

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

ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΕΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Σοφός

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2024



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

ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΕΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Σοφός

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31
η Οκτωβρίου 2024.

..... Νικόλαος Χατζηαργυρίου Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ Γεώργιος Κορρές Καθηγητής ΕΜΠ Άρης-Ευάγγελος Δημέας Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

.....

Νικόλαος Σοφός

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

Copyright © Νικόλαος Σοφός, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την απλοποίηση του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, με σκοπό τη δημιουργία ενός ισοδύναμου ελαττωμένου μοντέλου που να ανταποκρίνεται στις ανάγκες ανάλυσης δυναμικών φαινομένων και μελετών ευστάθειας. Η ανάγκη για τέτοια απλοποίηση προκύπτει από την αυξημένη πολυπλοκότητα του πλήρους μοντέλου, το οποίο χρησιμοποιείται από τον ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) για μελέτες του Συστήματος. Το πλήρες μοντέλο, αν και ακριβές, απαιτεί εκτεταμένους υπολογιστικούς πόρους και χρόνο για την προσομοίωση, ενώ, παράλληλα, λόγω του εμπιστευτικού χαρακτήρα των δεδομένων του, δεν μπορεί να κοινοποιηθεί δημοσίως. Για τον λόγο αυτό, η δημιουργία ενός αξιόπιστου απλοποιημένου μοντέλου είναι ουσιώδης.

Η μέθοδος που επιλέχθηκε για την απλοποίηση είναι η μέθοδος των συνεκτικών ομάδων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ομαδοποίηση γεννητριών που παρουσιάζουν παρόμοια δυναμική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια διαταραχών, επιτρέποντας έτσι τη μείωση του πλήθους των ζυγών του συστήματος και τη συνάθροιση των μοντέλων των γεννητριών χωρίς να θυσιάζεται η ακρίβεια στις προσομοιώσεις. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου είναι το PowerFactory της DIgSILENT, ένα εργαλείο ευρέως χρησιμοποιούμενο για μελέτες συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Η διαδικασία της απλοποίησης περιλαμβάνει την ελάττωση του συστήματος και την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του απλοποιημένου μοντέλου μέσω σύγκρισης με το πλήρες μοντέλο. Πραγματοποιήθηκαν διάφορα σενάρια προσομοίωσης δυναμικών φαινομένων, συμπεριλαμβανομένων διαταραχών όπως βηματικές αλλαγές φορτίου και σφάλματα σε γραμμές μεταφοράς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το απλοποιημένο μοντέλο διατηρεί υψηλή ακρίβεια σε σχέση με το πλήρες, παρέχοντας ταυτόχρονα σημαντική μείωση του υπολογιστικού χρόνου.

Στη συνέχεια, προστέθηκε η Κρήτη στο απλοποιημένο σύστημα. Το μοντέλο περιλαμβάνει την AC διασύνδεση της Κρήτης με την υπόλοιπη χώρα, και εξετάζει τη συμπεριφορά της κατά τη διάρκεια δυναμικών διαταραχών.

Η εργασία ολοκληρώνεται με προτάσεις και κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Συγκεκριμένα, προτείνεται η ενσωμάτωση στο μοντέλο της DC διασύνδεσης της Κρήτης με την Αττική, η μελλοντική ενσωμάτωση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, και τέλος, η σύγκριση της μεθόδου των συνεκτικών ομάδων με άλλες μεθόδους απλοποίησης συστημάτων.

Λέξεις Κλειδιά

Μοντελοποίηση, Συνεκτικότητα, Ελάττωση Συστήματος, Μελέτη Ευστάθειας, PowerFactory, Δυναμική Συμπεριφορά, Προσομοίωση, Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Abstract

This thesis focuses on the simplification of the Greek Transmission System, aiming to create a reduced equivalent model that meets the requirements for dynamic phenomenon analysis and stability studies. The need for such simplification arises from the increased complexity of the full model, which is used by the IPTO (Independent Power Transmission Operator) for system studies. Although the full model is accurate, it requires extensive computational resources and time for simulations. Furthermore, due to the confidential nature of its data, it cannot be publicly shared. For these reasons, creating a reliable simplified model is essential.

The method selected for the simplification is the method of coherent groups. This method is based on grouping generators that exhibit similar dynamic behavior during disturbances, thus allowing the reduction of system buses and the aggregation of generator models without sacrificing simulation accuracy. The software used for the implementation of the method is DIgSILENT's PowerFactory, a widely used tool for power system studies.

The simplification process involves the reduction of the system and the validation of the simplified model's results through comparison with the full model. Various dynamic-phenomena simulation scenarios were carried out, including disturbances such as load step changes and transmission line faults. The results showed that the simplified model maintains high accuracy compared to the full model, while significantly reducing computational time.

Subsequently, Crete was added to the simplified system. The model includes the AC interconnection of Crete with the rest of the country and examines its behavior during dynamic disturbances.

The thesis concludes with proposals and directions for future research. Specifically, it is recommended to integrate the DC interconnection between Crete and Attica into the model, as well as the future inclusion of offshore wind farms. Lastly, a comparison of the method of coherent groups with other system reduction methods is proposed to evaluate their respective performance.

Key Words

Modeling, Coherency, System Reduction, Stability Assessment, PowerFactory, Dynamic Behavior, Simulation, Electric Power System

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί το τέλος των πέντε χρόνων φοίτησής μου στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Όντας η μέχρι τώρα καλύτερη περίοδος της ζωής μου, θα ήθελα με την ευκαιρία που μου δίνεται να ευχαριστήσω όλους εκείνους που αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, όχι μόνο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, αλλά και για το συνεχές ενδιαφέρον του για εμένα, τις συμβουλές του και τη βοήθεια του σε όσες περιπτώσεις τη χρειάστηκα. Χωρίς αυτόν, σήμερα θα ήμουν πιο φτωχός σε γνώσεις, εμπειρίες και φιλίες.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστώ τον υποψήφιο Διδάκτορα Χρήστο Νικολακάκο. Η συνεχής του υποστήριξη, καθοδήγηση και βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, ήταν καθοριστικής σημασίας. Χωρίς τη συμβολή του, το αποτέλεσμα σίγουρα δε θα ήταν το ίδιο. Τον ευχαριστώ για τις συμβουλές του και το ενδιαφέρον του. Ελπίζω αυτή να είναι μόνο η αρχή της συνεργασίας μας.

Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ οφείλω και σε όλους εκείνους τους καθηγητές, που με τον τρόπο διδασκαλίας τους συνέβαλαν στην ανάπτυξη των ενδιαφερόντων που έχω σήμερα πάνω τον κλάδο του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους μου. Τόσο αυτούς που ήταν μαζί πριν την αρχή αυτού του ταξιδιού, όσο και αυτούς που η σχέση μας αναπτύχθηκε στην πορεία. Τους ευχαριστώ για την υποστήριξή τους, για τις συμβουλές τους, για τη βοήθειά τους, για τις αναμνήσεις, τα ταξίδια και όσα άλλα ζήσαμε μαζί. Οι εμπειρίες αυτές θα μου μείνουν αξέχαστες και έδωσαν επιπλέον αξία σε αυτά τα πέντε χρόνια.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου. Η συνεχής υποστήριξη και συμπαράστασή τους τα 23 αυτά χρόνια, έπαιξε καθοριστικό σε ότι έχω καταφέρει μέχρι σήμερα. Τους ευχαριστώ για όλους τους κόπους που κατέβαλαν για μένα όλα αυτά τα χρόνια και την ανιδιοτελή αγάπη τους.

Στους γονείς μου

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων13
Κατάλογος Εικόνων17
Κατάλογος Πινάκων
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή21
1.1 Σκοπός της Εργασίας21
1.2 Δομή της Εργασίας22
Κεφάλαιο 2: Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας23
2.1 Ιστορική Αναδρομή23
2.1.1 Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας23
2.2 Το Πρόβλημα Ευστάθειας ΣΗΕ25
2.3 Το Ενεργειακό Μείγμα26
2.4 Απλοποίηση ΣΗΕ
Κεφάλαιο 3: Η Απλοποίηση των ΣΗΕ και η Μέθοδος Συνεκτικότητας
3.1 Εισαγωγή στη Μέθοδο Συνεκτικότητας31
3.1.1 Γενικά31
3.1.2 Ορισμός του Προβλήματος32
3.1.3 Επισκόπηση της Διαδικασίας32
3.2 Εντοπισμός των Συνεκτικών Ομάδων Γεννητριών (Identification of Coherent Generators)
3.2.1 Ο Αλγόριθμος Γραμμικής Προσομοίωσης Χρόνου
3.2.2 Αλγόριθμος Ομαδοποίησης Γεννητριών
3.3 Ελάττωση των Ζυγών των Γεννητριών
3.4 Ελάττωση των Ζυγών Φορτίου45
3.5 Δυναμική Άθροιση των Μοντέλων των Γεννητριών
3.5.1 Άθροιση των Συστημάτων Ρυθμιστή Στροφών-Στροβίλου
3.5.2 Άθροιση των Σύγχρονων Γεννητριών
3.5.3 Άθροιση του Συστήματος Διέγερσης και των Μοντέλων των Σταθεροποιητών του ΣΗΕ
3.6 PowerFactory
3.6.1 Ελάττωση Δικτύου
3.6.2 Δυναμική Απλοποίηση51
Κεφάλαιο 4: Η Μεθοδολογία της Απλοποίησης53
4.1 Το Μοντέλο του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.53

