



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

Μέθοδος Ελεγχόμενης Νησιδοποίησης για την Αποφυγή Κατάρρευσης του Συστήματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Κ. Δημητρόπουλος

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2015



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

Μέθοδος Ελεγχόμενης Νησιδοποίησης για την Αποφυγή Κατάρρευσης του Συστήματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Κ. Δημητρόπουλος

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2015.

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Σ. Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Π. Γεωργιλάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....
Δημήτριος Κ. Δημητρόπουλος
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Δημήτριος Κ. Δημητρόπουλος, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν στην περάτωσή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα διπλωματικής εργασίας, το οποίο διεύρυνε τις γνώσεις μου πάνω στο αντικείμενο του ηλεκτρολόγου μηχανικού.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Τράκα για την άψογη συνεργασία που είχαμε, τη συνεχή καθοδήγησή του και την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε, χάρη στα οποία κατάφερα και ολοκλήρωσα την εργασία αυτή.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, στους φίλους μου και στη σύντροφό μου Δέσποινα, που έχουν σταθεί δίπλα μου σε όλα τα χρόνια της φοιτητικής μου πορείας στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Αθήνα, Ιούλιος 2015
Δημήτριος Κ. Δημητρόπουλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη μεθόδων ελεγχόμενης νησιδοποίησης ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό να αποφευχθεί η κατάρρευση του. Όταν συμβεί μια διαταραχή σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, εφαρμόζονται έλεγχοι ώστε το σύστημα να οδηγηθεί σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας όπου ικανοποιούνται οι περιορισμοί. Αν οι έλεγχοι αποτύχουν, τα συστήματα προστασίας ενεργοποιούνται ώστε να προστατέψουν τα στοιχεία του συστήματος από ανεπανόρθωτες βλάβες. Κάτι τέτοιο μπορεί να χωρίσει το σύστημα σε ασταθείς νησίδες ή σε νησίδες που αδυνατούν να ικανοποιήσουν ένα μεγάλο ποσοστό της ζήτησης, και λόγω αλληπάλληλων διακοπών το δίκτυο οδηγείται σε κατάρρευση.

Η ελεγχόμενη νησιδοποίηση είναι η έσχατη λύση ώστε να αποφευχθεί η κατάρρευση του συστήματος και σκοπός είναι η εύρεση των γραμμών που θα αποσυνδεθούν ώστε να σχηματιστούν ευσταθείς νησίδες που ικανοποιούν το ισοζύγιο ισχύος. Η απόφαση του ποιες γραμμές θα αποσυνδεθούν εξαρτάται από το σφάλμα και από την προ σφάλματος κατάσταση του συστήματος.

Η εργασία χωρίζεται σε 2 μεγάλα μέρη. Το Μέρος Α αποτελεί το θεωρητικό σκέλος της εργασίας, και αναπτύσσεται στα Κεφάλαια 1 και 2. Το Μέρος Β αποτελεί το πειραματικό σκέλος της εργασίας, με προσομοίωση των μεθόδων νησιδοποίησης στα πρότυπα δίκτυα IEEE -9, -39 και -118 ζυγών, και αναπτύσσεται στα Κεφάλαια 3 ως 8. Πιο αναλυτικά:

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στα μπλακάουτ ηλεκτρικών δικτύων. Αναφέρονται τα αίτια πρόκλησής τους και οι επιπτώσεις τους σε διάφορες πτυχές του κοινωνικού συνόλου. Έπειτα γίνεται μια ιστορική αναδρομή των μεγαλύτερων καταγεγραμμένων μπλακάουτ που έχουν συμβεί παγκοσμίως, αναλύοντας τόσο τον τρόπο που προκλήθηκαν όσο και τις σοβαρές τους συνέπειες.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι εισαγωγικές έννοιες των αλγορίθμων ελεγχόμενης νησιδοποίησης που θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία. Εισάγεται η θεωρία των γράφων, η έννοια των συναφών ομάδων γεννητριών και η έννοια της φασματικής ομαδοποίησης των ζυγών του δικτύου.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι ομάδες συναφών γεννητριών των δικτύων που θα χωριστούν σε νησίδες στην προσομοίωση. Οι ομάδες αυτές αποτελούν το βασικό περιορισμό των μεθόδων διαχωρισμού του δικτύου σε νησίδες που περιγράφονται στη συνέχεια.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η μέθοδος ελεγχόμενης νησιδοποίησης του δικτύου βασισμένη στις αρχές της φασματικής ομαδοποίησης (SCCI Algorithm). Περιγράφονται η έννοια του Πίνακα Προβολών και οι Αλγόριθμοι ομαδοποίησης k-means και k-medoids.

Στο Κεφάλαιο 5 εξετάζεται η μέθοδος ελεγχόμενης νησιδοποίησης του δικτύου με αλγόριθμο ομαδοποίησης των ζυγών του συστήματος σε νησίδες με την χρήση του Minimum Cut αλγορίθμου.

Στο Κεφάλαιο 6 αναλύεται η μέθοδος ελεγχόμενης νησιδοποίησης του δικτύου με τον αλγόριθμο φασματικής ομαδοποίησης, λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος στις νησίδες.

Στο Κεφάλαιο 7 εισάγονται οι δυαδικοί Γενετικοί Αλγόριθμοι, και αναπτύσσεται η μέθοδος ελεγχόμενης νησιδοποίησης του δικτύου με τη χρήση τους.

Στο Κεφάλαιο 8 συγκρίνονται τα αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί από τις μεθόδους ελεγχόμενης νησιδοποίησης που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, κι εξάγονται συμπεράσματα για την αποδοτικότητά τους στο εκάστοτε δίκτυο.

Λέξεις Κλειδιά:

κατάρρευση συστήματος, μπλακάουτ, ελεγχόμενη νησιδοποίηση, ομάδες συναφών γεννητριών, θεωρία γράφων, περιορισμένη φασματική ομαδοποίηση, κανονικοποιημένη φασματική ομαδοποίηση, ισορροπία άεργου ισχύος, γενετικός αλγόριθμος

ABSTRACT

The objective of this thesis is to study controlled islanding methods of a power system in order to avoid its collapse. When a disturbance occurs in a power system, controls are applied so as the system to be driven to a new state of stability where the constraints are satisfied. If the controls fail, protective systems are activated to protect the system components from irreparable damage. This may result in separating the system in unstable islands or islands that are unable to satisfy a large proportion of demand and because of cascading outages the power system is led to collapse.

Controlled islanding is the last way to avoid a power system collapse and its purpose is to find the branches that will be disconnected in order to form stable islands that satisfy the power balance. The decision of which branches will be disconnected depends on the failure and the state in which the system is before this failure.

The work is divided into two major parts. Part A is the theoretical part of the work, and is developed throughout Chapters 1 to 2. Part B is the experimental part of the work, where controlled islanding methods are simulated by using IEEE -9, -39 and -118 bus test systems; Part B is developed throughout Chapters 3 to 8. More specifically:

Chapter 1 refers to power system blackouts. The causes of the occurrence of blackouts are referred, along with the impact of blackouts on various aspects of society. It is followed by a retrospect of the largest recorded blackouts that have occurred worldwide, analyzing both their causes and their serious consequences.

Chapter 2 describes the concepts and principles of controlled islanding algorithms that are studied in this work. The theory of graphs, the concept of coherent generator groups and the concept of spectral clustering of bus system are introduced.

Chapter 3 presents the coherent generator groups of power systems that are divided into islands in the simulation. These groups are the main constraint for the controlled islanding methods that are described below.

Chapter 4 describes the controlled islanding method based on the principles of spectral clustering (SCCI Algorithm). The concept of projection matrix, along with clustering algorithms k-means and k-medoids are described.

Chapter 5 examines the controlled islanding method, where the Minimum Cut algorithm is the clustering algorithm of the bus system.

Chapter 6 analyzes the controlled islanding method with spectral clustering algorithm, taking account of the balance of active as long as reactive power in the islands.

Chapter 7 introduces the binary Genetic Algorithms. Furthermore, the controlled islanding method with their use is developed.

Chapter 8 compares the results from the controlled islanding methods that were described in previous chapters. Conclusions are extracted for the efficiency of every method in each bus system, too.

Keywords:

power system collapse, blackout, controlled islanding, coherent generator groups, graph theory, constraint spectral clustering, normalized spectral clustering, balance of reactive power, genetic algorithm

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΜΕΡΟΣ Α : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΣΚΕΛΟΣ 13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΔΙΑΚΟΠΕΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ – POWER OUTAGES 15

| | | |
|----------|---|----|
| A 1.1 | Εισαγωγή..... | 15 |
| A 1.2 | Επιπτώσεις μιας γενικής διακοπής ρεύματος (blackout) | 16 |
| A 1.3 | Ιστορική αναδρομή μεγαλύτερων διακοπών ρεύματος..... | 17 |
| A 1.3.1 | Αμερικάνικο μπλακάουτ – Northeast blackout (1965) | 17 |
| A 1.3.2 | Μπλακάουτ Νέας Υόρκης (1977) | 18 |
| A 1.3.3 | Μπλακάουτ Σαν Φρανσίσκο – San Francisco blackout (1998)..... | 19 |
| A 1.3.4 | Μπλακάουτ Νότιας Βραζιλίας – Southern Brazil blackout (1999) | 20 |
| A 1.3.5 | Μπλακάουτ Ινδίας – India blackout (2001)..... | 21 |
| A 1.3.6 | Αμερικάνικο μπλακάουτ – Northeast blackout (2003) | 21 |
| A 1.3.7 | Μπλακάουτ Ιταλίας – Italy blackout (2003)..... | 23 |
| A 1.3.8 | Μπλακάουτ Ελλάδας – Greek blackout (2004) | 24 |
| A 1.3.9 | Μπλακάουτ Ιάβα – Μπαλί – Java–Bali Blackout (2005)..... | 24 |
| A 1.3.10 | Μπλακάουτ Βραζιλίας-Παραγουάης – Brazil and Paraguay Blackout (2009)..... | 25 |
| A 1.3.11 | Μπλακάουτ Ινδίας – India Blackouts (2012)..... | 26 |
| A 1.3.12 | Μπλακάουτ Μπαγκλαντές – Bangladesh Blackout (2014) | 28 |
| A 1.3.13 | Μπλακάουτ Τουρκίας – Turkey Blackout (2015) | 29 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ (CONTROLLED ISLANDING)..... 31

| | | |
|---------|---|----|
| A 2.1 | Εισαγωγή..... | 31 |
| A 2.2 | Περιορισμοί στην Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση | 32 |
| A 2.3 | Θεωρία των Γράφων | 33 |
| A 2.4 | Ομάδες συναφών γεννητριών – Coherent generator groups | 35 |
| A 2.5 | Αντικειμενική Συνάρτηση (objective function) του αλγορίθμου Νησιδοποίησης | 36 |
| A 2.6 | Φασματική Ομαδοποίηση (Spectral Clustering)..... | 37 |
| A 2.6.1 | Ιδιοτιμές και Ιδιοδιανύσματα | 38 |
| A 2.6.2 | Πίνακας Laplace | 38 |
| A 2.6.3 | Τύποι Φασματικής Ομαδοποίησης..... | 39 |
| A 2.7 | Μέθοδοι ελεγχόμενης νησιδοποίησης..... | 40 |

ΜΕΡΟΣ Β : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΚΕΛΟΣ..... 43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΜΑΔΩΝ ΣΥΝΑΦΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ 45

| | | |
|---------|--|----|
| B 3.1 | Εισαγωγή | 45 |
| B 3.2 | Παρουσίαση Ομάδων Συναφών γεννητριών..... | 45 |
| B 3.2.1 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 9 Ζυγών – IEEE 9-Bus..... | 45 |
| B 3.2.2 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 39 Ζυγών – IEEE 39-Bus..... | 47 |
| B 3.2.3 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 118 Ζυγών – IEEE 118-Bus..... | 48 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗΣ – SCCI ALGORITHM 51

| | | |
|-------|--|----|
| B 4.1 | Εισαγωγή | 51 |
| B 4.2 | Στατικός Γράφος Δικτύου | 51 |
| B 4.3 | Πίνακας Προβολών..... | 52 |
| B 4.4 | Διαχωρισμός του δικτύου – Αλγόριθμοι k-means και k-medoids | 53 |

| | | |
|--|--|------------|
| B 4.4.1 | Αλγόριθμος k-means | 53 |
| B 4.4.2 | Αλγόριθμος k-medoids..... | 55 |
| B 4.5 | Μεθοδολογία SCCI αλγορίθμου | 55 |
| B 4.6 | Αποτελέσματα | 58 |
| B 4.6.1 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 9 Ζυγών – IEEE 9-Bus..... | 58 |
| B 4.6.2 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 39 Ζυγών – IEEE 39-Bus..... | 60 |
| B 4.6.3 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 118 Ζυγών – IEEE 118-Bus..... | 62 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ MINIMUM CUT..... | | 65 |
| B 5.1 | Εισαγωγή | 65 |
| B 5.2 | Αλγόριθμος Minimum cut..... | 65 |
| B 5.3 | Μεθοδολογία Minimum Cut Αλγορίθμου | 66 |
| B 5.4 | Αποτελέσματα | 70 |
| B 5.4.1 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 9 Ζυγών – IEEE 9-Bus..... | 70 |
| B 5.4.2 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 39 Ζυγών – IEEE 39-Bus..... | 71 |
| B 5.4.3 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 118 Ζυγών – IEEE 118-Bus..... | 73 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΚΑΙ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ | | 77 |
| B 6.1 | Εισαγωγή | 77 |
| B 6.2 | Πολλαπλά κριτήρια για το διαχωρισμό γράφου – Multi-Objective Graph Partitioning .. | 77 |
| B 6.3 | Μεθοδολογία μεθόδου νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού – άεργου ισχύος..... | 79 |
| B 6.4 | Αποτελέσματα | 82 |
| B 6.4.1 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 9 Ζυγών – IEEE 9-Bus..... | 82 |
| B 6.4.2 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 39 Ζυγών – IEEE 39-Bus..... | 83 |
| B 6.4.3 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 118 Ζυγών – IEEE 118-Bus..... | 85 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΟΝ ΓΕΝΕΤΙΚΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ | | 89 |
| B 7.1 | Εισαγωγή | 89 |
| B 7.2 | Εισαγωγή στο Δυαδικό Γενετικό Αλγόριθμο | 89 |
| B 7.3 | Οι Συνιστώσες του Δυαδικού Γενετικού Αλγορίθμου | 89 |
| B 7.3.1 | Επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης και της αντικειμενικής συνάρτησης | 91 |
| B 7.3.2 | Αποκωδικοποίηση μεταβλητών σχεδίασης | 92 |
| B 7.3.3 | Πληθυσμός..... | 92 |
| B 7.3.4 | Μέθοδος επιλογής γονέων | 93 |
| B 7.3.5 | Διασταύρωση..... | 95 |
| B 7.3.6 | Μετάλλαξη | 97 |
| B 7.3.7 | Επόμενες Γενιές..... | 98 |
| B 7.3.8 | Σύγκλιση αλγορίθμου | 99 |
| B 7.4 | Μεθοδολογία μεθόδου νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο | 100 |
| B 7.5 | Αποτελέσματα | 102 |
| B 7.5.1 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 9 Ζυγών – IEEE 9-Bus..... | 102 |
| B 7.5.2 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 39 Ζυγών – IEEE 39-Bus..... | 104 |
| B 7.5.3 | Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 118 Ζυγών – IEEE 118-Bus..... | 106 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | | 109 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | | 113 |

ΜΕΡΟΣ Α : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΣΚΕΛΟΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Μέρος Α, αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας εργασίας. Περιγράφονται τα αίτια και οι επιπτώσεις των μεγάλων διακοπών ρεύματος, και γίνεται μια ιστορική αναδρομή στα μεγαλύτερα μπλακάουτ μέχρι σήμερα. Επίσης, εισάγεται η μέθοδος ελεγχόμενης νησιδοποίησης για την αντιμετώπιση αυτών των μπλακάουτ, με τις αρχικές θεωρητικές έννοιες που την αποτελούν.

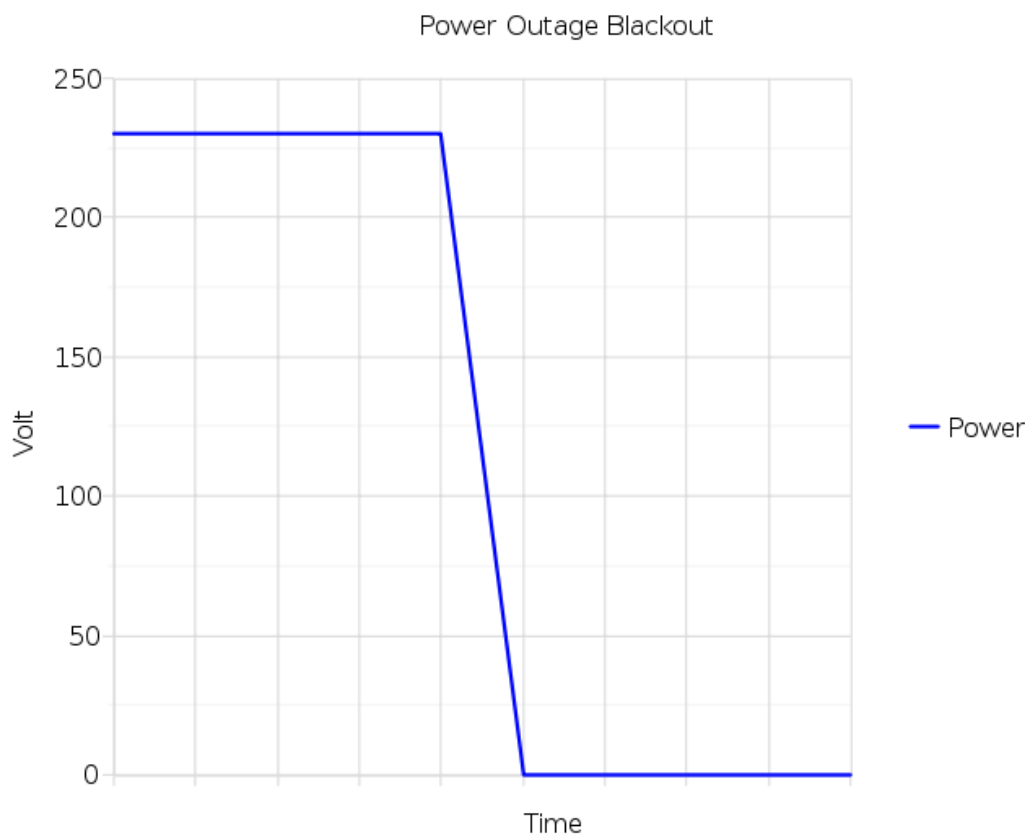
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΔΙΑΚΟΠΕΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ – POWER OUTAGES

A 1.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα μεταφοράς Ηλεκτρική Ενέργειας αποτελούν βασικό στοιχείο της εθνική υποδομής ενός κράτους. Οι διακοπές ρεύματος (*power outages*) σε αυτά τα συστήματα έχουν σημαντικές, άμεσες και έμμεσες, συνέπειες για την οικονομία και την εθνική ασφάλεια. Αν και οι διακοπές ρεύματος μεγάλης εμβέλειας στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχετικά σπάνιες, το αντίκτυπό τους είναι τέτοιο, ώστε η κατανόηση του ρίσκου τους να είναι υψηλής προτεραιότητας. Εκτός από τις άμεσες συνέπειες των διακοπών ρεύματος, οι αυξανόμενες διασυνδέσεις μεταξύ διαφόρων υποδομών ενός κράτους (όπως οι επικοινωνίες, οι χρηματοοικονομικές αγορές, οι μεταφορές κτλ), μπορούν να δώσουν τη δυνατότητα σε μια διακοπή ρεύματος να επηρεάσει κι άλλες υποδομές ζωτικής σημασίας. [1]

Οι διακοπές ρεύματος κατηγοριοποιούνται σε 3 διαφορετικά φαινόμενα, σχετικά με τη διάρκεια και το αποτέλεσμα της διακοπής:

- Ένα **μόνιμο σφάλμα** (*permanent fault*) είναι μια μεγάλη απώλεια ισχύος, που συνήθως προκαλείται από ένα σφάλμα σε μια γραμμή μεταφοράς. Το ρεύμα αποκαθίσταται αυτόματα αφού αποκατασταθεί η βλάβη.
- Μία **βύθιση** (*brownout*) είναι μια πτώση της τάσης σε μια παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Ο όρος βύθιση προέρχεται από την εξασθένηση του φωτισμού όταν η τάση παρουσιάζει αστάθεια. Οι βυθίσεις τάσης μπορούν να προκαλέσουν κακή απόδοση των εξοπλισμών ή ακόμα και λανθασμένη λειτουργία τους. Μια βύθιση τάσης μπορεί να είναι αποτέλεσμα της διακοπής του ηλεκτρικού δικτύου, ή μπορεί περιστασιακά να επιβληθεί σε μια προσπάθεια να μειωθεί το φορτίο και να αποτραπεί μια συνολική κατάρρευση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι γνωστή ως *μπλακάουτ*.
- Μία **γενική διακοπή ρεύματος – μπλακάουτ** (*blackout*) είναι η συνολική απώλεια ρεύματος σε μια περιοχή και είναι η πιο σοβαρή μορφή διακοπής ρεύματος που μπορεί να συμβεί. Οι διακοπές ρεύματος οι οποίες είτε προκύπτουν από ενεργοποίηση σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είτε οδηγούν σε αυτή, είναι ιδιαίτερα δύσκολο να ανακάμψουν γρήγορα. Μια γενική διακοπή ρεύματος μπορεί να διαρκέσει από λίγα λεπτά έως λίγες εβδομάδες ανάλογα με τη φύση του blackout και τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού δικτύου. [3]



Εικόνα 1.1 Γραφική αποτύπωση του blackout συναρτήσει του χρόνου

A 1.2 Επιπτώσεις μιας γενικής διακοπής ρεύματος (blackout)

Υπάρχουν αρκετές οδυνηρές επιπτώσεις μιας διακοπής ρεύματος μεγάλης διάρκειας, που μπορούν να γίνουν αισθητές για μεγάλο χρονικό διάστημα, ακόμα και αφού το ηλεκτρικό ρεύμα επανέλθει. Ιδιαίτερα στα αστικά κέντρα, οι συνέπειες που επιφέρει ένα blackout είναι πολύ σοβαρές, διότι οι αστικές περιοχές με τα προάστια τους είναι άμεσα εξαρτώμενες σε παροχή μη διακοπτόμενου ηλεκτρισμού.

Αρκετοί τομείς είναι αυτοί που επηρεάζονται άμεσα από μια γενική διακοπή ρεύματος σε μια αστική περιοχή. Συγκεκριμένα, μετά από ένα blackout μακράς διάρκειας:

- Στα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς μπορεί να προκληθεί χαοτική κατάσταση
- Τα Συστήματα Ύδρευσης θα κλείσουν, ιδιαίτερα σε περιοχές της επαρχίας που εξαρτώνται από ΥΗΣ
- Οι σταθμοί τηλεπικοινωνίας θα χαθούν
- Η φύλαξη και η ασφάλεια διάφορων πόρων θα κλονιστούν, με συνέπεια να υπάρξει πιθανή αύξηση της εγκληματικότητας
- Οι ηλεκτρικοί σηματοδότες δεν θα λειτουργούν, με αποτέλεσμα να προκληθεί κυκλοφοριακό χάος και να υπάρξει μεγάλη πιθανότητα ατυχημάτων
- Ο κλιματισμός εσωτερικών χώρων δεν θα λειτουργεί, είτε σε χειμερινή είτε σε καλοκαιρινή περίοδο – κίνδυνος υγείας για μικρές και μεγάλες ηλικίες

- Τα ΑΤΜ θα σταματήσουν να λειτουργούν – αδύνατες οι χρηματικές συναλλαγές
- Τα μέσα επικοινωνίας – Ιντερνέτ, τηλεόραση, ραδιόφωνο – θα πάψουν να λειτουργούν, άρα δεν θα υπάρχει καμία ενημέρωση για την κατάσταση

Όπως γίνεται αντιληπτό, οι συνέπειες ενός μπλακάουτ επηρεάζουν την ευημερία κάθε πολίτη, αλλά και μια ολόκληρη χώρα στο σύνολό της. Ουσιαστικά η χώρα που μέρος της θα υποστεί μπλακάουτ παραλύει, σύμφωνα και με όσα έχουν σημειωθεί παραπάνω. Οι βιομηχανικές μονάδες παύουν να λειτουργούν, κάτι που επιφέρει ζημία πολλών δισεκατομμυρίων, ενώ και το χρηματιστήριο σημειώνει σημαντική πτώση σε τέτοιες περιπτώσεις. Σύμφωνα με έκθεση του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α., η κατάρρευση του ηλεκτροδοτικού συστήματος κοστίζει μεταξύ 18 και 33 δις \$ στην οικονομία της χώρας ετησίως. Ο αριθμός αυτός μπορεί να εκτοξευθεί στα 75 δις \$ κατά τη διάρκεια ετών με ακραία καιρικά φαινόμενα. [21]

A 1.3 Ιστορική αναδρομή μεγαλύτερων διακοπών ρεύματος

Στην ενότητα αυτή, θα περιγραφούν οι σημαντικότερες περιπτώσεις διακοπής ρεύματος που έχουν καταγραφεί μέχρι τώρα στον πλανήτη, με τις συνέπειες που αυτές επέφεραν.

A 1.3.1 Αμερικάνικο μπλακάουτ – Northeast blackout (1965)

Το αμερικάνικο μπλακάουτ συνέβη στις 9 Νοεμβρίου 1965, στις 05:27 πμ, επηρεάζοντας την επαρχία του Οντάριο στον Καναδά, καθώς και τις πολιτείες του Κονέκτικατ, της Μασαχουσέτης, της Νέας Υόρκης, του Ρόουντ Άιλαντ, του Βέρμοντ και του Νιου Χάμσαϊρ στις Η.Π.Α.. Πάνω από **30 εκατομμύρια άνθρωποι** και **207000 τ.μ.** έμειναν χωρίς ηλεκτρισμό για πάνω από **13 ώρες**.

Η αιτία ήταν ανθρώπινο λάθος που συνέβη μέρες πριν εκδηλωθεί το μπλακάουτ. Το προσωπικό συντήρησης είχε τοποθετήσει εσφαλμένα ένα ρελέ προστασίας σε μια από τις γραμμές μεταφοράς μεταξύ του σταθμού παραγωγής του Νιαγάρα και του σταθμού Sir Adam, στο Κουίνστον του Οντάριο. Το ρελέ ασφαλείας, που έπρεπε να ενεργοποιηθεί σε περίπτωση που το ρεύμα υπερέβαινε τη χωρητικότητα της γραμμής μεταφοράς, είχε τεθεί σε πολύ χαμηλή τιμή. Έτσι λοιπόν, και λόγω του ότι επρόκειτο για ώρα αιχμής, το ρελέ αυτής της γραμμής μεταφοράς ενεργοποιήθηκε, και η ηλεκτρική ενέργεια πέρασε στις υπόλοιπες γραμμές. Έτσι υπήρξε υπερφόρτιση στις γραμμές αυτές – ενεργοποιώντας τα δικά τους ρελέ αποσυνδέθηκαν κι αυτές – με αποτέλεσμα ο σταθμός Sir Adam να απομονωθεί από όλο το νότιο Οντάριο.

Η περίσσεια ισχύος έπειτα άλλαξε κατεύθυνση, πηγαίνοντας ανατολικά του σταθμού Sir Adam, προς τις διασυνδεδεμένες γραμμές της πολιτείας της Νέας Υόρκης, υπερφορτίζοντας και αυτές, και απομονώνοντας την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στην περιοχή του Νιαγάρα από το υπόλοιπο διασυνδεδεμένο δίκτυο. Αυτόματα οι γεννήτριες του δικτύου έκλεισαν για να προστατευθούν. Μέσα σε 5 λεπτά, το δίκτυο διανομής στις Βορειοανατολικές πολιτείες των Η.Π.Α. βρισκόταν σε απόλυτο χάος, καθώς οι συνέπειες των υπερφορτίσεων και της επακόλουθης

απώλειας παραγωγικής ικανότητας κλιμακώθηκε εντός του δικτύου, οδηγώντας το σε μη ελεγχόμενη νησιδοποίησή του.

Η αποκατάσταση της ηλεκτρικής ενέργειας ήταν αρκετά δύσκολη. Οι περισσότερες γεννήτριες δεν είχαν καμία βοηθητική δύναμη για να χρησιμοποιηθεί για την εκκίνησή τους. Τμήματα του Μπρούκλιν άρχισαν να τροφοδοτούνται με ρεύμα από τις 23:00 μμ, ενώ το υπόλοιπο του δήμου από τα μεσάνυχτα. Ωστόσο, ολόκληρη η πόλη της Νέας Υόρκης δεν επέστρεψε στην κανονική παροχή ρεύματος πριν τις 7:00 πμ την επόμενη ημέρα, 10 Νοεμβρίου. Περίπου 800000 άνθρωποι αποκλείστηκαν στο μετρό της Νέας Υόρκης. Όσο διήρκεσε το μπλακάουτ, αρκετά περιστατικά βανδαλισμού και λεηλασιών συνέβησαν και 5000 αστυνομικοί εκτός υπηρεσίας μαζί με 10000 άνδρες της εθνοφρουράς βγήκαν στους δρόμους για να τα αποτρέψουν. Τέτοιος ήταν ο αντίκτυπος του μπλακάουτ που ανάγκασε σε εκ θεμελίων ανασχεδιασμό του δικτύου ηλεκτροδότησης των συγκεκριμένων πολιτειών. [2], [4]



Εικόνα 1.2 Northeast blackout (1965)

A 1.3.2 Μπλακάουτ Νέας Υόρκης (1977)

Το μπλακάουτ στις 13 Ιουλίου 1977 στις Η.Π.Α. περιορίστηκε μόνο στη **Νέα Υόρκη και τα προάστιά της**, και διήρκεσε **μία ολόκληρη ημέρα**, επηρεάζοντας **9 εκατομμύρια ανθρώπους**. Ξεκίνησε με διαδοχικούς κεραυνούς από τις 08:37 μμ, οι οποίοι προκάλεσαν την υπερφόρτιση πολλών γραμμών μεταφοράς, με αποτέλεσμα να τις θέσουν εκτός δικτύου. Επίσης, χάθηκε ο έλεγχος του πυρηνικού εργοστασίου στο Indian Point, που παρήγαγε 900MW. Αφού έγινε προσπάθεια απομακρυσμένης επανεκκίνησης γεννητριών που απέτυχε, το επόμενο βήμα ήταν να ελαττωθεί η απαίτηση σε φορτίο.

Μέσα σε 1 ώρα, έκλεισε και η μεγαλύτερη γεννήτρια στη Νέα Υόρκη, η Ravenswood 3 (επίσης γνωστή ως "Big Allis»), και η πόλη βυθίστηκε όλη στο σκοτάδι. Στις 10:25 μμ ξεκίνησε η διαδικασία αποκατάστασης του δικτύου, αλλά η ηλεκτρική ενέργεια αποκαταστάθηκε πλήρως αργά την επόμενη ημέρα.

Οι επιπτώσεις της συγκεκριμένης διακοπής ρεύματος ήταν μεγάλες. Συντελέστηκαν μεγάλες λεηλασίες και βανδαλισμοί, πολύ χειρότερες από το 1965, στο μεγαλύτερο μέρος της Νέας Υόρκης – κυρίως στις φτωχότερες γειτονιές. Αυτό αιτιολογείται τόσο από την παρατεταμένη οικονομική ύφεση εκείνη την περίοδο, όσο και από το ότι το μπλακάουτ εκδηλώθηκε βράδυ, με αποτέλεσμα να μην μπορούν οι ιδιοκτήτες καταστημάτων να προστατέψουν την περιουσία τους από τους πλιατσικολόγους. Συνελήφθησαν για λεηλασίες περίπου 4000 άτομα, και καταστράφηκαν 1600 περίπου καταστήματα. Επίσης, σημειώθηκαν και περίπου 1000 πυρκαγιές σε πολλά σημεία της πόλης, κάποιες από τις οποίες τέθηκαν υπό έλεγχο την επόμενη ημέρα. [2], [4]



Εικόνα 1.3 Λεηλασίες από το μπλακάουτ της Νέας Υόρκης (1977)

A 1.3.3 Μπλακάουτ Σαν Φρανσίσκο – San Francisco blackout (1998)

Στις 8 Δεκεμβρίου 1998 εκδηλώθηκε στο Σαν Φρανσίσκο της Καλιφόρνια ένα πολύ μεγάλο μπλακάουτ, αφήνοντας χωρίς ρεύμα 350000 κτίρια και **940000 ανθρώπους** περίπου.

Το μπλακάουτ προκλήθηκε όταν η PG&E – η εταιρία που παρέχει ηλεκτρισμό στην Καλιφόρνια – έθεσε εντός δικτύου έναν υποσταθμό στο Σαν Ματέο στις 08:17, στον οποίο όμως είχαν γίνει έργα συντήρησης και ήταν γειωμένος. Έτσι, το δίκτυο στη χερσόνησο του Σαν Φρανσίσκο τράβηξε τόση πολλή ηλεκτρική ενέργεια, που αυτόματα 25 υποσταθμοί του δικτύου τέθηκαν εκτός λειτουργίας.

Η ηλεκτρική ενέργεια επανήλθε την ίδια ημέρα στις 16:00, όμως η οικονομική ζημία της περιοχής υπολογίζεται σε δεκάδες εκατομμύρια δολάρια. [4]

A 1.3.4 Μπλακάουτ Νότιας Βραζιλίας – Southern Brazil blackout (1999)

Στις 11 Μαρτίου 1999 συνέβη το μεγαλύτερο – μέχρι εκείνη την περίοδο – μπλακάουτ που έχει συμβεί ποτέ, στο νότιο κομμάτι της Βραζιλίας. Η κατάρρευση του συστήματος επηρέασε τις μεγαλύτερες πόλεις της Βραζιλίας - Σάο Πάολο, Ρίο ντε Τζανέιρο, Γκοϊάς κ.α. – ενώ υπολογίζεται ότι **75 με 97 εκατομμύρια άνθρωποι** έμειναν χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα.

Μία αλυσιδωτή διαδικασία ξεκίνησε όταν ένας κεραυνός στις 22:16 χτύπησε έναν υποσταθμό του Σάο Πάολο, στο Bauru. Τα κυκλώματα των 440kV του υποσταθμού τέθηκαν εκτός λειτουργίας, και το ρεύμα είχε λίγες επιλογές για να συνεχίσει να ρέει – μέσω του συστήματος των 440kV – καθώς δεν είχαν γίνει τα αναγκαία έργα συντήρησης και επέκτασης του ηλεκτρικού δικτύου από το κράτος. Έτσι, πολλές γεννήτριες έκλεισαν αυτόματα, καθώς δεν υπήρχε φορτίο.

Η μεγαλύτερη μονάδα παραγωγής ενέργειας στον κόσμο εκείνη την εποχή, στο Itaipu, προσπάθησε να υποστηρίξει το φορτίο που είχε σταματήσει να τροφοδοτείται από τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας των 440kV, αλλά οι γραμμές των 750kV εναλλασσόμενου ρεύματος και οι γραμμές 600kV DC ρεύματος που συνέδεαν τη μονάδα με το υπόλοιπο σύστημα δεν μπορούσαν να λάβουν το φορτίο και τέθηκαν εκτός κι αυτές. Νότια του Σάο Πάολο υπήρχε υπερσυχνότητα, επειδή υπήρχε μεγαλύτερη παραγωγή φορτίου από κατανάλωση, κυρίως επειδή το Itaipu είχε συνδεθεί μόνο σε αυτό το υποσύστημα – αλλά αυτό το πρόβλημα λύθηκε αυτόματα από όλες τις γεννήτριες στην περιοχή, που μείωσαν την απαίτηση σε φορτίο. Το υπόλοιπο σύστημα βίωσε ένα πολύ μεγαλύτερο πρόβλημα υποσυχνότητας, δεδομένου ότι το σύστημα είχε μεγάλη κατανάλωση φορτίου και όχι αρκετή δυναμικότητα ηλεκτροπαραγωγής. Μερικές γεννήτριες τέθηκαν λόγω της υποσυχνότητας εκτός λειτουργίας, κάτι που επιδείνωσε το πρόβλημα, και παρά την αυτόματη απόρριψη του 35% του φορτίου του υποσυστήματος, η υποσυχνότητα δεν έπαψε να υπάρχει. Αυτό προκάλεσε στο δίκτυο να σπάσει σε πολλές νησίδες, οι περιοχές του Σάο Πάολο και του Ρίο ντε Τζανέιρο χωρίστηκαν, με λίγες περιοχές να παρέχονται με ηλεκτρική ενέργεια. Το μεγαλύτερο μέρος του συστήματος Minas Gerais παρέμεινε σε λειτουργία, τροφοδοτώντας την πρωτεύουσα της Βραζιλίας, Μπραζίλια,

Στο Ρίο, 1200 αστυνομικοί βγήκαν στους δρόμους για αποτροπή λεηλασιών, ενώ στο Σάο Πάολο οι αρχές έκλεισαν τις σήραγγες της πόλης, για να αποτραπούν πιθανές επιθέσεις. Όταν συνέβη το μπλακάουτ, πάνω από 60000 άνθρωποι βρίσκονταν μέσα στο μετρό του Ρίο. Το ρεύμα άρχισε να επανέρχεται σε κάποιες περιοχές τα μεσάνυχτα, ενώ η κυβέρνηση αναγκάστηκε να περικόψει κρατικές δαπάνες για να εξοικονομήσει τα αναγκαία για τον ανασχεδιασμό του ηλεκτρικού δικτύου. [2], [4]

A 1.3.5 Μπλακάουτ Ινδίας – India blackout (2001)

Συνέβη στις 2 Ιανουαρίου του 2001, όταν το δίκτυο της βόρειας Ινδίας κατέρρευσε, επηρεάζοντας **230 εκατομμύρια κατοίκους**, που έμειναν χωρίς ηλεκτρισμό για **12 ώρες περίπου**.

Η κατάρρευση του δικτύου οφείλεται στο ότι ο υποσταθμός του Uttar Pradesh τέθηκε εκτός λειτουργίας, καθώς κι επειδή ο εξοπλισμός για τη μετάδοση στο δίκτυο ήταν φτωχός και ανεπαρκής. Έτσι, κατέρρευσε συνολικά όλο το δίκτυο στη βόρεια Ινδία. Βασικές υπηρεσίες, μεταφορές, επιχειρήσεις και εγχώριες προμήθειες οδηγήθηκαν σε αδιέξοδο στις πολιτείες του Τζαμού και Κασμίρ, Punjab, Haryana, Χιματσάλ Πραντές, Ρατζαστάν, στο έδαφος της Chandigarh και στην πρωτεύουσα Νέο Δελχί.

Το σιδηροδρομικό δίκτυο στη βόρεια Ινδία παράλυσε, καθώς τα ηλεκτρικά τρένα ακινητοποιήθηκαν, μπλοκάροντας τις γραμμές. Περισσότερα από 80 τρένα ακινητοποιήθηκαν στην περιοχή για 15 ώρες περίπου. Οι αρχές των Σιδηροδρόμων χρησιμοποίησαν κινητήρες ντίζελ για να τραβήξουν τα ηλεκτρικά τρένα στον προορισμό τους, αλλά υπήρχε ανεπάρκεια στις μηχανές αυτές. Μερικά μεγάλα νοσοκομεία ήταν σε θέση να λειτουργήσουν με τη χρήση εφεδρικών γεννητριών, αλλά πολλά είχαν παραλύσει ακυρώνοντας έτσι πολλές χειρουργικές επεμβάσεις. Η παροχή νερού διακόπηκε, όταν μονάδες επεξεργασίας και αντλίες σταμάτησαν να λειτουργούν. Έτσι, εκατομμύρια άνθρωποι δεν μπορούσαν να αντλήσουν νερό από υπόγεια πηγάδια, διότι οι αντλίες δεν λειτουργούσαν. Επίσης, στο οδικό δίκτυο μεγάλων πόλεων δημιουργήθηκε χαώδης κατάσταση, ενώ και οι τηλεπικοινωνίες διακόπηκαν. Το αεροδρόμιο στο Νέο Δελχί λειτούργησε με αρκετές δυσκολίες, με τη βοήθεια εφεδρικής γεννήτριας.

