10% αύξηση φορτίου στη ζώνη 2

10% αύξηση φορτίου ζώνης 2	μέσος όρος τάσεων πριν τη διαταραχή	μέσος όρος τάσεων μετά τη διαταραχή	V _{var} (%)
ζώνη 1	0.983913111	0.983803967	0.011092796
ζώνη 2	0.988038935	0.987058177	0.099263052
ζώνη 3	0.984990083	0.984958595	0.003196792

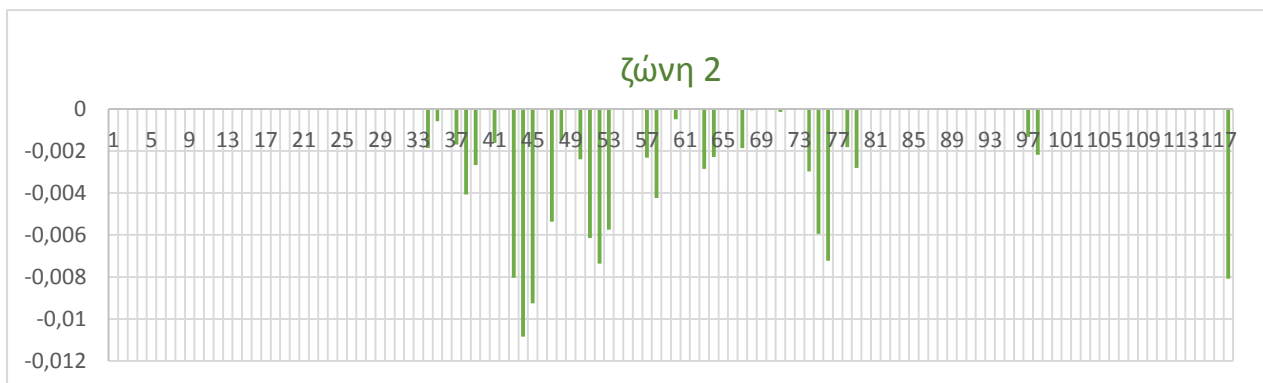
Πίνακας 8.1.7: μεταβολής της τάσης (μέσος όρος) για 20% αύξηση φορτίου στη ζώνη 2

20% αύξηση φορτίου ζώνης 2	μέσος όρος τάσεων πριν τη διαταραχή	μέσος όρος τάσεων μετά τη διαταραχή	V _{var} (%)
ζώνη 1	0.983913111	0.983690947	0.022579594
ζώνη 2	0.988038935	0.985811621	0.225427697
ζώνη 3	0.984990083	0.984926394	0.006465932

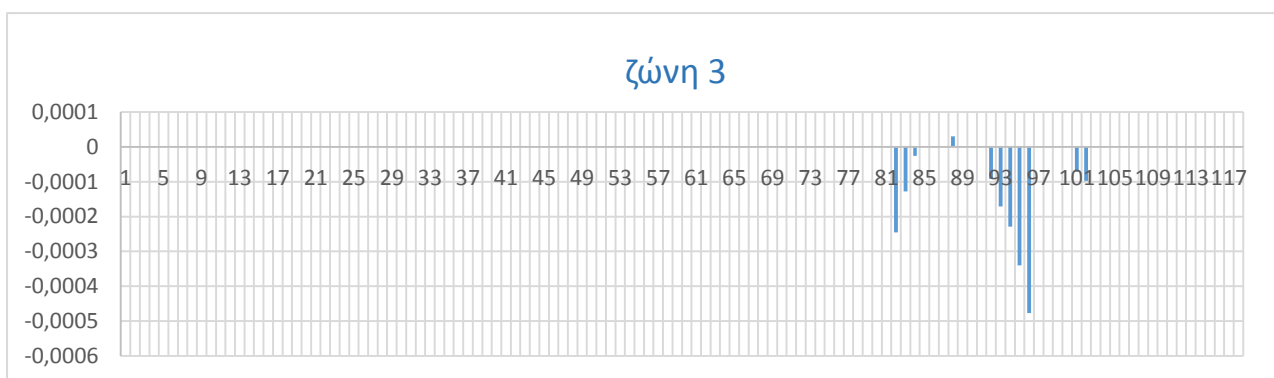
Όπως παρατηρείται και στην περίπτωση αυτή η μεταβολή της ισχύος στα φορτία που ανήκουν στη ζώνη 2 επηρεάζει περισσότερο τις τάσεις των ζυγών της ζώνης 2 σε σχέση με τις τάσεις των ζυγών που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες. Γραφικά οι τάσεις των ζυγών για διαταραχή στα φορτία της ζώνης 1 κατά 20% φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 8.1.4: Μεταβολή της τάσης στη ζώνη 1 για αύξηση φορτίου στη ζώνη 2



Σχήμα 8.1.5: Μεταβολή της τάσης στη ζώνη 2 για αύξηση φορτίου στη ζώνη 2



Σχήμα 8.1.6: Μεταβολή της τάσης στη ζώνη 3 για αύξηση φορτίου στη ζώνη 2

Τέλος πραγματοποιείται αύξηση των φορτίων που ανήκουν στη ζώνη 3. Και στην περίπτωση αυτή, περισσότερο επηρεάζεται η τάση των ζυγών της ζώνης στην οποία έγινε η διαταραχή, όπως φαίνεται και από τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 8.1.8: μεταβολής της τάσης (μέσος όρος) για 5% αύξηση φορτίου στη ζώνη 3

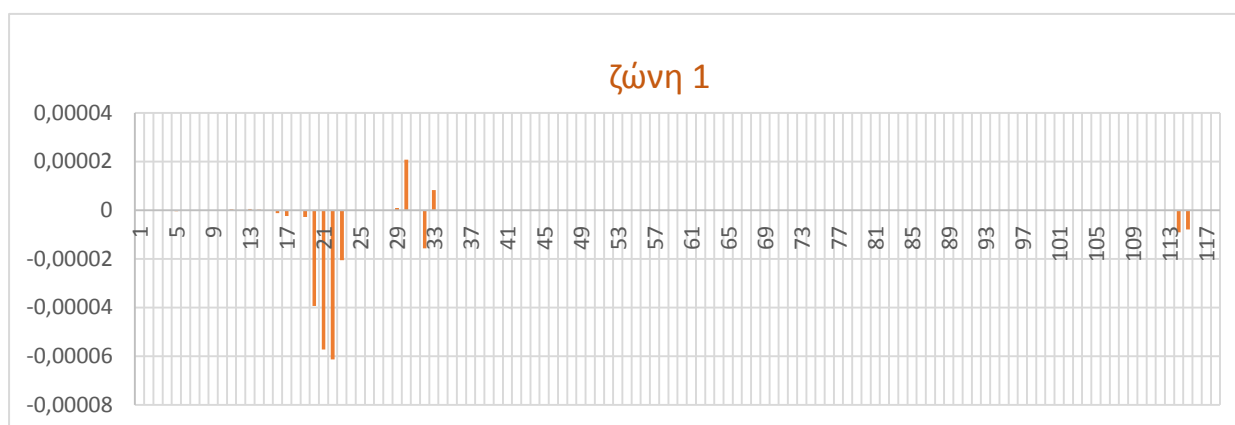
5% αύξηση φορτίου ζώνης 3	μέσος όρος τάσεων πριν τη διαταραχή	μέσος όρος τάσεων μετά τη διαταραχή	V_{var} (%)
ζώνη 1	0.983913111	0.983911863	0.000126818
ζώνη 2	0.988038935	0.988007893	0.003141804
ζώνη 3	0.984990083	0.984516421	0.04808801

Πίνακας 8.1.9: μεταβολής της τάσης (μέσος όρος) για 10% αύξηση φορτίου στη ζώνη 3

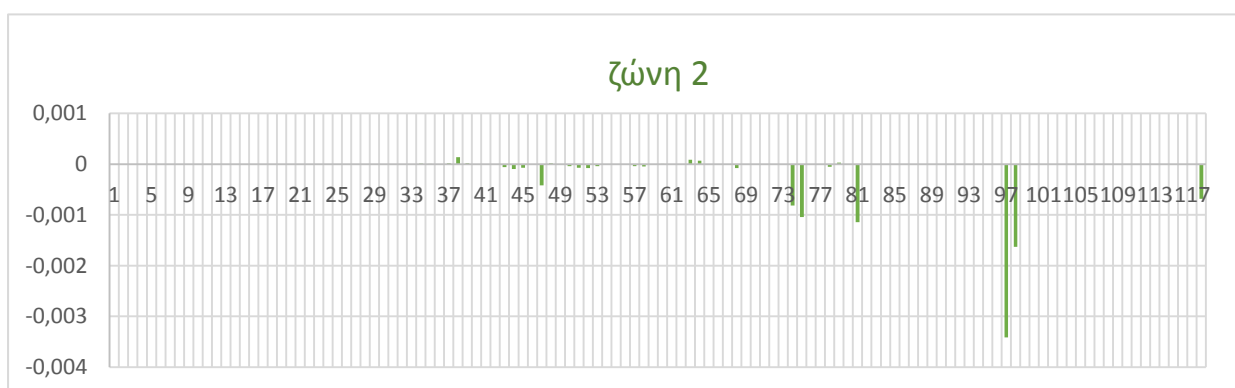
20% αύξηση φορτίου ζώνης 3	μέσος όρος τάσεων πριν τη διαταραχή	μέσος όρος τάσεων μετά τη διαταραχή	V _{var} (%)
ζώνη 1	0.983913111	0.983908052	0.00051419
ζώνη 2	0.988038935	0.987857199	0.018393566
ζώνη 3	0.984990083	0.983066366	0.19530312

Πίνακας 8.1.10: μεταβολής της τάσης (μέσος όρος) για 20% αύξηση φορτίου στη ζώνη 3

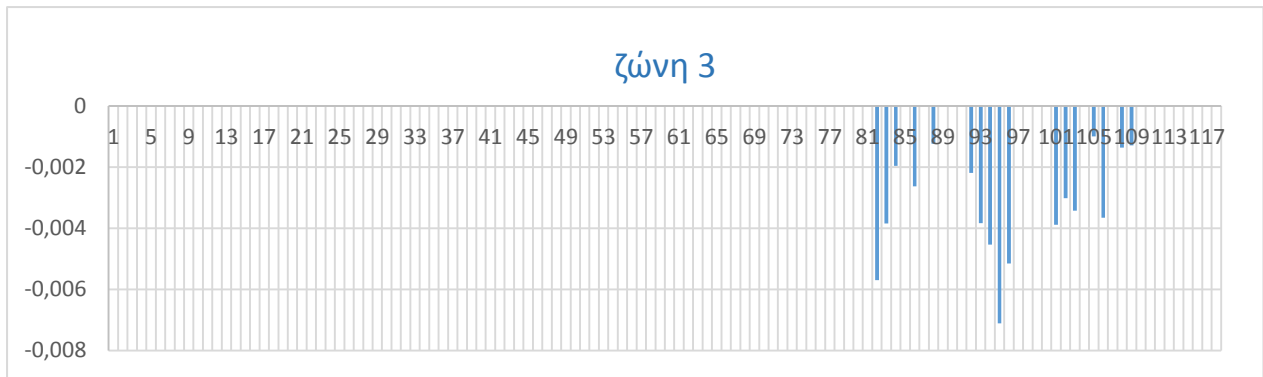
10% αύξηση φορτίου ζώνης 3	μέσος όρος τάσεων πριν τη διαταραχή	μέσος όρος τάσεων μετά τη διαταραχή	V _{var} (%)
ζώνη 1	0.983913111	0.983910603	0.000254832
ζώνη 2	0.988038935	0.987967544	0.007225562
ζώνη 3	0.984990083	0.983997952	0.100724914



Σχήμα 8.1.7: Μεταβολή της τάσης στη ζώνη 1 για αύξηση φορτίου στη ζώνη 3



Σχήμα 8.1.8: Μεταβολή της τάσης στη ζώνη 2 για αύξηση φορτίου στη ζώνη 3



Σχήμα 8.1.9: Μεταβολή της τάσης στη ζώνη 3 για αύξηση φορτίου στη ζώνη 3

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, ο διαχωρισμός του δικτύου με αυτόν τον τρόπο μπορεί να θεωρηθεί επιτυχημένος καθώς διαταραχές στα φορτία ζυγών που ανήκουν σε μία ομάδα, επηρεάζουν περισσότερο τις τάσεις των ζυγών της ίδιας ομάδας και λιγότερο τις τάσεις των ζυγών που ανήκουν σε διαφορετική ομάδα.

B 8.2 Επιλογή ‘πιλοτικών ζυγών’ (pilot buses)

Σύμφωνα με τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις όπου παρουσιάζονται οι μεταβολές των τάσεων $\Delta v = |v_{ad} - v_{bd}|$, στο ζυγό 21 προκαλείται η μεγαλύτερη μεταβολή της τάσης μετά την αύξηση των φορτίων των ζυγών της ζώνης 1. Για το λόγο αυτό ο ζυγός 21, που παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία σε περίπτωση διαταραχής, μπορεί να οριστεί ως ‘κύριος πιλοτικός’ ζυγός (main pilot bus), στον οποίο θα θεωρηθεί ότι υπάρχει δυνατότητα έγχυσης άεργου ισχύος από πυκνωτές για τον έλεγχο και τη ρύθμιση της τάσης. Ανάλογα, για τη ζώνη 2 ‘κύριος πιλοτικός’ ζυγός μπορεί να θεωρηθεί ο ζυγός 44 και για τη ζώνη 3 ο ζυγός 95. Προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματική ρύθμιση τάσης των ζυγών ακόμα και για μεγάλες διαταραχές, η οποία παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα, θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα έγχυσης άεργου ισχύος και σε άλλους ζυγούς του δικτύου (pilot buses). Έτσι για τη ζώνη 1 επιλέγονται οι ζυγοί 3,13,21,33,117 καθώς βρίσκονται σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους και εμφανίζουν μεγαλύτερη πτώση τάσης σε περίπτωση διαταραχής σε σύγκριση με τους γειτονικούς τους. Όμοια, για τη ζώνη 2 επιλέγονται οι ζυγοί 44,47,52,75,118 και για τη ζώνη 3 οι ζυγοί 82,95,106.

Πίνακας 8.2.1: Επιλογή ‘πιλοτικών ζυγών’

	Pilot buses
Ζώνη 1	3,13,21,33,117
Ζώνη 2	44,47,52,75,118
Ζώνη 3	82,95,106

Γ Μέρος

Έλεγχος τάσης

Στο τρίτο μέρος της εργασίας περιγράφονται οι έννοιες του ευφυούς πράκτορα και των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων. Οι έννοιες αυτές χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου αποκεντρωμένου ελέγχου, με σκοπό τη ρύθμιση των τάσεων των ζυγών μέσα στα αποδεκτά όρια. Επιπλέον, πραγματοποιείται έλεγχος των τάσεων των ζυγών με τη χρήση του αλγορίθμου Particle Swarm Optimization (PSO) και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο - Θεωρία συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων

Γ 9.1 Ο ευφυής πράκτορας

Η τεχνολογία που αναφέρεται στους ευφυείς πράκτορες αποτελεί ένα αυτόνομο επιστημονικό πεδίο με αρκετά μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα τα τελευταία χρόνια. Συνδυάζει στοιχεία από την τεχνητή νοημοσύνη, τον αντικειμενοστραφή και τον παράλληλο προγραμματισμό και βρίσκει εφαρμογές σε πάρα πολλούς τομείς, ένας εκ των οποίων είναι και ο έλεγχος των ηλεκτρικών δικτύων. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ορισμού του ευφυούς πράκτορα. Συνοπτικά, ένας πράκτορας είναι μια ευφυής οντότητα, η οποία έχει τη δυνατότητα να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον και με άλλους πράκτορες προκειμένου να ικανοποιήσει έναν στόχο.

Ένας πράκτορας, οποίος αποτελεί ένα σύστημα υλικού (hardware) ή λογισμικού, έχει τις εξής ιδιότητες:

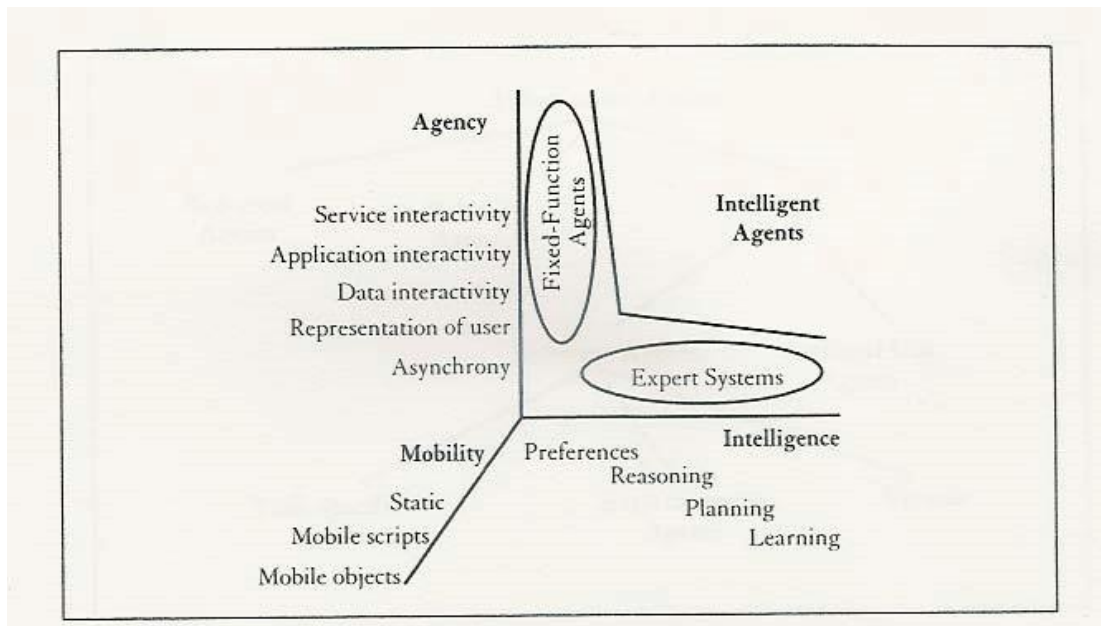
- Αυτονομία (autonomy): οι πράκτορες λειτουργούν χωρίς την άμεση παρέμβαση των χρηστών ή άλλων πρακτόρων και έχουν αυτοέλεγχο, δηλαδή έλεγχο της εσωτερικής τους κατάστασης και αυτενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι οι πράκτορες έχουν τη δυνατότητα να επιδιώκουν τους στόχους τους χωρίς να δέχονται συνεχώς εντολές από τον χρήστη ή κάποια άλλη εξωτερική πηγή, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να αφήνει στον χρήστη μόνο τον προσδιορισμό του γενικού στόχου και να τον απελευθερώνει από το βάρος της λήψης των επιμέρους αποφάσεων.
- Κοινωνικότητα (social ability): Οι πράκτορες επικοινωνούν με άλλους πράκτορες και χρήστες μέσω μιας κοινά κατανοητής γλώσσας, έτσι ώστε να μπορούν να συνεργαστούν για την επίτευξη των στόχων τους. Υπάρχει δηλαδή αλληλεπίδραση μεταξύ των πρακτόρων είτε για την επίτευξη των ανεξάρτητων στόχων των πρακτόρων ή για την επίτευξη ενός κοινού στόχου.
- Αντιδραστικότητα (reactiveness): Οι πράκτορες αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους και αντιδρούν μέσα σε συγκεκριμένα χρονικά πλαίσια στις αλλαγές που εισάγονται σε αυτό.
- Προνοητικότητα (pro-activeness): Οι πράκτορες δεν αντιδρούν απλά στο περιβάλλον αλλά είναι ικανοί να επιδείξουν και συμπεριφορά που βασίζεται σε στόχους, λαμβάνοντας ουσιαστικά πρωτοβουλία ανάλογα με τις συνθήκες οι οποίες εμφανίζονται στο περιβάλλον τους. Τόσο η προνοητικότητα όσο και η αντιδραστικότητα απαιτούν σε κάποιο βαθμό τη δυνατότητα συλλογισμού (νοημοσύνης) από τον πράκτορα.