4.2 Η Διαδικασία Απλοποίησης του Συστήματος	54
4.2.1 Ορισμός Ορίων	55
4.2.2 Εκτέλεση της Απλοποίησης (Dynamic Reduction)	56
4.2.3 Αποτελέσματα	59
4.3 Απλοποίηση των υπόλοιπων Ζωνών	61
4.3.1 Μακεδονία-Θράκη	61
4.3.2 Βόρεια Μακεδονία	63
4.3.3 Κεντρική Μακεδονία	65
4.3.4 Θεσσαλία	67
4.3.5 Αττική	69
4.3.6 Ιόνιο	71
4.3.7 Κυκλάδες	73
4.3.8 Δυτική Ελλάδα	75
4.4 Το Τελικό Μοντέλο	78
Κεφάλαιο 5: Πιστοποίηση του Ισοδύναμου Μοντέλου	79
5.1 Σενάριο 1: Βραχυκύκλωμα στη Διασύνδεση Ελλάδας - Βουλγαρίας	79
5.2 Σενάριο 2: Βραχυκύκλωμα σε Γραμμή Σύνδεσης Αττικής - Δυτικής Ελλάδας	84
5.3 Σενάριο 3: Βραχυκύκλωμα σε Γραμμή Σύνδεσης Αττικής - Πελοποννήσου	87
5.4 Σενάριο 4: Βηματική Αύξηση φορτίου -480MW και 50MVAR	90
5.5 Σενάριο 5: Βηματική Αύξηση φορτίου 338MW και 172MVAR	93
5.6 Σενάριο 6: Βηματική Αύξηση συνολικού φορτίου 111MW και 69MVAR	96
5.7 Σενάριο 7: Απώλεια Γεννήτριας 307MW	99
5.8 Σενάριο 8: Απώλεια Γεννήτριας 380MW1	02
5.9 Σενάριο 9: Απώλεια της Διασύνδεσης Ελλάδας – Βουλγαρίας 300MW1	05
5.10 Συμπεράσματα1	08
Κεφάλαιο 6: Προσθήκη της Κρήτης στο Μοντέλο1	09
6.1 Μοντελοποίηση της Κρήτης1	09
6.2 Μελέτη Βηματικής Αύξησης του Φορτίου της Κρήτης1	10
6.3 Συμπεράσματα1	12
Κεφάλαιο 7: Σύνοψη και Συμπεράσματα1	13
7.1 Σύνοψη1	13
7.2 Κύρια Συμπεράσματα1	13
7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα1	14
Βιβλιογραφία	15

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Η Παραγωγή ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα, ανά τεχνολογία.	27					
2.2	Η Παραγωγή ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ανά τεχνολογία.	27					
2.3	Η Παραγωγή ηλεκτρικής Ενέργειας στον Κόσμο, ανά τεχνολογία						
3.1	Η περιοχή μελέτης στο Σύστημα 39-Ζυγών.						
3.2	Η Διαμόρφωση του συστήματος μετά από την απαλοιφή των Ζυγών των γεννητριών, με βάση τη συνεκτικότητά τους.						
3.3	Η Διαμόρφωση του συστήματος μετά από την Γκαουσιανή εξάλειψη των Ζυγών φορτίου.						
3.4	Η Διαμόρφωση του συστήματος μετά από τον δυναμικό συνδυασμό των μοντέλων των γεννητριών.	35					
3.5	Απεικόνιση της αντιμετώπισης των αποσυνδέσεων γραμμών. α) Σύστημα πριν το σφάλμα. β) Υποθετικό σύστημα. γ) Σύστημα μετά το σφάλμα.						
3.6	Διαμόρφωση συνεκτικών γεννητριών στο αρχικό σύστημα.	42					
3.7	Οι ζυγοί των συνεκτικών γεννητριών συνδέονται σε έναν ισοδύναμο ζυγό μέσω ιδανικών μετασχηματιστών.	43					
3.8	Η διακλάδωση μεταξύ των συνεκτικών ζυγών 2 και 3 αντικαθίσταται από ισοδύναμες εγκάρσιες αγωγιμότητες στους ζυγούς 2 και 3.						
3.9	Γεννήτριες, φορτία και εγκάρσιες αγωγιμότητες μεταφέρονται από τους αρχικούς στον ισοδύναμο ζυγό.	44					
3.10	Οι αρχικών τερματικοί ζυγοί των γεννητριών απαλείφονται.						
4.1	Το πλήρες μοντέλο του Συστήματος.	54					
4.2	Το πλήρες μοντέλο του Συστήματος, όπου με κόκκινο χρώμα φαίνεται η Ζώνη που θα μειωθεί.	56					
4.3	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.	60					
4.4	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.	62					
4.5	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.	63					
4.6	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.	64					
4.7	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.	65					
4.8	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.	66					

4.9	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.	67					
4.10	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.	68					
4.11	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.	69					
4.12	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.	70					
4.13	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.	71					
4.14	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.	72					
4.15	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.	73					
4.16	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.	74					
4.17	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.	75					
4.18	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.	76					
4.19	Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.						
5.1	Η Τάση στο Ζυγό ΚΤΗΕS1 μέχρι και 2 sec μετά το σφάλμα.	80					
5.2	Η Τάση στο Ζυγό KTHES1 μέχρι και 12 sec μετά το σφάλμα.	80					
5.3	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 12 sec μετά το σφάλμα.						
5.4	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 80 sec μετά το σφάλμα.	81					
5.5	Η Τάση στο Ζυγό ΚΚΟUΜ μέχρι και 2 sec μετά το σφάλμα.	85					
5.6	Η Τάση στο Ζυγό KKOUM μέχρι και 12 sec μετά το σφάλμα.	85					
5.7	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 12 sec μετά το σφάλμα.	86					
5.8	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 100 sec μετά το σφάλμα.	86					
5.9	Η Τάση στο Ζυγό KORINTΗ1 μέχρι και 4 sec μετά το σφάλμα.	88					
5.10	Η Τάση στο Ζυγό KORINTΗ1 μέχρι και 14 sec μετά το σφάλμα.	88					
5.11	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 10 sec μετά το σφάλμα.	89					
5.12	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 50 sec μετά το σφάλμα.						

5.13	Η Τάση στο Ζυγό KARACH μέχρι και 3 sec μετά τη διαταραχή.	91
5.14	Η Τάση στο Ζυγό KARACH μέχρι και 100 sec μετά τη διαταραχή.	91
5.15	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 20 sec μετά τη διαταραχή.	92
5.16	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 300 sec μετά τη διαταραχή.	92
5.17	Η Τάση στο Ζυγό ALOUMIN1 μέχρι και 2 sec μετά τη διαταραχή.	94
5.18	Η Τάση στο Ζυγό ALOUMIN1 μέχρι και 50 sec μετά τη διαταραχή.	94
5.19	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 10 sec μετά τη διαταραχή.	95
5.20	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 70 sec μετά τη διαταραχή.	95
5.21	Η Τάση στο Ζυγό KARACH μέχρι και 3 sec μετά τη διαταραχή.	97
5.22	Η Τάση στο Ζυγό KARACH μέχρι και 60 sec μετά τη διαταραχή.	97
5.23	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 15 sec μετά τη διαταραχή.	98
5.24	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 80 sec μετά τη διαταραχή.	98
5.25	Η Τάση στο Ζυγό KDISTOMO μέχρι και 5 sec μετά τη διαταραχή.	100
5.26	Η Τάση στο Ζυγό KDISTOMO μέχρι και 50 sec μετά τη διαταραχή.	100
5.27	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 15 sec μετά τη διαταραχή.	101
5.28	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 80 sec μετά τη διαταραχή.	101
5.29	Η Τάση στο Ζυγό HERON μέχρι και 5 sec μετά τη διαταραχή.	103
5.30	Η Τάση στο Ζυγό HERON μέχρι και 80 sec μετά τη διαταραχή.	103
5.31	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 15 sec μετά τη διαταραχή.	104
5.32	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 70 sec μετά τη διαταραχή.	104
5.33	Η Τάση στο Ζυγό ΚΤΗΕS1 μέχρι και 5 sec μετά τη διαταραχή.	106
5.34	Η Τάση στο Ζυγό ΚΤΗΕS1 μέχρι και 80 sec μετά τη διαταραχή.	106
5.35	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 10 sec μετά τη διαταραχή.	107
5.36	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 80 sec μετά τη διαταραχή.	107
6.1	Η Τάση στο Ζυγό KORINTΗ1 μέχρι και 50 sec μετά τη διαταραχή.	111
6.2	Η Τάση στο Ζυγό ΚΚΟUΜ μέχρι και 50 sec μετά τη διαταραχή.	111
6.3	Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 50 sec μετά τη διαταραχή.	112

Κατάλογος Εικόνων

4.1	Η γραμμή εργασιών του PowerFactory και η Συνάρτηση Μείωσης Συστήματος.						
4.2	Το «παράθυρο» όπου επιλέγονται οι βασικά επιλογές που προσφέρει η συνάρτηση μείωσης Συστήματος.						
4.3	Το «παράθυρο» στο οποίο επιλέγεται ο τύπος της διαταραχής σύμφωνα με την οποία θα γίνει η ομαδοποίηση των συνεκτικών γεννητριών.						
4.4	Το «παράθυρο» στο οποίο επιλέγεται ο τρόπος αποθήκευσης του νέου μοντέλου.						
4.5	Το «παράθυρο» στο οποίο επιλέγονται άλλα χαρακτηριστικά της συνάρτησης μείωσης του Συστήματος.	58					
4.6	Το «παράθυρο» στο οποίο επιλέγονται οι έλεγχοι που μπορεί να γίνουν μεταξύ του απλοποιημένου και του αρχικού μοντέλου.	59					
5.1	Ορισμός του βραχυκυκλώματος.	82					
5.2	Ορισμός της εκκαθάρισης του σφάλματος.	83					
5.3	Το βραχυκύκλωμα και η εκκαθάριση του σφάλματος.	83					
5.4	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.	84					
5.5	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.	84					
5.6	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.	87					
5.7	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.	87					
5.8	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.	93					
5.9	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.	93					
5.10	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.	96					
5.11	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.	96					
5.12	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.	99					
5.13	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.	99					
5.14	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.	102					
5.15	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.	102					

5.16	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.	105
5.17	Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.	105
6.1	Ορισμός της βηματικής αύξησης του φορτίου της Κρήτης.	110

Κατάλογος Πινάκων

4.1	Τα αποτελέσματα	της ροής	ισχύος πρι	ν και μετά	τη μείωση	της Ζώνης:	59
	Πελοπόννησος.						57

- 4.2 Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: 61 Μακεδονία-Θράκη.
- 4.3 Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: 64 Βόρεια Μακεδονία.
- 4.4 Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: 65 Κεντρική Μακεδονία.
- 4.5 Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: 68 Θεσσαλία.
- 4.6 Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: 70 Αττική.
- 4.7 Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: 71 Ιόνιο.
- 4.8 Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: 73 Κυκλάδες.
- 4.9 Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: 75 Δυτική Ελλάδα.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την δημιουργία ενός ισοδύναμου ελαττωμένου μοντέλου, βασισμένο στο πλήρες μοντέλο του ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων. Το απλοποιημένο μοντέλο μπορεί μελλοντικά να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη σεναρίων επέκτασης του ελληνικού συστήματος, όπως η προσθήκη υπεράκτιων αιολικών πάρκων ή διασυνδέσεων με γειτονικές χώρες όπως η Κύπρος και η Αίγυπτος.