Η Συνομοσπονδία της Ινδικής Βιομηχανίας εκτιμά ότι η απώλεια για τις επιχειρήσεις κυμαίνεται μεταξύ 2.5 και 5 δισεκατομμύρια ρουπίες (107.1 εκατομμύρια \$). [2], [4], [7]

A 1.3.6 Αμερικάνικο μπλακάουτ – Northeast blackout (2003)

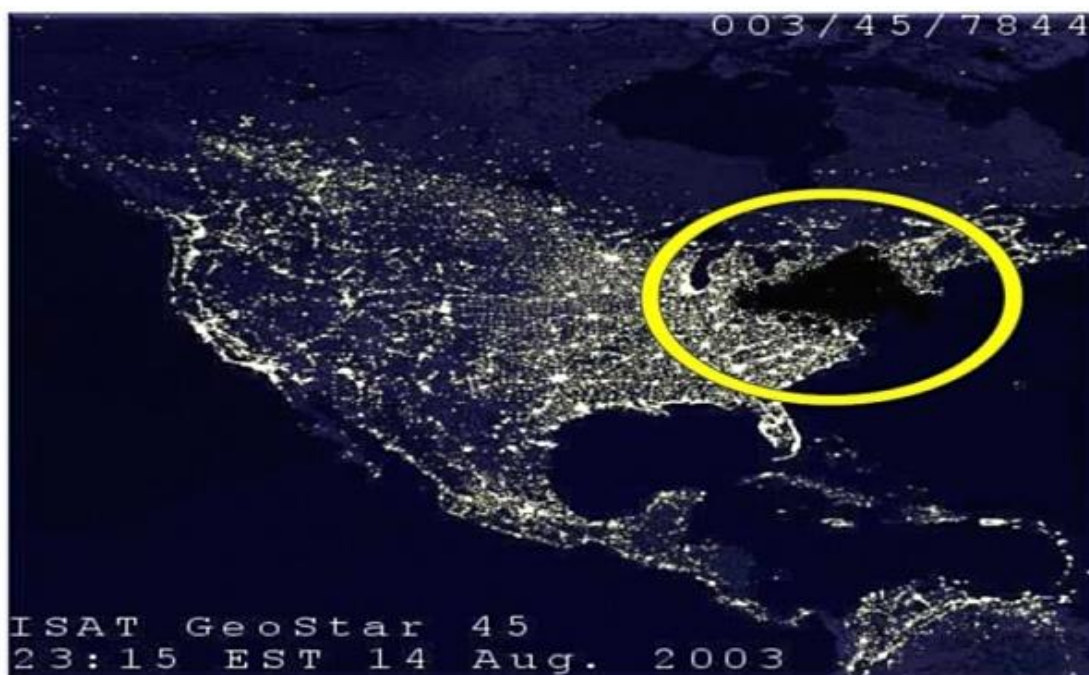
Το αμερικάνικο μπλακάουτ του 2003 ήταν – για εκείνη την περίοδο – το 2^ο μεγαλύτερο σε εύρος μπλακάουτ της ιστορίας μετά από αυτό της Βραζιλίας του 1999. Εκδηλώθηκε την Πέμπτη 14 Αυγούστου 2003, στις 16:10, σε περιοχές των Βορειοανατολικών και Κεντροδυτικών Η.Π.Α., καθώς και στην επαρχία Οντάριο στον Καναδά. Ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας επανήλθε σε κάποιες περιοχές στις 23:00 την ίδια μέρα, ενώ σε πολλές άλλες περιοχές μετά από **2 ημέρες**. Η διακοπή ρεύματος του 2003 ήταν πολύ μεγαλύτερη από αυτή του 1965 στη ίδια περιοχή, επηρεάζοντας **10 εκατομμύρια κατοίκους** στο Οντάριο, και **45 εκατομμύρια κατοίκους** σε 8 πολιτείες των Η.Π.Α..

Σύμφωνα με τη New York Independent System Operator (ή NYISO) – που διαχειρίζεται το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας στη Νέα Υόρκη – ένας κεραυνός προκάλεσε ένα κύμα ηλεκτρικής ενέργειας της τάξης των 3500 MW, το οποίο κατευθύνθηκε προς το Οντάριο, επηρεάζοντας το δίκτυο. Η αιτία του μπλακάουτ ήταν ένα σφάλμα του λογισμικού στο σύστημα συναγεμμού της FirstEnergy Corporation, στο Οχάιο. Λόγω της έλλειψης συναγεμμού, δεν γνώριζαν οι χειριστές

του δικτύου την ανάγκη αναδιανομής μετά την υπερφόρτιση των γραμμών μεταφοράς λόγω του κεραυνού.

Μέσα σε μισή ώρα είχαν προκληθεί διακοπές ρεύματος σε πολλές περιοχές, όπως στο Μίσιγκαν, στη Νέα Υόρκη, στο Οχάιο και στο Νιου Τζέρσεϊ, και εξακολούθησαν να εξαπλώνονται. Εν τέλει μια τεράστια – σχεδόν «τριγωνική» - περιοχή, που την οριοθετούσαν οι πόλεις Λάνσινγκ, Μίσιγκαν, Σολτ στε Μαρί, Οντάριο, η ακτή του Τζέιμς Μπέι, η Οττάβα, η Νέα Υόρκη, και το Τολέδο, έμεινε τελείως χωρίς ρεύμα. Σύμφωνα με την επίσημη ανάλυση του μπλακάουτ από τις κυβερνήσεις των ΗΠΑ και του Καναδά, περισσότερες από 508 μονάδες παραγωγής σε 265 σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έκλεισαν κατά τη διάρκεια της διακοπής ρεύματος. Στα λεπτά πριν από την εκδήλωση του μπλακάουτ, η NYISO μετέφερε 28.700 MW φορτίου. Στην κορύφωση της διακοπής ρεύματος, το φορτίο είχε πέσει στο 5716 MW, δηλαδή υπήρχε απώλεια φορτίου της τάξης του 80%!

Θα πρέπει να αναφερθεί πως εκείνη την ημέρα η θερμοκρασία ήταν πάνω από 31 ° C σε μεγάλο μέρος της πληγείσας περιοχής. Έτσι, και η θερμότητα έπαιξε ρόλο στο αρχικό γεγονός που προκάλεσε το ευρύτερο μπλακάουτ, διότι λόγω της υψηλής θερμοκρασίας υπήρχε αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας με τη λειτουργία των κλιματιστικών. Συνεπώς, από την αυξημένη ποσότητα ρεύματος καταπονήθηκαν οι γραμμές μεταφοράς



Εικόνα 1.4 Πολιτείες των Η.Π.Α. και του Καναδά χωρίς ηλεκτρισμό μετά το μπλακάουτ (2001)

Βασικές υπηρεσίες, τόσο στις Η.Π.Α. όσο και στον Καναδά παρέμειναν σε λειτουργία σε κάποιες περιοχές, ενώ και το τηλεφωνικό δίκτυο γενικά λειτούργησε, αν και μετά υπερφορτώθηκαν αρκετά κυκλώματά του λόγω της αυξημένης τηλεφωνικής κίνησης εξαιτίας του μπλακάουτ. Σε πολλές πόλεις το σύστημα ύδρευσης είχε χάσει πίεση, και μοιράζονταν στους πολίτες οδηγίες για μολυσμένο νερό. Η κινητή υπηρεσία διακόπηκε, καθώς τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ήταν

υπερφορτωμένοι με την αύξηση των κλήσεων - σημαντικοί πάροχοι κινητής τηλεφωνίας συνέχισαν να λειτουργούν σε κατάσταση αναμονής της ισχύος των γεννητριών. Με τη βοήθεια των γεννητριών μπακ-απ επίσης λειτούργησαν ραδιοτηλεοπτικοί σταθμοί, αν και αρκετοί έβγαιναν εκτός εκπομπής για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Σημειώθηκαν ακόμα αρκετές πυρκαγιές λόγω αναμμένων κεριών, και 10 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους λόγω αυτών. Το κόστος της κατάρρευσης του δικτύου έφτασε τα 6 δισεκατομμύρια \$. [2], [4]

A 1.3.7 Μπλακάουτ Ιταλίας – Italy blackout (2003)

Το μπλακάουτ στην Ιταλία το 2003 ήταν μια κατάρρευση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, που επηρέασε ολόκληρη την Ιταλία – εκτός από τα νησιά Σαρδηνία και Έλβα – για **12 ώρες**, καθώς και τμήμα της Ελβετίας κοντά στη Γενεύη για **3 ώρες**, στις 28 Σεπτεμβρίου 2003. Επηρέασε συνολικά **56 εκατομμύρια άτομα**, και ήταν η πιο σοβαρή διακοπή ρεύματος στην Ιταλία μέσα σε 70 χρόνια. Η γενική διακοπή ρεύματος, ωστόσο, δεν εξαπλώθηκε σε γειτονικές χώρες, όπως η Αυστρία, η Σλοβενία και η Κροατία, οι οποίες συνορεύουν με την Ιταλία.



Εικόνα 1.5 Η Ιταλία στο σκοτάδι μετά το μπλακάουτ (2003)

Η διακοπή ρεύματος έγινε περίπου στις 03:20, στις 28 Σεπτεμβρίου 2003. Οι αρχικές εκθέσεις από την πάροχο εταιρία ηλεκτρικής ενέργειας της Ιταλίας, ENEL, ανέφεραν ότι η γραμμή μεταφοράς υπερυψηλής τάσης η οποία παρείχε ηλεκτρική ενέργεια στην Ιταλία από την Ελβετία υπέστη ζημιές από τις καταιγίδες. Συνεπώς τέθηκε εκτός δικτύου, ενώ και οι δύο γραμμές μεταφοράς 400 kV μεταξύ της Γαλλίας και της Ιταλίας βγήκαν και αυτές εκτός λειτουργίας, λόγω αιφνίδιας αύξησης ζήτησης φορτίου. Οι αλυσιδωτές αντιδράσεις που ακολούθησαν, προκάλεσαν τη διαταραχή

της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος στην Ιταλία από τη Γαλλία και την Ελβετία. Η ENEL έχασε τον έλεγχο όλου του δικτύου στα επόμενα 4 δευτερόλεπτα, με τις γραμμές μεταφοράς να τίθενται εκτός λειτουργίας μία προς μία. Η ελβετική εταιρεία ηλεκτρισμού ATEL αργότερα συμφώνησε ότι ένα ηλεκτροφόρο καλώδιο μεταξύ της Ελβετίας και της Ιταλίας υπέστη βλάβες για λίγες ώρες.

Λόγω ενός καρναβαλιού που διεξαγόταν εκείνη την ημέρα στη Ρώμη, υπήρχαν πολλές χιλιάδες ανθρώπων στους δρόμους της πρωτεύουσας, και τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς λειτουργούσαν στις 03:20 που έγινε το μπλακάουτ. Έτσι, όταν εκδηλώθηκε το μπλακάουτ, αρκετές εκατοντάδες άνθρωποι είχαν παγιδευτεί στον υπόγειο σιδηρόδρομο. Σε συνδυασμό με τη δυνατή βροχή εκείνη την ημέρα, πολλοί άνθρωποι πέρασαν τη νύχτα να κοιμούνται σε σιδηροδρομικούς σταθμούς και στους δρόμους της Ρώμης. Σε όλη την Ιταλία, 110 δρομολόγια τρένων ακυρώθηκαν, με 30000 άτομα να έχουν αποκλειστεί σε αυτά. Όλες οι πτήσεις στην Ιταλία είχαν επίσης ακυρωθεί. Η αστυνομία περιέγραψε τις σκηνές ως χαοτικές, αλλά δεν υπήρξαν σοβαρά ατυχήματα.

Μετά από τρεις ώρες, η ηλεκτρική ενέργεια αποκαταστάθηκε στις βόρειες περιοχές. Στα περισσότερα μέρη ο ηλεκτρισμός αποκαταστάθηκε σταδιακά, και οι περισσότερες πόλεις είχαν ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια του επόμενου πρωινού. Μικρές διακοπές ρεύματος συνέχισαν να επηρεάζουν περίπου το 5% του πληθυσμού για τις επόμενες δύο ημέρες (29 έως 30 Σεπτέμβριος), όσο η εταιρεία ηλεκτρισμού ENEL συνέχιζε τις προσπάθειές της για την αποκατάσταση της τροφοδοσίας. [2], [4]

A 1.3.8 Μπλακάουτ Ελλάδας – Greek blackout (2004)

Στις 12 Ιουλίου 2004, δύο μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας – η μία στο Λαύριο και η δεύτερη στη Μεγαλόπολη – έκλεισαν λόγω βλάβης με διαφορά 12 ωρών. Αυτό οδήγησε σε αλυσιδωτό μπλακάουτ στο δίκτυο, οδηγώντας στην κατάρρευση του Νότιου Συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, και αφήνοντας χωρίς ρεύμα εκατομμύρια κατοίκους στη Νότια Ελλάδα.

Το μπλακάουτ οφειλόταν σε έλλειψη επαρκούς εγκατεστημένης ισχύος, δηλαδή σε έλλειψη εργοστασίων παραγωγής ρεύματος κοντά στα μεγάλα αστικά κέντρα της Αττικής και της Ανατολικής Στερεάς, καθώς το ρεύμα παράγεται στο Βορρά και μεταφέρεται στο Νότο. Παράλληλα, δεν λειτούργησε το αυτόματο σύστημα αποκοπής φορτίων, που σημαίνει ότι όλοι οι χειρισμοί από το ΔΕΣΜΗΕ έγιναν χειροκίνητα όταν εντοπίστηκε το πρόβλημα, και δεν είχαν γίνει έργα ενίσχυσης δικτύου. Ως αιτίες κατάρρευσης του δικτύου φωτογραφίζονται ακόμη η υπερβολική κατανάλωση ενέργειας λόγω καύσιμων και οι βλάβες σε υποσταθμούς. [4]

A 1.3.9 Μπλακάουτ Ιάβα – Μπαλί – Java-Bali Blackout (2005)

Το μπλακάουτ στα νησιά Ιάβα και Μπαλί της Ινδονησίας ήταν ένα από τα ισχυρότερα μπλακάουτ που έχουν συνέβη. Εκδηλώθηκε στις 18 Αυγούστου 2005,

επιηρέαζοντας περίπου **120 εκατομμύρια κατοίκους**, το μισό σχεδόν πληθυσμό της Ινδονησίας.

Η διακοπή ρεύματος έγινε στις 10:23 πμ, στο μεγαλύτερο μέρος των 2 νησιών. Η αιτία ήταν ότι μια γραμμή μεταφοράς υπερυψηλής τάσης – 500kV – μεταξύ Cilegon και Saguling, στη δυτική Ιάβα, τέθηκε εκτός λειτουργίας – αυτό οδήγησε σε αλυσιδωτά σφάλματα στο δίκτυο, κι έκλεισαν δύο μονάδες του σταθμού παραγωγής στο Paiton στην Ανατολική Ιάβα και έξι μονάδες του σταθμού Suralaya στη Δυτική Ιάβα. Η PT. PLN, η κρατική εταιρεία ηλεκτρισμού, επιβεβαίωσε ότι το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας παρουσίασε σφάλματα σε πολλά σημεία σε όλη την Ιάβα και στο γειτονικό νησί του Μπαλί, προκαλώντας ένα έλλειμμα εφοδιασμού της τάξης των 2700 MW, περίπου το μισό του αρχικού εφοδιασμού. Συνεπώς το δίκτυο των νησιών Ιάβα και Μπαλί κατέρρευσε.

Η Τζακάρτα, πρωτεύουσα της Ινδονησίας, έμεινε χωρίς ηλεκτρική ενέργεια, μαζί με τη γειτονική επαρχία του Μπάντεν. Υπήρχαν διακοπές ρεύματος σε περιοχές της κεντρικής, δυτικής και ανατολικής Ιάβα. Και άλλες πόλεις όπως η Σουραμπάγια – η δεύτερη μεγαλύτερη μετά την Τζακάρτα – έμειναν χωρίς ηλεκτρισμό.

Οι υπηρεσίες μεταφορών διακόπηκαν, και μια σειρά από διεθνείς και εσωτερικές πτήσεις καθυστέρησαν ή ακυρώθηκαν λόγω της διακοπής ρεύματος. Το ηλεκτρικό δίκτυο, ωστόσο, αποκαταστάθηκε πλήρως εντός 24 ωρών. [2], [4]

A 1.3.10 Μπλακάουτ Βραζιλίας-Παραγουάης – Brazil and Paraguay Blackout (2009)

Το μπλακάουτ στη Βραζιλία και στην Παραγουάη την Τρίτη 10 Νοεμβρίου του 2009, εκδηλώθηκε στις 22:15 το βράδυ. Επιηρέασε ολόκληρη την Παραγουάη, κι ένα πολύ μεγάλο μέρος της Βραζιλίας. Συνολικά **87 εκατομμύρια κάτοικοι** έμειναν χωρίς ηλεκτρισμό – τα 60 εκατομμύρια μόνο στη Βραζιλία.

Η αιτία ήταν τα έντονα καιρικά φαινόμενα – βροχές και ισχυροί άνεμοι – τα οποία οδήγησαν 3 μετασχηματιστές σε μία κομβική γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης στο να βραχυκυκλώσουν το κύκλωμα. Η γραμμή κόπηκε, οδηγώντας αυτόματα στην απώλεια 14GW ισχύος και στην παύση λειτουργίας του Itaipu Dam – μεγαλύτερος ΥΗΣ του κόσμου – για πρώτη φορά μετά από 25 χρόνια. Η κατάρρευση του συστήματος, η οποία επιηρέασε 18 από 26 πολιτείες της χώρας σύμφωνα με Βραζιλιάνους αξιωματούχους, έφερε χάος σε μεγαλουπόλεις συμπεριλαμβανομένων των Σάο Πάολο, Ρίο ντε Τζανέιρο, Μπέλο Οριζόντε, Κάμπο Γκράντε και Βιτόρια.

Χιλιάδες επιβάτες αποκλείστηκαν στα τρένα του μετρό, τα οποία σταμάτησαν απότομα να λειτουργούν, και τα λεωφορεία δεν κατάφεραν να αντιμετωπίσουν τον όγκο των επιβατών. Υπήρξαν εκτεταμένες αναφορές τροχαίων ατυχημάτων, καθώς δεν λειτουργούσε ο φωτισμός των δρόμων και οι ηλεκτρικοί σηματοδότες.

Η ηλεκτρική ενέργεια τελικά αποκαταστάθηκε σε πολλές περιοχές μέχρι τα μεσάνυχτα. Στο Σάο Πάολο όμως το ρεύμα δεν επανήλθε πριν τις 02:45. Σε αρκετές περιοχές το ρεύμα επανήλθε μετά από 6 ώρες. [2], [4]



Εικόνα 1.6 Μπλακάουτ Βραζιλίας-Παραγουάης (2009)

A 1.3.11 Μπλακάουτ Ινδίας – India Blackouts (2012)

Δύο πολύ σοβαρά μπλακάουτ εκδηλώθηκαν στις 30 και στις 31 Ιουλίου 2012, κι επηρέασαν το μεγαλύτερο μέρος της βόρειας και της ανατολικής Ινδίας. Το 1^ο μπλακάουτ στις 30 Ιουλίου επηρέασε πάνω από 300 εκατομμύρια ανθρώπους, και ήταν μέχρι εκείνη τη στιγμή το μεγαλύτερο μπλακάουτ που είχε συμβεί ποτέ – μεγαλύτερο ακόμα κι από το μπλακάουτ στην ίδια χώρα το 2001. Το 2^ο μπλακάουτ όμως που συνέβη την επόμενη ημέρα, αποτελεί μέχρι σήμερα τη **μεγαλύτερη διακοπή ρεύματος** σε εύρος που έχει συμβεί. Το μπλακάουτ αυτό άφησε χωρίς ηλεκτρισμό **620 εκατομμύρια κατοίκους**, δηλαδή το μισό πληθυσμό της Ινδίας ή αλλιώς το 9% του παγκόσμιου πληθυσμού, κι εξαπλώθηκε σε 22 πολιτείες στη βόρεια, ανατολική και βορειοανατολική Ινδία. Περίπου 32 GW παραγόμενης ισχύος απωλέσθηκαν. Η αποκατάσταση της ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή έγινε μεταξύ 31 Ιουλίου και 1 Αυγούστου.

Το ηλεκτρικό δίκτυο της Ινδίας – η 3^η χώρα παγκοσμίως σε παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας – είναι γενικά αναξιόπιστο, ενώ είχε ήδη υποστεί το μπλακάουτ του 2001. Γίνονται συχνά μικρές σε εύρος διακοπές ρεύματος, που μπορεί να διαρκέσουν και πάνω από 10 ώρες, ενώ το 25% του πληθυσμού – 300 εκατομμύρια περίπου – ζουν χωρίς ηλεκτρισμό. Εκτιμάται πως από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται χάνεται το 27% περίπου στις γραμμές μεταφοράς του δικτύου, ενώ η μέγιστη προσφορά ενέργειας υπολείπεται της ζήτησης κατά 9%.

Το πρώτο μπλακάουτ έγινε στις 02:48, όταν οι διακόπτες του κυκλώματος στη γραμμή υπερυψηλής τάσης 400 kV Bina-Gwalior τέθηκαν εκτός λειτουργίας. Με δεδομένο πως αυτή η γραμμή έπαιρνε τροφοδοσία από τον τμήμα μετάδοσης Agra-Bareilly, τέθηκαν και οι διακόπτες του σταθμού εκτός. Συνεπώς προκλήθηκαν αλυσιδωτά σφάλματα λειτουργίας σε όλο το δίκτυο. Όλοι οι μεγάλοι σταθμοί

ηλεκτρικής ενέργειας έκλεισαν στις περιοχές που επηρεάστηκαν, προκαλώντας μια εκτιμώμενη έλλειψη ισχύος των 32 GW. Εκπρόσωποι της εταιρείας παροχής ηλεκτρισμού ανέφεραν πως η αιτία ήταν ότι κάποιες περιοχές είχαν υπερβεί την ομαλή κατανάλωση ρεύματος κατά πολύ, οδηγώντας στη συνολική κατάρρευση του δικτύου.

Σιδηρόδρομοι και αρκετά αεροδρόμια παρέμειναν κλειστά μέχρι τις 08:00, ενώ στους δρόμους επικράτησε χάος, καθώς οι φωτεινοί σηματοδότες δεν λειτουργούσαν, ούτε και τα τρένα εντός της πόλης. Επίσης πολλά νοσοκομεία παρουσίασαν μεγάλες δυσκολίες στη λειτουργία τους, ενώ και οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας του νερού παρέμειναν κλειστές για αρκετές ώρες, κι εκατομμύρια άνθρωποι δεν μπορούσαν να πάρουν νερό από πηγάδια που λειτουργούσαν με ηλεκτρικές αντλίες. Επίσης υπήρξαν σοβαρές συνέπειες και για τις επιχειρήσεις – τα διυλιστήρια όμως της Ινδίας δεν εξαρτιόνταν από το δίκτυο, συνεχίζοντας κανονικά τη λειτουργία τους. Η διάρκεια αποκατάστασης του 80% περίπου του δικτύου διήρκησε πάνω από **15 ώρες**.

Την επόμενη ημέρα υπήρξε πάλι σφάλμα στο δίκτυο, εξαιτίας ενός προβλήματος ρελέ κοντά στο Ταζ Μαχάλ. Ως αποτέλεσμα, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές που επηρεάστηκαν τέθηκαν πάλι εκτός λειτουργίας, και 600 εκατομμύρια κατοίκων χωρίς ρεύμα.

Πάνω από 300 υπεραστικά επιβατηγά τρένα και γραμμές του προαστιακού σιδηροδρόμου τέθηκαν εκτός λειτουργίας εξαιτίας του μπλακάουτ. Οι περισσότερο πληγείσες σιδηροδρομικές ζώνες, στον απόηχο της κατάρρευσης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, ήταν η βόρεια, η βορειοκεντρική, η κεντροανατολική, και η ζώνη της ανατολικής ακτής. Επίσης τέθηκαν εκτός λειτουργίας τμήματα της ανατολικής, νοτιοανατολικής και κεντροδυτικής σιδηροδρομικής ζώνης. Το μετρό στο Νέο Δελχί ανέστειλε τη λειτουργία του και στις 6 γραμμές του, κι έπρεπε να εκκενωθούν τα τρένα που διέκοψαν στη μέση τη διαδρομή τους, κάτι που έγινε με τη βοήθεια των αρχών στο Νέο Δελχί. Θα πρέπει να αναφερθεί πως 200 ανθρακωρύχοι παγιδεύτηκαν υπόγεια στην ανατολική Ινδία καθώς δεν λειτουργούσαν οι ανελκυστήρες, αλλά οι αξιωματούχοι αργότερα είπαν ότι όλοι τους διασώθηκαν.

Συνολικά, οι περιοχές που επλήγησαν από το 2^ο μπλακάουτ, ήταν:

- Βόρειο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας: Delhi, Haryana, Himachal Pradesh, Jammu and Kashmir, Punjab, Rajasthan, Uttar Pradesh, Uttarakhand
- Ανατολικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας: Bihar, Jharkhand, Odisha, West Bengal
- Βορειοανατολικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας: Arunachal Pradesh, Assam, Manipur, Meghalaya, Mizoram, Nagaland, Sikkim [2], [4]



Εικόνα 1.7 Σιδηρόδρομοι Ινδίας μετά το μπλακάουτ (2012)

A 1.3.12 Μπλακάουτ Μπαγκλαντές – Bangladesh Blackout (2014)

Το Σάββατο 1 Νοεμβρίου του 2014, το Μπαγκλαντές υπέστη κατάρρευση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για σχεδόν 10 ώρες, επηρεάζοντας πάνω από **150 εκατομμύρια κατοίκους**. Η ηλεκτρική ενέργεια χάθηκε σε όλη τη χώρα περίπου στις 11:30 πμ., και αποκαταστάθηκε στις περισσότερες περιοχές στις 23:00 το βράδυ – **12 ώρες μετά** δηλαδή.

Η αιτία του μπλακάουτ ήταν ότι μια γραμμή μεταφοράς 400kV που ερχόταν από τη γειτονική Ινδία, φέρνοντας από εκεί ηλεκτρική ενέργεια της τάξης των 445 MW, τέθηκε εκτός λειτουργίας. Η βλάβη αυτή στη γραμμή μεταφοράς, προκάλεσε αλυσιδωτά σφάλματα σε όλο το δίκτυο του Μπαγκλαντές, με τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τους υποσταθμούς να κλείνουν, προκαλώντας το πανεθνικό αυτό μπλακάουτ.

Η εταιρία πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας Ltd στο Μπαγκλαντές επανεκκίνησε κάποιες από τις μονάδες παραγωγής, οδηγώντας σε αποκατάσταση της ηλεκτρικής ενέργειας σε κάποιες περιοχές για μερικές ώρες – επειδή όμως η λειτουργία των μονάδων αυτών δεν διεξαγόταν ομαλά, οδήγησε πάλι στο κλείσιμό τους. Ανώτατα στελέχη της Ltd έλεγαν ότι θα χρειαστούν πάνω από 12 ώρες για να επανέλθει το δίκτυο στην Ντάκα, πρωτεύουσα της χώρας με πάνω από 10 εκατομμύρια κατοίκους.

Τα νοσοκομεία στη Ντάκα, καθώς και το διεθνές αεροδρόμιο συνέχισαν κανονικά τη λειτουργία τους, με τη βοήθεια εφεδρικών γεννητριών. Πολλές όμως ήταν οι επιχειρήσεις που αναγκάστηκαν να μη λειτουργήσουν, καθώς και τα περισσότερα εργοστάσια. Οι μεγάλες πόλεις ερήμωσαν μέχρι το απόγευμα, καθώς όλα τα καταστήματα είχαν κλείσει, ενώ μέσα σε αυτές τις λίγες ώρες παρατηρήθηκε απότομη αύξηση στην τιμή κεριών και κηροζίνης.

Σε συνεργασία και με την Ινδία, το δίκτυο επανήλθε σε λειτουργία μετά τα μεσάνυχτα. [5]

A 1.3.13 Μπλακάουτ Τουρκίας – Turkey Blackout (2015)

Το μπλακάουτ που έπληξε την Τουρκία εκδηλώθηκε στις 31 Μαρτίου 2015, και ήταν το χειρότερο μέσα σε 15 χρόνια. Εκδηλώθηκε σχεδόν και στις 81 επαρχίες της χώρας, επηρεάζοντας **70 εκατομμύρια κατοίκους**. Μόνο οι επαρχίες Van και Hakkarî δεν επηρεάστηκαν καθόλου, καθώς τροφοδοτούνται από το δίκτυο του Ιράν.

Αρχικά κυκλοφόρησαν διάφορα σενάρια πως το μπλακάουτ οφειλόταν σε τρομοκρατική επίθεση. Η πραγματική όμως αιτία της πρόκλησης του μπλακάουτ, σύμφωνα με τον φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου στην Τουρκία TEIAS, ήταν ο συνδυασμός των παρακάτω παραγόντων:

- η υπερπαροχή υδροηλεκτρικής παραγωγής από τους ΥΗΣ στην ανατολική Τουρκία, που προκάλεσε ένα «κύμα» φορτίου
- η μειωμένη θερμική παραγωγή, καθώς οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί στο δυτικό τμήμα της χώρας βγήκαν εκτός λειτουργίας, είτε για προγραμματισμένη συντήρηση, ή διότι η ακριβής τιμή έπεσε κάτω από την τιμή των 53,64€ / MWh- το νεκρό σημείο για την παραγωγή φυσικού αερίου
- η κακή συντήρηση στις γραμμές μεταφοράς. Την ημέρα εκείνη, κάποιες από τις κομβικές γραμμές του δικτύου που συνδέουν την ανατολική Τουρκία με τις δυτικές επαρχίες της βρίσκονταν σε συντήρηση. Έτσι, η TEIAS δεν μπορούσε να τροφοδοτήσει με ηλεκτρισμό τη δυτική Τουρκία.

Τα δεδομένα αυτά προκάλεσαν σφάλματα ντόμινο σε όλο το σύστημα του ηλεκτρικού δικτύου της χώρας, ξεκινώντας από την Κωνσταντινούπολη, επηρεάζοντας ακόμη και τη διασύνδεση της Τουρκίας με το ηλεκτρικό δίκτυο της ΕΕ στα βουλγαρικά και ελληνικά σύνορα.

Στη χώρα προκλήθηκε χάος όσον αφορά τις μεταφορές. Στην Κωνσταντινούπολη και την Άγκυρα προκλήθηκαν τεράστια μποτιλιαρίσματα, καθώς οι σηματοδότες δεν λειτουργούσαν. Υπήρξαν εγκλωβισμοί ανθρώπων σε ασανσέρ, ενώ χιλιάδες αποκλείστηκαν στο μετρό της Κωνσταντινούπολης, της Άγκυρας και του Ιζμίρ – τα σωστικά συνεργεία όμως του κράτους τους απεγκλώβισαν. Και το μετρό του Μαρμαρά επίσης, που περνά κάτω από το Βόσπορο, ακινητοποιήθηκε. Να σημειωθεί ότι στην πόλη Ιζμίτ, κοντά στην Κωνσταντινούπολη, η οποία είναι μια εντελώς βιομηχανοποιημένη πόλη, τα περισσότερα σχεδόν εργοστάσια και εργαστήρια δεν κατόρθωσαν να λειτουργήσουν.

Τρεις ώρες μετά το χτύπημα του μπλακάουτ, τα μέσα μαζικής μεταφοράς τέθηκαν πάλι σε λειτουργία, ενώ και στο μεγαλύτερο κομμάτι των μεγαλουπόλεων επανερχόταν σταδιακά. Σε πολλούς οικισμούς όμως η ηλεκτρική ενέργεια επανήλθε μετά από 8 ώρες. [4], [6]



Εικόνα 1.8 Στο μετρό της Κωνσταντινούπολης μετά το μπλακάουτ (2015)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ (CONTROLLED ISLANDING)

A 2.1 Εισαγωγή

Αν και τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν σχεδιαστεί ώστε να είναι ανθεκτικά και ανεκτικά απέναντι σε διαταραχές, μπορούν τελικά να γίνουν ασταθή κατά τη διάρκεια σοβαρών σφαλμάτων. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα όταν το σύστημα λειτουργεί κοντά στα όρια ευστάθειάς του. Η προέλευση των διαταραχών που προκαλούν σφάλματα στο δίκτυο περιλαμβάνει σεισμούς, τυφώνες, τα ανθρώπινα σφάλματα κατά τη λειτουργία, αστοχίες του συστήματος ελέγχου, κρυφές βλάβες στο σύστημα προστασίας, κακόβουλες επιθέσεις, κ.λπ. Οι διαταραχές μπορεί να προκαλέσουν αστάθεια του συστήματος, και ακόμη χειρότερα να οδηγήσουν σε καταστροφικά μπλακάουτ, όπως περιγράφηκαν στο **Κεφάλαιο 1**.

Οι μελέτες δείχνουν ότι πολλά μπλακάουτ θα μπορούσαν να είχαν αποφευχθεί και σημαντικές απώλειες θα μπορούσαν να είχαν περιοριστεί, εάν είχε πραγματοποιηθεί **ελεγχόμενη νησιδοποίηση** του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, πριν ή και μετά από ένα σοβαρό σφάλμα. Η ελεγχόμενη νησιδοποίηση, που ονομάζεται επίσης αμυντική νησιδοποίηση ή ελεγχόμενος διαχωρισμός/διάσπαση του συστήματος, είναι διαφορετική από την παθητική – μη ελεγχόμενη νησιδοποίηση. Η παθητική νησιδοποίηση δεν είναι ένα ελεγχόμενο φαινόμενο, και συνήθως προκύπτει από αστοχία της προστασίας. Αντίθετα, η ελεγχόμενη νησιδοποίηση σκόπιμα χωρίζει ένα διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορες νησίδες, ανοίγοντας επιλεγμένες γραμμές μεταφοράς. Εάν η ελεγχόμενη νησιδοποίηση – μαζί με την αναγκαία αποκοπή φορτίου – αναπτυχθεί σωστά πριν η κατά τη διάρκεια επικίνδυνων καταστάσεων – προτού δηλαδή τεθεί εκτός ελέγχου η κατάσταση -, παρόλο που το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θα λειτουργεί σε μια λιγότερο ευέλικτη και ίσως υποβαθμισμένη κατάσταση, οι καταστροφικές ζημιές μπορούν να αποφευχθούν, διότι το μπλακάουτ απομονώνεται και εμποδίζεται η περαιτέρω εξάπλωσή του στο δίκτυο.

Στην πράξη οι περισσότερες ενέργειες νησιδοποίησης βασίζονται στην εμπειρία των μηχανικών και στερούνται τόσο θεωρητικής ανάλυσης όσο και πραγματικής επαλήθευσης. Στόχος είναι η ανάπτυξη ενός προσαρμοστικού σχεδίου νησιδοποίησης που θα λαμβάνει υπόψη τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος και την τοπολογία του δικτύου. Βάσει αυτής της προσέγγισης το σύστημα διαιρείται σε μικρά κομμάτια μικρότερης δυναμικότητας με το πλεονέκτημα όμως ότι μπορεί να αποκατασταθεί γρήγορα στην κανονική κατάσταση λειτουργίας.

Για το σχηματισμό των νησίδων είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράμετροι:

- Οι αποκλίσεις τη Συχνότητας. Η ανισορροπία ενεργού ισχύος μεταξύ παραγωγής και φορτίου οδηγεί τη συχνότητα να αποκλίνει από την ονομαστική τιμή της. Οι χαμηλές συχνότητες προκαλούν σημαντικότερα προβλήματα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας από τις υψηλές. Επομένως πρέπει ιδιαίτερα να προσεχθούν οι νησίδες που θα σχηματισθούν με φορτίο μεγαλύτερο από την παραγωγή.

- Ευστάθεια Τάσης. Υπό ορισμένες συνθήκες το σύστημα μέσα σε μια από τις σχηματιζόμενες νησίδες μπορεί να καταρρεύσει λόγω διαδοχικών συμβάντων που ξεκινούν από αστάθεια τάσης. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να θεωρείται και η ισορροπία άεργου ισχύος μέσα στη νησίδα.
- Δυνατότητα αποκατάστασης από black-start. Όλα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούν κάποιες διαδικασίες προκειμένου να επανεκκινήσουν, στην περίπτωση που ολόκληρο ή μέρος του συστήματος βγει εκτός λειτουργίας. Η διαδικασία της αποκατάστασης αναφέρεται ως black-start. Περιλαμβάνει τις νησίδες του συστήματος που ξεκινούν ανεξάρτητα και βαθμιαία επανασυνδέονται ώστε να αποκαταστήσουν την ακεραιότητα του συστήματος.
- Ευελιξία. Η προσέγγιση της νησιδοποίησης πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να παρέχει στο χειριστή του συστήματος μια λογική λύση χωρίς μεγάλη παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα. Παράλληλα όμως θα πρέπει να είναι ικανή να αποκτά και να χρησιμοποιεί πληροφορίες από ανθρώπινη αξιολόγηση και πρόγνωση για να βελτιώνει τις επιδόσεις της.

Η ελεγχόμενη νησιδοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιμετωπιστούν διάφορες ακραίες καταστάσεις του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως μη αποσβεννύμενες ταλαντώσεις ή η κατάρρευση της τάσης, που οδηγούν σε αλυσιδωτά σφάλματα εντός του δικτύου. [8], [15]

A 2.2 Περιορισμοί στην Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση

Για να δημιουργηθούν σταθερές νησίδες μετά την εκτέλεση στρατηγικών ελεγχόμενης νησιδοποίησης, πρέπει η λύση της νησιδοποίησης να πληρεί κάποιους περιορισμούς. Τέτοιοι περιορισμοί, μερικοί από τους οποίους αναφέρθηκαν στην ενότητα της εισαγωγής, είναι οι εξής για κάθε νησίδα:

- Ομάδες συναφών γεννητριών (generator coherency groups)
- Ισοζύγιο παραγωγής – κατανάλωσης ισχύος
- Τήρηση θερμικών ορίων γραμμών
- Σταθερότητα τάσης με επαρκείς ελέγχους τάσης
- Μεταβατική σταθερότητα
- Επάρκεια μονάδων blackstart ικανότητας (BS)
- Μονοπάτια εκκίνησης, ώστε να είναι σε θέση να εκκινήσουν οι μη blackstart μονάδες του συστήματος
- Τα σημεία ένωσης των νησίδων να μπορούν να συγχρονιστούν με τις παρακείμενες νησίδες
- Οι νησίδες να μπορούν να ανταλλάσσουν μεταξύ τους πληροφορίες

Όπως γίνεται αντιληπτό, είναι πολύ περίπλοκο να βρεθεί μια λύση νησιδοποίησης, η οποία να ικανοποιεί ταυτόχρονα όλους αυτούς του περιορισμούς, ή ακόμα και να επιβεβαιωθεί εάν υπάρχει τέτοια λύση. Θεωρώντας λοιπόν μόνο ένα υποσύνολο αυτών των περιορισμών, όπως η ισορροπία παραγωγής – φορτίου και η συνοχή γεννητριών εντός κάθε νησίδας, μπορούμε να εξάγουμε μια σειρά από εφικτές υποψηφίες λύσεις νησιδοποίησης. Αυτό το σύνολο των υποψηφίων λύσεων

μπορεί να συνδυαστεί με άλλα διορθωτικά μέτρα, ώστε τελικά να εξευρεθεί η τελική λύση ελεγχόμενης νησιδοποίησης για το δίκτυο, η οποία θα ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς.

Με βάση τα παραπάνω, οι αλγόριθμοι που θα αναλυθούν στην εργασία παράγουν λύση νησιδοποίησης για όλο το δίκτυο, έχοντας ως αντικειμενική συνάρτηση την τήρηση του ισοζυγίου ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες. Βασικό περιορισμό των λύσεων νησιδοποίησης αποτελούν οι ομάδες των συναφών γεννητριών.

Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς μειώνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος της ελεγχόμενης νησιδοποίησης ενός ΣΗΕ. Η χρησιμότητά του είναι ιδιαίτερη όταν ασχολούμαστε με μεγάλα δίκτυα. [9], [10]

A 2.3 Θεωρία των Γράφων

Το πρόβλημα ελεγχόμενης νησιδοποίησης, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πρόβλημα περιορισμένης βελτιστοποίησης, το οποίο μετατρέπεται σε πρόβλημα κοπής γράφου (graph-cut problem).

