



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Αξιολόγηση μεθόδων διαχωρισμού του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής
ενέργειας και αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Ανδρέα Μπάρου

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016



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

**Αξιολόγηση μεθόδων διαχωρισμού του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής
ενέργειας και αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Ανδρέα Μπάρου

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

(Υπογραφή)

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

(Υπογραφή)

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

(Υπογραφή)

.....
Πάυλος Γεωργιλιάκης
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

(Υπογραφή)

.....

Ανδρέας Μπάρος

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

Copyright © Ανδρέας Μπάρος, 2016

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 σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και να διευρύνω τις γνώσεις μου στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Τράκα για την άψογη συνεργασία που είχαμε και τη συνεχή στήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής αυτής εργασίας. Η υπομονετική καθοδήγηση του καθώς και η συνεχής βοήθεια του και οι υποδείξεις του, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου που αποτελούσαν στήριγμα για μένα σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Καθώς με την πάροδο του χρόνου τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν όλο και πιο κοντά στα όρια λειτουργίας τους εξαιτίας τεχνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών λόγων, ο αποκεντρωμένος έλεγχος για βελτίωση του ελέγχου τάσης κερδίζει ολοένα και περισσότερο ενδιαφέρον. Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθόδων διαχωρισμού για τον αποκεντρωμένο έλεγχο με στόχο τη ρύθμιση της τάσης των ζυγών ενός ηλεκτρικού συστήματος. Μετά τον διαχωρισμό του δικτύου σε ζώνες πραγματοποιείται έλεγχος σε κάθε ζώνη ξεχωριστά, παράλληλα και ανεξάρτητα από τις άλλες ζώνες με σκοπό τον περιορισμό των διαταραχών της τάσης στους ζυγούς που εμπεριέχονται στην κάθε ζώνη. Ο έλεγχος τάσης σε κάθε ζώνη γίνεται βάση ενός πιλοτικού ζυγού που επιλέγεται ως το «ηλεκτρικό κέντρο» της κάθε ζώνης.

Πιο συγκεκριμένα, η διπλωματική αυτή εργασία χωρίζεται σε τρία μέρη και έχει την εξής δομή:

Στο πρώτο μέρος αναλύεται ο αυτόματος έλεγχος τάσης και το προσαρμοστικό απλοποιημένο μοντέλο στο οποίο βασίζεται καθώς επίσης και η φιλοσοφία της ομαδοποίησης δεδομένων, η εφαρμογή της στα ηλεκτρικά συστήματα και τα πλεονεκτήματα που παρέχει σε σύγκριση με τον κεντρικό έλεγχο τάσης.

Ακολούθως στο δεύτερο μέρος αναλύεται η φασματική και ιεραρχική ομαδοποίηση δεδομένων, παρουσιάζονται τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι διαχωρισμού, η επιλογή του πιλοτικού ζυγού κάθε ζώνης καθώς επίσης και τα αποτελέσματα του διαχωρισμού του πρότυπου δικτύου 39 ζυγών της IEEE.

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος παρουσιάζεται η μέθοδος ελέγχου της τάσης σε περίπτωση διαταραχών. Ο έλεγχος πραγματοποιείται σε κάθε ζώνη ξεχωριστά και βασίζεται στην μεταβολή της τάσης των σύγχρονων γεννητριών κάθε ζώνης ώστε να επανέλθουν οι τάσεις των ζυγών στο επίπεδο που ήταν πριν τη διαταραχή.

Τέλος, γίνεται σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τη συγκεκριμένη διαδικασία διαχωρισμού του δικτύου και του ελέγχου τάσης.

Λέξεις κλειδιά: ομαδοποίηση δεδομένων, δίκτυο μεταφοράς, αλγόριθμοι ομαδοποίησης, διαχωρισμός δικτύου, ζώνες, πιλοτικός ζυγός, αποκεντρωμένος έλεγχος, διαταραχή, ρύθμιση τάσης.

Abstract

Over the last years power systems are increasingly operated closer to their capacity limits, due to technical, economic and environmental drivers. Consequently there is an international trend towards decentralized automatic voltage control. The purpose of this thesis is the development of zoning methodologies to control the voltage of buses of a power system. After the division of the power system into zones, each zone makes corrective actions parallel to and independently from other zones to achieve voltage regulation in case of disturbances in the network. The voltage regulation is applied on the pilot bus which is chosen as the “electrical centre” of each zone.

In particular, this thesis is divided into three parts with the following structure:

In the first part automatic voltage control and the adaptive reduced control model is introduced. Then, data clustering and its implementation in power systems is analyzed as well as the advantages it has over the centralized voltage control.

In the second part, an analysis of hierarchical and spectral clustering is provided and three different zoning methodologies are developed as well as the pilot node selection within zones in order to divide the IEEE 39-bus network into bus groups.

In the third part of the thesis, a method for voltage regulation in case of disturbances in the network, such as load augmentation, is presented. The voltage regulation is implemented in each zone separately and is based on the generator’s voltage variation of each zone so that the voltage of the buses reach the same level as that before the disturbance.

Finally the results of the aforementioned methods are compared and analyzed which lead into conclusions for the examined voltage control methodology.

Key words: data clustering, electric power transmission system, zoning methodologies, network partitioning, zones, pilot bus, decentralized voltage control, disturbance, voltage regulation.

Πίνακας Περιεχομένων

Α' Μέρος: Εισαγωγή

1	Κεφάλαιο 1^ο – Αυτόματος έλεγχος τάσης και προσαρμοστικό απλοποιημένο μοντέλο ελέγχου.....	11
1.1	Γενικά.....	13
1.2	Ανάλυση αυτόματου ελέγχου τάσης ιεραρχικής δομής.....	14
1.3	Δομή λειτουργίας συντονισμένου ελέγχου τάσης.....	15
2	Κεφάλαιο 2^ο – Ομαδοποίηση δεδομένων και έλεγχος σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....	18
2.1	Κεντρικός και Αποκεντρωμένος έλεγχος.....	18
2.2	Ομαδοποίηση Δεδομένων (Data Clustering).....	20
2.3	Διαχωρισμός του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και επιλογή «πιλοτικού» ζυγού.....	22

Β' Μέρος: Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες

3	Κεφάλαιο 3^ο – Θεωρία γράφων και φασματική ομαδοποίηση δεδομένων.....	26
3.1	Εισαγωγή στη θεωρία των γράφων.....	26
3.2	Εισαγωγή στη Φασματική Ομαδοποίηση.....	27
4	Κεφάλαιο 4^ο – Διαχωρισμός του δικτύου - Αλγόριθμοι k-means και k-medoids	29
4.1	Αλγόριθμος k-means.....	29
4.2	Αλγόριθμος k-medoids.....	30
4.3	Διαχωρισμός του δικτύου με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης μέσω του αλγόριθμου k-medoids	31
5	Κεφάλαιο 5^ο - Διαχωρισμός του δικτύου - Αλγόριθμος Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης	36
5.1	Ο αλγόριθμος Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης	36
5.2	Διαχωρισμός του δικτύου με χρήση του αλγορίθμου Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης.....	38

Γ' Μέρος: Έλεγχος Τάσης

6	Κεφάλαιο 6ο - Έλεγχος τάσης με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού.....	41
----------	--	-----------

6.1	Εισαγωγή.....	41
6.2	Προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού	41
6.3	Διατύπωση προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού για έλεγχο τάσης με προσαρμογή της τάσης των γεννητριών.....	43
6.4	Έλεγχος τάσης μέσω γραμμικού προγραμματισμού με τη μέθοδο διαχωρισμού Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης.....	46
6.5	Έλεγχος τάσης με τη μέθοδο διαχωρισμού φασματικής ομαδοποίησης	55
6.5.1	Έλεγχος τάσης με τη μέθοδο διαχωρισμού φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τη ροή φαινόμενης ισχύος S.....	55
6.5.2	Έλεγχος τάσης με τη μέθοδο διαχωρισμού φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών το φανταστικό μέρος του πίνακα αγωγιμοτήτων.....	63
7	Κεφάλαιο 7^ο - Σύγκριση μεθόδων διαχωρισμού και σχολιασμός αποτελεσμάτων...	71
7.1	Σύγκριση μεθόδων διαχωρισμού.....	71
7.2	Συμπεράσματα.....	72
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73

Α' Μέρος

Εισαγωγή

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) ορίζεται ως το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται με στόχο τη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές κατανάλωσης που εξυπηρετεί. Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας χαρακτηρίζεται από καλή λειτουργία όταν τηρεί τις εξής προϋποθέσεις:

- Η ηλεκτρική ενέργεια να παρέχεται σε όλα τα σημεία ζήτησης με το ελάχιστο δυνατό οικονομικό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις.
- Να εξασφαλίζει σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και να έχει υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.
- Εξαιτίας της αδυναμίας αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας λόγω υψηλού κόστους η παραγωγή της θα πρέπει να γίνεται τη στιγμή της κατανάλωσης.

Τα ΣΗΕ εκτελούν τρεις αλυσιδωτές λειτουργίες που χωρίζονται στα στάδια της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής από τις γεννήτριες (σύγχρονες μηχανές) που χωρίζονται σε συμβατικές και σε ανανεώσιμες πηγές. Από εκεί ξεκινούν τα **δίκτυα μεταφοράς** που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια από τα εργοστάσια παραγωγής προς τα κεντρικά σημεία του δικτύου, τους λεγόμενους υποσταθμούς, μέσω των γραμμών υψηλής (>60 kV) και υπερυψηλής τάσης (>225 kV). Ακολουθεί το τελευταίο στάδιο, τα δίκτυα διανομής που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές μέσω των υποσταθμών διανομής και τις γραμμές χαμηλής τάσης.

Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται ως η διαδικασία που έχει ως αρχή την έξοδο των σταθμών παραγωγής και τελικό σημείο τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής. Η διαδικασία αυτή απαρτίζεται από ένα σύνολο διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, οι υποσταθμοί ζεύξης των δικτύων αυτών και οι υποσταθμοί μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μεταφοράς είναι τα μέρη που απαρτίζουν το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε επίπεδα υψηλής τάσης για οικονομικούς λόγους δεδομένου ότι σε αυτά τα επίπεδα τάσης έχουμε μειωμένες ηλεκτρικές απώλειες. Απαραίτητος περιορισμός του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι η εξασφάλιση παροχής σταθερής τάσης και συμμετρικότητας μεταξύ των τριών φάσεων. Ακόμη το κύμα της τάσης πρέπει να έχει ημιτονοειδή μορφή και σταθερή συχνότητα,

ενώ η αποδοτικότητα να πλησιάζει την τιμή στην οποία το ετήσιο κόστος μεταφοράς ελαχιστοποιείται.[1]

Τα τελευταία χρόνια τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας προσεγγίζουν όλο και περισσότερο τα όρια λειτουργίας τους, εξαιτίας τεχνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών παραγόντων όπως είναι η αύξηση της ζήτησης, η λειτουργία κοντά στο όριο ασφαλείας, η μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κ.α. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα δίκτυα μεταφοράς να γίνονται ολοένα και πιο ευάλωτα σε διαταραχές, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν μεταβολές στις τάσεις των ζυγών που χωρίς τις απαραίτητες ρυθμίσεις μπορούν να μεταβληθούν έξω από τα αποδεκτά όρια λειτουργίας. Τέτοιες διαταραχές μπορούν να είναι η ξαφνική αύξηση του φορτίου ή η απώλεια γραμμών που μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα τη μεγάλη μείωση της τάσης σε διάφορους ζυγούς του δικτύου. Τα γεγονότα αυτά μπορούν να έχουν καταστροφικές συνέπειες ως προς την ασφάλεια και την αξιοπιστία των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, για τους λόγους αυτούς παρατηρείται μία διεθνής τάση προς την ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων αυτόματου ελέγχου τάσης, οι οποίες θα μπορούν να ανταποκρίνονται γρήγορα και με αποτελεσματικότητα όταν προκύπτουν αυτού του είδους οι διαταραχές [2],[3].

Κεφάλαιο 1^ο - Αυτόματος έλεγχος τάσης και προσαρμοστικό απλοποιημένο μοντέλο ελέγχου

A.1.1 Γενικά

Ο αυτόματος έλεγχος τάσης (AVC – Automatic Voltage Control) απαιτεί κάποιου είδους συντονισμό μεταξύ των πηγών άεργου ισχύος και των ελεγκτών. Η υιοθέτηση μίας στρατηγικής αυτόματου ελέγχου τάσης προσαρμόζεται στο υπό έλεγχο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αναλόγως των χαρακτηριστικών του δικτύου, τον διαθέσιμο εξοπλισμό ελέγχου και τη λειτουργία του. Επομένως υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για την επίτευξη αυτού του στόχου. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στα συστήματα αυτόματου ελέγχου τάσης ιεραρχικής δομής. Η αρχιτεκτονική ιεραρχικού αυτόματου ελέγχου τάσης επιτρέπει ευρείας περιοχής- κλειστού βρόχου συντονισμένο έλεγχο τάσης (CVR – Coordinated Voltage Regulation) και άεργου ισχύος. Ωστόσο, η έμφυτη πολυπλοκότητα αυτού του έργου βασίζεται στην ομαδοποίηση του απλοποιημένου μοντέλου ελέγχου (RCM - Reduction Control Model) [4].

Επί του παρόντος έρευνα στην απλοποίηση του μοντέλου ελέγχου αναπτύσσεται προς δύο κατευθύνσεις. Η πρώτη διαχωρίζει το δίκτυο σε ζώνες με ασθενή μεταξύ τους συσχέτιση και έπειτα τοποθετεί τον πιλοτικό ζυγό (pilot node) στο «ηλεκτρικό κέντρο» κάθε ζώνης, χρησιμοποιώντας ευριστικές μεθόδους. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί μεθόδους διαχωρισμού και είναι το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η δεύτερη χρησιμοποιεί ευριστικές μεθόδους και τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης για να αναγνωρίσει τους καταλληλότερους πιλοτικούς ζυγούς (pilot nodes) ελαχιστοποιώντας τη γραμμικοποιημένη αντικειμενική συνάρτηση ελέγχου ενός συγκεκριμένου συστήματος συντονισμένης ρύθμισης τάσης [5]. Σε αυτήν την περίπτωση η απαίτηση ασθενής σύζευξης αποτελεί στατικό περιορισμό στο έργο της βελτιστοποίησης. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στα απλοποιημένα μοντέλα ελέγχου που πρώτον είναι κοντά σε πραγματικές πρακτικές που χρησιμοποιούνται σε εμπορικά AVCs (Automatic Voltage Control) και δεύτερον μπορούν να προσαρμοστούν στις συνθήκες του δικτύου απευθείας, μία διαδικασία υπό τον όρο «προσαρμοστικό απλοποιημένο μοντέλο ελέγχου» (adaptive Reduction Control Model). Προσεγγίσεις της δεύτερης κατεύθυνσης έρευνας δέχονται εκτενές ακαδημαϊκό ενδιαφέρον αλλά σε αντίθεση με τις μεθόδους διαχωρισμού δεν έχουν αναπτυχθεί σε πραγματικές εφαρμογές και δεν μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα προσαρμοστικών απλοποιημένων μοντέλων ελέγχου λόγω των μεγάλων εκτελεστικών χρόνων που χρειάζονται. Επομένως, εξετάζονται οι μέθοδοι διαχωρισμού που είναι εμπορικά εφαρμόσιμες και αξιοσημείωτα γρήγορες.

Η επιλογή μίας μεθόδου διαχωρισμού επηρεάζει όχι μόνο την απόδοση της συντονισμένης ρύθμισης τάσης αλλά επίσης και τη στιβαρότητα σε δεδομένα που περιέχουν σφάλματα καθώς και την επίτευξη προσαρμοστικού απλοποιημένου μοντέλου ελέγχου [6],[7]. Η στιβαρότητα σε εσφαλμένα δεδομένα είναι μία τρομερά επιθυμητή ιδιότητα δεδομένου οι πιλοτικοί ζυγοί παρέχουν μετρήσεις «κλειδιά». Οποιαδήποτε αβεβαιότητα στις τιμές τους λόγω ατελής πρόβλεψης, θορύβου ή κατεστραμμένων δεδομένων επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη ζώνη την οποία αντιπροσωπεύουν καθώς επίσης και τις γειτονικές ζώνες ελέγχου σε λιγότερο όμως βαθμό λόγω της αδύναμης σύζευξης μεταξύ των ζωνών. Για τον λόγο αυτό η έρευνα πάνω σε διαφορετικές μεθόδους διαχωρισμού είναι πολύ σημαντική αφού αναπτύσσουν διαφορετικά μέτρα εγγύτητας και κριτήρια ομαδοποίησης. Παράλληλα, ένα ενιαίο απλοποιημένο μοντέλο ελέγχου (static RCM) δεν μπορεί να

είναι βέλτιστο για όλες τις διαμορφώσεις των δικτύων και τις συνθήκες λειτουργίας. Επομένως, η έρευνα στην εφαρμοσιμότητα ποικίλων μεθόδων διαχωρισμού σε συστήματα προσαρμοστικών απλοποιημένων μοντέλων ελέγχου είναι ενθαρρυντική από θεωρητική σκοπιά.

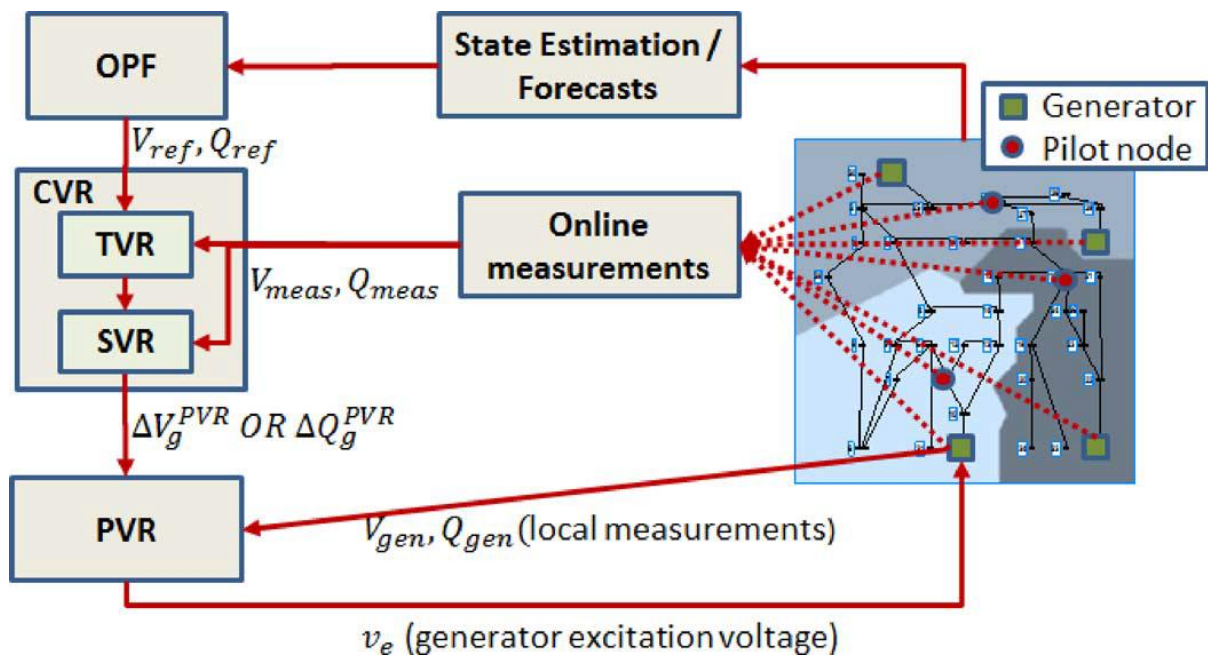
A.1.2 Ανάλυση αυτόματου ελέγχου τάσης ιεραρχικής δομής

Το ιδανικό για την επίτευξη αυτόματου ελέγχου τάσης σε πραγματικό χρόνο θα ήταν η βελτιστοποίηση όλων των μεταβλητών ελέγχου ενός ηλεκτρικού συστήματος τρέχοντας μία πλήρης βέλτιστη ροή φορτίου εναλλασσόμενου ρεύματος (OPF – Optimal Power Flow). Ρεαλιστικά όμως, αυτό είναι μη πραγματοποιήσιμο και απαγορευτικό από άποψης απαίτησης χρόνου [8]. Επομένως, αν και υποβέλτιστος, ο αυτόματος έλεγχος τάσης σε πραγματικό χρόνο πραγματοποιείται μέσω της ομαδοποίησης του απλοποιημένου μοντέλου ελέγχου. Οι ζώνες προκύπτουν από την ομαδοποίηση του απλοποιημένου μοντέλου ελέγχου μέσω του Ιακωβιανού πίνακα, της ροής ισχύος και του πίνακα αγωγιμοτήτων του συστήματος και είναι στην ουσία υποδιαίρεσεις του δικτύου οι οποίες παρουσιάζουν κάποιο είδος συνοχή ως προς τον έλεγχο της τάσης στους ζυγούς που εμπεριέχουν. Σε κάθε ζώνη ελέγχεται ο αντίστοιχος πιλοτικός ζυγός του οποίου η μεταβολή της τάσης είναι αντιπροσωπευτική της ζώνης στην οποία ανήκει.

Η δευτερεύουσα ρύθμιση τάσης (SVR- Secondary Voltage Regulation) εξαλείφει τις αποκλίσεις τάσης που προκύπτουν μέσα στη ζώνη ελέγχου με το να θέτει τα σημεία των πρωταρχικών ρυθμιστών τάσης (PVR- Primary Voltage Regulators). Ο έλεγχος είναι βασισμένος κατά κόρον στις σύγχρονες γεννήτριες που ανήκουν στην υπό έλεγχο ζώνη και η ευαισθησία της τάσης του πιλοτικού ζυγού προς τη μεταβολή της τάσης των γεννητριών αυτών είναι μεγάλη [9].

Για σκοπούς βελτίωσης, ενίσχυσης επείγον περιπτώσεων και αποφυγής αλληλοαναιρούμενων προσπαθειών ελέγχου μέσα στην ίδια ζώνη, τα σημεία ελέγχου της δευτερεύουσας ρύθμισης τάσης προκύπτουν από την τριτογενή ρύθμιση τάσης (TVR- Tertiary Voltage Regulation) η οποία συντονίζει τις αποκεντρωμένες δευτερεύουσες ρυθμίσεις τάσης. Η τριτογενής ρύθμιση τάσης ελαχιστοποιεί τις διαφορές μεταξύ των πραγματικών μετρήσεων και των τιμών αναφοράς τις οποίες παρέχει η βέλτιστη ροή έργου ισχύος που έχει ως είσοδο τη τελευταία κατάσταση του συστήματος ή εναλλακτικά αναπτύσσει προβλέψεις. Παρόλο που ο ορισμός και οι εφαρμογές της δευτερεύουσας και της τριτογενής ρύθμισης τάσης μπορούν να διαφέρουν από εφαρμογή σε εφαρμογή δεδομένου ότι ο αυτόματος έλεγχος τάσης προσαρμόζεται κάθε φορά στα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου δικτύου στο οποίο θα γίνεται ο έλεγχος, κατά κανόνα η δευτερεύουσα ρύθμιση τάσης σε συνδυασμό με την τριτογενή ρύθμιση τάσης είναι αυτές που παρέχουν τον συντονισμένο έλεγχο τάσης [10].