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να επισημάνουμε ότι το γεγονός πως ο ευφυής πράκτορας δεν αντιδρά μόνο στα ερεθίσματα του περιβάλλοντος (αντιδραστικότητα) αλλά παράλληλα έχει τη δυνατότητα να αναλαμβάνει δράσεις (προνοητικότητα) – οι οποίες θα επηρεάσουν το περιβάλλον του και κατά συνέπεια τις μελλοντικές του αποφάσεις – αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο των πολυπρακτορικών συστημάτων και ουσιαστική διαφορά από τα κλασικά συστήματα τεχνητής νοημοσύνης. Ακόμα, η αυτονομία του πράκτορα δεν περιορίζεται μόνο στη συμπεριφορά αλλά και στον τρόπο που θα διαχειριστεί τους πόρους που του διατίθενται. Για να μπορέσει να δράσει ο πράκτορας χρειάζεται κάποιους πόρους, όπως έναν επεξεργαστή, ηλεκτρική ισχύ, πρόσβαση σε πληροφορίες κ.α. Ο πράκτορας εξαρτάται μερικώς από το περιβάλλον του αφού αυτό του παρέχει τους πόρους αλλά είναι και ανεξάρτητος από αυτό στο βαθμό του τρόπου με τον οποίο θα τους διαχειριστεί.

Υπάρχουν ακόμη μερικά δευτερεύοντα χαρακτηριστικά που αποδίδονται στους πράκτορες, όπως:

- Κινητικότητα (mobility): Οι πράκτορες δεν είναι πάντα στατικοί, αλλά μπορούν να κινηθούν σε ένα υπολογιστικό περιβάλλον.
- Προσαρμοστικότητα (adaptivity): Οι πράκτορες προσαρμόζονται διαρκώς στο περιβάλλον τους, ή τις απαιτήσεις του χρήστη, έχουν δηλαδή ικανότητα για μάθηση.
- Ειλικρίνεια (veracity): Οι πράκτορες δε δίνουν εσκεμμένα λάθος πληροφορίες
- Αγαθή προαίρεση (benevolence): Οι πράκτορες προσπαθούν να επιτύχουν πάντα τους στόχους που τους έχουν ανατεθεί
- Λογικότητα (rationality): Οι πράκτορες δρουν για να πετύχουν τους στόχους τους, δηλαδή δεν κάνουν αναίτιες ενέργειες και δε λειτουργούν εναντίον της επίτευξης των στόχων τους.

Τα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν οι πράκτορες επιτρέπουν την κατηγοριοποίησή τους. Σύμφωνα με αυτό οι ευφυείς πράκτορες περιγράφονται στα πλαίσια ενός χώρου που ορίζεται από τρεις άξονες: agency («συνεργασία»), intelligence (νοημοσύνη) και mobility (κινητικότητα).



Σχήμα 9.1.1: Οι άξονες προσδιορισμού των χαρακτηριστικών των πρακτόρων

- Συνεργασία (agency) ορίζεται ως ο βαθμός της αυτονομίας και της αυτενέργειας που έχει ένας πράκτορας και μπορεί να μετρηθεί, τουλάχιστον ποιοτικά, από τη φύση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του πράκτορα και άλλων οντοτήτων στο σύστημα
- Νοημοσύνη (intelligence) είναι ο βαθμός της δυνατότητας συλλογισμού και της ικανότητας για να διδαχθούν συμπεριφορές που έχουν οι πράκτορες. Πιο συγκεκριμένα δείχνει την ικανότητα του πράκτορα να δέχεται τους στόχους που του έχει αναθέσει ο χρήστης και να αναλαμβάνει τις απαραίτητες ενέργειες για την επίτευξή τους.
- Κινητικότητα (mobility) είναι ο βαθμός κατά τον οποίο οι ίδιοι οι πράκτορες κινούνται σε ένα δίκτυο.

Γ 9.2 Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων

Συνήθως δε συναντάμε τους πράκτορες μεμονωμένα, αλλά οργανωμένους σε μια κοινωνία πρακτόρων, τα πολυπρακτορικά συστήματα (Multi-Agent Systems). Η καινοτομία που εισάγουν οι πράκτορες εστιάζεται κυρίως στο γεγονός ότι η αλληλεπίδραση στα συστήματα αυτά είναι δυναμική και όχι στατικά καθορισμένη. Το σύστημα αποκτά με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα να συμπεριφερθεί με σωστό τρόπο ακόμα και σε περιπτώσεις που δεν είχαν αρχικά προβλεφθεί.

Γενικότερα, ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων είναι ένα σύστημα που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ως ένα σύνολο πρακτόρων που αλληλεπιδρούν, δηλαδή συνεργάζονται, συντονίζονται, διαπραγματεύονται κλπ. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για ένα δίκτυο από «χαλαρά συνδεδεμένους» πράκτορες, οι οποίοι δρουν μαζί για να επιλύσουν προβλήματα που είναι πέραν των δυνατοτήτων και της γνώσης ενός μόνο πράκτορα. Η συνεργασία μεταξύ τους είναι δυναμική με την έννοια ότι οι οντότητες που αλληλεπιδρούν είναι αυτόνομες και άρα αποφασίζουν οι ίδιες για το πότε και το πώς θα συνεργαστούν. Αυτό έχει σαν συνέπεια οι πράκτορες να επιλέγουν είτε να εργαστούν αυτόνομα ανταλλάσσοντας υπηρεσίες ή/και πληροφορίες προσπαθώντας να επιτύχουν τους δικούς τους ανεξάρτητους στόχους, είτε να συνεργάζονται επιλύοντας υποπροβλήματα ώστε ο συνδυασμός των επιμέρους λύσεων που θα προκύψουν να αποτελέσουν την τελική λύση.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφέρουμε ότι ένας ευφυής πράκτορας μπορεί να υλοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι βέβαια προσδιορίζουν και τη λειτουργία του μέσα στο σύστημα. Έτσι μπορούμε να τους διακρίνουμε στους πράκτορες με αντίληψη (cognitive agents) του περιβάλλοντος και στους πράκτορες που αντιδρούν στο περιβάλλον (reactive agents). Στη πρώτη κατηγορία οι πράκτορες χαρακτηρίζονται από αυξημένη ευφυΐα και η επίλυση του προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κατανόησης του τρόπου λειτουργίας του περιβάλλοντος (έχουν αντίληψη). Οι πράκτορες αυτοί έχουν ορισμένες προθέσεις, δηλαδή κάποιους στόχους που προσπαθούν να επιτύχουν, καταστρώνοντας τον τρόπο δράσης για τη δεδομένη χρονική στιγμή αλλά και για τα μελλοντικά στάδια.

Οι πράκτορες της δεύτερης κατηγορίας (reactive agents – αντιδραστικοί πράκτορες) έχουν σαν κυρίαρχο χαρακτηριστικό την απουσία μιας εσωτερικής συμβολικής αναπαράστασης του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκονται. Για το λόγο αυτό βασίζουν τη συμπεριφορά τους μόνο σε αντιδράσεις στα ερεθίσματα τα οποία λαμβάνουν από το περιβάλλον. Οι υποστηρικτές αυτής της θεώρησης είναι της άποψης ότι δεν είναι απαραίτητο κάθε μεμονωμένος πράκτορας να είναι ευφυής για να παρουσιάζει το συνολικό σύστημα ευφυΐα..

Κύριο χαρακτηριστικό των συνεργαζόμενων πρακτόρων – είτε αυτοί είναι cognitive είτε reactive agents – είναι η δυνατότητα συντονισμού μέσω κάποιας γλώσσας επικοινωνίας, έτσι ώστε να φτάσουν σε κοινά αποδεκτές συμφωνίες και να επιλύσουν ενδεχόμενες συγκρούσεις οι οποίες προκύπτουν από την επίτευξη των επιμέρους στόχων τους. Οι πράκτορες μπορούν να συντονίζουν τη δράση τους είτε για να επιτύχουν έναν κοινό στόχο (συνεργασία – cooperation) ή για να επιτύχουν τους «προσωπικούς» τους ανεξάρτητους στόχους (διαπραγμάτευση – negotiation). Άλλα χαρακτηριστικά ενός πολυπρακτορικού συστήματος είναι:

- Κανένας πράκτορας δεν έχει πλήρη πληροφορία.

- Δεν υπάρχει κεντρικός έλεγχος του συστήματος, υπό την έννοια ότι δεν παρεμβαίνει κάποιος χρήστης ή πράκτορας με αυξημένες αρμοδιότητες στην αλληλεπίδραση μεταξύ των πρακτόρων ώστε να ευνοήσει τον έναν ή τον άλλο ή να αποφασίσει εκ μέρους αυτών πώς θα δράσουν.
- Τα δεδομένα είναι συνήθως καταναμημένα.
- Οι υπολογισμοί γίνονται με ασύγχρονο τρόπο.

Όπως γίνεται αντιληπτό, στη σχεδίαση και υλοποίηση του πολυπρακτορικού συστήματος υπάρχουν μερικά κρίσιμα σημεία, στα οποία πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή. Αυτά αφορούν κυρίως την επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων και τον τρόπο αλληλεπίδρασής τους. Όσον αφορά στην επικοινωνία, ένα ερώτημα το οποίο τίθεται είναι το ποιες γλώσσες και πρωτόκολλα θα χρησιμοποιηθούν, δηλαδή το πώς θα δοθεί η δυνατότητα στους πράκτορες να επικοινωνήσουν. Όσον αφορά την αλληλεπίδραση, το πρόβλημα εστιάζεται κυρίως στο πώς θα τυποποιηθεί, περιγραφεί και διαμοιραστεί το πρόβλημα, ώστε να συντεθούν οι λύσεις του σε μια ομάδα ευφυών πρακτόρων. Οι ενότητες που ακολουθούν θα περιγράψουν αναλυτικότερα τις λύσεις που έχουν προταθεί για τα παραπάνω προβλήματα.

Γ 9.3 Επικοινωνία των Πρακτόρων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ικανότητα για επικοινωνία αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό του ευφυούς πράκτορα και είναι αυτό που επιτρέπει τη δημιουργία πολυπρακτορικών συστημάτων. Το γεγονός ότι οι πράκτορες επικοινωνούν τους δίνει τη δυνατότητα να μαθαίνουν, να συνεργάζονται αλλά και να συντονίζονται. Η επικοινωνία μπορεί να είναι πολύ απλή, βασιζόμενη σε σήματα, ή μια σύνθετη γλώσσα βασισμένη σε γραμματική, συντακτικό και λεξιλόγιο. Το μόνο δεδομένο είναι ότι όσο πιο σύνθετη είναι μια γλώσσα τόσο πιο εξελιγμένες λειτουργίες μπορεί να επιτελέσει το σύστημα.

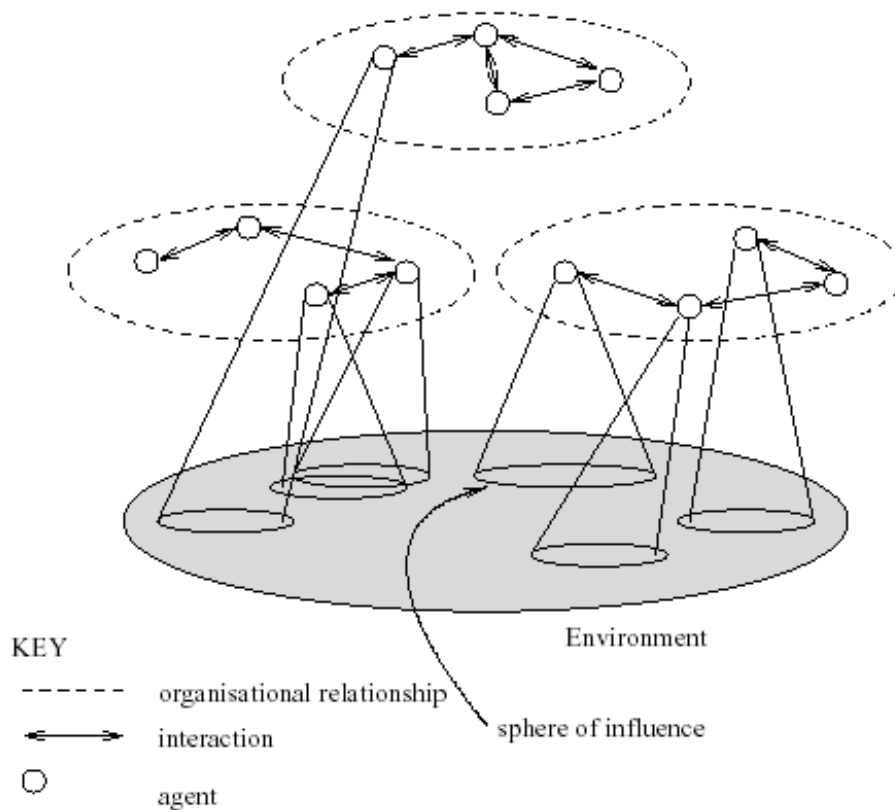
Όσον αφορά τώρα τις επικοινωνίες, υπάρχουν πάρα πολλές θεωρίες, ωστόσο η πλέον βασική είναι αυτή σύμφωνα με την οποία, το μοντέλο της επικοινωνίας αποτελείται από έναν αποστολέα και έναν δέκτη. Ο αποστολέας στέλνει την πληροφορία κωδικοποιημένη με βάση μία γλώσσα και ο δέκτης την αποκωδικοποιεί όταν την λαμβάνει. Το μοντέλο αυτό είναι πολύ απλό και ουσιαστικά περιγράφει τον τρόπο αποστολής δεδομένων.

Τα συστήματα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων προκειμένου να μπορούν να αναπτύξουν την συλλογική ευφυΐα θα πρέπει να είναι εφοδιασμένα με ένα εργαλείο που θα τους επιτρέπει να πραγματοποιούν σύνθετους διαλόγους παρόμοιους με τους ανθρώπους. Η επικοινωνία των πρακτόρων θα πρέπει να έχει τα εξής τρία χαρακτηριστικά:

- Μία κοινή γλώσσα

- Μία κοινή παράσταση της γνώσης και των εννοιών
- Να υπάρχει τρόπος να ανταλλάξουν οτιδήποτε ανήκει και στις δύο προηγούμενες κατηγορίες

Γ 9.4 Αλληλεπίδραση των Πρακτόρων



Σχήμα 9.4.1: Αλληλεπίδραση των πρακτόρων

[17]

Το βασικό στοιχείο της συμπεριφοράς ενός πράκτορα σε ένα γενικότερο σύστημα είναι η αλληλεπίδραση που έχει με τους άλλους πράκτορες. Η αλληλεπίδραση αυτή σχετίζεται τόσο με τις πράξεις του πράκτορα όσο και με την δυνατότητα που έχει για επικοινωνία και είναι το ανώτερο στοιχείο για την δημιουργία μίας ολοκληρωμένης λειτουργίας. Το ερώτημα που τίθεται είναι πώς ακριβώς μπορεί να καθοριστεί ο τρόπος που αλληλεπιδρούν οι πράκτορες μεταξύ τους.

Το πρώτο κριτήριο αφορά τους στόχους που θέτουν οι πράκτορες. Οι στόχοι αυτοί μπορεί να είναι συμβατοί μεταξύ τους οπότε έχουμε πράκτορες που συνεργάζονται, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ανταγωνίζονται. Για παράδειγμα διαφορετική συμπεριφορά θα έχουν πράκτορες που συνεργάζονται στα πλαίσια μίας αγοράς ενέργειας σε σχέση με άλλους που τους ανταγωνίζονται.

Το δεύτερο κριτήριο αφορά τους πόρους που διαθέτει το σύστημα συνολικά και ο κάθε πράκτορας ξεχωριστά. Οι πόροι που συνήθως δεν είναι απεριόριστοι, είναι πάντα ένα θέμα προς διαπραγμάτευση ή αντιδικία ανάλογα με το αν συνεργάζονται οι πράκτορες ή όχι. Σε κάθε περίπτωση ο τρόπος με τον οποίο θα διαχειριστούν τους πόρους του συστήματος οι πράκτορες αποτελεί σημαντικό στοιχείο της συμπεριφοράς τους.

Το τρίτο κριτήριο σχετίζεται με τις ικανότητες του κάθε πράκτορα για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων του συστήματος. Το ερώτημα σε αυτήν την περίπτωση είναι εάν μπορεί να το επιλύσει από μόνος του ή αν απαιτείται μία συλλογική προσπάθεια. Για παράδειγμα αν θεωρήσουμε τον έλεγχο της τάσης και τον έλεγχο της συχνότητας. Ο έλεγχος της τάσης είναι κυρίως τοπικό φαινόμενο και ένας πράκτορας που ελέγχει μία μονάδα παραγωγής μπορεί να ελέγξει την τάση στο ζυγό που βρίσκεται. Αντίθετα η συχνότητα αφορά ολόκληρο το σύστημα και απαιτείται μια συντονισμένη προσπάθεια για τον έλεγχο της.

Γ 9.5 Μέθοδοι συνεργασίας των πρακτόρων

Η έννοια της συνεργασίας δύο ή περισσότερων πρακτόρων είναι σύνθετη δεδομένου ότι υπάρχουν πολλοί τρόποι για να επιτευχθεί. Επειδή αναφερόμαστε σε πολύπλοκα συστήματα αυτή θα πρέπει να μελετηθεί και να κατηγοριοποιηθεί. Οι τρόποι με τους οποίους θα μπορούσαν να συνεργαστούν οι πράκτορες είναι:

- Ομαδοποίηση

Ο τρόπος αυτός είναι ο πλέον προφανής και στον οποίο όμοιοι πράκτορες σχηματίζουν ομάδες μέσα στο σύστημα προκειμένου να επιτελέσουν από κοινού μία εργασία.

- Επικοινωνία

Η επικοινωνία είναι ένας προφανής τρόπος για την συνεργασία των πρακτόρων αφού με αυτόν τον τρόπο ανταλλάσσουν δεδομένα, γνώσεις και συντονίζουν τις πράξεις τους.