Η θεωρία των γράφων είναι ένα πεδίο των μαθηματικών με εφαρμογές σε μία πληθώρα επιστημονικών πεδίων όπως είναι η πληροφορική, η χημεία, η επιστήμες μηχανικών, η κοινωνιολογία κ.α. Κάποιες βασικές έννοιες που αφορούν τη θεωρία των γράφων, είναι οι εξής:

- Γράφος θα μπορούσε να ορισθεί η οπτική αναπαράσταση των σχέσεων που αναπτύσσουν ορισμένες ποσότητες ή αντικείμενα, σχεδιασμένα σύμφωνα με ένα σύνολο αξόνων. Ένας γράφος $G=(V,E)$ αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων (vertices ή nodes) V και ένα σύνολο ακμών (edges) E .
- Κάθε ακμή θα μπορούσε να οριστεί ως ένα μη διατεταγμένο ζεύγος δύο κόμβων $E \subseteq V \times V$.
- $e=(u,v) \in E$, συμβολίζουμε μία πλευρά
- Ένας γράφος $G=(V,E)$ μπορεί εναλλακτικά να αναπαρασταθεί από έναν πίνακα γειτνίασης (adjacency matrix). Ο πίνακας αυτός έχει μέγεθος $|V|^2$ και κάθε στοιχείο του πίνακα $a_{i,j}$ (όπου $i,j < |V|$) ορίζεται ως
$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{αν } (i,j) \in E \\ 0, & \text{σε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$
- Ως απόσταση δύο κόμβων ορίζεται το συντομότερο μονοπάτι που υπάρχει ανάμεσα τους. Ένα μονοπάτι είναι απλό όταν περνάει ακριβώς μία φορά από κάθε κόμβο ενώ κυκλικό, ονομάζεται όταν έχει ως αρχή και τέλος τον ίδιο κόμβο.
- Μη κατευθυνόμενος γράφος (undirected graph) είναι ο γράφος για τον οποίο ισχύει (u,v) αν και μόνο αν (v,u)
Οι κορυφές u και v λέγονται άκρα της (u,v)
Οι κορυφές u και v λέγονται γείτονες αν υπάρχει η (u,v) .
Αν η u έχει d γείτονες τότε λέμε πως έχει βαθμό d
- Σε έναν κατευθυνόμενο γράφο (directed graph) τα (u,v) και (v,u) δεν είναι ισοδύναμα.

Στην κατευθυνόμενη πλέον πλευρά (u,v) η κορυφή u λέγεται πηγή(origin) και η v προορισμός (destination)

- Γράφος με βάρη: Σε έναν γράφο με βάρη θεωρούμε μία συνάρτηση βάρους $w : E \rightarrow \mathcal{R}$

Το w μπορεί να μοντελοποιεί βάρος, απόσταση, μήκος, χρόνο, κόστος, χωρητικότητα κ.α. (γενικά επιτρέπονται και αρνητικά βάρη).

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

$$d_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (2.3.1)$$

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

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

Στη θεωρία των γράφων λοιπόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα *μη κατευθυνόμενο μοντέλο* $G (V, V_G, E, W)$, για να περιγράψει ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με m αριθμό γεννητριών και n αριθμό ζυγών. Σε αυτό το μοντέλο γράφου, το σύνολο των κόμβων V και το σύνολο των ακμών E , με στοιχεία e_{ij} ($i,j = 1 \dots n$) υποδηλώνουν του ζυγούς και τις γραμμές μεταφοράς αντιστοίχως. Το V_G είναι υποσύνολο του συνόλου των κόμβων V , και περιέχει μόνο τους ζυγούς που είναι απευθείας συνδεδεμένοι με γεννήτριες. Ο **πίνακας βαρών** W παρουσιάζει το σύνολο των βαρών στους κλάδους του γράφου. Ο W , που λέγεται και **πίνακας γεινίασης με βάρη** (adjacency matrix) ή αλλιώς **πίνακας ομοιότητας** ορίζεται ο πίνακας

$$W = (w_{ij})_{i,j=1,\dots,n} \quad (2.3.2)$$

Αν $w_{ij}=0$, τότε σημαίνει ότι οι κορυφές v_i και v_j δεν συνδέονται με κάποια ακμή μεταξύ τους. Επίσης, επειδή θεωρήσαμε ότι ο γράφος που χρησιμοποιούμε είναι μη κατευθυνόμενος (undirected graph) θα πρέπει να ισχύει ότι $w_{ij} = w_{ji}$.

Το σύνολο των ακμών οι οποίες απομακρύνονται, ώστε να διαχωριστούν μεταξύ τους οι υπογράφοι που αντιστοιχούν σε κάθε νησίδα και να προκύψει η λύση νησιδοποίησης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ονομάζεται **διαχωριστικό σύνολο(cutset)**. Το άθροισμα των βαρών των ακμών μέσα στο διαχωριστικό σύνολο ονομάζεται **κοπή(cut)** και ορίζεται ως εξής:

$$\text{cut}(V_1, V_2) = \sum_{i \in V_1, j \in V_2} w_{ij} \quad (2.3.3)$$

όπου V_1 το σύνολο των ακμών του υπογράφου G_1 που αντιστοιχεί στην 1η νησίδα, και V_2 το αντίστοιχο σύνολο για τη 2η νησίδα.

Ως επί το πλείστον, στους αλγορίθμους νησιδοποίησης που θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία θα εφαρμοστεί η *διχοτόμηση (bisection)* του αρχικού γράφου G σε 2 υπογράφους $G_1(V_1, V_{G1}, E_1, W_1)$ και $G_2(V_2, V_{G2}, E_2, W_2)$. Τα υποσύνολα V_1 και V_2 πρέπει να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, δηλαδή

$$V_1 \cap V_2 = \emptyset \text{ και } V_1 \cup V_2 = V \quad (2.3.4)$$

Η ίδια ακριβώς λογική ισχύει και για τα υποσύνολα V_{G1} και V_{G2} τα οποία είναι δύο ανεξάρτητα υποσύνολα του συνόλου V_G , και ταυτόχρονα αποτελούν και υποσύνολα των συνόλων V_1 και V_2 αντίστοιχα.

Συνεπώς, το πρόβλημα ελεγχόμενης νησιδοποίησης αντιστοιχεί σε ένα αντίστοιχο **πρόβλημα περικοπής γράφου (graph-cut problem)** στο οποίο πρέπει να υπολογιστεί το cutset που διχοτομεί το γράφο με το ελάχιστο δυνατό cut. Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό, η λύση νησιδοποίησης για τα μεγάλα δίκτυα μπορεί να απαιτεί περισσότερες από 2 νησίδες – αυτό μπορεί να επιτευχθεί με **αναδρομική διχοτόμηση (recursive bisection)**. [9], [11]

A 2.4 Ομάδες συναφών γεννητριών – Coherent generator groups

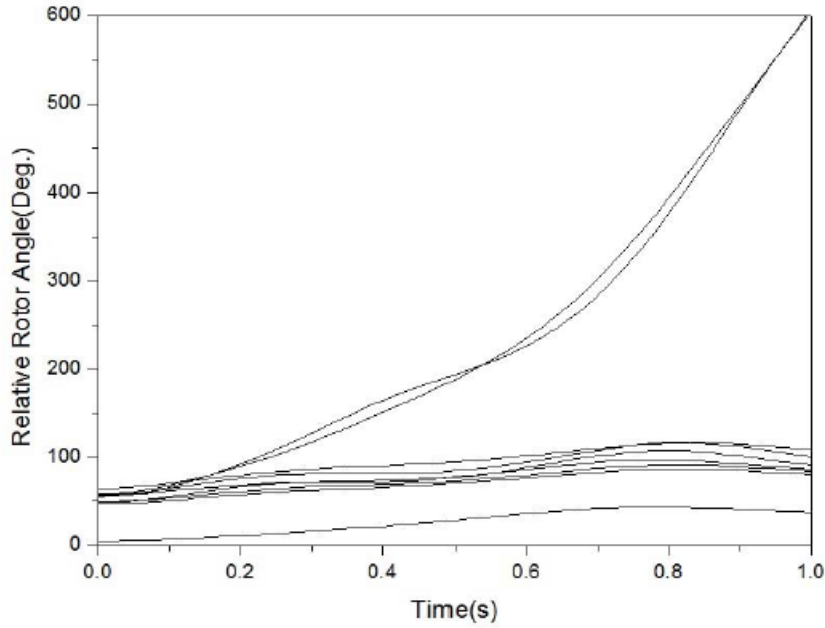
Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να ξεκινήσει μια διαταραχή λόγω μη αποσβεννύμενων ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Οι ταλαντώσεις αυτές μπορούν να οδηγήσουν τις γεννήτριες στο να χάσουν τη συνοχή μεταξύ τους και να αποσυγχρονιστούν.

Για να δημιουργηθούν λοιπόν σταθερές νησίδες, **οι γεννήτριες εντός κάθε νησίδας πρέπει να είναι συγχρονισμένες**. Γενικά έχει παρατηρηθεί ότι σε ένα μεγάλο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, μετά από κάποια διαταραχή, κάποιες γεννήτριες έχουν την τάση να ταλαντώνονται μαζί. Απαιτείται λοιπόν οι γεννήτριες με παρόμοια καμπύλη ταλάντωσης να ομαδοποιούνται σε μια συνεκτική ομάδα. Για κάθε ομάδα γεννητριών που δομείται με αυτό τον τρόπο, οι γεννήτριες πρέπει να έχουν ίδια ή παρόμοια δυναμικά χαρακτηριστικά ρότορα. Συγκεκριμένα, για κάθε 2 γεννήτριες i και j μέσα σε μια ομάδα συνεκτικών γεννητριών, ισχύει ότι:

$$\max_{t \in [0, \tau]} |\delta_i(t) - \delta_j(t)| \leq \epsilon \quad (2.4.1)$$

όπου $t \in [0, \tau]$ υποδεικνύει το χρονικό διάστημα, ϵ είναι μια δεδομένη τιμή κατωφλίου, και τα $\delta_i(t)$, $\delta_j(t)$ είναι οι γωνίες ρότορα των γεννητριών i και j αντίστοιχα, τη χρονική στιγμή t . Με βάση τις πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο, ο γρήγορος και ακριβής προσδιορισμός των συνεκτικών γεννητριών είναι ένα κρίσιμο βήμα για την ελεγχόμενη νησιδοποίηση μετά από σοβαρές διαταραχές.

Στην εικόνα 2.1 αποτυπώνεται ξεκάθαρα γιατί είναι απαραίτητος ο περιορισμός των ομάδων συναφών γεννητριών:



Εικόνα 2.1 Ασταθής νησίδα με μη συγχρονισμένες γεννήτριες

Στην παραπάνω εικόνα, αποτυπώνονται οι σχετικές γωνίες ρότορα των γεννητριών μιας νησίδας ενός συστήματος μετά τη διαταραχή. Όπως φαίνεται, οι γωνίες ρότορα δύο γεννητριών αποκλίνουν από τις γωνίες των υπόλοιπων γεννητριών, αδυνατώντας έτσι να συγχρονιστούν με τις υπόλοιπες γεννήτριες. Έτσι, χάνουν το συγχρονισμό τους με τις υπόλοιπες γεννήτριες, και η νησίδα οδηγείται σε αστάθεια. [12]

A 2.5 Αντικειμενική Συνάρτηση (objective function) του αλγορίθμου Νησιδοποίησης

Η αντικειμενική συνάρτηση (objective function) της μεθόδου ελεγχόμενης νησιδοποίησης μπορεί να έχει 2 μορφές. Η πρώτη είναι η *ελάχιστη ανισορροπία ισχύος (minimum power imbalance)* και η δεύτερη η *τήρηση του ισοζυγίου ισχύος (minimum power – flow disruption)*. Κάθε αντικειμενική συνάρτηση παράγει μια διαφορετική λύση με διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Οι παρακάτω συναρτήσεις εκφράζουν τις 2 αντικειμενικές συναρτήσεις:

$$\min_{V_1, V_2 \subseteq V} \left(\left| \sum_{i \in V_1, j \in V_2} P_{ij} \right| \right) \quad (2.5.1)$$

$$\min_{V_1, V_2 \subseteq V} \left(\sum_{i \in V_1, j \in V_2} |P_{ij}| \right) \quad (2.5.2)$$

όπου η (2.5.1) αντιστοιχεί στην ελάχιστη ανισορροπία ισχύος, και η (2.5.2) στην τήρηση του ισοζυγίου ισχύος. Η P_{ij} αντιστοιχεί στην ενεργό ισχύ της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών i και j .

Η χρήση της ελάχιστης ανισορροπίας ισχύος ως αντικειμενική συνάρτηση, δημιουργεί νησίδες με παρόμοιο επίπεδο φορτίου και παραγωγής, δηλαδή μια καλή ισορροπία φορτίου – παραγωγής. Αυτή η ιδιότητα της αντικειμενικής συνάρτησης ελαχιστοποιεί την ποσότητα του φορτίου που πρέπει να απορριφθεί μετά τη διάσπαση του συστήματος σε νησίδες.

Η χρήση της τήρησης του ισοζυγίου ισχύος ως αντικειμενική συνάρτηση δημιουργεί νησίδες με την ελάχιστη μεταβολή σε σχέση με το μοτίβο της ροής ισχύος πριν τη διαταραχή. Αυτή η ιδιότητα της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιώνει την μεταβατική σταθερότητα των νησίδων, μειώνει την πιθανότητα υπερφόρτωσης των γραμμών μεταφοράς εντός μιας νησίδας, και διευκολύνει την ενδεχόμενη επανένταξη των νησίδων στο υπόλοιπο σύστημα.

Κατά την προσπάθεια να διασφαλιστεί η σταθερότητα μετά το διαχωρισμό του συστήματος σε νησίδες, μεγαλύτερη προτεραιότητα πρέπει να έχει η μεταβατική σταθερότητα από ότι η ισορροπία παραγωγής – φορτίου. Αυτό εξηγείται από το ότι μια νησίδα με αρνητικό περιθώριο σταθερότητας, έχοντας όμως ταυτόχρονα καλή ισορροπία παραγωγής – φορτίου, θα καταρρεύσει. Αν όμως ισχύει το αντίθετο, δηλαδή μια νησίδα να έχει θετικό περιθώριο σταθερότητας και μια σχετική ανισορροπία παραγωγής – φορτίου, μπορεί να σταθεροποιηθεί μέσω της απόρριψης φορτίου.

Με βάση αυτές τις ιδιότητες των αντικειμενικών, προτιμάται η τήρηση του ισοζυγίου ισχύος (minimum power – flow disruption). Πέραν των όσων προείπαμε, η συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση έχει επίσης το πρόσθετο πλεονέκτημα της μείωσης της πολυπλοκότητας του προβλήματος νησιδοποίησης. Επίσης, το ισοζύγιο αέργου ισχύος θεωρείται ότι μπορεί να επιτευχθεί μέσω τοπικής αντιστάθμισης με πυκνωτικές συστοιχίες.

A 2.6 Φασματική Ομαδοποίηση (Spectral Clustering)

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 των πινάκων Laplace. [11]

A 2.6.1 Ιδιοτιμές και Ιδιοδιανύσματα

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

$$Ax = \lambda x \quad (2.6.1)$$

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

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (2.6.2)$$

όπου I είναι ο ταυτοτικός πίνακας. Τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές είναι γραμμικά ανεξάρτητα, δηλαδή, σε ένα n -διάστατο χώρο ο γραμμικός μετασχηματισμός A δεν μπορεί να έχει παραπάνω από n ιδιοδιανύσματα με διαφορετικές ιδιοτιμές. Η πολλαπλότητα μιας ιδιοτιμής είναι ο αριθμός των γραμμικά ανεξάρτητων ιδιοδιανυσμάτων που έχουν την ίδια ιδιοτιμή. Ένα ιδιοδιάνυσμα ενός γράφου G ορίζεται ως ένα ιδιοδιάνυσμα του πίνακα ομοιότητας του γράφου ή ως ένα ιδιοδιάνυσμα του πίνακα Laplace του γράφου αυτού. [11]

A 2.6.2 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 :

$$L = D - W \quad (2.6.3)$$

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

- Ο πίνακας L είναι συμμετρικός και πάντα θετικά ημιορισμένος (δηλαδή όλες οι ιδιοτιμές του είναι πραγματικές με θετικές ή ίσες με μηδέν τιμές).
- Ο αριθμός των φορών που εμφανίζεται η ιδιοτιμή 0 ισούται με τον αριθμό των συνδεδεμένων συνιστωσών του γράφου. Ο γράφος G είναι συνδεδεμένος αν δύο οποιοσδήποτε κορυφές του μπορούν να συνδεθούν μέσω ενός μονοπατιού όπου όλοι οι ενδιάμεσοι σταθμοί ανήκουν και αυτοί στον G .
- Η ιδιοτιμή λ_i είναι μεγαλύτερη από το 0 αν και μόνο αν ο γράφος G είναι συνδεδεμένος
- Η μικρότερη ιδιοτιμή του είναι η μηδενική [11]

A 2.6.3 Τύποι Φασματικής Ομαδοποίησης

Η φασματική ομαδοποίηση είναι εργαλείο που χρησιμοποιείται για να λύσει το πρόβλημα περικοπής γράφου – graph-cut, που αναφέρθηκε στην ενότητα A 2.3. Σε αυτή την υποενότητα, θα εισαχθούν τρεις τύποι φασματικής ομαδοποίησης: η κανονικοποιημένη, η μη – κανονικοποιημένη και η υπό περιορισμούς.

Μη Κανονικοποιημένη Φασματική Ομαδοποίηση (Un-normalized spectral clustering)

Η μη-κανονικοποιημένη φασματική ομαδοποίηση, ομαδοποιεί τους κόμβους ενός γράφου σε δύο υποσύνολα, με βάση τον Λαπλασιανό Πίνακα L που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα και ορίζεται από τη σχέση (2.6.3).

Με τον τρόπο που ορίσαμε τους πίνακες D και W, είναι και οι 2 συμμετρικοί πίνακες για κάθε μη κατευθυνόμενο γράφο.

Ο αλγόριθμος της μη κανονικοποιημένης φασματικής ομαδοποίησης – για την περίπτωση της διχοτόμησης (bisection) ενός γράφου – μπορεί να εκτελεστεί με τα παρακάτω βήματα:

- 1) Υπολογισμός των 2 πρώτων ιδιοδιανυσμάτων της μήτρας Laplace (όπου θ_1 και θ_2 τα ιδιοδιανύσματα)
- 2) Έστω $J \in \mathcal{R}^{n \times 2}$ ο πίνακας που περιέχει τα ιδιοδιανύσματα θ_1 και θ_2 ως στήλες. Έστω επίσης $y_i \in \mathcal{R}^2$ το διάνυσμα το οποίο αντιστοιχεί στη γραμμή i του πίνακα J
- 3) Ομαδοποίηση των κόμβων y_i σε ομάδες c_1 και c_2 με χρήση κατάλληλου αλγορίθμου ομαδοποίησης

Δυστυχώς, η λύση της διχοτόμησης του γράφου χρησιμοποιώντας μη κανονικοποιημένη φασματική ομαδοποίηση συχνά αποτελεί τον απλό διαχωρισμό ενός κόμβου από τον υπόλοιπο γράφο. Αυτή η μορφή προφανώς δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή ως λύση νησιδοποίησης. [9]

Κανονικοποιημένη Φασματική Ομαδοποίηση (Normalized spectral clustering)

Η Κανονικοποιημένη φασματική ομαδοποίηση χρησιμοποιεί το άθροισμα των βαρών των κόμβων μέσα σε κάθε υπογράφο ως προϋπόθεση ισορροπίας, ώστε να αποτρέψει τον απλό διαχωρισμό ενός κόμβου από τον υπόλοιπο γράφο με εφαρμογή απλής φασματικής ομαδοποίησης. Συνδέεται με την έννοια της κανονικοποιημένης κοπής (Ncut) που ορίζεται ως εξής:

$$Ncut(V_1, V_2) = \frac{cut(V_1, V_2)}{weig(V_1)} + \frac{cut(V_1, V_2)}{weig(V_2)} \quad (2.6.4)$$

όπου

$$weig(V_1) = \sum_{i \in V_1} D_i \quad (2.6.5)$$

Η σχέση (2.6.5) αποτυπώνει το συνολικό άθροισμα των βαρών των κόμβων στον υπογράφο G_1 . Ομοίως ορίζεται και το $weig(V_2)$, για τον υπογράφο G_2 . Η συμπερίληψη των βαρών των κόμβων ως προϋπόθεση ισορροπίας ενεργεί ώστε να ελαττωθεί η πιθανότητα δημιουργίας υπογράφου με πολύ χαμηλό άθροισμα βαρών. Η μέθοδος της κανονικοποιημένης φασματικής ομαδοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να χωρίσει τον γράφο σε υπογράφους, με την *ελάχιστη τιμή στον τύπο Ncut*.

Στην περίπτωση της διχοτόμησης, αυτό μπορεί να επιτευχθεί ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

- 1) Υπολογισμός των 2 πρώτων ιδιοδιανυσμάτων θ_1, θ_2 του Γενικευμένου Ιδιοπροβλήματος $L\theta = \lambda D\theta$
- 2) Έστω $J \in \mathcal{R}^{n \times 2}$ ο πίνακας που περιέχει τα ιδιοδιανύσματα θ_1 και θ_2 ως στήλες. Έστω επίσης $y_i \in \mathcal{R}^2$ το διάνυσμα το οποίο αντιστοιχεί στη γραμμή i του πίνακα J
- 3) Ομαδοποίηση των κόμβων y_i σε ομάδες c_1 και c_2 με χρήση κατάλληλου αλγορίθμου ομαδοποίησης [9]

Φασματική ομαδοποίηση υπό περιορισμούς (Constrained spectral clustering)

Η φασματική ομαδοποίηση υπό περιορισμούς, είναι μέθοδος που χρησιμοποιείται για να διασφαλιστεί πως οι ασυγχρόνιστες γεννήτριες θα ανήκουν σε διαφορετική νησίδα μετά την εφαρμογή της ελεγχόμενης νησιδοποίησης. Αποτελεί μια αποτελεσματική μέθοδο για την επίλυση των προβλημάτων ομαδοποίησης με ζεύγη περιορισμών.

Τα ζεύγη περιορισμών, όσων αφορά το συγχρονισμό των γεννητριών, αποτελούνται από:

- Περιορισμούς Must – Link: Όλοι οι κόμβοι γεννητριών που ανήκουν σε μια συνεκτική ομάδα, πρέπει να παραμείνουν ενωμένοι και μετά το πέρας της νησιδοποίησης του συστήματος
- Περιορισμούς Cannot – Link: Κάθε 2 κόμβοι γεννητριών που ανήκουν σε διαφορετικές συνεκτικές ομάδες, δεν μπορούν να παραμείνουν ενωμένοι και μετά το πέρας της νησιδοποίησης του συστήματος [9]

A 2.7 Μέθοδοι ελεγχόμενης νησιδοποίησης

Στην επιστημονική βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι που στοχεύουν στην ελεγχόμενη νησιδοποίηση ενός ΣΗΕ. Η διαφοροποίηση μεταξύ τους έγκειται, τόσο στο ότι έχουν διαφορετικούς περιορισμούς η καθεμία, όσο και ότι έχουν διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις για την ομαδοποίηση των ζυγών.

Η μέθοδος 2 φάσεων του Διατεταγμένου Δυαδικού Διαγράμματος Αποφάσεων *OBDD* (*Ordered Binary Decision Diagram*), που βασίζεται σε έναν απλοποιημένο γράφο, χρησιμοποιείται για την εύρεση νησίδων, με την ελάχιστη ανισορροπία ισχύος (*minimum power imbalance*) ως αντικειμενική συνάρτηση. Η λύση της μεθόδου *OBDD* βασίζεται στις ομάδες συναφών γεννητριών.

Δύο άλλοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στην ελεγχόμενη νησιδοποίηση, είναι ο αλγόριθμος της αναζήτησης πρώτα σε βάθος *BFS* (*Breadth First Search*) και της αναζήτησης πρώτα σε πλάτος *DFS* (*Depth First Search*). Και οι 2, όπως ο *OBDD*, χρησιμοποιούνται για την εύρεση λύσης νησιδοποίησης που διαχωρίζει τις ομάδες συναφών γεννητριών, με ελάχιστη πάλι ανισορροπία ισχύος. Άλλοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούμε για νησιδοποίηση κι έχουν ως αντικειμενική συνάρτηση την ελάχιστη ανισορροπία ισχύος, είναι ο αλγόριθμος *Βελτιστοποίησης Γωνίας διαμορφωμένης με Σμήνος Σωματιδίων* (*Angle Modulated Particle Swarm Optimization*) και η μέθοδος υποχώρου *Krylov* (*Krylov Subspace method*).

Η εξεύρεση λύσης με την ελάχιστη ανισορροπία ισχύος είναι ένα NP-hard πρόβλημα και έχει αποδειχθεί ότι είναι μια ειδική περίπτωση του προβλήματος σακιδίου $0 - 1$ (*knapsack problem*). Δεν υπάρχει γνωστός αλγόριθμος που να μπορεί να λύσει αποτελεσματικά τα προβλήματα αυτού του τύπου μέσα σε πολυωνυμικό χρόνο. Οι περισσότεροι υπάρχοντες αλγόριθμοι έχουν ξεπεράσει αυτό το πρόβλημα με τη χρησιμοποίηση *ευριστικών μεθόδων αναζήτησης* (*heuristic search methods*), ή μόνο με την επίλυση του προβλήματος για ένα απλοποιημένο μοντέλο δικτύου, ή με την επιλογή ενός υποσυνόλου του αρχικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιείται μια μέθοδος που βασίζεται στην *OBDD* σε διαδικτυακές εφαρμογές, το μοντέλο του δικτύου θα πρέπει να απλουστευθεί, ώστε να περιέχει λιγότερους από περίπου 40 κόμβους.

Βέβαια, η απλούστευση του μοντέλου του δικτύου μειώνει το αριθμό των πιθανών λύσεων. Είναι συνεπώς πιθανό, ότι μερικές από τις λύσεις που χάνονται κατά τη διάρκεια της απλούστευσης του δικτύου να είναι καλύτερες από την τελική λύση που βρέθηκε από το αλγόριθμο. Οι ευριστικές μέθοδοι αναζήτησης που αναφέρθηκαν πριν είναι συνήθως αρκετά ευέλικτες και έχουν ικανοποιητική υπολογιστική αποδοτικότητα. Ωστόσο, η ποιότητα λύσης δεν μπορεί να είναι εγγυημένη δεδομένου ότι αυτές οι μέθοδοι τείνουν να συγκλίνουν σε τοπικά, παρά σε ολικά, ελάχιστα.

Η *Φασματική Διχοτόμηση* (*Spectral partitioning*) και η μέθοδος *πολυεπίπεδου πυρήνα k-means* (*multi-level kernel k-means*) είναι 2 μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να βρούμε τη λύση νησιδοποίησης με την τήρηση του ισοζυγίου ισχύος (*minimum power – flow disruption*) ως αντικειμενική συνάρτηση. Και οι δύο μέθοδοι έχουν εξαιρετική υπολογιστική αποδοτικότητα, αλλά δεν λαμβάνουν υπόψη το συγχρονισμό των γεννητριών. Το ότι δε λαμβάνεται υπόψη η συμπεριφορά των γεννητριών σημαίνει ότι δεν μπορεί να είναι εγγυημένη η σταθερότητα των νησίδων που προκύπτουν, όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον, η άμεση εφαρμογή της φασματικής ομαδοποίησης χωρίς περιορισμούς, οδηγεί συχνά στο διαχωρισμό μόνο ενός κόμβου από τον υπόλοιπο γράφο. Αυτές οι παραλείψεις σε αυτές τις 2 μεθόδους λύσεων είναι πολύ σοβαρές και μη αποδεκτές όταν επιχειρείται ελεγχόμενη νησιδοποίηση σε ένα ΣΗΕ. [9]

Οι μέθοδοι ελεγχόμενης νησιδοποίησης που θα περιγράψουμε στην παρούσα εργασία και θα προσομοιώσουμε, έχουν ως αποκλειστικό περιορισμό τη νησιδοποίηση με βάση τις ομάδες συναφών γεννητριών, και αντικειμενική τους συνάρτηση είναι η τήρηση του ισοζυγίου ισχύος.

Αφού λοιπόν έχουν βρεθεί οι ομάδες συναφών γεννητριών, οι αλγόριθμοι νησιδοποίησης που θα αναλυθούν είναι οι εξής:

- *Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Φασματικής Ομαδοποίησης - Spectral Clustering Controlled Islanding algorithm (SCCI algorithm)*
- *Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Minimum Cut*
- *Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση με Σύμπραξη Ενεργού και Άεργου Ισχύος στην ισορροπία των νησίδων*
- *Ελεγχόμενη Νησιδοποίηση με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο (Genetic algorithm)*

ΜΕΡΟΣ Β : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΚΕΛΟΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο Μέρος Β, παρουσιάζονται τα γκρουπ συναφών γεννητριών. Περιγράφονται οι μέθοδοι ελεγχόμενης νησιδοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα νησιδοποίησης για πρότυπα δίκτυα IEEE - 9 ζυγών, - 39 ζυγών και -118 ζυγών, τα οποία και σχολιάζονται. Στο τέλος συγκρίνονται οι μέθοδοι με βάση την αποδοτικότητά τους κι εξάγονται συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΜΑΔΩΝ **ΣΥΝΑΦΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

B 3.1 Εισαγωγή

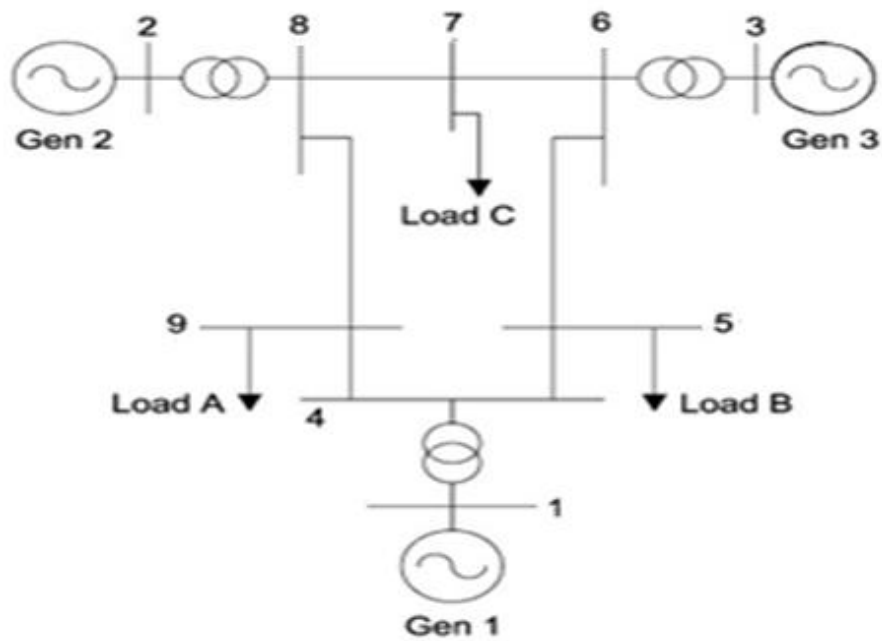
Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, απαραίτητη προϋπόθεση για να επιτευχθεί αποδεκτή λύση ελεγχόμενης νησιδοποίησης, είναι να έχουν καθοριστεί οι ομάδες συναφών γεννητριών, που με βάση αυτές θα ομαδοποιηθούν και οι υπόλοιποι ζυγοί του συστήματος. Οι ομάδες αυτές δεν παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις – με εξαίρεση ίσως μικρές διαφορές στα μεγάλα δίκτυα, όπου εξαρτώνται από το που θα συμβεί η διαταραχή. Στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται με τη μορφή που φαίνεται στις παρακάτω ενότητες.

B 3.2 Παρουσίαση Ομάδων Συναφών γεννητριών

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα πρότυπα δίκτυα IEEE - 9 ζυγών, - 39 ζυγών και -118 ζυγών, και τα αντίστοιχα γκρουπ συναφών γεννητριών [9]. Οι συγκεκριμένες ομάδες συναφών γεννητριών θα αποτελέσουν βασικό περιορισμό στις μεθόδους νησιδοποίησης που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια.

B 3.2.1 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 9 Ζυγών – IEEE 9-Bus

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας 9 ζυγών που θα χωριστεί σε νησίδες, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.1 IEEE 9-Bus

Οι ομάδες συναφών γεννητριών του παραπάνω δικτύου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

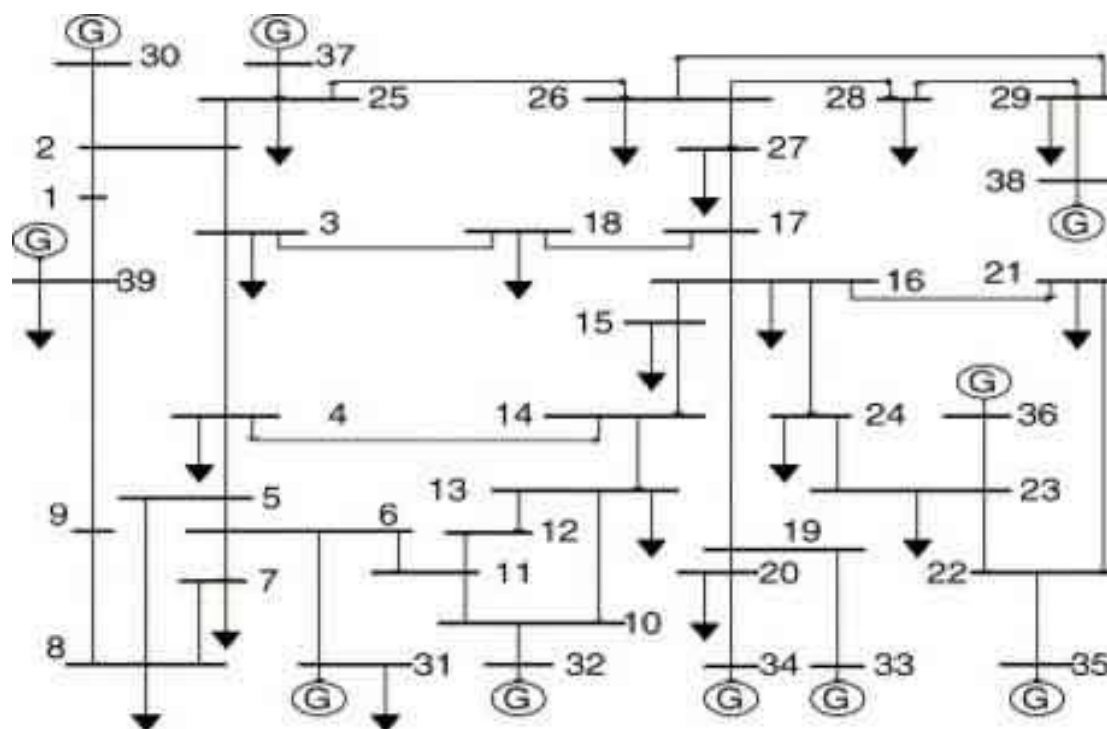
| ΟΜΑΔΑ 1 | ΟΜΑΔΑ 2 |
|---------|---------|
| 1 | 2 |
| | 3 |

Πίνακας 3.1 Ομάδες συναφών γεννητριών στο ΣΗΕ 9 ζυγών [9]

Σύμφωνα λοιπόν με τον παραπάνω πίνακα, προκύπτουν 2 ομάδες συναφών γεννητριών στο ΣΗΕ 9 ζυγών. Επομένως, 2 θα είναι και οι νησίδες που θα προκύψουν από την ελεγχόμενη νησιδοποίηση του συστήματος, ακολουθώντας οποιαδήποτε από τις μεθόδους που θα αναλυθούν στη συνέχεια.

B 3.2.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 39 Ζυγών – IEEE 39-Bus

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας 39 ζυγών που θα χωριστεί σε νησίδες, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.2 IEEE 39-Bus

Οι ομάδες συναφών γεννητριών του παραπάνω δικτύου, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

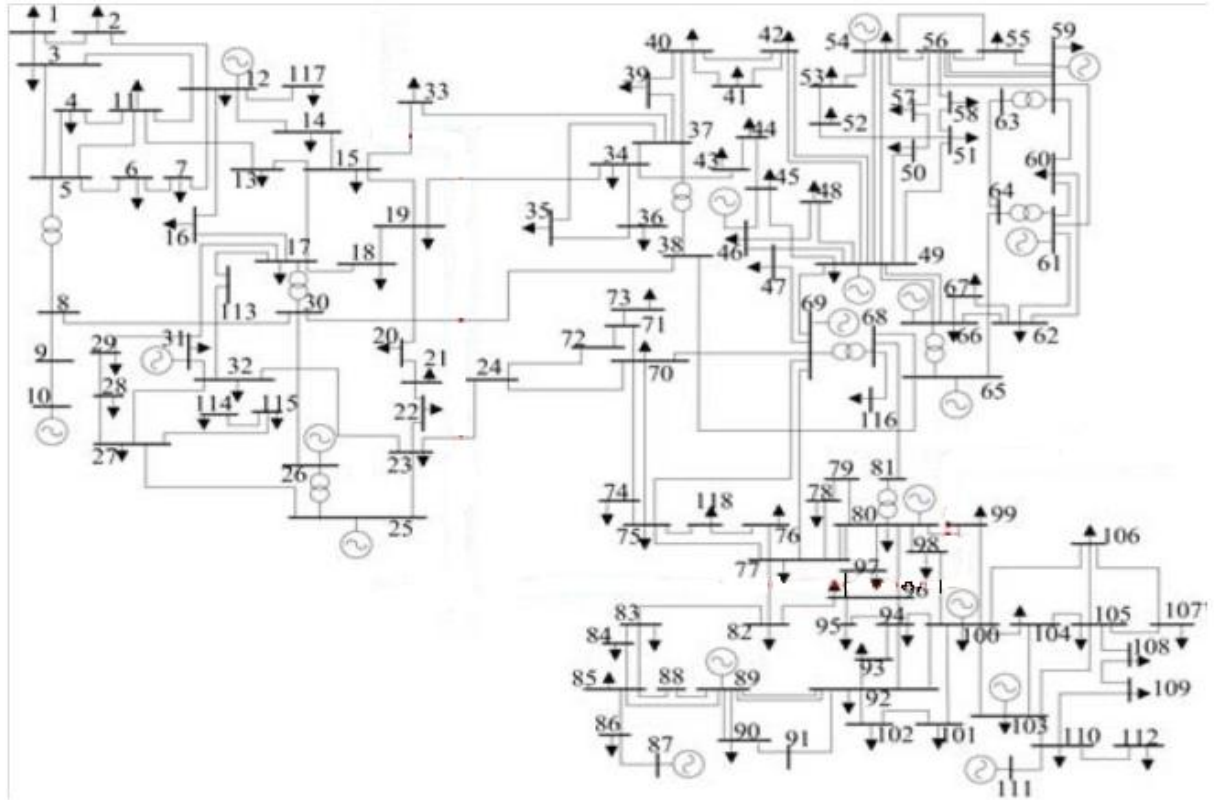
| ΟΜΑΔΑ 1 | ΟΜΑΔΑ 2 | ΟΜΑΔΑ 3 |
|---------|---------|---------|
| 31 | 37 | 39 |
| 32 | 38 | |
| 33 | 30 | |
| 34 | | |
| 35 | | |
| 36 | | |

Πίνακας 3.2 Ομάδες συναφών γεννητριών στο ΣΗΕ 39 ζυγών [9]

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, προκύπτουν 3 ομάδες συναφών γεννητριών στο ΣΗΕ 39 ζυγών. Επομένως, 3 θα είναι και οι νησίδες που θα προκύψουν από την ελεγχόμενη νησιδοποίηση του συστήματος, ακολουθώντας οποιαδήποτε από τις μεθόδους που θα αναλυθούν στη συνέχεια.