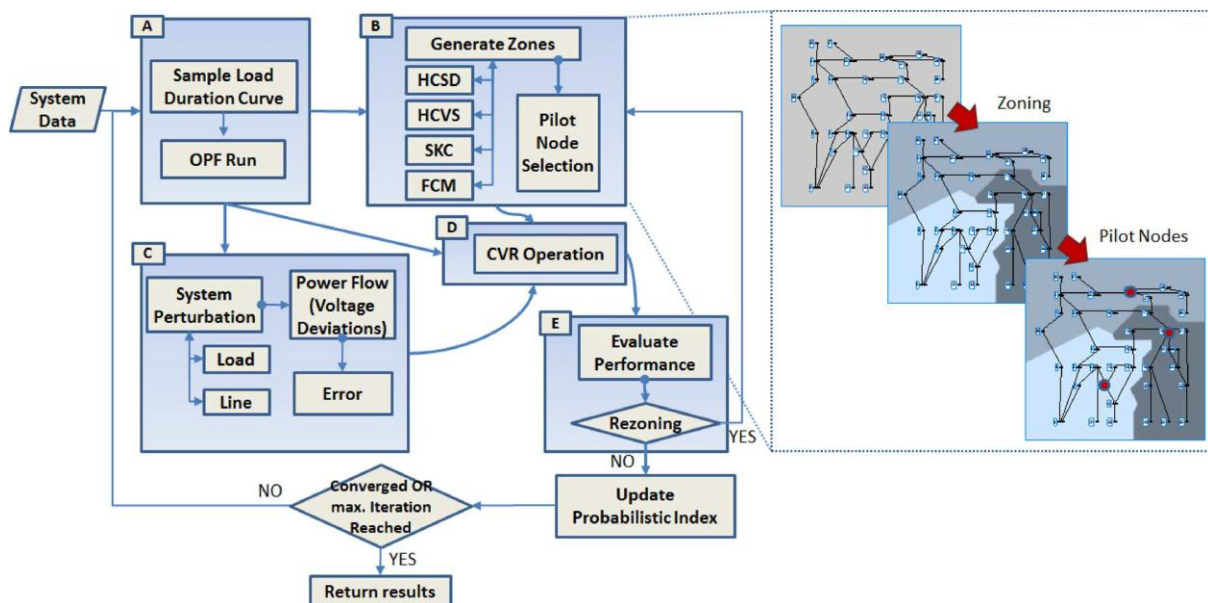
Στο σχήμα 1.2.1 παρουσιάζεται η βασική δομή ενός αυτόματου ελέγχου τάσης.



Σχήμα 1.2.1 Αρχιτεκτονική του αυτόματου ελέγχου τάσης ιεραρχικής δομής.

A.1.3 Δομή λειτουργίας συντονισμένου ελέγχου τάσης.

Παρακάτω παρουσιάζεται η γενική δομή για την αξιολόγηση της ολικής επίδοσης του συντονισμένου ελέγχου τάσης που φαίνεται στο σχήμα 1.3.1. Σε κάθε επανάληψη τα τμήματα Α και C παράγουν μία κατάσταση συστήματος καθώς τα τμήματα Β, D και Ε επιλύουν και αξιολογούν αυτήν την κατάσταση συστήματος.



Σχήμα 1.3.1: Δομή λειτουργίας συντονισμένου ελέγχου τάσης

Τμήμα Α: Παράγεται μία τυχαία κατάσταση συστήματος μέσω δειγματοληψίας από μία καμπύλη φορτίου. Στη συνέχεια μία βέλτιστη ροή φορτίου επιλύεται σε όλο το σύστημα το οποίο ελαχιστοποιεί τις απώλειες συστήματος λαμβάνοντας υπόψιν παράλληλα τους περιορισμούς του συστήματος. Αυτό το τμήμα παρέχει τις πληροφορίες της κατάστασης του συστήματος, συγκεκριμένα τις τιμές της τάσης, της ενεργού και άεργου ισχύος (P,Q,V) στα τμήματα Β και C και τις τιμές αναφοράς τάσης και άεργου ισχύος (Vref, Qref) και τα αντίστοιχα όρια ελέγχου (Vmax, Vmin, Qmax, Qmin) στο τμήμα D.

Τμήμα Β: Σε αυτό το τμήμα γίνεται ο διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες μέσω μίας μεθόδου ομαδοποίησης. Η μέθοδος ομαδοποίησης αποτελείται από έναν αλγόριθμο ομαδοποίησης ο οποίος διαχωρίζει το δίκτυο σε ζώνες με ασθενή μεταξύ τους συσχέτιση, και έναν αλγόριθμο επιλογής πιλοτικού ζυγού σε κάθε ζώνη. Η μέθοδος ομαδοποίησης χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες της κατάστασης του συστήματος που πήρε από το τμήμα Α, παρέχει στον συντονισμένο έλεγχο τάσης του τμήματος D τους πιλοτικούς ζυγούς στους οποίους θα βασιστεί ο έλεγχος και τις διαθέσιμες πηγές άεργου ισχύος με σκοπό τη ρύθμιση τάσης μίας ζώνης.

Τμήμα C: Αυτό το τμήμα δημιουργεί αποκλίσεις τάσης και παρέχει στο συντονισμένο έλεγχο τάσης ένα διάνυσμα με τις αποκλίσεις τάσεων στο οποίο θα δράσει. Αυτό το διάνυσμα παράγεται ως εξής:

- Το φορτίο των ζυγών του συστήματος μεταβάλλεται. Η μεταβολή (διαταραχή) θεωρείται πως γίνεται στιγμιαία.
- Οι εξισώσεις ροής φορτίου εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής κατάστασης χρησιμοποιούνται για να εξάγουν τις τιμές τάσης υποθέτοντας ότι η παροδική απόκριση των γεννητριών έχει φτάσει σε σταθερή κατάσταση τη στιγμή που δρα ο συντονισμένος έλεγχος τάσης. Αυτό παρέχει τις τιμές του διανύσματος ΔV το οποίο έχει μήκος N, όπου N είναι ο αριθμός των ζυγών του συστήματος και ΔV το διάνυσμα αποκλίσεων που ορίζεται ως η διαφορά τάσης μεταξύ της τάσης του τμήματος A (Vref) και της τάσης μετά τη διαταραχή (Vad).

$$\Delta V = V_{ref} - V_{ad} \quad (1.3.1)$$

- Ο ελεγκτής της συντονισμένης ρύθμισης τάσης έχει γνώση για τις αποκλίσεις της τάσης μόνο στους πιλοτικούς ζυγούς (ΔV_p) καθώς και τις τιμές άεργου ισχύος (Qg) που παράγονται από τις γεννήτριες που συμμετέχουν στον συντονισμένο έλεγχο τάσης. Για να λαμβάνονται υπόψιν τυχόν σφάλματα στα δεδομένα που μπορεί να είναι αποτέλεσμα θορύβου στις μετρήσεις, ατελών προβλέψεων ή κατεστραμμένων δεδομένων χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\Delta V_p' = |1-\varepsilon| \Delta V_p \quad (1.3.2)$$

Τμήμα D: Το τμήμα αυτό περιλαμβάνει τη στρατηγική του συντονισμένου ελέγχου τάσης. Ο συντονισμένος έλεγχος τάσης ρυθμίζει τη τάση στους πιλοτικούς ζυγούς μέσα από το συντονισμένο έλεγχο των σύγχρονων γεννητριών που συμμετέχουν σε κάθε ζώνη.

Ο πρωταρχικός στόχος του συντονισμένου ελέγχου τάσης είναι να ελέγχει τις τάσεις στους πιλοτικούς ζυγούς έτσι ώστε να ακολουθούν τις βέλτιστες προβλεπόμενες τιμές αναφοράς όπως έχουν ανανεωθεί από τη βέλτιστη ροή φορτίου στο τμήμα Α. Ο δευτερεύον στόχος είναι η ελάχιστη μεταβολή των τάσεων των σύγχρονων γεννητριών που συμμετέχουν στον έλεγχο κάθε ζώνης έτσι ώστε να ενισχύεται η ασφάλεια παροχής.

Τμήμα Ε: Αυτό το τμήμα αξιολογεί τις αποφάσεις ελέγχου. Σε κάθε κύκλο συντονισμένου ελέγχου τάσης υπολογίζεται ένα διάνυσμα διόρθωσης ΔV_g βασισμένο στην εφαρμογή του τμήματος D.

- Η επίδοση του συντονισμένου ελέγχου τάσης αξιολογείται βασισμένη στο μέσο σχετικό απόλυτο σφάλμα όπως δίνεται από τη σχέση:

$$PI = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| 1 - \frac{|V_{ref} - V_{ac}|}{V_{ref}} \right| \quad (1.3.3)$$

όπου V_{ac} υποδηλώνει τη τιμή της τάσης μετά τον έλεγχο, V_{ad} τη τιμή τάσης μετά τη διαταραχή, V_{ref} η τιμή της τάσης πριν τη διαταραχή και N είναι οι ζυγοί φορτίου. Όλες οι τιμές υπολογίζονται μέσω πλήρους ροής φορτίου εναλλασσόμενου ρεύματος.

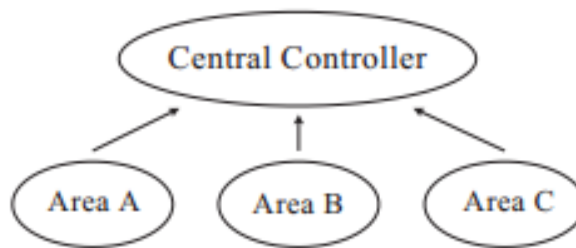
- Στην περίπτωση που η επίδοση PI κριθεί ακατάλληλη, απαιτείται αναδιαμόρφωση των ζωνών και επαναπροσδιορισμός των πιλοτικών ζυγών δεδομένου ότι η υπό εξέταση μέθοδος διαχωρισμού επιτρέπει προσαρμοστικό απλοποιημένο μοντέλο ελέγχου. Στην περίπτωση αυτή γίνεται επιστροφή στο τμήμα Β και η τιμή της επίδοσης PI ανανεώνεται.[11]

Κεφάλαιο 2^ο – Ομαδοποίηση δεδομένων και έλεγχος σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

A.2.1 Κεντρικός και αποκεντρωμένος έλεγχος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ένας αποτελεσματικός έλεγχος ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντικός ειδικά σε περιπτώσεις διαταραχών στο δίκτυο. Στις μέρες μας υπάρχουν δύο είδη ελέγχου στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας: ο κεντρικός και ο αποκεντρωμένος έλεγχος. Αναλυτικότερα:

- **Κεντρικός έλεγχος:** Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο διέπεται από κεντρικό έλεγχο οι πολλαπλές περιοχές αντιμετωπίζονται ως συνορεύουσες περιοχές παρά ως μεμονωμένες οντότητες. Έτσι, επιλύεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για όλη τη περιοχή από ένα κεντρικό ελεγκτή. Για να είναι δυνατός ο συγχρονισμός, όλες οι περιοχές στέλνουν τα δεδομένα τους στον κεντρικό ελεγκτή, ο οποίος αφού υπολογίσει τη βέλτιστη λύση για όλο το σύστημα, αναδιανέμει τα υπολογισμένα αποτελέσματα που προέκυψαν σε κάθε περιοχή.



Σχήμα 2.1.1: Κεντρικός Έλεγχος

- **Αποκεντρωμένος έλεγχος:** Στον αποκεντρωμένο έλεγχο το συνολικό πρόβλημα βελτιστοποίησης διαιρείται σε υποπροβλήματα που αντιστοιχούν σε κάθε ζώνη. Σε αντίθεση με το σχεδιασμό κεντρικού ελέγχου σε κάθε ζώνη επιλύεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ξεχωριστά για τη δική τους περιοχή, και για τη λήψη της συνολικής λύσης απαιτείται συντονισμός μεταξύ των περιοχών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.1.2: Αποκεντρωμένος Έλεγχος

Η σύγκριση των δύο αυτών ελέγχων μεταξύ τους καθιστά ξεκάθαρο πως σε μεγάλα και σύνθετα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας προτιμάται ο αποκεντρωμένος έλεγχος για τους παρακάτω λόγους:

1. 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.
2. Ο κεντρικός σχεδιασμός ελέγχου δεν είναι αρκετά στιβαρός, καθώς σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου μπορεί να υπάρχει 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.
3. 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, γεγονός που δεν μπορεί να υλοποιηθεί σε έναν κεντρικό σχεδιασμό ελέγχου.
4. 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.

A.2.2 Ομαδοποίηση Δεδομένων

Ομαδοποίηση δεδομένων (data clustering) ορίζεται ο διαχωρισμός ενός συνόλου δεδομένων σε ομάδες έτσι ώστε τα στοιχεία που αναθέτονται σε κάθε ομάδα να έχουν κάποιες ομοιότητες ή να συσχετίζονται μεταξύ τους με κάποια προκαθορισμένη έννοια και να έχουν ανομοιότητες με τα στοιχεία των άλλων ομάδων. Η ανάθεση των στοιχείων σε ομάδες γίνεται μέσω κάποιου αλγόριθμου ομαδοποίησης δεδομένων ο οποίος έχει ως είσοδο τον γράφο του συνόλου δεδομένων και ως έξοδο την ομαδοποίηση δεδομένων. Η ομαδοποίηση δεδομένων αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο απαιτεί τον καθορισμό: (1) ενός μέτρου γειτνίασης, (2) ένα κριτήριο ομαδοποίησης και (3) την επικύρωση των ομάδων διαχωρισμού που είναι ένας τρόπος αξιολόγησης τη καταλληλότητας της λύσης που προτείνεται από τον αλγόριθμο ομαδοποίησης.

Πιο αναλυτικά η διαδικασία της ομαδοποίησης δεδομένων περιγράφεται από τα παρακάτω βήματα:

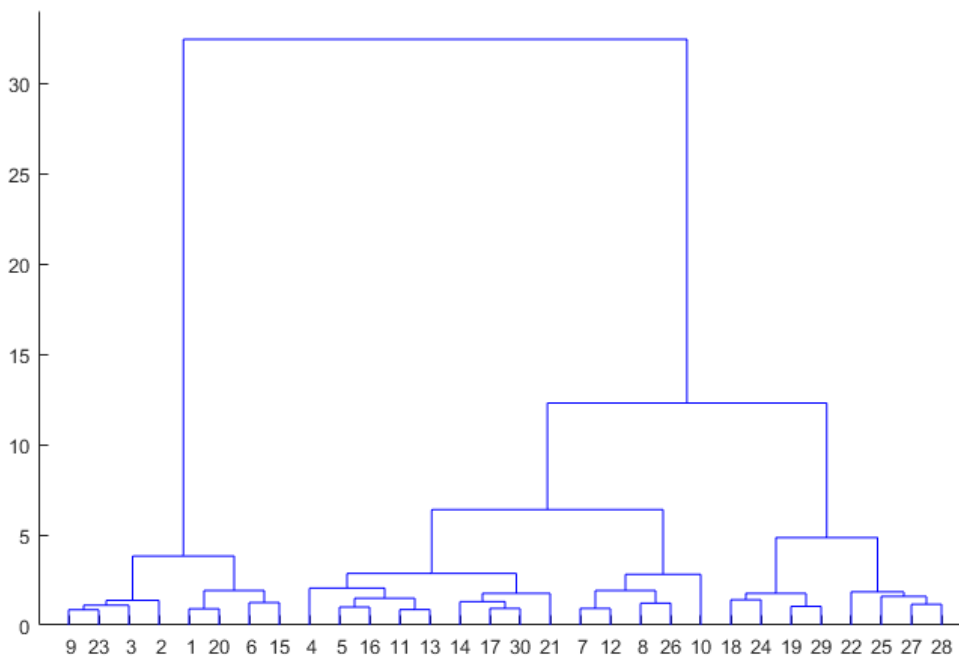
- **Επιλογή χαρακτηριστικών γνωρισμάτων:** Γίνεται προεπεξεργασία του συνόλου δεδομένων στο οποίο πρόκειται να γίνει η ομαδοποίηση έτσι ώστε να εντοπιστούν κάποιες ομοιότητες ή κάποια συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων που θα τεθούν ως κριτήριο για την ομαδοποίηση με σκοπό τη βέλτιστη ομοιογένεια σε κάθε ζώνη δεδομένων.
- **Επιλογή αλγορίθμου ομαδοποίησης:** Για την ομαδοποίηση δεδομένων έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι. Σε αυτό το στάδιο στόχος είναι η επιλογή του καταλληλότερου αλγορίθμου ομαδοποίησης για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων, λόγω του ότι η επίδοση κάθε αλγορίθμου εξαρτάται από το σύνολο δεδομένων που καλείται να ομαδοποιήσει. Ένας αλγόριθμος ομαδοποίησης ορίζεται από το μέτρο γειτνίασης και το κριτήριο ομαδοποίησης.
 1. Το μέτρο γειτνίασης αναφέρεται στις ομοιότητες και τα γνωρίσματα των δεδομένων. Η γειτνίαση των δεδομένων μετριέται συνήθως βάση μίας συνάρτησης απόστασης όπως η Ευκλείδεια, η Minkowski, η Jaccard, η Chebychev, η Mahalanobis κ.α. Η πιο απλή συνάρτηση απόστασης είναι η Ευκλείδεια.
 2. Το κριτήριο ομαδοποίησης εκφράζεται συνήθως μέσω μίας συνάρτησης κόστους.
- **Επικύρωση αποτελεσμάτων:** Σε αυτό το στάδιο αξιολογούνται τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης των δεδομένων. Στόχος είναι να έχει επιτευχθεί μεγάλη ομοιότητα μεταξύ των δεδομένων μέσα στις ομάδες και οι ομάδες μεταξύ τους να χαρακτηρίζονται από ανομοιότητα. Η αξιολόγηση αυτή γίνεται μέσω συγκεκριμένων κριτηρίων ορθότητας και δεικτών.[12]

Ως προς το είδος, η ομαδοποίηση δεδομένων χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες, την ιεραρχική ομαδοποίηση και τη διαμεριστική.

- **Ιεραρχική ομαδοποίηση:** Έχοντας ένα σύνολο δεδομένων με N στοιχεία και έναν $N \times N$ πίνακα απόστασης ή ομοιότητας σε αυτού του είδους την ομαδοποίηση ακολουθείται η εξής διαδικασία με τα παρακάτω βήματα:
 1. Ξεινώντας ανατίθεται το κάθε στοιχείο του συνόλου δεδομένων σε μία ξεχωριστή ομάδα, επομένως προκύπτουν N ομάδες δεδομένων η κάθε μία με ένα στοιχείο. Θεωρούμε την απόσταση (ομοιότητα) μεταξύ των ομάδων να είναι συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των στοιχείων που περιέχουν.
 2. Ευρίσκεται το κοντινότερο (με τη μεγαλύτερη ομοιότητα) ζευγάρι ομάδων και συγχωνεύονται σε μία καινούρια ομάδα. Επομένως, τώρα συνολικά υπάρχει μία λιγότερη ομάδα δεδομένων.
 3. Υπολογίζονται οι αποστάσεις (ομοιότητες) μεταξύ της καινούριας ομάδας δεδομένων και κάθε μίας από τις παλιές.
 4. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 και 3 μέχρις ότου όλα τα στοιχεία του συνόλου να ομαδοποιηθούν σε μία ομάδα δεδομένων που να περιέχει N στοιχεία.

Το βήμα 3 μπορεί να γίνει με ποικίλους τρόπους και είναι αυτό που διαχωρίζει την ιεραρχική ομαδοποίηση σε τρεις υποκατηγορίες: *single-link*, *complete-link* και *average-link*, όπου χρησιμοποιείται η μικρότερη, η μεγαλύτερη και η μέση απόσταση αντίστοιχα από οποιοδήποτε στοιχείο μίας ομάδας σε οποιοδήποτε στοιχείο της άλλης ομάδας [13].

Οι αλγόριθμοι ιεραρχικής ομαδοποίησης συνήθως χρησιμοποιούν ένα δενδρόγραμμα που υποδηλώνει το μέγεθος και τον αριθμό των ομάδων που δημιουργήθηκαν.



Σχήμα 2.2.1: Δενδρόγραμμα Ιεραρχικής Ομαδοποίησης δεδομένων

- **Διαμεριστική ομαδοποίηση:** Σε αυτού του είδους την ομαδοποίηση δεδομένων οι αλγόριθμοι χωρίζουν αρχικά τα στοιχεία του συνόλου δεδομένων σε ομάδες και στη συνέχεια έχουν ως στόχο την βελτιστοποίηση του αποτελέσματος. Συγκεκριμένα σε ένα σύνολο δεδομένων με N στοιχεία, δημιουργούνται k ομάδες και στη συνέχεια ελέγχεται η δυνατότητα βελτιστοποίησης. Γνωστοί αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας ομαδοποίησης είναι οι centroids με γνωστούς τους αλγόριθμους k -means και k -medoids, όπου κάθε ομάδα δεδομένων αναπαριστάται με το κέντρο μάζας της. Μόλις δημιουργηθούν οι k ομάδες γίνεται η προσπάθεια βελτιστοποίησης του προβλήματος ως εξής: 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 [14].
- **Φασματική ομαδοποίηση (Spectral Clustering):** Η φασματική ομαδοποίηση είναι μία σχετικά πιο νέα τεχνική ομαδοποίησης. Ως είσοδος στον αλγόριθμο χρησιμοποιείται ένας συμμετρικός πίνακας με στοιχεία τις ομοιότητες (similarities) μεταξύ των στοιχείων που πρόκειται να ομαδοποιηθούν και ο αριθμός των ομάδων που πρέπει να προκύψουν. Η φασματική ομαδοποίηση αναπαρίσταται διαισθητικά με τη χρήση γραφών, όπου τα σημεία προς ομαδοποίηση παρουσιάζονται ως κορυφές (vertices) του γραφού ενώ οι μεταξύ τους ομοιότητες με ακμές (edges). Οι ακμές εμφανίζονται με βάρη, οι τιμές των οποίων αναπαριστούν τις αντίστοιχες τιμές ομοιότητας μεταξύ των δύο σημείων τα οποία συνδέονται από τη συγκεκριμένη ακμή.

Υπάρχουν και άλλα είδη ομαδοποίησης δεδομένων που διαφέρουν από τις κλασσικές ομαδοποιήσεις που αναφέρθηκαν πιο πάνω, όπως είναι η ασαφής ομαδοποίηση (Fuzzy Clustering).

Στην ασαφής ομαδοποίηση, κάθε στοιχείο του συνόλου ανήκει σε όλες τις ομάδες δεδομένων σε κάποιο βαθμό. Κάθε στοιχείο έχει τη δυνατότητα να ανήκει σε δύο ή περισσότερες ομάδες δεδομένων και ορίζεται μία συνάρτηση συμμετοχής η οποία υποδηλώνει το βαθμό συμμετοχής κάθε στοιχείου σε κάθε ομάδα. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι ο βαθμός συμμετοχής ενός στοιχείου σε μία ομάδα, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα συμμετοχής αυτού του στοιχείου στη συγκεκριμένη ομάδα. Αντίστοιχα, όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι ο βαθμός συμμετοχής του, τόσο μικρότερη η πιθανότητα να συμμετέχει το στοιχείο στη συγκεκριμένη ομάδα δεδομένων.

A.2.3 Διαχωρισμός του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και επιλογή «πιλοτικού» ζυγού.

Στη διπλωματική αυτή εργασία χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι για την ομαδοποίηση των ζυγών ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικά, υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι για την επίτευξη αυτού του στόχου, η επιλογή όμως ενός κατάλληλου αλγόριθμου ομαδοποίησης είναι πολύ σημαντική καθώς οι ομάδες που θα προκύψουν πρέπει να χαρακτηρίζονται από στιβαρότητα δεδομένου ότι θα χρησιμοποιηθούν για την απλοποίηση του δικτύου και την επίτευξη ενός πιο εύκολου και αποτελεσματικού ελέγχου τάσης. Οι ζώνες που προκύπτουν μετά την ομαδοποίηση αποτελούν μία ενότητα που επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από δράσεις που συμβαίνουν μέσα σε αυτήν (διαταραχές) και κατ'επέκταση σε μικρό βαθμό σε δράσεις που συμβαίνουν εκτός των συνόρων της.

Για τον έλεγχο του δικτύου και τη ρύθμιση της τάσης μέσα στα αποδεκτά όρια μεγάλο ρόλο παίζει επίσης η επιλογή του «πιλοτικού ζυγού» σε κάθε ζώνη του οποίου οι μεταβολές σε περίπτωση

διαταραχών είναι αντιπροσωπευτικές των διαταραχών που συμβαίνουν σε όλους τους ζυγούς της ζώνης που ανήκει. Σε αυτήν την εργασία ως πιλοτικός ζυγός κάθε ζώνης επιλέγεται το «ηλεκτρικό κέντρο» κάθε ζώνης. Πιο συγκεκριμένα πιλοτικός ζυγός επιλέγεται ο ζυγός φορτίου που ελαχιστοποιεί τη νόρμα L_m , η οποία ορίζεται από τη συνάρτηση:

$$L_m = \sum_{m,n \in C} D_{mn} \quad (2.3.1)$$

όπου D_{mn} είναι η ηλεκτρική απόσταση μεταξύ των ζυγών m και n και C η ζώνη στην οποία ανήκουν οι ζυγοί.