- Ειδίκευση

Μια σημαντική λειτουργία σε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων είναι η ειδίκευση και ειδικότερα η ανάθεση συγκεκριμένων καθηκόντων στον κάθε πράκτορα.

- Συνεργασία στο μοίρασμα καθηκόντων και πόρων

Ένας αρκετά σύνθετος τρόπος συνεργασίας είναι η από κοινού ανάληψη από μία ομάδα πρακτόρων κάποιων καθηκόντων με παράλληλη κοινή χρήση των διαθέσιμων πόρων.

- Συντονισμός πράξεων

Ο συντονισμός των πράξεων είναι μία σύνθετη λειτουργία του συστήματος και ειδικά εφόσον αναφερόμαστε σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχει μία πληθώρα πράξεων που θα πρέπει να γίνουν σε συντονισμό με άλλους πράκτορες του συστήματος. Παραδείγματα τέτοιων πράξεων είναι το κλείσιμο ενός διακόπτη ή η διακοπή της λειτουργίας μίας μονάδας. Οι πράξεις αυτές μπορεί να επηρεάσουν την ευστάθεια του συστήματος και για αυτόν τον λόγο θα πρέπει να γίνουν συντονισμένα με άλλους πράκτορες.

- Διαπραγμάτευση

Μία σημαντική μέθοδος συνεργασίας είναι η διαπραγμάτευση, ειδικά σε ότι αφορά την κατανομή των πόρων του συστήματος ή καθηκόντων. Οι τρόποι με τους οποίους θα μπορούσε να γίνει η διαπραγμάτευση είναι πάρα πολλοί αλλά το ερώτημα που τίθεται σε αυτή την περίπτωση είναι εάν το αποτέλεσμα είναι το σωστό και το βέλτιστο για το σύστημα.

- Πολλαπλασιασμός

Η μέθοδος του πολλαπλασιασμού αναφέρει ότι ένα πρόβλημα μπορεί να λυθεί αυξάνοντας τον αριθμό των πρακτόρων. Η μέθοδος αυτή έχει ενδιαφέρον εφόσον μπορεί να εφαρμοστεί. [18]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^ο - ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Γ 10.1 Εισαγωγή

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος ελέγχου της τάσης και της αέργου ισχύος των ζυγών σε περίπτωση εμφάνισης διαταραχών στο δίκτυο. Στην εργασία αυτή ως διαταραχές εξετάζονται η αύξηση των φορτίων και απώλεια γραμμών. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στη θεωρία των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων.

Ο αλγόριθμος ελέγχου που υλοποιήθηκε, βασίζεται σε μία αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική πολλαπλών πρακτόρων, ενώ χρησιμοποιούνται οι ζώνες διαχωρισμού που πραγματοποιήθηκαν στα προηγούμενα, για την εφαρμογή γρήγορων τρόπων αντιμετώπισης της διαταραχής με έναν αποκεντρωμένο τρόπο. Κάθε ζώνη διαθέτει ένα σύνολο έξυπνων πρακτόρων που αντιπροσωπεύουν τα φορτία και τις γεννήτριες. Θα πρέπει να τονιστεί ότι για των υπολογισμό των βέλτιστων κινήσεων προκειμένου να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά ένα πρόβλημα που εμφανίζεται σε κάποια περιοχή μετά από διαταραχές, χρησιμοποιήθηκαν οι ευαισθησίες των ζυγών του συστήματος. Πιο αναλυτικά, η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην επόμενη υπο-ενότητα.

Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί τόσο κεντρικές όσο και αποκεντρωμένες στρατηγικές συντονισμού των πρακτόρων σε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων . Ωστόσο, όταν το σύστημα βρίσκεται αντιμέτωπο με μια καταστροφική κατάσταση όπου συμβαίνουν πολλαπλές απρόβλεπτες διαταραχές, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα έκτακτης υποστήριξης αέργου ισχύος, γεγονός που μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μια αποκεντρωμένη στρατηγική συντονισμού των ευφύων πρακτόρων προκειμένου να αποφευχθεί η καθυστέρηση μεταβίβασης πληροφοριών προς τον κεντρικό ελεγκτή από τις περιοχές που εμφανίζουν πρόβλημα.

Για το λόγο αυτό, στον αλγόριθμο ελέγχου που υλοποιήθηκε σε αυτή την εργασία, χρησιμοποιείται αποκεντρωμένη στρατηγική συντονισμού, σύμφωνα με την οποία κάθε ζώνη έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει γρήγορες αυτόνομες αποφάσεις με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης λύσης.

Ως ευφυείς πράκτορες μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα RTU(Remote Terminal Units), τα οποία έχουν τη δυνατότητα μέτρησης ηλεκτρικών παραμέτρων όπως τάση, ρεύμα, ισχύ, συχνότητα. Αφού το δίκτυο έχει χωριστεί σε ζώνες, οι ευφυείς πράκτορες κάθε ζώνης συνεργάζονται προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη σειρά δράσεων με σκοπό την αποκατάσταση της ισορροπίας μετά τη διαταραχή. Ως μέσα ελέγχου στον αλγόριθμο που υλοποιήθηκε χρησιμοποιούνται η μεταβολή της τάσης αναφοράς των γεννητριών καθώς και η έγχυση αέργου ισχύος στους 'πιλοτικούς' ζυγούς (pilot buses) μέσω πυκνωτικών στοιχείων.[19]

Γ 10.2 Ιακωβιανή Μήτρα – Ευαισθησίες

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, για την εύρεση των βέλτιστων κινήσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν προκειμένου να ρυθμιστούν όλες οι τάσεις των ζυγών μέσα στα αποδεκτά όρια, χρησιμοποιούνται τα στοιχεία της Ιακωβιανής Μήτρας. Πιο αναλυτικά:

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ορίζονται τρία είδη ζυγών:

- οι **ζυγοί φορτίου**, όπου είναι γνωστή η ενεργός και άεργος ισχύς φορτίου και άγνωστη η τάση
- οι **ζυγοί παραγωγής**, όπου είναι γνωστή η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης και άγνωστη η άεργος ισχύς και η γωνία της τάσης
- ο **ζυγός ταλάντωσης ή ζυγός αναφοράς**, ο οποίος είναι ζυγός παραγωγής, χρησιμεύει για να αντισταθμίζει τις - άγνωστες αρχικά - απώλειες του δικτύου και για την άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Σ' αυτόν το ζυγό επιβάλλουμε σταθερή κατά μέτρο και γωνία τάση.

Επιπλέον, η έγχυση ενεργού και άεργου ισχύος στο ζυγό i του συστήματος δίνεται από τις σχέσεις:

$$P_i = \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \text{ και } Q_i = \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (10.2.1)$$

Όπου V_i, V_j τα μεγέθη των τάσεων των ζυγών i και j , $G_{ij} + jB_{ij}$ το i, j στοιχείο της μήτρας αγωγιμοτήτων και N το πλήθος των ζυγών.

Αν θεωρήσουμε ως ζυγό αναφοράς (slack bus) τον ζυγό 1, και n το πλήθος των ζυγών τότε η Ιακωβιανή Μήτρα ορίζεται ως εξής:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} |V_2| & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} |V_n| \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} |V_2| & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} |V_n| \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} |V_2| & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} |V_n| \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} |V_2| & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} |V_n| \end{bmatrix}}_{\text{Ιακωβιανή μήτρα}} = \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta |V_n|}{|V_n|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}$$

Ιακωβιανή μήτρα

Δηλαδή,

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial V} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \delta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} \quad (10.2.3)$$

και σε απλοποιημένη μορφή

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (10.2.4)$$

[20]

Στην περίπτωση επίλυσης προβλημάτων ροής φορτίου σε μεγάλα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιείται μία εναλλακτική-προσεγγιστική μέθοδος, προκειμένου να μειωθεί η πολυπλοκότητα του προβλήματος. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται ταχεία - αποζευγμένη μέθοδος Newton-Raphson (Decoupled Power-Flow Method) και βασίζεται στις εξής παρατηρήσεις:

- Αλλαγή στη γωνία δ της τάσης ενός ζυγού επηρεάζει κυρίως τη ροή της ενεργού ισχύος P στη γραμμή μεταφοράς και αφήνει σχεδόν ανεπηρέαστη τη ροή της αέργου ισχύος Q
- Αλλαγή στο μέτρο της τάσης ενός ζυγού $|V|$ επηρεάζει κυρίως τη ροή αέργου ισχύος Q στη γραμμή μεταφορά και αφήνει σχεδόν ανεπηρέαστη τη ροή ενεργού ισχύος.

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις αυτές προκύπτει ουσιαστικά ότι το μέγεθος $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}$ είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέγεθος $\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j}$, και συνεπώς το δεύτερο μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί μηδέν. Ανάλογα, το μέγεθος $\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|}$ είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέγεθος $\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|}$, το οποία προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το μηδέν. Σύμφωνα με αυτές τις προσεγγίσεις, οι υπο-πίνακες της Ιακωβιανής μήτρας J_2 και J_3 παραλείπονται και έτσι προκύπτουν δύο ξεχωριστά συστήματα εξισώσεων, τα οποία σε μορφή πινάκων είναι:

$$[\Delta P] = [J_1] [\Delta \delta] \quad \text{και} \quad [\Delta Q] = [J_4] [\Delta V] \quad (10.2.5)$$

Για τον υπολογισμό των ευαισθησιών των τάσεων χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Q-V δηλαδή σε μορφή πινάκων $\left[\frac{\Delta Q}{V} \right] = [B''] [\Delta V]$ με $B'' = -\text{Im}(Y_{\text{bus}})$ όπου $\text{Im}(Y_{\text{bus}})$ το φανταστικό μέρος της μήτρας αγωγιμοτήτων.

Στον αλγόριθμο που υλοποιήθηκε για τον έλεγχο της τάσης των ζυγών και παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα, οι τάσεις των ζυγών παραγωγής μεταβάλλονται προκειμένου οι γεννήτριες να παράγουν την απαραίτητη άεργο ισχύ για την αποκατάσταση της ισορροπίας μετά την εμφάνιση της διαταραχής. Έτσι, οι ζυγοί παραγωγής και οι ζυγοί φορτίου μπορούν να διαχωριστούν και συνεπώς να διαχωριστεί και ο πίνακας B'' σε τέσσερις υπο-πίνακες ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_G/V_G \\ \Delta Q_L/V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{GG} & B_{GL} \\ B_{LG} & B_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_G \\ \Delta V_L \end{bmatrix} \quad (10.2.6)$$

Όπου τα ΔQ_G και ΔV_G αντιστοιχούν στη μεταβολή της αέργου ισχύος και της τάσης των ζυγών παραγωγής ενώ τα ΔQ_L και ΔV_L αντιστοιχούν στη μεταβολή της αέργου ισχύος και της τάσης των ζυγών φορτίου. Σε περίπτωση μεταβολής της τάσης αναφοράς των τάσεων των γεννητριών, τα φορτία δε μεταβάλλονται και συνεπώς $\Delta Q_L = 0$. Έτσι προκύπτει ότι :

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_G/V_G \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{GG} & B_{GL} \\ B_{LG} & B_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_G \\ \Delta V_L \end{bmatrix} \quad (10.2.7)$$

Η σχέση μεταξύ της μεταβολής της τάσης ενός ζυγού φορτίου και της μεταβολής της τάσης αναφοράς σε ένα ζυγό παραγωγής προκύπτει από τα παραπάνω

$$\Delta V_L = - \mathbf{B}_{LL}^{-1} \mathbf{B}_{LG} \Delta V_G \quad (10.2.8)$$

Από τα παραπάνω έχουμε επίσης ότι:

$$\frac{\Delta Q_G}{V_G} = [\mathbf{B}_{GG} - \mathbf{B}_{GL} \mathbf{B}_{LL}^{-1} \mathbf{B}_{LG}] \Delta V_G \quad (10.2.9)$$

Έτσι η ευαισθησία της τάσης των ζυγών φορτίου ως προς τη μεταβολή της τάσης των γεννητριών στους ζυγούς παραγωγής, συμβολίζεται με S_{LV} , και δίνεται από τη σχέση :

$$\mathbf{S}_{LV} = - \mathbf{B}_{LL}^{-1} \mathbf{B}_{LG} \quad (10.2.10)$$

Επιπλέον, η ευαισθησία της αέργου ισχύος μιας γεννήτριας ως προς τη μεταβολή της τάσης των γεννητριών στους ζυγούς παραγωγής, συμβολίζεται με S_{QV} , και δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{S}_{QV} = (\mathbf{diag} [V_G]) (\mathbf{B}_{GG} - \mathbf{B}_{GL} \mathbf{B}_{LL}^{-1} \mathbf{B}_{LG}) \quad (10.2.11)$$

Στον αλγόριθμο που υλοποιήθηκε, για τη διόρθωση των τάσεων των ζυγών μετά την εμφάνιση διαταραχών στο δίκτυο χρησιμοποιήθηκε ως μέσο ελέγχου και έγχυση αέργου ισχύος μέσω πυκνωτικών στοιχείων σε ορισμένους ζυγούς του δικτύου (pilot buses). Αντίστοιχα με τα προηγούμενα, σε περίπτωση μεταβολής της αέργου ισχύος ενός ζυγού φορτίου μέσω έγχυσης ισχύος από πυκνωτικά στοιχεία, η τάση των γεννητριών δε μεταβάλλεται. Συνεπώς, $\Delta V_G = 0$. Έτσι προκύπτει ότι:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_G/V_G \\ \Delta Q_L/V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{GG} & B_{GL} \\ B_{LG} & B_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta V_L \end{bmatrix} \quad (10.2.12)$$

Η σχέση μεταξύ της μεταβολής της τάσης ενός ζυγού φορτίου και της μεταβολής της αέργου ισχύος των ζυγών φορτίου, σύμφωνα με τα παραπάνω δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V_L = \mathbf{B}_{LL}^{-1} \mathbf{diag}(1/V_L) \Delta Q_L \quad (10.2.13)$$

Έτσι η ευαισθησία της τάσης των ζυγών φορτίου ως προς τη μεταβολή της αέργου ισχύος των ζυγών φορτίου, συμβολίζεται με S_{LL} , και δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{S}_{LL} = \mathbf{B}_{LL}^{-1} \text{diag}(1/V_L) \quad (10.2.14)$$

Συνοπτικά αναφέρεται ότι για τους ζυγούς που έχουν τάση εκτός συγκεκριμένων ορίων θα χρησιμοποιηθούν οι παραπάνω ευαισθησίες προκειμένου να βρεθούν οι γεννήτριες οι οποίες αυξάνοντας την τάση τους προκαλούν μεγαλύτερη μεταβολή των τάσεων των ζυγών που εμφανίζουν πρόβλημα, καθώς επίσης και οι ζυγοί στους οποίους η έγχυση αέργου ισχύος θα προκαλέσει μεγαλύτερη ανύψωση τάσης στους ζυγούς που παρουσιάζουν τάση κάτω από τα αποδεκτά όρια. Συνεπώς, με τη χρήση των ευαισθησιών προκύπτει η βέλτιστη σειρά κινήσεων για τη διόρθωση της τάσης. Η παραπάνω μεθοδολογία περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα που ακολουθεί.

Γ 10.3 Υλοποίηση Αλγορίθμου Αποκεντρωμένου Ελέγχου

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι εξοπλισμένα με συστήματα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) τα οποία παρακολουθούν και ελέγχουν μεγάλη περιοχή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα SCADA αποτελείται από διάφορες συσκευές που επικοινωνούν μεταξύ τους όπως το HMI (Human Machine Interface), το MTU (Master Terminal Unit) και RTU (Remote Terminal Unit). Συνοπτικά αναφέρεται ότι μια κεντρική μονάδα MTU βρίσκεται στο κέντρο ελέγχου και επικοινωνεί με τις συσκευές RTU, οι οποίες συλλέγουν δεδομένα από κάποιο αισθητήρα, μετατρέπουν το σήμα σε ψηφιακό και το στέλνουν στη μονάδα MTU. Οι συσκευές RTU, επίσης είναι υπεύθυνες για την εκτέλεση εντολών που προέρχονται από τη μονάδα MTU.

Στον αλγόριθμο που υλοποιήθηκε για την ανάπτυξη ελέγχου τάσης θεωρήθηκαν δύο είδη ευφυών πρακτόρων: οι πράκτορες γεννητριών (generator agent GA) και οι πράκτορες φορτίου (Load Agents LA). Οι πράκτορες γεννητριών (GA) είναι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων με σκοπό τη ρύθμιση της τάσης αναφοράς σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγόριθμου ελέγχου και για την εφαρμογή των απαραίτητων αλλαγών στην τάση των γεννητριών μεταβάλλοντας την τάση αναφοράς AVR. Με τον ίδιο τρόπο, οι πράκτορες φορτίου είναι υπεύθυνοι για την εφαρμογή έγχυσης αέργου ισχύος μέσω πυκνωτικών στοιχείων σε ορισμένους ζυγούς του δικτύου (pilot buses).

Αναλυτικά τα βήματα του αλγόριθμου που υλοποιήθηκε για τη ρύθμιση της τάσης των ζυγών με τη χρήση του συστήματος πολλαπλών πρακτόρων περιγράφονται παρακάτω:

Βήμα 1^ο :

Το δίκτυο έχει διαχωριστεί σε ζώνες σύμφωνα με τους αλγόριθμους ομαδοποίησης. Μετά την εμφάνιση κάποιας διαταραχής στο δίκτυο, οι πράκτορες φορτίου (Load Agents) που εμφανίζουν τάση κάτω από το αποδεκτό όριο (στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στη παρούσα εργασία, θεωρούμε ως κατώτατο όριο τάσης 0.95 α.μ.) ενημερώνουν τον πλησιέστερο πράκτορα γεννήτριας στη ζώνη στην οποία ανήκουν, ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ως manager πράκτορας, στέλνοντας το μέτρο της τάσης του ζυγού τους και ζητούν ανύψωση τάσης με έγχυση αέργου ισχύος. Αφού ο πράκτορας γεννήτριας λάβει τις πληροφορίες για τα μέτρα των τάσεων των ζυγών της ζώνης, επιλέγει τον ζυγό που

εμφανίζει τη μεγαλύτερη ανάγκη για ρύθμιση τάσης και τον θέτει ως τον ζυγό 'στόχο' (target bus). Οι κινήσεις ελέγχου που θα πραγματοποιηθούν αρχικά, θα έχουν σκοπό τη ρύθμιση της τάσης του ζυγού 'στόχου'.