B 3.2.3 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 118 Ζυγών – IEEE 118-Bus

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας 118 ζυγών που θα χωριστεί σε νησίδες, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.3 IEEE 118-Bus

Οι ομάδες συναφών γεννητριών του παραπάνω δικτύου, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

| ΟΜΑΔΑ 1 | ΟΜΑΔΑ 2 | ΟΜΑΔΑ 3 |
|---------|---------|---------|
| 10 | 46 | 87 |
| 12 | 49 | 89 |
| 25 | 54 | 100 |
| 26 | 59 | 103 |
| 31 | 61 | 111 |
| | 65 | |
| | 66 | |
| | 69 | |
| | 80 | |

Πίνακας 3.3 Ομάδες συναφών γεννητριών στο ΣΗΕ 118 ζυγών [9]

Όπως και στο ΣΗΕ 39 ζυγών, προκύπτουν 3 ομάδες συναφών γεννητριών στο ΣΗΕ 118 ζυγών. Οπότε ισχύει ό,τι και για το ΣΗΕ 39 ζυγών, δηλαδή οι νησίδες που θα προκύψουν από την ελεγχόμενη νησιδοποίηση του συστήματος 118 ζυγών θα είναι 3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗΣ – SCCI ALGORITHM

B 4.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος ελεγχόμενης νησιδοποίησης με αλγόριθμο φασματικής ομαδοποίησης (Spectral clustering controlled islanding algorithm - SCCI) αναλύεται σε αυτό το κεφάλαιο. Η μέθοδος βασίζεται στις ομάδες συναφών γεννητριών, οι οποίες λειτουργούν ως ζεύγη περιορισμών, όπου κάθε ζυγός ομαδοποιείται με φασματική ομαδοποίηση υπό περιορισμούς.

Το περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση όλων των μεθόδων ελεγχόμενης νησιδοποίησης που εξετάζονται στην εργασία είναι το Matlab, χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πακέτο **Matpower** του Matlab. Το Matpower είναι ένα πρόγραμμα από M-files της Matlab και προορίζεται για τη επίλυση προβλημάτων ροής φορτίου και βέλτιστης ροής φορτίου. Πρόκειται για ένα εργαλείο προσομοίωσης συστημάτων ισχύος, κατάλληλο για μελετητές και εκπαιδευτικούς, αφού είναι εύκολο στη χρήση και τροποποίησή του. Είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε να προσφέρει την καλύτερη δυνατή απόδοση, διατηρώντας τον κώδικα απλό στην κατανόηση και τροποποίησή του. [16]

B 4.2 Στατικός Γράφος Δικτύου

Η λύση νησιδοποίησης που θα διαχωρίζει τις ομάδες συναφών γεννητριών, με αντικειμενική συνάρτηση την τήρηση του ισοζυγίου ισχύος, μπορεί να βρεθεί με την εφαρμογή περιορισμένης φασματικής ομαδοποίησης σε ένα Στατικό Γράφο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο Στατικός Γράφος $G_S(V, E_S, W_S)$ μπορεί να κατασκευαστεί για ένα ΣΗΕ n ζυγών χρησιμοποιώντας δεδομένα ροής ισχύος, ώστε να περιγραφεί η ανταλλαγή Ενεργού Ισχύος ανάμεσα σε καθένα από τους n κόμβους. Επίσης, το θέμα των απωλειών εντός του συστήματος πρέπει να ληφθεί υπόψη, ώστε να παραχθεί ο συμμετρικός και μη κατευθυνόμενος γράφος που είναι απαραίτητος για την εφαρμογή της φασματικής ομαδοποίησης. Για να βεβαιωθούμε ότι ο πίνακας βαρών W_S είναι συμμετρικός, ορίζουμε τα στοιχεία του W_S να ισούνται με $(|P_{ij}| + |P_{ji}|)/2$.

Ο Πίνακας Laplace L_S του στατικού γράφου G_S ορίζεται ως:

$$[L_S]_{ij} = \begin{cases} \frac{|P_{ij}| + |P_{ji}|}{2} = -|V_i||V_j|B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j), & i \neq j \\ -\sum_{l=1, l \neq i}^n [L_S]_{il}, & i = j \end{cases} \quad (4.2.1)$$

όπου B_{ij} η φανταστική είσοδος της Μήτρας αγωγιμοτήτων του δικτύου. Η παραπάνω σχέση, **βασίζεται στη σχέση (2.6.3)**, καθώς ο πίνακας Laplace είναι μη κανονικοποιημένος. Το σκέλος της παράστασης που ισχύει για $i \neq j$ αντιστοιχεί στον πίνακα βαρών W , ενώ το σκέλος που ισχύει για $i = j$ αντιστοιχεί στον διαγώνιο πίνακα βαθμών D . [9]

B 4.3 Πίνακας Προβολών

Η τήρηση του ισοζυγίου ισχύος για το στατικό γράφο G_S , αποτελεί την επίλυση της σχέσης (2.5.2). Θα πρέπει όμως να συμπεριληφθεί ο περιορισμός της συνεκτικότητας των γεννητριών – που τον έχουμε ήδη ως δεδομένο, με τις ομάδες συναφών γεννητριών.

Οι ομάδες συναφών γεννητριών λειτουργούν ως ζεύγη περιορισμών (περιορισμοί Must-Link και Cannot-Link), και όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, τέτοια προβλήματα επιλύονται με φασματική ομαδοποίηση υπό περιορισμούς. Τα ζεύγη περιορισμών μπορούν να συμπεριληφθούν, τροποποιώντας τον Υποχώρο λύσεων με τη χρήση του Πίνακα Προβολών U .

Ο πίνακας προβολών προκύπτει από το γενικευμένο πίνακα Ug , ο οποίος σχετίζεται με τους περιορισμούς που θέτουμε σε ένα γράφο στον οποίο θέλουμε να εφαρμόσουμε φασματική ομαδοποίηση υπό περιορισμούς:

$$Ug = \begin{pmatrix} 1_{s_1} & 1_{s_1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1_{s_2} & -1_{s_2} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1_{s_3} & 0 & 1_{s_3} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1_{s_4} & 0 & -1_{s_4} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1_{s_{p-1}} & 0 & 0 & \dots & 1_{s_{p-1}} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1_{s_p} & 0 & 0 & \dots & -1_{s_p} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1_{s_{p+1}} & 0 & 0 & \dots & 0 & 1_{s_{p+1}} & 0 & \dots & 0 \\ 1_{s_{p+2}} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1_{s_{p+2}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1_{s_c} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1_{s_c} \end{pmatrix} \quad (4.3.1)$$

Κάθε γραμμή i του πίνακα Ug αντιστοιχεί στο στοιχείο I , έτσι ώστε στοιχεία που αντιστοιχούν σε ένα μπλοκ σειράς μεγέθους s_k να θεωρείται πως ανήκουν στην ίδια τάξη. Από την άλλη μεριά, οι περιορισμοί Cannot-Link κωδικοποιούνται από τις πρώτες $2p$ γραμμές: για $k \leq p$, τα στοιχεία που αντιστοιχούν στη γραμμή k ανήκουν σε διαφορετική τάξη από ότι τα στοιχεία της γραμμής $k+1$. Για τις τελευταίες $c-2p$ γραμμές δε δίνονται περιορισμοί Cannot-Link.

Με βάση τα παραπάνω, θεωρούμε ότι σε ένα δίκτυο n ζυγών και m γεννητριών, ότι οι πρώτοι m_1 κόμβοι γεννητριών του γράφου ανήκουν στην ομάδα c_1 και οι επόμενοι m_2 κόμβοι γεννητριών στην ομάδα c_2 . Ο πίνακας προβολών U του δικτύου ορίζεται ως εξής:

$$U = \begin{pmatrix} 1_{m_1} & 1_{m_1} & 0_{m_1 \times (n-m)} \\ 1_{m_2} & -1_{m_2} & 0_{m_2 \times (n-m)} \\ 1_{(n-m)} & 0_{(n-m)} & I_{(n-m) \times (n-m)} \end{pmatrix} \quad (4.3.2)$$

όπου I η μοναδιαία διαγώνια μήτρα (ή μήτρα ταυτότητας), I το μοναδιαίο διάνυσμα στήλη και 0 το μηδενικό διάνυσμα στήλη.

Έτσι, ο Υποχώρος λύσεων προβάλλεται από ένα χώρο n -διαστάσεων σε ένα χώρο $(n-m+2)$ διαστάσεων, όπου $m = m_1+m_2$. Οι κόμβοι των γεννητριών που ανήκουν στην ίδια συνεκτική ομάδα, αντιπροσωπεύονται από έναν ισοδύναμο κόμβο στο χώρο $(n-m+2)$ διαστάσεων, ώστε να ικανοποιηθούν τα ζεύγη περιορισμών.

Συνεπώς, με την εισαγωγή του Πίνακα Προβολών U , εφαρμόζεται η φασματική ομαδοποίηση υπό περιορισμούς στο στατικό γράφο G_S , για να βρεθεί το *διαχωριστικό σύνολο (cutset)* με την τήρηση του ισοζυγίου ισχύος. Η τιμή cutset ικανοποιεί τον περιορισμό συγχρονισμένων ομάδων γεννητριών. [9], [13]

B 4.4 Διαχωρισμός του δικτύου – Αλγόριθμοι k-means και k-medoids

Ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί στο τελικό στάδιο της μεθόδου νησιδοποίησης με SCCI αλγόριθμο ώστε να διαχωριστεί το δίκτυο σε νησίδες, είναι ο αλγόριθμος k-means ή ο αλγόριθμος k-medoids. Τα αποτελέσματα και των 2 αλγορίθμων είναι ίδια, αν και ο αλγόριθμος k-medoids είναι πιο συμπαγής από τον k-means.

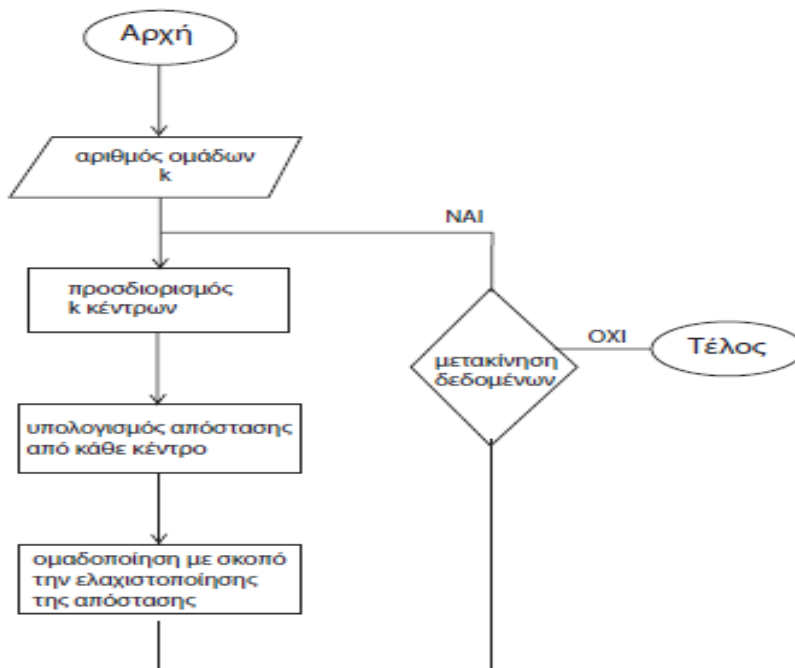
B 4.4.1 Αλγόριθμος k-means

Ο διαμεριστικός αλγόριθμος k-means είναι ένας από τους πιο απλούς και δημοφιλέστερους αλγορίθμους 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 αλγορίθμου είναι η εξής: αρχικά προσδιορίζονται k κέντρα (centroids), ένα για κάθε ομάδα (cluster). Η επιλογή των centroids πρέπει να είναι επιδέξια καθώς για διαφορετικές αρχικές 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:

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\| \quad (4.4.1)$$

όπου $\|x_i^{(j)} - c_j\|$ ένα μέτρο απόστασης που χρησιμοποιείται για να μετρά την απόσταση μεταξύ κάθε στοιχείου και του κέντρου κάθε ομάδας. Επιπλέον σαν μέτρο απόστασης μεταξύ των στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η Ευκλείδεια απόσταση – όπως θα δούμε στην επόμενη μέθοδο νησιδοποίησης – ή άλλα δημοφιλή μέτρα απόστασης. Δηλαδή σε κάθε βήμα το στοιχείο x θα μπαίνει στην ομάδα i , εάν η Ευκλείδεια απόσταση του από το centroid της i ομάδας είναι η μικρότερη σε σχέση με όλες τις άλλες αποστάσεις του από τα centroids των άλλων ομάδων. Έτσι προκύπτει μια πρώτη πρόχειρη ομαδοποίηση. Αμέσως μετά επιλέγονται ξανά k νέα centroids και ακολουθείται πάλι η διαδικασία ανάθεσης κάθε στοιχείου στο πλησιέστερο σε αυτό centroid. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να σταματήσει η μετακίνηση δεδομένων, όπου τερματίζει ο αλγόριθμος και έχουμε την τελική ομαδοποίηση των δεδομένων σε k ομάδες (clusters).

Παρακάτω φαίνονται σχηματικά τα βήματα του αλγορίθμου k-means:



Εικόνα 4.1 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου k-means

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 ακόμα βασικό μειονέκτημα του. Επιπλέον, πολύ συχνά τα αποτελέσματα εξαρτώνται από το μέτρο της απόστασης το οποίο θα εφαρμοστεί. [11]

B 4.4.2 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 πραγματοποιείται καμία αλλαγή [11]

B 4.5 Μεθοδολογία SCCI αλγορίθμου

Με βάση τις έννοιες στις προηγούμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου, τα βήματα με τα οποία επιτυγχάνεται η νησιδοποίηση σε ένα ΣΗΕ με χρήση SCCI αλγορίθμου – έχοντας δεδομένες τις ομάδες συναφών γεννητριών – είναι τα ακόλουθα:

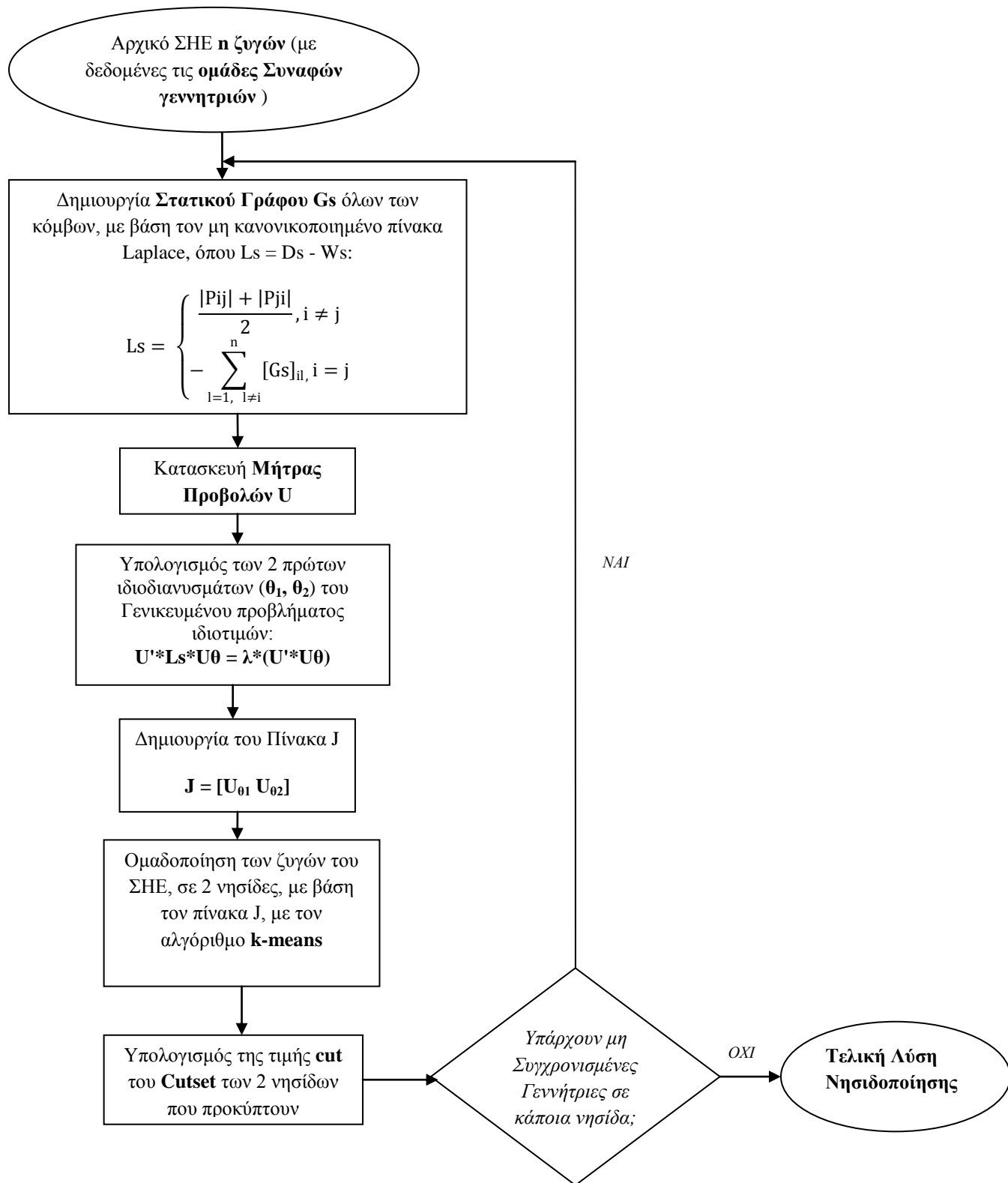
1. Κατασκευή του **στατικού γράφου** G_S με κόμβους για όλους τους ζυγούς του συστήματος. Τα βάρη των ακμών ορίζονται ως $(|P_{ij}| + |P_{ji}|)/2$
2. Κατασκευή του Πίνακα Προβολών U, βασισμένου στα αποτελέσματα ομαδοποίησης συναφών γεννητριών
3. Υπολογισμός των 2 πρώτων ιδιοδιανυσμάτων θ_1 και θ_2 του γενικευμένου ιδιοπροβλήματος:

$$U^T L_S U \theta = \lambda U^T U \theta \quad (4.5.1)$$

4. Έστω $J \in \mathcal{R}^{n \times 2}$ ο πίνακας που περιέχει τα ιδιοδιανύσματα U_{θ_1} και U_{θ_2} ως στήλες. Έστω επίσης $y_i \in \mathcal{R}^2$ το διάνυσμα το οποίο αντιστοιχεί στη γραμμή i του πίνακα J
5. Ομαδοποίηση των κόμβων y_i σε επιμέρους σύνολα V_1 και V_2 με χρήση αλγορίθμου k-means ή k-medoids
6. Επιλογή του συνόλου V_1 ή του V_2 (αναλόγως ποιο περιέχει μη συγχρονισμένες γεννήτριες) ως σύνολο κόμβων ενός νέου Στατικού Γράφου, κι επιστροφή στο βήμα 1) για να εφαρμοστεί *Αναδρομική Διχοτόμηση*

Με την παραπάνω μεθοδολογία λοιπόν, μπορεί να βρεθεί λύση νησιδοποίησης για το δίκτυο. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε online μέθοδο ταυτοποίησης συνοχής – με την προϋπόθεση όμως πως τα γκρουπ συναφών γεννητριών είναι διαθέσιμα να λειτουργήσουν σαν περιορισμοί. [9]

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα ροής (flowchart) της ελεγχόμενης νησιδοποίησης του δικτύου με SCCI αλγόριθμο. Το διάγραμμα αποτυπώνει τη συλλογιστική που ακολουθήθηκε στον κώδικα Matlab ώστε να εξαχθούν τα αποτελέσματα της νησιδοποίησης.



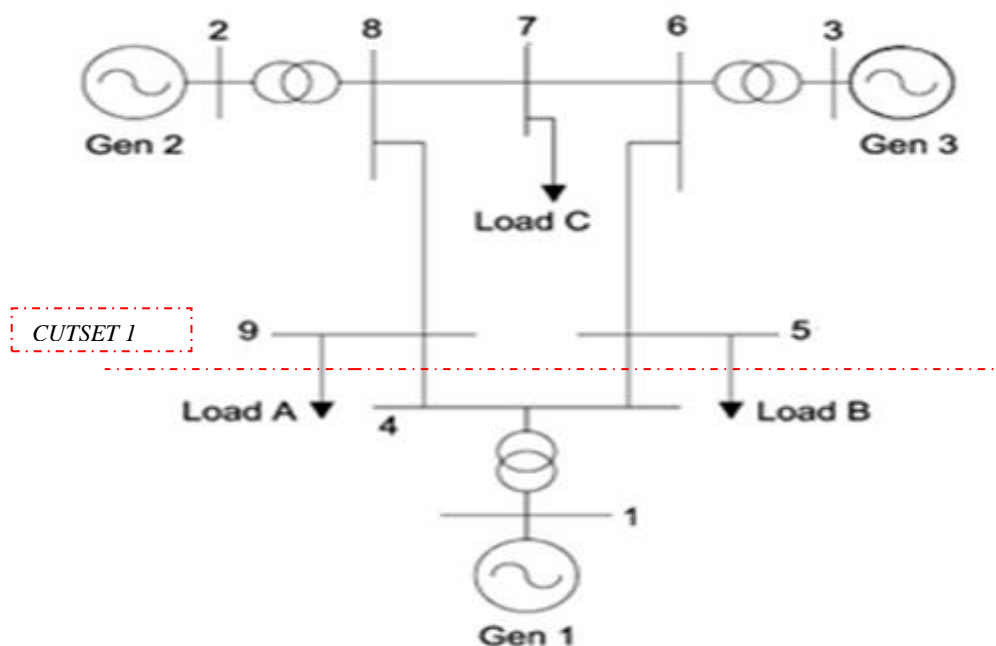
Εικόνα 4.2 Διάγραμμα ροής – SCCI Algorithm

B 4.6 Αποτελέσματα

Στις επόμενες υποενότητες, παρατίθενται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του SCCI αλγόριθμου για τα πρότυπα δίκτυα IEEE - 9 ζυγών, - 39 ζυγών και -118 ζυγών. Η προσομοίωση έγινε στο περιβάλλον του Matlab, και τα δεδομένα πάνω στα οποία έγινε προήλθαν από το πρόγραμμα Matpower. Τα χαρακτηριστικά του PC είναι: Intel Core 2 Duo CPU 2GHz - 4GB RAM PC - Matlab 7.14.0.739 code.

B 4.6.1 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 9 Ζυγών – IEEE 9-Bus

Με βάση τον αλγόριθμο SCCI, το δίκτυο 9 ζυγών θα χωριστεί σε 2 νησίδες – όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 4. Παρακάτω φαίνεται το δίκτυο χωρισμένο σε νησίδες, καθώς και ο πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό κάθε ζυγού, τη νησίδα που ανήκει καθένας από αυτούς και το χρόνο υπολογισμού της μεθόδου.



Εικόνα 4.3 Διαχωρισμός του δικτύου 9 ζυγών σε νησίδες με SCCI Αλγόριθμο

| ΝΗΣΙΔΑ 1 | ΝΗΣΙΔΑ 2 | Χρόνος Υπολογισμού (sec) |
|-------------|----------------------------|--------------------------|
| 1, 4 | 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 | 1.042 |

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα διαχωρισμού δικτύου 9 ζυγών με χρήση SCCI Αλγορίθμου – με **bold** οι ζυγοί των γεννητριών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ισοζύγιο ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας 9 ζυγών. Στη Νησίδα 1 υπάρχει περίσσεια ισχύος, η οποία ενδέχεται να ελαττώσει ελάχιστα τη συχνότητα των γεννητριών, χωρίς όμως να επηρεαστεί η ευστάθεια την νησίδας. Στη Νησίδα 2 υπάρχει μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος, οπότε προτείνεται η αποκοπή φορτίου για να μην επηρεαστεί η ευστάθειά της.

| | P_G (MW) | P_L (MW) | Διαφορά(MW) |
|----------|------------|------------|-------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 71.95 | 0 | 71.95 |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 248 | 315 | -67 |

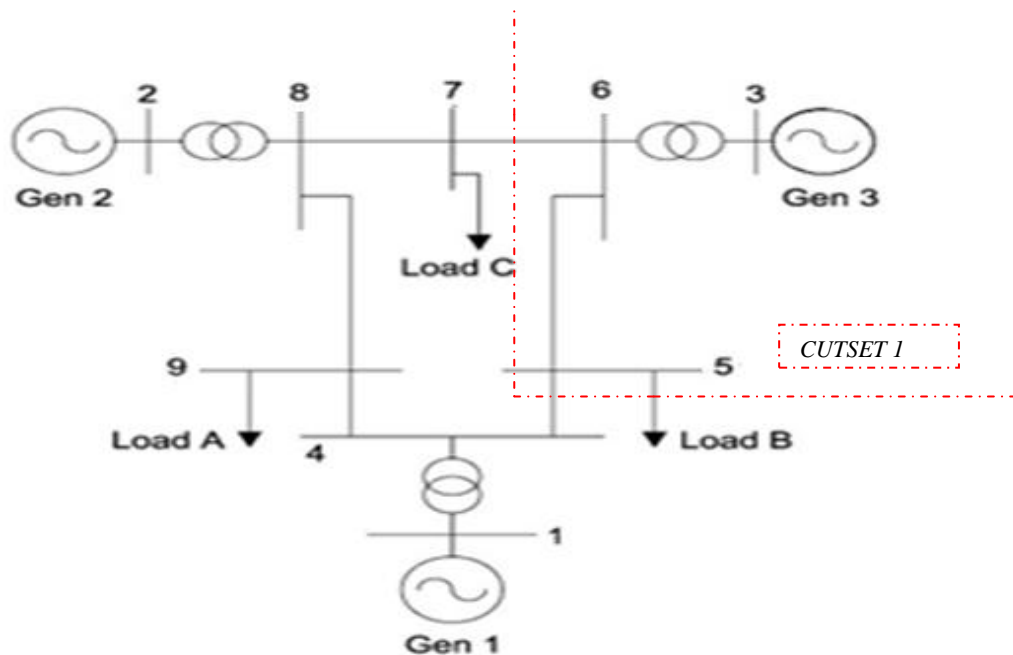
Πίνακας 4.2 Ισοζύγιο ισχύος μετά το διαχωρισμό του δικτύου 9 ζυγών με χρήση SCCI Αλγορίθμου

Κατά τη νησιδοποίηση δημιουργείται ένα διαχωριστικό σύνολο (*Cutset 1*), στο δίκτυο 9 ζυγών, μετά το χωρισμό του σε 2 νησίδες. Οι γραμμές που αποκόπτονται από το *cutset 1*, καθώς και η αντίστοιχη τιμή cut είναι οι εξής:

| <u><i>Cutset 1</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|------------------------|--------------------------------------|
| 4-5, 4-9 | 71.735 |

Πίνακας 4.3 Τιμή *cut* του *Cutset 1* μετά τη νησιδοποίηση με SCCI αλγόριθμο στο δίκτυο 9 ζυγών

Έστω ότι η νησιδοποίηση με SCCI εφαρμόζεται χωρίς όμως να ληφθεί υπόψη ο περιορισμός των συναφών γεννητριών. Το δίκτυο των 9 ζυγών θα διαχωριστεί όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.4 Διαχωρισμός του δικτύου 9 ζυγών σε νησίδες με SCCI Αλγόριθμο – δε λαμβάνεται υπόψη ο περιορισμός των γεννητριών

Οι γραμμές που αποκόπτονται από το διαχωρισμό cutset 1 της παραπάνω εικόνας, καθώς και η αντίστοιχη τιμή cut, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

| <i>Cutset 1</i> | $\Sigma/P_{ij}/MW$ |
|-----------------|--------------------|
| 4-5, 6-7 | 54.7 |

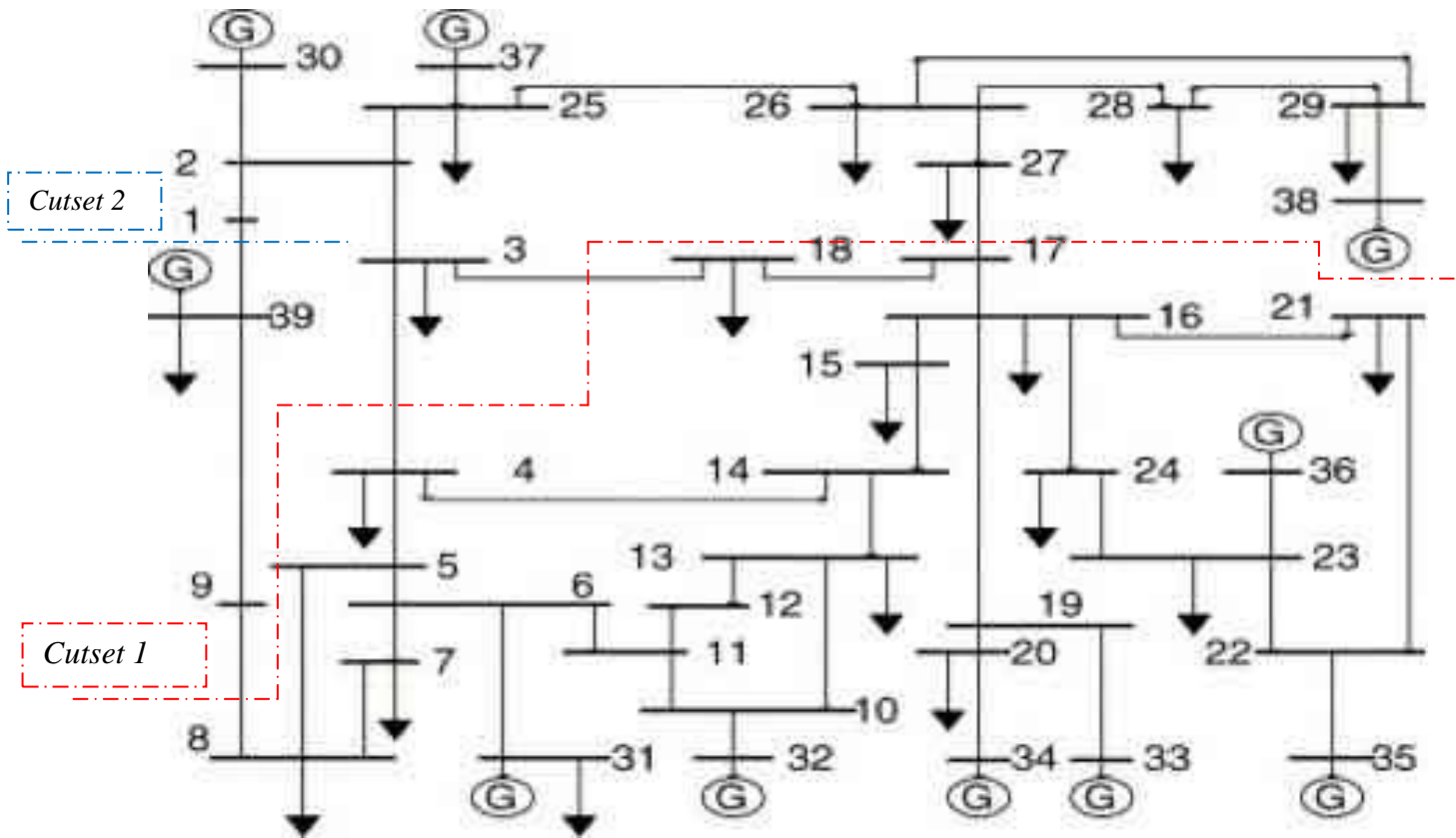
Πίνακας 4.4 Τιμή cut του Cutset 1 μετά τη νησιδοποίηση με SCCI αλγόριθμο στο δίκτυο 9 ζυγών– δε λαμβάνεται υπόψη ο περιορισμός των γεννητριών

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, η τιμή κοπής που προκύπτει όταν δε λαμβάνονται υπόψη οι ομάδες συναφών γεννητριών είναι μικρότερη από την τιμή κοπής όταν λαμβάνονται υπόψη. Η λύση αυτή όμως δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή, καθώς η 1^η νησίδα περιέχει τις γεννήτριες 1 και 2, οι οποίες είναι μη συγχρονισμένες – άρα η νησίδα αυτή είναι ασταθής. Συνεπώς για να μην προκύπτουν μη αποδεκτές λύσεις, ο περιορισμός αυτός θα λαμβάνεται υπόψη σε όλες τις μεθόδους νησιδοποίησης που ακολουθούν.

B 4.6.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 39 Ζυγών – IEEE 39-Bus

Με βάση τον αλγόριθμο SCCI, το δίκτυο 39 ζυγών θα χωριστεί σε 3 νησίδες – όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 4. Για να προκύψει αυτό, θα χρησιμοποιηθεί

αναδρομική διχοτόμηση, ούτως ώστε να προκύψουν 2 διαχωριστικά σύνολα και άρα 3 νησίδες. Παρακάτω φαίνεται το δίκτυο χωρισμένο σε νησίδες, καθώς και ο πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό κάθε ζυγού, τη νησίδα που ανήκει καθένας από αυτούς και το χρόνο υπολογισμού της μεθόδου.



Εικόνα 4.5 Διαχωρισμός του δικτύου 39 ζυγών σε νησίδες με SCCI Αλγόριθμο

| ΝΗΣΙΔΑ 1 | ΝΗΣΙΔΑ 2 | ΝΗΣΙΔΑ 3 | Χρόνος Υπολογισμού (sec) |
|--|--|--------------|--------------------------|
| 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 31, 32, 33, 34, 35, 36 | 1, 2, 3, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 37, 38 | 9, 39 | 1.232 |

Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα διαχωρισμού δικτύου 39 ζυγών με χρήση SCCI Αλγόριθμου – με **bold** οι ζυγοί των γεννητριών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ισοζύγιο ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας 39 ζυγών. Στις νησίδες 1 και 2 υπάρχει περίσσεια ισχύος. Στη νησίδα 3 υπάρχει μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος. Και στις 3

νησίδες οι αποκλίσεις παραγωγής – κατανάλωσης είναι μικρές, οπότε η ευστάθειά τους δεν επηρεάζεται.

| | P_G (MW) | P_L (MW) | Διαφορά(MW) |
|----------|------------|------------|-------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 3677.87 | 3590.6 | 87.27 |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 1620 | 1553.1 | 66.9 |
| ΝΗΣΙΔΑ 3 | 1000 | 1110.5 | -110.5 |

Πίνακας 4.6 Ισοζύγιο ισχύος μετά το διαχωρισμό του δικτύου 39 ζυγών με χρήση SCCI Αλγορίθμου

Κατά τη νησιδοποίηση δημιουργούνται δύο διαχωριστικά σύνολα (*Cutset 1* και *Cutset 2*), στο δίκτυο 39 ζυγών, μετά το χωρισμό του σε 3 νησίδες. Το *Cutset 1* διαχωρίζει την Ομάδα 1 συναφών γεννητριών από τις Ομάδες 2 και 3, κι έπειτα το *Cutset 2* την Ομάδα 2 από την Ομάδα 3 (Πίνακας 3.2). Οι γραμμές που αποκόπτονται από τα *Cutset 1* και *Cutset 2*, η τιμή cut του καθενός καθώς και η συνολική τιμή cut των 2 *Cutset* είναι τα εξής:

| <u><i>Cutset 1</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|------------------------|--------------------------------------|
| 8-9, 3-4, 3-18, 17-27 | 137.3 |

Πίνακας 4.7 Τιμή cut του *Cutset 1* μετά τη νησιδοποίηση με SCCI αλγόριθμο στο δίκτυο 39 ζυγών

| <u><i>Cutset 2</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|------------------------|--------------------------------------|
| 1-39 | 76.1 |

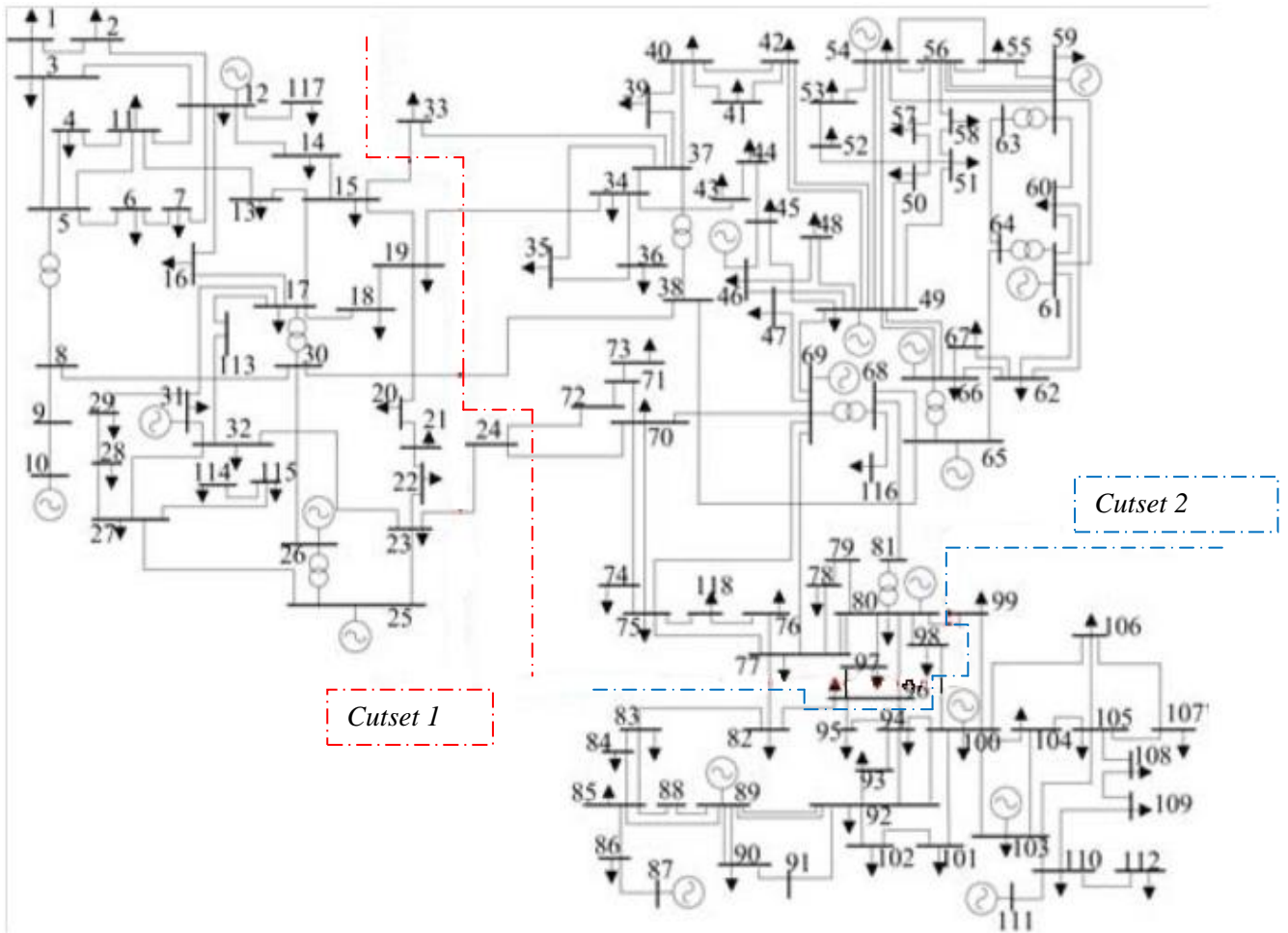
Πίνακας 4.8 Τιμή cut του *Cutset 2* μετά τη νησιδοποίηση με SCCI αλγόριθμο στο δίκτυο 39 ζυγών

| <u>$Cutset(ol) = Cutset 1 + Cutset 2$</u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|--|--------------------------------------|
| 8-9, 3-4, 3-18, 17-27, 1-39 | 213.4 |

Πίνακας 4.9 Τιμή cut των *Cutset 1* και *Cutset 2* συνολικά μετά τη νησιδοποίηση με SCCI αλγόριθμο στο δίκτυο 39 ζυγών

B 4.6.3 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 118 Ζυγών – IEEE 118-Bus

Με βάση τον αλγόριθμο SCCI, το δίκτυο 118 ζυγών θα χωριστεί σε 3 νησίδες όπως και το δίκτυο των 39 ζυγών. Αναλόγως λοιπόν, θα χρησιμοποιηθεί αναδρομική διχοτόμηση, ούτως ώστε να προκύψουν 2 διαχωριστικά σύνολα και άρα 3 νησίδες. Παρακάτω φαίνεται το δίκτυο χωρισμένο σε νησίδες, καθώς και ο πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό κάθε ζυγού, τη νησίδα που ανήκει καθένας από αυτούς και το χρόνο υπολογισμού της μεθόδου.