Ακόμη, για την επίτευξη ενός αποτελεσματικού διαχωρισμού δικτύου ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η θεωρία των γράφων η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση και την υλοποίηση μεγάλων και σύνθετων ηλεκτρικών δικτύων. Στον γράφο ενός ηλεκτρικού δικτύου, οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν τους ζυγούς του δικτύου, οι κλάδοι τις γραμμές μεταφοράς και τα βάρη στους κλάδους αντιπροσωπεύουν τη ροή φαινόμενης ισχύος. Τα παραπάνω αναλύονται εκτενέστερα στο αντίστοιχο κεφάλαιο για τη θεωρία των γράφων.

Β' Μέρος

Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες

Σε αυτό το μέρος της εργασίας πραγματοποιείται ο διαχωρισμός του πρότυπου δικτύου 39 ζυγών της IEEE μέσω των αλγορίθμων διαχωρισμού ιεραρχικής ομαδοποίησης ενιαίας απόστασης (Hierarchical Clustering With Single Electrical Distance-HCSD) και του αλγορίθμου φασματικής ομαδοποίησης (Spectral Clustering). Επίσης αναλύονται βασικές αρχές στη θεωρία των γράφων οι οποίες χρησιμοποιούνται από τους αλγόριθμους ομαδοποίησης. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το διαχωρισμό του δικτύου με τις συγκεκριμένες μεθόδους.

Κεφάλαιο 3^ο - Θεωρία γράφων και φασματική ομαδοποίηση δεδομένων.

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, σε περίπτωση εμφάνισης διαταραχών στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να παρουσιαστεί παραβίαση των ορίων της τάσης ορισμένων ζυγών. Για το λόγο αυτό απαιτείται ο έλεγχος του συστήματος. Ο αποκεντρωμένος έλεγχος παρουσιάζει πλεονεκτήματα 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, οι επιστήμες μηχανικών, η κοινωνιολογία κ.α. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες βασικές έννοιες της θεωρίας γράφων.

- Γράφος θα μπορούσε να οριστεί 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 ακμών
- $e=(u,v) \in E$, συμβολίζουμε μία ακμή μεταξύ των κορυφών u και v .
- Ένας γράφος $G=(V,E)$ μπορεί εναλλακτικά να αναπαρασταθεί από έναν πίνακα γειτνίασης (adjacency matrix). Ο πίνακας αυτός έχει μέγεθος $V \times V$ και κάθε στοιχείο του πίνακα $\alpha_{i,j}$ (όπου $i,j < |V|$) ορίζεται ως :

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

- 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 ο οποίος αποτελείται από ένα σύνολο κορυφών και ακμών χωρίς κατεύθυνση.
- **Κατευθυνόμενος γράφος** (directed graph) είναι ο γράφος ο οποίος αποτελείται από ένα σύνολο κορυφών και ακμών με συγκεκριμένη κατεύθυνση που συνήθως συμβολίζεται με βέλη στις ακμές

- **Γράφος με βάρη:** Σε έναν γράφο με βάρη θεωρούμε μία συνάρτηση βάρους $w : E \rightarrow \mathcal{R}$. Το w μπορεί να μοντελοποιεί απόσταση, μήκος, χρόνο, κόστος, χωρητικότητα κ.α. (γενικά επιτρέπονται και αρνητικά βάρη). [15]

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 $w_{i,j} \geq 0$. 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) μίας κορυφής $v_i \in V$ ορίζεται ως:

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

Το παραπάνω άθροισμα αναφέρεται στις κορυφές που είναι γειτονικές με τη κορυφή v_i καθώς για μη γειτονικές κορυφές 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 $A \subseteq V$. 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:

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

B.3.2 Εισαγωγή στη Φασματική Ομαδοποίηση

Η μέθοδος της Φασματικής Ομαδοποίησης (Spectral Clustering) χρησιμοποιεί 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 ιδιότητες του πίνακα Laplace.

Ιδιοδιανύσματα και Ιδιοτιμές :

Σε έναν 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 ιδιοδιάνυσμα 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 μοναδιαίος 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).
- 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 οποιεσδήποτε κορυφές του μπορούν να συνδεθούν μέσω ενός μονοπατιού όπου όλοι οι ενδιάμεσοι σταθμοί ανήκουν και αυτοί στον G .
- Η ιδιοτιμή λ_1 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 ως εξής:

$$L_{\text{norm}} = D^{-1/2} L D^{-1/2} = I - D^{-1/2} W D^{-1/2} \quad (3.2.4)$$

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

- Ο L_{norm} είναι πάντα θετικά ημιορισμένος και έχει n πραγματικές, μη αρνητικές ιδιοτιμές
- Ο αριθμός των φορών που εμφανίζεται η ιδιοτιμή 0 είναι ίσος με τον αριθμό των συνδεδεμένων συνιστωσών του γράφου.[16]

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

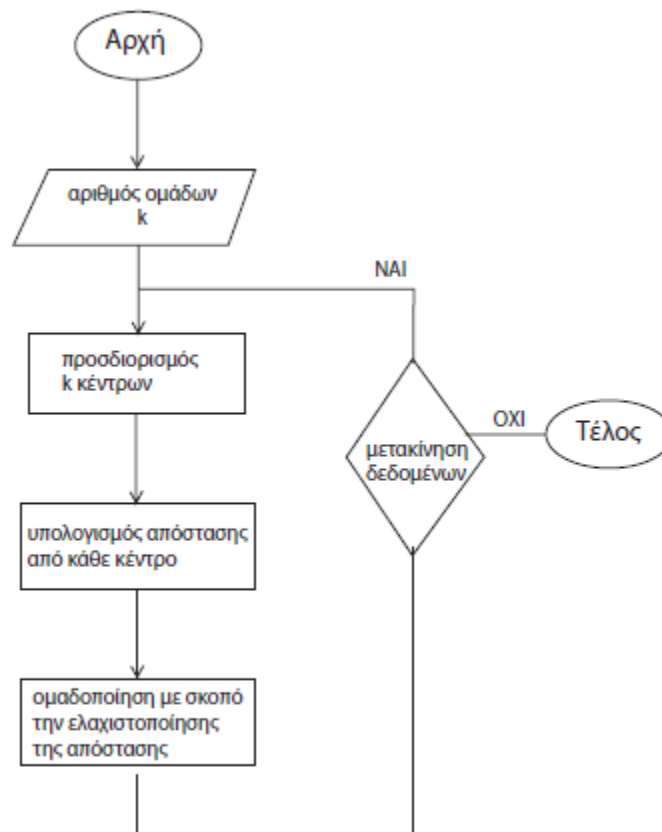
B.4.1 Αλγόριθμος k-means

Ο διαμεριστικός αλγόριθμος k-means είναι ένας από τους πιο απλούς και δημοφιλέστερους αλγορίθμους φασματικής 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 $\|x_i^{(j)} - c_j\|^2$ η ευκλείδεια απόσταση 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 είτε 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 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).

Ο αλγόριθμος k-means αν και από τους πιο δημοφιλείς αλγορίθμους 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 ακόμη βασικό μειονέκτημα του. Επιπλέον, πολύ συχνά τα αποτελέσματα εξαρτώνται από το μέτρο της απόστασης το οποίο θα εφαρμοστεί [17].



Σχήμα 4.1.1: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου k-means

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 [18].

B.4.3 Διαχωρισμός του δικτύου με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης μέσω του αλγορίθμου k-medoids.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε αρχικά ο αλγόριθμος k-medoids για την υλοποίηση ομαδοποίησης - διαχωρισμού του πρότυπου δικτύου 39 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 τον αλγόριθμο k-medoids.

Αρχικά το δίκτυο των 39 ζυγών της IEEE αναπαρίσταται με έναν γράφο στον οποίο ισχύουν τα ακόλουθα:

- οι κόμβοι των γράφων αντιπροσωπεύουν τους ζυγούς του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας
- οι ακμές τις γραμμές μεταφοράς

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 κανονικοποιημένος πίνακας Laplace όπως ορίστηκε στην εξίσωση (3.2.4) 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 αλγορίθμου k-medoids. Τα βήματα που εφαρμόστηκαν είναι τα ακόλουθα:

- Είσοδος: γράφος του δικτύου και k αριθμός 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 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-medoids αλγόριθμου.
- Έξοδος: Ομάδες : A_1, \dots, A_k

Ακολουθούν τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του αλγορίθμου φασματικής ομαδοποίησης στο δίκτυο των 39 ζυγών της IEEE το οποίο αποτελείται από: 10 γεννήτριες, 21 φορτία, 39 ζυγούς και 46 γραμμές μεταφοράς.

Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε δύο περιπτώσεις. Στη πρώτη για τη δημιουργία του πίνακα W με βάρη (adjacency matrix) χρησιμοποιήθηκε η ροή φαινόμενης ισχύς μεταξύ των ζυγών (S) που υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση:

$$S = \frac{S_{to} + S_{from}}{2} \quad (4.3.1)$$

$$S_{to,from} = \sqrt{P_{to,from}^2 + Q_{to,from}^2}$$

όπου,

S_{to} και S_{from} η ροή φαινόμενης ισχύος προς και από τους ζυγούς αντίστοιχα.

P και Q η ενεργός και η άεργος ισχύς αντίστοιχα.

Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το φανταστικό μέρος της αγωγιμότητας μεταξύ των ζυγών ($W = \text{imag}(Y_{bus})$)

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 :

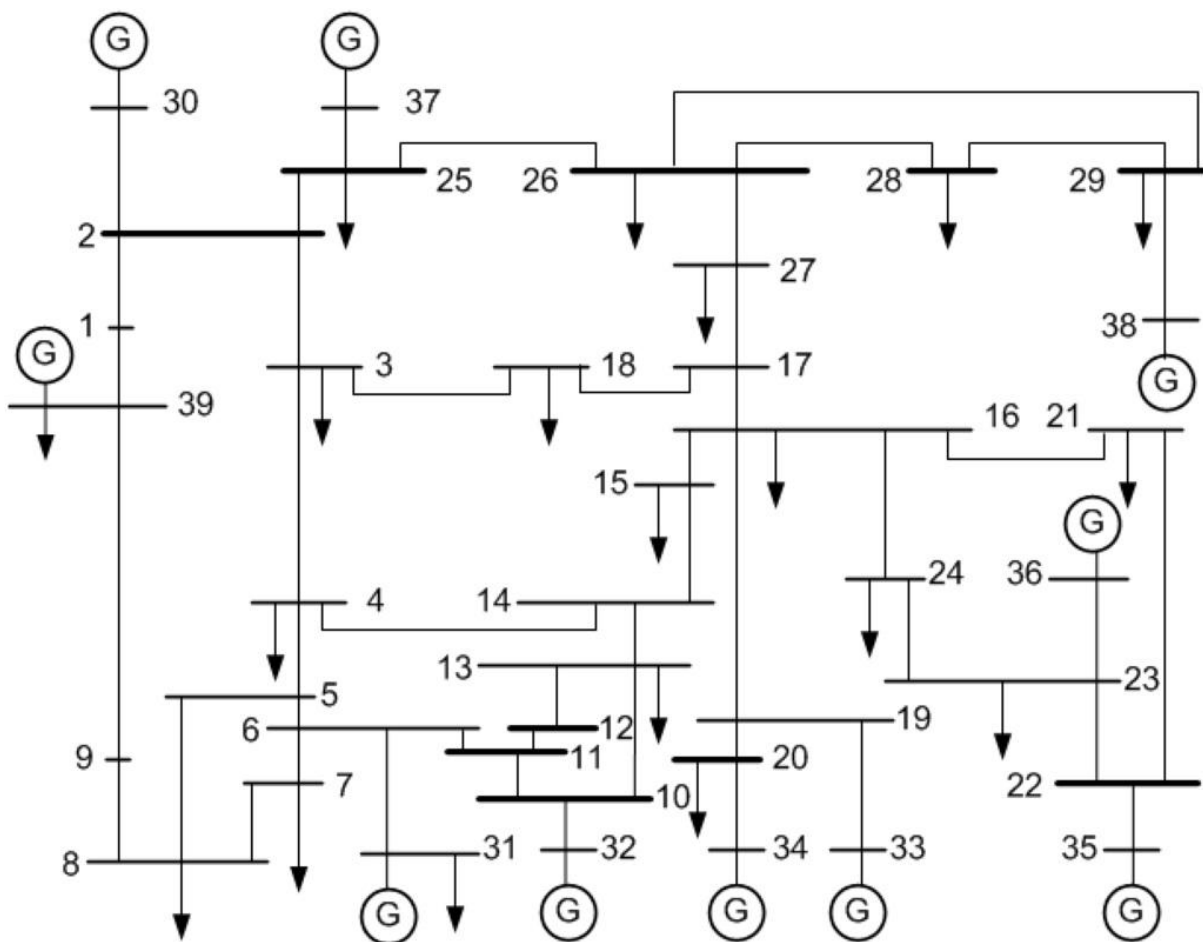
$$\gamma_k = \frac{v_{k+1} - v_k}{v_k} \quad (k \geq 2) \quad (4.3.2)$$

Μεγάλη τιμή γ_k σημαίνει καλός διαχωρισμός για k ομάδες διαχωρισμού.

Για τον διαχωρισμό του συγκεκριμένου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας θεωρήθηκε το εύρος [2,39], όπου ύστερα από υπολογισμό του παραπάνω δείκτη προέκυψε ότι ο καλύτερος διαχωρισμός είναι για $k=4$ ζώνες και για τις δύο περιπτώσεις του πίνακα W που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

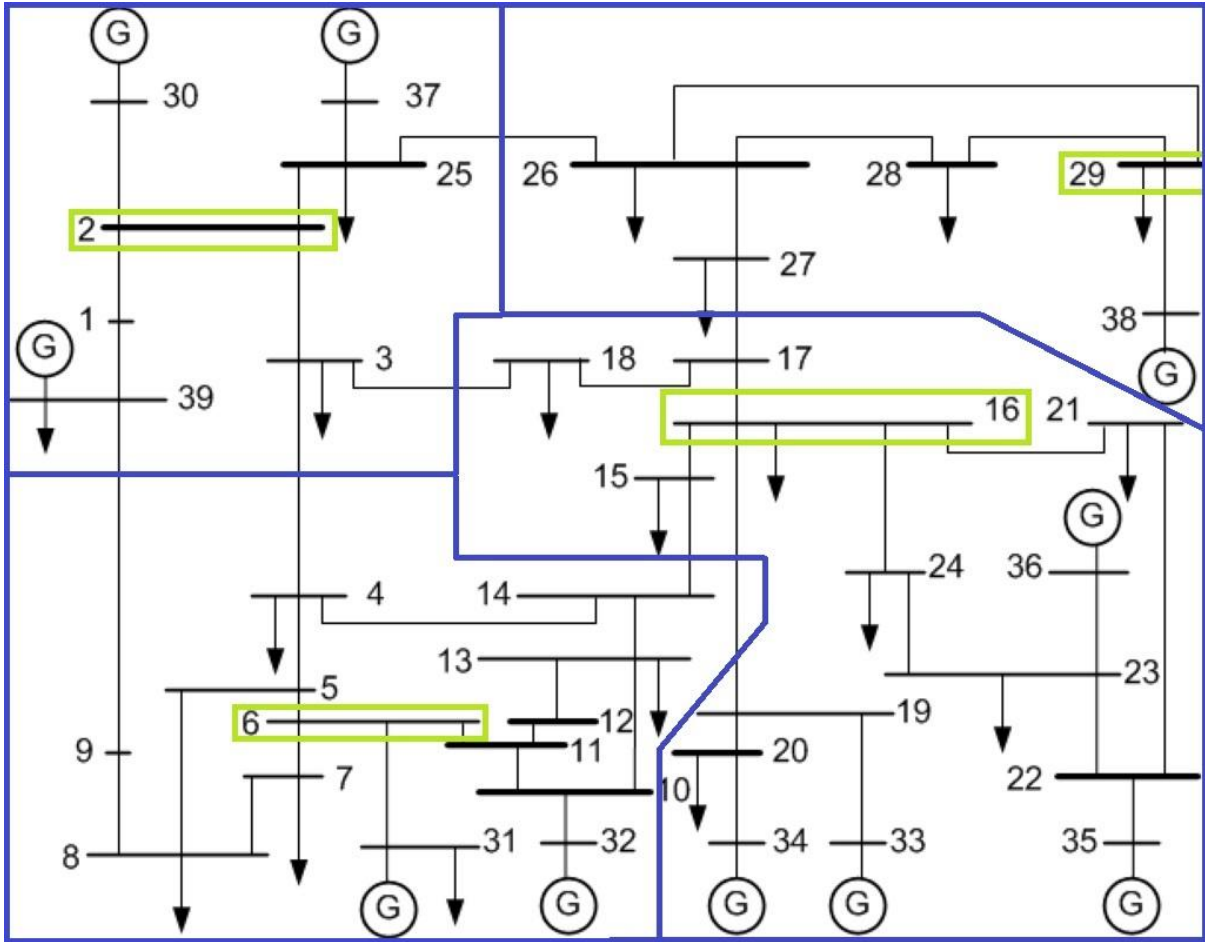
Η ροή φορτίου πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Matpower και οι μέθοδοι διαχωρισμού καθώς και όλοι οι υπολογισμοί που αναφέρονται στη παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού Matlab.

Ακολουθεί το πρότυπο δίκτυο των 39 ζυγών της IEEE στο σχήμα 4.3.1 και παρουσιάζονται οι δύο διαχωρισμοί που προέκυψαν με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης καθώς επίσης και οι πιλοτικοί ζυγοί που επιλέγησαν.



Σχήμα 4.3.1: Πρότυπο δίκτυο των 39 ζυγών της IEEE

όπου: Ζυγοί 30-39: Γεννήτριες
 Ζυγοί 1-29: Ζυγοί Φορτίου

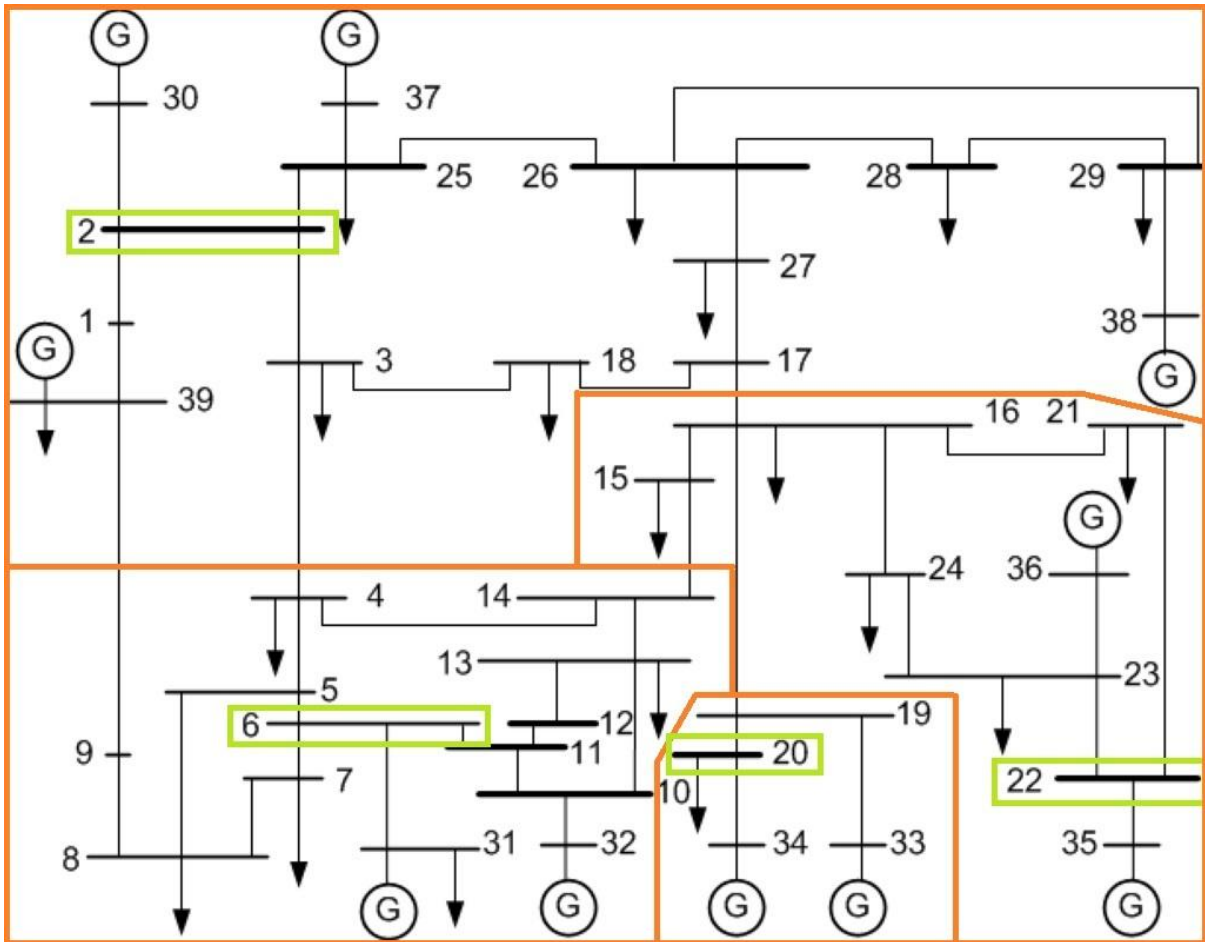


Σχήμα 4.3.2: Διαχωρισμός του δικτύου 39 ζυγών της IEEE με τον αλγόριθμο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τη ροή της φαινόμενης ισχύος (S) και οι πιλοτικοί ζυγοί που επιλέγησαν.

Ακολουθεί ο πίνακας διαχωρισμού που προέκυψε με τη μέθοδο διαχωρισμού φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών $W = S$ (φαινόμενη ισχύς)

Πίνακας 4.3.1: Διαχωρισμός ζωνών φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών $W = S$ (φαινόμενη ισχύς)

	ΖΩΝΕΣ			
	1	2	3	4
ΖΥΓΟΙ	15-24, 33,34,35,36	1,2,3,25, 30,37,39	26,27,28,29, 38	4-14, 31,32
Πιλοτικός ζυγός	16	2	29	6



Σχήμα 4.3.3: Διαχωρισμός του δικτύου 39 ζυγών της IEEE με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών το φανταστικό μέρος της αγωγιμότητας των ζυγών και οι πιλοτικοί ζυγοί που επιλέγησαν.

Ακολουθεί ο πίνακας διαχωρισμού που προέκυψε με τη μέθοδο διαχωρισμού φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών $W = \text{imag}(Y_{\text{bus}})$

Πίνακας 4.3.2: Διαχωρισμός ζωνών φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών το φανταστικό μέρος της αγωγιμότητας των ζυγών.

	ΖΩΝΕΣ			
	1	2	3	4
ΖΥΓΟΙ	4-14, 31,32	19,20, 33,34	1,2,3,17,18, 25-30, 37,38,39	15,16,21-24, 35,36
Πιλοτικός ζυγός	6	20	2	22

Για τον έλεγχο της στιβαρότητας του διαχωρισμού που προκύπτει, ελέγχθηκαν αυξομειώσεις του φορτίου των ζυγών. Συγκεκριμένα έγιναν αλλαγές στην ενεργό και άεργο ισχύ των ζυγών (θεωρήθηκαν φορτία σταθερού συντελεστή ισχύος) σε εύρος $\pm 20\%$ από το αρχικό. Παρατηρήθηκε ότι οι ζώνες διαχωρισμού παρέμειναν αναλλοίωτες και στις δύο περιπτώσεις που αναφέρθηκαν

παραπάνω. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την ομαδοποίηση των ζυγών είναι στιβαρός και ομαδοποιεί τα δεδομένα με επιθυμητό τρόπο.

Κεφάλαιο 5^ο – Διαχωρισμός του δικτύου – Αλγόριθμος Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης.

B 5.1 Ο αλγόριθμος Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης.