Βήμα 2^ο :

Ο πράκτορας γεννήτριας στέλνει σήμα στους υπόλοιπους generator agents της ζώνης ως κάλεσμα για ανάγκη έγχυσης αέργου ισχύος προκειμένου να ανυψωθεί η τάση του ζυγού 'στόχου' ώστε να βρίσκεται στα αποδεκτά όρια. Οι υπόλοιποι generator agents λαμβάνουν το μήνυμα και ενημερώνουν τον manager πράκτορα για την διαθέσιμη άεργο ισχύ που μπορούν να παράγουν, καθώς οι γεννήτριες στις οποίες αναφέρονται οι πράκτορες γεννητριών έχουν κάποιο ανώτατο όριο αέργου ισχύος που μπορούν να εγχύσουν. Παράλληλα οι bus agents οι οποίοι βρίσκονται στο 'πilotικούς ζυγούς' ενημερώνουν και αυτοί τον manager agent για τη διαθέσιμη άεργο ισχύ που μπορούν να εγχύσουν στο δίκτυο μέσω πυκνωτικών στοιχείων. Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο θεωρούνται ως όρια αέργου ισχύος που μπορούν να εγχυθούν μέσω πυκνωτικών στοιχείων τα 0-12MVA_r (με βήμα 1MVA_r).

Στη συνέχεια, ο manager agent επιλέγει τις κινήσεις που πρέπει να γίνουν και το ποσό της ισχύος που πρόκειται να εγχυθεί σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

Έστω i η γεννήτρια στην οποία, σύμφωνα με την προηγούμενη υπο-ενότητα, η μεταβολή της τάσης του ζυγού 'στόχου' εμφανίζει τον μεγαλύτερο βαθμό ευαισθησίας τάσης $S_{LV}(i, tg)$ (με τον όρο tg αναφερόμαστε στο ζυγό 'στόχο').

Η γεννήτρια i επιλέγεται ως η πρώτη που θα αυξήσει την παραγόμενη άεργο ισχύ της προκειμένου να ρυθμιστεί η τάση στον ζητούμενο ζυγό. Το ποσό της αύξησης της αέργου ισχύος που πρέπει να πραγματοποιηθεί από την γεννήτρια i , συμβολίζεται με ΔQ_{Gi} και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\Delta Q_{Gi} = \min\left[\frac{S_{QV}(i, i)}{S_{LV}(tg, i)} * (V_{tg}^{min} - V_{tg}), \Delta Q_{Ri}, S_{QV}(i, i) * (V_{Gi}^{max} - V_{Gi})\right] \quad (10.3.1)$$

Όπου,

V_{tg} , η παρούσα τάση του ζυγού 'στόχου' και V_{tg}^{min} , το κατώτατο όριο τάσης των ζυγών δηλαδή στο συγκεκριμένο αλγόριθμο 0.95 α.μ.

ΔQ_{Ri} , η άεργος ισχύς που μπορεί να διαθέσει η γεννήτρια i και υπολογίζεται ως η διαφορά της μέγιστης αέργου ισχύος που μπορεί να παράγει και της παρούσας παραγόμενης αέργου ισχύος της γεννήτριας.

V_{Gi} , η παρούσα τάση αναφοράς της γεννήτριας i και V_{Gi}^{max} , το ανώτατο όριο τάσης αναφοράς της γεννήτριας που στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται το 1.05 α.μ.

Σε περίπτωση που το ποσό αέργου ισχύος που μπορεί να εγχυθεί από τη γεννήτρια δεν αρκεί για τη ρύθμιση της τάσης του ζυγού 'στόχου' στα αποδεκτά όρια, τότε η εφεδρεία αέργου ισχύος που διαθέτουν οι γεννήτριες ανανεώνεται ως εξής:

$$\Delta Q_{Rj} (new) = \Delta Q_{Rj} (old) + |S_{QV}(i,j)|^* \Delta V_{Gi}, j \in N_G \quad (10.3.2)$$

Όπου,

$\Delta Q_{Rj} (old)$ η εφεδρεία αέργου ισχύος πριν την εφαρμογή κινήσεων ελέγχου στην γεννήτρια i και $\Delta Q_{Rj} (new)$ η νέα ανανεωμένη εφεδρεία αέργου ισχύος των γεννητριών.

Η μεταβολή της τάσης αναφοράς της γεννήτριας i μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\Delta V_G = \Delta Q_{Gi} / S_{QV(i,i)} \quad (10.3.3)$$

Σε περίπτωση, που ο ζυγός 'στόχος' συνεχίζει να έχει τάση κάτω από τα αποδεκτά όρια μετά την πρώτη κίνηση ελέγχου, η επόμενη γεννήτρια με τη μεγαλύτερη ευαισθησία ως προς τη μεταβολή της τάσης του ζυγού 'στόχου' επιλέγεται προκειμένου να συμβάλει στην ρύθμιση της τάσης του ζητούμενου ζυγού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι ο ζυγός 'στόχος' αποκτήσει τάση μέσα στα αποδεκτά όρια ή όταν εξαντληθούν οι ρυθμίσεις των γεννητριών που μπορούν να γίνουν.

Σε περίπτωση που ο ζυγός 'στόχος' έχει τάση κάτω από τα αποδεκτά όρια και έχουν εξαντληθεί όλα τα ποσά εφεδρείας αέργου ισχύος των γεννητριών, επιλέγεται ως επόμενη κίνηση η έγχυση αέργου ισχύος σε 'πilotικούς' ζυγούς μέσω πυκνωτικών στοιχείων.

Έστω j , ζυγός (pilot bus) στον οποίο η μεταβολή της τάσης του ζυγού 'στόχου' εμφανίζει το μεγαλύτερο βαθμό ευαισθησίας $S_{LL}(tg,j)$.

Ο ζυγός j αναλαμβάνει αρχικά την αύξηση της τάσης του ζυγού 'στόχου' με έγχυση αέργου ισχύος από πυκνωτικά στοιχεία. Το ποσό της αέργου ισχύος που μπορεί να εγχυθεί από τον ζυγό αυτό (pilot bus), συμβολίζεται με ΔQ_{cj} και δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta Q_{cj} = \min\left(\frac{V_{tg}^{min} - V_{tg}}{S_{LL}(tg,j)} * S_{base}, (Q_c^{max} - Q_c^n)\right) \quad (10.3.4)$$

Όπου S_{base} βάση ισχύος, η οποία στον συγκεκριμένο δίκτυο είναι 100 MVA, Q_c^{max} το μέγιστο ποσό αέργου ισχύος που μπορούν να εγχύσουν οι πυκνωτές στο ζυγό j , δηλαδή 12 MVA στην περίπτωση αυτή και Q_c^n το ποσό αέργου ισχύος που εγχέεται στον ζυγό j εκείνη τη χρονική στιγμή.

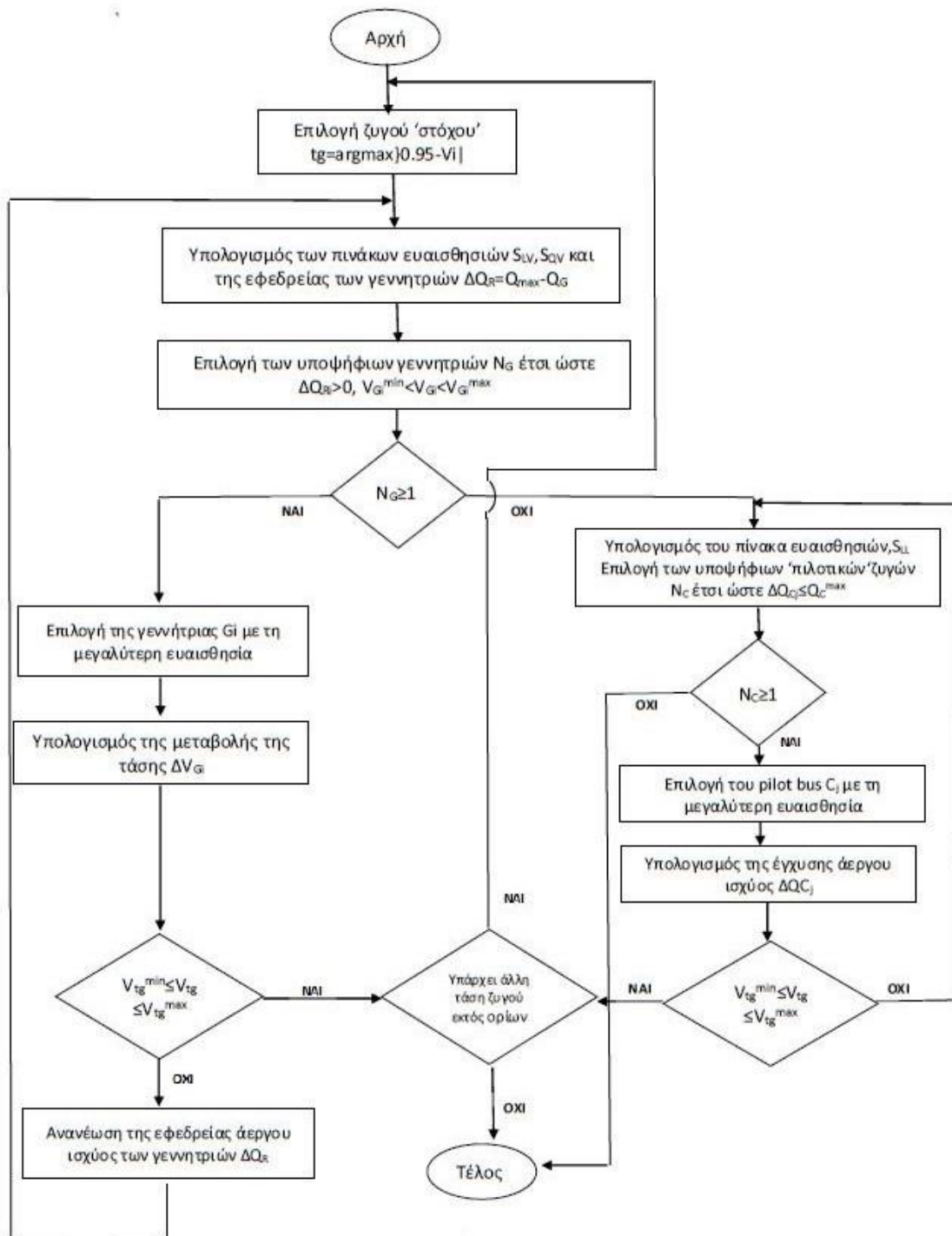
Σε περίπτωση, που ο ζυγός 'στόχος' συνεχίζει να έχει τάση κάτω από τα αποδεκτά όρια ο επόμενος 'πilotικός ζυγός' με τη μεγαλύτερη ευαισθησία ως προς την μεταβολή της τάσης του ζυγού 'στόχου' επιλέγεται προκειμένου να συμβάλει στην ρύθμιση της τάσης του ζητούμενου ζυγού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι ο ζυγός 'στόχος' αποκτήσει

τάση μέσα στα αποδεκτά όρια ή όταν εγχυθεί η μέγιστη δυνατή άεργος ισχύς στους 'πυλοτικούς' ζυγούς.

Ο manager πράκτορας στέλνει στους κατάλληλους πράκτορες τις κατάλληλες μεταβολές που πρέπει να πραγματοποιηθούν.

Αν ο πρώτος ζυγός 'στόχος' αποκτήσει τάση μέσα στα αποδεκτά όρια, τότε ο επόμενος ζυγός της ζώνης με τάση κάτω από το ελάχιστο όριο τάσης (0.95 α.μ.) επιλέγεται ως ζυγός 'στόχος' και η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι όλοι οι ζυγοί της ζώνης να ρυθμίσουν την τάση τους στα αποδεκτά όρια.[21].

Τα βήματα του αλγόριθμου που υλοποιήθηκε για τον αποκεντρωμένο έλεγχο τάσης φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα ροής:

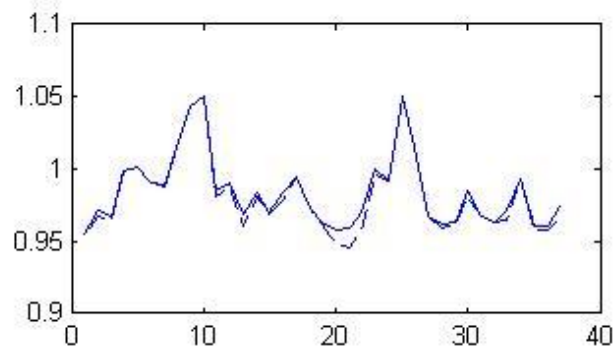


Σχήμα 10.3.1: Διάγραμμα ροής Αλγόριθμου Αποκεντρωμένου Ελέγχου

Γ 10.4 Αποτελέσματα Αλγορίθμου Αποκεντρωμένου Ελέγχου

Προκειμένου να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου αποκεντρωμένου ελέγχου που βασίζεται στη θεωρία συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων και περιγράφηκε παραπάνω, έγιναν μία σειρά δοκιμών στο δίκτυο των 118 ζυγών της IEEE. Στο δίκτυο αυτό εφαρμόστηκαν μία σειρά διαταραχών (αύξηση φορτίου και απώλεια γραμμών) σε κάθε ζώνη του δικτύου προκειμένου με τη χρήση του αλγορίθμου αποκεντρωμένου ελέγχου να πραγματοποιηθεί η ρύθμιση της τάσης όλων των ζυγών μέσα στα αποδεκτά όρια, τα οποία θεωρήθηκαν τα $[0.95 \ 1.05]$. Αρχικά, εφαρμόστηκε ως διαταραχή, αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 1. Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά οι κινήσεις που πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τον αλγόριθμο για τη ρύθμιση της τάσης.

Μετά την αύξηση κατά 30% της ενεργού και αέργου ισχύος των φορτίων της ζώνης 1, οι ζυγοί 20 και 21 εμφανίζουν τάση 0.9489 α.μ. και 0.9461 α.μ. αντίστοιχα, που είναι κάτω από το ελάχιστο αποδεκτό όριο τάσης. Πριν και μετά τη διαταραχή οι τάσεις των ζυγών φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 10.4.1: Τάσεις των ζυγών πριν και μετά την αύξηση κατά 30% της ισχύος των φορτίων της ζώνης 1

Με συνεχή γραμμή φαίνονται οι τάσεις των ζυγών πριν την εμφάνιση διαταραχής ενώ με διακεκομμένη, οι τάσεις των ζυγών μετά την διαταραχή.

Αφού ο ζυγός 21 είναι ο ζυγός με τη χαμηλότερη τάση (0.9461 α.μ.) γίνεται ο ζυγός 'στόχος' (target bus) στον αλγόριθμο ελέγχου. Οι ευαισθησίες της τάσης του ζυγού ως προς τη μεταβολή της τάσης των γεννητριών στους ζυγούς παραγωγής της ζώνης 1, S_{LV} , καθώς και οι ευαισθησίες της τάσης του ζυγού ως προς τη μεταβολή της αέργου ισχύος των 'πilotικών' ζυγών, φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 10.4.1: Ευαισθησίες ζυγού 21

Generator	19	24	25	32	Pilot bus	21
S_{LV}	0.585584	0.205139	0.13069	0.087511	S_{LL}	0.130598

(Οι ζυγοί παραγωγής και οι 'πυλοτικοί' ζυγοί στους οποίους η τάση του ζυγού 21 εμφανίζει πολύ μικρή ευαισθησία δεν φαίνονται στον παραπάνω πίνακα).

Επιλέγεται η γεννήτρια 19 ως η πρώτη γεννήτρια που θα μεταβάλλει την τάση αναφοράς της προκειμένου να παράγει περισσότερη αέργο ισχύ για τη διόρθωση της τάσης του ζυγού 21 καθώς ο ζυγός 21 εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή της τάσης της γεννήτριας 19.

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο που περιγράφηκε παραπάνω, η επιπλέον αέργος ισχύς που θα παράγει η γεννήτρια 19 θα πρέπει να υπόκεινται στους περιορισμούς της ανώτατης δυνατής παραγόμενης αέργου ισχύος της γεννήτριας και της ανώτατης τάσης αναφοράς της.

Έτσι προκύπτει ότι η γεννήτρια θα πρέπει να μεταβάλλει τη τάση αναφοράς της από 0.962 α.μ. σε 0.9660 α.μ. καθώς για την τάση αυτή παράγει τη μέγιστη δυνατή αέργο ισχύ (24 MVar). Για μεταβολή 0.004 α.μ. της τάσης αναφοράς της γεννήτριας 19, η τάση του ζυγού 'στόχου' 21 γίνεται ίση με 0.9481. Έτσι, επόμενη κίνηση για τη ρύθμιση της τάσης του ζυγού επιλέγεται η μεταβολή της τάσης αναφοράς της γεννήτριας 24. Οι κινήσεις προκειμένου να ρυθμιστεί τελικά η τάση του ζυγού 21 φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 10.4.2: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 1

Γεννήτρια	Τάση γεννήτριας πριν τον έλεγχο	Τάση γεννήτριας μετά τον έλεγχο	Μεταβολή τάσης αναφοράς
19	0.962	0.966	0.004
24	0.992	0.9998	0.0078

Πίνακας 10.4.3: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 1

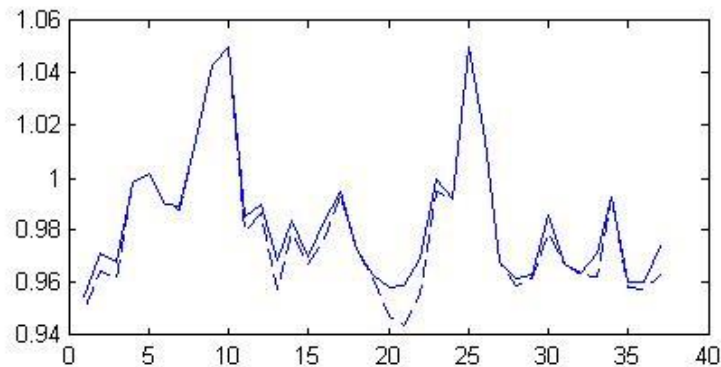
Αριθμός ζυγού	Τάση ζυγού πριν τον έλεγχο (α.μ.)	Τάση ζυγού μετά τον έλεγχο (α.μ.)
20	0.9489	0.9527
21	0.9461	0.9500

Μετά την εφαρμογή των κινήσεων αυτών, επιτυγχάνεται η ρύθμιση της τάσης του ζυγού 21 ενώ παρατηρείται ότι και οι υπόλοιποι ζυγοί της ζώνης έχουν τάσεις μέσα στα αποδεκτά όρια. Συνεπώς, με τις ελάχιστες δυνατές κινήσεις, επιτεύχθηκε αποτελεσματική ρύθμιση τάσης με τη χρήση του αλγόριθμου αποκεντρωμένου ελέγχου.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται αύξηση του φορτίου των ζυγών της ζώνης 1 κατά 35% και 40% προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα του αλγόριθμου αποκεντρωμένου ελέγχου για μεγάλες διαταραχές.

Μετά την αύξηση κατά 35% της ενεργού και αέργου ισχύος των φορτίων της ζώνης 1, οι ζυγοί 1, 20 και 21 εμφανίζουν τάσεις 0.9495α.μ., 0.9475 α.μ. και 0.9439 α.μ. αντίστοιχα,

που είναι κάτω από το ελάχιστο αποδεκτό όριο τάσης. Πριν και μετά τη διαταραχή οι τάσεις των ζυγών φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 10.4.2: Τάσεις των ζυγών πριν και μετά την αύξηση κατά 35% της ισχύος των φορτίων της ζώνης 1

Και στην περίπτωση αυτή, ζυγός 'στόχος' είναι αρχικά ο ζυγός 21.