Εικόνα 4.6 Διαχωρισμός του δικτύου 118 ζυγών σε νησίδες με SCCI Αλγόριθμο

| ΝΗΣΙΔΑ 1 | ΝΗΣΙΔΑ 2 | ΝΗΣΙΔΑ 3 | Χρόνος Υπολογισμού (sec) |
|---|--|---|--------------------------|
| 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 , 11, 12 , 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 , 26 , 27, 28, 29, 30, 31 , 32, 113, 114, 115, 117 | 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46 , 47, 48, 49 , 50, 51, 52, 53, 54 , 55, 56, 57, 58, 59 , 60, 61 , 62, 63, 64, 65 , 66 , 67, 68, 69 , 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80 , 81, 96, 97, 98, 116, 118 | 82, 83, 84, 85, 86, 87 , 88, 89 , 90, 91, 92, 93, 94, 95, 99, 100 , 101, 102, 103 , 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111 , 112 | 1.421 |

Πίνακας 4.10 Αποτελέσματα διαχωρισμού δικτύου 118 ζυγών με χρήση SCCI Αλγορίθμου – με **bold** οι ζυγοί των γεννητριών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ισοζύγιο ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας 39 ζυγών. Στις νησίδες 1 και 2 υπάρχει περίσσεια ισχύος. Στη νησίδα 3 υπάρχει μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος. Και στις 3 νησίδες οι αποκλίσεις παραγωγής – κατανάλωσης είναι μικρές, οπότε η ευστάθειά τους δεν επηρεάζεται.

| | P_G (MW) | P_L (MW) | Διαφορά(MW) |
|----------|------------|------------|-------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 1076 | 976 | 100 |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 2359.9 | 2358 | 1.9 |
| ΝΗΣΙΔΑ 3 | 939 | 908 | 31 |

Πίνακας 4.11 Ισοζύγιο ισχύος μετά το διαχωρισμό του δικτύου 118 ζυγών με χρήση SCCI Αλγορίθμου

Κατά τη νησιδοποίηση δημιουργούνται δύο διαχωριστικά σύνολα (*Cutset 1* και *Cutset 2*), στο δίκτυο 118 ζυγών, μετά το χωρισμό του σε 3 νησίδες. Ομοίως με το δίκτυο 39 ζυγών, το *Cutset 1* διαχωρίζει την Ομάδα 1 συναφών γεννητριών από τις Ομάδες 2 και 3, κι έπειτα το *Cutset 2* την Ομάδα 2 από την Ομάδα 3 (Πίνακας 3.3). Οι γραμμές που αποκόπτονται από τα *Cutset 1* και *Cutset 2*, η τιμή cut του καθενός καθώς και η συνολική τιμή cut των 2 *Cutset* είναι τα εξής:

| <u><i>Cutset 1</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 15-33, 19-34, 30-38, 24-70, 24-72 | 80.8 |

Πίνακας 4.12 Τιμή cut του *Cutset 1* μετά τη νησιδοποίηση με SCCI αλγόριθμο στο δίκτυο 118 ζυγών

| <u><i>Cutset 2</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| 77-82, 94-96, 95-96, 98-100, 80-99 | 58.9 |

Πίνακας 4.13 Τιμή cut του *Cutset 2* μετά τη νησιδοποίηση με SCCI αλγόριθμο στο δίκτυο 118 ζυγών

| <u>$Cutset(ol) = Cutset 1 + Cutset 2$</u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|--|--------------------------------------|
| 15-33, 19-34, 30-38, 24-70, 24-72, 77-82, 94-96, 95-96, 98-100, 80-99 | 139.7 |

Πίνακας 4.14 Τιμή cut των *Cutset 1* και *Cutset 2* συνολικά μετά τη νησιδοποίηση με SCCI αλγόριθμο στο δίκτυο 118 ζυγών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ MINIMUM CUT

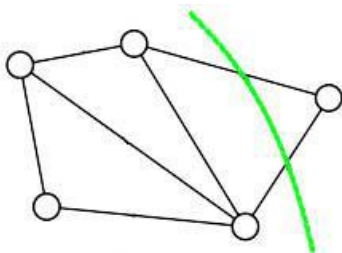
B 5.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος ελεγχόμενης νησιδοποίησης με τον αλγόριθμο *Minimum Cut* αναλύεται σε αυτό το κεφάλαιο. Έχει κοινά στοιχεία με την αντίστοιχη μέθοδο με SCCI αλγόριθμο, καθώς κι εδώ κατασκευάζεται στατικός γράφος του δικτύου στον οποίο εφαρμόζεται φασματική ομαδοποίηση υπό περιορισμούς με τη βοήθεια του πίνακα προβολών U , ώστε να ισχύσει ο περιορισμός για τις συγχρονισμένες γεννήτριες. Η διαφορά έγκειται στον αλγόριθμο ομαδοποίησης των ζυγών του συστήματος σε νησίδες στο τελικό στάδιο της μεθόδου, που είναι ο *Minimum Cut* αλγόριθμος.

B 5.2 Αλγόριθμος *Minimum cut*

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

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



Εικόνα 5.1 *Minimum cut* σε γράφο

Όμως ο αλγόριθμος *Minimum cut* μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον διαχωρισμό ενός γράφου σε περισσότερες από δύο ομάδες. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ενός πίνακα γειτνίασης W , και k ο αριθμός των ομάδων που πρόκειται να

δημιουργηθούν, η επίλυση του minimum cut προβλήματος είναι ουσιαστικά η επιλογή των υποσυνόλων A_1, A_2, \dots, A_k που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση:

$$cut(A_1, A_2, \dots, A_k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k W(A_i, \bar{A}_i) \quad (5.2.1)$$

όπου \bar{A}_i συμπλήρωμα του A_i και $W(V_1, V_2) = cut(V_1, V_2) = \sum_{i \in V_1, j \in V_2} w_{ij}$ (από σχέση (2.3.3)).

Βέβαια η επίλυση του αλγορίθμου για ελαχιστοποίηση της παραπάνω συνάρτησης οδηγεί πολλές φορές σε μη ικανοποιητικά αποτελέσματα, διότι σε πολλές περιπτώσεις το Minimum cut πρόβλημα απλά διαχωρίζει έναν κόμβο από τον υπόλοιπο γράφο. Ο διαχωρισμός αυτός προφανώς και δεν είναι ικανοποιητικός καθώς τα υποσύνολα που θέλουμε να δημιουργήσουμε δε θα πρέπει να έχουν μεγάλη διαφορά ως προς το πλήθος των στοιχείων που τα αποτελούν. Για το λόγο αυτό, συχνά χρησιμοποιούνται παραλλαγές του Minimum cut αλγορίθμου ώστε να λαμβάνονται τα επιθυμητά αποτελέσματα.

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

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

$$RatioCut(A_1, A_2, \dots, A_k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \frac{W(A_i, \bar{A}_i)}{|A_i|} = \sum_{i=1}^k \frac{cut(A_i, \bar{A}_i)}{|A_i|} \quad (5.2.2)$$

Η συνάρτηση *Ncut* της κανονικοποιημένης φασματικής ομαδοποίησης έχει οριστεί από τη σχέση (2.6.4), για τον χωρισμό ενός δικτύου σε 2 ομάδες. Για τη γενικευμένη περίπτωση του χωρισμού του δικτύου σε k ομάδες, ορίζεται ως εξής:

$$Ncut(A_1, A_2, \dots, A_k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \frac{W(A_i, \bar{A}_i)}{weig(A_i)} = \sum_{i=1}^k \frac{cut(A_i, \bar{A}_i)}{weig(A_i)} \quad (5.2.3)$$

Στη μέθοδο ελεγχόμενης νησιδοποίησης με αλγόριθμο Minimum Ncut που θα εξεταστεί, η συνάρτηση που θα ελαχιστοποιηθεί είναι η **Ncut**. [11]

B 5.3 Μεθοδολογία Minimum Cut Αλγορίθμου

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, η μέθοδος νησιδοποίησης με αλγόριθμο Minimum cut έχει κοινά στοιχεία με τη μέθοδο με SCCI αλγόριθμο. Και στις 2 μεθόδους ισχύει ο περιορισμός των συναφών γεννητριών, ενώ και στη μέθοδο με

Minimum cut αλγόριθμο χρησιμοποιείται αναδρομική διχοτόμηση όταν τα γκρουπ συναφών γεννητριών είναι περισσότερα από 2.

Τα κοινά βήματα των 2 μεθόδων είναι τα παρακάτω:

1. Κατασκευή του **στατικού γράφου** G_S με κόμβους για όλους τους ζυγούς του συστήματος. Τα βάρη των ακμών ορίζονται ως $(|P_{ij}| + |P_{ji}|)/2$
2. Κατασκευή του Πίνακα Προβολών U , βασισμένου στα αποτελέσματα ομαδοποίησης συναφών γεννητριών
3. Υπολογισμός των 2 πρώτων ιδιοδιανυσμάτων θ_1 και θ_2 του γενικευμένου ιδιοπροβλήματος της εξίσωσης (4.5.1):

$$U^T L_S U \theta = \lambda U^T U \theta$$

4. Έστω $J \in \mathcal{R}^{n \times 2}$ ο πίνακας που περιέχει τα ιδιοδιανύσματα $U\theta_1$ και $U\theta_2$ ως στήλες. Έστω επίσης $y_i \in \mathcal{R}^2$ το διάνυσμα το οποίο αντιστοιχεί στη γραμμή i του πίνακα J

Η σημαντική διαφοροποίηση αυτής της μεθόδου είναι ο αλγόριθμος ομαδοποίησης των ζυγών του συστήματος μετά την εξαγωγή του πίνακα J . Για τον διαχωρισμό του δικτύου των n ζυγών σε 2 νησίδες επιλέχθηκαν αρχικά δύο τυχαία σημεία - ζυγοί του δικτύου ως κέντρα. Στη συνέχεια κάθε ζυγός του δικτύου τοποθετήθηκε σε μία ομάδα ως εξής: υπολογίζεται η Ευκλείδεια απόσταση – με βάση τα δεδομένα του πίνακα J , ώστε να ληφθεί υπόψη ο περιορισμός για τις γεννήτριες – μεταξύ του ζυγού και των δύο κέντρων και ο ζυγός μπαίνει στην ομάδα στην οποία κέντρο είναι ο ζυγός από τον οποίο απέχει τη μικρότερη απόσταση.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κέντρα κάθε ομάδας, για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς δύο ζυγών του δικτύου και τα αποτελέσματα ομαδοποίησης τοποθετούνται σε ένα συνολικό πίνακα. Τέλος για κάθε μία από τις πιθανές ομαδοποιήσεις που προέκυψαν, υπολογίζεται η συνάρτηση $Ncut$ και επιλέγεται ο διαχωρισμός του δικτύου για τον οποίο η συνάρτηση αυτή ελαχιστοποιείται.

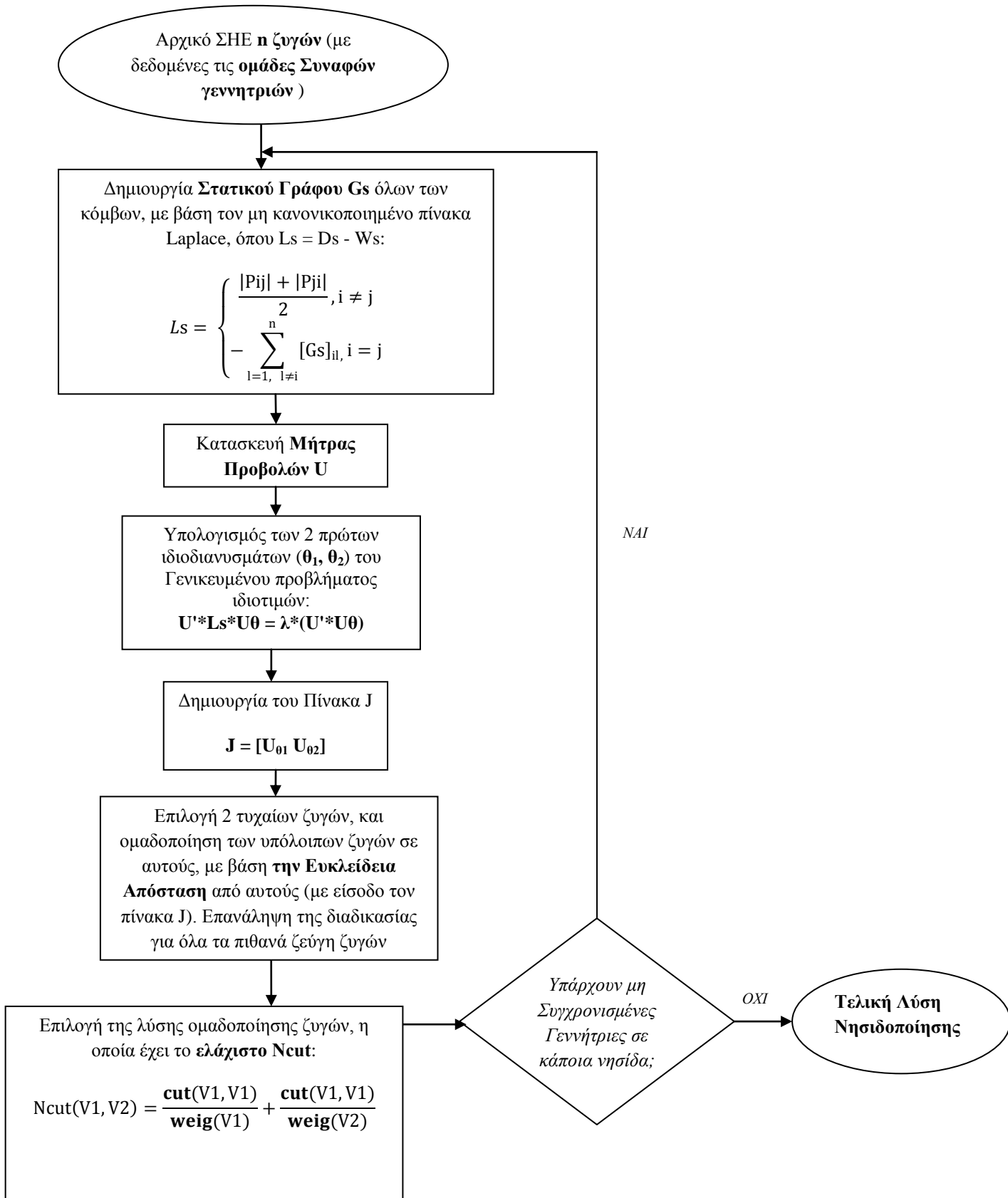
Συνοπτικά τα βήματα του αλγορίθμου που ακολουθούν τον βήμα 4 της εύρεσης του πίνακα J , ο οποίος αποτελεί τον πίνακα – είσοδο, είναι τα εξής:

- Υπολογισμός όλων των πιθανών συνδυασμών 2 κέντρων για το δίκτυο n ζυγών. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε πίνακα $m \times 2$ όπου m το πλήθος των συνδυασμών που προκύπτουν
- Για κάθε συνδυασμό 2 σημείων ως κέντρα των ομάδων που πρόκειται να χωριστεί το δίκτυο:
 - Τοποθέτηση καθενός από τα δύο κέντρα σε μία ομάδα
 - Υπολογισμός της ευκλείδειας απόστασης μεταξύ του ζυγού και κάθε κέντρου
 - Τοποθέτηση του ζυγού στην ομάδα που έχει κέντρο αυτό με το οποίο η Ευκλείδεια απόσταση γίνεται ελάχιστη
 - Επανάληψη τη διαδικασίας για κάθε έναν από τους n ζυγούς
- Αποθήκευση των αποτελεσμάτων σε πίνακα, ο οποίος περιλαμβάνει την ομαδοποίηση του δικτύου σε νησίδες για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς δύο κέντρων του δικτύου

- Υπολογισμός της συνάρτησης *normalized cut* – *Ncut* για όλους τους διαχωρισμούς του δικτύου που έχουν προκύψει κι έχουν αποθηκευτεί στον πίνακα του προηγούμενου βήματος
- Η ομαδοποίηση για την οποία η συνάρτηση *Ncut* λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της είναι και η τελική ομαδοποίηση του δικτύου, σε 2 ομάδες V_1 και V_2
- Επιλογή του συνόλου V_1 ή του V_2 (αναλόγως ποιο περιέχει μη συγχρονισμένες γεννήτριες) ως σύνολο κόμβων ενός νέου Στατικού Γράφου, κι επιστροφή στο βήμα 1) για να εφαρμοστεί *Αναδρομική Διχοτόμηση*

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, για το διαχωρισμό του δικτύου σε ζώνες δεν χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση *cut*, γιατί όπως αναφέρθηκε δεν δίνει επιθυμητά αποτελέσματα ομαδοποίησης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση *Ncut* η οποία δίνει ως αποτέλεσμα επαρκώς μεγάλες ομάδες.

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα ροής (flowchart) της ελεγχόμενης νησιδοποίησης του δικτύου με *Minimum Cut* αλγόριθμο. Το διάγραμμα αποτυπώνει τη συλλογιστική που ακολουθήθηκε στον κώδικα *Matlab* ώστε να εξαχθούν τα αποτελέσματα της νησιδοποίησης.



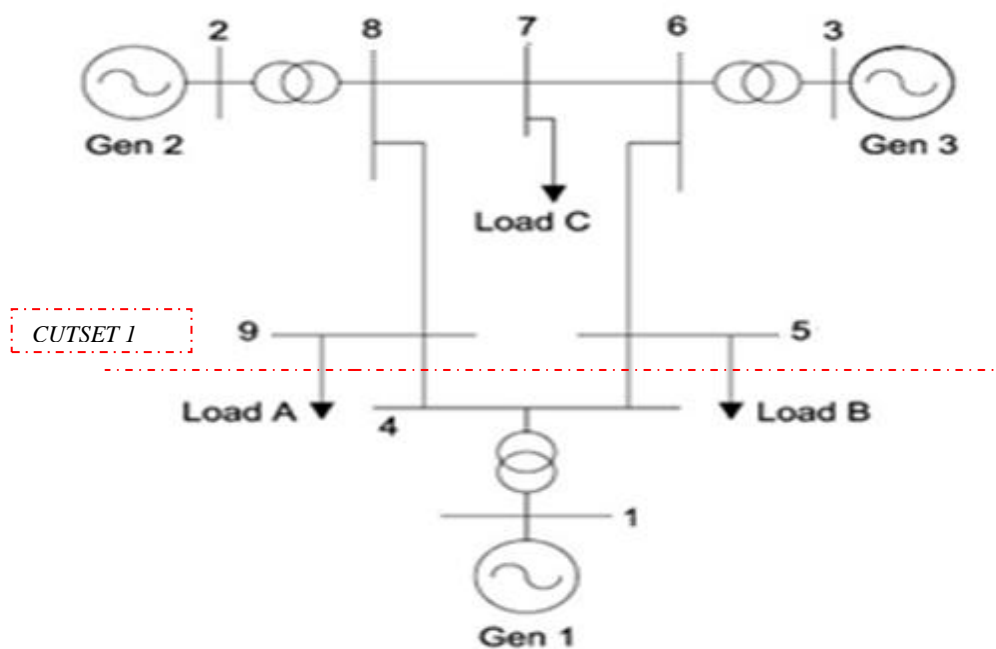
Εικόνα 5.2 Διάγραμμα ροής – Minimum Cut Αλγόριθμος

B 5.4 Αποτελέσματα

Στις επόμενες υποενότητες, παρατίθενται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του Minimum cut αλγορίθμου για τα πρότυπα δίκτυα IEEE - 9 ζυγών, - 39 ζυγών και -118 ζυγών. Η προσομοίωση έγινε στο περιβάλλον του Matlab, και τα δεδομένα πάνω στα οποία έγινε προήλθαν από το πρόγραμμα Matpower. Τα χαρακτηριστικά του PC είναι: Intel Core 2 Duo CPU 2GHz - 4GB RAM PC - Matlab 7.14.0.739 code.

B 5.4.1 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 9 Ζυγών – IEEE 9-Bus

Με βάση τον αλγόριθμο Minimum cut, το δίκτυο 9 ζυγών θα χωριστεί σε 2 νησίδες, λόγω των 2 ομάδων συναφών γεννητριών – όπως με τον SCCI αλγόριθμο. Παρακάτω φαίνεται το δίκτυο χωρισμένο σε νησίδες, καθώς και ο πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό κάθε ζυγού, τη νησίδα που ανήκει καθένας από αυτούς και το χρόνο υπολογισμού της μεθόδου.



Εικόνα 5.3 Διαχωρισμός του δικτύου 9 ζυγών σε νησίδες με Minimum Cut Αλγόριθμο

| ΝΗΣΙΔΑ 1 | ΝΗΣΙΔΑ 2 | Χρόνος Υπολογισμού (sec) |
|-------------|----------------------------|--------------------------|
| 1, 4 | 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 | 0.947 |

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα διαχωρισμού δικτύου 9 ζυγών με χρήση Minimum Cut Αλγορίθμου – με **bold** οι ζυγοί των γεννητριών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ισοζύγιο ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας 9 ζυγών. Στη Νησίδα 1 υπάρχει περίσσεια ισχύος και στη Νησίδα 2 η κατανάλωση ισχύος είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή της.

| | P_G (MW) | P_L (MW) | Διαφορά(MW) |
|----------|------------|------------|-------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 71.95 | 0 | 71.95 |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 248 | 315 | -67 |

Πίνακας 5.2 Ισοζύγιο ισχύος μετά το διαχωρισμό του δικτύου 9 ζυγών με χρήση Minimum Cut Αλγορίθμου

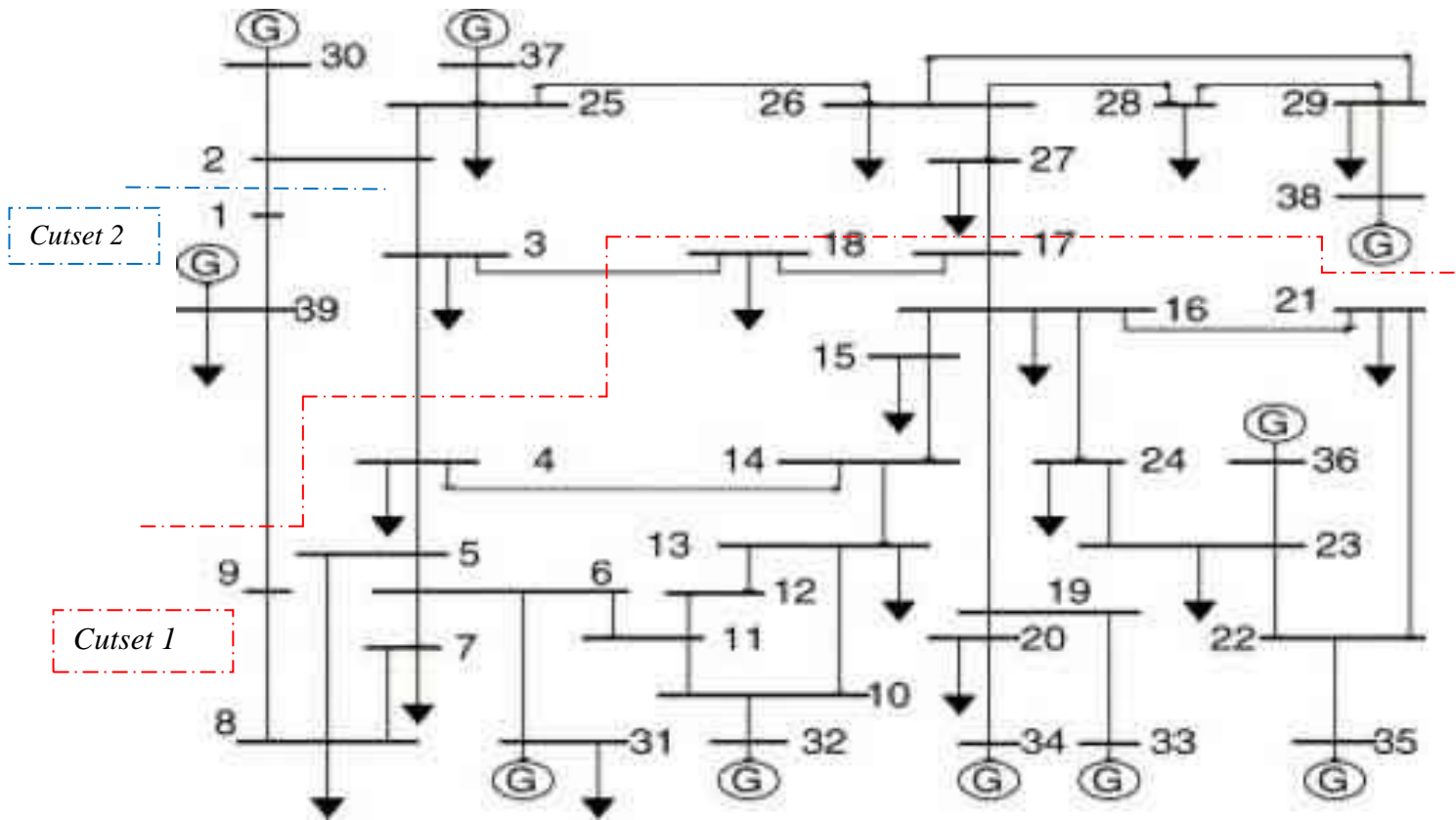
Κατά τη νησιδοποίηση δημιουργείται ένα διαχωριστικό σύνολο (*Cutset 1*), στο δίκτυο 9 ζυγών, μετά το χωρισμό του σε 2 νησίδες. Οι γραμμές που αποκόπτονται από το *cutset 1*, καθώς και η τιμή cut είναι οι εξής:

| <u><i>Cutset 1</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|------------------------|--------------------------------------|
| 4-5, 4-9 | 71.735 |

Πίνακας 5.3 Τιμή *cut* του *Cutset 1* μετά τη νησιδοποίηση με Minimum Cut αλγόριθμο στο δίκτυο 9 ζυγών

B 5.4.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 39 Ζυγών – IEEE 39-Bus

Με βάση τον αλγόριθμο Minimum cut και τις ομάδες συναφών γεννητριών, το δίκτυο 39 ζυγών θα χωριστεί σε 3 νησίδες. Όπως και στον SCCI αλγόριθμο, έτσι κι εδώ θα χρησιμοποιηθεί *αναδρομική διχοτόμηση*, ούτως ώστε να προκύψουν 2 διαχωριστικά σύνολα και άρα 3 νησίδες. Παρακάτω φαίνεται το δίκτυο χωρισμένο σε νησίδες, καθώς και ο πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό κάθε ζυγού, τη νησίδα που ανήκει καθένας από αυτούς και το χρόνο υπολογισμού της μεθόδου.



Εικόνα 5.4 Διαχωρισμός του δικτύου 39 ζυγών σε νησίδες με Minimum Cut Αλγόριθμο

| ΝΗΣΙΔΑ 1 | ΝΗΣΙΔΑ 2 | ΝΗΣΙΔΑ 3 | Χρόνος Υπολογισμού (sec) |
|---|---|--------------|--------------------------|
| 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 31, 32, 33, 34, 35, 36 | 2, 3, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 37, 38 | 1, 39 | 2.024 |

Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα διαχωρισμού δικτύου 39 ζυγών με χρήση Minimum Cut Αλγορίθμου – με **bold** οι ζυγοί των γεννητριών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ισοζύγιο ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας 39 ζυγών. Στις νησίδες 1 και 2 υπάρχει περίσσεια ισχύος. Στη νησίδα 3 υπάρχει μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος. Και στις 3 νησίδες οι αποκλίσεις παραγωγής – κατανάλωσης είναι μικρές, οπότε η ευστάθειά τους δεν επηρεάζεται.

| | P_G (MW) | P_L (MW) | Διαφορά(MW) |
|----------|------------|------------|-------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 3677.87 | 3597.1 | 80.77 |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 1620 | 1455.5 | 164.5 |
| ΝΗΣΙΔΑ 3 | 1000 | 1201.6 | -201.6 |

Πίνακας 5.5 Ισοζύγιο ισχύος μετά το διαχωρισμό του δικτύου 39 ζυγών με χρήση Minimum Cut Αλγορίθμου

Κατά τη νησιδοποίηση δημιουργούνται δύο διαχωριστικά σύνολα (*Cutset 1* και *Cutset 2*), στο δίκτυο 39 ζυγών, μετά το χωρισμό του σε 3 νησίδες. Το *Cutset 1* διαχωρίζει την Ομάδα 1 συναφών γεννητριών από τις Ομάδες 2 και 3, κι έπειτα το *Cutset 2* την Ομάδα 2 από την Ομάδα 3 (Πίνακας 3.2). Οι γραμμές που αποκόπτονται από τα *Cutset 1* και *Cutset 2*, η τιμή cut του καθενός καθώς και η συνολική τιμή cut των 2 *Cutset* είναι τα εξής:

| <u><i>Cutset 1</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|------------------------|--------------------------------------|
| 9-39, 3-4, 3-18, 17-27 | 130.6 |

Πίνακας 5.6 Τιμή *cut* του *Cutset 1* μετά τη νησιδοποίηση με Minimum Cut αλγόριθμο στο δίκτυο 39 ζυγών

| <u><i>Cutset 2</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|------------------------|--------------------------------------|
| 1-2 | 174.8 |

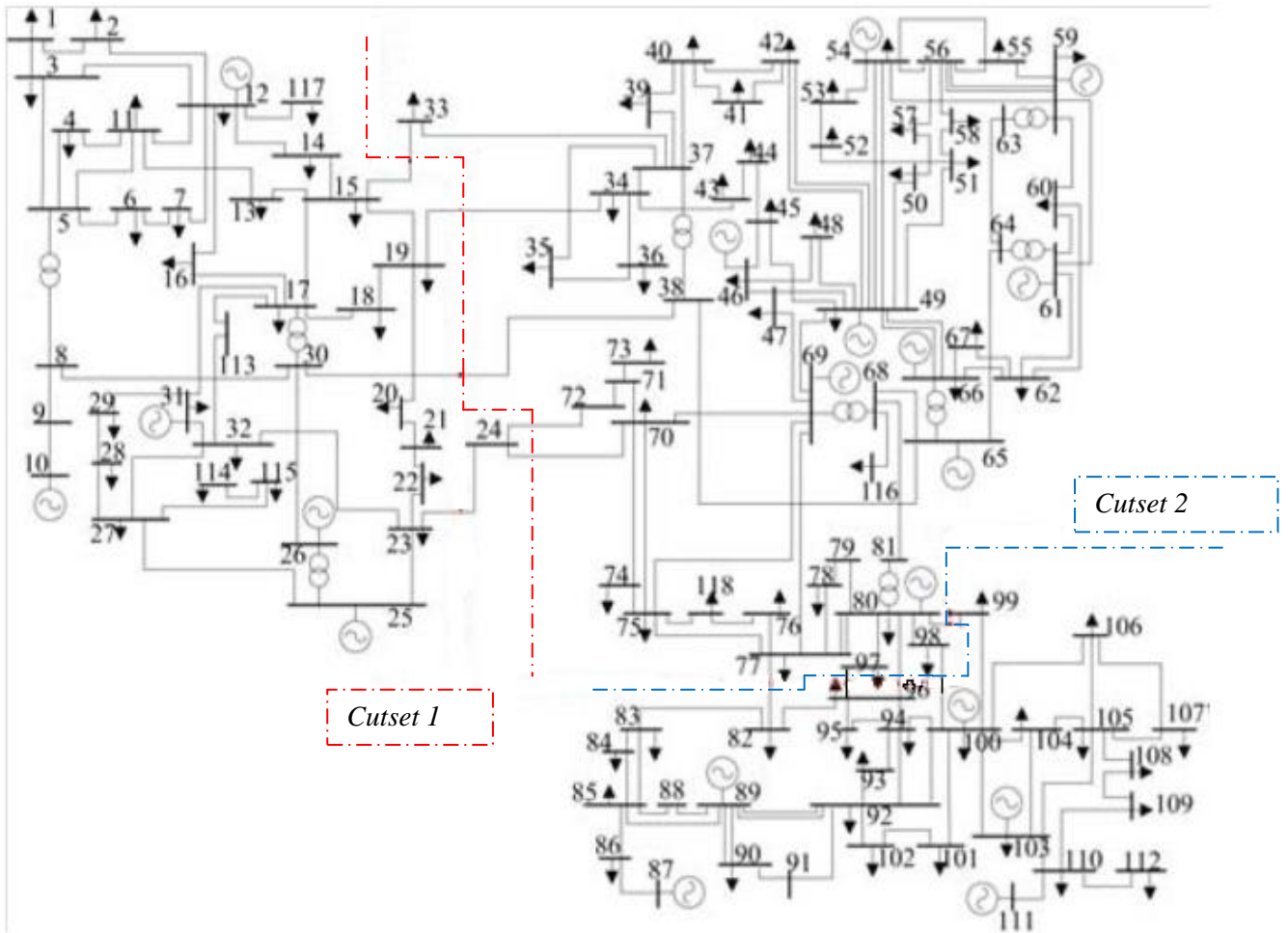
Πίνακας 5.7 Τιμή *cut* του *Cutset 2* μετά τη νησιδοποίηση με Minimum Cut αλγόριθμο στο δίκτυο 39 ζυγών

| <u>$Cutset(ol)=Cutset 1 + Cutset 2$</u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|--|--------------------------------------|
| 9-39, 3-4, 3-18, 17-27, 1-2 | 304.8 |

Πίνακας 5.8 Τιμή *cut* των *Cutset 1* και *Cutset 2* συνολικά μετά τη νησιδοποίηση με Minimum Cut αλγόριθμο στο δίκτυο 39 ζυγών

B 5.4.3 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 118 Ζυγών – IEEE 118-Bus

Με βάση τον αλγόριθμο Minimum cut και τις ομάδες συναφών γεννητριών, το δίκτυο 118 ζυγών θα χωριστεί σε 3 νησίδες όπως και το δίκτυο των 39 ζυγών. Αναλόγως λοιπόν, θα χρησιμοποιηθεί αναδρομική διχοτόμηση, ούτως ώστε να προκύψουν 2 διαχωριστικά σύνολα και άρα 3 νησίδες. Παρακάτω φαίνεται το δίκτυο χωρισμένο σε νησίδες, καθώς και ο πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό κάθε ζυγού, τη νησίδα που ανήκει καθένας από αυτούς και το χρόνο υπολογισμού της μεθόδου.



Εικόνα 5.5 Διαχωρισμός του δικτύου 118 ζυγών σε νησίδες με Minimum Cut Αλγόριθμο

| ΝΗΣΙΔΑ 1 | ΝΗΣΙΔΑ 2 | ΝΗΣΙΔΑ 3 | Χρόνος Υπολογισμού (sec) |
|---|--|---|--------------------------|
| 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 , 11, 12 , 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 , 26 , 27, 28, 29, 30, 31 , 32, 113, 114, 115, 117 | 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46 , 47, 48, 49 , 50, 51, 52, 53, 54 , 55, 56, 57, 58, 59 , 60, 61 , 62, 63, 64, 65 , 66 , 67, 68, 69 , 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80 , 81, 97, 98, 116, 118 | 82, 83, 84, 85, 86, 87 , 88, 89 , 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 99, 100 , 101, 102, 103 , 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111 , 112 | 48.739 |

Πίνακας 5.9 Αποτελέσματα διαχωρισμού δικτύου 118 ζυγών με χρήση Minimum Cut Αλγορίθμου – με **bold** οι ζυγοί των γεννητριών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ισοζύγιο ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας 39 ζυγών. Στις νησίδες 1 και 2 υπάρχει περίσσεια ισχύος. Στη νησίδα 3 υπάρχει μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος. Και στις 3 νησίδες οι αποκλίσεις παραγωγής – κατανάλωσης είναι μικρές, οπότε η ευστάθειά τους δεν επηρεάζεται.

| | P_G (MW) | P_L (MW) | Διαφορά(MW) |
|----------|------------|------------|-------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 1076 | 976 | 100 |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 2359.9 | 2320 | 39.9 |
| ΝΗΣΙΔΑ 3 | 939 | 946 | -7 |

Πίνακας 5.10 Ισοζύγιο ισχύος μετά το διαχωρισμό του δικτύου 118 ζυγών με χρήση Minimum Cut Αλγορίθμου

Κατά τη νησιδοποίηση δημιουργούνται δύο διαχωριστικά σύνολα (*Cutset 1* και *Cutset 2*), στο δίκτυο 118 ζυγών, μετά το χωρισμό του σε 3 νησίδες. Ομοίως με το δίκτυο 39 ζυγών, το *Cutset 1* διαχωρίζει την Ομάδα 1 συναφών γεννητριών από τις Ομάδες 2 και 3, κι έπειτα το *Cutset 2* την Ομάδα 2 από την Ομάδα 3 (Πίνακας 3.3). Οι γραμμές που αποκόπτονται από τα *Cutset 1* και *Cutset 2*, η τιμή cut του καθενός καθώς και η συνολική τιμή cut των 2 *Cutset* είναι τα εξής:

| <u><i>Cutset 1</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 15-33, 19-34, 30-38, 24-70, 24-72 | 80.8 |

Πίνακας 5.11 Τιμή *cut* του *Cutset 1* μετά τη νησιδοποίηση με Minimum Cut αλγόριθμο στο δίκτυο 118 ζυγών

| <u><i>Cutset 2</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| 77-82, 96-97, 80-96, 98-100, 80-99 | 57.8 |

Πίνακας 5.12 Τιμή *cut* του *Cutset 2* μετά τη νησιδοποίηση με Minimum Cut αλγόριθμο στο δίκτυο 118 ζυγών

| <u>$Cutset(ol)=Cutset 1 + Cutset 2$</u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|--|--------------------------------------|
| 15-33, 19-34, 30-38, 24-70, 24-72, 77-82, 96-97, 80-96, 98-100, 80-99 | 138.6 |

Πίνακας 5.13 Τιμή *cut* των *Cutset 1* και *Cutset 2* συνολικά μετά τη νησιδοποίηση με Minimum Cut αλγόριθμο στο δίκτυο 118 ζυγών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ **ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΕΝΕΡΓΟΥ ΚΑΙ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ**

B 6.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος ελεγχόμενης νησιδοποίησης με τον αλγόριθμο φασματικής ομαδοποίησης λαμβάνοντας υπόψη την ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος στις νησίδες αναλύεται στο παρόν κεφάλαιο. Η μεθοδολογία βασίζεται στον SCCI αλγόριθμο, μόνο που εφαρμόζεται και για τη ροή άεργου ισχύος στο δίκτυο, πέρα από τη ροή ενεργού ισχύος, και συνδυάζονται τα αποτελέσματα ώστε να εξαχθεί η τελική λύση νησιδοποίησης στο ΣΗΕ.

Στις προηγούμενες μεθόδους ελεγχόμενης νησιδοποίησης που εξετάστηκαν, βασικό κριτήριο για την επίτευξή τους ήταν το ισοζύγιο ισχύος εντός της νησίδας. Γι αυτό και ως αντικειμενική συνάρτηση έχει επιλεγεί η τήρηση του ισοζυγίου ενεργού ισχύος, κάτι που επίσης αποσκοπεί στη ρύθμιση της συχνότητας του συστήματος κάθε νησίδας, μέσα σε επιτρεπόμενα όρια. Ωστόσο, η ισορροπία άεργου ισχύος δεν ενσωματώθηκε στην ανάπτυξη των αλγορίθμων που αναδιατάσσουν το σύστημα μετά από κάποια διαταραχή.

Η άεργος ισχύς όμως διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη του προφίλ τάσης του συστήματος. Η ανεπαρκής υποστήριξη άεργου ισχύος στο σύστημα οδηγεί σε ένα χαμηλό προφίλ τάσης, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια τάσης. Μια σημαντική αναντιστοιχία μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης άεργου ισχύος μπορεί να προκαλέσει συνθήκες πολύ υψηλής ή πολύ χαμηλής τάσης εντός των νησίδων. Για να διατηρηθεί λοιπόν η συχνότητα του συστήματος και το προφίλ της τάσης εντός των αποδεκτών ορίων, είναι σκόπιμο να λαμβάνεται υπόψη η ισορροπία τόσο της ενεργού όσο και της άεργου ισχύος στις τεχνικές αναδιάρθρωσης του συστήματος μετά από διαταραχή. [17]

B 6.2 Πολλαπλά κριτήρια για το διαχωρισμό γράφου – Multi-Objective Graph Partitioning

Ο παραδοσιακός αλγόριθμος διαχωρισμού γράφου είναι σε θέση να βρει το βέλτιστο διαχωρισμό του σε ομάδες, έχοντας μόνο ένα κριτήριο– που εκφράζεται με την αντικειμενική συνάρτηση. Ωστόσο, σε πολλές μηχανολογικές εφαρμογές, υπάρχει η ανάγκη για την παραγωγή μιας λύσης διαχωρισμού που πρέπει να πληρεί πολλαπλά κριτήρια βελτιστοποίησης. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να διαμορφωθούν ως ένα πρόβλημα διαχωρισμού γράφου στο οποίο σε κάθε ακμή έχουν οριστεί πολλαπλά βάρη. Τα κριτήρια διαχωρισμού του γράφου ελαχιστοποιούν την συνολική τιμή κοπής που προκύπτει από το διαχωρισμό, πάντα σε συνάρτηση με κάθε ένα από τα πολλαπλά βάρη .