Για την δημιουργία ενός αξιόπιστου απλοποιημένου μοντέλου, κάθε βήμα της διαδικασίας της απλοποίησης καταγράφεται λεπτομερώς. Τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων συγκρίνονται εξετάζοντας διάφορες διαταραχές και στα δύο συστήματα, για να επιβεβαιωθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του απλοποιημένου μοντέλου.

Η σημασία της ύπαρξης ενός πιο απλού, αλλά και αξιόπιστου μοντέλου, δεν σταματά στην πιο γρηγορότερη διενέργεια προσομοιώσεων που αυτό προσφέρει σε σύγκριση με το αρχικό. Αντιθέτως, προσφέρει και πολλά ακόμη πλεονεκτήματα. Το πλήρες μοντέλο του συστήματος, αποτελεί το μοντέλο που χρησιμοποιεί ο ελληνικός Διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) για να μελετήσει το σύστημα. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί ακριβή στοιχεία για τα φορτία και τις γεννήτριες του συστήματος και είναι εμπιστευτικό. Το απλοποιημένο μοντέλο αντιθέτως θα μπορεί να κοινοποιηθεί δημόσια. Επιπροσθέτως, σε περιπτώσεις όπου μελετάται η επέκταση του συστήματος, ιδιαίτερη σημασία έχει η ακριβής μοντέλο που κατασκευάστηκε στην παρούσα διπλωματική είναι κατάλληλο για τέτοιες μελέτες..

Για την απλοποίηση του συστήματος, αλλά και την επικύρωση των αποτελεσμάτων του απλοποιημένου μοντέλου σε σύγκριση με το πλήρες χρησιμοποιείται το λογισμικό PowerFactory της εταιρείας DIgSILENT. Αυτό χρησιμοποιείται από πολλούς διαχειριστές δικτύων σε όλο τον κόσμο, αλλά και από ιδιωτικές εταιρείες και πανεπιστημιακά ιδρύματα για τη μοντελοποίηση και τη μελέτη Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.

1.2 Δομή της Εργασίας

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά τα περιεχόμενα των υπόλοιπων Κεφαλαίων της Διπλωματικής εργασίας.

- Κεφάλαιο 2: Στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της σύστασης των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας καθώς και το πως αυτή έχει μεταβληθεί με την πάροδο του χρόνου. Συνάμα, δίνεται ο ορισμός της ευστάθειας ΣΗΕ και αναλύεται η σημασία της. Τέλος γίνεται αναφορά σε ορισμένες από τις μεθόδους απλοποίησης ΣΗΕ.
- Κεφάλαιο 3: Στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται οι διάφορες μεθόδους απλοποίησης των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη μέθοδο των συνεκτικών ομάδων, η οποία χρησιμοποιείται για την απλοποίηση του ελληνικού συστήματος στην παρούσα διπλωματική. Επιπλέον παρουσιάζεται συνοπτικά το λογισμικό PowerFactory καθώς και οι θεωρητικές πληροφορίες που αυτό παρέχει για τη διαδικασία της απλοποίησης που ακολουθήθηκε.
- Κεφάλαιο 4: Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται λεπτομερώς η μεθοδολογία και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την πλήρη απλοποίηση του συστήματος στο PowerFactory. Στην αρχή γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση του συστήματος. Έπειτα, παρουσιάζεται βήμα-βήμα η διαδικασία της απλοποίησης της πρώτης ζώνης του συστήματος. Οι απλοποιήσεις των υπόλοιπων ζωνών δεν παρουσιάζονται με τόση λεπτομέρεια, ωστόσο μετά από κάθε μία γίνεται σύγκριση της απόκρισης του νέου Συστήματος που προκύπτει με αυτό του προηγούμενου σταδίου της απλοποίησης, αλλά και με το αρχικό μοντέλο. Στο τέλος του Κεφαλαίου έχει δημιουργηθεί το πλήρως απλοποιημένο μοντέλο.
- Κεφάλαιο 5: Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων που εξετάζονται με στόχο την πιστοποίηση (validation) των αποτελεσμάτων του απλοποιημένου μοντέλου, και διατυπώνονται τα κατάλληλα συμπεράσματα. Για την διατύπωση όσον το δυνατόν ασφαλέστερων συμπερασμάτων, έχουν μελετηθεί διάφοροι τύποι διαταραχών, σε διάφορα σημεία του Συστήματος.
- Κεφάλαιο 6: Στο Κεφάλαιο 6 προστίθεται στο απλοποιημένο μοντέλο και το η Κρήτη. Για λόγους απλότητας προστίθεται μόνο η υποθαλάσσια γραμμή AC που συνδέει την Κρήτη με την ηπειρωτική Ελλάδα και το σύστημά της μοντελοποιείται με ένα μόνο ζυγό στον οποίο συνδέεται το φορτίου του Συστήματος της Κρήτης.
- Κεφάλαιο 7: Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται μια σύνοψη και διατυπώνονται συμπεράσματα για το σύνολο της διπλωματικής. Τέλος αναφέρονται διάφορα ζητήματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική και προσφέρονται για περαιτέρω διερεύνηση και ανάλυση.

Κεφάλαιο 2: Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Ιστορική Αναδρομή

2.1.1 Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το πρώτο πλήρες ΣΗΕ κατασκευάστηκε από τον Thomas Edison στην Νέα Υόρκη το Σεπτέμβριο του 1882. Ήταν ένα σύστημα συνεχούς ρεύματος (DC), που αποτελούνταν από μια ατμοηλεκτρική γεννήτρια η οποία παρείχε ισχύ σε 59 καταναλωτές, σε μια περιοχή με ακτίνα περίπου 1,5 χλμ. Το φορτίο ήταν 400 λαμπτήρες πυράκτωσης των 83 W η κάθε μία [1]. Τα επόμενα παρόμοια συστήματα αναπτύχθηκαν στις περισσότερες μεγάλες πόλεις του κόσμου.

Επανάσταση στα ΣΗΕ αποτέλεσε η εισαγωγή του εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ) σε αυτά στις αρχές του 1880, με την παράλληλη ανάπτυξη των μετασχηματιστών (Μ/Σ) και των μηχανών ΕΡ. Η ανάπτυξη των πολυφασικών συστημάτων από το Nicola Tesla, αλλά και πολλές από τις εφευρέσεις του, έκαναν τα συστήματα ac (alternative current) ακόμα πιο ελκυστικά. Ορισμένες από αυτές αποτελούν την βάση των συστημάτων ac μέχρι και σήμερα.

Τελικά, μετά από έντονες διαμάχες τη δεκαετία του 1890 μεταξύ του Edison, που υποστήριζε το συνεχές ρεύμα, και του Westinghouse, που υποστήριζε τον εναλλασσόμενο, με την αλλαγή του αιώνα το σύστημα ac ήταν αυτό που τελικά υιοθετήθηκε από την βιομηχανία ηλεκτρικού ρεύματος [1]. Οι βασικοί λόγοι ήταν οι εξής:

- Με τη χρήση των Μ/Σ τα επίπεδα τάσης στα ας συστήματα μπορούσαν να μετασχηματιστούν εύκολα, προσφέροντας ευελιξία στο επίπεδο τάσης που μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή, μεταφορά και κατανάλωση. Ιδιαίτερη συμβολή είχαν οι Μ/Σ στη μείωση των απωλειών ενεργής ισχύος κατά τη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις.
- Οι κινητήρες ac ήταν πιο απλοί και φθηνοί από του κινητήρες dc.
- Οι γεννήτριες ac ήταν και αυτές σημαντικά πιο απλές από τις γεννήτριες dc.

Στην Ελλάδα η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ιδρύθηκε τον Αύγουστο του 1950. Τότε υπήρχαν ήδη μικρά ΣΗΕ ανήκαν σε ιδιώτες, δήμους ή κοινότητες, και τα οποία τα επόμενα χρόνια εξαγοράστηκαν από τη ΔΕΗ. Η τελευταία τέτοια εξαγορά ολοκληρώθηκε το 1968 [2].

Σήμερα, τη βάση του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς αποτελούν τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400kV, που μεταφέρουν τον ηλεκτρισμό από το ενεργειακό κέντρο παραγωγής της Δυτικής Μακεδονίας στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας. Άλλα βασικά στοιχεία του Συστήματος Μεταφοράς είναι:

- Εναέριες γραμμές μεταφοράς 400kV, 150kV και 66kV
- Υπόγειες και Υποβρύχιες Καλωδιακές Γραμμές 150kV και 400kV
- Υποσταθμοί 150/20kV

• Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (KYT) 400/250kV

Το Ελληνικό Σύστημα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το διασυνδεδεμένο Ευρωπαϊκό Σύστημα υπό το γενικότερο συντονισμό του ENTSO-E. Η παράλληλη λειτουργία του Ελληνικού Συστήματος με το Ευρωπαϊκό επιτυγχάνεται μέσω διασυνδετικών γραμμών μεταφοράς (Γ.Μ.), κυρίως 400 kV, με τα Συστήματα της Αλβανίας, της Βουλγαρίας, της Βόρειας Μακεδονίας και της Τουρκίας. Αξιοσημείωτη είναι επιπλέον, η διασύνδεση του Ελληνικού Συστήματος με την Ιταλία μέσω υποβρυχίου συνδέσμου συνεχούς ρεύματος τάσης 400 kV [3].

Το 2019, και σύμφωνα με τον ΑΔΜΗΕ, η εγκατεστημένη ισχύς στο Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) ανερχόταν σε 18,5 GW. Αυτά χωρίζονται ανά τεχνολογία ως εξής [4]:

- Σε Θερμικές Μονάδες αντιστοιχούν 9.319,3 MW. Δηλαδή το 50,5% του συνόλου της Εγκατεστημένης Ισχύος.
- Σε Υδροηλεκτρικές Μονάδες με ταμιευτήρα αντιστοιχούν 3.170,2 MW.
 Δηλαδή το 17,2% του συνόλου της Εγκατεστημένης Ισχύος.
- Σε ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ αντιστοιχούν 5.962,1 MW. Δηλαδή το 32,3% του συνόλου της Εγκατεστημένης Ισχύος.

2.2 Το Πρόβλημα Ευστάθειας ΣΗΕ

Σύμφωνα με το [1], «Η ευστάθεια ΣΗΕ είναι η ικανότητα του συστήματος, για μια δεδομένη αρχική συνθήκη λειτουργίας, να επανακτήσει μια κατάσταση λειτουργικής ισορροπίας μετά από μια φυσική διαταραχή, με τις περισσότερες μεταβλητές του συστήματος να παραμένουν εντός ορίων, ώστε σχεδόν ολόκληρο το σύστημα να παραμείνει άθικτο.»