Ο αλγόριθμος Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης (Hierarchical Clustering with Single Distance – HCSD) είναι ιεραρχικής δομής. Ο βαθμός σύζευξης δύο ζυγών m και n υπό όρους τάσης μπορεί να ποσοτικοποιηθεί από την απόσβεση των μεταβολών των τάσεων όπως καθορίζονται από τη σχέση:

$$a_{mn} = \frac{\left[\frac{\partial V_m}{\partial Q_n} \right]}{\left[\frac{\partial V_n}{\partial Q_m} \right]} \quad (5.1.1)$$

Για να προκύψουν συμμετρικές αποστάσεις, ως **μέτρο εγγύτητας** χρησιμοποιείται η εξής ποσότητα:

$$D_{mn} = -\log(a_{mn} \cdot a_{nm}) \quad (5.1.2)$$

Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί ομαδοποίηση δεδομένων τύπου από κάτω προς τα πάνω (bottom-up) για να συγχωνεύσει τους ζυγούς του συστήματος (κόμβους) σε ομάδες. Σε κάθε επανάληψη, το κριτήριο ολοκληρωτικής σύνδεσης (complete linkage criterion) το οποίο χρησιμοποιεί τη μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ δύο στοιχείων στις δύο ζώνες είναι αυτό που καθορίζει την εγγύτητα δύο ζωνών C_i και C_j , σύμφωνα με την εξίσωση:

$$ICD_{i,j} = \max\{D_{mn} : m \in C_i \text{ and } n \in C_j\} \quad (5.1.3)$$

Στη συνέχεια οι ζώνες συγχωνεύονται βάση της εξίσωσης:

$$C_i \cup C_j : \min\{ICD_{i,j}\} \quad (5.1.4)$$

Το αποτέλεσμα του επαναληπτικού αυτού αλγόριθμου είναι ένα δενδρόγραμμα το οποίο παρουσιάζει πως συσχετίζονται μεταξύ τους οι ζώνες που προκύπτουν, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Για να εξασφαλιστεί ο κατάλληλος αριθμός ομάδων k , το δενδρόγραμμα αποκόπτεται σε ένα επιθυμητό επίπεδο βάση του κριτηρίου της σχετικής διαμέτρου. Η διάμετρος μίας ομάδας-ζώνης δεδομένων $diam_C$ είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο οποιονδήποτε στοιχείων που ανήκουν στην ίδια ζώνη και ορίζεται από τη σχέση:

$$diam_C = \max\{D_{mn} : m, n \in C\} \quad (5.1.5)$$

Η σχετική διάμετρος των \mathbf{k} ομάδων προκύπτει από την εξίσωση:

$$RD = \frac{\sum_{i=1}^k diam_{C_i}}{k} \quad (5.1.6)$$

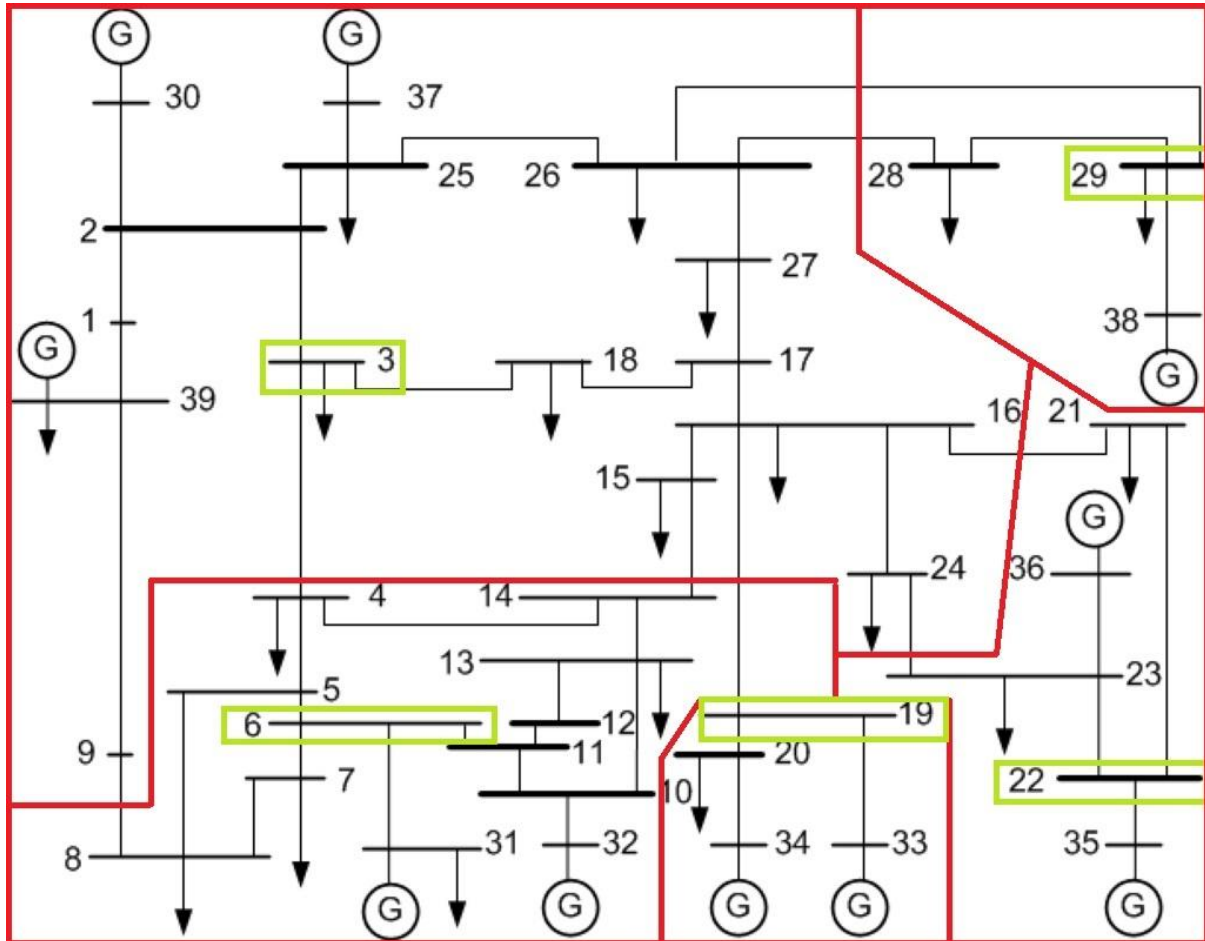
Οι αλλαγές στη κλίση της καμπύλης RD υποδηλώνουν υποβάθμιση της ποιότητας της ομαδοποίησης. Συνεπώς ο καταλληλότερος αριθμός ζωνών \mathbf{k} μέσα στο διάστημα $[1, k_{max}]$ που στη περίπτωση του δικτύου που εξετάζεται είναι το διάστημα $[1, 39]$, προκύπτει από την εξίσωση:

$$k: \max \{ |RD_2 - RD_1|, \dots, |RD_{k_{max}} - RD_{k_{max}-1}| \} \quad (5.1.7)$$

Εκτελώντας όλα τα παραπάνω βήματα στο δίκτυο των 39 ζυγών της IEEE μέσω του λογισμικού Matlab και τις ροές φορτίου μέσω Matpower, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος καταλήγει ως βέλτιστη ομαδοποίηση των ζυγών βάση της τελευταίας εξίσωσης για $\mathbf{k=5}$ ζώνες.[11]

B.5.2 Διαχωρισμός του δικτύου με χρήση του αλγόριθμου Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης

Ακολουθεί ο διαχωρισμός και οι πιλοτικοί ζυγοί που προέκυψαν με τον αλγόριθμο Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης:



Σχήμα 5.2.1: Διαχωρισμός του δικτύου 39 ζυγών της IEEE και πιλοτικοί ζυγοί με τον αλγόριθμο Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης

Πίνακας 5.2.1: Διαχωρισμός των ζωνών με χρήση του αλγόριθμου Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης

	ΖΩΝΕΣ				
	1	2	3	4	5
ΖΥΓΟΙ	4-14, 31,32	1,2,3,9, 15-18,24-27, 30,37,39	21,22,23, 35,36	19,20, 33,34	28,29, 38
Πιλοτικός ζυγός	6	3	22	19	29

Γ' Μέρος

Έλεγχος Τάσης

Σε αυτό το μέρος της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται ο έλεγχος τάσης σε περίπτωση διαταραχών στο πρότυπο δίκτυο των 39 ζυγών της IEEE το οποίο παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Λαμβάνοντας υπόψιν τις ομαδοποιήσεις του δικτύου που προέκυψαν από τους αλγόριθμους που αναλύθηκαν στα προηγούμενα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ελέγχου τάσης σε κάθε ζώνη ξεχωριστά καθώς επίσης και στο συνολικό δίκτυο. Ο έλεγχος τάσης γίνεται μέσω ενός αλγορίθμου γραμμικού προγραμματισμού.

Κεφάλαιο 6° - Έλεγχος τάσης με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού

Γ 6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία μέθοδος ελέγχου τάσης που στηρίζεται στη ρύθμιση της τάσης των γεννητριών του δικτύου μεταφοράς που εξετάζεται και διατυπώνεται ως πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Αρχικά περιγράφεται μαθηματικά ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η διατύπωση του προβλήματος ρύθμισης τάσης και εφαρμόζεται στο πρότυπο δίκτυο των 39 ζυγών της IEEE με σκοπό τον έλεγχο τάσης μετά από διαταραχή.

Γ 6.2 Προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού

Ο γραμμικός προγραμματισμός είναι μια μαθηματική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων απόφασης με εξαιρετικά ευρύ πεδίο εφαρμογών από την οικονομία και την παραγωγή μέχρι την διοίκηση και την μεταφορά προϊόντων από τα σημεία παραγωγής στα σημεία κατανάλωσης (logistics).

Το μοντέλο του γενικού προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού έχει την ακόλουθη μορφή:

Προσδιορίζονται οι τιμές των μεταβλητών απόφασης x_1, x_2, \dots, x_n που μεγιστοποιούν (ή ελαχιστοποιούν) τη γραμμική συνάρτηση:

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (6.2.1)$$

και συγχρόνως ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n & (\leq, =, \geq) b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n & (\leq, =, \geq) b_2 \\ & \cdot \\ & \cdot \\ & \cdot \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n & (\leq, =, \geq) b_m \end{aligned} \quad (6.2.2)$$

$$(x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0)$$

a_{ij}, b_i, c_j ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$) είναι δοσμένες σταθερές.

Η γραμμική συνάρτηση Z που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε λέγεται αντικειμενική συνάρτηση και οι μεταβλητές x_i είναι οι μεταβλητές της απόφασης και παριστάνουν τις στάθμες των δραστηριοτήτων. Ο συντελεστής c_j της αντικειμενικής συνάρτησης ονομάζεται μοναδιαία αξία της δραστηριότητας j , γιατί όταν αυξάνεται κατά μια μονάδα η στάθμη της δραστηριότητας τότε η αντικειμενική συνάρτηση αυξάνεται κατά c_j , ενώ οι συντελεστές b_i εκφράζουν την ποσότητα του μέσου i που μπορεί να διατεθεί για τις n δραστηριότητες. Οι συντελεστές a_{ij} εκφράζουν την ποσότητα του μέσου i που καταναλώνεται για κάθε μονάδα της δραστηριότητας j και λέγονται τεχνολογικοί συντελεστές.

Το παραπάνω σύστημα μπορεί να εκφραστεί και με την μορφή μητρωικών εξισώσεων ως εξής:

$$\min_x (\max_x) : Z = C^T X$$

$$\text{υπό τον περιορισμό: } AX (\leq, =, \geq) B \quad (6.2.3)$$

$$\text{και } X \geq 0$$

$$\text{όπου, } C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \text{ και } B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

Προκειμένου να υπάρχει μια και μοναδική λύση του ως άνω συστήματος πρέπει ο αριθμός των αγνώστων να ισούται με τον αριθμό των εξισώσεων δηλαδή $m=n$. [19],[20]

Γ.6.3 Διατύπωση προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού για έλεγχο τάσης με προσαρμογή της τάσης των γεννητριών.

Στο παρόν στάδιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έχουν γίνει ήδη οι διαχωρισμοί του δικτύου με τους αλγόριθμους που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Μέσω του λογισμικού Matlab και του πακέτου Matpower γίνεται η ροή φορτίου στο πρότυπο δίκτυο των 39 ζυγών της IEEE. Κρατώντας τα αρχικά δεδομένα της τάσης των ζυγών (**τάση πριν τη διαταραχή**) του δικτύου, αλλάζουμε το φορτίο στους ζυγούς. Ως διαταραχή ορίζεται η απότομη μεταβολή (αύξηση) του φορτίου του δικτύου. Συγκεκριμένα αυξάνουμε την ενεργό και άεργο ισχύ (φορτία σταθερού συντελεστή ισχύος) κατά 5 % και γίνεται εκ νέου η ροή φορτίου στο δίκτυο. Έχοντας τώρα τα καινούρια δεδομένα για τις τάσεις των ζυγών (**τάση μετά τη διαταραχή**), στόχος μας είναι μέσω του γραμμικού προγραμματισμού να επαναφέρουμε την τάση όσο πιο κοντά στα αρχικά δεδομένα (**τάση μετά τον έλεγχο**). Αυτό γίνεται πάντα παρατηρώντας τις αλλαγές που προκύπτουν στον πιλοτικό ζυγό κάθε ζώνης και θεωρούμε ότι ως αντιπρόσωπος της ζώνης που ανήκει οι μεταβολές στον πιλοτικό ζυγό θα φέρουν τα επιθυμητά αποτελέσματα στους ζυγούς ολόκληρης της ζώνης.

Οι πιλοτικοί ζυγοί επιλέγηκαν βάση της εξίσωσης (2.3.1) όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.

Παίρνοντας τις τιμές από τον πίνακα ευαισθησίας της τάσης στους ζυγούς φορτίου ως προς τις τάσεις στις γεννήτριες και όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορούμε να ορίσουμε το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού που υπολογίζει την απαιτούμενη προσαρμογή της τάσης των γεννητριών.

Για κάθε μέθοδο διαχωρισμού που αναφέρθηκε ως τώρα γίνεται έλεγχος της τάσης μέσω του γραμμικού προγραμματισμού σε κάθε ζώνη που λειτουργά ανεξάρτητα και μεμονωμένα από το υπόλοιπο δίκτυο, καθώς επίσης και στο συνολικό δίκτυο ταυτόχρονα.

Το πρόβλημα του γραμμικού προγραμματισμού που επιλύουμε έχει την εξής μαθηματική μορφή:

$$\min_x x \text{ έτσι ώστε } \begin{cases} A \cdot x \leq b \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ l_b \leq x \leq u_b \end{cases} \quad (6.3.1)$$

Το αντίστοιχο διάνυσμα x στο δίκτυο που εξετάζουμε είναι το διάνυσμα ΔV_G , η μεταβολή της τάσης γεννητριών του δικτύου ώστε να επανέλθει η τάση στους ζυγούς στα αρχικά επίπεδα. Η αντικειμενική συνάρτηση $\min_x x$ χρησιμοποιείται ώστε να επιτευχθεί η ρύθμιση της τάσης με τη μικρότερη μεταβολή της τάσης των γεννητριών. [21]

Οι εξισώσεις που θέλουμε να φέρουμε στην παραπάνω τυποποιημένη μορφή είναι οι εξής:

$$1. \quad V_{ad(pilot)} + \sum_i \frac{dV_{pilot}}{dV_{G_i}} \cdot \Delta V_G = V_{bd(pilot)} \Rightarrow$$

$$\sum_i \frac{dV_{pilot}}{dV_{G_i}} \cdot \Delta V_G = V_{bd(pilot)} - V_{ad(pilot)} \quad (6.3.2)$$

όπου,

$\frac{dV_{pilot}}{dV_{G_i}}$: είναι η ευαισθησία της τάσης του πιλοτικού ζυγού ως προς τη μεταβολή της τάσης της γεννήτριας i που ανήκει στην ίδια ζώνη.

$V_{bd(pilot)}$: η τάση του πιλοτικού ζυγού πριν τη διαταραχή.

$V_{ad(pilot)}$: η τάση του πιλοτικού ζυγού μετά τη διαταραχή.

Σε αντιστοιχία με την $A_{eq} \cdot x = b_{eq}$, είναι φανερό ότι

$$A_{eq} = \left[\frac{dV_{pilot}}{dV_G} \right] \text{ και } b_{eq} = [V_{old(pilot)} - V_{new(pilot)}]$$

$$2. \quad (i) \quad Q_{G_i} + \frac{dQ_{G_i}}{dV_{G_i}} \cdot \Delta V_G \leq Q_{max} \Rightarrow$$

$$\frac{dQ_{G_i}}{dV_{G_i}} \cdot \Delta V_G \leq Q_{max} - Q_{G_i} \quad (6.3.3)$$

$$(ii) \quad Q_{G_i} + \frac{dQ_{G_i}}{dV_{G_i}} \cdot \Delta V_G \geq Q_{min} \Rightarrow$$

$$\frac{dQ_{G_i}}{dV_{G_i}} \cdot \Delta V_G \leq Q_{G_i} - Q_{min}$$

όπου,

Q_{max}, Q_{min} : Το μέγιστο και ελάχιστο όριο παραγωγής άεργου ισχύος των γεννητριών αντίστοιχα

$\frac{dQ_G}{dV_G}$: Η ευαισθησία της άεργου ισχύος της γεννήτριας ως προς τη τάση της.

Σε αντιστοιχία με την $A \cdot x \leq b$ προκύπτει ότι $A = \left[\frac{dQ_G}{dV_G} \right]$ και $b = \begin{bmatrix} Q_{max} - Q_G \\ Q_G - Q_{min} \end{bmatrix}$

$$\begin{aligned}
3. \quad (i) \quad & V_{G_i} + \Delta V_G \leq V_{max} \Rightarrow \\
& \Delta V_G \leq V_{max} - V_{G_i} \\
& \hspace{20em} (6.3.4) \\
(ii) \quad & V_{G_i} + \Delta V_G \geq V_{min} \Rightarrow \\
& \Delta V_G \geq V_{min} - V_{G_i}
\end{aligned}$$

όπου,

$V_{max} = 1.07$ (α.μ) το μέγιστο όριο τάσης

$V_{min} = 0.93$ (α.μ) το ελάχιστο όριο τάσης

V_G : η τάση στις γεννήτριες.

Σε αντιστοιχία με την $l_b \leq x \leq u_b$ καταλήγουμε στο ότι:

$$u_b = [V_{max} - V_G] \text{ και } l_b = [V_{min} - V_G]$$

Οι εξισώσεις (6.3.2), (6.3.3) και (6.3.4) ορίζουν πλήρως το πρόβλημα του γραμμικού προγραμματισμού που επιλύεται για το συγκεκριμένο δίκτυο όπως εκφράστηκε στην μορφή της εξίσωσης (6.3.1).

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στην επίλυση του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού χρησιμοποιεί μία επαναληπτική διαδικασία με κριτήριο ένα όριο απόκλισης μεταξύ της τάσης μετά τον έλεγχο του πιλοτικού ζυγού από τη τάση πριν τη διαταραχή του πιλοτικού ζυγού.

Αιολουθούν τα διαγράμματα που προέκυψαν από την επίλυση του προβλήματος που αναλύθηκε παραπάνω για τις μεθόδους διαχωρισμού Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης (HCSD) καθώς και για τη μέθοδο Φασματικής Ομαδοποίησης σε συνδυασμό για τους δύο διαφορετικούς πίνακες βαρών που έχουν αναφερθεί παραπάνω.

Γ.6.4 Έλεγχος τάσης με τη μέθοδο διαχωρισμού Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης.

Όπως είδαμε στο αντίστοιχο κεφάλαιο διαχωρισμού με τη μέθοδο Ιεραρχικής Ομαδοποίησης Ενιαίας Απόστασης (HCSD) ο διαχωρισμός που προέκυψε για το δίκτυο των 39 ζυγών της IEEE είναι ο ακόλουθος:

Πίνακας 6.4.1: Διαχωρισμός του δικτύου με τη μέθοδο HCSD και οι πιλοτικοί ζυγοί που επιλέγησαν

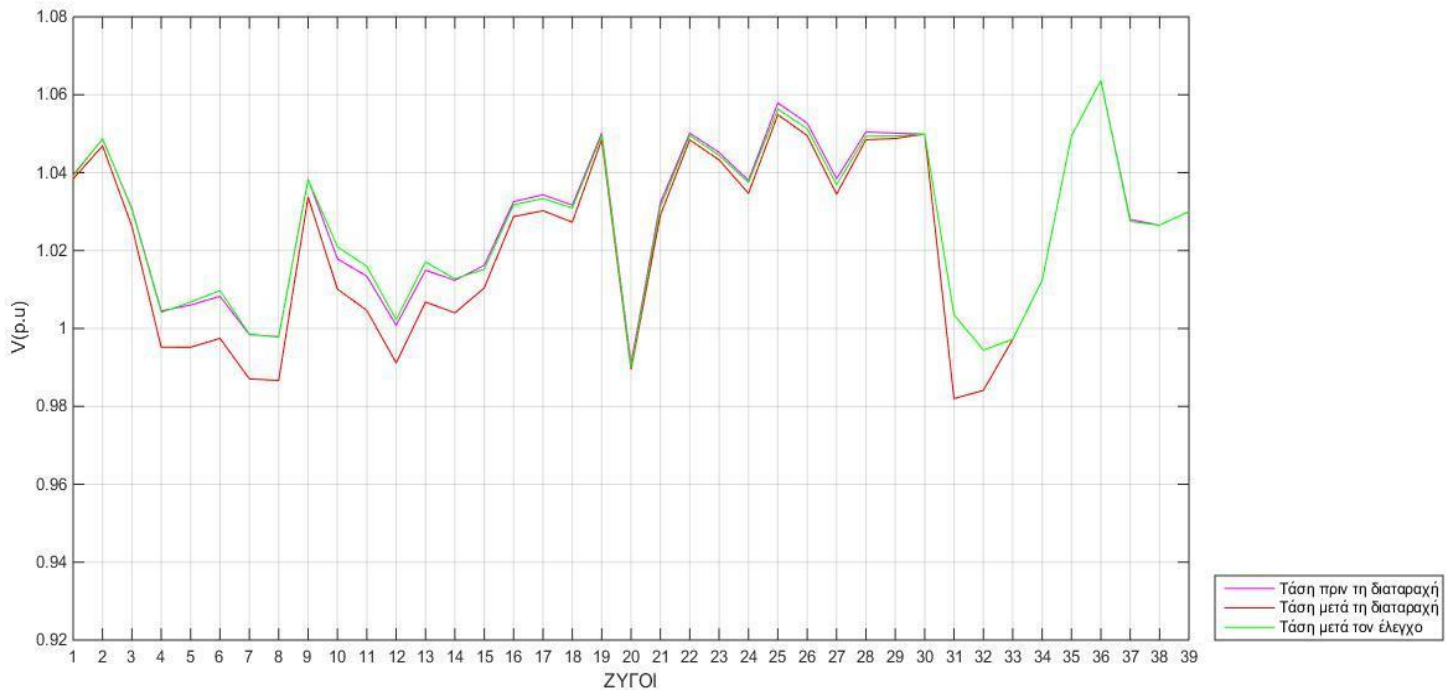
ΖΥΓΟΙ	ΖΩΝΕΣ				
	1	2	3	4	5
	4-14, 31,32	1,2,3,9, 15-18,24-27, 30,37,39	21,22,23, 35,36	19,20, 33,34	28,29, 38
Πιλοτικός ζυγός	6	3	22	19	29

Έλεγχος τάσης στη ζώνη 1:

Ζυγοί φορτίου: 4-14

Γεννήτριες: 31,32

Πιλοτικός ζυγός: 6



Σχήμα 6.4.1: Έλεγχος τάσης στη ζώνη 1 με τη μέθοδο HCSD

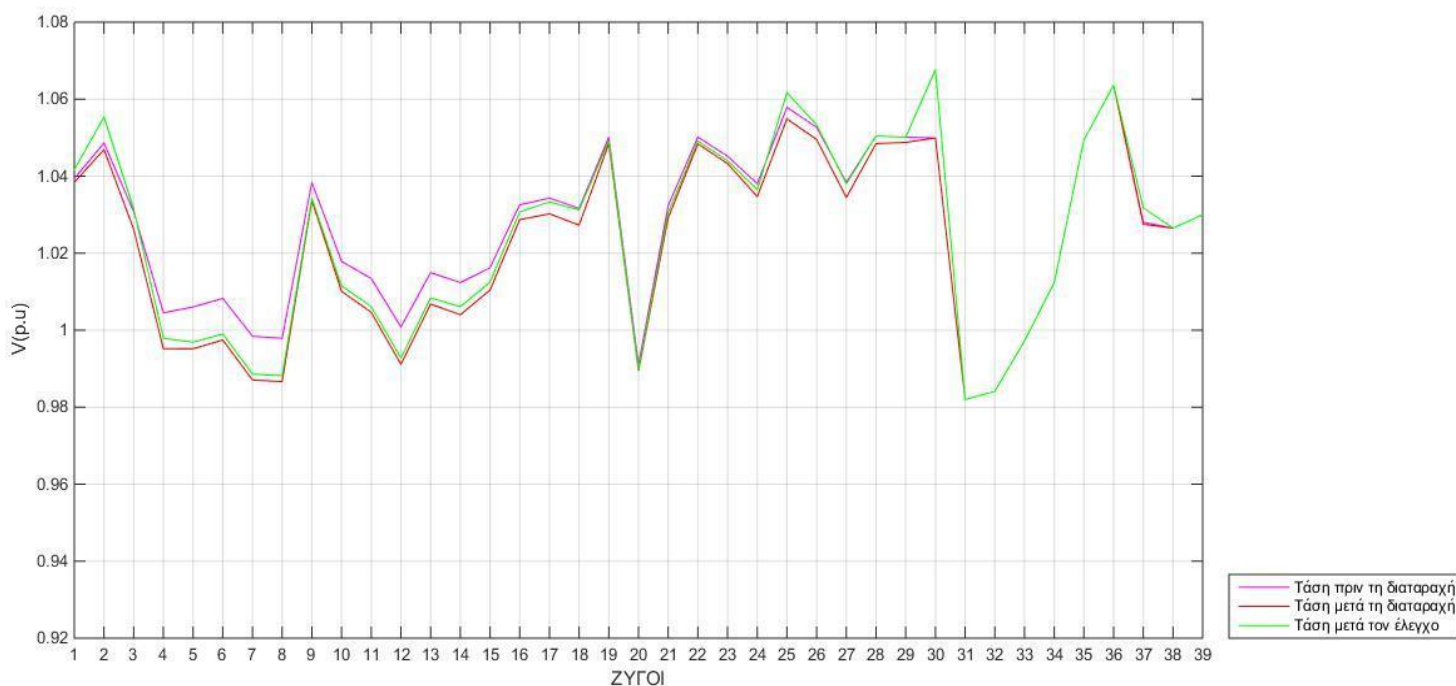
Στο σχήμα 6.4.1 φαίνεται ότι στην συγκεκριμένη ζώνη ειδικά στους ζυγούς 4-14 παρατηρείται μεγάλη πτώση τάσης. Ο έλεγχος τάσης επαναφέρει τη τάση στον πιλοτικό ζυγό (ζυγό 6) πολύ κοντά στα αρχικά επίπεδα τάσης του. Γενικά και οι υπόλοιποι ζυγοί της ζώνης αυτής επαναφέρουν τη τιμή της τάσης τους πολύ κοντά ακόμα και ακριβώς στις τιμές τάσης που είχαν πριν τη διαταραχή.