Όπως και στα προηγούμενα, η τάση του ζυγού 21 εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή της τάσης της γεννήτριας 19 και στη αμέσως μετά στη μεταβολή της τάσης της γεννήτριας 24. Η τάση της γεννήτριας 19 μεταβάλλεται από 0.962 α.μ. σε 0.9639 α.μ. (στην οποία η γεννήτρια παράγει τη μέγιστη άεργο ισχύ της) και η τάση αναφοράς της γεννήτριας 24 από 0,992 α.μ. σε 1.0162 α.μ. Μετά τις κινήσεις αυτές η τάση του ζυγού 21 ρυθμίζεται εντός ορίων, ενώ οι κινήσεις αυτές προκαλούν και ρύθμιση της τάσης του ζυγού 20.

Στη συνέχεια, ως ζυγός 'στόχος' επιλέγεται ο ζυγός 1.

Οι ευαισθησίες της τάσης του ζυγού ως προς τη μεταβολή της τάσης των γεννητριών στους ζυγούς παραγωγής της ζώνης 1, S_{LV} , καθώς και οι ευαισθησίες της τάσης του ζυγού ως προς τη μεταβολή της αέργου ισχύος των 'πilotικών' ζυγών, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 10.4.4: Ευαισθησίες ζυγού 1

Generator	4	6	8	18	19	26	31	113
S_{LV}	0.477054	0.303808	0.118724	0.017847	0.042367	0.00427	0.005594	0.029047
Pilot bus	3		13		33		117	
S_{LL}	0.05302		0.008118		0.001042		0.015214	

Επιλέγεται η γεννήτρια 4 ως η πρώτη γεννήτρια που θα μεταβάλλει την τάση αναφοράς της προκειμένου να παράγει περισσότερη άεργο ισχύ για τη διόρθωση της τάσης του ζυγού 1 καθώς ο ζυγός 1 εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή της τάσης της γεννήτριας αυτής. Έτσι η τάση αναφοράς της γεννήτριας 4 μεταβάλλεται από 0.9980 α.μ. σε 0.9988 α.μ.

Μετά την εφαρμογή των κινήσεων αυτών, επιτυγχάνεται η ρύθμιση της τάσης του ζυγού 1,20 και 21 .Συνεπώς, επιτεύχθηκε και στην περίπτωση αυτή αποτελεσματική ρύθμιση τάσης με τη χρήση του αλγόριθμου αποκεντρωμένου ελέγχου.

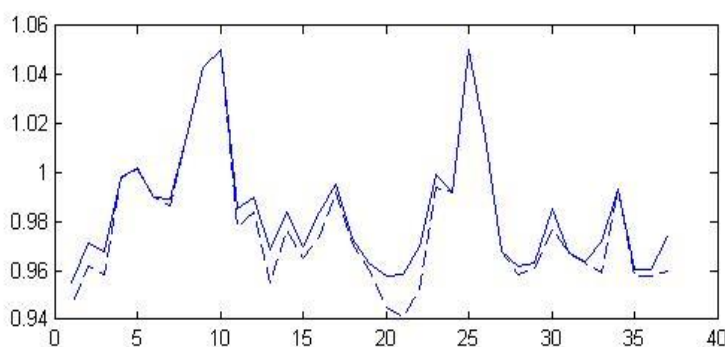
Πίνακας 10.4.5: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 35% στη ζώνη 1

Γεννήτρια	Τάση γεννήτριας πριν τον έλεγχο	Τάση γεννήτριας μετά τον έλεγχο	Μεταβολή τάσης αναφοράς
4	0.9980	0.9988	0.0008
19	0.962	0.9639	0.0019
24	0.992	1.0162	0.0242

Πίνακας 10.4.6: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 35% στη ζώνη 1

Αριθμός ζυγού	Τάση ζυγού πριν τον έλεγχο (α.μ.)	Τάση ζυγού μετά τον έλεγχο (α.μ.)
1	0.9495	0.950
20	0.9475	0.9521
21	0.9439	0.9504

Για αύξηση του φορτίου των ζυγών της ζώνης 1 κατά 40% , οι ζυγοί 1, 20 και 21 εμφανίζουν τάσεις 0.9458α.μ. , 0.9449 α.μ. και 0.9409 α.μ. αντίστοιχα, που είναι κάτω από το ελάχιστο αποδεκτό όριο τάσης. Πριν και μετά τη διαταραχή οι τάσεις των ζυγών φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 10.4.3: Τάσεις των ζυγών πριν και μετά την αύξηση κατά 40% της ισχύος των φορτίων της ζώνης 1

Όπως και στα προηγούμενα, για ζυγό 'στόχο', το ζυγό με τη χαμηλότερη τάση και σύμφωνα με τις ευαισθησίες που προκύπτουν, ο αλγόριθμος δίνει τις εξής κινήσεις που πρέπει να γίνουν για τη ρύθμιση της τάσης των ζυγών:

Πίνακας 10.4.7: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 40% στη ζώνη 1

Γεννήτρια	Τάση γεννήτριας πριν τον έλεγχο	Τάση γεννήτριας μετά τον έλεγχο	Μεταβολή τάσης αναφοράς
4	0.9980	1.0066	0.0086
24	0.992	1.0316	0.0396

Πίνακας 10.4.8: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 40% στη ζώνη 1

Αριθμός ζυγού	Τάση ζυγού πριν τον έλεγχο (α.μ.)	Τάση ζυγού μετά τον έλεγχο (α.μ.)
1	0.9458	0.9503
20	0.9449	0.9511
21	0.9409	0.9506

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γεννήτρια 19, στην οποία ο ζυγός 21 εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία, δεν επιλέγεται στην περίπτωση αυτή καθώς μετά την εμφάνιση διαταραχής 40% των φορτίων της ζώνης 1, η γεννήτρια 19 παράγει τη μέγιστη άεργο ισχύ της και δεν έχει περιθώριο για αύξηση της.

Τέλος, ως διαταραχή στη ζώνη 1 εφαρμόζεται απώλεια των γραμμών 4-11 και 21-22. Ο ζυγός 21 επιλέγεται ως ζυγός 'στόχος' καθώς είναι ο μοναδικός που εμφανίζει τάση μικρότερη από το κατώτατο αποδεκτό όριο και συγκεκριμένα 0.9335 α.μ. Έτσι σύμφωνα με τις ευαισθησίες που προκύπτουν, οι οποίες διαφέρουν αρκετά από τα προηγούμενα αφού έχουμε και αλλαγή της δομής του δικτύου, οι κινήσεις που πρέπει να εφαρμοστούν προκειμένου να ρυθμιστεί η τάση του ζυγού 21 από 0.9335α.μ. σε 0.9510 α.μ. είναι:

Πίνακας 10.4.9: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για απώλεια γραμμών στη ζώνη1

Γεννήτρια	Τάση γεννήτριας πριν τον έλεγχο	Τάση γεννήτριας μετά τον έλεγχο	Μεταβολή τάσης αναφοράς
19	0.962	0.9674	0.0054

Πίνακας 10.4.10: Έγχυση άεργου ισχύος στους 'πilotικούς' ζυγούς για απώλεια γραμμών στη ζώνη1

Pilot bus	Έγχυση ισχύος(MVAr)
3	0
13	0
21	6
33	0
117	0

Θα πρέπει να τονιστεί ότι σε περίπτωση εμφάνισης διαταραχής στη ζώνη 1 πραγματοποιείται έλεγχος τάσης και στις άλλες ζώνες του δικτύου στις οποίες εμφανίζεται ανάγκη ρύθμισης τάσης, παράλληλα με τον έλεγχο τάσης της ζώνης 1. Για παράδειγμα μετά την αύξηση κατά 30% των φορτίων της ζώνης 1 και μετά την απώλεια γραμμών απαιτείται ρύθμιση τάσης σε κάποιους ζυγούς της ζώνης 2. Στη ζώνη 3 δεν υπάρχει ανάγκη ρύθμισης της τάσης. Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα αποκεντρωμένου ελέγχου για ρύθμιση της τάσης των ζυγών της ζώνης 2 μετά την εμφάνιση διαταραχών στη ζώνη 1 φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 10.4.11: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα στη ζώνη 2 πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 1

Αριθμός ζυγού	Τάση ζυγού πριν τον έλεγχο (α.μ.)	Τάση ζυγού μετά τον έλεγχο (α.μ.)
38	0.9497	0.9501
53	0.9460	0.9504

Πίνακας 10.4.12: Τάσεις γεννητριών της ζώνης 2 πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 1

Γεννήτρια	Τάση γεννήτριας πριν τον έλεγχο	Τάση γεννήτριας μετά τον έλεγχο	Μεταβολή τάσης αναφοράς
34	0.9840	0.9848	0.0008
54	0.9550	0.9605	0.0055

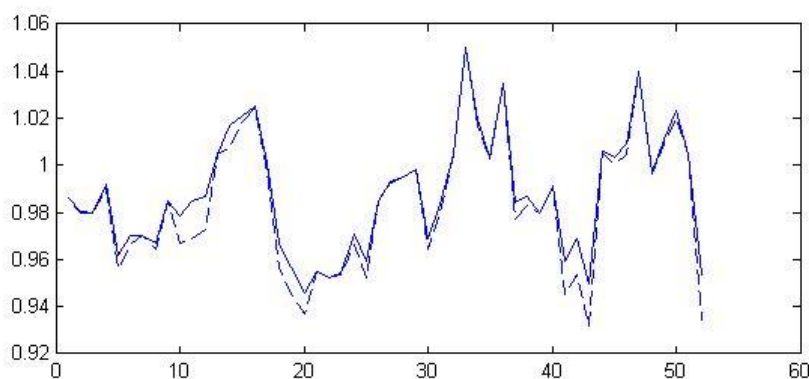
Πίνακας 10.4.13: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα στη ζώνη 2 πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για απώλεια γραμμών στη ζώνη 1

Αριθμός ζυγού	Τάση ζυγού πριν τον έλεγχο (α.μ.)	Τάση ζυγού μετά τον έλεγχο (α.μ.)
53	0.9459	0.9505

Πίνακας 10.4.14: Τάσεις γεννητριών της ζώνης 2 πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για απώλεια γραμμών στη ζώνη 1

Γεννήτρια	Τάση γεννήτριας πριν τον έλεγχο	Τάση γεννήτριας μετά τον έλεγχο	Μεταβολή τάσης αναφοράς
54	0.9550	0.9606	0.0056

Στη συνέχεια εφαρμόζονται διαταραχές στη ζώνη 2 του δικτύου προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα του αλγόριθμου αποκεντρωμένου ελέγχου. Για αύξηση της ενεργού και αέργου ισχύος των φορτίων της ζώνης 2 κατά 30% οι ζυγοί 52,53,74,76 και 118 εμφανίζουν τάσεις κάτω από το κατώτατο αποδεκτό όριο (0.95 α.μ.) και συγκεκριμένα 0.9453 α.μ. , 0.9371α.μ., 0.9453 α.μ.,0,9316 α.μ. και 0.9342α.μ. αντίστοιχα. Πριν και μετά την εμφάνιση της διαταραχής οι τάσεις των ζυγών φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 10.4.4: Τάσεις των ζυγών πριν και μετά την αύξηση κατά 30% της ισχύος των φορτίων της ζώνης 2

Αρχικά ως ζυγός στόχος επιλέγεται ο ζυγός 76, καθώς αυτός αντιμετωπίζει την μεγαλύτερη ανάγκη ανύψωσης τάσης.

Οι ευαισθησίες της τάσης του ζυγού ως προς τη μεταβολή της τάσης των γεννητριών στους ζυγούς παραγωγής της ζώνης 2, S_{LV} , καθώς και οι ευαισθησίες της τάσης του ζυγού ως προς τη μεταβολή της αέργου ισχύος των 'πilotικών' ζυγών, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 10.4.15: Ευαισθησίες ζυγού 76

Generator	69	72	73	80	Pilot bus	75	118
S_{LV}	0.39139	0.026222	0.106472	0.416505	S_{LL}	0.03087	0.06099

Επιλέγεται η γεννήτρια 80 ως η πρώτη γεννήτρια που θα μεταβάλλει την τάση αναφοράς της προκειμένου να παράγει περισσότερη άεργο ισχύ για τη διόρθωση της τάσης του ζυγού 76 καθώς ο ζυγός 76 εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή της τάσης της γεννήτριας αυτής. Έτσι η τάση αναφοράς της γεννήτριας 80 μεταβάλλεται από 1.04 α.μ. σε 1.05 α.μ. Η μεταβολή αυτή δεν αρκεί για τη διόρθωση της τάσης του ζυγού 76 όμως η τάση αναφοράς της γεννήτριας 80 δεν μπορεί να αυξηθεί περισσότερο καθώς το 1.05 α.μ. είναι το ανώτατο όριο τάσης. Έτσι, επιλέγεται η γεννήτρια 69 ως η επόμενη γεννήτρια που θα μεταβάλλει την τάση αναφοράς της για τη διόρθωση της τάσης του ζυγού 76. Και στην περίπτωση αυτή η τάση της γεννήτριας λαμβάνει τη μέγιστη δυνατή τιμή της, δηλαδή 1.05.

Η τάση του ζυγού 76 συνεχίζει να είναι κάτω από το κατώτατο αποδεκτό όριο οπότε επιλέγεται στη συνέχεια η γεννήτρια 73. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η διόρθωση της τάσης όλων των ζυγών της ζώνης και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 10.4.16: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 2

Γεννήτρια	Τάση γεννήτριας πριν τον έλεγχο	Τάση γεννήτριας μετά τον έλεγχο	Μεταβολή τάσης αναφοράς
54	0.955	0.9711	0.0161
69	1.035	1.0500	0.0150
72	0.980	1.0500	0.0700

73	0.991	1.0500	0.0590
77	1.006	1.0179	0.0119
80	1.040	1.0500	0.0100

Πίνακας 10.4.17: Έγχυση άεργου ισχύος στους 'πilotικούς' ζυγούς για έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 2

Pilot bus	Έγχυση ισχύος(MVAr)
44	0
47	0
52	0
75	0
118	5

Πίνακας 10.4.18: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 2

Αριθμός ζυγού	Τάση ζυγού πριν τον έλεγχο (α.μ.)	Τάση ζυγού μετά τον έλεγχο (α.μ.)
52	0.9453	0.9542
53	0.9371	0.9504
74	0.9453	0.9661
76	0.9316	0.9505
118	0.9342	0.9551

Έτσι μετά την εφαρμογή των κινήσεων αυτών, επιτυγχάνεται η ρύθμιση της τάσης των ζυγών της ζώνης 2 μέσα στα αποδεκτά όρια με το βέλτιστο δυνατό τρόπο.

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται για αύξηση των φορτίων της ζώνης 2 κατά 35% καθώς και για την απώλεια των γραμμών 35-36,60-62. Οι κινήσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν για τη ρύθμιση της τάσης των ζυγών φαίνονται παρακάτω:

- 35% αύξηση φορτίων ζώνης 2

Πίνακας 10.4.19: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 35% στη ζώνη 2

Γεννήτρια	Τάση γεννήτριας πριν τον έλεγχο	Τάση γεννήτριας μετά τον έλεγχο	Μεταβολή τάσης αναφοράς
54	0.955	0.9722	0.0172
69	1.035	1.0500	0.0150
72	0.980	1.0500	0.0700
73	0.991	1.0500	0.0590
74	0.958	0.9652	0.0072
77	1.006	1.0163	0.0103
80	1.040	1.0500	0.0100

Πίνακας 10.4.20: Έγχυση άεργου ισχύος στους 'πilotικούς' ζυγούς για έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 35% στη ζώνη 2

Pilot bus	Έγχυση ισχύος(MVAr)
44	0
47	0
52	0
75	12
118	12

Πίνακας 10.4.21: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 35% στη ζώνη 2

Αριθμός ζυγού	Τάση ζυγού πριν τον έλεγχο (α.μ.)	Τάση ζυγού μετά τον έλεγχο (α.μ.)
52	0.9418	0.9532
53	0.9349	0.9500
58	0.9497	0.9605
74	0.9386	0.9663
75	0.9471	0.9748
76	0.9241	0.9506
118	0.9270	0.9573

- Απώλεια γραμμών 35-36 και 60-62

Μετά την απώλεια των γραμμών αυτών η τάση του ζυγού 53 πέφτει στην τιμή 0.9460 α.μ.

Έτσι επιλέγεται ως ζυγός 'στόχος' ενώ οι ευαισθησίες της τάσης του ζυγού ως προς τη μεταβολή της τάσης των γεννητριών στους ζυγούς παραγωγής της ζώνης 2, S_{LV} , καθώς και οι ευαισθησίες της τάσης του ζυγού ως προς τη μεταβολή της άεργου ισχύος των 'πilotικών' ζυγών, είναι:

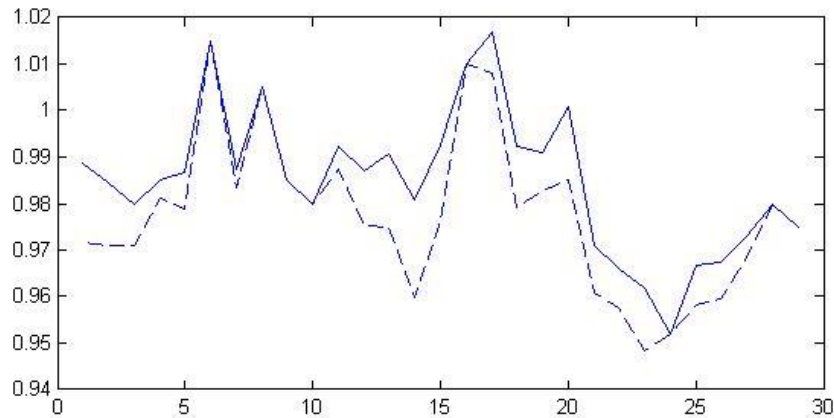
Πίνακας 10.4.22: Ευαισθησίες ζυγού 53

Generator	49	54	56	Pilot bus	75
S_{LV}	0.157143	0.720534	0.127879	S_{LL}	0.044861

Συνεπώς, επιλέγεται η γεννήτρια στο ζυγό 54 προκειμένου να ρυθμίσει την τάση του ζυγού 53. Από τον αλγόριθμο προκύπτει ότι η γεννήτρια θα πρέπει να μεταβάλλει την τάση αναφοράς της από 0.955 α.μ. σε 0.9606 α.μ. έτσι ώστε η τάση του ζυγού 53 να γίνει από 0.9460 α.μ., 0.9505 α.μ.

Μετά την εμφάνιση των παραπάνω διαταραχών στη ζώνη 2, οι άλλες ζώνες του δικτύου επηρεάζονται σε μικρό βαθμό με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν παραβιάσεις τάσεων και συνεπώς ανάγκη για ρύθμιση της τάσης.