Παραδοσιακά, το πρόβλημα της ευστάθειας ΣΗΕ, σχετίζεται με τη διατήρηση της σύγχρονης κατάστασης λειτουργίας του. Η αστάθεια μπορεί να εκδηλωθεί σε ένα ΣΗΕ με διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με τη διαμόρφωση και τη λειτουργική κατάσταση του συστήματος.

Καθώς τα ΣΗΕ βασίζονται σε σύγχρονες μηχανές για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, μια αναγκαία συνθήκη για την ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος είναι όλες οι σύγχρονες μηχανές να παραμένουν σε συγχρονισμό. Αυτή η πλευρά της ευστάθειας επηρεάζεται από τη δυναμική συμπεριφορά των γωνιών των δρομέων των σύγχρονων γεννητριών και από τις σχέσεις ισχύος-γωνίας.

Ωστόσο, αστάθεια μπορεί να εμφανιστεί και χωρίς απώλεια συγχρονισμού. Αυτό μπορεί να συμβεί σε περίπτωση στην περίπτωση της κατάρρευσης της τάσης φορτίου. Σε κάθε περίπτωση, επιθυμητή είναι η ευστάθεια και ο έλεγχος της τάσης.

Για την αξιολόγηση της ευστάθειας είναι απαραίτητη η μελέτη της συμπεριφοράς του ΣΗΕ, όταν αυτό υποβάλλεται σε μια μεταβατική διαταραχή. Η διαταραχή μπορεί να είναι είτε μεγάλη είτε μικρή, και το σύστημα πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι σε θέση να λειτουργεί ικανοποιητικά κάτω από αυτές τις συνθήκες και να τροφοδοτεί με επιτυχία το μέγιστο δυνατό φορτίο.

Τα τελευταία χρόνια, η σύσταση των ΣΗΕ έχει μεταβληθεί σημαντικά, κυρίως λόγω της αύξησης των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέονται μέσω ηλεκτρονικών ισχύος στο σύστημα. Οι πιο σημαντικές από αυτές τις τεχνολογίες είναι τεχνολογίες αξιοποίησης της αιολικής και ηλιακής ενέργειας, τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, διάφορα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας με τεχνολογία HVDC και φορτία με ηλεκτρονικά ισχύος [5].

Η προσθήκη αυτών των τεχνολογιών στα ΣΗΕ, έχει δύο κύριες συνέπειες: Την αλλαγή της δυναμικής συμπεριφοράς των ΣΗΕ λόγω της πιο σύνθετης και γρήγορης απόκρισης των τεχνολογιών βασισμένες στα ηλεκτρονικά ισχύος, αλλά και την αύξηση της πολυπλοκότητας τους.

2.3 Το Ενεργειακό Μείγμα

Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί κάθε φορά με έναν εκ των παρακάτω δύο τρόπων:

- Αξιοποιώντας την θερμότητα από την καύση καυσίμων.
- Αξιοποιώντας την ενέργεια φυσικών πόρων, όπως ο ήλιος, ο άνεμος και το νερό.

Αν και οι πρώτες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούσαν είτε λιγνίτη, είτε νερό, σταδιακά η σύσταση του ενεργειακού μείγματος μεταβλήθηκε. Σε αυτό συνέβαλαν διάφοροι παράγοντες συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογικών εξελίξεων, της διαθεσιμότητας καυσίμων, των οικονομικών συμφερόντων, της επιθυμίας για ένα πιο αξιόπιστο και ευέλικτο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Οι μακροχρόνιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που δημιουργούνται από την εκτεταμένη χρήση ορισμένων ορυκτών καυσίμων, οδήγησαν στην ανάγκη χάραξης κοινών περιβαλλοντικών πολιτικών σε παγκόσμιο επίπεδο μέσα από μια σειρά σημαντικών διεθνών συνεδριάσεων και συμφωνιών. Αυτές οι συναντήσεις οδήγησαν σε συμφωνίες που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με πιο βιώσιμο και οικολογικό τρόπο. Ορισμένες από τις πιο σημαντικές είναι οι παρακάτω:

- <u>Σύνοδος της Στοκχόλμης</u> (1972): Η πρώτη μεγάλη διεθνής συνδιάσκεψη για το περιβάλλον. Οδήγησε στην ίδρυση του Προγράμματος των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον (UNEP). Δεν εστίασε άμεσα στην ηλεκτρική ενέργεια, αλλά έθεσε τις βάσεις για περιβαλλοντική συνείδηση σε παγκόσμιο επίπεδο.
- Σύνοδος Κορυφής του Ρίο (1992): Υιοθετήθηκαν σημαντικά κείμενα, όπως η "Ατζέντα 21", τα οποία προωθούν τη βιώσιμη ανάπτυξη. Η ενέργεια αναφέρθηκε ως κρίσιμος τομέας, με συστάσεις για τη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα.
- <u>Πρωτόκολλο του Κιότο</u> (1997): Τα κράτη που υπέγραψαν δεσμεύτηκαν να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Παρόλο που το πρωτόκολλο δεν επικεντρώνεται ειδικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υποστηρίζει τη μετάβαση σε καθαρότερες μορφές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής και αιολικής ενέργειας.
- Σύνοδος του Παρισιού (2015): Η Συμφωνία των Παρισίων ήταν η πιο σημαντική απόφαση που ελήφθη για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Τα κράτη δεσμεύτηκαν να περιορίσουν την άνοδο της παγκόσμιας θερμοκρασίας στους 1,5-2 βαθμούς Κελσίου. Σε επίπεδο ενέργειας, η συμφωνία προωθεί τη μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), μείωση της χρήσης άνθρακα και την προώθηση της αποδοτικότητας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- <u>COP 26</u> (Γλασκώβη, 2021): Οι χώρες συμφώνησαν σε ενισχυμένες δεσμεύσεις για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και τη σταδιακή κατάργηση της χρήσης άνθρακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, δόθηκε έμφαση στην αύξηση των επενδύσεων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Σε όλες τις παραπάνω συνόδους οι βασικότερες αποφάσεις που λήφθηκαν αφορούσαν τη μεταστροφή προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την πλήρη απανθρακοποίηση της παραγωγής ενέργειας έως τα μέσα του αιώνα.

Όλα τα παραπάνω αποτυπώνονται και στα παρακάτω διαγράμματα όπου φαίνεται το μερίδιο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τους διάφορους τύπους καυσίμων/ πηγές ενέργειας στην Ελλάδα (Σχήμα 2.1), στην Ευρωπαϊκή Ένωση(Σχήμα 2.2), αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο(Σχήμα 2.3) [6].



Σχήμα 2.1:Η Παραγωγή ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα, ανά τεχνολογία.



Σχήμα 2.2:Η Παραγωγή ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ανά τεχνολογία.



Σχήμα 2.3:Η Παραγωγή ηλεκτρικής Ενέργειας στον Κόσμο, ανά τεχνολογία.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν αρκετά συμπεράσματα για τους τύπους καυσίμων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το 1985 έως και σήμερα.

Όσον αφορά την Ελλάδα (Σχήμα 2.1), παρατηρείται πως οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχουν μεταβληθεί δραματικά από το 1990. Τότε, το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας παράγονταν από το λιγνίτη, ενώ ακολουθούσαν το πετρέλαιο και τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Σήμερα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κυρίως το φυσικό αέριο, η αιολική και η ηλιακή ενέργειας. Αξιοσημείωτη είναι ακόμα και η τιμή της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αν και αυξανόταν σταθερά από το 1990 μέχρι το 2005, το 2023 είχε μια ενδιάμεση τιμή περί τις 50TWh.

Η Ευρώπη (Σχήμα 2.2) έχει μια σχετική σταθερότητα όσον αφορά τη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ωστόσο παρατηρείται μια σταθερή μείωση της χρήσης του λιγνίτη, του πετρελαίου και της πυρηνικής ενέργειας και αύξηση των ΑΠΕ.

Τέλος, σε παγκόσμιο επίπεδο (Σχήμα 2.3), η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει σχεδόν τριπλασιαστεί από το 1985 μέχρι σήμερα. Παρατηρείται αύξηση της χρήσης όλων των τύπων καυσίμου και τεχνολογιών, εκτός από το πετρέλαιο, του οποίου η χρήση έχει μειωθεί ακόμα και σε παγκόσμιο επίπεδο.

2.4 Απλοποίηση ΣΗΕ

Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι επιθυμητό κάθε φορά να χρησιμοποιείται το πλήρες μοντέλο του εκάστοτε συστήματος. Αυτό μπορεί να συμβαίνει είτε γιατί η πολυπλοκότητα του πλήρους συστήματος αυξάνει σημαντικά το χρόνο διενέργειας των προσομοιώσεων είτε γιατί το πλήρες μοντέλο είναι εμπιστευτικό. Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την απλοποίηση σύνθετων συστημάτων. Το ποια μέθοδος επιλέγεται κάθε φορά, εξαρτάται από τους είδους των μελετών που χρειάζεται να διενεργηθούν, αλλά και από τα ποια χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος χρειάζεται να διατηρηθούν.

Η πρώτη μέθοδος απλοποίησης κυκλωμάτων αναπτύχθηκε το 1883, και είναι το Θεώρημα του Thevenin. Το θεώρημα αυτό, δίνει τη δυνατότητα απλοποίησης πολύπλοκων γραμμικών κυκλωμάτων, σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα με μία πηγή τάσης και μία αντίσταση. Το θεώρημα του Thévenin και το δυικό του, το θεώρημα του Norton, χρησιμοποιούνται ευρέως για την απλοποίηση κυκλωμάτων και τη μελέτη τους στη μόνιμη κατάσταση.

Αργότερα, το 1949, ο J.B. Ward ανέπτυξε μια μέθοδο για την απλοποίηση μεγάλων σε μέγεθος και πολυπλοκότητα ΣΗΕ. Στόχος της μεθόδου Ward η δυνατότητα χρήσης των απλοποιημένων μοντέλων σε μελέτες ροής ισχύος. Η μέθοδος λειτουργεί απαλείφοντας τους λιγότερο σημαντικούς ζυγούς του συστήματος και αντικαθιστώντας τους με ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις [7].