Έλεγχος τάσης στη ζώνη 2:

Ζυγοί φορτίου: 1,2,3,9,15-18,24-27

Γεννήτριες: 30,37,39

Πιλοτικός ζυγός: 3



Σχήμα 6.4.2: Έλεγχος τάση στη ζώνη 2 με τη μέθοδο HCSD

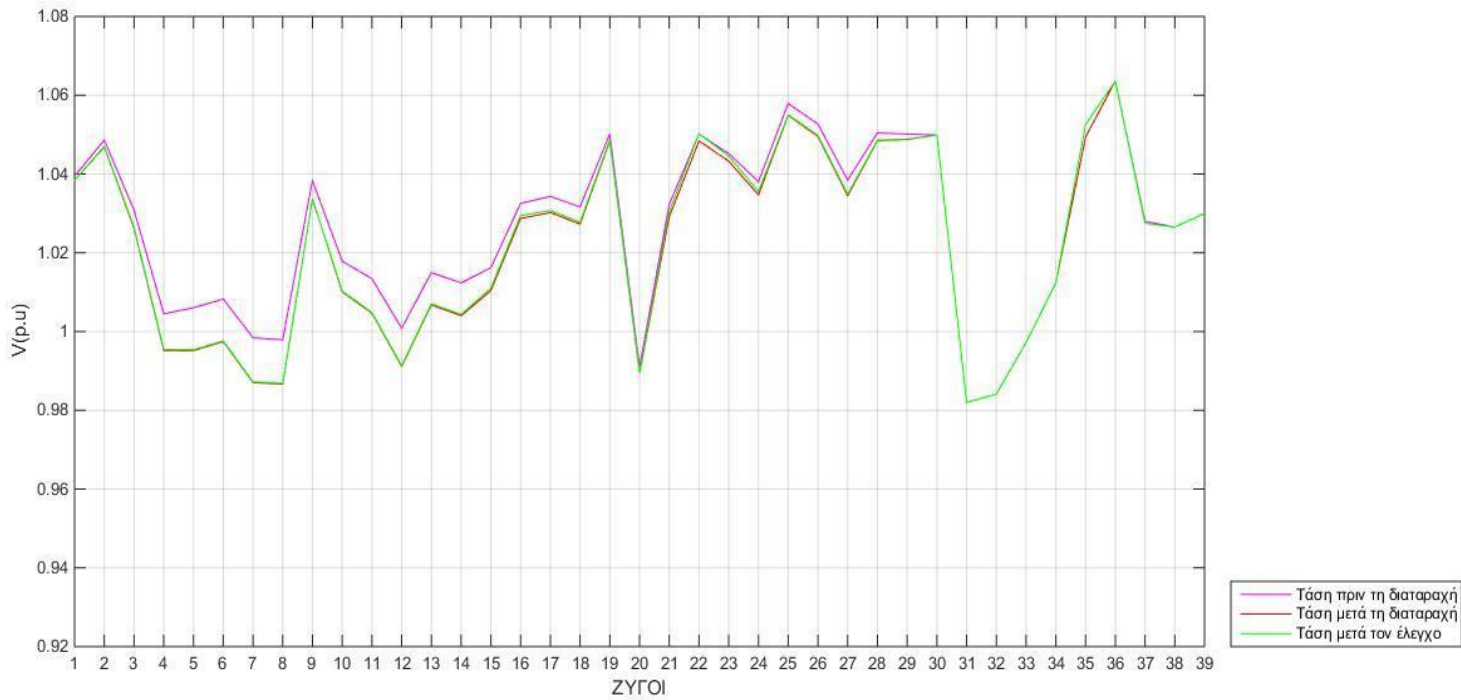
Στο σχήμα 6.4.2 φαίνεται ότι ο πιλοτικός ζυγός (ζυγός 3) επανέρχεται πλήρως στην τιμή που είχε πριν από τη διαταραχή μετά από τον έλεγχο στη ζώνη αυτή αφού στο συγκεκριμένο σημείο οι καμπύλες «τάση πριν από τη διαταραχή» και «τάση μετά τον έλεγχο» εφάπτονται. Γενικά και οι υπόλοιποι ζυγοί στη ζώνη αυτή φαίνεται να ακολουθούν αρκετά καλή συμπεριφορά.

Έλεγχος τάσης στη ζώνη 3:

Ζυγοί φορτίου: 21,22,23

Γεννήτριες: 35,36

Πιλοτικός ζυγός: 22



Σχήμα 6.4.3: Έλεγχος τάση στη ζώνη 3 με τη μέθοδο HCSD

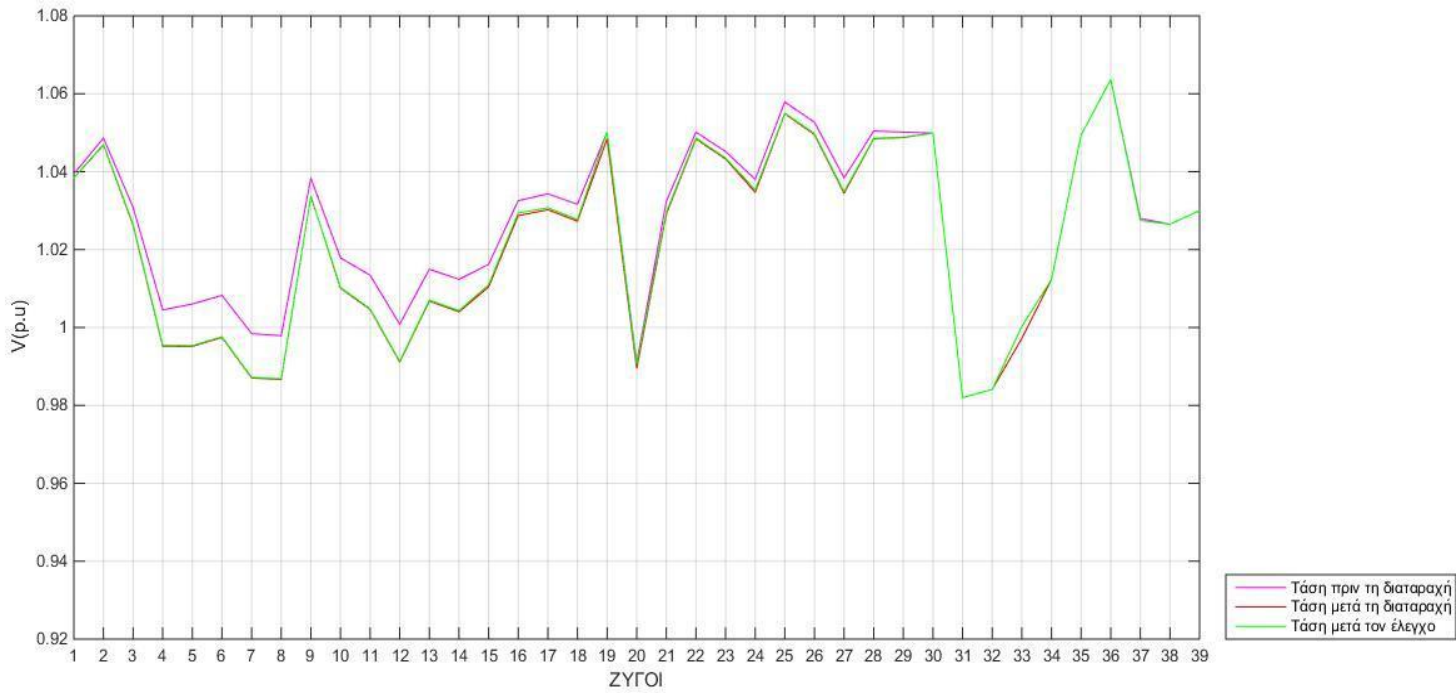
Στο σχήμα 6.4.3 φαίνεται ότι όπως και πριν και σε αυτή τη ζώνη ο πιλοτικός ζυγός (ζυγός 22) επανέρχεται πλήρως στην τιμή που είχε πριν από τη διαταραχή μετά από τον έλεγχο αφού στο συγκεκριμένο σημείο οι καμπύλες «τάση πριν από τη διαταραχή» και «τάση μετά τον έλεγχο» εφάπτονται. Επίσης και οι υπόλοιποι ζυγοί στη ζώνη αυτή επανέρχονται πλήρως στις τιμές που είχαν πριν τη διαταραχή.

Έλεγχος τάσης στη ζώνη 4:

Ζυγοί φορτίου: 19,20

Γεννήτριες: 33,34

Πιλοτικός ζυγός: 19



Σχήμα 6.4.4: Έλεγχος τάση στη ζώνη 4 με τη μέθοδο HCSD

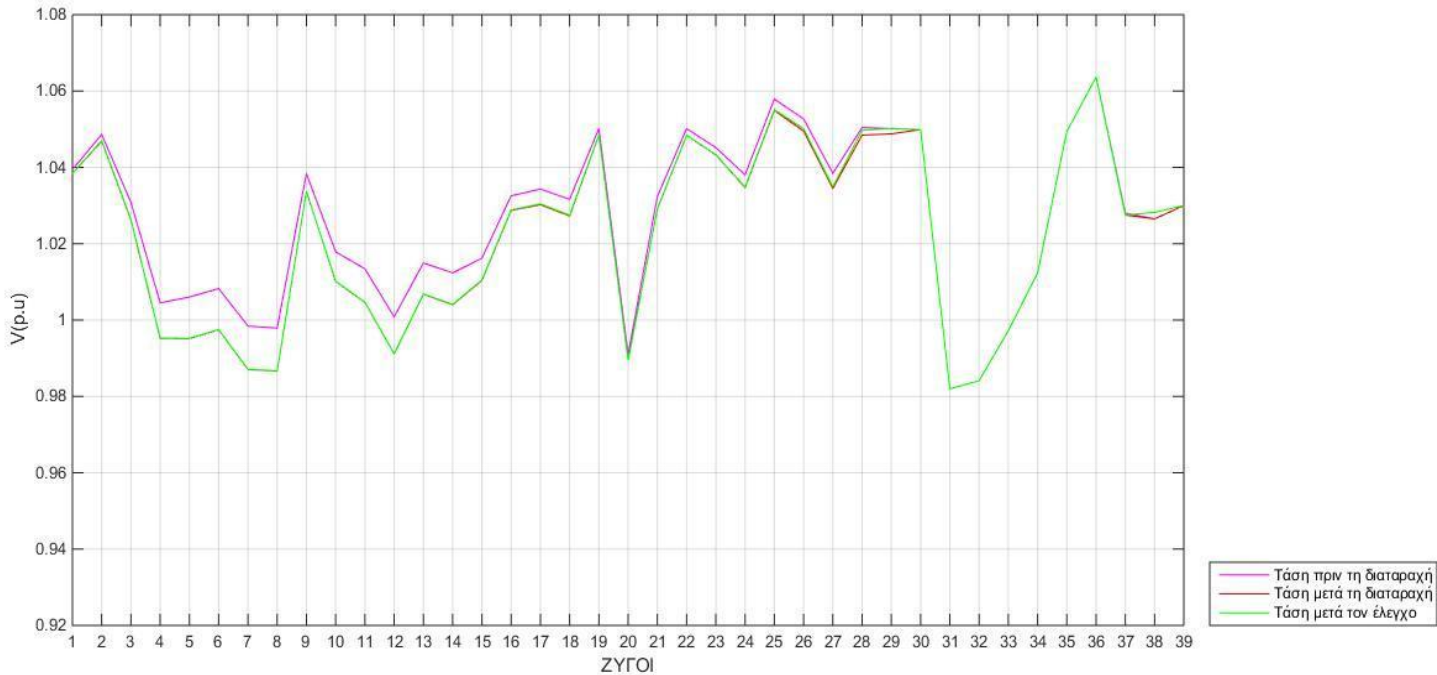
Στο σχήμα (6.4.4) φαίνεται ότι ο έλεγχος και σε αυτή τη ζώνη είναι επιτυχής αφού ο πιλοτικός ζυγός (ζυγός 19) αλλά και ο ζυγός 20 ταυτίζονται με τις τιμές τάσης που είχαν πριν από τη διαταραχή.

Έλεγχος τάσης στη ζώνη 5:

Ζυγοί φορτίου: 28,29

Γεννήτριες: 38

Πilotικός ζυγός: 29



Σχήμα 6.4.5: Έλεγχος τάσης στη ζώνη 5 με τη μέθοδο HCSD

Στο σχήμα 6.4.5 φαίνεται ότι όπως και στη προηγούμενη ζώνη είναι επιτυχής ο έλεγχος. Ο πιλοτικός ζυγός (ζυγός 29) καθώς και ο ζυγός 28 επανήλθαν στις τιμές που είχαν πριν από τη διαταραχή όπως φαίνεται από τα σημεία τομής των δύο καμπύλων.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται πως ο έλεγχος σε κάθε μία ζώνη δεν επηρεάζει (ή επηρεάζει λίγο) την τάση των ζυγών εκτός ζώνης γεγονός που είναι επιθυμητό αποτέλεσμα και υποδηλώνει την καλή ομαδοποίηση του δικτύου.

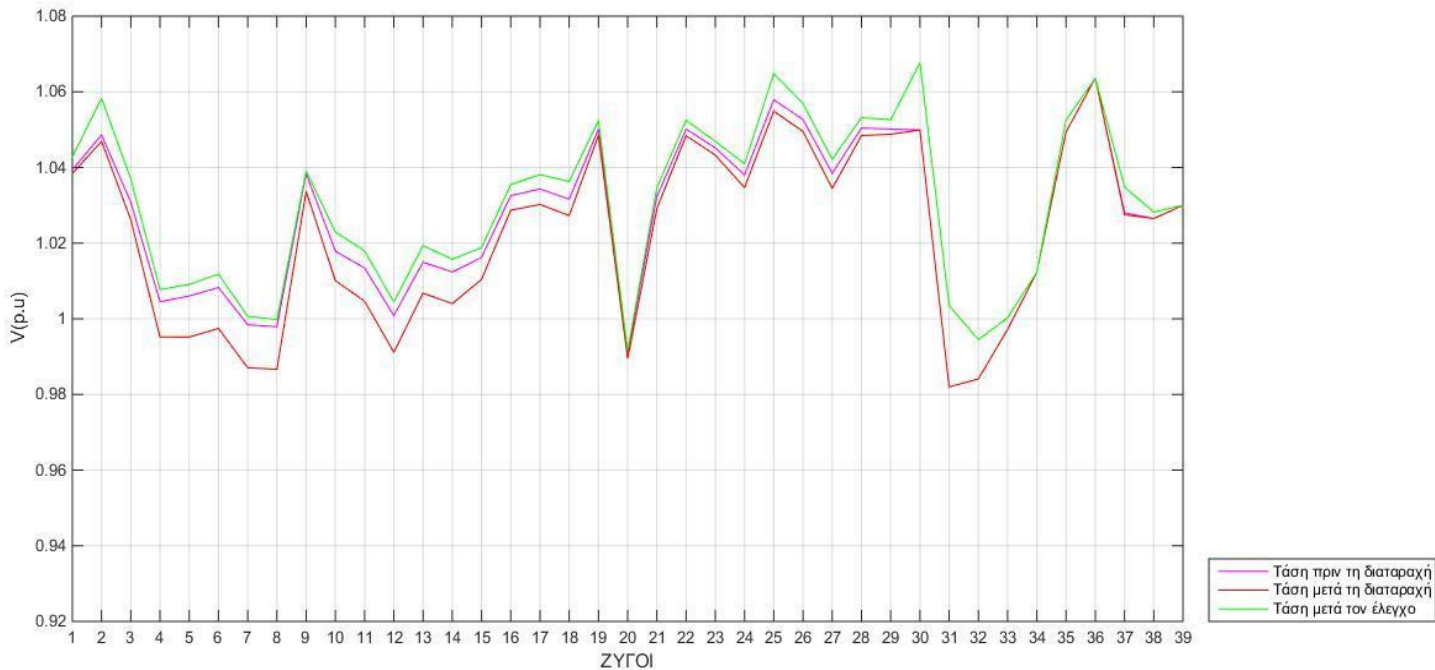
Οι παραπάνω έλεγχοι τάσης που έγιναν μεμονωμένα σε κάθε μία από τις 5 ζώνες ξεχωριστά, εφαρμόζονται ταυτόχρονα σε ολόκληρο το δίκτυο με σκοπό τη ρύθμιση τάσης μετά τη διαταραχή στο συνολικό δίκτυο. Ακολουθεί το διάγραμμα που προέκυψε από τον έλεγχο τάσης για το συνολικό δίκτυο.

Έλεγχος τάσης στο συνολικό δίκτυο:

Ζυγοί φορτίου: 1-29

Γεννήτριες: 30-39

Πιλοτικοί ζυγοί: 3,6,19,22,29



Σχήμα 6.4.6: Έλεγχος τάσης σε όλες τις ζώνες του δικτύου με τη μέθοδο HCSD

Στο σχήμα 6.4.6 φαίνεται ότι μετά τη διαταραχή στο δίκτυο προέκυψε πτώση τάσης σε όλους τους ζυγούς φορτίου του δικτύου. Ο έλεγχος τάσης που έγινε σε κάθε ζώνη φαίνεται ότι επαναφέρει τη τάση των πιλοτικών ζυγών πολύ κοντά ή και ακριβώς στις αρχικές τιμές που είχαν πριν από τη διαταραχή. Γενικά και οι υπόλοιποι ζυγοί φορτίου του δικτύου μετά τη πτώση τάσης ύστερα από τον έλεγχο επανέρχονται πολύ κοντά στις αρχικές τιμές τους γεγονός που υποδηλώνει ότι η ομαδοποίηση του δικτύου που προέκυψε με τη συγκεκριμένη μέθοδο διαχωρισμού καθώς επίσης και η επιλογή των πιλοτικών ζυγών ήταν κατάλληλη.

Τα παραπάνω αποτελέσματα της μεθόδου HCSD συνοψίζονται και παρουσιάζονται βάση της επίδοσης PI στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 6.4.2: Πίνακας επίδοσης PI με τη μέθοδο HCSD

ΖΩΝΗ	PI (%)
1	99.654
2	99.586
3	99.797
4	99.861
5	99.752
Δίκτυο	99.662

όπου, PI ο δείκτης επίδοσης που αναφέρθηκε στην (1.3.3)

Η μέτρηση της τάσης των πιλοτικών ζυγών μπορεί να επιφέρει κάποιο σφάλμα. Επίσης σφάλμα στα δεδομένα μπορεί να εισαχθεί κατά την μεταφορά των μετρήσεων στον κεντρικό ελεγκτή της κάθε ζώνης. Για το λόγο αυτό εξετάζεται η ανθεκτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου διαχωρισμού και έλεγχου τάσης προς την εισαγωγή σφαλμάτων στις μετρήσεις των τάσεων των πιλοτικών ζυγών. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκε το πρόβλημα ελέγχου τάσης μέσω γραμμικού προγραμματισμού και για σφάλματα μέτρησης τάσης πιλοτικού ζυγού 2% και 4% .

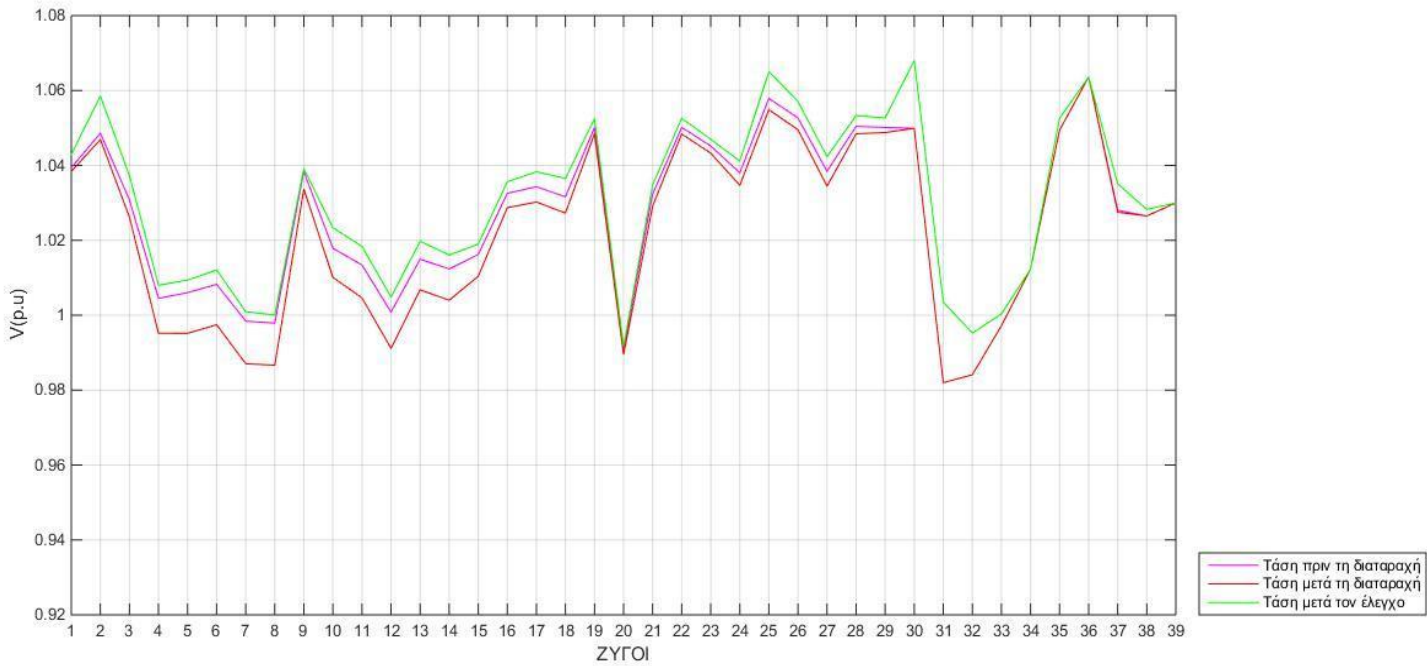
Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον έλεγχο τάσης σε όλο το δίκτυο καθώς και οι πίνακες της επίδοσης PI.