Τα πολλαπλά κριτήρια βελτιστοποίησης αποτελούν δύσκολη πρόκληση, δεδομένου ότι μια βέλτιστη λύση για το ένα κριτήριο δεν είναι απαραίτητα η βέλτιστη και για ένα άλλο κριτήριο. Σε πρόβλημα με πολλαπλά κριτήρια για διαχωρισμό γράφου, διαφορετικά βάρη ακμών αυξάνουν τη δυσκολία στην εξεύρεση

της βέλτιστης λύσης. Η απλοϊκή προσέγγιση συνδυασμού των κριτηρίων, όπως η άθροιση 2 βαρών σε ένα ενιαίο βάρος, δεν είναι πάντα κατάλληλη.

Ο αλγόριθμος που προτείνεται μπορεί να χειριστεί τόσο παρόμοια, καθώς και ανόμοια βάρη ακμών, επιτρέποντας ανταλλαγές μεταξύ των διαφόρων κριτηρίων. Αυτός ο αλγόριθμος συνδυάζει πολλαπλά κριτήρια σε ένα κριτήριο, κι εφαρμόζεται για αυτό το συνδυαστικό κριτήριο για να προκύψει ο διαχωρισμός. Ο τρόπος για να συνδυαστούν πολλαπλά κριτήρια βασίζεται στη διαισθητική αντίληψη του τι συνιστά έναν καλό διαχωρισμό ενός γράφου πληρώντας πολλαπλά κριτήρια. Μια λύση διαχωρισμού του γράφου κοντά σε κάθε βέλτιστο διαχωρισμό, όσων αφορά το συνδυαστικό κριτήριο, θεωρείται μια καλή λύση.

Η βασική διαδικασία διεξαγωγής διαχωρισμού σε ένα γράφο πληρώντας 2 κριτήρια φαίνεται παρακάτω:

Βήμα 1: Διεξαγωγή του διαχωρισμού του γράφου, με κριτήριο το ισοζύγιο ενεργού ισχύος. Λαμβάνεται η βέλτιστη τιμή cut C_1 του διαχωρισμού.

Βήμα 2: Διεξαγωγή του διαχωρισμού του γράφου, με κριτήριο το ισοζύγιο άεργου ισχύος. Λαμβάνεται η βέλτιστη τιμή cut C_2 του διαχωρισμού.

Βήμα 3: Υπολογισμός ενός συνδυασμένου βάρους $w_{combined}$ για κάθε ακμή του γράφου. Το συνδυασμένο βάρος $w_{combined}$ λαμβάνεται από το άθροισμα των 2 κανονικοποιημένων βαρών σε κάθε ακμή με βέλτιστες τιμές cut τις C_1 και C_2 αντίστοιχα, και σταθμίζονται από το ρυθμιζόμενο παράγοντα προτίμησης p , όπου w_1 και w_2 είναι τα διαφορετικά βάρη σε κάθε ακμή του γράφου. Ο παράγοντας προτίμησης p είναι ένας αριθμός μεταξύ 0 και 1. Η σχέση από την οποία προκύπτει το συνδυασμένο βάρος είναι η εξής:

$$w_{combined} = p \cdot \frac{w_1}{c_1} + \frac{w_2}{c_2} \cdot (1 - p) \quad (6.2.1)$$

Το πόσο θα διαφέρει η τιμή cut σε κάθε cutset από η βέλτιστη λύση, ελέγχεται από τον παράγοντα p . Έτσι, ο παράγοντας προτίμησης p ελέγχει τους συμβιβασμούς μεταξύ των διαφόρων κριτηρίων. Δεδομένου ότι όλα τα βάρη των ακμών είναι κανονικοποιημένα με το αντίστοιχο κριτήριο, αντιπροσωπεύουν ένα κλάσμα της βέλτιστης περικοπής – cutset και μπορούν να συνδυαστούν

Βήμα 4: Εφαρμόζεται διαχωρισμός του γράφου με ένα – συνδυαστικό – κριτήριο, με βάση τα νέα συνδυαστικά και κανονικοποιημένα βάρη ακμών του γράφου. [17]

B 6.3 Μεθοδολογία μεθόδου νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού – άεργου ισχύος

Τα κριτήρια που θα πρέπει να πληρεί ο αλγόριθμος για να επιτευχθεί ελεγχόμενη νησιδοποίηση, είναι 2: η ισορροπία ενεργού ισχύος και η ισορροπία άεργου στις νησίδες μετά το διαχωρισμό του δικτύου – πάντα βέβαια με τον περιορισμό των ομάδων συναφών γεννητριών. Έτσι, θα προκύψει ένα ενιαίο συνδυαστικό κριτήριο πάνω στο οποίο θα βασιστεί ο διαχωρισμός του δικτύου σε νησίδες.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται βασίζεται στον SCCI αλγόριθμο, ώστε να διαχωρίζεται το δίκτυο για κάθε κριτήριο. Βέβαια, θα μπορούσε να επιλεγεί οποιοσδήποτε άλλος από τους αλγορίθμους νησιδοποίησης που αναλύονται στην εργασία. Με βάση λοιπόν τα βασικά βήματα του αλγορίθμου στην ενότητα B 4.5, έχουμε την παρακάτω μεθοδολογία:

Βήμα 1

1. Κατασκευή του **στατικού γράφου** G_{S1} με κόμβους για όλους τους ζυγούς του συστήματος. Τα βάρη των ακμών ορίζονται ως $(|P_{ij}| + |P_{ji}|)/2$
2. Κατασκευή του Πίνακα Προβολών U_1 , βασισμένου στα αποτελέσματα ομαδοποίησης συναφών γεννητριών
3. Υπολογισμός των 2 πρώτων ιδιοδιανυσμάτων θ_{p1} και θ_{p2} του γενικευμένου ιδιοπροβλήματος:

$$U_1^T L_{S1} U_1 \theta = \lambda U_1^T U_1 \theta \quad (6.3.1)$$

4. Έστω $J_1 \in \mathcal{R}^{n \times 2}$ ο πίνακας που περιέχει τα ιδιοδιανύσματα $U\theta_{p1}$ και $U\theta_{p2}$ ως στήλες. Έστω επίσης $y_{1i} \in \mathcal{R}^2$ το διάνυσμα το οποίο αντιστοιχεί στη γραμμή i του πίνακα J_1
5. Ομαδοποίηση των κόμβων y_{1i} σε επιμέρους σύνολα V_{p1} και V_{p2} με χρήση αλγορίθμου k-means
6. Επιλογή του συνόλου V_{p1} ή του V_{p2} (αναλόγως ποιο περιέχει μη συγχρονισμένες γεννήτριες) ως σύνολο κόμβων ενός νέου Στατικού Γράφου, κι επιστροφή στο βήμα 1) για να εφαρμοστεί *Αναδρομική Διχοτόμηση*
7. Αποθήκευση της βέλτιστης τιμής cut C_1 του διαχωρισμού, και του πίνακα βαρών W_1 που χρησιμοποιήθηκε

Βήμα 2

1. Κατασκευή του **στατικού γράφου** G_{S2} με κόμβους για όλους τους ζυγούς του συστήματος. Τα βάρη των ακμών ορίζονται ως $(|Q_{ij}| + |Q_{ji}|)/2$
2. Κατασκευή του Πίνακα Προβολών U_2 , βασισμένου στα αποτελέσματα ομαδοποίησης συναφών γεννητριών
3. Υπολογισμός των 2 πρώτων ιδιοδιανυσμάτων θ_{q1} και θ_{q2} του γενικευμένου ιδιοπροβλήματος:

$$U_2^T L_{S2} U_2 \theta = \lambda U_2^T U_2 \theta \quad (6.3.2)$$

4. Έστω $J_2 \in \mathcal{R}^{n \times 2}$ ο πίνακας που περιέχει τα ιδιοδιανύσματα $U_{\theta q_1}$ και $U_{\theta q_2}$ ως στήλες. Έστω επίσης $y_{2i} \in \mathcal{R}^2$ το διάνυσμα το οποίο αντιστοιχεί στη γραμμή i του πίνακα J_2
5. Ομαδοποίηση των κόμβων y_{2i} σε επιμέρους σύνολα V_{q_1} και V_{q_2} με χρήση αλγορίθμου k-means
6. Επιλογή του συνόλου V_{q_1} ή του V_{q_2} (αναλόγως ποιο περιέχει μη συγχρονισμένες γεννήτριες) ως σύνολο κόμβων ενός νέου Στατικού Γράφου, κι επιστροφή στο βήμα 1) για να εφαρμοστεί *Αναδρομική Διχοτόμηση*
7. Αποθήκευση της βέλτιστης τιμής cut C_2 του διαχωρισμού, και του πίνακα βαρών W_2 που χρησιμοποιήθηκε

Βήμα 3 και Βήμα 4

1. Έχοντας από τα προηγούμενα 2 βήματα δεδομένα τα C_1, W_1, C_2, W_2 , κατασκευή του **στατικού γράφου** G_{S3} με κόμβους για όλους τους ζυγούς του συστήματος. Τα βάρη των ακμών ορίζονται από τη σχέση (6.2.1) ως

$$w_{combined} = p \cdot \frac{w_1}{c_1} + \frac{w_2}{c_2} \cdot (1 - p)$$

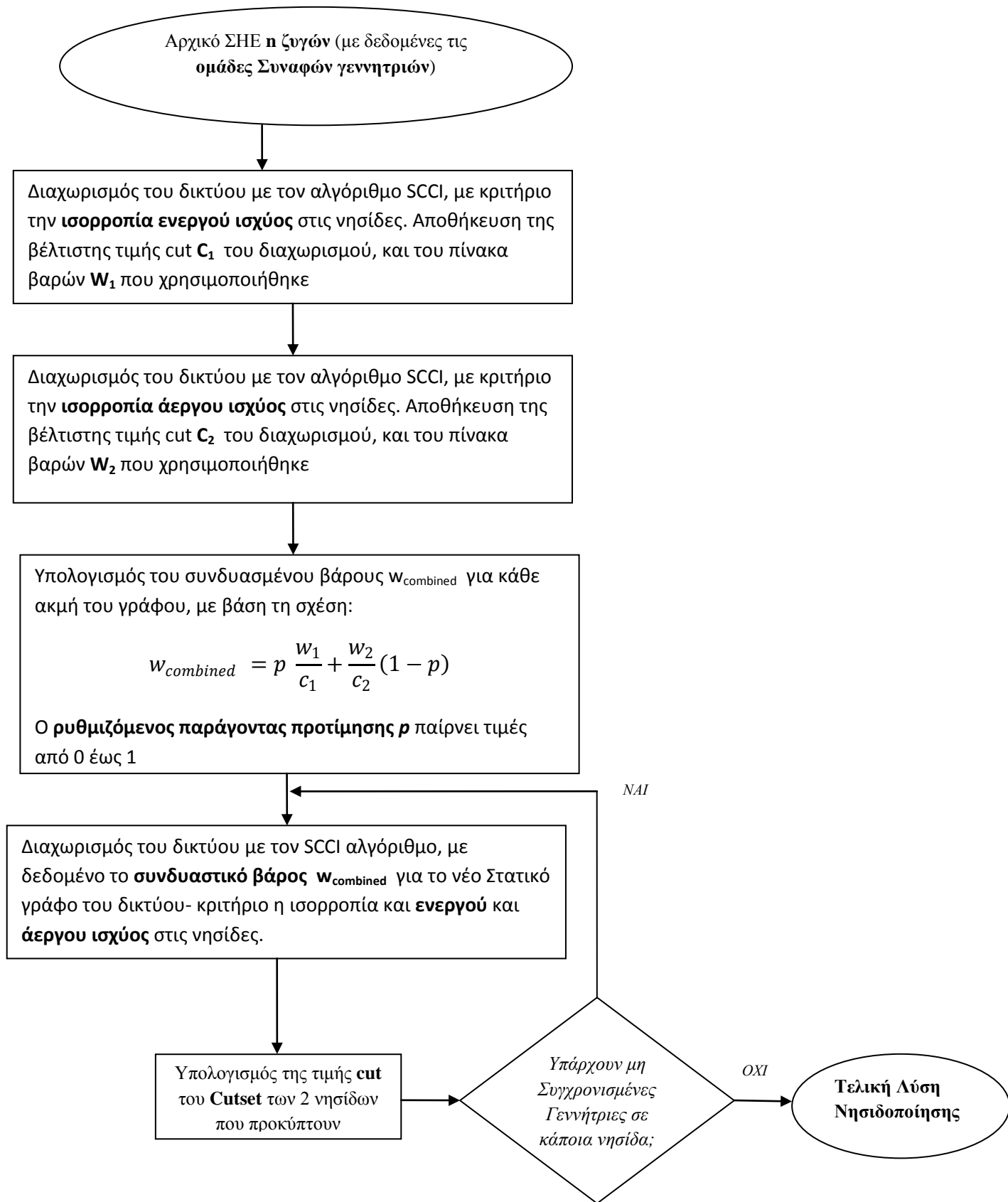
Όπου το p παίρνει τιμή από 0 ως 1

2. Κατασκευή του Πίνακα Προβολών U_3 , βασισμένου στα αποτελέσματα ομαδοποίησης συναφών γεννητριών
3. Υπολογισμός των 2 πρώτων ιδιοδιανυσμάτων $\theta_{r q_1}$ και $\theta_{r q_2}$ του γενικευμένου ιδιοπροβλήματος:

$$U_3^T L_{S_3} U_2 \theta = \lambda U_3^T U_3 \theta \quad (6.3.3)$$

4. Έστω $J_3 \in \mathcal{R}^{n \times 2}$ ο πίνακας που περιέχει τα ιδιοδιανύσματα $U_{\theta r q_1}$ και $U_{\theta r q_2}$ ως στήλες. Έστω επίσης $y_{3i} \in \mathcal{R}^2$ το διάνυσμα το οποίο αντιστοιχεί στη γραμμή i του πίνακα J_3
5. Ομαδοποίηση των κόμβων y_{3i} σε επιμέρους σύνολα $V_{r q_1}$ και $V_{r q_2}$ με χρήση αλγορίθμου k-means
6. Επιλογή του συνόλου $V_{r q_1}$ ή του $V_{r q_2}$ (αναλόγως ποιο περιέχει μη συγχρονισμένες γεννήτριες) ως σύνολο κόμβων ενός νέου Στατικού Γράφου, κι επιστροφή στο βήμα 1) για να εφαρμοστεί *Αναδρομική Διχοτόμηση*

Παρακάτω παρατίθεται και το διάγραμμα ροής(flowchart) της μεθοδολογίας του αλγορίθμου νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος:



Εικόνα 6.1 Διάγραμμα ροής Αλγορίθμου νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος

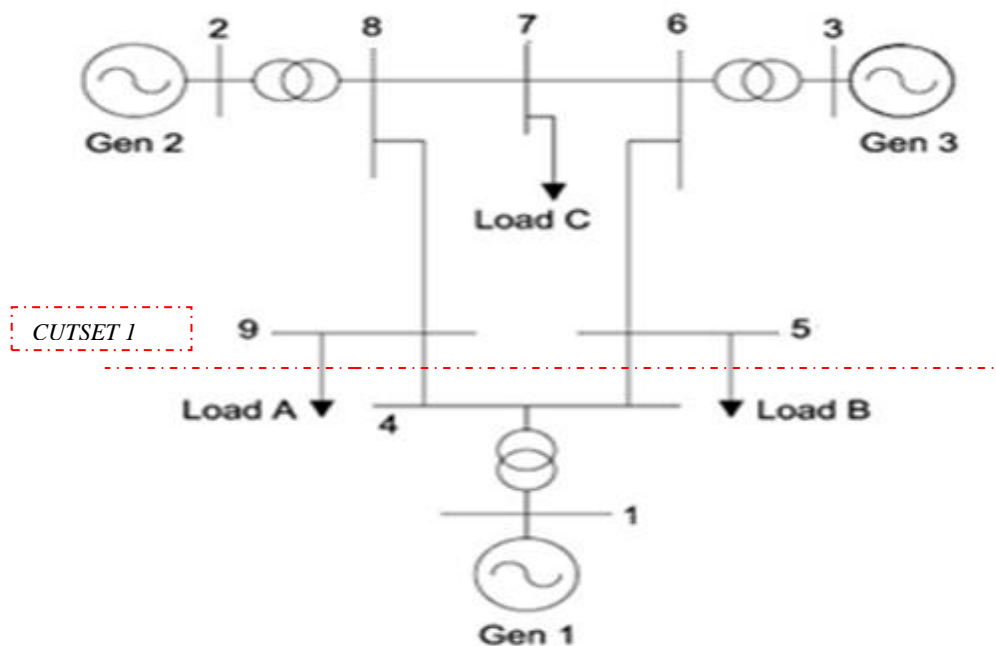
B 6.4 Αποτελέσματα

Στις επόμενες υποενότητες, παρατίθενται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του αλγορίθμου νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος στις νησίδες για τα πρότυπα δίκτυα IEEE - 9 ζυγών, - 39 ζυγών και -118 ζυγών. Η προσομοίωση έγινε στο περιβάλλον του Matlab, και τα δεδομένα πάνω στα οποία έγινε προήλθαν από το πρόγραμμα Matpower. Τα χαρακτηριστικά του PC είναι: Intel Core 2 Duo CPU 2GHz - 4GB RAM PC - Matlab 7.14.0.739 code.

Να σημειωθεί πως και για τα 3 δίκτυα, η τιμή που πήρε ο ρυθμιζόμενος παράγοντας προτίμησης p ήταν ίση με **0.7**.

B 6.4.1 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 9 Ζυγών – IEEE 9-Bus

Με βάση τον αλγόριθμο νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος στις νησίδες, καθώς και τις ομάδες συναφών γεννητριών, το δίκτυο 9 ζυγών θα χωριστεί σε 2 νησίδες. Παρακάτω φαίνεται το δίκτυο χωρισμένο σε νησίδες, καθώς και ο πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό κάθε ζυγού, τη νησίδα που ανήκει καθένας από αυτούς και το χρόνο υπολογισμού της μεθόδου.



Εικόνα 6.2 Διαχωρισμός του δικτύου 9 ζυγών σε νησίδες με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος

| ΝΗΣΙΔΑ 1 | ΝΗΣΙΔΑ 2 | Χρόνος Υπολογισμού (sec) |
|-------------|----------------------------|--------------------------|
| 1, 4 | 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 | 1.298 |

Πίνακας 6.1 Αποτελέσματα διαχωρισμού δικτύου 9 ζυγών με χρήση Αλγορίθμου Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος – με **bold** οι ζυγοί των γεννητριών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ισοζύγιο ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας 9 ζυγών. Στη Νησίδα 1 υπάρχει περίσσεια ισχύος και στη Νησίδα 2 η κατανάλωση ισχύος είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή της.

| | P_G (MW) | P_L (MW) | Διαφορά(MW) |
|----------|------------|------------|-------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 71.95 | 0 | 71.95 |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 248 | 315 | -67 |

Πίνακας 6.2 Ισοζύγιο ισχύος μετά το διαχωρισμό του δικτύου 9 ζυγών με χρήση Αλγορίθμου Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος

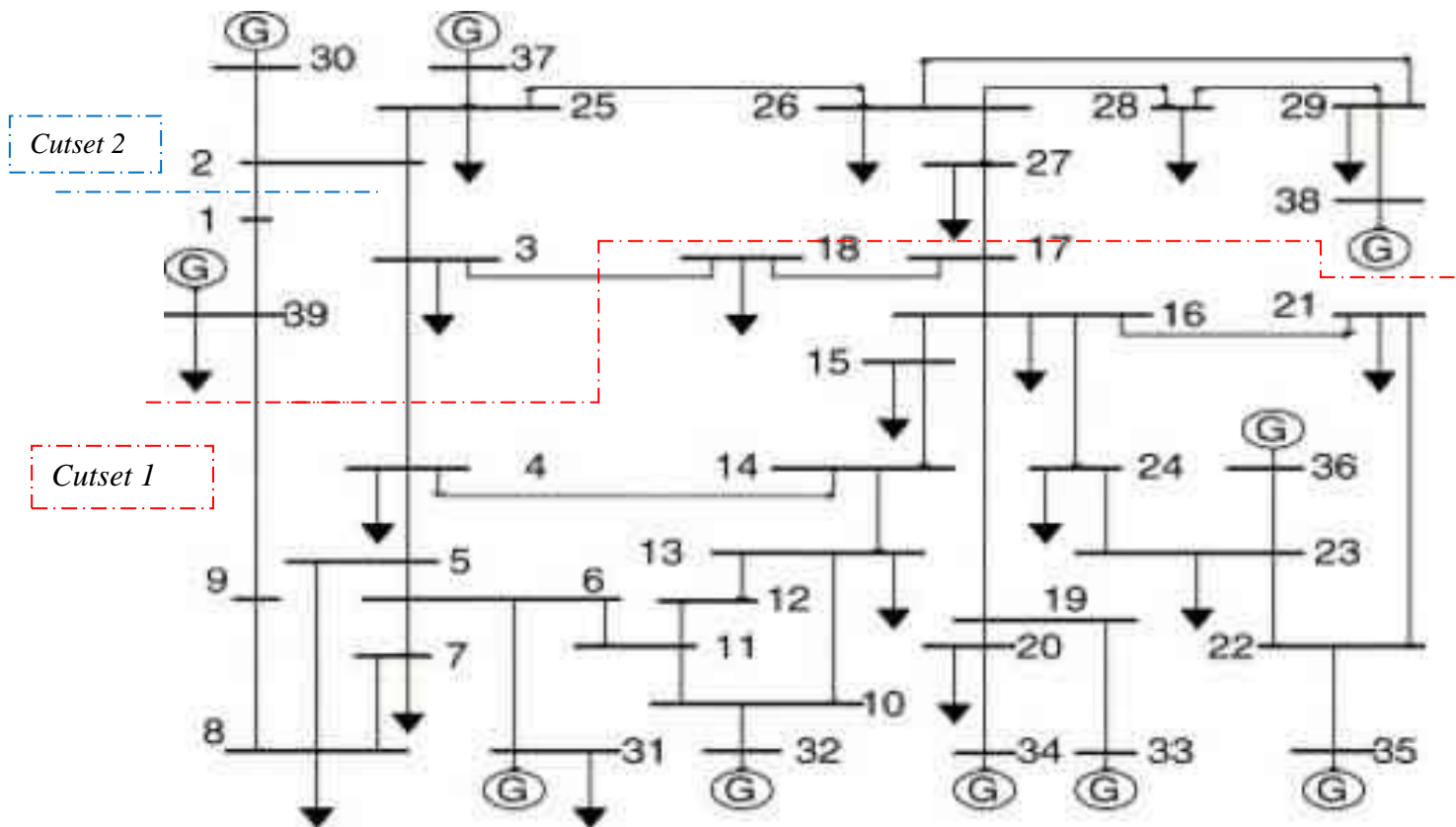
Κατά τη νησιδοποίηση δημιουργείται ένα διαχωριστικό σύνολο (*Cutset 1*), στο δίκτυο 9 ζυγών, μετά το χωρισμό του σε 2 νησίδες. Οι γραμμές που αποκόπτονται από το *cutset 1*, καθώς και η τιμή cut είναι οι εξής:

| <u><i>Cutset 1</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|------------------------|--------------------------------------|
| 4-5, 4-9 | 71.735 |

Πίνακας 6.3 Τιμή *cut* του *Cutset 1* μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο 9 ζυγών

B 6.4.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 39 Ζυγών – IEEE 39-Bus

Με βάση τον αλγόριθμο Minimum cut και τις ομάδες συναφών γεννητριών, το δίκτυο 39 ζυγών θα χωριστεί σε 3 νησίδες. Όπως και στον SCCI αλγόριθμο, έτσι κι εδώ θα χρησιμοποιηθεί *αναδρομική διχοτόμηση*, ούτως ώστε να προκύψουν 2 διαχωριστικά σύνολα και άρα 3 νησίδες. Παρακάτω φαίνεται το δίκτυο χωρισμένο σε νησίδες, καθώς και ο πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό κάθε ζυγού, τη νησίδα που ανήκει καθένας από αυτούς και το χρόνο υπολογισμού της μεθόδου.



Εικόνα 6.3 Διαχωρισμός του δικτύου 39 ζυγών σε νησίδες με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος

| ΝΗΣΙΔΑ 1 | ΝΗΣΙΔΑ 2 | ΝΗΣΙΔΑ 3 | Χρόνος Υπολογισμού (sec) |
|---|---|--------------|--------------------------|
| 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 31, 32, 33, 34, 35, 36 | 2, 3, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 37, 38 | 1, 39 | 1.629 |

Πίνακας 6.4 Αποτελέσματα διαχωρισμού δικτύου 39 ζυγών με χρήση Αλγορίθμου Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος – με **bold** οι ζυγοί των γεννητριών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ισοζύγιο ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας 39 ζυγών. Στις νησίδες 1 και 2 υπάρχει περίσσεια ισχύος. Στη νησίδα 3 υπάρχει μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος. Και στις 3 νησίδες οι αποκλίσεις παραγωγής – κατανάλωσης είναι μικρές, οπότε η ευστάθειά τους δεν επηρεάζεται.

| | P_G (MW) | P_L (MW) | Διαφορά(MW) |
|----------|------------|------------|-------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 3677.87 | 3597.1 | 80.77 |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 1620 | 1455.5 | 164.5 |
| ΝΗΣΙΔΑ 3 | 1000 | 1201.6 | -201.6 |

Πίνακας 6.5 Ισοζύγιο ισχύος μετά το διαχωρισμό του δικτύου 39 ζυγών με χρήση Αλγορίθμου Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος

Κατά τη νησιδοποίηση δημιουργούνται δύο διαχωριστικά σύνολα (*Cutset 1* και *Cutset 2*), στο δίκτυο 39 ζυγών, μετά το χωρισμό του σε 3 νησίδες. Το *Cutset 1* διαχωρίζει την Ομάδα 1 συναφών γεννητριών από τις Ομάδες 2 και 3, κι έπειτα το *Cutset 2* την Ομάδα 2 από την Ομάδα 3 (Πίνακας 3.2). Οι γραμμές που αποκόπτονται από τα *Cutset 1* και *Cutset 2*, η τιμή cut του καθενός καθώς και η συνολική τιμή cut των 2 *Cutset* είναι τα εξής:

| <u><i>Cutset 1</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|------------------------|--------------------------------------|
| 9-39, 3-4, 3-18, 17-27 | 130.6 |

Πίνακας 6.6 Τιμή cut του *Cutset 1* μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο 39 ζυγών

| <u><i>Cutset 2</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MVA$</u> |
|------------------------|---------------------------------------|
| 1-2 | 174.2 |

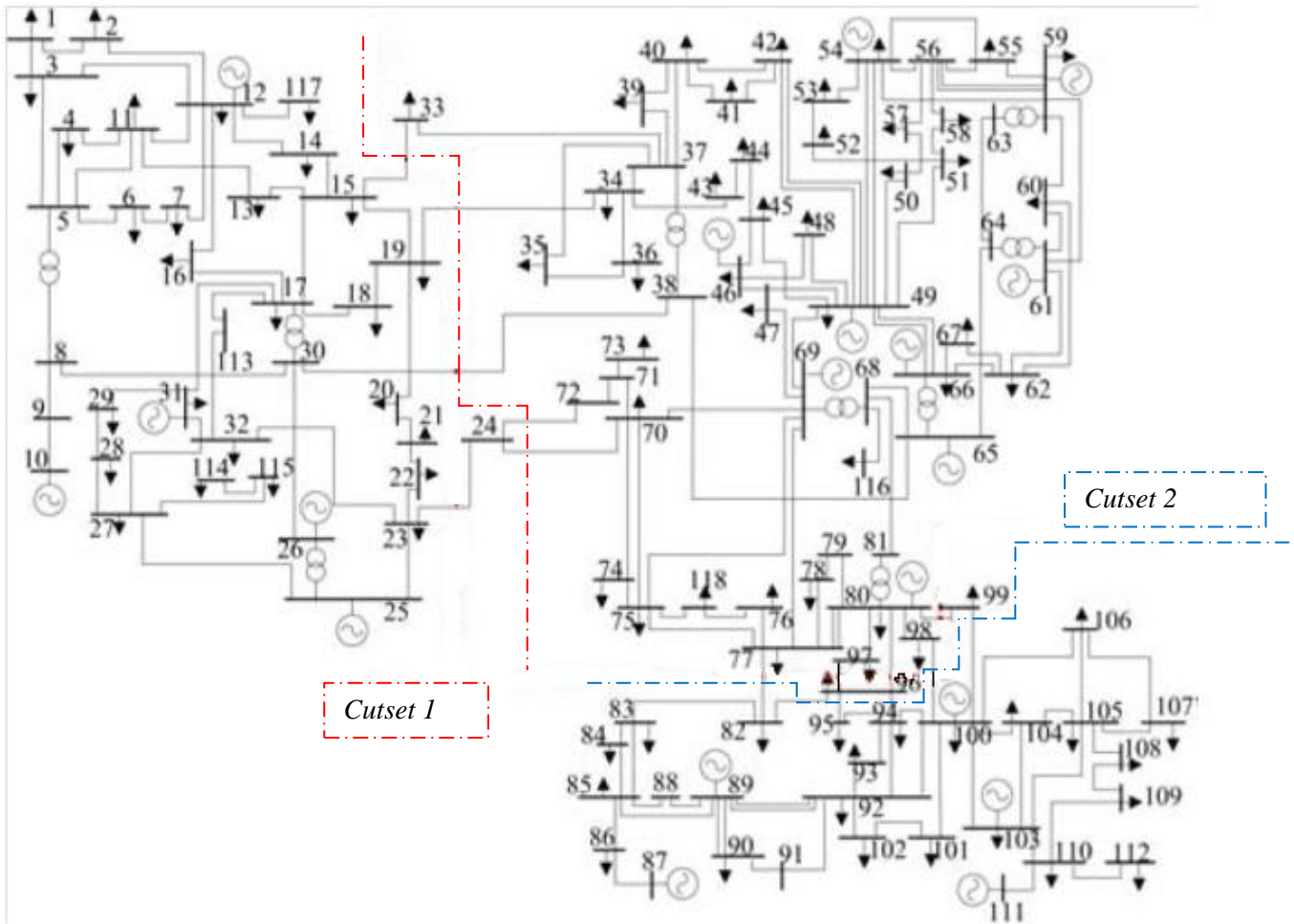
Πίνακας 6.7 Τιμή cut του *Cutset 2* μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο 39 ζυγών

| <u>$Cutset(ol)=Cutset 1 + Cutset 2$</u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MVA$</u> |
|--|---------------------------------------|
| 9-39, 3-4, 3-18, 17-27, 1-2 | 304.8 |

Πίνακας 6.8 Τιμή cut των *Cutset 1* και *Cutset 2* συνολικά μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο 39 ζυγών

B 6.4.3 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 118 Ζυγών – IEEE 118-Bus

Με βάση τον Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος στις νησίδες, και τις ομάδες συναφών γεννητριών, το δίκτυο 118 ζυγών θα χωριστεί σε 3 νησίδες όπως και το δίκτυο των 39 ζυγών. Αναλόγως λοιπόν, θα χρησιμοποιηθεί *αναδρομική διχοτόμηση*, ούτως ώστε να προκύψουν 2 διαχωριστικά σύνολα και άρα 3 νησίδες. Παρακάτω φαίνεται το δίκτυο χωρισμένο σε νησίδες, καθώς και ο πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό κάθε ζυγού, τη νησίδα που ανήκει καθένας από αυτούς και το χρόνο υπολογισμού της μεθόδου.



Εικόνα 6.4 Διαχωρισμός του δικτύου 118 ζυγών σε νησίδες με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος

| ΝΗΣΙΔΑ 1 | ΝΗΣΙΔΑ 2 | ΝΗΣΙΔΑ 3 | Χρόνος Υπολογισμού (sec) |
|---|--|---|--------------------------|
| 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 , 11, 12 , 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 , 26 , 27, 28, 29, 30, 31 , 32, 113, 114, 115, 117 | 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46 , 47, 48, 49 , 50, 51, 52, 53, 54 , 55, 56, 57, 58, 59 , 60, 61 , 62, 63, 64, 65 , 66 , 67, 68, 69 , 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80 , 81, 96, 97, 98, 99, 116, 118 | 82, 83, 84, 85, 86, 87 , 88, 89 , 90, 91, 92, 93, 94, 95, 100 , 101, 102, 103 , 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111 , 112 | 2.375 |

Πίνακας 6.9 Αποτελέσματα διαχωρισμού δικτύου 118 ζυγών με χρήση Αλγορίθμου Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος – με **bold** οι ζυγοί των γεννητριών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ισοζύγιο ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας 39 ζυγών. Στις νησίδες 1 και 2 υπάρχει περίσσεια ισχύος. Στη νησίδα 3 υπάρχει μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος. Και στις 3 νησίδες οι αποκλίσεις παραγωγής – κατανάλωσης είναι μικρές, οπότε η ευστάθειά τους δεν επηρεάζεται.

| | P_G (MW) | P_L (MW) | Διαφορά(MW) |
|----------|------------|------------|-------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 1076 | 976 | 100 |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 2359.9 | 2400 | -40.1 |
| ΝΗΣΙΔΑ 3 | 939 | 866 | 73 |

Πίνακας 6.10 Ισοζύγιο ισχύος μετά το διαχωρισμό του δικτύου 118 ζυγών με χρήση Αλγορίθμου Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος

Κατά τη νησιδοποίηση δημιουργούνται δύο διαχωριστικά σύνολα (*Cutset 1* και *Cutset 2*), στο δίκτυο 118 ζυγών, μετά το χωρισμό του σε 3 νησίδες. Ομοίως με το δίκτυο 39 ζυγών, το *Cutset 1* διαχωρίζει την Ομάδα 1 συναφών γεννητριών από τις Ομάδες 2 και 3, κι έπειτα το *Cutset 2* την Ομάδα 2 από την Ομάδα 3 (Πίνακας 3.3). Οι γραμμές που αποκόπτονται από τα *Cutset 1* και *Cutset 2*, η τιμή cut του καθενός καθώς και η συνολική τιμή cut των 2 *Cutset* είναι τα εξής:

| <u><i>Cutset 1</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 15-33, 19-34, 30-38, 24-70, 24-72 | 80.8 |

Πίνακας 6.11 Τιμή *cut* του *Cutset 1* μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο 118 ζυγών

| <u><i>Cutset 2</i></u> | <u>$\Sigma/ P_{ij}/MVA$</u> |
|-------------------------------------|--|
| 77-82, 94-96, 95-96, 98-100, 99-100 | 62.2 |

Πίνακας 6.12 Τιμή *cut* του *Cutset 2* μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο 118 ζυγών

| $Cutset(ol) = Cutset 1 + Cutset 2$ | $\sum P_{ij}/MVA$ |
|---|-------------------|
| 15-33, 19-34, 30-38, 24-70, 24-72, 77-82, 94-96, 95-96, 98-100, 99-100 | 143.0 |

Πίνακας 6.13 Τιμή *cut* των *Cutset 1* και *Cutset 2* συνολικά μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με ισορροπία ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο 118 ζυγών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ **ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΟΝ ΓΕΝΕΤΙΚΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ**

B 7.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος ελεγχόμενης νησιδοποίησης με χρήση του **δυναδικού Γενετικού Αλγορίθμου** αναλύεται σε αυτό το κεφάλαιο. Πέρα από το γεγονός πως η εύρεση της λύσης νησιδοποίησης βασίζεται στη θεωρία Γράφων, η συγκεκριμένη μέθοδος νησιδοποίησης δεν παρουσιάζει κοινά στοιχεία με τις προηγούμενες μεθόδους, καθώς δεν βασίζεται στο θεωρητικό υπόβαθρο του αντικειμένου, αλλά αποτελεί μια «διαισθητική» μέθοδο. Στις επόμενες ενότητες, αφού αναλυθεί το θεωρητικό υπόβαθρο του Γενετικού Αλγορίθμου, θα περιγραφεί η μεθοδολογία της ελεγχόμενης νησιδοποίησης που βασίζεται σε αυτόν.

B 7.2 Εισαγωγή στο Δυναδικό Γενετικό Αλγόριθμο

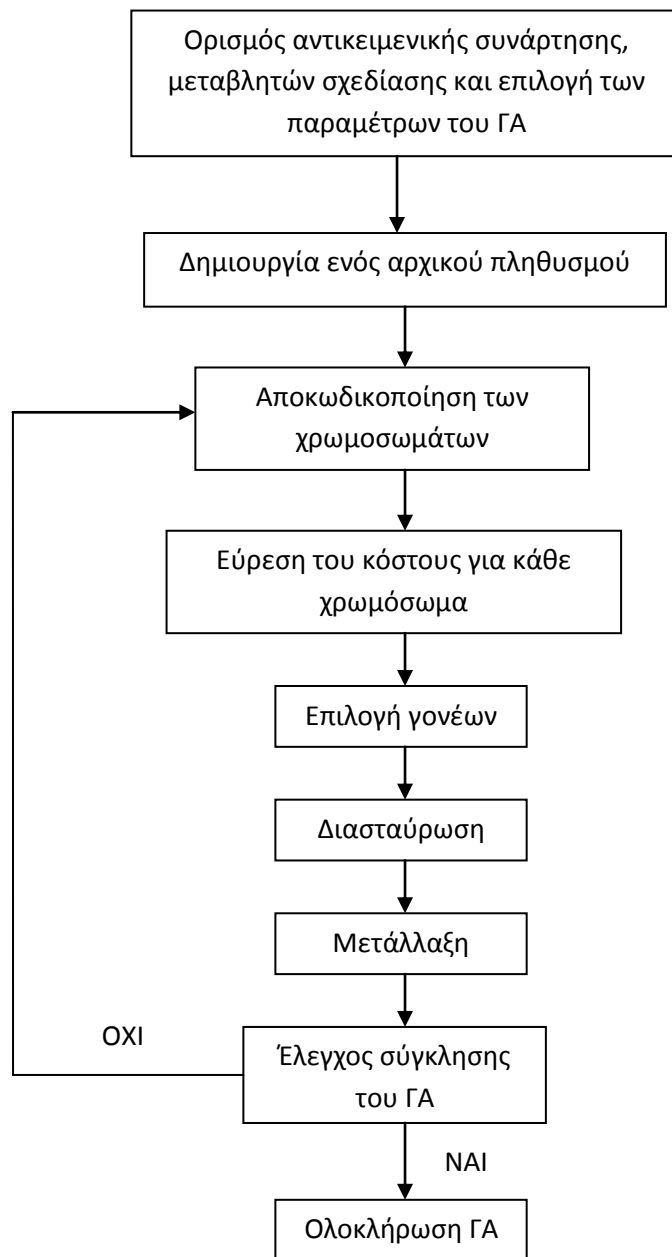
Ο γενετικός αλγόριθμος (ΓΑ) – genetic algorithm – είναι μία τεχνική βελτιστοποίησης βασισμένη στις αρχές της γενετικής και της φυσικής εξέλιξης. Δηλαδή ο ΓΑ επιτρέπει σε ένα πληθυσμό αποτελούμενο από πολλά άτομα να εξελιχθεί κάτω από συγκεκριμένους κανόνες επιλογής με σκοπό να μεγιστοποιηθεί το κέρδος (δηλαδή να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση κόστους). Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε το 1975 από τον John Holland και δημοσιεύτηκε το 1989 από έναν μαθητή του, τον David Goldberg, ο οποίος τη χρησιμοποίησε στη διατριβή του, που ασχολούνταν με τον έλεγχο της μεταφοράς πετρελαίου μέσω αγωγών. Μερικά από τα πλεονεκτήματα του ΓΑ είναι τα παρακάτω:

- Μπορεί να βελτιστοποιήσει συναρτήσεις και με συνεχόμενες αλλά και με διακριτές μεταβλητές,
- Δεν απαιτεί η αντικειμενική συνάρτηση να είναι παραγωγίσιμη,
- Ταυτοχρόνως ψάχνει από ένα ευρύ δείγμα τη συνάρτηση κόστους,
- Μπορεί να ανταποκριθεί καλά με ένα μεγάλο πλήθος μεταβλητών σχεδίασης,
- Μπορεί να βελτιστοποιήσει μεταβλητές με εξαιρετικά περίπλοκη συνάρτηση κόστους,
- Παρέχει μια λίστα από βέλτιστες λύσεις και όχι μόνο μια βέλτιστη λύση,
- Μπορεί να κωδικοποιεί τις μεταβλητές έτσι ώστε η βελτιστοποίηση να γίνεται με τις κωδικοποιημένες μεταβλητές, και
- Μπορεί εξίσου καλά να ανταποκριθεί με αριθμητικά δεδομένα, με πειραματικά δεδομένα και με αναλυτικές συναρτήσεις. [14], [18]

B 7.3 Οι Συνιστώσες του Δυναδικού Γενετικού Αλγορίθμου

Ο ΓΑ ξεκινάει, όπως και όλοι οι υπόλοιποι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, με τον ορισμό των μεταβλητών σχεδίασης, την αντικειμενική συνάρτηση, και το κόστος. Ακόμα τερματίζεται, όπως και κάθε άλλος αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ελέγχοντας αν συνέκλινε. Παρόλα αυτά, στα ενδιάμεσα στάδια διαφέρει σημαντικά σε σχέση με

άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Παρακάτω φαίνεται ένα διάγραμμα ροής με όλες τις επιμέρους συνιστώσες του ΓΑ και κάθε μία από αυτές αναλύεται στις παρακάτω υποενότητες.