Για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς μεγάλων και σύνθετων ΣΗΕ με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, υπάρχει πάντα μια διαμάχη μεταξύ της σύλληψης όσο το δυνατόν περισσότερης λεπτομέρειας στην προσομοίωση και της ολοκλήρωσής της σε εύλογο χρονικό διάστημα ώστε τα αποτελέσματα να είναι χρήσιμα. Η απόκτηση ενός μοντέλου ΣΗΕ μειωμένης τάξης για τη καταγραφή της δυναμικής του συμπεριφοράς, αποτελεί αντικείμενο έρευνας από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, με σημαντικότερο το έργο του Robin Podmore. Είναι αξιοσημείωτο ότι η αρχική διαδικασία που ανέπτυξε ο Podmore εξακολουθεί να χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα, αν και μερικοί από τους αλγόριθμους της διαδικασίας έχουν ενημερωθεί. Η μέθοδος αυτή, ονομάζεται μέθοδος της συνεκτικότητας (coherency method) ή μέθοδος των συνεκτικών ομάδων (method of coherent groups).

Αν και η μέθοδος των συνεκτικών ομάδων είναι η ευρέως πιο γνωστή μέθοδος απλοποίησης ΣΗΕ για τη διεξαγωγή δυναμικών μελετών, επιγραμματικά υπάρχουν και οι παρακάτω μέθοδοι:

- Συγχρονισμός (Synchrony)
- Ανάλυση ιδιαζουσών διαταραχών (Singular Perturbations Analysis (SPA))
- Ανάλυση ρυθμών (Modal Analysis (MA)), και
- Ταυτοποίηση συστήματος (Identification)

Αναλυτικά κάθε μέθοδος παρουσιάζεται στο [8].

Ορισμένα από τα λογισμικά προγράμματα που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ισοδύναμων κυκλωμάτων είναι το PowerFactory, το DYNRED και το PSS/E.

Κεφάλαιο 3: Η Απλοποίηση των ΣΗΕ και η Μέθοδος Συνεκτικότητας

3.1 Εισαγωγή στη Μέθοδο Συνεκτικότητας

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η μέθοδος της συνεκτικότητας ή των συνεκτικών ομάδων αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1970 από τον Robin Podmore.

Η συνεκτικότητα μιας ομάδας γεννητριών χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ομοιότητα των αποκρίσεων τους μετά από ορισμένες διαταραχές [9].

Αν και από τότε έχουν ορισμένοι από τους αλγόριθμους της διαδικασίας έχουν ενημερωθεί, η βασική ιδέα της διαδικασίας παραμένει ίδια. Καθώς το λογισμικό PowerFactory, που επιλέχθηκε για την απλοποίηση του ελληνικού Συστήματος, δεν παρέχει λεπτομέρειες για την ακριβή μεθοδολογία με βάση την οποία υλοποιεί την απλοποίηση, αναλύεται η διαδικασία με βάση όπως αυτή παρουσιάζεται από τον ίδιο τον Robin Podmore στο [10].

3.1.1 Γενικά

Οι πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας επενδύουν πολύ χρόνο στη διενέργεια μελετών ευστάθειας, για την αξιολόγηση της ικανότητας του ΣΗΕ να αντέχει σε μεγάλες διαταραχές. Μια τέτοια διαταραχή μπορεί να προκληθεί από ένα σφάλμα σε μια γραμμή μεταφοράς και ενδεχομένως να οδηγήσει σε απώλεια συγχρονισμού και σε διακοπές στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στην πλευρά του καταναλωτή. Η μελέτη πολλών σεναρίων για την εξέταση της μεταβατικής ευστάθειας (transient stability) των ΣΗΕ είναι αναγκαία σε:

- Μελέτες σχεδιασμού μεγάλου μέρους Συστήματος
- Μελέτες σχεδιασμού μικρού μέρους Συστήματος
- Μελέτες βραχυπρόθεσμης λειτουργίας του Συστήματος, και σε
- Μελέτες πραγματικού χρόνου

<u>Οι Μελέτες σχεδιασμού μεγάλου μέρους του Συστήματος</u>, μπορεί να απαιτούν λύσεις που περιλαμβάνουν διάφορους συνδυασμούς προτεινόμενων διαμορφώσεων μεταφοράς και γεννητριών.

<u>Οι Μελέτες σχεδιασμού μικρού μέρους του Συστήματος</u>, μπορεί να απαιτούν λύσεις για το συντονισμό των συστημάτων προστασίας και τον σχεδιασμό των συστημάτων ελέγχου.

<u>Οι Μελέτες βραχυπρόθεσμης λειτουργίας του Συστήματος</u>, μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των ασφαλών ορίων μεταφοράς.

<u>Οι Μελέτες πραγματικού χρόνου</u>, μπορεί να διαδραματίσουν υποστηρικτικό ρόλο, κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, στο διαχειριστή του Συστήματος.

Καθώς οι πιο σοβαρές διαταραχές μπορούν να λάβουν χώρα στις γραμμές σύνδεσης (tie-lines) γειτονικών Συστημάτων, είναι σημαντικό για τη μελέτες μεταβατικής

ευστάθειας, το μοντέλο που μελετάται να περιέχει όχι μόνο το μέρος του Συστήματος προς μελέτη, αλλά και τις γειτονικές περιοχές. Η μοντελοποίηση των γειτονικών περιοχών μπορεί να αποβεί αρκετά δύσκολη, καθώς αυξάνοντας την πολυπλοκότητα του συνολικού μοντέλου, αυξάνεται και ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση των μελετών.

3.1.2 Ορισμός του Προβλήματος

Για το σκοπό της ανάλυσης, το ΣΗΕ χωρίζεται σε δύο μέρη:

- Στην περιοχή μελέτης (study area), όπου η συμπεριφορά του συστήματος είναι ιδιαίτερης σημασίας και όπου όλα τα σφάλματα και οι διαταραχές θεωρείται ότι θα συμβούν.
- Στην εξωτερική περιοχή (external area), της οποία η λεπτομερής αναπαράσταση δεν είναι αναγκαία.

Η περιοχή μελέτης μπορεί να οριστεί με διάφορους τρόπους και οι ζυγοί της δεν χρειάζεται να είναι άμεσα συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Για καλύτερη κατανόηση δίνονται δύο παραδείγματα για το τι μπορεί να θεωρηθεί ως περιοχή μελέτης:

- Ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και το σύστημα μεταφοράς γύρω από αυτόν μπορούν να θεωρηθούν ως μία περιοχή μελέτης για να αναλυθεί η ευστάθεια του σταθμού σε σχέση με το υπόλοιπο σύστημα.
- Ένα μεγάλο μέρος του Συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και πολλές σημαντικές γεννήτριες του Συστήματος μπορούν να θεωρηθούν ως μια περιοχή μελέτης για να αξιολογηθεί η ευστάθεια μιας ολόκληρης περιοχής ενός διασυνδεδεμένου Συστήματος.

Ακολουθούν ορισμένες απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται από κάθε λογισμικό που επιτελεί το σκοπό της απλοποίησης ΣΗΕ:

- Η μέθοδος απλοποίησης πρέπει να επιτυγχάνει μείωση του μεγέθους του δυναμικού μοντέλου του συστήματος, χωρίς να οδηγεί σε σημαντικές διαφορές μεταξύ των προσομοιώσεων του ισοδύναμου και του πλήρους συστήματος.
- Τα ισοδύναμα μοντέλα θα πρέπει να υπολογίζονται με αποδοτικό τρόπο.
 Ιδανικά, η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για τον υπολογισμό ενός απλοποιημένου μοντέλου θα πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή που απαιτείται για μια προσομοίωση μεταβατικής ευστάθειας στο πλήρες σύστημα.

3.1.3 Επισκόπηση της Διαδικασίας

Η συνολική διαδικασία για τη δημιουργία απλοποιημένων ισοδύναμων συστημάτων σύμφωνα με τη μέθοδο των συνεκτικών ομάδων, μπορεί να χωριστεί σε 4 βασικά βήματα:

- 1. Αναγνώριση των συνεκτικών ομάδων γεννητριών, κατάλληλες για τη μελέτη σφαλμάτων στην περιοχή μελέτης.
- 2. Ελάττωση των ζυγών γεννητριών.

- 3. Ελάττωση των ζυγών φορτίου.
- 4. Δυναμική συνάθροιση των μοντέλων των μονάδων παραγωγής.

Για την επεξήγηση της διαδικασίας, δίνεται ένα Παράδειγμα χρησιμοποιώντας το σύστημα 39-Ζυγών του ΙΕΕΕ, που φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Το σύστημα υπό μελέτη (study system), αλλά και η εξωτερικό σύστημα (external system) ορίζονται όπως φαίνεται στο Σχήμα. Έστω, ότι ενδιαφερόμαστε για ένα σφάλμα στο Ζυγό 29 και οι γεννήτριες 2, 3, 4, 5, 6 και 7 είναι συνεκτικές (coherent) για αυτό το συγκεκριμένο σφάλμα. Κατά την ελάττωση του πλήθους των ζυγών των γεννητριών, όλοι οι τερματικοί Ζυγοί των παραπάνω γεννητριών αντικαθίστανται από έναν ισοδύναμο Ζυγό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Στη συνέχεια, συγχωνεύονται και οι Ζυγοί φορτίου και προκύπτει το σύστημα στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.1:Η περιοχή μελέτης στο Σύστημα 39-Ζυγών.

Μέχρι στιγμής, το μέγεθος του συστήματος έχει μειωθεί, αλλά ο αριθμός των γεννητριών έχει παραμείνει σταθερός. Κατά τη δυναμική συνάθροιση των μοντέλων των μονάδων παραγωγής, κάθε ομάδα παράλληλων γεννητριών αντικαθίσταται με μία ισοδύναμη μονάδα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Υπάρχει ωστόσο η πιθανότητα οι ισοδύναμες μονάδες που δημιουργούνται να είναι περισσότερες από μία, ώστε να αποφευχθεί ο συνδυασμός μονάδων με αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά. Π.χ. Θερμικές και υδροηλεκτρικές μονάδες.



Σχήμα 3.2:Η Διαμόρφωση του συστήματος μετά από την απαλοιφή των Ζυγών των γεννητριών, με βάση τη συνεκτικότητά τους.

Το πρόβλημα της μείωσης του μεγέθους του Συστήματος, το οποίο περιγράφεται από αλγεβρικές εξισώσεις, δε συνδέεται με το πρόβλημα μείωσης της τάξης του δυναμικού Συστήματος μέσα από το συνδυασμό των μοντέλων των γεννητριών. Αυτή η ανεξαρτησία είναι το κλειδί για την ανάπτυξη μιας διαδικασίας που είναι αποτελεσματική και εφαρμόσιμη σε ένα μεγάλο εύρος Συστημάτων.