Τέλος, εφαρμόστηκαν διαταραχές στη ζώνη 3 του δικτύου προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα του αλγόριθμου αποκεντρωμένου ελέγχου. Για αύξηση της ενεργού και αέργου ισχύος των φορτίων της ζώνης 3 κατά 40% ο ζυγός 106 εμφανίζει τάση κάτω από το κατώτατο αποδεκτό όριο (0.95 α.μ.) και συγκεκριμένα 0.9484 α.μ.. Πριν και μετά την εμφάνιση της διαταραχής οι τάσεις των ζυγών φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 10.4.5: Τάσεις των ζυγών πριν και μετά την αύξηση κατά 40% της ισχύος των φορτίων της ζώνης 3

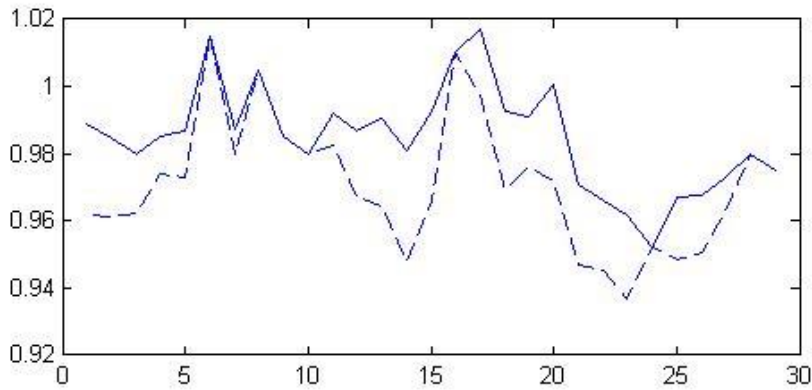
Οι ευαισθησίες της τάσης του ζυγού ως προς τη μεταβολή της τάσης των γεννητριών στους ζυγούς παραγωγής της ζώνης 3, S_{LV} , καθώς και οι ευαισθησίες της τάσης του ζυγού ως προς τη μεταβολή της αέργου ισχύος των 'πilotικών' ζυγών, φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 10.4.23: Ευαισθησίες ζυγού 106

Generator	87	89	91	99	107	111	112
S_{LV}	0.001822	0.08651	0.022853	0.151194	0.476269	0.08803	0.098059
Pilot bus	82		95		106		
S_{LL}	0.05302		0.008118		0.001042		

Συνεπώς, επιλέγεται η γεννήτρια στο ζυγό 107 προκειμένου να ρυθμίσει την τάση του ζυγού 106. Από τον αλγόριθμο προκύπτει ότι η γεννήτρια θα πρέπει να μεταβάλλει την τάση αναφοράς της από 0.9520 α.μ. σε 0.9554 α.μ. έτσι ώστε η τάση του ζυγού 106 να γίνει από 0.9484 α.μ., 0.9501 α.μ. Οι υπόλοιποι ζυγοί της ζώνης 1 έχουν τάση μέσα στα αποδεκτά όρια άρα δεν χρειάζονται άλλες κινήσεις ελέγχου.

Για αύξηση της ενεργού και αέργου ισχύος των φορτίων της ζώνης 3 κατά 50% οι ζυγοί 95 και 106 εμφανίζουν τάσεις κάτω από το κατώτατο αποδεκτό όριο (0.95 α.μ.) και συγκεκριμένα 0.9480 α.μ. και 0.9366 α.μ. αντιστοίχα. Πριν και μετά την εμφάνιση της διαταραχής οι τάσεις των ζυγών φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 10.4.6: Τάσεις των ζυγών πριν και μετά την αύξηση κατά 50% της ισχύος των φορτίων της ζώνης 3

Οι κινήσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν για τη ρύθμιση της τάσης των ζυγών φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 10.4.24: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 50% στη ζώνη 3

Γεννήτρια	Τάση γεννήτριας πριν τον έλεγχο	Τάση γεννήτριας μετά τον έλεγχο	Μεταβολή τάσης αναφοράς
89	1.0050	1.0065	0.0015
107	0.9520	0.9802	0.0282

Με αυτές τις μεταβολές στις τάσεις αναφοράς των γεννητριών οι τάσεις των ζυγών 95 και 106 ρυθμίζονται εντός των αποδεκτών όριων:

Πίνακας 10.4.25: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 50% στη ζώνη 3

Αριθμός ζυγού	Τάση ζυγού πριν τον έλεγχο (α.μ.)	Τάση ζυγού μετά τον έλεγχο (α.μ.)
95	0.9480	0.9500
106	0.9366	0.9508

Παράλληλα με τον έλεγχο της τάσης στη ζώνη 3 πραγματοποιείται και έλεγχος τάσης στη ζώνη 2 καθώς υπάρχει παραβίαση των ορίων τάσης ενώ στη ζώνη 1 δεν εμφανίζεται ανάγκη για ρύθμιση της τάσης. Συγκεκριμένα, για αύξηση των φορτίων κατά 40% της ζώνης 3, ο αλγόριθμος αποκεντρωμένου ελέγχου δίνει τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 10.4.26: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα στη ζώνη 2 πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 40% στη ζώνη 3

Αριθμός ζυγού	Τάση ζυγού πριν τον έλεγχο (α.μ.)	Τάση ζυγού μετά τον έλεγχο (α.μ.)
53	0.9459	0.9505

Πίνακας 10.4.27: Τάσεις γεννητριών της ζώνης 2 πριν και μετά τον αποκεντρωμένο έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 40% στη ζώνη 3

Γεννήτρια	Τάση γεννήτριας πριν τον έλεγχο	Τάση γεννήτριας μετά τον έλεγχο	Μεταβολή τάσης αναφοράς
54	0.9550	0.9607	0.0057

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11^ο - PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Γ 11.1 Εισαγωγή

Διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης περιλαμβάνουν έναν αριθμό περιορισμών που πρέπει να ικανοποιεί η λύση. Έτσι, ο σκοπός των βελτιστοποιήσεων με περιορισμούς είναι να ψάξει για εφικτές λύσεις με καλύτερες αντικειμενικές τιμές. Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

Ζητείται η εύρεση του x έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η $f(x)$ και να υπόκειται στους παρακάτω περιορισμούς:

$$\mathbf{g}_i(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (11.1.1)$$

$$\mathbf{h}_j(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \quad j=1,2,\dots,p$$

όπου $x=[x_1,x_2,\dots,x_d]^T$ συμβολίζει το διάνυσμα της λύσης, n είναι ο αριθμός των ανισοτικών περιορισμών και p ο αριθμός των ισοτικών περιορισμών. Πρακτικά, ένας ισοτικός περιορισμός $h_j(x)=0$ μπορεί να αντικατασταθεί από δύο μη ανισοτικούς περιορισμούς $h_j(x) \leq \delta$ και $h_j(x) \geq -\delta$ (δ είναι μια πολύ μικρή ποσότητα). Επομένως όλοι οι περιορισμοί μπορούν να μετασχηματιστούν σε $N=2n+p$ ανισοτικούς περιορισμούς. Καλούμε το x εφικτή(feasible) λύση αν ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς.

Διάφοροι παραδοσιακοί μαθηματικοί μέθοδοι προγραμματισμού όπως η μέθοδος του πολλαπλασιαστή Lagrange συνήθως απαιτούν πληροφορίες της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης. Επίσης, η λύση που προκύπτει τείνει να είναι τοπικό και όχι ολικό βέλτιστο. Τα τελευταία χρόνια, διάφοροι εξελικτικοί αλγόριθμοι (Evolutionary algorithms-EAs) έχουν προσελκύσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν σε σχέση με παλαιότερες μεθόδους. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι δεν απαιτούν η αντικειμενική συνάρτηση να είναι παραγωγίσιμη-ούτε καν συνεχής- και λόγω του ότι εξερευνούν όλο το εύρος της περιοχής που βρίσκεται η λύση παρουσιάζουν ολικό(global) βέλτιστο.

Το 1995 αναπτύχθηκε μια στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης από τους Kennedy και Eberhart, η μέθοδος σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization-PSO). Η ανάπτυξη της PSO βασίζεται στην παρατήρηση της συμπεριφοράς ατόμων σμήνους, όπως για παράδειγμα ένα σμήνος πουλιών ή ψαριών. Στην αναζήτησή τους για τροφή από το ένα μέρος στο άλλο, πάντα υπάρχει κάποιο μέλος του σμήνους που έχει μεγαλύτερη ικανότητα στο να εντοπίσει την τροφή. Καθώς υπάρχει αλληλεπίδραση και μετάδοση πληροφορίας μεταξύ των ατόμων του σμήνους, το σμήνος τελικά θα μετακινηθεί προς την περιοχή όπου υπάρχει τροφή. Στη μέθοδο της PSO υπάρχει ένας αριθμός ατόμων(particles) τα οποία τοποθετούνται στο χώρο αναζήτησης ενός προβλήματος ή μιας συνάρτησης και υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στην τρέχουσα θέση. Κάθε σωματίδιο καθορίζει στη συνέχεια την κίνησή του στο χώρο αναζήτησης βασιζόμενο τόσο στη δική του εμπειρία (τρέχουσα και καλύτερη θέση) όσο και στην εμπειρία των υπόλοιπων ατόμων του

πληθυσμού. Η επόμενη επανάληψη λαμβάνει χώρα αφού έχουν κινηθεί όλα τα σωματίδια. Τελικά, το σμήνος ως σύνολο θα προσεγγίσει τη βέλτιστη τιμή της συνάρτησης.

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα που συνοψίζονται παρακάτω:

- Χρησιμοποιεί πιθανοκρατικούς και όχι ντετερμινιστικούς κανόνες μετάβασης και έτσι είναι ένα είδος στοχαστικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης ο οποίος μπορεί να ψάχνει λύση σε μία πολύπλοκη περιοχή. Αυτό προσδίδει στην PSO μεγαλύτερη ευελιξία από τις συμβατικές μεθόδους.
- Χρησιμοποιεί έναν πληθυσμό ο οποίος ψάχνει για τη λύση. Επομένως η αναζήτηση της λύσης από μία ομάδα ατόμων προσφέρει μεγαλύτερο εύρος από την αναζήτηση της λύσης από ένα μοναδικό σημείο και καθιστά τη μέθοδο λιγότερο ευαίσθητη στο να εγκλωβίζεται σε τοπικά ελάχιστα.
- Μπορεί να εφαρμοστεί σε μη παραγωγίσιμα προβλήματα διότι δεν χρησιμοποιείται η ευαισθησία της συνάρτησης (function sensitivity-gradient).
- Διαθέτει ένα πλήθος παραμέτρων οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να εφαρμόζεται σε ποικίλα προβλήματα. Είναι προφανές ότι η επιλογή των παραμέτρων είναι εξαιρετικής σημασίας τόσο για την ταχύτητα όσο και για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.
- Αντίθετα από τους γενετικούς και τους άλλους ευρετικούς αλγορίθμους, η PSO διαθέτει την ευελιξία να ελέγχει την ισορροπία ανάμεσα στην ολική και την τοπική εξερεύνηση του εξεταζόμενου χώρου. Έτσι ξεπερνάει το πρόβλημα της πρόωρης σύγκλισης και διευρύνεται η ικανότητα αναζήτησης της λύσης [22]

Γ 11.2 PSO Αλγόριθμος

Όπως προαναφέρθηκε, η PSO αποσκοπεί στην εύρεση της βέλτιστης λύσης, δηλαδή στη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, διεξάγοντας μια στοχαστική αναζήτηση βασισμένη σε έναν πληθυσμό. Ο πληθυσμός αποτελείται από τα άτομα (particles), το κάθε ένα από τα οποία αποτελεί μια πιθανή λύση (candidate solution) και αναπαρίσταται από ένα διάνυσμα d διαστάσεων, όπου d ο αριθμός των παραμέτρων που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν. Δηλαδή το k -οστό άτομο έχει την εξής μορφή:

$$x_k^{(t)} = [x_{k,1}^{(t)} \ x_{k,2}^{(t)} \ \dots \ x_{k,d}^{(t)}] \quad (11.2.1)$$

Ο πληθυσμός αρχικοποιείται κατά τυχαίο τρόπο, αλλά έτσι ώστε να ισχύουν οι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας στους οποίους υπόκειται το πρόβλημα, και τα άτομα κινούνται ελεύθερα εντός του πολυδιάστατου χώρου αναζήτησης με κάποια ταχύτητα (velocity) η οποία μαθηματικά έχει την ίδια ακριβώς μορφή με τα άτομα.

Η αρχική θέση και η ταχύτητα του ατόμου i δίνονται από τους τύπους:

$$x_i^{(0)} = x_{min} + rand(x_{max} - x_{min}) \quad \text{με} \quad x_i^{(t)} = [x_{i,1}^{(t)}, x_{i,2}^{(t)}, \dots, x_{i,d}^{(t)}] \quad (11.2.2)$$

$$u_i^{(0)} = x_{min} + \frac{rand(x_{max} - x_{min})}{\Delta t} \quad \text{με} \quad u_i^{(t)} = [u_{i,1}^{(t)}, u_{i,2}^{(t)}, \dots, u_{i,d}^{(t)}] \quad (11.2.3)$$

Όπου x_{min} x_{max} τα διανύσματα των ανώτερων και κατώτερων τιμών αντίστοιχα.

Κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων τα άτομα διορθώνουν τόσο την ταχύτητά τους όσο και τη θέση τους (position) βασιζόμενα στη βέλτιστη λύση που έχει επιτύχει το κάθε ένα από αυτά (τοπικό βέλτιστο, $pbest_i$) αλλά και στη βέλτιστη λύση που έχει επιτύχει ο συνολικός πληθυσμός (ολικό βέλτιστο, $gbest_i$) μέχρι εκείνη τη στιγμή. Αυτό συμβαίνει με σκοπό να βρεθούν όλα τα άτομα στην περιοχή της βέλτιστης λύσης όπου θα γίνει μία πιο λεπτομερής εξέταση με σκοπό να επιτευχθεί με ακρίβεια η καλύτερη δυνατή λύση.

$$pbest_i = (pbest_{i,1}, pbest_{i,2}, \dots, pbest_{i,d}) \quad (11.2.4)$$

$$gbest = (gbest_1, gbest_2, \dots, gbest_d) \quad (11.2.5)$$

Παρακάτω παρουσιάζεται η σχέση σύμφωνα με την οποία κάθε άτομο ανανεώνει την ταχύτητα του σε κάθε επανάληψη:

$$u_i^{(t+1)} = \omega u_i^{(t)} + c_1 rand_1(pbest_i - x_i^{(t)}) + c_2 rand_2(gbest - x_i^{(t)}) \quad (11.2.6)$$

Οι c_1 και c_2 είναι συντελεστές βαρύτητας ενώ οι $rand_1$ και $rand_2$ λαμβάνουν τυχαίες τιμές στο διάστημα $[0,1]$ προσδίδοντας στον αλγόριθμο στοχαστικό χαρακτήρα. Πιο συγκεκριμένα, η c_1 ονομάζεται εμπειρική παράμετρος διότι συμβάλλει στην καινούργια ταχύτητα σύμφωνα με την εμπειρία του ατόμου, δηλαδή τη βέλτιστη λύση που έχει επιτύχει το ίδιο, ενώ η c_2 ονομάζεται κοινωνική παράμετρος επειδή καθορίζει την καινούργια ταχύτητα βασιζόμενο στη συμπεριφορά ολόκληρου του πληθυσμού, δηλαδή στη βέλτιστη λύση που έχει επιτευχθεί από το συνολικό πληθυσμό. Η παράμετρος ω ονομάζεται βάρος αδράνειας (inertia weight) και ελέγχει το αντίκτυπο που έχουν οι προηγούμενες ταχύτητες στις τρέχουσες. Όσον αφορά τα πρώτα στάδια της αναζήτησης είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται μεγάλες τιμές του ω ενώ όταν πρόκειται για τις τελευταίες επαναλήψεις όπου ο αλγόριθμος έχει ήδη προσεγγίσει την περιοχή της βέλτιστης λύσης, είναι αποδοτικότερο να χρησιμοποιούνται μικρές τιμές του ω έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη και πιο λεπτομερής τοπική αναζήτηση. Έτσι το ω παρουσιάζεται να μεταβάλλεται γραμμικά σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

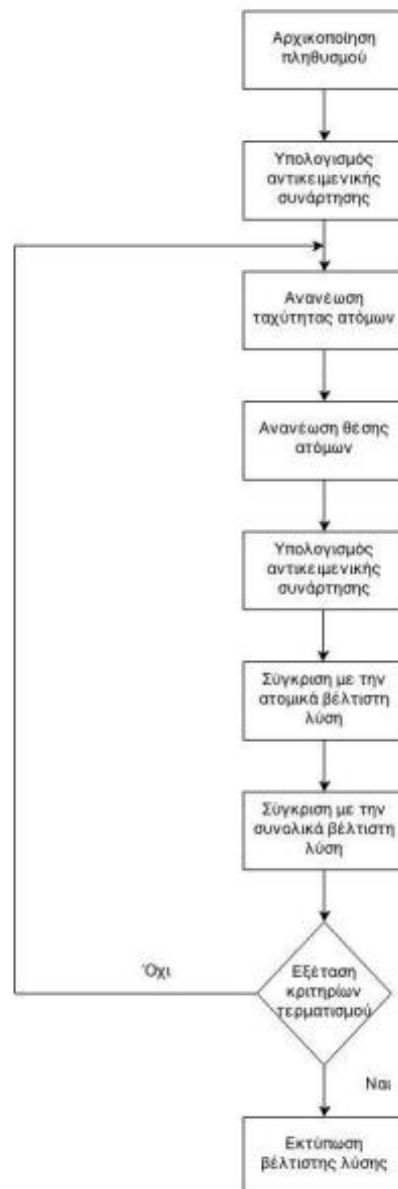
$$\omega = (\omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iterations}) \cdot iterations \quad (11.2.7)$$

όπου $iterations$ ο συνολικός αριθμός των επαναλήψεων και $\omega_{max}, \omega_{min}$ η μέγιστη και η ελάχιστη αντίστοιχα τιμή που έχουμε ορίσει. Σε άλλες μελέτες το ω παρουσιάζεται να μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση: $\omega_{new} = \alpha \cdot \omega_{old}$, όπου α μια σταθερά μικρότερη της μονάδας αλλά πολύ κοντά σε αυτήν, ενώ πολλές φορές, για λόγους απλοποίησης, το ω θεωρείται σταθερό και ίσο με τη μονάδα.