Έλεγχος τάσης στο συνολικό δίκτυο για σφάλμα μέτρησης 2%:

Ζυγοί φορτίου: 1-29

Γεννήτριες: 30-39

Πilotικοί ζυγοί: 3,6,19,22,29



Σχήμα 6.4.7: Έλεγχος τάσης σε όλες τις ζώνες του δικτύου με τη μέθοδο HCSD για σφάλμα μέτρησης 2%

Πίνακας 6.4.3: Πίνακας επίδοσης PI με τη μέθοδο HCSD για σφάλμα μέτρησης 2 %

ΖΩΝΗ	PI (%)
1	99.620
2	99.568
3	99.787
4	99.854
5	99.743
Δίκτυο	99.640

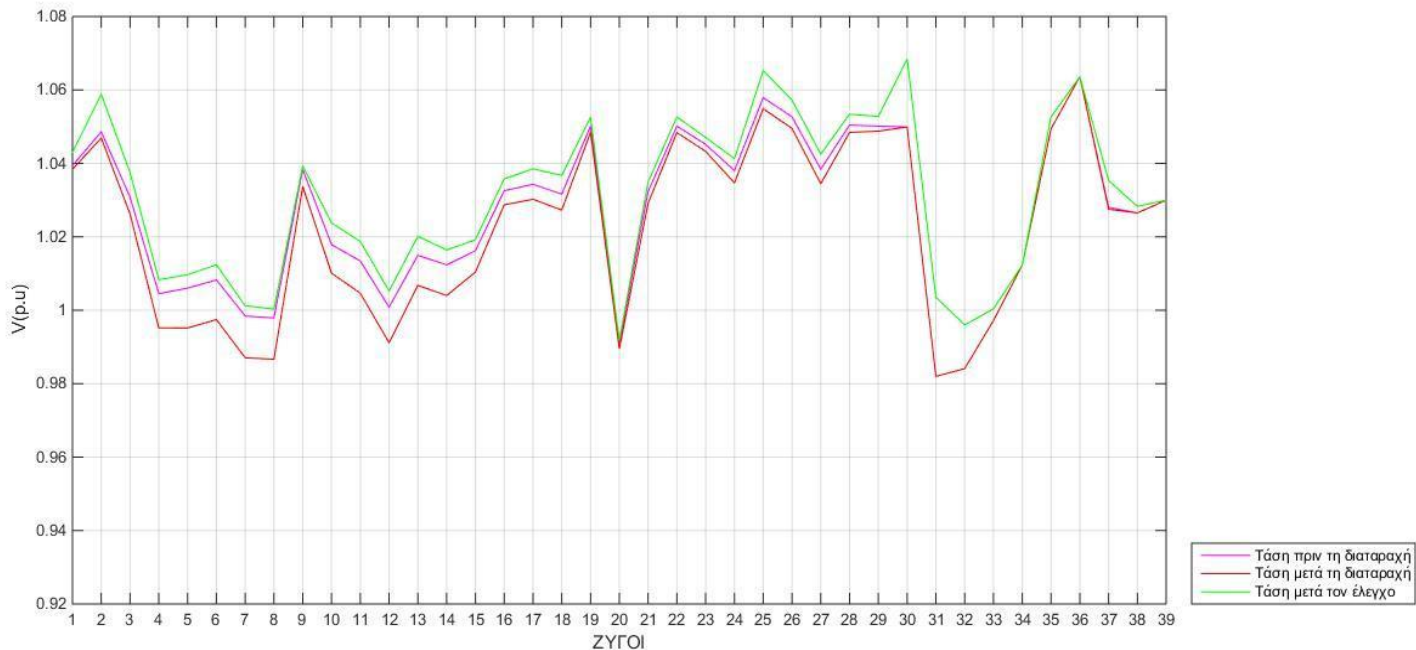
Όπως φαίνεται στον πίνακα 6.4.3 ο δείκτης PI τόσο σε κάθε ζώνη όσο και για το συνολικό δίκτυο έχει μειωθεί σε σχέση με τα αποτελέσματα χωρίς σφάλμα μέτρησης γεγονός που υποδηλώνει τη χειροτέρευση των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα στο συνολικό δίκτυο φαίνεται να μειώθηκε από 99.662 % σε 99.640 %.

Έλεγχος τάσης στο συνολικό δίκτυο για σφάλμα μέτρησης 4%:

Ζυγοί φορτίου: 1-29

Γεννήτριες: 30-39

Πilotικοί ζυγοί: 3,6,19,22,29



Σχήμα 6.4.8: Έλεγχος τάσης σε όλες τις ζώνες του δικτύου με τη μέθοδο HCSD για σφάλμα μέτρησης 4%

Πίνακας 6.4.4: Πίνακας επίδοσης PI με τη μέθοδο HCSD για σφάλμα μέτρησης 4 %

ΖΩΝΗ	PI (%)
1	99.587
2	99.549
3	99.777
4	99.847
5	99.733
Δίκτυο	99.619

Όπως και πριν, στον πίνακα 6.4.4 παρατηρείται ότι ο δείκτης PI μειώθηκε ακόμα περισσότερο τόσο σε κάθε ζώνη όσο και στο συνολικό δίκτυο γεγονός που δείχνει ακόμα μεγαλύτερη χειροτέρευση των αποτελεσμάτων.

Γ 6.5 Έλεγχος τάσης με τη μέθοδο διαχωρισμού φασματικής ομαδοποίησης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί για τη μέθοδο διαχωρισμού φασματικής ομαδοποίησης με τον αλγόριθμο kmedoids έχουν εξεταστεί δύο περιπτώσεις διαχωρισμού με δύο διαφορετικούς πίνακες βαρών. Συγκεκριμένα στη πρώτη περίπτωση ως πίνακα βαρών θεωρούμε τη ροή φαινόμενης ισχύος των ζυγών (πίνακας S) και στη δεύτερη περίπτωση το φανταστικό μέρος του πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου.

Γ 6.5.1 Έλεγχος τάσης με τη μέθοδο διαχωρισμού φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τη ροή φαινόμενης ισχύος S

Ο διαχωρισμός των ζωνών που προέκυψε με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τη ροή φαινόμενης ισχύος S είναι ο ακόλουθος:

Πίνακας 6.5.1.1: Διαχωρισμός του δικτύου με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τη ροή φαινόμενης ισχύος S

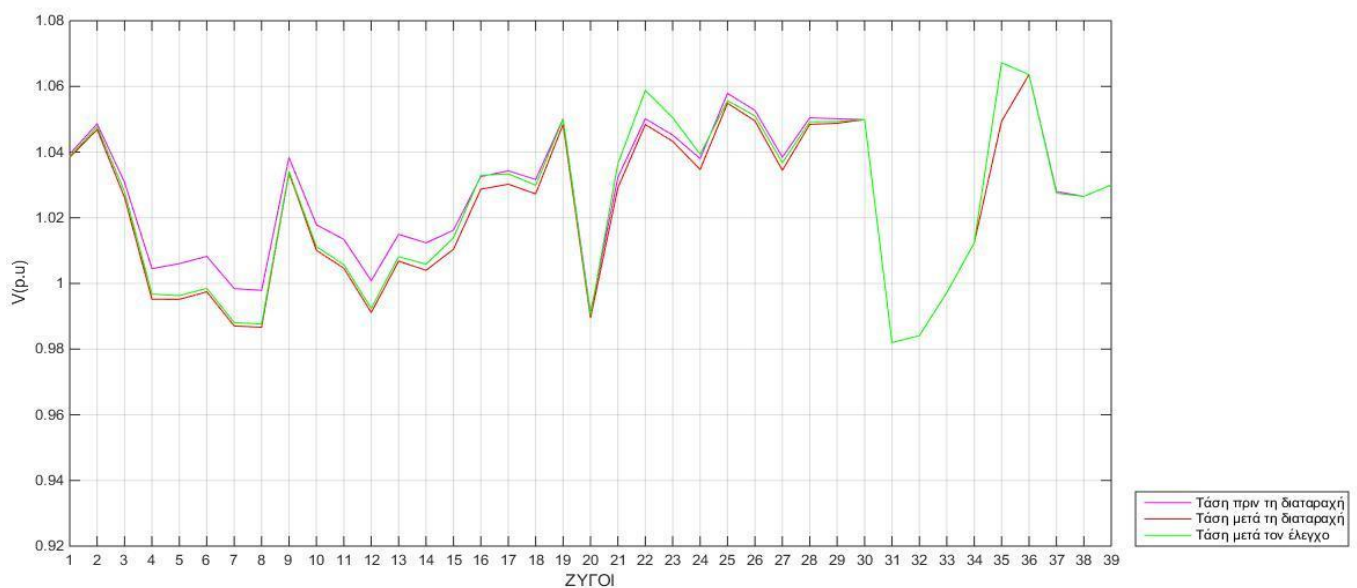
	ΖΩΝΕΣ			
	1	2	3	4
ΖΥΓΟΙ	15-24, 33,34,35,36	1,2,3,25, 30,37,39	26,27,28,29, 38	4-14, 31,32
Πιλοτικός ζυγός	16	2	29	6

Έλεγχος τάσης στη ζώνη 1:

Ζυγοί φορτίου: 15-24

Γεννήτριες: 33,34,35,36

Πιλοτικός ζυγός: 16



Σχήμα 6.5.1.1: Έλεγχος τάσης στη ζώνη 1 με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τη ροή φαινόμενης ισχύος S

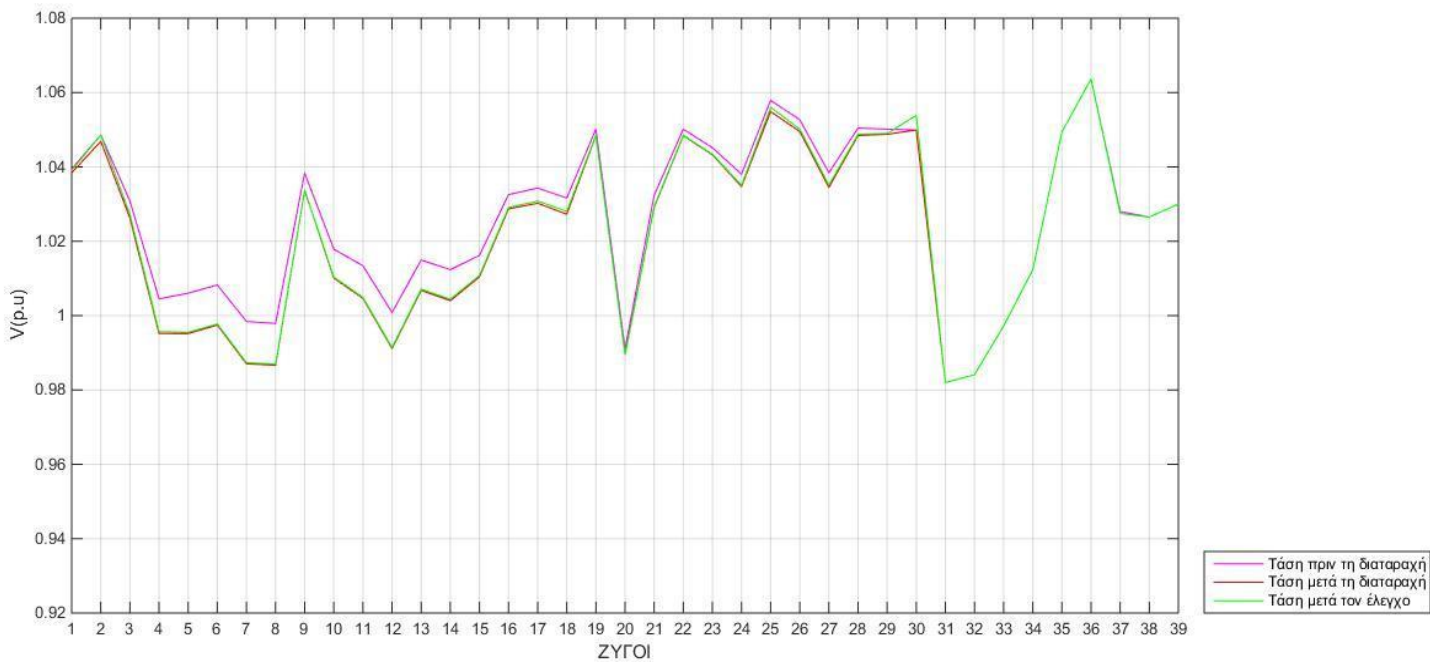
Στο σχήμα 6.5.1.1 φαίνεται ότι ο έλεγχος τάσης στον πιλοτικό ζυγό 16 μετά τη πτώση τάσης που προέκυψε λόγω της διαταραχής επαναφέρει τη τιμή της τάσης του ζυγού στην ακριβή τιμή τάσης που είχε πριν τη διαταραχή. Οι υπόλοιποι ζυγοί φορτίου της ζώνης (ζυγοί 15-24) ακολουθούν εξίσου καλή συμπεριφορά αφού όπως φαίνεται στο σχήμα μετά τον έλεγχο τάσης παίρνουν τιμές πολύ κοντά στις αρχικές τους. Ακόμη παρατηρείται ότι οι υπόλοιποι ζυγοί εκτός ζώνης επηρεάζονται ελάχιστα έως καθόλου γεγονός που υποδηλώνει πως η ομαδοποίηση της συγκεκριμένης ζώνης είναι επιτυχής.

Έλεγχος τάσης στη ζώνη 2:

Ζυγοί φορτίου: 1,2,3,25

Γεννήτριες: 30,37,39

Πιλοτικός ζυγός: 2



Σχήμα 6.5.1.2: Έλεγχος τάσης στη ζώνη 2 με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τη ροή φαινόμενης ισχύος S

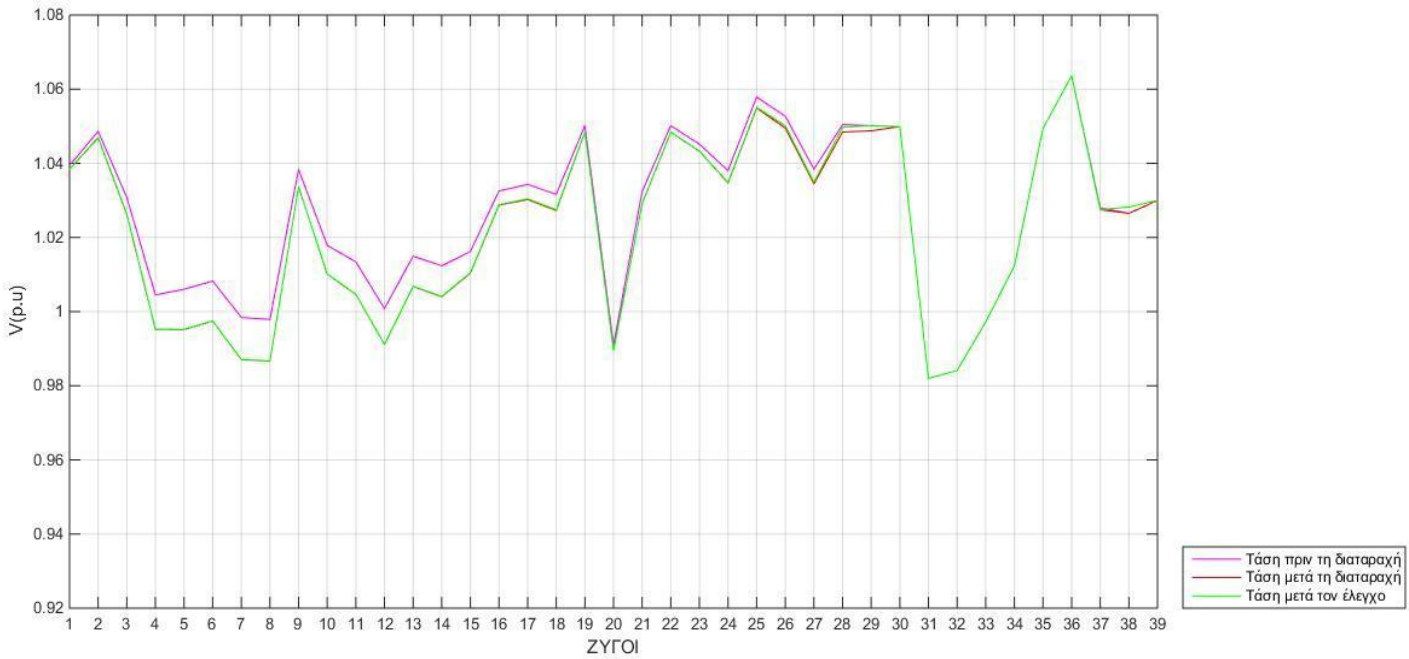
Στο σχήμα 6.5.1.2 φαίνεται ότι ο πιλοτικός ζυγός 2 μετά τον έλεγχο τάσης επανέρχεται στην αρχική τιμή του. Οι υπόλοιποι ζυγοί φορτίου που ανήκουν σε αυτή τη ζώνη παρουσιάζουν επίσης καλή συμπεριφορά αφού επαναφέρουν τη τιμή της τάσης πολύ κοντά στα αρχικά επίπεδα.

Έλεγχος τάσης στη ζώνη 3:

Ζυγοί φορτίου: 26,27,28,29

Γεννήτριες: 38

Πιλοτικός ζυγός: 29



Σχήμα 6.5.1.3: Έλεγχος τάσης στη ζώνη 3 με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τη ροή φαινόμενης ισχύος S

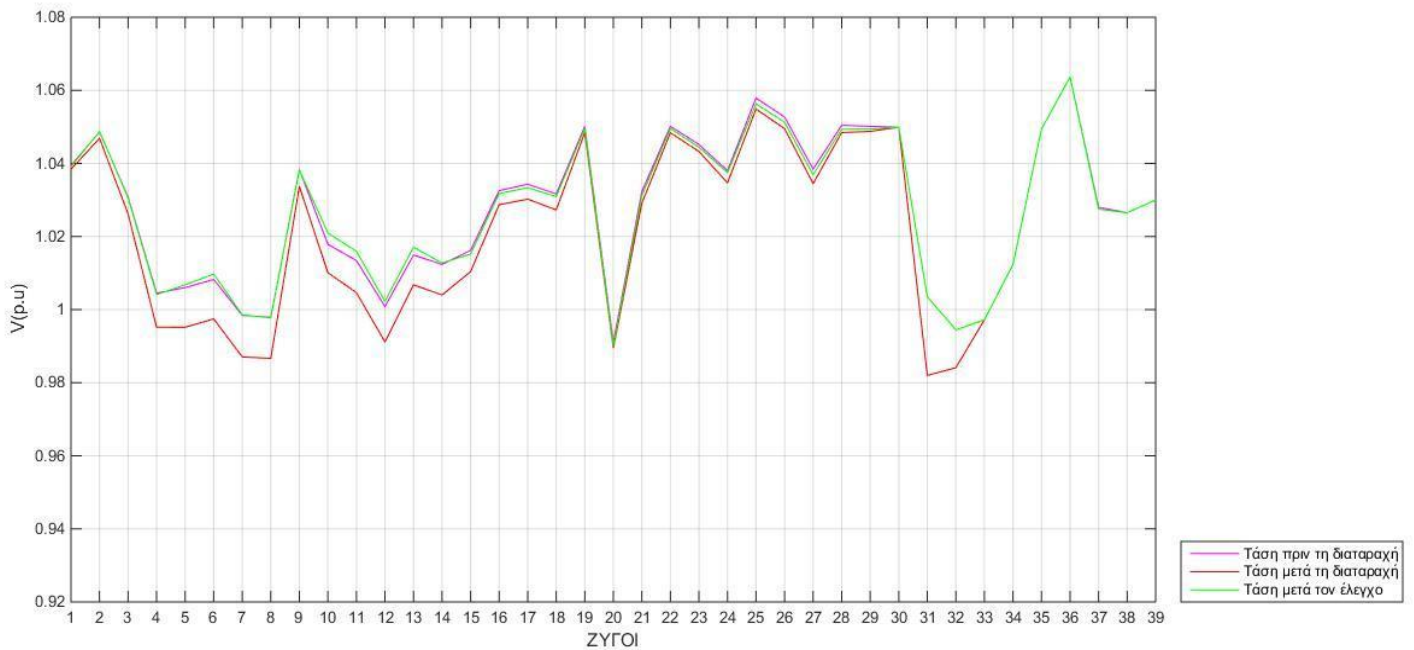
Στο σχήμα 6.5.1.3 φαίνεται ότι μετά τον έλεγχο τάσης ο πιλοτικός ζυγός 29 επαναφέρεται στην αρχική τιμή που είχε πριν από τη διαταραχή. Το ίδιο ισχύει και για τον ζυγό φορτίου 28 ενώ οι ζυγοί φορτίου 26 και 27 παραμένουν σχετικά αδρανείς μετά τον έλεγχο τάσης στη συγκεκριμένη ζώνη.

Έλεγχος τάσης στη ζώνη 4:

Ζυγοί φορτίου: 4-14

Γεννήτριες: 31,32

Πιλοτικός ζυγός: 6



Σχήμα 6.5.1.4: Έλεγχος τάσης στη ζώνη 4 με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τη ροή φαινόμενης ισχύος S

Στο σχήμα 6.5.1.4 φαίνεται ότι μετά τον έλεγχο τάσης στον πιλοτικό ζυγό (ζυγός 6) η τιμή της τάσης του επανέρχεται πολύ κοντά στη τιμή που είχε πριν από τη διαταραχή. Γενικότερα και οι υπόλοιποι ζυγοί φορτίου της συγκεκριμένης ζώνης (ζυγοί 4-14) παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά.

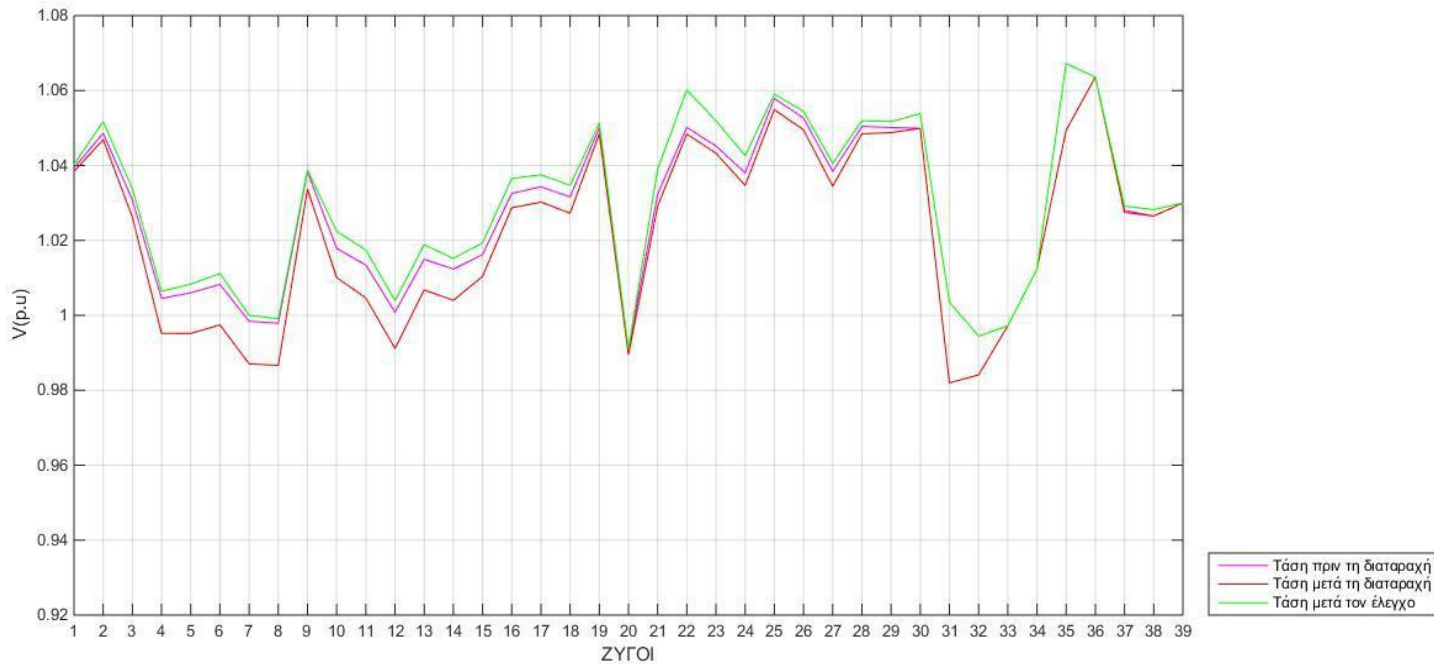
Οι παραπάνω έλεγχοι τάσης που έγιναν μεμονωμένα σε κάθε μία από τις 4 ζώνες ξεχωριστά, εφαρμόζονται ταυτόχρονα σε ολόκληρο το δίκτυο με σκοπό τη ρύθμιση τάσης μετά τη διαταραχή στο συνολικό δίκτυο. Ακολουθεί το διάγραμμα που προέκυψε από τον έλεγχο τάσης για το συνολικό δίκτυο.