την Γκαουσιανή εξάλειψη των Ζυγών φορτίου.



Σχήμα 3.4: Η Διαμόρφωση του συστήματος μετά από τον δυναμικό συνδυασμό των μοντέλων των γεννητριών.

3.2 Εντοπισμός των Συνεκτικών Ομάδων Γεννητριών (Identification of Coherent Generators)

Δύο Ζυγοί γεννητριών ονομάζονται συνεκτικοί (coherent), αν η διαφορά των γωνιών τους είναι συνεχώς μέσα στο όριο που έχει οριστεί, για σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Σημασία έχει η συνεκτικότητα τόσο των εσωτερικών Ζυγών, όσο και των τερματικών Ζυγών της γεννήτριας. Η συνεκτικότητα των τερματικών Ζυγών τως γεννητριών, θέτει τη βάση για τη διαδικασία της απλοποίησης του Συστήματος. Η συνεκτικότητα των εσωτερικών Ζυγών των γεννητριών, λαμβάνεται υπόψη στο στάδιο της δυναμικής συνάθροισης των μοντέλων των μονάδων παραγωγής. Οι συνεκτικές ομάδες γεννητριών μπορεί να οριστούν είτε για ένα μόνο σφάλμα, είτε για πολλά σφάλματα που λαμβάνουν χώρα σε μια περιοχή. Στην συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία ταυτοποίησης της συνεκτικότητας για ένα σφάλμα.

Η μέθοδος προσδιορισμού των συνεκτικών ομάδων γεννητριών, βασίζεται στη δημιουργία ενός απλοποιημένου μοντέλου του ΣΗΕ, στο οποίο ισχύουν οι παρακάτω υποθέσεις:

- Οι συνεκτικές ομάδες των γεννητριών είναι ανεξάρτητες από το μέγεθος της διαταραχής. Επομένως, η συνεκτικότητα μπορεί να καθοριστεί υποθέτοντας μια γραμμικοποιημένη μορφή του Συστήματος.
- Οι συνεκτικές ομάδες των γεννητριών είναι ανεξάρτητες από τη λεπτομέρεια των μοντέλων των μονάδων παραγωγής. Συνεπώς, θεωρείται ένα μοντέλο κλασικής σύγχρονης γεννήτριας, ενώ το σύστημα διέγερσης (excitation system) και το σύστημα ρυθμιστή στροφών-στροβίλου (turbine-governor system) αγνοούνται.
- Το αποτέλεσμα ενός σφάλματος μπορεί να αναπαραχθεί αν στο σύστημα πριν το σφάλμα, μεταβληθούν οι μηχανικές δυνάμεις με τέτοιο τρόπο ώστε να

επιτευχθούν οι ίδιες δυνάμεις επιτάχυνσης που θα υπήρχαν στο σύστημα κατά τη διάρκεια του σφάλματος.

Η πρώτη υπόθεση μπορεί να επιβεβαιωθεί θεωρώντας ένα σφάλμα σε ένα συγκεκριμένο Ζυγό, και παρατηρώντας πως η συνεκτικότητα των γεννητριών δε θα μεταβληθεί σημαντικά σε περίπτωση που ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος αυξηθεί.

Η δεύτερη υπόθεση βασίζεται στην παρατήρηση πως αν και η ποσότητα της λεπτομέρειας στη μοντελοποίηση των γεννητριών έχει μεγάλη επιρροή στις καμπύλες ταλάντωσής τους (swing curves), ιδιαίτερα στις αποσβέσεις (damping), δεν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό τα πιο βασικά χαρακτηριστικά τους, όπως οι φυσικές συχνότητες (natural frequencies) και οι ρυθμοί (mode shapes).

Η τρίτη υπόθεση αναγνωρίζει πως οι δυνάμεις επιτάχυνσης των γεννητριών είναι σχεδόν σταθερές κατά τη διάρκεια σφαλμάτων με τυπικούς χρόνους εκκαθάρισης.

Έχοντας ως βάση τις παραπάνω υποθέσεις, οι ομάδες των συνεκτικών γεννητριών μπορούν να εντοπιστούν, παράγοντας τις καμπύλες γωνιών ισχύος χρησιμοποιώντας μια προσομοίωση γραμμικού χρονικού βήματος, των εξισώσεων γωνιών ισχύος. Με τη χρήση του κανόνα ολοκλήρωσης τραπεζοειδούς [11], μπορούν να χρησιμοποιηθούν βήματα του 0.1 s. Η λύση είναι μη-επαναληπτική, επομένως ο χρόνος επίλυσης μπορεί να είναι 10-50 φορές πιο γρήγορος συγκριτικά με το χρόνο επίλυσης της πλήρης μεταβατικής ευστάθειας. Αν και μπορούν να αναπτυχθούν πιο σύνθετες μέθοδοι από αυτή, δύσκολα μπορούν να ξεπεράσουν την επίδοση της μεθόδου γραμμικής προσομοίωσης.

Οι εξισώσεις για την κίνηση μια σύγχρονης γεννήτριας είναι:

$$M_i \frac{d\Delta\omega_i}{dt} = \Delta P_{Mi} - \Delta P_{Gi} - D_i \Delta\omega_i \tag{3.1}$$

$$\frac{d\Delta\delta_i}{dt} = 2\pi f_0 \Delta\omega_i \tag{3.2}$$

Όπου

- *i* ο δείκτης για τη γεννήτρια *i*
- Το Δ υποδηλώνει ότι αυτή η μεταβλητή αντιπροσωπεύει μια απόκλιση από ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας στη μόνιμη κατάσταση
- *M_i* η σταθερά αδράνειας (α.μ.) (pu)
- Δω_i η απόκλιση ταχύτητας (α.μ.)
- Δδ_i η απόκλιση της γωνίας του δρομέα (radians)
- *D_i* η σταθερά απόσβεσης (α.μ.)
- *f*₀ η σύγχρονη συχνότητα (Hz)
- Δ*P_{Mi}* η μεταβολή στη μηχανική ισχύ εισόδου (α.μ.)
- ΔP_{Gi} η μεταβολή στην ηλεκτρική ισχύ εξόδου (α.μ.)
Η γραμμικοποιημένη έκφραση της ροής ισχύος, που συσχετίζει την αλλαγή στην ενεργή και άεργη ισχύ παραγωγής και φορτίου με τις τάσεις και τις γωνίες στους ζυγούς γεννητριών και φορτίου δίνεται από:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{G} \\ \Delta P_{L} \\ \Delta Q_{G} \\ \Delta Q_{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P_{G}/\partial \delta & \partial P_{G}/\partial \theta & \partial P_{G}/\partial E & \partial P_{G}/\partial V \\ \partial P_{L}/\partial \delta & \partial P_{L}/\partial \theta & \partial P_{L}/\partial E & \partial P_{L}/\partial V \\ \partial Q_{G}/\partial \delta & \partial Q_{G}/\partial \theta & \partial Q_{G}/\partial E & \partial Q_{G}/\partial V \\ \partial Q_{L}/\partial \delta & \partial Q_{L}/\partial \theta & \partial Q_{L}/\partial E & \partial Q_{L}/\partial V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \theta \\ \Delta E \\ \Delta V \end{bmatrix}$$
(3.3)

Όπου

- *P_G*, *Q_G* οι εγχύσεις ενεργού και άεργου ισχύος (α.μ.)(pu) στους εσωτερικούς ζυγούς των γεννητριών αντίστοιχα
- *P*_L, *Q*_L η ενεργός και η άεργος ισχύς (α.μ.) των φορτίων στου ζυγούς φορτίου
- Ε, δ τα μέτρα τάσης (α.μ.) και οι γωνίες (ακτίνια) στους εσωτερικούς ζυγούς των γεννητριών
- *V*, *θ* τα μέτρα τάσης (α.μ.) και οι γωνίες (ακτίνια) στους ζυγούς φορτίου

Η εξάρτηση της ισχύος των φορτίων από την τάση δηλώνεται στους όρους $\partial P_L/\partial V$ και $\partial Q_L/\partial V$, και οι όροι ΔP_L και ΔQ_L είναι συνήθως μηδενικοί. Ωστόσο, μπορεί αυτοί να λάβουν κάποια τιμή σε περίπτωση μοντελοποίησης μιας διαταραχής όπως η απόρριψη φορτίου.

Η εξίσωση (3.3) μπορεί να απλοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη την απόζευξη που υπάρχει μεταξύ των ροών ενεργού και άεργου ισχύος σε ένα σύστημα μεταφοράς με υψηλές τιμές λόγου X/R [12]. Οι ροές ενεργού ισχύος εξαρτώνται κυρίως από τις γωνίες τάσης και, ως πρώτη προσέγγιση, η επίδραση των μεταβολών στο μέτρο της τάσης στους ζυγούς φορτίου μπορεί να παραλειφθεί θέτοντας τους όρους $\partial P_G/\partial V$ και $\partial P_L/\partial V$ ίσους με το μηδέν. Η τάση πίσω από τη μεταβατική αντίδραση της γεννήτριας παραμένει σταθερή, επομένως $\Delta E = 0$.

Η εξίσωση (3.3) απλοποιείται άρα σε:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_G \\ \Delta P_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P_G / \partial \delta & \partial P_G / \partial \theta \\ \partial P_L / \partial \delta & \partial P_L / \partial \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \theta \end{bmatrix}$$
(3.4)

Για ευκολία, η (3.4) ξαναγράφεται με τον παρακάτω τρόπο:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_G \\ \Delta P_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{GG} & H_{GL} \\ H_{LG} & H_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \vartheta \end{bmatrix}$$
(3.5)

Οι μερικές παράγωγοι στην εξίσωση (3.4) υπολογίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιώντας τις τάσεις και τις γωνίες στο σημείο λειτουργίας μόνιμης κατάστασης πριν από τη βλάβη. Για περαιτέρω απλοποίηση, είναι δυνατόν να υποτεθεί ένα επίπεδο προφίλ τάσης με μοναδιαίες τιμές πλάτους και μηδενικές τιμές γωνιών.