Στη συνέχεια ανανεώνεται η θέση του κάθε ατόμου σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + u_i^{(t+1)} \quad (11.2.8)$$

δηλαδή η καινούργια θέση του ατόμου προκύπτει από την πρόσθεση της καινούργια ταχύτητας και της παλιάς του θέσης. Έπειτα αφού υπολογιστεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος, ανανεώνονται τα $\vec{p}_{best,i}$ και \vec{g}_{best} , στην περίπτωση που το άτομο ή ο πληθυσμός αντίστοιχα έχει επιτύχει κάποια καλύτερη λύση. Μετά από αυτό το βήμα εξετάζεται αν ικανοποιούνται οι συνθήκες τερματισμού. Αν αυτές ικανοποιούνται ο αλγόριθμος τερματίζεται ενώ αν όχι, αυτός προχωράει στην επόμενη επαναληπτική διαδικασία. [23]. Τα βήματα του αλγορίθμου συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 11.2.1: Διάγραμμα ροής PSO

Γ 11.3 Χρήση αλγόριθμου PSO για ρύθμιση τάσης

Στην εργασία αυτή, ο αλγόριθμος PSO χρησιμοποιήθηκε ως εναλλακτικός τρόπος για τη ρύθμιση της τάσης των ζυγών μετά την εμφάνιση κάποιας διαταραχής στο δίκτυο των 118 ζυγών της IEEE. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση αυτή, αν i η ζώνη στην οποία εμφανίζεται κάποια διαταραχή, ζητείται το διάνυσμα x που περιλαμβάνει τις τάσεις που πρέπει να πάρουν οι γεννήτριες της ζώνης i καθώς και τις τιμές της άεργου ισχύος που πρέπει να εγχυθούν στους pilot buses από πυκνωτές έτσι ώστε να ρυθμιστεί η τάση όλων των ζυγών συγκεκριμένης ζώνης πάνω από 0.95.

Το διάνυσμα x το οποίο ζητείται να βρεθεί, έχει $n_g + n_{\text{pilot}}$ στοιχεία, όπου n_g ο αριθμός των γεννητριών της συγκεκριμένης ζώνης, και n_{pilot} ο αριθμός των pilot buses στους οποίους μπορεί να εγχυθεί άεργος ισχύς μέσω πυκνωτών 0-12 MVar (με βήμα 1MVar). Συνεπώς, τα στοιχεία του διανύσματος x θα πρέπει να υπόκεινται στους παρακάτω περιορισμούς:

$$0.95 \leq x_i \leq 1.05, \text{ όπου } i=1, \dots, n_g \quad (11.3.1)$$

$$\text{και } 0 \leq x_i \leq 12, \text{ όπου } i=n_{g+1}, \dots, n_{\text{pilot}} \quad (11.3.2)$$

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, ζητείται η εύρεση των κινήσεων που πρέπει να γίνουν στις γεννήτριες της ζώνης στην οποία συμβαίνει η διαταραχή και στους πυκνωτές που βρίσκονται στους pilot buses έτσι ώστε οι ζυγοί οι οποίοι εμφανίζουν τάση μικρότερη από 0.95 α.μ. ή μεγαλύτερη από 1.05 α.μ., να ρυθμίσουν την τάση τους μέσα στα όρια της σχέση (11.3.1). Θα πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι, οι ζυγοί της ζώνης που εμφανίζουν πρόβλημα, θα πρέπει να αποκτήσουν τάσεις ενός ορίων με τις λιγότερες δυνατές κινήσεις δηλαδή με τις ελάχιστες δυνατές αλλαγές στις τάσεις των γεννητριών και στους pilot buses. Συνεπώς τα βήματα για να υπολογιστεί η αντικειμενική συνάρτηση η οποία χρησιμοποιήθηκε και καλείται να ελαχιστοποιηθεί στον αλγόριθμο PSO είναι τα εξής:

Βήμα 1: Ροή φορτίου, για τις προτεινόμενες λύσεις του αλγόριθμου PSO ως τάσεις των γεννητριών και έγχυση άεργου ισχύος στους pilot ζυγούς.

Βήμα 2: Έστω B_1 το σύνολο των ζυγών που εμφανίζουν τάση κάτω από $v_{\text{bus},\text{min}} = 0.95$ α.μ. Υπολογίζεται το άθροισμα:

$$\sum_{i \in B_1} (v_{\text{bus},i} - v_{\text{bus},\text{min}})^2 \quad (11.3.3)$$

Βήμα 3: Έστω B_2 το σύνολο των ζυγών που εμφανίζουν τάση πάνω από $v_{\text{bus},\text{max}} = 1.05$ α.μ. Υπολογίζεται το άθροισμα:

$$\sum_{i \in B_2} (v_{\text{bus},i} - v_{\text{bus},\text{max}})^2 \quad (11.3.4)$$

Βήμα 4: Έστω G το σύνολο των γεννητριών της ζώνης και $v_{g,bc}$ οι τάσεις των γεννητριών πριν την εφαρμογή του αλγόριθμου PSO και $v_{g,ac}$ οι τάσεις των γεννητριών που προκύπτουν μετά την εφαρμογή του PSO. Υπολογίζεται το άθροισμα:

$$\sum_{i \in G} (v_{g,bc,i} - v_{g,ac,i})^2 \quad (11.3.5)$$

Βήμα 5: Έστω C το σύνολο των ζυγών στους οποίους μπορεί γίνει έγχυση άεργου ισχύος και Q_{bc} η έγχυση άεργου ισχύος που προκύπτει πριν την εφαρμογή του PSO ενώ Q_{ac} η έγχυση άεργου ισχύος μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου PSO στους pilot ζυγούς. Υπολογίζεται το άθροισμα:

$$\sum_{i \in C} (Q_{bc,i} - Q_{ac,i})^2 \quad (11.3.6)$$

Οι τιμές των τάσεων καθώς και της άεργου ισχύος που μπορεί να εγχυθεί στους pilot ζυγούς του δικτύου, χρησιμοποιούνται στις παραπάνω σχέσεις σε κανονικοποιημένη μορφή στο διάστημα [0 1]. Η αντικειμενική συνάρτηση που καλείται να ελαχιστοποιηθεί είναι:

$$F = W_1 \cdot \sum_{i \in B_1} (v_{bus,i} - v_{bus,min})^2 + W_2 \cdot \sum_{i \in B_2} (v_{bus,i} - v_{bus,max})^2 + W_3 \cdot \sum_{i \in G} (v_{g,bc,i} - v_{g,ac,i})^2 + W_4 \cdot \sum_{i \in C} (Q_{bc,i} - Q_{ac,i})^2 \quad (11.3.7)$$

Όπου για τα βάρη W_1, W_2, W_3 και W_4 ισχύει $W_1, W_2 \gg W_3$ και $W_3 > W_4$ προκειμένου να δίνεται μεγαλύτερο βάρος στην ελαχιστοποίηση των ζυγών που εμφανίζουν τάση εκτός των ορίων καθώς αυτός είναι ο κύριος λόγος εφαρμογής του αλγόριθμου.

Ο αλγόριθμος PSO χρησιμοποιήθηκε για τη ρύθμιση της τάσης όλων των ζυγών του δικτύου των 118 ζυγών της IEEE στο εύρος [0.95 1.05] σε περίπτωση εμφάνισης διαταραχών στο δίκτυο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για διάφορες διαταραχές στα φορτία των ζυγών καθώς και μετά την απώλεια γραμμών.

Με μπλε χρώμα φαίνονται οι τάσεις των ζυγών κάθε ζώνης πριν την εφαρμογή ελέγχου ενώ με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι τάσεις των ζυγών μετά τον έλεγχο. Ο έλεγχος πραγματοποιείται αλλάζοντας τις τάσεις των γεννητριών σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγόριθμου PSO και προσθέτοντας άεργο ισχύ στους pilot buses.

Πίνακας 11.3.1: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 1

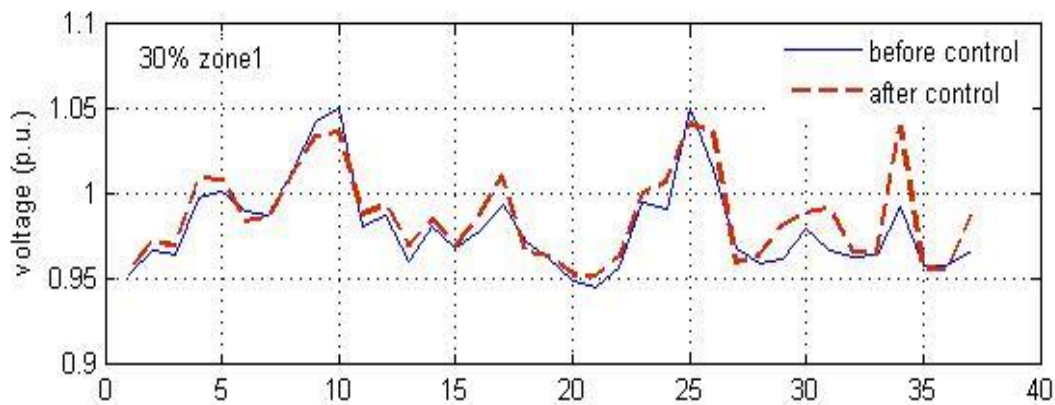
Ζώνη 1			
Αύξηση φορτίου 30%	Ζυγοί με τάση < 0.95	Τάση ζυγών πριν τον έλεγχο	Τάση ζυγών μετά των έλεγχο
	20	0.9489	0.9532
	21	0.9461	0.9522

Πίνακας 11.3.2: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 1

Generator	Vg before PSO	Vg (after PSO)
4	0.998	1.010
6	0.990	0.971
8	1.015	1.012
10	1.050	1.037
18	0.973	0.963
19	0.962	0.980
24	0.992	1.008
25	1.050	1.010
26	1.015	1.037
27	0.968	0.960
31	0.967	0.992
32	0.963	0.964
113	0.993	1.040

Πίνακας 11.3.3: Έγχυση άεργου ισχύος για αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 1

Pilot buses	MVAR
3	7
13	6
21	2
33	11
117	11



Σχήμα 11.3.1: τάσεις ζυγών πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση κατά 30% του φορτίου της ζώνης 1

Πίνακας 11.3.4: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 35% στη ζώνη 1

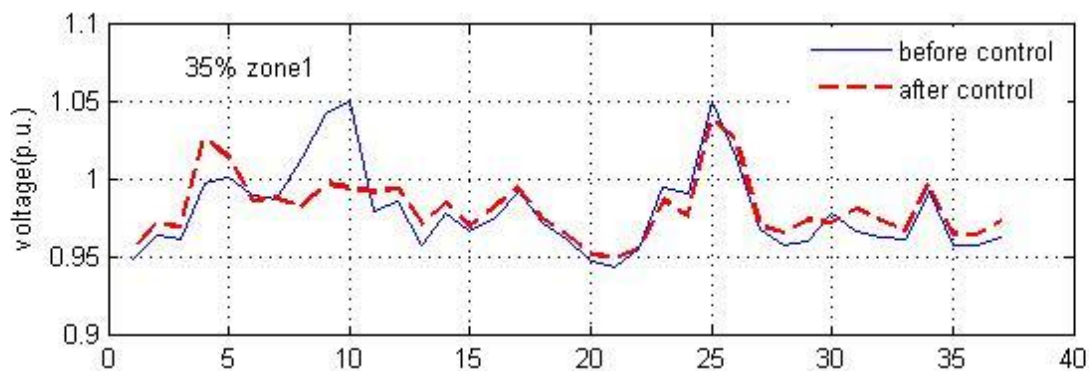
Ζώνη 1			
Αύξηση φορτίου 35%	Ζυγοί με τάση<0.95	Τάση ζυγών πριν τον έλεγχο	Τάση ζυγών μετά των έλεγχο
	1	0.9495	0.9550
	20	0.9475	0.9524
	21	0.9439	0.9502

Πίνακας 11.3.5: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 35% στη ζώνη 1

Generator	Vg before PSO	Vg (after PSO)
4	0.998	1.027
6	0.990	0.965
8	1.015	0.983
10	1.050	0.995
18	0.973	0.975
19	0.962	0.965
24	0.992	0.977
25	1.050	1.040
26	1.015	1.026
27	0.968	0.971
31	0.967	0.982
32	0.963	0.976
113	0.993	0.998

Πίνακας 11.3.6: Έγχυση άεργου ισχύος για αύξηση φορτίου κατά 35% στη ζώνη 1

Pilot buses	MVAR
3	3
13	6
21	7
33	6
117	2



Σχήμα 11.3.2: τάσεις ζυγών πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση κατά 35% του φορτίου της ζώνης 1

Πίνακας 11.3.7: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 40% στη ζώνη 1

Ζώνη 1			
Αύξηση φορτίου 40%	Ζυγοί με τάση<0.95	Τάση ζυγών πριν τον έλεγχο	Τάση ζυγών μετά των έλεγχο
	1	0.9458	0.9512
	20	0.9449	0.9512
	21	0.9409	0.9508

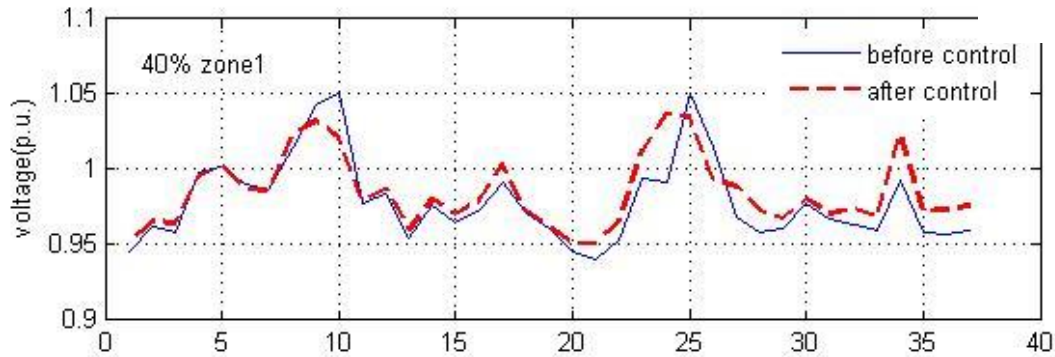
Πίνακας 11.3.8: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 40% στη ζώνη 1

Generator	Vg before PSO	Vg (after PSO)
4	0.998	1.027
6	0.990	0.965
8	1.015	0.983
10	1.050	0.995
24	0.992	0.977
25	1.050	1.040
26	1.015	1.026
27	0.968	0.971
31	0.967	0.982
32	0.963	0.976
113	0.993	0.998

Πίνακας 11.3.9: Έγχυση άεργου ισχύος για αύξηση φορτίου κατά 40% στη ζώνη 1

Pilot buses	MVAR
3	8
13	4
21	0

33	10
117	9



Σχήμα 11.3.3: τάσεις ζυγών πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση κατά 40% του φορτίου της ζώνης 1

Πίνακας 11.3.10: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον έλεγχο για απώλεια γραμμών στη ζώνη 1

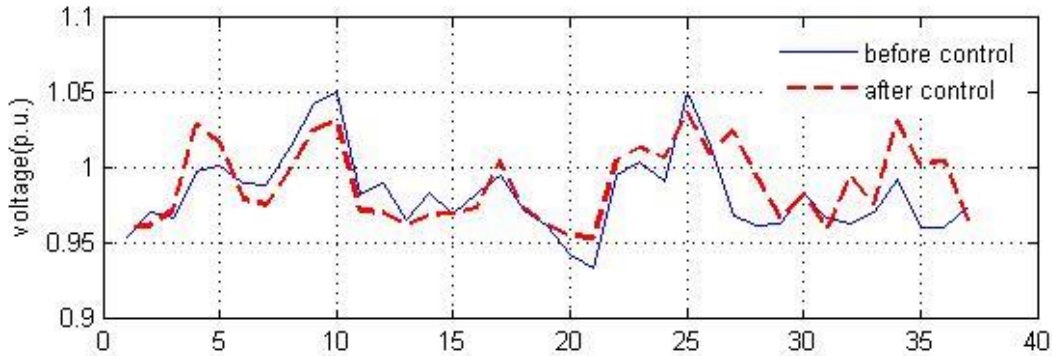
Ζώνη 1			
Απώλεια γραμμών 4-11 και 21-22	Ζυγοί με τάση<0.95	Τάση ζυγών πριν τον έλεγχο	Τάση ζυγών μετά των έλεγχο
	20	0.9428	0.9553
	21	0.9335	0.9544

Πίνακας 11.3.11: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον έλεγχο για απώλεια γραμμών στη ζώνη 1

Generator	Vg before PSO	Vg (after PSO)
1	0.955	0.966
4	0.998	1.029
6	0.990	0.977
8	1.015	0.999
10	1.050	1.032
12	0.990	0.971
15	0.970	0.967
18	0.973	0.974
19	0.962	0.963
24	0.992	1.007
25	1.050	1.023
26	1.015	1.010
27	0.968	1.025
31	0.967	0.960
113	0.993	1.032

Πίνακας 11.3.12: Έγχυση άεργου ισχύος για απώλεια γραμμών στη ζώνη 1

Pilot buses	MVAR
3	2
13	9
21	10
33	6
117	8



Σχήμα 11.3.4: τάσεις ζυγών πριν και μετά τον έλεγχο για απώλεια γραμμών ζώνης 1

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, οι ζυγοί 1,20,21 παρουσιάζουν τάση κάτω από 0.95 μετά από την εμφάνιση διαταραχών στο δίκτυο. Με αλλαγή των τάσεων των γεννητριών της ζώνης 1 και με έγχυση άεργου ισχύος στους πιλοτ ζυγούς, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγόριθμου PSO, επιτυγχάνεται η ρύθμιση της τάσης καθώς όπως φαίνεται και από τις γραφικές παραστάσεις όλες οι τάσεις των ζυγών είναι μέσα στα όρια [0.95 1.05].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής ελέγχου στις ζώνες 2 και 3 του δικτύου μετά την αύξηση φορτίου και την απώλεια γραμμών.