Εικόνα 7.1 Διάγραμμα ροής του Δυαδικού ΓΑ

[14], [18]

B 7.3.1 Επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης και της αντικειμενικής συνάρτησης

Η αντικειμενική συνάρτηση παράγει μια τιμή, η οποία δημιουργείται ύστερα από την εισαγωγή των μεταβλητών σχεδίασης σε αυτή. Όλες οι μεταβλητές μαζί αποτελούν ένα χρωμόσωμα. Ο στόχος είναι να βελτιστοποιηθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης με την εύρεση των κατάλληλων τιμών για τις μεταβλητές εισόδου. Ένα παράδειγμα από την καθημερινότητα είναι η ρύθμιση του νερού στην μπανιέρα. Το κόστος σε αυτή την περίπτωση είναι η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής και πραγματικής τιμής της θερμοκρασίας του νερού. Οι μεταβλητές εισόδου είναι οι κάνουλες του ζεστού και του κρύου νερού, οι οποίες ρυθμίζονται κατάλληλα. Επομένως η αντικειμενική συνάρτηση σε αυτό το πρόβλημα είναι το πειραματικό αποτέλεσμα που προκύπτει όταν το νερό δοκιμάζεται από τον άνθρωπο. Έτσι φαίνεται ότι η επιλογή αντικειμενικής συνάρτησης και μεταβλητών σχεδίασης είναι στενά συνδεδεμένες διαδικασίες.

Ο ΓΑ ξεκινάει με τον ορισμό του χρωμοσώματος, το οποίο είναι ένα διάνυσμα που αποτελείται από τις μεταβλητές σχεδίασης. Εάν το χρωμόσωμα έχει N_{var} μεταβλητές οι οποίες είναι οι $x_1, x_2, \dots, x_{N_{var}}$, τότε το χρωμόσωμα γράφεται σαν ένα διάνυσμα γραμμή μεγέθους N_{var} , όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$chromosome = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad \dots \quad x_{N_{var}}] \quad (7.3.1)$$

Ακόμα κάθε χρωμόσωμα έχει ένα κόστος, το οποίο υπολογίζεται από την **αντικειμενική συνάρτηση**, f , η οποία είναι συνάρτηση των μεταβλητών σχεδίασης $x_1, x_2, \dots, x_{N_{var}}$, όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$F_{cost} = f(chromosome) = f(x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad \dots \quad x_{N_{var}}) \quad (7.3.2)$$

Τα περισσότερα προβλήματα βελτιστοποίησης έχουν συγκεκριμένους περιορισμούς ή αλλιώς οι μεταβλητές σχεδίασης είναι φραγμένες. Για παράδειγμα η μεταβλητή x_1 μπορεί να είναι φραγμένη μεταξύ του 0 και του 10, δηλαδή $0 \leq x_1 \leq 10$, και σε περίπτωση που η μεταβλητή x υπολογιστεί ίση με 11 τότε παίρνει σαν τιμή το ανώτερο όριο, το οποίο σε αυτό το παράδειγμα είναι 10. Προκειμένου να μην υπάρχει αυτό το πρόβλημα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια δεύτερη μεταβλητή x_2 , η οποία να συνδέεται με την μεταβλητή x_1 και να περιέχει τον περιορισμό της. Δηλαδή αν η μεταβλητή x_1 έχει σαν όρια $0 \leq x_1 \leq 10$, τότε αυτή μπορεί να γραφεί συναρτήσει της μεταβλητής x_2 ως εξής $x_1 = 5 \sin x_2 + 5$ και με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μια νέα μεταβλητή x_2 η οποία δεν έχει κανέναν περιορισμό, καθώς για οποιαδήποτε τιμή της η μεταβλητή x_1 παραμένει εντός των επιτρεπών της ορίων. Με αυτόν τον μετασχηματισμό, ένα πρόβλημα το οποίο έχει περιορισμένες μεταβλητές μετασχηματίζεται σε ένα πρόβλημα με μεταβλητές χωρίς περιορισμούς.

[14], [18], [19]

B 7.3.2 Αποκωδικοποίηση μεταβλητών σχεδίασης

Από τη στιγμή που οι μεταβλητές σχεδίασης στο δυαδικό ΓΑ αναπαρίστανται σε δυαδική μορφή, αλλά τις περισσότερες φορές η αντικειμενική συνάρτηση απαιτεί οι τιμές να είναι σε δεκαδική μορφή, είναι αναγκαίο να βρεθεί μια μέθοδος, η οποία θα μετατρέπει τις μεταβλητές σχεδίασης από τη δυαδική τους μορφή σε δεκαδική.

Έστω η φραγμένη μεταβλητή x , δηλαδή $x_{min} \leq x \leq x_{max}$. Αν η δυαδική της μορφή αποτελείται από N_{gene} bits, τότε η δεκαδική μορφή της μεταβλητής x θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$x = x_{min} + (x_d - p_{min}) \cdot \frac{(x_{max} - x_{min})}{(p_{max} - p_{min})} \quad (7.3.3)$$

Όπου:

x_{min} : το κατώτερο όριο της μεταβλητής x

x_{max} : το ανώτερο όριο της μεταβλητής x

p_{min} : ο κατώτερος δεκαδικός αριθμός που προκύπτει από το δυαδικό με N_{gene} bits

p_{max} : ο ανώτερος δεκαδικός αριθμός που προκύπτει από το δυαδικό με N_{gene} bits

x_d : η δεκαδική μορφή της δυαδικής κωδικοποιημένης μεταβλητής x

Παραδείγματος χάρι, έστω ότι η παραπάνω μεταβλητή σχεδίασης x είναι φραγμένη μεταξύ των τιμών -30 και 30 . Δηλαδή $-30 \leq x \leq 30$. Ακόμα έστω ότι αυτή η μεταβλητή κωδικοποιείται με $N_{gene} = 7$ bits. Τότε : $p_{min} = (0000000)_2 = 0$ και $p_{max} = (1111111)_2 = 127$. Συνεπώς, αν η κωδικοποιημένη τιμή του x είναι: $x_d = (1000001)_2 = 65$, τότε μετά από αντικατάσταση στη σχέση (7.3.3) η τιμή του x προκύπτει ίση με: $x = 0.70866$. [14]

B 7.3.3 Πληθυσμός

Ο ΓΑ αρχικοποιείται με ένα σύνολο από χρωμοσώματα, γνωστό και ως πληθυσμός. Ο πληθυσμός έχει N_{pop} χρωμοσώματα και αρχικά ένας πίνακας διαστάσεων $N_{pop} \times N_{bits}$ δημιουργείται τυχαία και αποτελείται από 0 και 1. Κάθε γραμμή αυτού του πίνακα αποτελεί και ένα χρωμόσωμα. Στη συνέχεια τα γονίδια που αποτελούν το χρωμόσωμα περνιούνται στην αντικειμενική συνάρτηση προκειμένου να υπολογιστεί το κόστος του κάθε χρωμοσώματος. Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα αρχικού πληθυσμού και τα αντίστοιχα κόστη κάθε χρωμοσώματος για $N_{pop} = 8$ τυχαία χρωμοσώματα, με 2 γονίδια το κάθε ένα και το κάθε γονίδιο κωδικοποιημένο με 7 bits. Το πρόβλημα αυτό αφορά την εύρεση του γεωγραφικού πλάτους και μήκους της υψηλότερης βουνοκορφής μια οροσειράς. Έτσι πρόκειται για ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης, το οποίο μετατρέπεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης πολλαπλασιάζοντας την αντικειμενική συνάρτηση με -1 .

| Χρωμόσωμα | Κόστος |
|----------------|--------|
| 00101111000110 | -12359 |
| 11100101100100 | -11872 |
| 00110010001100 | -13477 |
| 00101111001000 | -12363 |
| 11001111111011 | -11631 |
| 01000101111011 | -12097 |
| 11101100000001 | -12588 |
| 01001101110011 | -11860 |

Πίνακας 7.1 Παράδειγμα αρχικού πληθυσμού 8 τυχαίων χρωμοσωμάτων με τα αντίστοιχα κόστη τους

[14], [18], [19]

B 7.3.4 Μέθοδος επιλογής γονέων

Η επιβίωση μόνο των καλύτερων χρωμοσωμάτων συνεπάγεται ότι απορρίπτονται τα χρωμοσώματα αυτά που έχουν τα μεγαλύτερα κόστη. Αρχικά τα N_{pop} κόστη και τα αντίστοιχα χρωμοσώματα ταξινομούνται από αυτά με το μικρότερο κόστος προς αυτά με το μεγαλύτερο κόστος, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

| Χρωμόσωμα | Κόστος |
|----------------|--------|
| 00110010001100 | -13477 |
| 11101100000001 | -12588 |
| 00101111001000 | -12363 |
| 00101111000110 | -12359 |
| 01000101111011 | -12097 |
| 11100101100100 | -11872 |
| 01001101110011 | -11860 |
| 11001111111011 | -11631 |

Πίνακας 7.2 Ταξινομημένος αρχικός πληθυσμός με βάση τα κόστη των χρωμοσωμάτων

Στην συνέχεια, μόνο τα καλύτερα χρωμοσώματα κρατιούνται για να τη συνέχεια, ενώ τα υπόλοιπα διαγράφονται. Το ποσοστό του πληθυσμού που κρατιέται για διασταύρωση, X_{rate} , είναι ένα κλάσμα του συνολικού πληθυσμού N_{pop} το οποίο επιβιώνει για το επόμενο στάδιο που είναι η διασταύρωση. Ο αριθμός των χρωμοσωμάτων που κρατιούνται σε κάθε γενιά δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_{keep} = X_{rate} N_{pop} \quad (7.3.4)$$

Μία φυσική επιλογή γονέων συμβαίνει σε κάθε γενιά του αλγορίθμου. Από τα N_{pop} χρωμοσώματα της γενιάς, μόνο τα καλύτερα N_{keep} επιβιώνουν για διασταύρωση και τα χειρότερα $N_{pop} - N_{keep}$ απορρίπτονται, έτσι ώστε να κάνουν χώρο για τα νέα παιδιά που προκύπτουν από τη διασταύρωση.

Η απόφαση για το πόσα χρωμοσώματα θα κρατηθούν είναι κάπως αυθαίρετη. Αφήνοντας μόνο λίγα χρωμοσώματα να επιβιώσουν στην επόμενη γενιά περιορίζει κάπως τα διαθέσιμα γονίδια για τα παιδιά. Από την άλλη αν κρατηθούν πολλά χρωμοσώματα για την επόμενη γενιά, τότε επιτρέπεται σε αυτά με κακή απόδοση να συνεισφέρουν τα χαρακτηριστικά τους στην επόμενη γενιά. Συνήθως προτιμάται να επιλέγεται σαν ποσοστό του πληθυσμού που κρατιέται για διασταύρωση το 50% ($X_{rate} = 0.5$).

Έστω ότι στο προηγούμενο παράδειγμα που επιλέχτηκε στην Ενότητα 7.3.3, ο αριθμός του πληθυσμού είναι $N_{pop} = 8$ και έτσι με ποσοστό επιλογής 50%, ο αριθμός του πληθυσμού που κρατιέται για διασταύρωση είναι $N_{keep} = 4$, δηλαδή τα τέσσερα πρώτα χρωμοσώματα του Πίνακα 7.2. Τα αποτελέσματα αυτής της φυσικής επιλογής των καλύτερων χρωμοσωμάτων φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα. Έτσι τα τέσσερα χρωμοσώματα με τα μικρότερα κόστη μεταφέρονται στην επόμενη γενιά και είναι δυνητικοί γονείς.

| Χρωμόσωμα | Κόστος |
|----------------|--------|
| 00110010001100 | -13477 |
| 11101100000001 | -12588 |
| 00101111001000 | -12363 |
| 00101111000110 | -12359 |

Πίνακας 7.3 Τα χρωμοσώματα που κρατιούνται στην επόμενη γενιά μετά από ποσοστό πληθυσμού που κρατιέται για διασταύρωση 50%

Στην συνέχεια δύο χρωμοσώματα επιλέγονται από αυτά που έχουν επιζήσει (N_{keep}) και διασταυρώνονται προκειμένου να δημιουργηθούν δύο νέα παιδιά. Η διασταύρωση λαμβάνει μέρος μέχρι να δημιουργηθούν $N_{pop} - N_{keep}$ νέα παιδιά, ώστε να αντικαταστήσουν τα χρωμοσώματα που απορρίφθηκαν.

Η μέθοδος με την οποία γίνεται η επιλογή των δύο γονέων καλείται σταθμισμένη τυχαία διασταύρωση (weighted random pairing). Σύμφωνα με αυτή, οι πιθανότητες επιλογής κάποιου χρωμοσώματος για διασταύρωση είναι αντιστρόφως ανάλογες με το κόστος του. Ένα χρωμόσωμα με το χαμηλότερο κόστος έχει τις μεγαλύτερες πιθανότητες να επιλεγεί για διασταύρωση, ενώ ένα χρωμόσωμα με το υψηλότερο κόστος έχει τις μικρότερες πιθανότητες να επιλεγεί. Έτσι για το χρωμόσωμα με αξιολόγηση n , η πιθανότητα του να επιλεγεί δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$p_n = \frac{N_{keep} - n + 1}{\sum_{n=1}^{N_{keep}} n} \quad (7.3.5)$$

Στο προηγούμενο παράδειγμα λοιπόν, η πιθανότητα να επιλεγεί το χρωμόσωμα με αξιολόγηση n θα ισούται με: $p_n = \frac{5-n}{10}$, για $N_{keep} = 4$. Ο παρακάτω Πίνακας δείχνει τα αποτελέσματα για τα $N_{keep} = 4$ χρωμοσώματα του παραδείγματος:

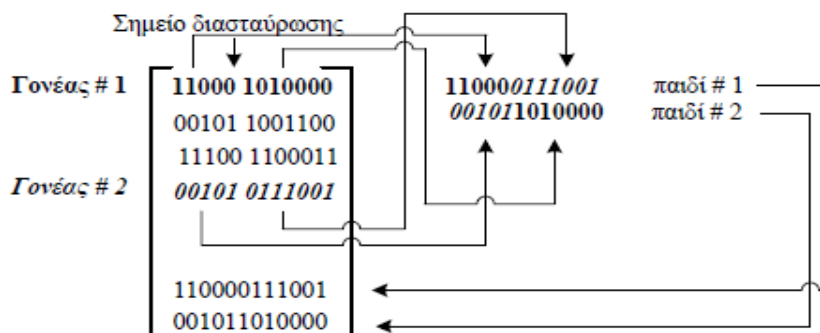
| Αξιολόγηση n | Χρωμόσωμα | p_n | $\sum_{i=1}^n p_i$ |
|--------------|----------------|-------|--------------------|
| 1 | 00110010001100 | 0.4 | 0.4 |
| 2 | 11101100000001 | 0.3 | 0.7 |
| 3 | 00101111001000 | 0.2 | 0.9 |
| 4 | 00101111000110 | 0.1 | 1.0 |

Πίνακας 7.4 Αξιολόγηση των χρωμοσωμάτων με βάση το κόστος του και οι αντίστοιχες πιθανότητες επιλογής τους για διασταύρωση

Η **αθροιστική πιθανότητα**, η οποία φαίνεται στην τέταρτη στήλη του παραπάνω Πίνακα χρησιμοποιείται για την επιλογή του χρωμοσώματος. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργείται ένας τυχαίος αριθμός μεταξύ μηδέν και ένα. Ξεκινώντας από την αρχή της λίστας, το πρώτο χρωμόσωμα που έχει αθροιστική πιθανότητα μεγαλύτερη από τον τυχαίο αριθμό που δημιουργήθηκε επιλέγεται για διασταύρωση. Για παράδειγμα, αν αυτός ο τυχαίος αριθμός είναι $r=0.577$, τότε $0.4 \leq r \leq 0.7$, και έτσι επιλέγεται το δεύτερο χρωμόσωμα του Πίνακα 7.4. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου επιλεγθούν τόσα χρωμοσώματα, όσο απαιτούνται για να δημιουργήσουν $N_{pop} - N_{keep}$ νέα παιδιά. Αν ένα χρωμόσωμα διασταυρωθεί με τον εαυτό του, τότε τα δύο παιδιά που προκύπτουν είναι πανομοιότυπα. [14], [18], [19]

B 7.3.5 Διασταύρωση

Κατά τη διασταύρωση, οι δύο γονείς που διασταυρώνονται δημιουργούν δύο νέα παιδιά. Η διαδικασία με την οποία γίνεται αυτό ονομάζεται *διασταύρωση μονού σημείου*, και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 7.2 Διασταύρωση δύο γονέων για τη δημιουργία δύο παιδιών. Τα παιδιά τοποθετούνται στο νέο πληθυσμό

Δημιουργείται τυχαία ένα σημείο διασταύρωσης μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου bit του χρωμοσώματος του γονέα. Αρχικά ο γονέας₁ περνάει το δυαδικό του κώδικα από το αριστερό μέρος του σημείου διασταύρωσης στο παιδί₁. Με τον ίδιο τρόπο, ο γονέας₂, περνάει τον δυαδικό του κώδικα από το αριστερό μέρος του σημείου διασταύρωσης στον παιδί₂. Στη συνέχεια, ο δυαδικός κώδικας από το δεξί

μέρος του σημείου διασταύρωσης περνιέται από τον γονέα₁ στο παιδί₂ και ο αντίστοιχος κώδικας του γονέα₂ στο παιδί₁. Επομένως το κάθε παιδί περιέχει μέρη από τον δυαδικό κώδικα και των δύο γονέων. Όταν οι γονείς έχουν δημιουργήσει $N_{pop} - N_{keep}$ τότε ο πληθυσμός των χρωμοσωμάτων επαναφέρεται στο αρχικό του μέγεθος N_{pop} .

Ο παρακάτω Πίνακας 7.5 δείχνει την επιλογή των γονέων και την διασταύρωση για το παράδειγμα που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες. Οι πρώτοι δύο γονείς είναι τα χρωμοσώματα 3 και 2 και έχουν σαν σημείο διασταύρωσης αυτό μεταξύ των bits 5 και 6. Οι δεύτεροι δύο γονείς είναι αυτοί με χρωμοσώματα 3 και 4 και έχουν σαν σημείο διασταύρωσης αυτό μεταξύ των bits 10 και 11. Ακόμα ο Πίνακας 7.6 δείχνει το νέο πληθυσμό που προκύπτει μετά την διασταύρωση, μαζί με τα χρωμοσώματα – γονείς του προηγούμενου πληθυσμού.

| Χρωμόσωμα | Οικογένεια | Δυαδικός Κώδικας |
|-----------|--------------------|------------------|
| 3 | ma(1) | 00101111001000 |
| 2 | pa(1) | 11101100000001 |
| 5 | παιδί ₁ | 00101100000001 |
| 6 | παιδί ₂ | 11101111001000 |
| 3 | ma(2) | 00101111001000 |
| 4 | pa(2) | 00101111000110 |
| 7 | παιδί ₃ | 00101111000110 |
| 8 | παιδί ₄ | 00101111001000 |

Πίνακας 7.5 Διασταύρωση μονού σημείου

| Χρωμόσωμα | Σχόλια |
|----------------|--|
| 00110010001100 | Χρωμόσωμα του αρχικού πληθυσμού με το χαμηλότερο κόστος |
| 11101100000001 | Χρωμόσωμα του αρχικού πληθυσμού με το δεύτερο χαμηλότερο κόστος |
| 00101111001000 | Χρωμόσωμα του αρχικού πληθυσμού με το τρίτο χαμηλότερο κόστος |
| 00101111000110 | Χρωμόσωμα του αρχικού πληθυσμού με το τέταρτο χαμηλότερο κόστος |
| 00101100000001 | Πρώτο παιδί που προέκυψε από διασταύρωση του 3ου χρωμοσώματος με το 2ο χρωμόσωμα με σημείο διασταύρωσης μεταξύ 5 και 6 bit |
| 11101111001000 | Δεύτερο παιδί που προέκυψε από διασταύρωση του 3ου χρωμοσώματος με το 2ο χρωμόσωμα με σημείο διασταύρωσης μεταξύ 5 και 6 bit |
| 00101111000110 | Πρώτο παιδί που προέκυψε από διασταύρωση του 3ου χρωμοσώματος με το 4ο χρωμόσωμα με σημείο διασταύρωσης μεταξύ 10 και 11 bit |
| 00101111001000 | Δεύτερο παιδί που προέκυψε από διασταύρωση του 3ου χρωμοσώματος με το 4ο χρωμόσωμα με σημείο διασταύρωσης μεταξύ 10 και 11 bit |

Πίνακας 7.6 Πληθυσμός μετά την διασταύρωση [14], [18], [19]

B 7.3.6 Μετάλλαξη

Οι τυχαίες μεταλλάξεις που συμβαίνουν στον πληθυσμό αλλάζουν ένα συγκεκριμένο ποσοστό των bits των χρωμοσωμάτων του πληθυσμού. Οι μεταλλάξεις είναι το δεύτερο εργαλείο που χρησιμοποιεί ο ΓΑ, προκειμένου να βρει το καλύτερο δυνατό χρωμόσωμα, καθώς με αυτόν τον τρόπο εισέρχονται χαρακτηριστικά τα οποία δεν υπήρχαν στον αρχικό πληθυσμό. Η μετάλλαξη ενός σημείου αλλάζει ένα bit από 0 σε 1 και το αντίστροφο. Τα σημεία στα οποία θα γίνει μετάλλαξη επιλέγονται τυχαία από τον $N_{pop} \times N_{bits}$ πίνακα, ο οποίος ουσιαστικά είναι ο πίνακας με τα χρωμοσώματα που απαρτίζουν τον πληθυσμό. Ακόμα δεν επιτρέπεται να γίνονται μεταλλάξεις στο καλύτερο χρωμόσωμα της γενιάς, καθώς στον ΓΑ υπάρχει το κριτήριο του ελιτισμού.

Όταν θεωρείται ότι το ποσοστό μεταλλάξεων σε ένα πληθυσμό είναι μ , τότε ο αριθμός των bits που θα μεταλλαχθούν δίνεται από την σχέση:

$$\neq mutations = \mu \times (N_{pop} - 1) \times N_{bits} \quad (7.3.6)$$

Στο παράδειγμα των προηγούμενων ενοτήτων, επιλέγεται σαν ποσοστό μετάλλαξης στον πληθυσμό 20% ($\mu=0.20$), και φυσικά δεν επιτρέπεται να μεταλλαχθεί το καλύτερο χρωμόσωμα. Έτσι αντικαθιστώντας στην σχέση (7.3.6) όπου $\mu=0.20$, $N_{pop} = 8$ και $N_{bits} = 14$ προκύπτει ότι:

$$\neq mutations = 0.2 \times 7 \times 14 = 19.6 \cong 20$$

Έτσι δημιουργούνται 20 τυχαία ζευγάρια ακεραίων αριθμών που αντιστοιχούν στις γραμμές και στις στήλες των bits που θα μεταλλαχθούν, τα οποία φαίνονται στον πίνακα της παρακάτω εικόνας:

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|---|----|---|----|----|---|---|---|---|----|----|---|----|---|---|----|---|----|----|---|
| Αριθμός γραμμής | 5 | 7 | 6 | 3 | 6 | 6 | 8 | 4 | 6 | 7 | 3 | 4 | 7 | 4 | 8 | 6 | 6 | 4 | 6 | 7 |
| Αριθμός στήλης | 6 | 12 | 5 | 11 | 13 | 5 | 5 | 6 | 4 | 11 | 10 | 6 | 13 | 3 | 4 | 11 | 5 | 14 | 10 | 5 |

Πίνακας 7.7 Bits τα οποία θα μεταλλαχθούν

Για παράδειγμα από τον Πίνακα 7.7, το πρώτο τυχαίο bit είναι αυτό που βρίσκεται στην 5η γραμμή και την 6η στήλη του πίνακα με τα χρωμοσώματα μετά την διασταύρωση – bit (5,6). Από τον Πίνακα 7.6 φαίνεται ότι το χρωμόσωμα της 5ης γραμμής είναι το 00101100000001 και έτσι σε αυτό το χρωμόσωμα θα γίνει μετάλλαξη στο 6ο bit το οποίο από 1 θα γίνει 0. Δηλαδή:

$$00101100000001 \rightarrow 00101\mathbf{0}00000001$$

Το ίδιο πράγμα θα πραγματοποιηθεί και για τα υπόλοιπα 19 bit, των οποίων οι γραμμές και οι στήλες που βρίσκονται φαίνονται στον Πίνακα 7.7. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πληθυσμός που προκύπτει ύστερα από τις μεταλλάξεις:

| Πληθυσμός μετά τις Διασταυρώσεις | Πληθυσμός μετά τις Μεταλλάξεις | Κόστος Νέου Πληθυσμού |
|----------------------------------|---|-----------------------|
| 00110010001100 | 00110010001100 | -13477 |
| 11101100000001 | 11101100000001 | -12588 |
| 00101111001000 | 001011110 1 0000 | -12415 |
| 00101111000110 | 00 0 01 0 110001 11 | -13482 |
| 00101100000001 | 00101 0 00000001 | -13171 |
| 11101111001000 | 111 1 01110 1 00 1 0 | -12146 |
| 00101111000110 | 001 0 0111 0 0 1 000 | -12716 |
| 00101111001000 | 001 1 0111001000 | -12103 |

Πίνακας 7.8 Μεταλλάξεις στον πληθυσμό - Με **bold** τα bit αυτά τα οποία μεταλλάχθηκαν

Όπως φαίνεται, τα bit που μεταλλάσσονται αντί για 20, που είναι το αναμενόμενο, είναι 18 και ο λόγος είναι ότι το bit που βρίσκεται στην γραμμή 6 και στην στήλη 5 επιλέχθηκε τυχαία τρεις φορές. Έτσι το ίδιο bit άλλαξε από 1 σε 0, στην συνέχεια από 0 σε 1 και τέλος από 1 πάλι σε 0. [14], [18], [19]

B 7.3.7 Επόμενες Γενιές

Αφού πραγματοποιηθούν και οι μεταλλάξεις στον πληθυσμό, υπολογίζονται πάλι τα κόστη για όλα τα καινούρια χρωμοσώματα που προέκυψαν, όπως φαίνονται στον Πίνακα 7.8 και στην συνέχεια ο νέος πληθυσμός ταξινομείται με βάση το κόστος του, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

| Χρωμόσωμα | Κόστος |
|----------------|--------|
| 00001011000111 | -13482 |
| 00110010001100 | -13477 |
| 00101000000001 | -13171 |
| 00100111001000 | -12716 |
| 11101100000001 | -12588 |
| 00101111010000 | -12415 |
| 11110111010010 | -12146 |
| 00110111001000 | -12103 |

Πίνακας 7.9 Ταξινομημένος πληθυσμός με βάση τα κόστη των χρωμοσωμάτων στην αρχή της δεύτερης γενιάς

Στη συνέχεια η διαδικασία που θα περιγραφεί επαναλαμβάνεται για κάθε γενιά. Αρχικά τα τελευταία 4 χρωμοσώματα που φαίνονται στην πρώτη στήλη του Πίνακα 7.9 διαγράφονται και αντικαθίστανται από τα παιδιά που δημιουργούνται ύστερα από διασταύρωση των 4 πρώτων χρωμοσωμάτων της πρώτης στήλης του ίδιου Πίνακα. Στη συνέχεια επιλέγονται πάλι 20 τυχαία bits για μετάλλαξη από τα τελευταία 7 χρωμοσώματα του Πίνακα 7.9. Ο πληθυσμός μετά και τις διασταυρώσεις και τις μεταλλάξεις στο τέλος της δεύτερης γενιάς φαίνεται στον Πίνακα 7.10. Στον Πίνακα 7.11 φαίνεται ο ταξινομημένος πληθυσμός στην αρχή της τρίτης γενιάς και

στον Πίνακα 7.12 φαίνεται ο πληθυσμός που προκύπτει μετά τις διασταυρώσεις και τις μεταλλάξεις στο τέλος της τρίτης γενιάς.

| Χρωμόσωμα | Κόστος |
|----------------|--------|
| 00001011000111 | -13482 |
| 00110000001000 | -13332 |
| 01101001000001 | -12923 |
| 01100111011000 | -12128 |
| 10100111000001 | -12961 |
| 10100010001000 | -13237 |
| 00110100001110 | -13564 |
| 00100010000001 | -13246 |

Πίνακας 7.10 Πληθυσμός μετά από διασταυρώσεις και μεταλλάξεις στο τέλος της δεύτερης γενιάς

| Χρωμόσωμα | Κόστος |
|----------------|--------|
| 00110100001110 | -13564 |
| 00001011000111 | -13482 |
| 00110000001000 | -13332 |
| 00100010000001 | -13246 |
| 10100010001000 | -13237 |
| 10100111000001 | -12961 |
| 01101001000001 | -12923 |
| 01100111011000 | -12128 |

Πίνακας 7.11 Ταξινομημένος πληθυσμός με βάση τα κόστη των χρωμοσωμάτων στην αρχή της τρίτης γενιάς

| Χρωμόσωμα | Κόστος |
|----------------|--------|
| 00100010100001 | -14199 |
| 00110100001110 | -13564 |
| 00010000001110 | -13542 |
| 00100000000001 | -13275 |
| 00100011010000 | -12840 |
| 00001111111111 | -12739 |
| 11001011000111 | -12614 |
| 01111111011111 | -12192 |

Πίνακας 7.12 Ταξινομημένος πληθυσμός με βάση τα κόστη των χρωμοσωμάτων στο τέλος της τρίτης γενιάς, ύστερα από διασταυρώσεις και μεταλλάξεις [14], [18], [19]

B 7.3.8 Σύγκλιση αλγορίθμου

Ο ΓΑ τερματίζεται είτε όταν η καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δεν βελτιώνεται για ένα ορισμένο αριθμό συνεχόμενων γενεών, ή όταν οι γενιές φτάσουν ένα προκαθορισμένο αριθμό τον οποίο τον έχει θέσει ο χρήστης.

B 7.4 Μεθοδολογία μεθόδου νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο

Ο Γενετικός Αλγόριθμος, ο τρόπος λειτουργίας του οποίου περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, χρησιμοποιείται ώστε να διαχωρίσει σε νησίδες τον Γράφο ενός ΣΗΕ. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μέθοδο ελεγχόμενης νησιδοποίησης, περιγράφεται ως εξής:

1. Κατασκευή του **γράφου** G_S του ΣΗΕ με κόμβους για όλους τους ζυγούς του συστήματος. Τα βάρη των ακμών ορίζονται ως $(|P_{ij}| + |P_{ji}|)/2$, από τον Πίνακα Βαρών W
2. Αρχικοποίηση Γενετικού Αλγορίθμου, με τη δημιουργία Αρχικού Πληθυσμού μεγέθους N_{pop} , με δυαδικά χρωμοσώματα μεγέθους N_{bits} , όπου N_{bits} το σύνολο των γραμμών N_{br} του εκάστοτε δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν η τιμή ενός bit του χρωμοσώματος ισούται με '1', τότε η αντίστοιχη γραμμή του ΣΗΕ θα ανοίξει. Αν ισούται με '0', θα παραμείνει κλειστή.
3. Αξιολόγηση του πληθυσμού, με βάση τα κριτήρια που έχουν τεθεί στην Αντικειμενική Συνάρτηση του Γενετικού Αλγορίθμου, η οποία είναι η εξής:

$$F_{cost} = W_1 \cdot \Sigma P_{disc_branches} + W_2 \cdot \{islands_number\} + W_3 \cdot \{buses_number/island\} + W_4 \cdot \{coh_groups_place\} \quad (7.4.1)$$

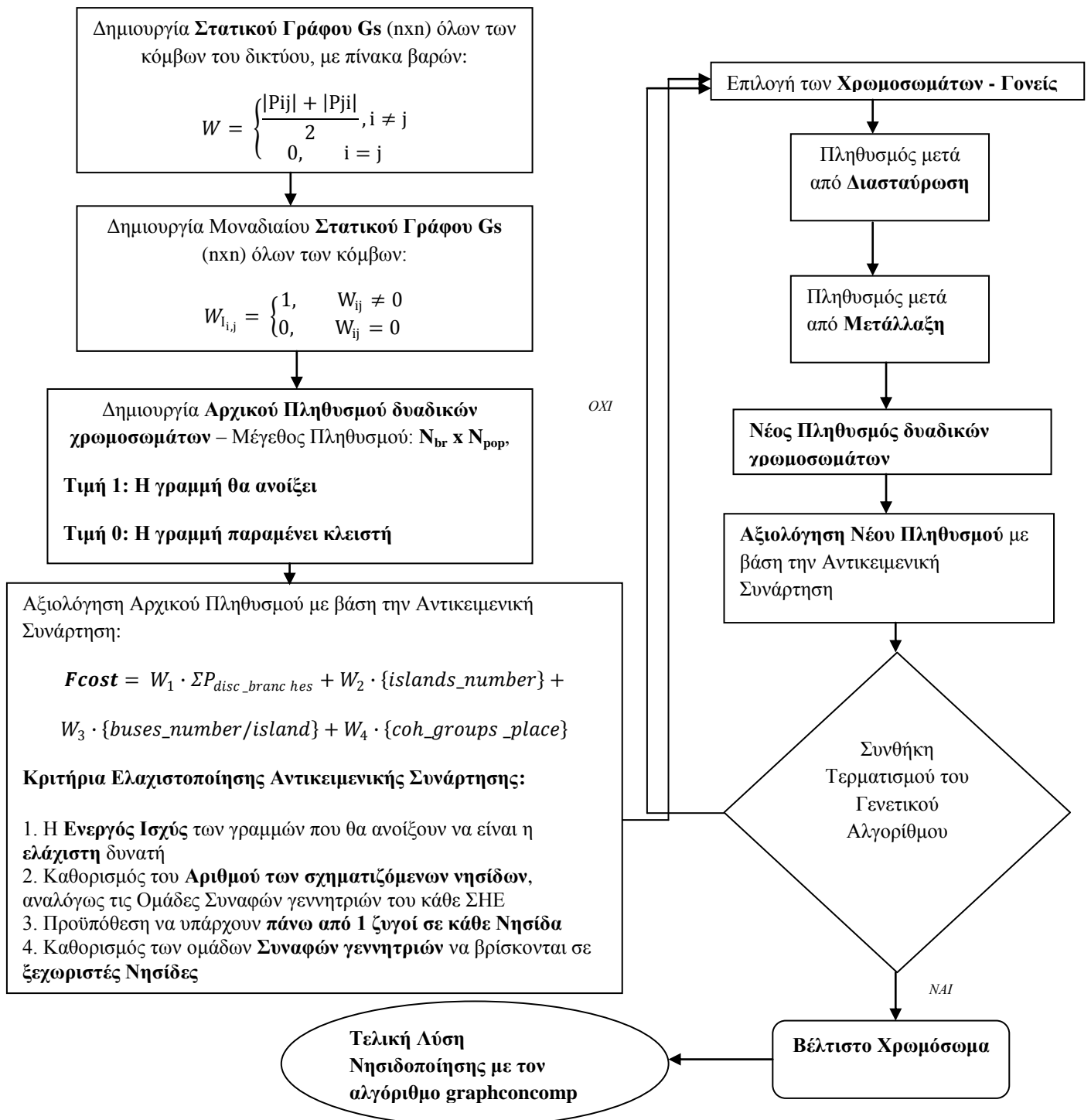
όπου $W_{1..4}$ τα βάρη των κριτηρίων

Τα κριτήρια της αντικειμενικής συνάρτησης, με βάση τη σχέση (7.4.1) είναι τα εξής:

- Η Ενεργός Ισχύς των γραμμών που θα ανοίξουν να είναι η ελάχιστη δυνατή
 - Καθορισμός του Αριθμού των σχηματιζόμενων νησίδων, αναλόγως με τον αριθμό συναφών γεννητριών του κάθε δικτύου
 - Προϋπόθεση υπάρχουν πάνω από 1 ζυγοί σε κάθε Νησίδα
 - Καθορισμός των ομάδων συναφών γεννητριών να βρίσκονται σε ξεχωριστές Νησίδες
4. Εφαρμογή του Γενετικού Αλγορίθμου στον Αρχικό Πληθυσμό με τον τρόπο που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες, με βάση τα Κόστη που προήλθαν για κάθε χρωμόσωμα από την Αξιολόγηση του Πληθυσμού.
 5. Παραγωγή Νέου Πληθυσμού χρωμοσωμάτων, κι επιστροφή στο Βήμα 3
 6. Τερματισμός Αλγορίθμου με τη Συνθήκη τερματισμού, που αντιστοιχεί στον αριθμό αναπαραγωγών του πληθυσμού – ο αριθμός αυτός καθορίζεται από το χρήστη, αναλόγως με την πολυπλοκότητα του εκάστοτε δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας
 7. Εύρεση Βέλτιστου Χρωμοσώματος, μετά τον τερματισμό του ΓΑ
 8. Νησιδοποίηση του δικτύου που προκύπτει από το βέλτιστο χρωμόσωμα, με εφαρμογή του αλγορίθμου **graphconcomp** της Matlab στο νέο Γράφο του δικτύου – ο αλγόριθμος **graphconcomp** επεξηγείται στην ενότητα με τα αποτελέσματα νησιδοποίησης

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα ροής (flowchart) της ελεγχόμενης νησιδοποίησης του δικτύου με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο. Το διάγραμμα

αποτυπώνει τη συλλογιστική που ακολουθήθηκε στον κώδικα Matlab ώστε να εξαχθούν τα αποτελέσματα της νησιδοποίησης.



Εικόνα 7.3 Διάγραμμα ροής Αλγορίθμου νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο

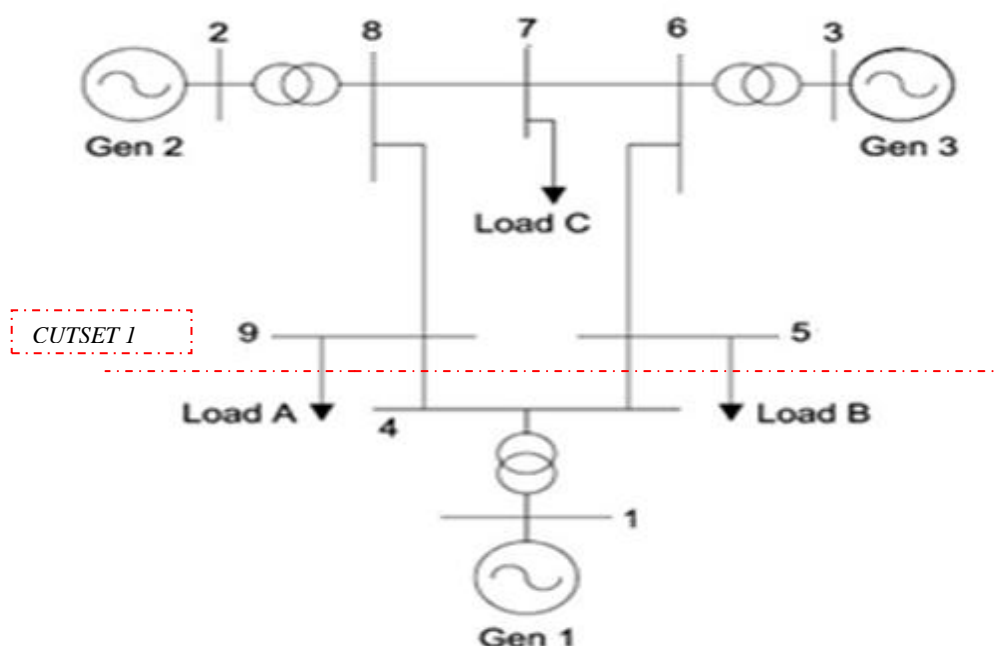
B 7.5 Αποτελέσματα

Στις επόμενες υποενότητες, παρατίθενται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του αλγορίθμου νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο για τα πρότυπα δίκτυα IEEE - 9 ζυγών, - 39 ζυγών και -118 ζυγών. Η προσομοίωση έγινε στο περιβάλλον του Matlab, και τα δεδομένα πάνω στα οποία έγινε προήλθαν από το πρόγραμμα Matpower. Τα χαρακτηριστικά του PC είναι: Intel Core 2 Duo CPU 2GHz - 4GB RAM PC - Matlab 7.14.0.739 code.