Το απλοποιημένο γραμμικό μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί για τη μοντελοποίηση διαφόρων διαταραχών του ΣΗΕ. Η ηλεκτρική ισχύς εξόδου των μονάδων παραγωγής κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος υπολογίζεται λύνοντας τις εξισώσεις του

συστήματος κατά τη βλάβη, με τις μεταβατικές τάσεις της γεννήτριας να παραμένουν σταθερές στις τιμές πριν από τη βλάβη. Για τυπικούς χρόνους εκκαθάρισης σφάλματος, οι σχετικές γωνίες του δρομέα δεν μεταβάλλονται περισσότερο από μερικές μοίρες, και η επιταχυνόμενη ισχύς της κάθε γεννήτριας παραμένει περίπου σταθερή κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Αυτή η χαρακτηριστική απόκριση επιτρέπει την πιστή αναπαραγωγή των επιδράσεων της κατάστασης του συστήματος κατά το σφάλμα, λαμβάνοντας υπόψη ένα δίκτυο χωρίς το σφάλμα και αυξάνοντας τη μηχανική ισχύ των γεννητριών κατά την επιταχυνόμενη ισχύ για χρόνο ίσο με τον χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος.

Μια διαταραχή απόρριψης φορτίου σε ζυγό μπορεί να μοντελοποιηθεί εισάγοντας βηματικές αλλαγές στις μεταβλητές ΔP_L και ΔQ_L για τον επιλεγμένο ζυγό την κατάλληλη χρονική στιγμή. Η αποσύνδεση μιας μονάδας παραγωγής μπορεί επίσης να μοντελοποιηθεί εισάγοντας βηματικές αλλαγές στις μεταβλητές ΔP_L και ΔQ_L για τον τερματικό ζυγό της γεννήτριας. Σε αυτή την περίπτωση, ο εσωτερικός ζυγός της γεννήτριας και η μεταβατική αντίδραση δεν περιλαμβάνονται στη διαμόρφωση του Ιακωβιανού Πίνακα (Jacobian Matrix).

Η μοντελοποίηση των αποσυνδέσεων των γραμμών απεικονίζεται θεωρώντας το ενδεικτικό σύστημα που φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Το Σχήμα 3.5α δείχνει την κατάσταση πριν από τη βλάβη. Το Σχήμα 3.5β δείχνει μια υποθετική κατάσταση δικτύου στην οποία η γραμμή από τον Ζυγό 2 στον Ζυγό 3 έχει αφαιρεθεί, αλλά έχουν εισαχθεί εγχύσεις ίσες με τις αρχικές ροές της γραμμής, έτσι ώστε οι τάσεις στους ζυγούς να μην αλλάξουν. Αυτή η υποθετική κατάσταση μόνιμης λειτουργίας χρησιμοποιείται ως το σημείο αναφοράς για τη γραμμικοποίηση των εξισώσεων του συστήματος. Η επίδραση της αφαίρεσης της γραμμής στη συνέχεια μοντελοποιείται εισάγοντας αλλαγές φορτίου, έτσι ώστε οι ισοδύναμες εγχύσεις στους Ζυγούς 2 και 3 να μηδενιστούν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5γ.

Η τραπεζοειδής ολοκλήρωση [11] εφαρμόζεται για την απόκτηση μιας λύσης στο πεδίο του χρόνου για τις γραμμικοποιημένες εξισώσεις ταλάντωσης (swing equations). Ο αλγόριθμος τραπεζοειδούς ολοκλήρωσης είναι ιδανικός για αυτήν την εφαρμογή, διότι δεν απαιτείται εξαιρετικά ακριβής λύση και, καθώς η μέθοδος είναι αριθμητικά σταθερή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγάλα χρονικά βήματα. Επίσης, επιτυγχάνεται μια άμεση, μη επαναληπτική λύση σε κάθε χρονικό βήμα, καθώς το σύστημα των εξισώσεων είναι γραμμικό. Ο συνδυασμός αυτών των δύο παραγόντων επιτρέπει την ανάπτυξη ενός πολύ αποδοτικού αλγόριθμου. Με εφαρμογή του κανόνα τραπεζοειδούς ολοκλήρωσης στις εξισώσεις (3.1) και (3.2) προκύπτει:

$$M_{i}\Delta\omega_{i}(t) = M_{i}\Delta\omega_{i}(t-\Delta t) - (\Delta t/2)D_{i}(\Delta\omega_{i}(t) + \Delta\omega_{i}(t-\Delta t)) - (\Delta t/2)(\Delta P_{Gi}(t) + (\Delta P_{Gi}(t-\Delta t)) + \Delta t\Delta P_{Mi}(t)$$
(3.6)

$$\Delta \delta_i(t) = \Delta \delta_i(t - \Delta t) + (\Delta t/2)2\pi f_0 \left(\Delta \omega_i(t) + \Delta \omega_i(t - \Delta t) \right)$$
(3.7)



Σχήμα 3.5: Απεικόνιση της αντιμετώπισης των αποσυνδέσεων γραμμών. α) Σύστημα πριν το σφάλμα. β) Υποθετικό σύστημα. γ) Σύστημα μετά το σφάλμα.

Οι μεταβλητές $\Delta\omega$, $\Delta\delta$ και ΔP_G θεωρείται ότι μεταβάλλονται με γραμμικό τρόπο κατά το διάστημα $t - \Delta t$ έως t. Για να διευκολυνθεί η μοντελοποίηση των διαταραχών, οι μεταβλητές εισόδου $\Delta P_M(t)$ και $\Delta P_L(t)$ θεωρείται ότι μεταβάλλονται βηματικά. Η τιμή της $\Delta P_M(t)$ και της $\Delta P_L(t)$ ορίζεται σταθερή από $t - \Delta t$ έως t. Οι εξισώσεις (3.6) και (3.7) λύνονται ταυτόχρονα με την (3.5) σε κάθε χρονικό βήμα ολοκλήρωσης για τον υπολογισμό των μεταβλητές τη χρονική στιγμή t, με βάση τις μεταβλητές τη χρονική στιγμή $t - \Delta t$.

Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζεται αναλυτικά ο αλγόριθμος γραμμικής προσομοίωσης χρόνου, για την εύρεση των καμπυλών ταλάντωσης.

3.2.1 Ο Αλγόριθμος Γραμμικής Προσομοίωσης Χρόνου

Βήμα 1: Αρχικοποίηση των $\Delta\delta(0)$, $\Delta\omega(0)$ και $\Delta P_G(0)$.

Βήμα 2: Αύξηση του χρόνου από $t - \Delta t$ σε t.

Βήμα 3: Ορισμός των $\Delta P_M(t)$ και $\Delta P_L(t)$ σύμφωνα με τη διαταραχή που μοντελοποιείται.

Βήμα 4: Υπολογισμός των παρακάτω μεταβλητών για κάθε μονάδα παραγωγής χρησιμοποιώντας:

$$A_{i}(t - \Delta_{t}) = \left(1 - \frac{D_{i}\Delta t}{2M_{i}}\right) \Delta \omega_{i}(t - \Delta t) - \frac{\Delta t}{2M_{i}} \Delta P_{G_{i}}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{M_{i}} \Delta P_{M_{i}}(t) \alpha$$

$$(3.8)$$

$$B_i(t - \Delta_t) = \pi f_0 \Delta t \Delta \omega_i(t - \Delta t) + \Delta \delta_i(t - \Delta t)$$
(3.9)

$$C_i(t - \Delta_t) = \frac{2M_i}{\Delta t} A_i(t - \Delta t) - \frac{2M_i}{\Delta t^2 \pi f_0} \left(1 + \frac{D_i \Delta t}{2M_i}\right) B_i(t - \Delta_t)$$
(3.10)

Βήμα 5: Επίλυση της παρακάτω εξίσωσης πίνακα:

$$\begin{bmatrix} \Delta C(t - \Delta t) \\ \Delta P_L(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H'_{GG} & H_{GL} \\ H_{LG} & H_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta(t) \\ \Delta \vartheta(t) \end{bmatrix}$$
(3.11)

για τις νέες γωνίες τάσης $\Delta \vartheta(t)$ και $\Delta \delta(t)$, όπου η μήτρα H'_{GG} είναι ο πίνακας H_{GG} με την προσθήκη του

$$\frac{2M_i}{\Delta t^2 \pi f_0} \left(1 + \frac{D_i \Delta t}{2M_i} \right) \tag{3.12}$$

στα διαγώνια στοιχεία του.

Βήμα 6: Υπολογισμός της νέας ισχύος της γεννήτριας:

$$\Delta P_{G_i}(t) = \frac{2M_i}{\Delta t} A_i(t - \Delta t) - \frac{2M_i}{\Delta t^2 \pi f_0} \left(1 + \frac{D_i \Delta t}{2M_i}\right) \left(\Delta \delta_i(t) - B_i(t - \Delta_t)\right) \quad (3.13)$$

Βήμα 7: Υπολογισμός της νέας ταχύτητας της γεννήτριας χρησιμοποιώντας την σχέση (3.9) ως:

$$\Delta\omega_i(t) = -\frac{\Delta\delta_i(t) - B_i(t - \Delta_t)}{\pi f_0 \Delta t}$$
(3.14)

Βήμα 8: Τερματισμός αν ο χρόνος t υπερβαίνει την καθορισμένη τιμή διαφορετικά, επιστροφή στο Βήμα 2.

Τέλος Αλγορίθμου

Ο πίνακας του Βήματος 5 είναι σταθερός και έχει την ίδια αραιή συμμετρική δομή με την Ιακωβιανή μήτρα γωνίας ισχύος. Η μόνη του διαφορά του με την Ιακωβιανή μήτρα γωνίας ισχύος, είναι οι διαγώνιοι όροι του για τους εσωτερικούς ζυγούς των γεννητριών. Οι τριγωνικοί παράγοντες της μήτρας στο Βήμα 5 προϋπολογίζονται και χρησιμοποιούνται σε κάθε χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης.

Οι φυσικές συχνότητες των ταλαντώσεων της γωνίας του δρομέα κυμαίνονται στην περιοχή 0.25–2.0 Hz. Ένα χρονικό βήμα ολοκλήρωσης 0.1 s είναι αρκετά ακριβές για αυτό το εύρος συχνοτήτων, και σε ορισμένες περιπτώσεις, και το 0.2 s είναι ικανοποιητικό.

3.2.2 Αλγόριθμος Ομαδοποίησης Γεννητριών

Ένας αλγόριθμος ομαδοποίησης χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των προσεγγιστικών καμπυλών ταλάντωσης που παράγονται από τη γραμμική προσομοίωση, ώστε να καθοριστούν οι συνεκτικές ομάδες των γεννητριών. Ο αλγόριθμος ομαδοποίησης μπορεί να εφαρμοστεί είτε στις καμπύλες ταλάντωσης της εσωτερικής τάσης της γεννήτριας είτε στις καμπύλες ταλάντωσης της τάσης του τερματικού ζυγού της. Αρχικά, ο αλγόριθμος ομαδοποίησης εφαρμόζεται στις γωνίες τάσης των τερματικών ζυγών. Οι ομάδες συνεκτικών τερματικών ζυγών που προκύπτουν αποθηκεύονται για χρήση από το πρόγραμμα ελάττωσης (reduction) του συστήματος. Στη συνέχεια, γίνεται ένας επιπλέον έλεγχος για τη συνεκτικότητα των τάσεων των εσωτερικών ζυγών των γεννητριών, προκειμένου να προσδιοριστεί αν όλες οι γεννήτριες μέσα σε κάθε ομάδα πρέπει να συνδυαστούν.