Πίνακας 11.3.13: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 2

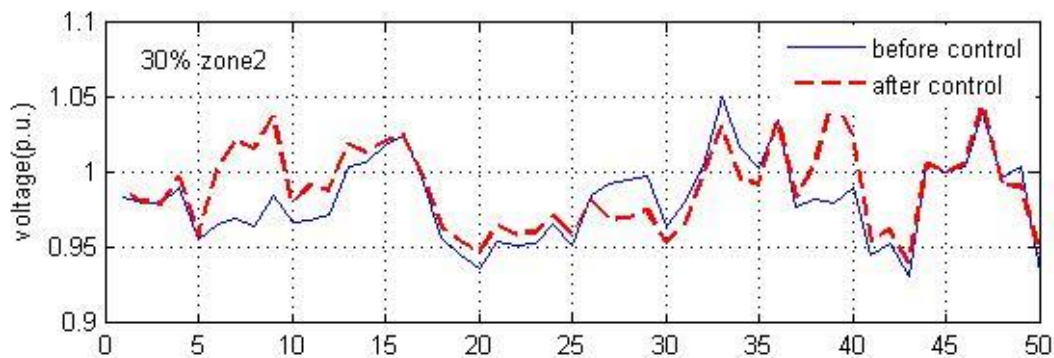
Ζώνη 2			
	Ζυγοί με τάση<0.95	Τάση ζυγών πριν τον έλεγχο	Τάση ζυγών μετά των έλεγχο
Αύξηση φορτίου 30%	52	0.9453	0.9545
	53	0.9371	0.9470
	74	0.9455	0.9544
	76	0.9317	0.9410
	118	0.9345	0.9466

Πίνακας 11.3.14: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 2

Generator	Vg before PSO	Vg (after PSO)
34	0.9840	0.9885
36	0.9800	0.9772
40	0.9700	1.0221
42	0.9850	1.0375
46	1.0050	1.0193
54	0.9550	0.9650
55	0.9520	0.9571
59	0.9850	0.9825
61	0.9950	0.9728
62	0.9980	0.9880
65	1.0050	1.0273
66	1.0500	1.0275
72	0.9800	1.0500
73	0.9910	1.0258
80	1.0400	1.0452
116	1.0050	0.9915

Πίνακας 11.3.15: Έγχυση άεργου ισχύος για αύξηση φορτίου κατά 30% στη ζώνη 2

Pilot buses	MVAR
44	12
47	7
52	4
75	8
118	12



Σχήμα 11.3.5: τάσεις ζυγών πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση κατά 30% του φορτίου της ζώνης 2

Πίνακας 11.3.16: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον έλεγχο για απώλεια γραμμών στη ζώνη 2

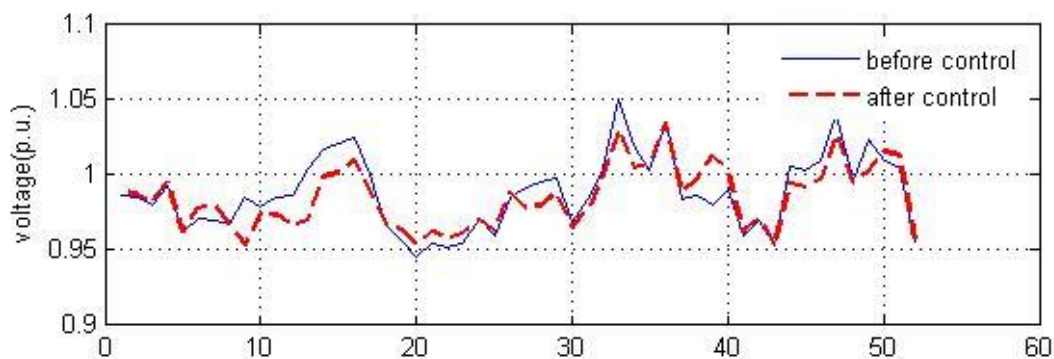
Ζώνη 2			
Απώλεια γραμμών 35-36,60-62	Ζυγοί με τάση<0.95	Τάση ζυγών πριν τον έλεγχο	Τάση ζυγών μετά των έλεγχο
	53	0.9460	0.9533

Πίνακας 11.3.17: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον έλεγχο για απώλεια γραμμών στη ζώνη 2

Generator	Vg before PSO	Vg (after PSO)
36	0.980	0.982
40	0.970	0.980
42	0.985	0.954
46	1.005	0.970
49	1.025	1.010
54	0.955	0.962
55	0.952	0.951
56	0.954	0.960
59	0.985	0.989
61	0.995	0.975
62	0.998	0.992
65	1.005	1.001
66	1.050	1.030
70	0.984	0.989
72	0.980	1.012
73	0.991	1.003
76	0.953	0.958
77	1.006	0.993
80	1.040	1.028
116	1.005	1.013

Πίνακας 11.3.18: Έγχυση άεργου ισχύος για απώλεια γραμμών στη ζώνη 2

Pilot buses	MVAR
44	12
47	7
52	4
75	8
118	12



Σχήμα 11.3.6: τάσεις ζυγών πριν και μετά τον έλεγχο για απώλεια γραμμών στη ζώνη 2

Όπως φαίνεται και από το αντίστοιχο διάγραμμα, για αύξηση του φορτίου της ζώνης 2 κατά 30% δεν επιτυγχάνεται πλήρης ρύθμιση τάσης μετά την εφαρμογή ελέγχου. Η προτεινόμενη λύση από τον αλγόριθμο PSO ρυθμίζει την τάση των ζυγών ως ένα βαθμό χωρίς όμως να καταφέρει να ρυθμίσει όλες τις τάσεις έτσι ώστε να είναι μεγαλύτερες από 0.95 α.μ.

Πίνακας 11.3.19: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 40% στη ζώνη 3

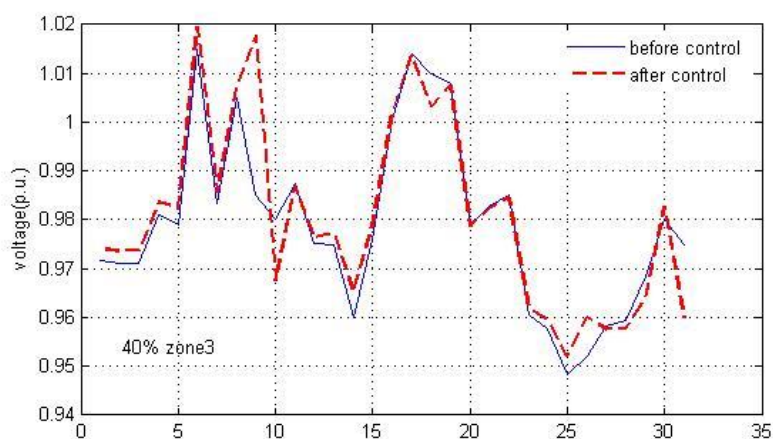
Ζώνη 3			
Αύξηση φορτίου 40%	Ζυγοί με τάση<0.95	Τάση ζυγών πριν τον έλεγχο	Τάση ζυγών μετά των έλεγχο
	106	0.9484	0.9521

Πίνακας 11.3.20: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 40% στη ζώνη 3

Generator	Vg before PSO	Vg (after PSO)
87	1.015	1.0197
89	1.005	1.0070
90	0.985	1.0177
91	0.980	0.9677
99	1.010	1.0032
107	0.952	0.9600
111	0.980	0.9829
112	0.975	0.9600

Πίνακας 11.3.21: Έγχυση άεργου ισχύος για αύξηση φορτίου κατά 40% στη ζώνη 3

Pilot buses	MVAR
85	2
95	12
106	3



Σχήμα 11.3.7: τάσεις ζυγών πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση κατά 40% του φορτίου της ζώνης 3

Πίνακας 11.3.22: Τάσεις ζυγών με πρόβλημα πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 45% στη ζώνη 3

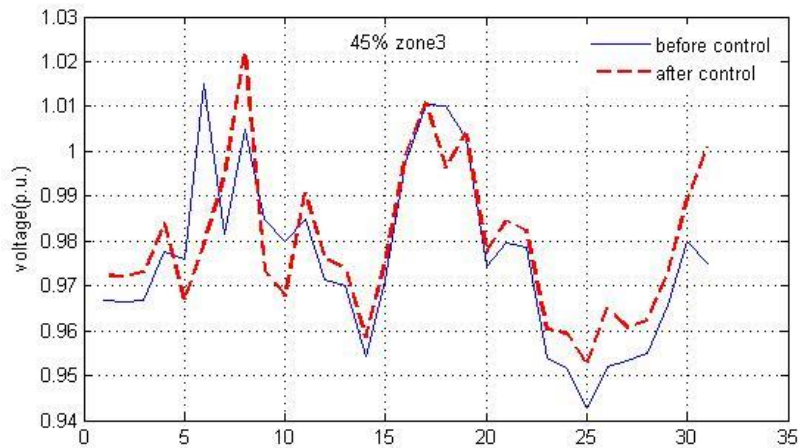
Ζώνη 3			
Αύξηση φορτίου 45%	Ζυγοί με τάση<0.95	Τάση ζυγών πριν τον έλεγχο	Τάση ζυγών μετά των έλεγχο
		106	0.9427

Πίνακας 11.3.23: Τάσεις γεννητριών πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση φορτίου κατά 45% στη ζώνη 3

Generator	Vg before PSO	Vg (after PSO)
87	1.015	0.9797
89	1.005	1.0224
90	0.985	0.9732
91	0.980	0.9679
99	1.010	0.9963
107	0.952	0.9650
111	0.980	0.9895
112	0.975	1.0008

Πίνακας 11.3.24: Έγχυση άεργου ισχύος για αύξηση φορτίου κατά 45% στη ζώνη 3

Pilot buses	MVAR
85	8
95	3
106	5



Σχήμα 11.3.8: τάσεις ζυγών πριν και μετά τον έλεγχο για αύξηση κατά 45% του φορτίου της ζώνης 3

ΚΕΦΑΛΑΙΑΟ 12^ο

Γ 12.1 Σύγκριση μεθόδων ελέγχου

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναπτύχθηκαν δύο μέθοδοι ελέγχου της τάσης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Στην πρώτη μέθοδο, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε, πραγματοποιεί αποκεντρωμένο έλεγχο βασισμένο στις ευαισθησίες μεταξύ της τάσης των ζυγών και της μεταβολής των τάσεων αναφοράς των γεννητριών καθώς και της μεταβολής της αέργου ισχύος που μπορεί να εγχυθεί σε ορισμένους ζυγούς του δικτύου. Στη δεύτερη μέθοδο, ως αλγόριθμος ελέγχου χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων (PSO) προκειμένου να βρεθεί ένα σύνολο τάσεων που πρέπει να εφαρμοστούν ως τάσεις αναφοράς των γεννητριών, καθώς και ένα σύνολο ποσοτήτων αέργου ισχύος που πρέπει να εγχυθούν στους pilot ζυγούς, έτσι ώστε να ρυθμιστούν όλες τις τάσεις των ζυγών μέσα στα αποδεκτά όρια.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων ελέγχου τα οποία παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες υπο-ενότητες, διαπιστώνεται ότι με τη χρήση του αλγόριθμου αποκεντρωμένου ελέγχου οι κινήσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν προκειμένου να ρυθμιστούν οι τάσεις των ζυγών στα αποδεκτά όρια είναι λιγότερες και πιο αποτελεσματικές από αυτές που προτείνει ο αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων. Το γεγονός αυτό προκύπτει για όλες τις διαταραχές που πραγματοποιήθηκαν στο δίκτυο είτε πρόκειται για αύξηση των φορτίων κάποιας ζώνης είτε για απώλεια γραμμών μεταφοράς. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου αποκεντρωμένου ελέγχου είναι πολύ καλύτερα από τα αντίστοιχα του αλγορίθμου PSO, γεγονός που γίνεται κατανοητό και κατά την εφαρμογή διαταραχής 30% στα φορτία της ζώνης 2. Στην περίπτωση αυτή ενώ με την εφαρμογή του αλγορίθμου αποκεντρωμένου ελέγχου προκύπτει μία σειρά κινήσεων που προκαλούν ρύθμιση όλων των τάσεων των ζυγών μέσα στα αποδεκτά όρια, ο αλγόριθμος σμήνους

σωματιδίων PSO δεν μπορεί να βρει λύση που να προκαλεί πλήρης ρύθμιση τάσης όλων των ζυγών.

Η βελτιωμένη αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου αποκεντρωμένου ελέγχου σε σύγκριση με την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου σμήνους σωματιδίων είναι αναμενόμενη καθώς ο αλγόριθμος PSO προτείνει λύσεις διαισθητικά, προσπαθώντας να βρει ένα σύνολο τυχαίων λύσεων, που υπόκεινται σε κάποιους περιορισμούς, που θα ελαχιστοποιούν μία αντικειμενική συνάρτηση. Ο αλγόριθμος αυτός δεν έχει κάποιο θεωρητικό υπόβαθρο του αντικειμένου ενώ ταυτόχρονα η λύση που προτείνει μπορεί να έχει εγκλωβιστεί σε κάποιο τοπικό ελάχιστο και να διαφέρει αρκετά από τη βέλτιστη. Αντίθετα, ο αλγόριθμος αποκεντρωμένου ελέγχου χρησιμοποιεί συγκεκριμένη τεχνική προκειμένου να βρει το σύνολο των κινήσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν, βασισμένος σε θεωρητικό υπόβαθρο (χρήση των ευαισθησιών), βρίσκοντας έτσι τις κινήσεις που θα επιφέρουν έλεγχο τάσης και προτείνοντας μία λύση που προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό τη βέλτιστη.

Γ 12.2 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή, προκειμένου να επιτευχθεί ένας αποτελεσματικός έλεγχος τάσης, εφαρμόστηκαν διάφοροι μέθοδοι ομαδοποίησης δεδομένων προκειμένου να διαχωρισθεί το δίκτυο σε ζώνες, οι οποίες συμβάλλουν σημαντικά στην υλοποίηση αποτελεσματικού ελέγχου τάσης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν πολλά στοιχεία από τη θεωρία των γράφων, η οποία είναι εξαιρετικά χρήσιμη για την αναπαράσταση και απλοποίηση μεγάλων δικτύων.

Επιπλέον, στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε ένας αλγόριθμος αποκεντρωμένου ελέγχου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ρύθμιση της τάσης των ζυγών του δικτύου σε περιπτώσεις εμφάνισης διαταραχών. Ο αλγόριθμος αυτός βασίστηκε στη θεωρία συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων, έτσι ώστε να υπάρχει άμεση και αποτελεσματική ρύθμιση τάσης σε ζυγούς που εμφανίζουν παραβίαση των ορίων τάσης, μετά την εμφάνιση διαταραχών μέσα σε μία ζώνη του δικτύου. Ο σκοπός του αλγορίθμου αυτού ήταν η εύρεση των κινήσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν για τη ρύθμιση των τάσεων των ζυγών, χρησιμοποιώντας τη διαθέσιμη άεργο ισχύ των γεννητριών καθώς και την έγχυση άεργου ισχύος μέσω πυκνωτικών στοιχείων. Οι ευαισθησίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να βρεθούν λύσεις κοντά στη βέλτιστη.

Μετά την εφαρμογή διάφορων διαταραχών στο δίκτυο (αύξηση φορτίων, απώλεια γραμμών) και την πραγματοποίηση ελέγχου με τη χρήση του αλγορίθμου αποκεντρωμένου ελέγχου, διαπιστώθηκε η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής καθώς επιτεύχθηκε έλεγχος των τάσεων όλων των ζυγών της ζώνης στην οποία εμφανίστηκε το πρόβλημα.

Η χρήση αλγορίθμων αποκεντρωμένου ελέγχου, που βασίζονται στη θεωρία των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων προτιμάται για τη ρύθμιση των τάσεων των ζυγών σε περίπτωση εμφάνισης διαταραχών στα δίκτυα μεταφοράς, λόγω της μεγάλης αποτελεσματικότητας που προσφέρουν. Όπως φάνηκε και στην εργασία αυτή, ο

αλγόριθμος αποκεντρωμένου ελέγχου που χρησιμοποιεί τις ευαισθησίες των ζυγών, είναι πιο αποτελεσματικός και γρήγορος αλγόριθμος ρύθμισης τάσης σε σχέση με τον αλγόριθμο PSO.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, για τον έλεγχο του συστήματος κατά την εμφάνιση διαταραχών, ο αλγόριθμος αποκεντρωμένου ελέγχου που παρουσιάστηκε θα μπορούσε να βελτιωθεί λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ ζωνών ενώ σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων διαταραχών όπου δεν μπορεί να ρυθμιστούν πλήρως οι τάσεις όλων των ζυγών, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η αποκοπή φορτίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξή, 'Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας', Αθήνα ΕΜΠ 2006
- [2] 'A Decentralized Control of Partitioned Power Networks for Voltage Regulation and Prevention Against Disturbance Propagation' , IEEE TRANSACTION ON POWER SYSTEMS, VOL 28, NO 2, MAY 2013, Hasan Mehrjerdi,Serge Lefebvre, Maarouf Saad and Dalal Asber
- [3]http://en.wikibooks.org/wiki/Data_Mining_Algorithms_In_R/Clustering/Hybrid_HierarchicalClustering
- [4] 'Μελέτη αλγορίθμου Ομαδοποίησης k-means σε δεδομένα παγκόσμιου ιστού' Διπλωματική εργασία, Ακακιάδου Γεωργία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σεπτέμβριος 2007
- [5] 'Μέθοδος Νευτώνειας Φασματικής Ομαδοποίησης και Πειραματική Μελέτη-Αξιολόγηση', Κυριακή Χριστοδουλίδου, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιούλιος 2009
- [6] 'Operation and Control Zones for future complex power systems' ,#74, Varvara Alimisis, Student Member, IEEE, Chiara Piacentini, James E. King, Philip C. Taylor, Senior Member IEEE
- [7] 'Multi-Area Control in Electric Power Systems', Master Thesis WS 05/06 ETH, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Michele Arnold and Selina Vinopfli
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Graph_Theory
http://math.tut.fi/~ruohonen/GT_English.pdf
- [9] 'Graph Partitioning of Power Network for Emergency Voltage Control', Hasan Mehrjerdi, Serge Lefebvre, Dalal Asber, Electrical Network Department, Hydro-Quebec's Research Institute Varennes, Canada, Maarouf Saad, Electrical Engineering Department Quebec University(ETS) Montreal, Canada
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_Clustering
- [11] 'Φασματικές Μέθοδοι Ανάκτησης Πληροφορίας, Εργαλεία Λογισμικού και Εφαρμογές', Δημήτριος Ζεϊμπέκης, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πατρών
- [12] <http://www.stat.cmu.edu/~ryantibs/datamining/lectures/04-clus1-marked.pdf>
- [13] 'Hierarchical Spectral Clustering of Power Grids' , IEEE, TRANSACTION ON POWER SYSTEMS, Ruben J. Sanchez-Garcia, Max Fennelly, Sean Norris, Nick Wright, Graham Niblo, Jacek Brodzki and Janusz W. Blalek
- [14] 'A Tutorial on Spectral Clustering', Ulrike von Luxburg, Max Planck, Institute of Biological Cybernetics, Statistics and Computing 2007 //www.springer.com//

- [15] 'Spectral K-Way Ratio-Cut Partitioning and Clustering', IEEE Transactions on Computed-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol 13, No 9, Pak K. Chan, *Member, IEEE*, Martine D. F. Schlag, *Member, IEEE*, and Jason Y. Zien
- [16] 'A Distributed Approach to Node Clustering in Decentralized Peer-to-Peer Networks. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol 16, no. 9, September 2005, Lakshmish Ramaswamy, Bugra Gedik, Ling Lin
- [17] 'Multiagent Systems', second edition, The MIT Press
- [18] 'Ανάπτυξη συστήματος Ελέγχου Απομονωμένου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας με Τεχνολογία Ευφυών Πρακτόρων', Διπλωματική Εργασία, Σπυρίδων Ι. Χατζηβασιλειάδης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2007
- [19] 'Dynamic Wide Area Voltage Control Strategy Based on Organized Multi-Agent systems' IEEE Transactions on Power Systems, Alireza and S.M. Shahrtash
- [20] 'Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας', Τόμος 1, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας, Βασιλείου Κ. Παπαδιά, Καθηγητής ΕΜΠ
- [21] 'A Denentralized Multi-Agent based Voltage Control for Catastrophic Disturbances in Power Systems, Sk Razibul Islam, Student Member IEEE
- [22] 'Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Μονάδων Διεσπαρμένης παραγωγής με τη χρήση Υβριδικής PSO και Βέλτιστης ροής Φορτίου', Αλεξάνδρα Ζίγκηρη, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Ιούλιος 2012
- [23] 'Βέλτιστη τοποθέτηση σταθμών ταχείας φόρτισης με τη χρήση Hybrid PSO', Πάσχου Δροσιά, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Απρίλιος 2014