Έλεγχος τάσης στο συνολικό δίκτυο:

Ζυγοί φορτίου: 1-29

Γεννήτριες: 30-39

Πιλοτικοί ζυγοί: 2,6,16,29



Σχήμα 6.5.1.5: Έλεγχος τάσης σε ολόκληρο το δίκτυο με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με είσοδο τον πίνακα φαινόμενης ισχύος S

Στο σχήμα 6.5.1.5 φαίνεται ότι οι πιλοτικοί ζυγοί κάθε ζώνης (ζυγοί 2,6,16 και 29) μετά τον έλεγχο έρχονται πολύ κοντά στις αρχικές τιμές τους πριν από τη διαταραχή. Γενικά στο συνολικό δίκτυο παρατηρείται επαναφορά στις τιμές τάσης όλων των ζυγών φορτίου μετά από τον έλεγχο. Συγκεκριμένα μετά τον έλεγχο παίρνουν τιμές λίγο μεγαλύτερες από τις αρχικές τους.

Τα παραπάνω αποτελέσματα της μεθόδου φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τη ροή φαινόμενης ισχύος S μέσω του αλγορίθμου k-medoids συνοψίζονται και παρουσιάζονται βάση της επίδοσης PI στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 6.5.1.2: Πίνακας επίδοσης PI με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης και πίνακα βαρών τον πίνακα ροής ισχύος S

ΖΩΝΗ	PI (%)
1	99.590
2	99.810
3	99.834
4	99.739
Δίκτυο	99.711

Για τη συγκεκριμένη μέθοδο διαχωρισμού εξετάστηκε το πρόβλημα ελέγχου τάσης μέσω γραμμικού προγραμματισμού και για σφάλματα μέτρησης 2% και 4% .

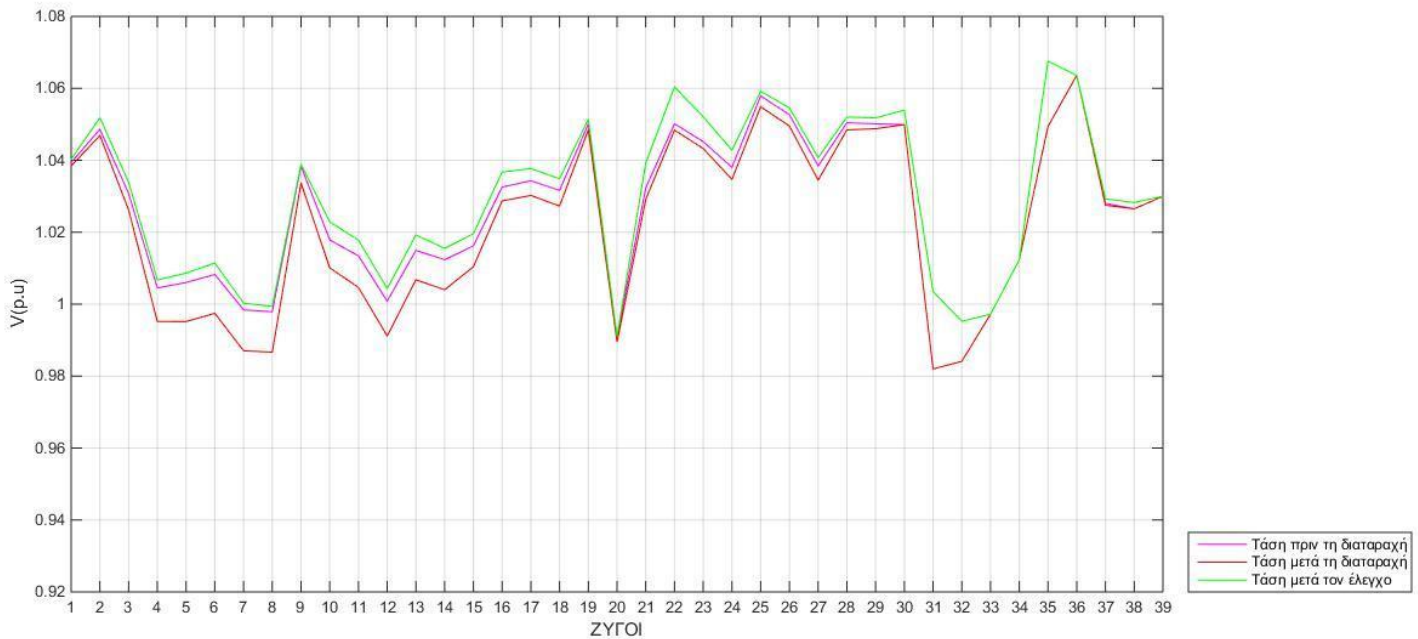
Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον έλεγχο τάσης σε όλο το δίκτυο καθώς και οι πίνακες της επίδοσης PI.

Έλεγχος τάσης στο συνολικό δίκτυο με σφάλμα μέτρησης 2 %:

Ζυγοί φορτίου: 1-29

Γεννήτριες: 30-39

Πilotικοί ζυγοί: 2,6,16,29



Σχήμα 6.5.1.6: Έλεγχος τάσης στο συνολικό δίκτυο με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τον πίνακα της ροή φαινόμενης ισχύος S και σφάλμα μέτρησης +2%

Πίνακας 6.5.1.3: Πίνακας επίδοσης PI με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης και πίνακα βαρών τον πίνακα ροής ισχύος S και σφάλμα μέτρησης 2 %

ΖΩΝΗ	PI (%)
1	99.573
2	99.798
3	99.823
4	99.709
Δίκτυο	99.690

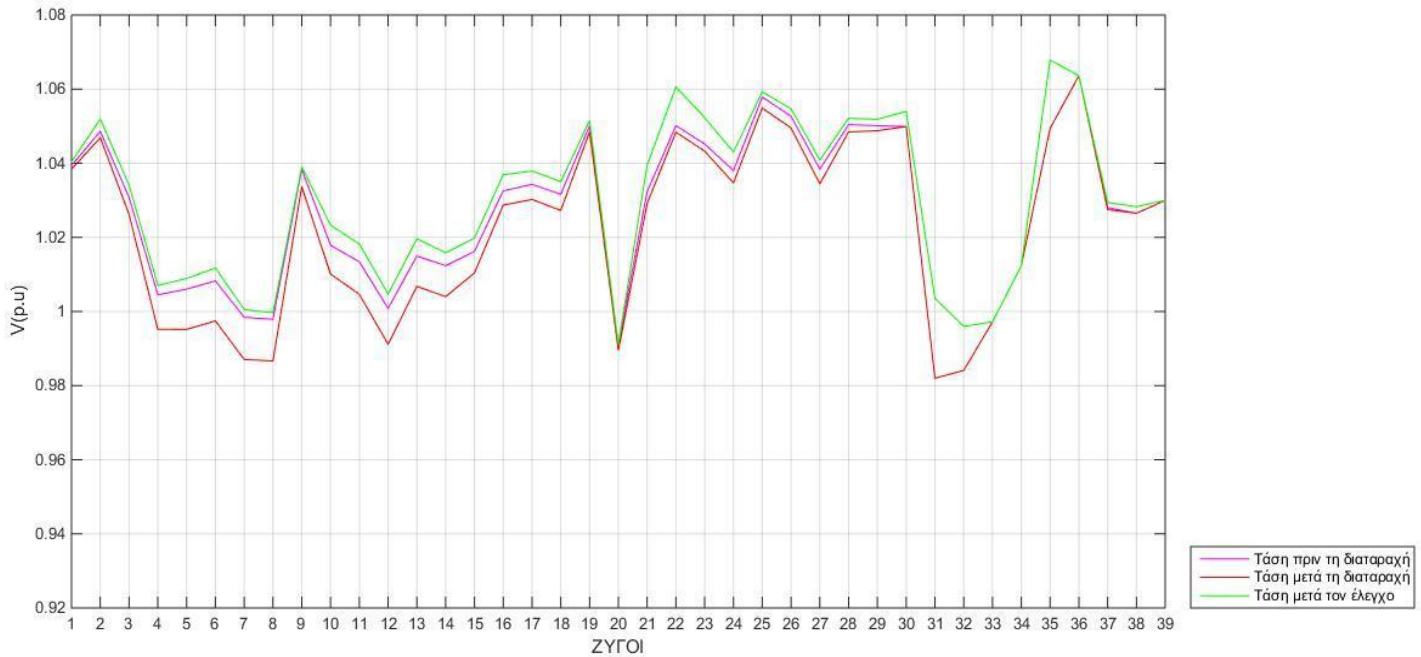
Όπως φαίνεται στον πίνακα 6.5.1.3 ο δείκτης PI τόσο σε κάθε ζώνη όσο και για το συνολικό δίκτυο έχει μειωθεί σε σχέση με τα αποτελέσματα χωρίς σφάλμα μέτρησης, όπως συνέβηκε και με τη μέθοδο διαχωρισμού ιεραρχικής ομαδοποίησης ενιαίας απόστασης (HCSD).

Έλεγχος τάσης στο συνολικό δίκτυο με σφάλμα μέτρησης 4 %:

Ζυγοί φορτίου: 1-29

Γεννήτριες: 30-39

Πilotικοί ζυγοί: 2,6,16,29



Σχήμα 6.5.1.7: Έλεγχος τάσης στο συνολικό δίκτυο με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τον πίνακα της ροή φαινόμενης ισχύος S και σφάλμα μέτρησης +4%

Πίνακας 6.5.1.4: Πίνακας επίδοσης PI με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης και πίνακα βαρών τον πίνακα ροής ισχύος S και σφάλμα μέτρησης 4 %

ΖΩΝΗ	PI (%)
1	99.556
2	99.786
3	99.813
4	99.679
Δίκτυο	99.670

Όπως φαίνεται στον πίνακα 6.5.1.4 ο δείκτης PI μειώθηκε ακόμη περισσότερο τόσο σε κάθε ζώνη όσο και στο συνολικό δίκτυο.

Ακολουθούν τα διαγράμματα που προέκυψαν από την επίλυση του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού για τη δεύτερη περίπτωση που εξετάστηκε η μέθοδος διαχωρισμού φασματικής ομαδοποίησης όπου ως πίνακας βαρών τέθηκε το φανταστικό μέρος του πίνακα αγωγιμοτήτων των ζυγών όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Γ 6.5.2 Έλεγχος τάσης με τη μέθοδο διαχωρισμού φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών το φανταστικό μέρος του πίνακα αγωγιμοτήτων.

Ο διαχωρισμός των ζωνών που προέκυψε με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με τον αλγόριθμο k-medoids με πίνακα βαρών το φανταστικό μέρος της αγωγιμότητας μεταξύ των ζυγών είναι ο ακόλουθος:

Πίνακας 6.5.2.1: Διαχωρισμός ζωνών μέσω φασματικής ομαδοποίησης με τον αλγόριθμο k-medoids με πίνακα βαρών το φανταστικό μέρος της αγωγιμότητας των ζυγών.

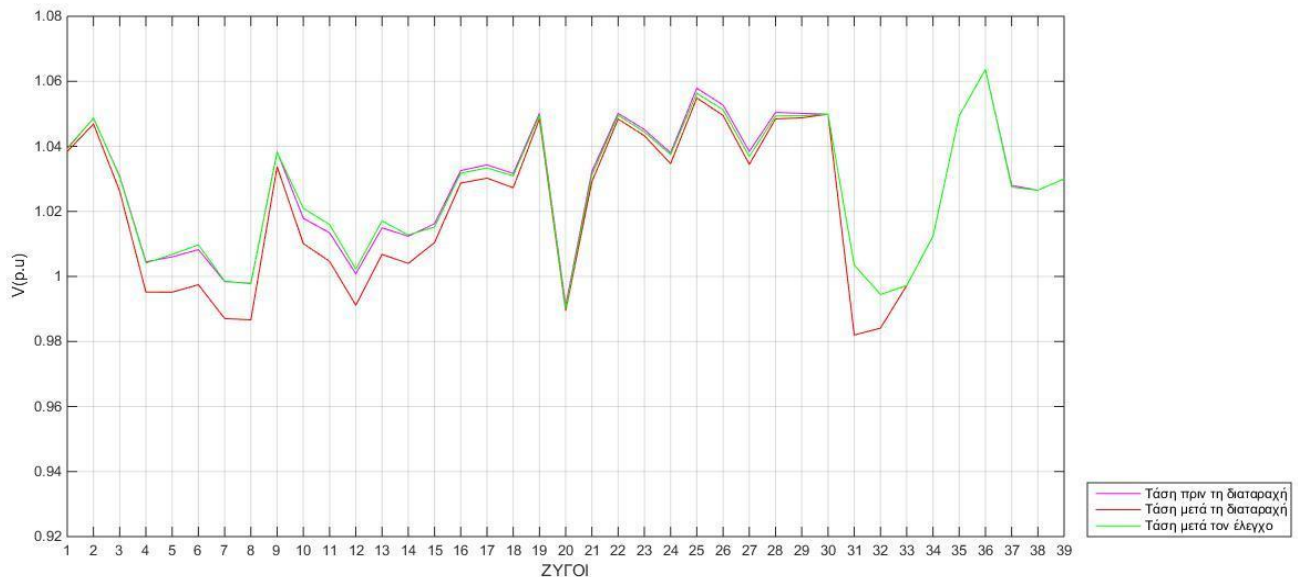
	ΖΩΝΕΣ			
	1	2	3	4
ΖΥΓΟΙ	4-14, 31,32	19,20, 33,34	1,2,3,17,18, 25-30, 37,38,39	15,16,21-24, 35,36
Πιλοτικός ζυγός	6	20	2	22

Έλεγχος τάσης στη ζώνη 1:

Ζυγοί φορτίου: 4-14

Γεννήτριες: 31,32

Πιλοτικός ζυγός: 6



Σχήμα 6.5.2.1: Έλεγχος τάσης στη ζώνη 1 με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τον $W = \text{imag}(Y_{\text{bus}})$

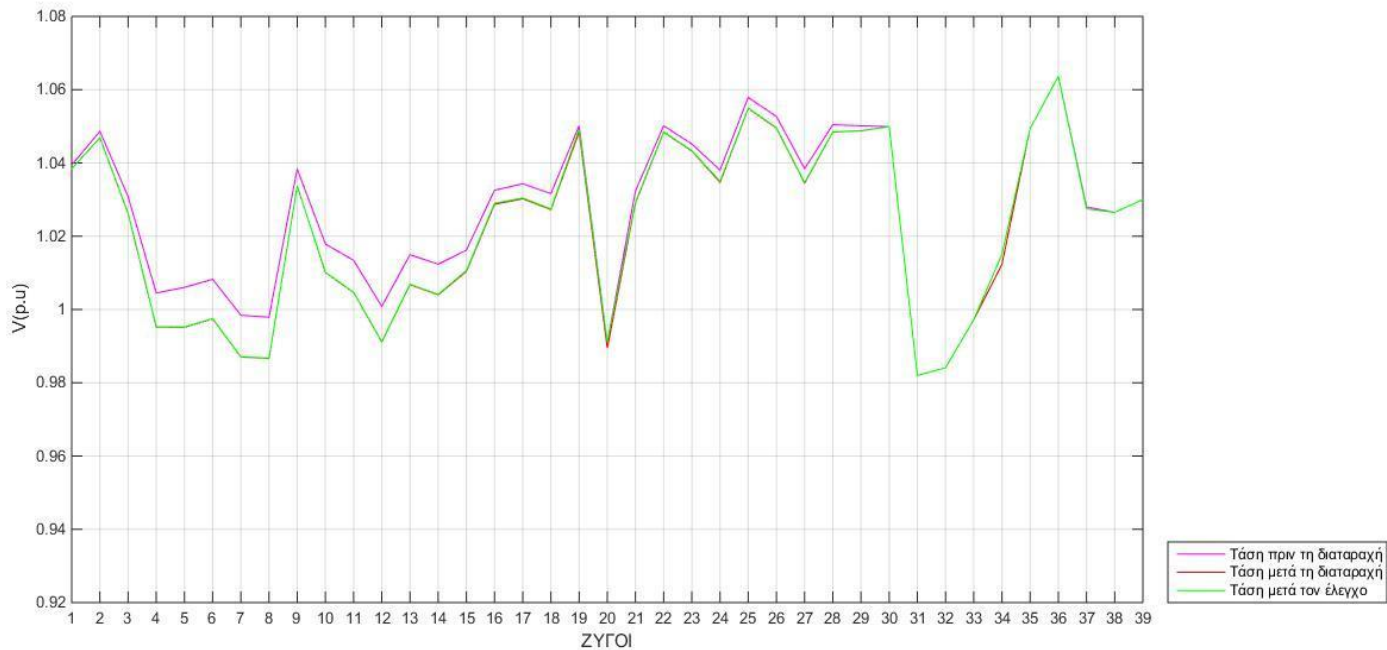
Στο σχήμα 6.5.2.1 φαίνεται ότι στην συγκεκριμένη ζώνη ειδικά στους ζυγούς 4-14 παρατηρείται μεγάλη πτώση τάσης. Ο έλεγχος τάσης επαναφέρει τη τάση στον πιλοτικό ζυγό (ζυγός 6) και γενικά στους υπόλοιπους ζυγούς της ζώνης αυτής πολύ κοντά στις αρχικές τιμές τους.

Έλεγχος τάσης στη ζώνη 2:

Ζυγοί φορτίου: 19,20

Γεννήτριες: 33,34

Πιλοτικός ζυγός: 20



Σχήμα 6.5.2.2: Έλεγχος τάσης στη ζώνη 2 με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τον πίνακα $W=\text{imag}(Y_{\text{bus}})$

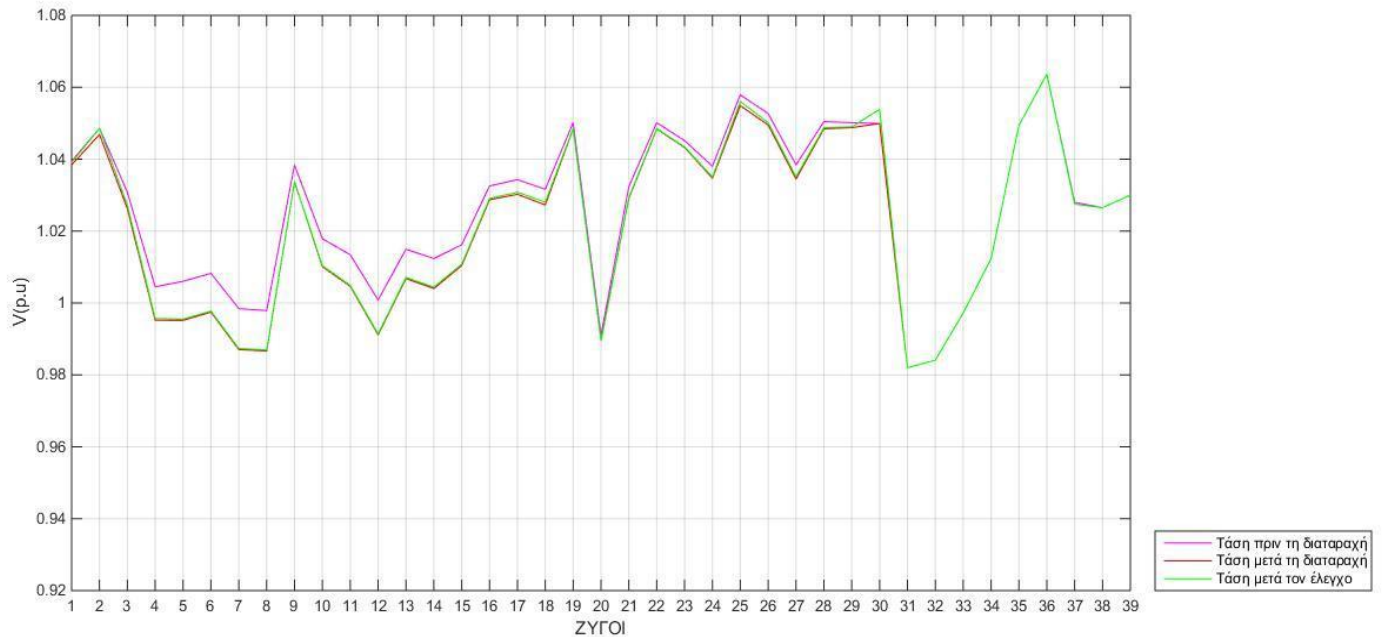
Στο σχήμα (6.5.2.2) φαίνεται ότι ο έλεγχος και σε αυτή τη ζώνη είναι επιτυχής αφού ο πιλοτικός ζυγός (ζυγός 20) αλλά και ο ζυγός 19 ταυτίζονται με τις τιμές τάσης που είχαν πριν από τη διαταραχή. Ακόμη παρατηρείται ότι οι υπόλοιποι ζυγοί του δικτύου εκτός της συγκεκριμένης ζώνης παραμένουν αδρανείς γεγονός που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη ζώνη επιτυχής από πλευράς ομαδοποίησης.

Έλεγχος τάσης στη ζώνη 3:

Ζυγοί φορτίου: 1,2,3,17,18,25-29

Γεννήτριες: 30,37,38,39

Πιλοτικός ζυγός: 2



Σχήμα 6.5.2.3: Έλεγχος τάσης στη ζώνη 3 με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τον πίνακα $W = \text{imag}(Y_{\text{bus}})$

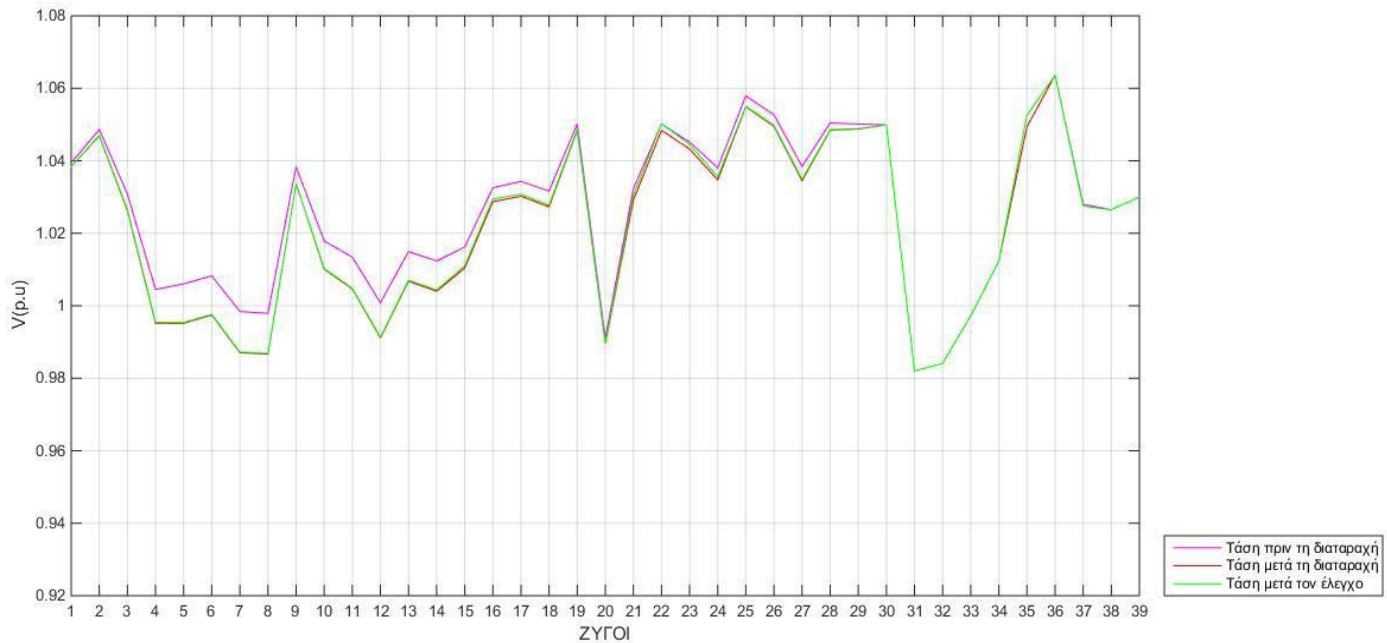
Στο σχήμα 6.5.2.3 φαίνεται ότι ο πιλοτικός ζυγός της ζώνης (ζυγός 2) επαναφέρει την τιμή της τάσης του στα αρχικά επίπεδα που είχε πριν τη διαταραχή. Οι υπόλοιποι ζυγοί φορτίου της ζώνης παρουσιάζουν επίσης καλή συμπεριφορά με εξαίρεση τους ζυγούς 17 και 18 που παρουσιάζουν ελάχιστη βελτίωση.