Για το διαχωρισμό του γράφου που προκύπτει από το βέλτιστο χρωμόσωμα σε νησίδες, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος *graphconcomp*. Ο αλγόριθμος *graphconcomp*, είναι αλγόριθμος ομαδοποίησης κόμβων, ο οποίος βρίσκει τις ισχυρά συνδεδεμένες συνιστώσες του γράφου που αντιπροσωπεύεται από τον πίνακα βαρών W , χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Tarján. Ένα ισχυρά συνδεδεμένο στοιχείο αποτελεί μια μέγιστη ομάδα κόμβων που είναι αμοιβαία προσβάσιμοι, χωρίς να παραβιάζονται οι κατευθύνσεις των ακμών του γράφου εάν είναι κατευθυνόμενος. Επίσης, ο πίνακας που αντιπροσωπεύει τον γράφο του δικτύου πρέπει να είναι αραιός πίνακας ώστε να λειτουργήσει ο αλγόριθμος. [20]

B 7.5.1 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 9 Ζυγών – IEEE 9-Bus

Με βάση τον αλγόριθμο νησιδοποίησης με χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου, καθώς και τις ομάδες συναφών γεννητριών, το δίκτυο 9 ζυγών θα χωριστεί σε 2 νησίδες. Παρακάτω φαίνεται το δίκτυο χωρισμένο σε νησίδες, καθώς και ο πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό κάθε ζυγού, τη νησίδα που ανήκει καθένας από αυτούς και το χρόνο υπολογισμού της μεθόδου. Για το βέλτιστο διαχωρισμό του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν **2 γενιές πληθυσμών** από τον Γενετικό Αλγόριθμο.



Εικόνα 7.4 Διαχωρισμός του δικτύου 9 ζυγών σε νησίδες με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο

| ΝΗΣΙΔΑ 1 | ΝΗΣΙΔΑ 2 | Χρόνος Υπολογισμού (sec) |
|-------------|----------------------------|--------------------------|
| 1, 4 | 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 | 2.804 |

Πίνακας 7.13 Αποτελέσματα διαχωρισμού δικτύου 9 ζυγών με χρήση Αλγορίθμου Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο – με **bold** οι ζυγοί των γεννητριών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ισοζύγιο ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας 9 ζυγών. Στη Νησίδα 1 παρατηρείται περίσσεια ισχύος και στη Νησίδα 2 η κατανάλωση ισχύος είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή της.

| | P_G (MW) | P_L (MW) | Διαφορά(MW) |
|----------|------------|------------|-------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 71.95 | 0 | 71.95 |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 248 | 315 | -67 |

Πίνακας 7.14 Ισοζύγιο ισχύος μετά το διαχωρισμό του δικτύου 9 ζυγών με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο

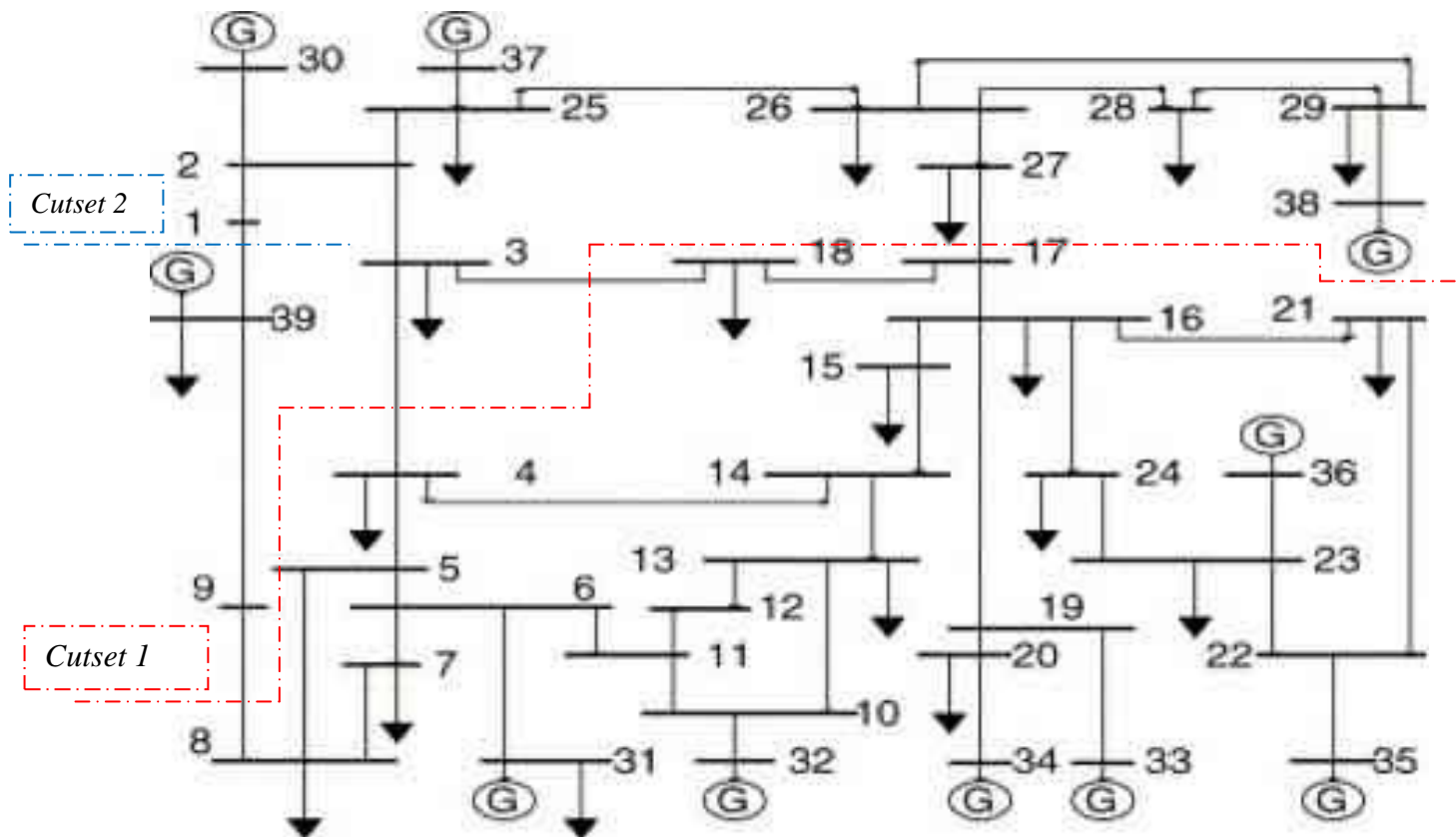
Κατά τη νησιδοποίηση δημιουργείται ένα διαχωριστικό σύνολο (*Cutset 1*), στο δίκτυο 9 ζυγών, μετά το χωρισμό του σε 2 νησίδες. Οι γραμμές που αποκόπτονται από το *cutset 1*, καθώς και η τιμή cut είναι οι εξής:

| <i>Cutset 1</i> | $\Sigma/P_{ij}/MW$ |
|-----------------|--------------------|
| 4-5, 4-9 | 71.735 |

Πίνακας 7.15 Τιμή *cut* του *Cutset 1* μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο στο δίκτυο 9 ζυγών

B 7.5.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 39 Ζυγών – IEEE 39-Bus

Με βάση τον Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου, καθώς και τις ομάδες συναφών γεννητριών, το δίκτυο 39 ζυγών θα χωριστεί σε 3 νησίδες. Παρακάτω φαίνεται το δίκτυο χωρισμένο σε νησίδες, καθώς και ο πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό κάθε ζυγού, τη νησίδα που ανήκει καθέννας από αυτούς και το χρόνο υπολογισμού της μεθόδου. Για το βέλτιστο διαχωρισμό του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν **436 γενιές πληθυσμών** από τον Γενετικό Αλγόριθμο.



Εικόνα 7.5 Διαχωρισμός του δικτύου 39 ζυγών σε νησίδες με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο

| ΝΗΣΙΔΑ 1 | ΝΗΣΙΔΑ 2 | ΝΗΣΙΔΑ 3 | Χρόνος Υπολογισμού (sec) |
|--|--|--------------|--------------------------|
| 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 31, 32, 33, 34, 35, 36 | 1, 2, 3, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 37, 38 | 9, 39 | 44.324 |

Πίνακας 7.16 Αποτελέσματα διαχωρισμού δικτύου 39 ζυγών με χρήση Αλγορίθμου Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο – με **bold** οι ζυγοί των γεννητριών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ισοζύγιο ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας 39 ζυγών. Στις νησίδες 1 και 2 υπάρχει περίσσεια ισχύος. Στη νησίδα 3 υπάρχει μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος. Και στις 3 νησίδες οι αποκλίσεις παραγωγής – κατανάλωσης είναι μικρές, οπότε η ευστάθειά τους δεν επηρεάζεται.

| | P_G (MW) | P_L (MW) | Διαφορά(MW) |
|----------|------------|------------|-------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 3677.87 | 3590.6 | 87.27 |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 1620 | 1553.1 | 66.9 |
| ΝΗΣΙΔΑ 3 | 1000 | 1110.5 | -110.5 |

Πίνακας 7.17 Ισοζύγιο ισχύος μετά το διαχωρισμό του δικτύου 39 ζυγών με χρήση Αλγορίθμου Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο

Κατά τη νησιδοποίηση δημιουργούνται δύο διαχωριστικά σύνολα (*Cutset 1* και *Cutset 2*), στο δίκτυο 39 ζυγών, μετά το χωρισμό του σε 3 νησίδες. Το *Cutset 1* διαχωρίζει την Ομάδα 1 συναφών γεννητριών από τις Ομάδες 2 και 3, κι έπειτα το *Cutset 2* την Ομάδα 2 από την Ομάδα 3 (Πίνακας 3.2). Οι γραμμές που αποκόπτονται από τα *Cutset 1* και *Cutset 2*, η τιμή cut του καθενός καθώς και η συνολική τιμή cut των 2 *Cutset* είναι τα εξής:

| <i>Cutset 1</i> | $\sum P_{ij}/MW$ |
|-----------------------|------------------|
| 8-9, 3-4, 3-18, 17-27 | 137.3 |

Πίνακας 7.18 Τιμή *cut* του *Cutset 1* μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο στο δίκτυο 39 ζυγών

| <u>Cutset 2</u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|-----------------|--------------------------------------|
| 1-39 | 76.1 |

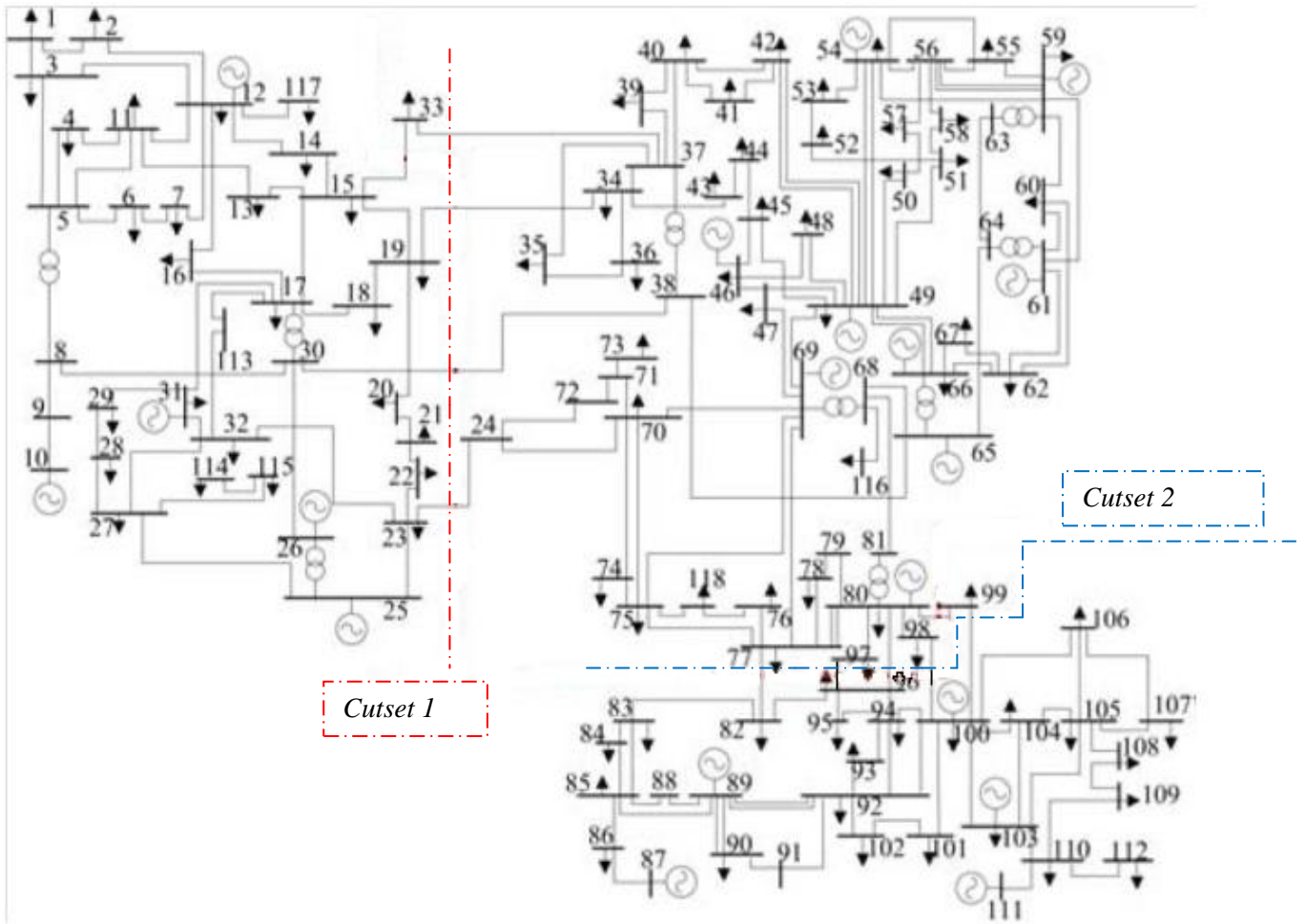
Πίνακας 7.19 Τιμή *cut* του *Cutset 2* μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο στο δίκτυο 39 ζυγών

| <u>Cutset(ol)=Cutset 1 + Cutset 2</u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 8-9, 3-4, 3-18, 17-27,1-39 | 213.4 |

Πίνακας 7.20 Τιμή *cut* των *Cutset 1* και *Cutset 2* συνολικά μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο στο δίκτυο 39 ζυγών

B 7.5.3 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 118 Ζυγών – IEEE 118-Bus

Με βάση τον Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου, καθώς και τις ομάδες συναφών γεννητριών, το δίκτυο 118 ζυγών θα χωριστεί σε 3 νησίδες όπως και το δίκτυο των 39 ζυγών. Παρακάτω φαίνεται το δίκτυο χωρισμένο σε νησίδες, καθώς και ο πίνακας που περιλαμβάνει τον αριθμό κάθε ζυγού, τη νησίδα που ανήκει καθέννας από αυτούς και το χρόνο υπολογισμού της μεθόδου. Για το βέλτιστο διαχωρισμό του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν **594 γενιές πληθυσμών** από τον Γενετικό Αλγόριθμο.



Εικόνα 7.6 Διαχωρισμός του δικτύου 118 ζυγών σε νησίδες με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο

| ΝΗΣΙΔΑ 1 | ΝΗΣΙΔΑ 2 | ΝΗΣΙΔΑ 3 | Χρόνος Υπολογισμού (sec) |
|---|--|---|--------------------------|
| 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 , 11, 12 , 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25 , 26 , 27, 28, 29, 30, 31 , 32, 33, 113, 114, 115, 117 | 24, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46 , 47, 48, 49 , 50, 51, 52, 53, 54 , 55, 56, 57, 58, 59 , 60, 61 , 62, 63, 64, 65 , 66 , 67, 68, 69 , 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80 , 81, 97, 98, 99, 116, 118 | 82, 83, 84, 85, 86, 87 , 88, 89 , 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 100 , 101, 102, 103 , 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111 , 112 | 91.108 |

Πίνακας 7.21 Αποτελέσματα διαχωρισμού δικτύου 118 ζυγών με χρήση Αλγορίθμου Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο – με **bold** οι ζυγοί των γεννητριών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το ισοζύγιο ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας 39 ζυγών. Και στις τρεις νησίδες υπάρχει περίσσεια ισχύος. Οι αποκλίσεις παραγωγής – κατανάλωσης είναι μικρές, οπότε η ευστάθειά τους δεν επηρεάζεται.

| | P_G (MW) | P_L (MW) | Διαφορά(MW) |
|----------|------------|------------|-------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 1076 | 986 | 90 |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 2359.9 | 2352 | 7.9 |
| ΝΗΣΙΔΑ 3 | 939 | 904 | 35 |

Πίνακας 7.22 Ισοζύγιο ισχύος μετά το διαχωρισμό του δικτύου 118 ζυγών με χρήση Αλγορίθμου Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο

Κατά τη νησιδοποίηση δημιουργούνται δύο διαχωριστικά σύνολα (*Cutset 1* και *Cutset 2*), στο δίκτυο 118 ζυγών, μετά το χωρισμό του σε 3 νησίδες. Ομοίως με το δίκτυο 39 ζυγών, το *Cutset 1* διαχωρίζει την Ομάδα 1 συναφών γεννητριών από τις Ομάδες 2 και 3, κι έπειτα το *Cutset 2* την Ομάδα 2 από την Ομάδα 3 (Πίνακας 3.3). Οι γραμμές που αποκόπτονται από τα *Cutset 1* και *Cutset 2*, η τιμή cut του καθενός καθώς και η συνολική τιμή cut των 2 *Cutset* είναι τα εξής:

| <u><i>Cutset 1</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|----------------------------|--------------------------------------|
| 19-34, 23-24, 30-38, 33-37 | 89.9 |

Πίνακας 7.23 Τιμή *cut* του *Cutset 1* μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο στο δίκτυο 118 ζυγών

| <u><i>Cutset 2</i></u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 77-82, 80-96, 96-97, 98-100, 99-100 | 61.0 |

Πίνακας 7.24 Τιμή *cut* του *Cutset 2* μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο στο δίκτυο 118 ζυγών

| <u>$Cutset(ol) = Cutset 1 + Cutset 2$</u> | <u>$\Sigma/P_{ij}/MW$</u> |
|---|--------------------------------------|
| 19-34, 23-24, 30-38, 33-37, 77-82, 80-96, 96-97, 98-100, 99-100 | 150.9 |

Πίνακας 7.25 Τιμή *cut* των *Cutset 1* και *Cutset 2* συνολικά μετά τη νησιδοποίηση με Αλγόριθμο Νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό Αλγόριθμο στο δίκτυο 118 ζυγών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα προηγούμενα κεφαλαία αναπτύχθηκαν 4 μέθοδοι ελεγχόμενης νησιδοποίησης για την αποφυγή κατάρρευσης του συστήματος. Οι λόγοι πρόκλησης και οι καταστροφικές συνέπειες κατάρρευσης του συστήματος περιγράφηκαν στο 1^ο κεφάλαιο της εργασίας μαζί με τα μεγαλύτερα μπλακάουτ που έχουν συμβεί μέχρι σήμερα. Οι μέθοδοι ελεγχόμενης νησιδοποίησης ικανοποιούν τον περιορισμό των ομάδων συναφών γεννητριών του εκάστοτε δικτύου, και έχουν ως κριτήριο την τήρηση του ισοζυγίου ενεργού ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες. Η ισορροπία της άεργου ισχύος θεωρήθηκε ότι μπορεί να επιτευχθεί μέσω τοπικής αντιστάθμισης, δηλαδή με τοποθέτηση επαγωγικών ή χωρητικών στοιχείων για την απορρόφηση ή παραγωγή άεργου ισχύος αντίστοιχα. Στη μία μέθοδο εφαρμόστηκε ως κριτήριο η ισορροπία τόσο της ενεργού όσο και της άεργου ισχύος. Οι μέθοδοι νησιδοποίησης προσομοιώθηκαν στο περιβάλλον του Matlab για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε 3 διαφορετικά πρότυπα δίκτυα της IEEE: -9 ζυγών, -39 ζυγών και -118 ζυγών.

Στην **1^η μέθοδο** εφαρμόστηκε ελεγχόμενη νησιδοποίηση του δικτύου βασισμένη στη θεωρία των γράφων και στις αρχές της φασματικής ομαδοποίησης (SCCI Algorithm), και η τελική ομαδοποίηση των ζυγών σε νησίδες επιτεύχθηκε με τον k-means αλγόριθμο. Στη **2^η μέθοδο** ο διαχωρισμός του δικτύου βασίστηκε πάλι στα ίδια στοιχεία, όμως ο τελικός διαχωρισμός του δικτύου έγινε με τον Minimum Cut αλγόριθμο, θέτοντας ως στόχο την ελάχιστη δυνατή τιμή της κανονικοποιημένης κοπής Ncut. Στην **3^η μέθοδο** εφαρμόστηκε ο SCCI αλγόριθμος της 1^{ης} μεθόδου, τέθηκαν όμως ως κριτήρια η ισορροπία τόσο της ενεργού όσο και της άεργου ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες, οδηγώντας σε ένα ενιαίο κριτήριο με βάση τις τιμές κοπής για τα διαχωριστικά σύνολα (cutsets) των 2 πρώτων κριτηρίων. Τέλος στην **4^η μέθοδο**, το δίκτυο αποτυπώνεται από τη θεωρία των γράφων και διαχωρίζεται σε νησίδες με χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου, ο οποίος παράγει τη βέλτιστη λύση έχοντας ως βασικά κριτήρια της ισορροπία ενεργού ισχύος στις νησίδες και τον διαχωρισμό των μη συναφών γεννητριών.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές κοπής(cut) του συνολικού διαχωριστικού συνόλου(cutset) που προκύπτει μετά την εφαρμογή των μεθόδων νησιδοποίησης για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας 9 ζυγών, 39 ζυγών και 118 ζυγών:

| | 1^η μέθοδος | 2^η μέθοδος | 3^η μέθοδος | 4^η μέθοδος |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <u>ΣΗΕ 9 ζυγών</u> | 71.735 MW | 71.735 MW | 71.735 MW | 71.735 MW |
| <u>ΣΗΕ 39 ζυγών</u> | 213.4 MW | 304.8 MW | 304.8 MW | 213.4 MW |
| <u>ΣΗΕ 118 ζυγών</u> | 139.7 MW | 138.6 MW | 143.0 MW | 150.9 MW |

Πίνακας 8.1 Τιμές cut των Συνολικών Cutset σε όλα τα δίκτυα με καθεμιά από τις 4 μεθόδους ελεγχόμενης Νησιδοποίησης – με **bold** οι βέλτιστες λύσεις

Στο διαχωρισμό του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας των 9 ζυγών, το βέλτιστο διαχωριστικό σύνολο έχει τιμή κοπής ίση με **71.735 MW**, και προκύπτει και από τις

4 μεθόδους ελεγχόμενης νησιδοποίησης, με βάση τις νόρμες που έχουν ακολουθηθεί σε καθεμιά από αυτές. Συνεπώς, για το δίκτυο των 9 ζυγών και οι 4 μέθοδοι παρουσιάζουν ίδιες τιμές στον υπολογισμό του ισοζυγίου ισχύος. Όπως φαίνεται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα, οποιαδήποτε μέθοδος νησιδοποίησης και να εφαρμοστεί στο δίκτυο των 9 ζυγών, θα πρέπει να ληφθούν μέτρα όπως η αποκοπή φορτίου στη νησίδα 2 για να αντιμετωπιστεί το έλλειμμα παραγόμενης ισχύος. Η περίσσεια ισχύος, εφόσον δεν επηρεάζει σημαντικά τη συχνότητα των γεννητριών, δεν επηρεάζει την ευστάθεια των νησίδων

| | 1 ^η μέθοδος | 2 ^η μέθοδος | 3 ^η μέθοδος | 4 ^η μέθοδος |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 71.95 MW | 71.95 MW | 71.95 MW | 71.95 MW |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | -67 MW | -67 MW | 67 MW | -67 MW |

Πίνακας 8.2 Ισοζύγιο ισχύος ($P_G - P_L$) σε κάθε νησίδα του δικτύου 9 ζυγών με καθεμιά από τις 4 μεθόδους ελεγχόμενης Νησιδοποίησης

Στο διαχωρισμό του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας των 39 ζυγών, το βέλτιστο διαχωριστικό σύνολο έχει τιμή κοπής ίση με **213.4 MW**. Οι μέθοδοι νησιδοποίησης από τις οποίες προκύπτει αυτό το διαχωριστικό σύνολο, είναι η 1^η μέθοδος νησιδοποίησης με SCCI αλγόριθμο, και η 4^η μέθοδος νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό αλγόριθμο. Οι τιμές κοπής των διαχωριστικών συνόλων των άλλων 2 μεθόδων νησιδοποίησης για το δίκτυο των 39 ζυγών απέχουν κατά πολύ από τη βέλτιστη τιμή, κάτι που φαίνεται στον Πίνακα 8.1. Η 2^η μέθοδος νησιδοποίησης με διαχωρισμό του δικτύου με Minimum Cut αλγόριθμο δίνει λύση νησιδοποίησης όπου η τιμή κοπής του διαχωριστικού συνόλου ισούται με 304.8 MW, απέχοντας 91.4 MW από τη βέλτιστη λύση νησιδοποίησης. Αντίστοιχα, η 3^η μέθοδος νησιδοποίησης με αλγόριθμο που λαμβάνει υπόψη την ισορροπία και ενεργού και άεργου ισχύος στις νησίδες, δίνει την ίδια λύση νησιδοποίησης με τη 2^η μέθοδο, δηλαδή τιμή κοπής του διαχωριστικού συνόλου ίση με 304.8 MW, απέχοντας 91.4 MW από τη βέλτιστη λύση νησιδοποίησης.

Τα παραπάνω αποτελέσματα αντικατοπτρίζονται και στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα ισοζυγίου ισχύος για το δίκτυο των 39 ζυγών. Όπως φαίνεται, η 1^η με την 4^η μέθοδος νησιδοποίησης σχηματίζουν πιο ισορροπημένες νησίδες όσον αφορά την παραγωγή και την κατανάλωση ισχύος σε αυτές, ενώ η 3^η και η 2^η μέθοδος παρουσιάζουν πιο μεγάλες διαφορές μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού ισχύος και απαιτούν περισσότερες ενέργειες ώστε οι νησίδες που σχηματίζουν να παραμείνουν ευσταθείς. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η σχηματιζόμενη νησίδα 3 – από οποιαδήποτε μέθοδο – απαιτεί αποκοπή φορτίου ώστε να έχει ευστάθεια.

| | 1 ^η μέθοδος | 2 ^η μέθοδος | 3 ^η μέθοδος | 4 ^η μέθοδος |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 87.27 MW | 80.77 MW | 80.77 MW | 87.27 MW |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 66.9 MW | 164.5 MW | 164.5 MW | 66.9 MW |
| ΝΗΣΙΔΑ 3 | -110.5 MW | -201.6 MW | -201.6 MW | -110.5 MW |

Πίνακας 8.3 Ισοζύγιο ισχύος ($P_G - P_L$) σε κάθε νησίδα του δικτύου 39 ζυγών με καθεμιά από τις 4 μεθόδους ελεγχόμενης Νησιδοποίησης

Στο διαχωρισμό του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας των 118 ζυγών, το βέλτιστο διαχωριστικό σύνολο έχει τιμή κοπής ίση με **138.6 MW**, και προκύπτει από

τη 2^η μέθοδο νησιδοποίησης με διαχωρισμό του δικτύου με Minimum Cut αλγόριθμο. Όπως φαίνεται όμως στον Πίνακα 8.1, οι τιμές κοπής των διαχωριστικών συνόλων των υπόλοιπων μεθόδων νησιδοποίησης για το δίκτυο των 118 ζυγών απέχουν πολύ λίγο από τη τιμή κοπής της βέλτιστης λύσης. Η 1^η μέθοδος νησιδοποίησης με SCCI αλγόριθμο δίνει λύση νησιδοποίησης όπου η τιμή κοπής του διαχωριστικού συνόλου ισούται με 139.7 MW, απέχοντας μόλις 1.1 MW από τη βέλτιστη λύση νησιδοποίησης. Η 3^η μέθοδος νησιδοποίησης με αλγόριθμο που λαμβάνει υπόψη την ισορροπία και ενεργού και άεργου ισχύος στις νησίδες, δίνει λύση νησιδοποίησης όπου η τιμή κοπής του διαχωριστικού συνόλου ισούται με 143.0 MW, απέχοντας 4.4 MW από τη βέλτιστη λύση νησιδοποίησης. Τέλος, η 4^η μέθοδος νησιδοποίησης με βάση τον Γενετικό αλγόριθμο δίνει λύση νησιδοποίησης όπου η τιμή κοπής του διαχωριστικού συνόλου ισούται με 150.9 MW, απέχοντας 12.3 MW από τη βέλτιστη λύση νησιδοποίησης. Συνεπώς, η 2^η μέθοδος νησιδοποίησης είναι προτιμότερη στο ΣΗΕ 118 ζυγών, όμως μπορούν κάλλιστα να διαχωρίσουν το συγκεκριμένο δίκτυο η 1^η ή η 3^η μέθοδος νησιδοποίησης με ελάχιστα μεγαλύτερες απώλειες ισχύος.

Στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα με τα αποτελέσματα ισοζυγίου ισχύος στις σχηματιζόμενες νησίδες του δικτύου των 118 ζυγών φαίνεται η συνάφεια των αποτελεσμάτων που περιγράφηκε πριν, καθώς οι σχηματιζόμενες νησίδες από κάθε μέθοδο δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους όσον αφορά τη διαφορά παραγωγής με κατανάλωση ισχύος. Ιδιαίτερα στην 1^η και την 4^η μέθοδο δεν υπάρχει έλλειμμα ενεργού ισχύος σε καμία από τις σχηματιζόμενες νησίδες. Η 3^η μέθοδος απαιτεί αποκοπή φορτίου στη νησίδα 2 για να λειτουργήσει ευσταθώς, όπως και η 2^η μέθοδος στη νησίδα 3.

| | 1 ^η μέθοδος | 2 ^η μέθοδος | 3 ^η μέθοδος | 4 ^η μέθοδος |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| ΝΗΣΙΔΑ 1 | 100 MW | 100 MW | 100 MW | 90 MW |
| ΝΗΣΙΔΑ 2 | 1.9 MW | 39.9 MW | -40.1 MW | 7.9 MW |
| ΝΗΣΙΔΑ 3 | 31 MW | -7 MW | 73 MW | 35 MW |

Πίνακας 8.4 Ισοζύγιο ισχύος ($P_G - P_L$) σε κάθε νησίδα του δικτύου 118 ζυγών με καθεμιά από τις 4 μεθόδους ελεγχόμενης Νησιδοποίησης

Η υπολογιστική αποτελεσματικότητα μιας μεθόδου ελεγχόμενης νησιδοποίησης αποτελεί επίσης βασικό παράγοντα κατά την αξιολόγηση της απόδοσης ενός αλγορίθμου νησιδοποίησης. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τον χρόνο υπολογισμού της κάθε μεθόδου νησιδοποίησης για τα ίδια δίκτυα:

| | 1 ^η μέθοδος | 2 ^η μέθοδος | 3 ^η μέθοδος | 4 ^η μέθοδος |
|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <u>ΣΗΕ 9 ζυγών</u> | 1.042 sec | 0.947 sec | 1.298 sec | 2.804 sec |
| <u>ΣΗΕ 39 ζυγών</u> | 1.232 sec | 2.024 sec | 1.629 sec | 44.324 sec |
| <u>ΣΗΕ 118 ζυγών</u> | 1.421 sec | 48.739 sec | 2.375 sec | 91.108 sec |

Πίνακας 8.5 Χρόνος υπολογισμού για κάθε μέθοδο ελεγχόμενης νησιδοποίησης για όλα τα δίκτυα – με **bold** οι βέλτιστες λύσεις
Intel Core 2 Duo CPU 2GHz; 4GB RAM PC; Matlab 7.14.0.739 code

Η 1^η μέθοδος νησιδοποίησης με SCCI αλγόριθμο είναι η πιο γρήγορη σε σχέση με τις υπόλοιπες για τα δίκτυα των 39 και 118 ζυγών, ενώ και στο δίκτυο των 9

ζυγών ο χρόνος υπολογισμού της συγκεκριμένης μεθόδου είναι παραπλήσιος του βέλτιστου χρόνου που ανήκει στη 2^η μέθοδο. Η 3^η μέθοδος διαρκεί σχετικά μικρό χρόνο για όλα τα δίκτυα, διαρκεί όμως περισσότερο απ' την 1^η μέθοδο καθώς πέρα από το ισοζύγιο ενεργού ισχύος, λαμβάνει υπόψη και το ισοζύγιο αέργου ισχύος για το διαχωρισμό των δικτύων. Η 2^η μέθοδος διαρκεί τον πιο μικρό χρόνο για το δίκτυο των 9 ζυγών σε σχέση με τις υπόλοιπες, όμως στα άλλα 2 δίκτυα που είναι πιο πολύπλοκα ο χρόνος που διαρκεί η νησιδοποίηση με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι πιο μεγάλος. Η 4^η μέθοδος είναι η πιο αργή μέθοδος από όλες και για όλα τα δίκτυα, καθώς η πολυπλοκότητα του εκάστοτε δικτύου αυξάνει ραγδαία τον αριθμό των απαραίτητων αναπαραγωγών πληθυσμού χρωμοσωμάτων, ώστε από το Γενετικό αλγόριθμο να προκύψει η βέλτιστη λύση.

Συμπερασματικά, η 1^η μέθοδος νησιδοποίησης έχει τον μικρότερο χρόνο εκτέλεσης, κάτι που την καθιστά κατάλληλη για online ανάλυση του συστήματος όταν υπάρχουν περιπτώσεις όπου το δίκτυο κινδυνεύει με άμεση κατάρρευση. Η 2^η μέθοδος δημιουργεί "ίσες νησίδες", καθώς ο αλγόριθμός της στοχεύει στην αποφυγή της αποκοπής ενός μόνο ζυγού κατά το διαχωρισμό του δικτύου. Αυτό καθιστά τις σχηματιζόμενες νησίδες πιο εύκολα διαχειρίσιμες σε περίπτωση αναδρομικής διχοτόμησης, και φαίνεται εάν συγκριθούν οι λύσεις νησιδοποίησης κάθε μεθόδου για το δίκτυο των 118 ζυγών, όπου η λύση της 2^{ης} μεθόδου παρουσιάζει τη μικρότερη διασπορά σε σχέση με τις υπόλοιπες, όσον αφορά τον αριθμό των ζυγών στις νησίδες. Όμως η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί μεγάλο χρόνο εκτέλεσης και είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται σε offline ανάλυση του συστήματος, εάν θεωρηθεί πως το σύστημα δεν αλλάζει κατάσταση. Η 3^η μέθοδος είναι η μόνη μέθοδος ελεγχόμενης νησιδοποίησης που λαμβάνει υπόψη και το ισοζύγιο αέργου ισχύος κατά το διαχωρισμό του δικτύου σε νησίδες. Τέλος, η 4^η μέθοδος που βασίζεται στον Γενετικό αλγόριθμο, βρίσκει λύση νησιδοποίησης ενός δικτύου, αλλά σε μεγάλα δίκτυα η λύση αυτή δεν είναι καλύτερη από τη λύση των υπολοίπων μεθόδων. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή απαιτεί μεγάλο χρόνο εκτέλεσης, άρα χρησιμοποιείται μόνο σε offline ανάλυση του συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Newman, D.E.; Carreras, B.A.; Lynch, V.E.; Dobson, I., "Exploring Complex Systems Aspects of Blackout Risk and Mitigation," *Reliability, IEEE Transactions on* , vol.60, no.1, pp.134,143, March 2011
- [2] <http://www.power-technology.com/features/featurethe-10-worst-blackouts-in-the-last-50-years-4486990/>
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Power_outage
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_major_power_outages
- [5] http://www.huffingtonpost.com/2014/11/01/power-blackout-bangladesh_n_6086592.html
- [6] <http://www.icis.com/resources/news/2015/04/16/9876979/turkey-s-blackout-caused-by-line-maintenance-hydro-production-oversupply-teias/>
- [7] <https://www.wsws.org/en/articles/2001/01/ind-j09.html>
- [8] Li Liu; Li Liu; Cartes, D.A., "Slow Coherency and Angle Modulated Particle Swarm Optimization Based Islanding of Large Scale Power Systems," *Neural Networks, 2007. IJCNN 2007. International Joint Conference on* , vol., no., pp.2087,2092, 12-17 Aug. 2007
- [9] Lei Ding; Gonzalez-Longatt, F.M.; Wall, P.; Terzija, V., "Two-Step Spectral Clustering Controlled Islanding Algorithm," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.28, no.1, pp.75,84, Feb. 2013
- [10] Tortos, J.Q.; Terzija, V., "Controlled islanding strategy considering power system restoration constraints," *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE* , vol., no., pp.1,8, 22-26 July 2012
- [11] Όλγα Βλαχοκυριάκου, "Διαχωρισμός του δικτύου σε ζώνες και αποκεντρωμένος έλεγχος για ρύθμιση τάσης σε περίπτωση διαταραχών", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Σεπτέμβριος 2014
- [12] Song, H.; Wu, J.; Wu, K., "A Wide-Area Measurement Systems-Based Adaptive Strategy for Controlled Islanding in Bulk Power Systems", *Energies 2014*, 7, 2631-2657
- [13] T. D. Bie, J. Suykens, and B. D. Moor, "Learning from general label constraints," in *Proc. IAPR Int. Workshop Statistical Pattern Recognition*, Lisbon, Portugal, Aug. 2004
- [14] Φίντζος Α. Γεώργιος, "Βέλτιστη διαστασιολόγηση μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής με χρήση Γενετικού Αλγορίθμου και Βέλτιστης ροής φορτίου", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Ιούλιος 2012
- [15] Εμμανουήλ Μ. Βουμβουλάκης, "Συμβολή μεθόδων μηχανικής μάθησης στην εκτίμηση και τον έλεγχο δυναμικής ασφάλειας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Φεβρουάριος 2010
- [16] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, Feb. 2011
- [17] Juan Li; Chen-Ching Liu; Schneider, K.P., "Controlled Partitioning of a Power Network Considering Real and Reactive Power Balance," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.1, no.3, pp.261,269, Dec. 2010
- [18] R. L. Haupt and S. E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms* Second Edition WileyInterscience, USA, 2004, pp. 27-47

- [19] Babatunde Oluleye, Armstrong Leisa, Leng Jinsong, Diepeveen Dean, (2014)"
A Genetic Algorithm-Based Feature Selection". *International Journal of
Electronics Communication and Computer Engineering*: 5(4);889-905
- [20] <http://www.mathworks.com/help/bioinfo/ref/graphconncomp.html>
- [21] [http://www.huffingtonpost.com/2013/08/14/2003-northeast-
blackout_n_3751171.html](http://www.huffingtonpost.com/2013/08/14/2003-northeast-blackout_n_3751171.html)