Έλεγχος τάσης στη ζώνη 4:

Ζυγοί φορτίου: 15,16,21-24

Γεννήτριες: 35,36

Πιλοτικός ζυγός: 22



Σχήμα 6.5.2.4: Έλεγχος τάσης στη ζώνη 4 με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τον πίνακα $W = \text{imag}(Y_{\text{bus}})$

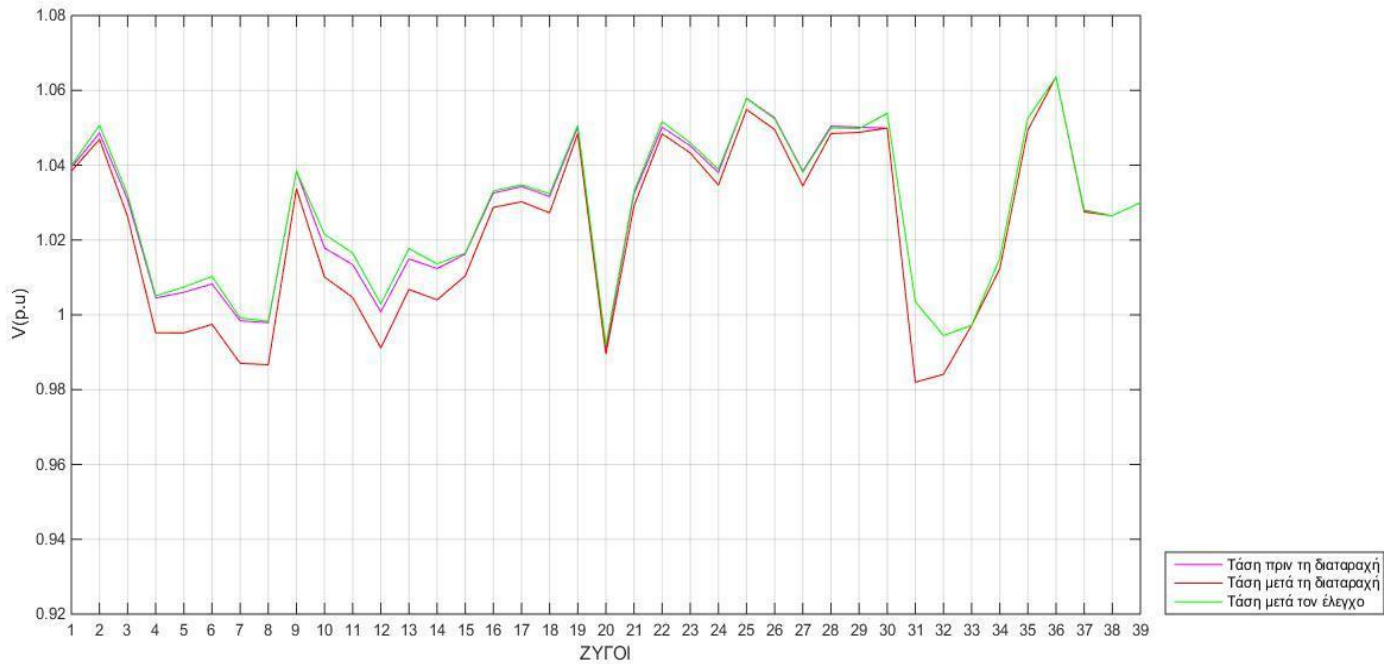
Στο σχήμα 6.5.2.4 φαίνεται ότι μετά τον έλεγχο ο πιλοτικός ζυγός της ζώνης (ζυγός 22) επαναφέρει την τιμή της τάσης του αν και είχε μικρή πτώση τάσης μετά τη διαταραχή. Το ίδιο ισχύει και για τους υπόλοιπους ζυγούς της ζώνης με εξαίρεση τους ζυγούς 15 και 16 που παρουσίασαν λιγότερη βελτίωση.

Έλεγχος τάσης στο συνολικό δίκτυο:

Ζυγοί φορτίου: 1-29

Γεννήτριες: 30-39

Πιλοτικοί ζυγοί: 2,6,20,22



Σχήμα 6.5.2.5: Έλεγχος τάσης σε όλες τις ζώνες με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τον πίνακα $W = \text{imag}(Y_{\text{bus}})$

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5.2.5 οι πιλοτικοί ζυγοί κάθε ζώνης (ζυγοί 2,6,20 και 22) μετά τον έλεγχο επαναφέρουν πλήρως τη τιμή τους στα αρχικά επίπεδα τάσης που είχαν πριν από τη διαταραχή. Γενικά στο συνολικό δίκτυο παρατηρείται επαναφορά στις τιμές τάσης όλων των ζυγών φορτίου μετά από τον έλεγχο. Συγκεκριμένα μετά τον έλεγχο παίρνουν τιμές λίγο μεγαλύτερες ή και ακριβώς όπως στις αρχικές τους.

Τα παραπάνω αποτελέσματα της μεθόδου φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τον πίνακα $W=imag(Y_{bus})$ συνοψίζονται και παρουσιάζονται βάση της επίδοσης PI στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 6.5.2.2: Πίνακας επίδοσης PI με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης και πίνακα βαρών τον πίνακα $W=imag(Y_{bus})$

ΖΩΝΗ	PI (%)
1	99.838
2	99.929
3	99.938
4	99.926
Δίκτυο	99.897

Για τη συγκεκριμένη μέθοδο διαχωρισμού εξετάστηκε το πρόβλημα ελέγχου τάσης μέσω γραμμικού προγραμματισμού και για σφάλματα μέτρησης 2% και 4% .

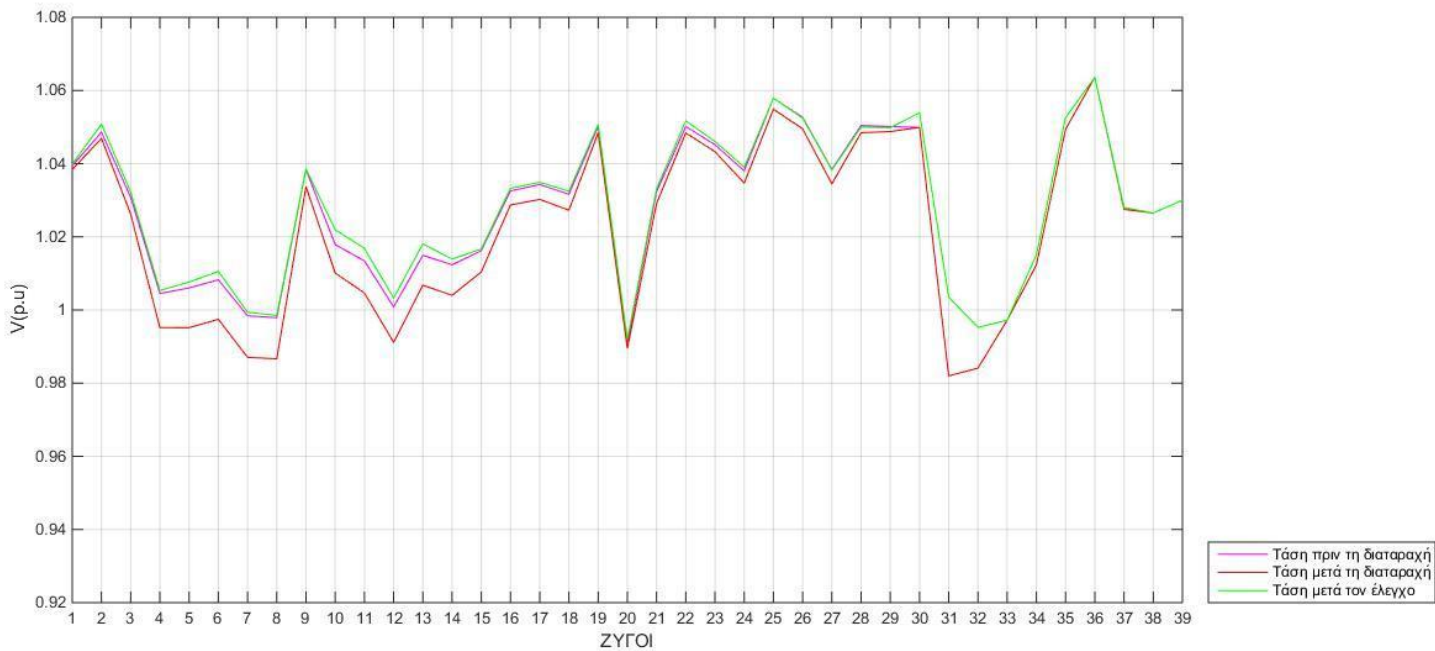
Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον έλεγχο τάσης σε όλο το δίκτυο καθώς και οι πίνακες της επίδοσης PI.

Έλεγχος τάσης στο συνολικό δίκτυο με σφάλμα μέτρησης 2 %:

Ζυγοί φορτίου: 1-29

Γεννήτριες: 30-39

Πιλοτικοί ζυγοί: 2,6,20,22



Σχήμα 6.5.2.6: Έλεγχος τάσης σε όλες τις ζώνες με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τον πίνακα $W=\text{imag}(Y_{\text{bus}})$ και σφάλμα μέτρησης 2 %

Πίνακας 6.5.2.3: Πίνακας επίδοσης PI με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης και πίνακα βαρών τον πίνακα $W=\text{imag}(Y_{\text{bus}})$ με σφάλμα μέτρησης 2 %

ΖΩΝΗ	PI (%)
1	99.810
2	99.924
3	99.936
4	99.915
Δίκτυο	99.883

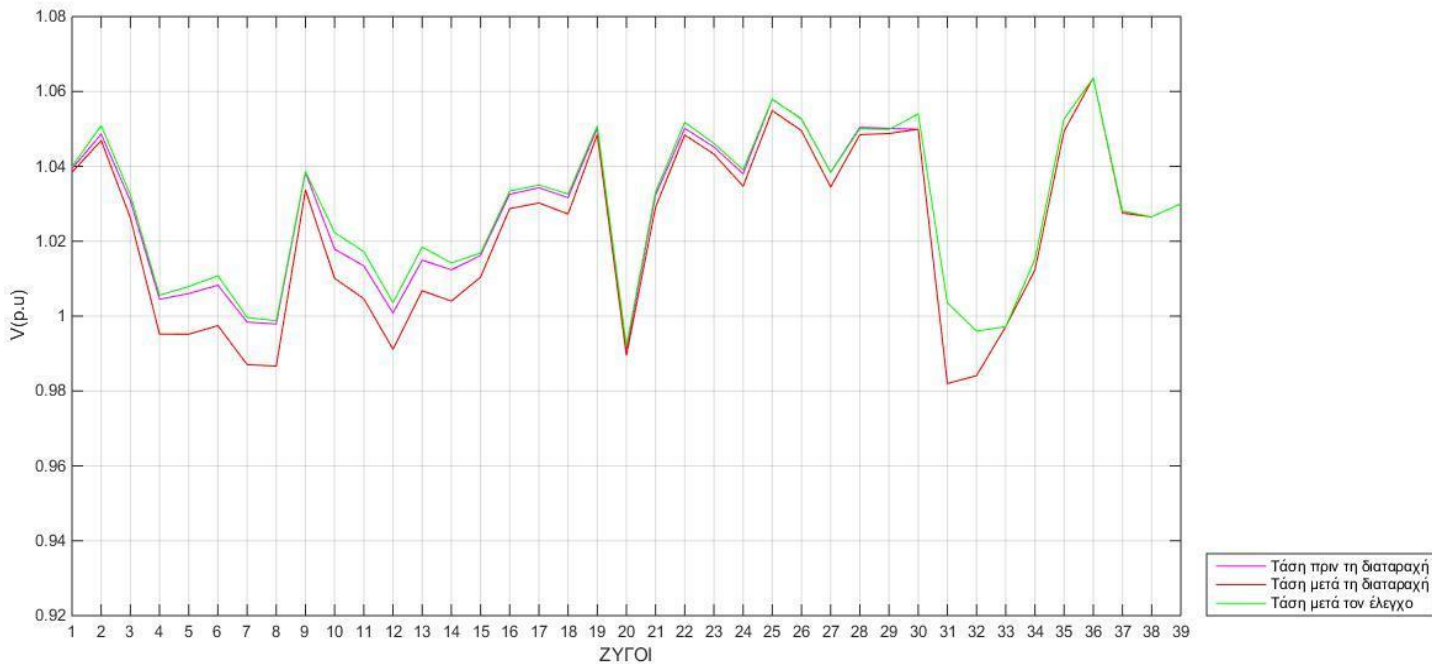
Όπως παρατηρείται στον πίνακα 6.5.2.3 ο δείκτης PI μειώθηκε τόσο σε κάθε ζώνη όσο και στο συνολικό δίκτυο σε σύγκριση με τα αποτελέσματα χωρίς σφάλμα μέτρησης γεγονός που δείχνει ότι με την εισαγωγή σφάλματος τα αποτελέσματα χειροτερεύουν. Συγκεκριμένα στο συνολικό δίκτυο αυξήθηκε από 99.897 % σε 99.883 %.

Έλεγχος τάσης στο συνολικό δίκτυο με σφάλμα μέτρησης 4 %:

Ζυγοί φορτίου: 1-29

Γεννήτριες: 30-39

Πιλοτικοί ζυγοί: 2,6,20,22



Σχήμα 6.5.2.7: Έλεγχος τάσης σε όλες τις ζώνες με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τον πίνακα $W=\text{imag}(Y_{\text{bus}})$ και σφάλμα μέτρησης 4 %

Πίνακας 6.5.2.4: Πίνακας επίδοσης PI με τη μέθοδο φασματικής ομαδοποίησης και πίνακα βαρών τον πίνακα $W=\text{imag}(Y_{\text{bus}})$ με σφάλμα μέτρησης 4 %

ΖΩΝΗ	PI (%)
1	99.782
2	99.918
3	99.933
4	99.904
Δίκτυο	99.869

Ομοίως με πριν, όπως παρατηρείται στον πίνακα 6.5.2.4 ο δείκτης PI μειώθηκε ακόμα περισσότερο τόσο σε κάθε ζώνη όσο και στο συνολικό δίκτυο με σφάλμα μέτρησης 4%.

Κεφάλαιο 7^ο – Σύγκριση μεθόδων διαχωρισμού και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Γ 7.1 Σύγκριση μεθόδων διαχωρισμού

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναπτύχθηκαν οι μέθοδοι διαχωρισμού ιεραρχικής ομαδοποίησης ενιαίας απόστασης (HCSD) και φασματικής ομαδοποίησης (Spectral k-way Clustering). Η φασματική ομαδοποίηση εξετάστηκε για δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη ως πίνακας βαρών στον αλγόριθμο χρησιμοποιήθηκε η ροή φαινόμενης ισχύος (πίνακας S) και στη δεύτερη περίπτωση το φανταστικό μέρος του πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου. Ακολούθως, έγινε η επιλογή του πιλοτικού ζυγού κάθε ζώνης ως το «ηλεκτρικό κέντρο» της ζώνης μέσω της εξίσωσης 2.2.1. Μετά τον διαχωρισμό του δικτύου εφαρμόζεται έλεγχος τάσης σε κάθε ζώνη ανεξάρτητα, μετά την εμφάνιση διαταραχής. Ο διαχωρισμός και ο έλεγχος τάσης κάθε ζώνης με τη χρήση γραμμικού προγραμματισμού έγιναν στο πρότυπο δίκτυο των 39 ζυγών της IEEE.

Μετά την εφαρμογή διαταραχής στο δίκτυο, αυξάνοντας την ενεργό και άεργο ισχύ στους ζυγούς, επιλύθηκε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού με σκοπό να επανέλθει η τάση του πιλοτικού ζυγού και κατ' επέκταση οι τάσεις των υπολοίπων ζυγών φορτίου σε κάθε ζώνη κοντά στα αρχικά επίπεδα τιμών που είχαν πριν από τη διαταραχή. Ο έλεγχος τάσης μέσω γραμμικού προγραμματισμού στηρίχθηκε στην ρύθμιση της τάσης των γεννητριών του δικτύου μεταφοράς που εξετάζεται.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μεθόδων διαχωρισμού που έχουν αναφερθεί, η μέθοδος ιεραρχικής ομαδοποίησης ενιαίας απόστασης (HCSD) όπως παρουσιάστηκε στις προηγούμενες υπο-ενότητες επέδειξε πολύ καλή συμπεριφορά μετά τον έλεγχο τάσης και σε κάθε ζώνη ξεχωριστά όπως επίσης και στο συνολικό δίκτυο, γεγονός που υποδηλώνει ότι τόσο η επιλογή των πιλοτικών ζυγών όσο και ο διαχωρισμός των ζωνών ήταν κατάλληλος. Αντίστοιχα, η μέθοδος φασματικής ομαδοποίησης Spectral k-way Clustering με πίνακα βαρών τον πίνακα ροής φαινόμενης ισχύος S ή το φανταστικό μέρος του πίνακα αγωγιμοτήτων επέδειξε επίσης πολύ καλή συμπεριφορά στο συνολικό δίκτυο και σε κάθε ζώνη ξεχωριστά.

Συνοψίζοντας, βάση των παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψιν τις τιμές του δείκτη PI ο οποίος φανεώνει την επίδοση της κάθε μεθόδου όπως παρουσιάστηκαν στους παραπάνω πίνακες, η μέθοδος φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών το φανταστικό μέρος του πίνακα αγωγιμοτήτων επέδειξε τα καλύτερα αποτελέσματα και σε κάθε ζώνη μεμονωμένα αλλά και στο συνολικό δίκτυο, καταλήγοντας στο συμπέρασμα πως έκανε την καλύτερη ομαδοποίηση του δικτύου που εξετάστηκε. Αμέσως επόμενη καλύτερη μέθοδος διαχωρισμού από ποιότητας αποτελεσμάτων υπήρξε η μέθοδος φασματικής ομαδοποίησης με πίνακα βαρών τον πίνακα ροής φαινόμενης ισχύος S. Τελευταία φαίνεται να είναι η μέθοδος ιεραρχικής ομαδοποίησης ενιαίας απόστασης (HCSD).

Γ 7.2 Συμπεράσματα

Στην διπλωματική αυτή εργασία, που στόχο είχε την επίτευξη ενός αποτελεσματικού αποκεντρωμένου ελέγχου τάσης, εφαρμόστηκαν διάφοροι μέθοδοι ομαδοποίησης δεδομένων προκειμένου να διαχωριστεί το δίκτυο σε ζώνες, οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα του 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 σκοπός του αλγόριθμου αυτού ήταν η ρύθμιση των τάσεων των ζυγών με τη μικρότερη δυνατή μεταβολή στις τάσεις των γεννητριών.

Τέλος, μετά την εφαρμογή διαταραχής στο δίκτυο (αύξηση φορτίων) και την πραγματοποίηση ελέγχου με τη χρήση του αλγορίθμου αποκεντρωμένου ελέγχου, διαπιστώθηκε η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής καθώς επιτεύχθηκε επιτυχής έλεγχος των τάσεων όλων των ζυγών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Αθήνα 2010
- [2] J. Y.Wen, Q. H. Wu, D. R. Turner, S. J. Cheng, and J. Fitch, “Optimal coordinated voltage control for power system voltage stability,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 2, pp. 1115–1122, May 2004.
- [3] C. Taylor, D. C. Erickson, K. Martin, R.Wilson, and V. Venkatasubramanian, “WACS-wide-area stability and voltage control system: R&D and online demonstration,” Proc. IEEE, Special Issue on Energy Infrastructure Defense System, vol. 93, no. 5, p. 892, 906, May 2005.
- [4] Coordinated Voltage Control in Transmission Networks, CIGRE Task Force, 2007, C4.602.
- [5] M. Ilic-Spong, J. Christensen, and K. L. Eichorn, “Secondary voltage control using pilot point information,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 3, no. 2, pp. 660–668, May 1988.
- [6] V. Alimisis, C. Piacentini, J. King, and P. C. Taylor, “Operation and control zones for future complex power systems,” in Proc. IEEE Green Technologies Conf., Denver, CO, USA, 2013.
- [7] F. Li, W.Qiao,H. Sun,H.Wan, J.Wang, Y. Xia, Z.Xu, and P. Zhang, “Smart transmission grid: Vision and framework,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 2, pp. 168–177, 2010.
- [8] R. Marconato, Electric Power Systems. Milan, Italy: CEI, 2004.
- [9] S. Corsi, M. Pozzi, C. Sabelli, and A. Serrani, “The coordinated automatic voltage control of the Italian transmission grid – Part I: Reasons of the choice and overview of the consolidated hierarchical system,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 4, pp. 1723–1732, Nov. 2004.
- [10] H. Lefebvre,D. Fragnier, J.Y. Boussion, P. Mallet, andM. Bulot, “Secondary coordinated voltage control system: Feedback of EDF,” in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, Seattle, WA, USA, 2000.
- [11] Varvara Alimisis and Philip C. Taylor, “Zoning Evaluation for Improved Coordinated Automatic Voltage Control”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 5, September 2015.
- [12] “Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες και αποκεντρωμένος έλεγχος σε περίπτωση διαταραχών”, Διπλωματική εργασία, Βλαχοκυριάκου Α. Όλγα, Ε.Μ.Π, Σεπτέμβριος 2014.
- [13]<http://nlp.stanford.edu/IR-book/html/htmledition/single-link-and-complete-link-clustering-1.html>
- [14] “Μελέτη αλγορίθμου Ομαδοποίησης k-means σε δεδομένα παγκόσμιου ιστού” Διπλωματική εργασία, Ακακιάδου Γεωργία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σεπτέμβριος 2007
- [15] Keijo Ruohonen, (Translation by Janne Tamminen, Kung-Chung Lee and Robert Piché) “Graph Theory”, 2013.
- [16] Ulrike von Luxburg, “A Tutorial on Spectral Clustering”, Max Planck Institute for Biological Cybernetics, 2007.

[17] “Φασματικές Μέθοδοι Ανάκτησης Πληροφορίας, Εργαλεία Λογισμικού και Εφαρμογές”, Δημήτριος Ζεϊμπέκης, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πατρών.

[18] <http://www.stat.cmu.edu/~ryantibs/datamining/lectures/04-clus1-marked.pdf>

[19] Μ. Σαμουηλίδης, Κ. Βλάχος, Γ. Ψαρράς, “Βοηθήματα για το μάθημα Συστήματα Αποφάσεων”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Ακαδ. Έτος 1986-87.

[20] “Διαχωρισμός του δικτύου διανομής σε ζώνες και αποκεντρωμένος έλεγχος τάσης”, Διπλωματική εργασία, Νικόλαος Κ. Περιβολιώτης, Ε.Μ.Π, Ιούλιος 2015.

[21] <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/example-linear-programming.html>