Ο αλγόριθμος ομαδοποίησης ελαχιστοποιεί τον αριθμό των συγκρίσεων των καμπυλών λαμβάνοντας υπόψη ότι η συνεκτικότητα των γεννητριών είναι μια μεταβατική διαδικασία δηλαδή, αν η Μονάδα Α είναι συνεκτική με τη Μονάδα Γ, και η Μονάδα Β είναι συνεκτική με τη Μονάδα Γ. Επομένως, προκύπτει ότι οι Μονάδες Α και Β είναι συνεκτικές. Σε κάθε ομάδα, ορίζεται μια γεννήτρια αναφοράς και οι άλλες γεννήτριες συγκρίνονται πάντα με αυτήν για να προσδιοριστεί αν πρέπει ή όχι να ανήκουν στην ίδια ομάδα. Η πρώτη γεννήτρια ορίζεται αυθαίρετα ως η μονάδα αναφοράς της πρώτης ομάδα. Οι υπόλοιπες γεννήτριες αξιολογούνται διαδοχικά, με δύο πιθανά αποτελέσματα: είτε η μονάδα συνδυάζεται με μια υπάρχουσα ομάδα με αυτή τη μονάδα ως μονάδα αναφοράς.

Το κριτήριο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του αν μια μονάδα πρέπει να προστεθεί σε μια υπάρχουσα ομάδα είναι:

$$|\Delta\theta_i(t) - \Delta\theta_r(t)| < \varepsilon \tag{3.15}$$

για όλα τα δείγματα του t, όπου:

- ε είναι η καθορισμένη ανοχή σε μοίρες
- *i* είναι ο δείκτης για τη γεννήτρια που ομαδοποιείται
- *r* είναι ο δείκτης για τη γεννήτρια αναφοράς της υπό εξέταση ομάδας.

3.3 Ελάττωση των Ζυγών των Γεννητριών

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η διαδικασία ελάττωσης του πλήθους των ζυγών των γεννητριών ως μια σειρά επεμβάσεων στα φυσικά στοιχεία του δικτύου. Αυτή η φυσική ερμηνεία της διαδικασίας χρησιμοποιείται ως βάση για την ανάπτυξη ενός αποδοτικού αλγόριθμου. Είναι επίσης χρήσιμη για την κατανόηση του πώς το ισοδύναμο μοντέλο θα πρέπει να αντιδρά σε μια προσομοίωση μεταβατικής ευστάθειας.

Η διαδικασία περιλαμβάνει τέσσερα βασικά βήματα. Όλα τα βήματα περιγράφονται λεπτομερώς στη συνέχεια. Το παράδειγμα συστήματος στο Σχήμα 3.6 χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της διαδικασίας. Υποθέτουμε ότι οι ζυγοί των γεννητριών 1, 2 και 3 έχουν προσδιοριστεί ως συνεκτικοί και θα αντικατασταθούν από έναν μόνο ισοδύναμο Ζυγό, τον Ζυγό 4.



Σχήμα 3.6: Διαμόρφωση συνεκτικών γεννητριών στο αρχικό σύστημα.

Βήμα 1: Η τάση V_t στον ισοδύναμο ζυγό ορίζεται. Επιλέγεται είτε η μέση τάση της ομάδας είτε η τάση ενός μεμονωμένου ζυγού. Κάθε τερματικός ζυγός συνδέεται μέσω ενός ιδανικού μετασχηματιστή με μιγαδικό λόγο στροφών στον ισοδύναμο ζυγό. Ο λόγος στροφών κατευθύνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7 και υπολογίζεται ως: $\bar{a}_k = V_k/V_t$, όπου V_k είναι η τάση στον ζυγό k.

Όταν υπάρχει συνεκτικότητα, ο λόγος \bar{a}_k είναι σταθερός για κάθε ζυγό στην ομάδα και δεν υπάρχει ροή ισχύος μέσα από τους μετασχηματιστές φάσης. Συνεπώς, η προσθήκη των μετασχηματιστών φάσης δεν θα έχει καμία επίδραση στην απόκριση των τάσεων και των ρευμάτων του δικτύου υπό αυτές τις συνθήκες. Η κατάσταση που περιγράφεται είναι ανάλογη με την ευρέως γνωστή μέθοδο απλοποίησης των δικτύων συνεχούς ρεύματος, όπου εισάγεται ένα βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο κόμβων που έχουν πάντα την ίδια DC τάση (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.7: Οι ζυγοί των συνεκτικών γεννητριών συνδέονται σε έναν ισοδύναμο ζυγό μέσω ιδανικών μετασχηματιστών.



Σχήμα 3.8: Η διακλάδωση μεταξύ των συνεκτικών ζυγών 2 και 3 αντικαθίσταται από ισοδύναμες εγκάρσιες αγωγιμότητες στους ζυγούς 2 και 3.

Βήμα 2: Οι τερματικοί ζυγοί της γεννήτριας, συνήθως, συνδέονται ακτινικά μέσω ενός μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης με το υπόλοιπο δίκτυο. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, ο ζυγός χαμηλής τάσης μπορεί να έχει αφαιρεθεί συνδυάζοντας την αντίδραση του μετασχηματιστή με την εσωτερική αντίδραση της γεννήτριας. Σε αυτήν την περίπτωση, αρκετοί μη ακτινικοί ζυγοί μπορεί να περιλαμβάνονται στη συνεκτική ομάδα γεννητριών και να συνδέονται μέσω ενός κοινού κλάδου (π.χ., ο κλάδος μεταξύ των Ζυγών 2 και 3 στο Σχήμα 3.5b). Ο σκοπός του δεύτερου βήματος είναι να εντοπίσει αυτήν την κατάσταση και να αφαιρέσει αυτόν τον κοινό κλάδο, αντικαθιστώντας τον με ισοδύναμες εγκάρσιες αγωγιμότητες. Για να εξηγηθεί αυτό, θεωρούμε τη ροή του ρεύματος στον κλάδο μεταξύ των Ζυγών 2 και 3:

$$I_{23} = (V_2 - V_3)Y_{23}$$

Επειδή ο λόγος V_2/V_3 είναι σταθερός, το ρεύμα μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική συνάρτηση είτε του V_2 είτε του V_3 . Η επίδραση του κλάδου μπορεί έτσι να αντικατασταθεί από μια εγκάρσια αγωγιμότητα $(1 - V_3/V_2)Y_{23}$ στο Ζυγό 2 και μια εγκάρσια αγωγιμότητα $(1 - V_2/V_3)Y_{23}$ στο Ζυγό 2.

Βήμα 3: Η παραγωγή, το φορτίο και οι εγκάρσιες αγωγιμότητες στους συνεκτικούς ζυγούς μεταφέρονται και αθροίζονται στον ισοδύναμο ζυγό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Η παραγωγή και το φορτίο δεν τροποποιούνται κατά τη μεταφορά. Η εγκάρσια αγωγιμότητα μεταβάλλεται με κατάλληλη κλίμακα ώστε να ληφθεί υπόψη ο μηονομαστικός λόγος τάσης του ιδανικού μετασχηματιστή. Αν χρησιμοποιείται μη γραμμική αναπαράσταση του φορτίου, τότε τα τμήματα του φορτίου με σταθερή ισχύ (MVA), σταθερό ρεύμα και σταθερή αντίσταση μεταφέρονται μεμονωμένα και παραμένουν χωριστά.



Σχήμα 3.9: Γεννήτριες, φορτία και εγκάρσιες αγωγιμότητες μεταφέρονται από τους αρχικούς στον ισοδύναμο ζυγό.

Βήμα 4: Οι αρχικοί συνεκτικοί ζυγοί καταργούνται (απαλείφονται) με το σειριακό συνδυασμό του αρχικού Ζυγού και του ιδανικού μετασχηματιστή (*Σχήμα 3.10*). Εάν υπάρχουν πολλοί αρχικοί κλάδοι που συνδέονται με τον καταργημένο ζυγό (όπως για τον Ζυγό 1), ο ιδανικός μετασχηματιστής συγχωνεύεται με καθέναν από αυτούς.



Σχήμα 3.10: Οι αρχικοί τερματικοί ζυγοί των γεννητριών απαλείφονται.

Η διαδικασία απλοποίησης επηρεάζει μόνο τους κλάδους που συνδέονται με ζυγούς στην ομάδα συνεκτικών ζυγών. Η ισορροπημένη ροή ισχύος στους αρχικούς ζυγούς διατηρείται, ενώ μια ισορροπημένη ροή ισχύος δημιουργείται για τον ισοδύναμο ζυγό.

Η σύνδεση των τερματικών ζυγών των γεννητριών με τον ισοδύναμο ζυγό μέσω των ιδανικών μετασχηματιστών εισάγει απείρως ισχυρούς δεσμούς συγχρονισμού μεταξύ τους. Για τον λόγο αυτό, είναι προτιμότερο η μείωση με βάση τη συνεκτικότητα να πραγματοποιείται στους ζυγούς χαμηλής τάσης των γεννητριών, ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση αυτού του τεχνητού δεσμού, όπως φαίνεται από το υπόλοιπο δίκτυο, λόγω των σχετικά υψηλών αντιδράσεων των μετασχηματιστών.

3.4 Ελάττωση των Ζυγών Φορτίου

Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε αρχικά την ελάττωση του πλήθους των ζυγών που έχουν φορτία με σταθερή αντίσταση. Σε αυτή την περίπτωση, καθώς υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης του φορτίου και του ρεύματος, είναι δυνατή η χρήση μιας ακριβούς μεθόδου μείωσης. Στη συνέχεια, περιγράφεται μια προσεγγιστική μέθοδος για την ελάττωσης του πλήθους των ζυγών με πιο γενικά μη γραμμικά χαρακτηριστικά φορτίου.

Η μέθοδος Ward-Hale [13] ή η μέθοδος της απαλοιφής κατά Gauss έχει εφαρμοστεί ευρέως για την ελάττωση ζυγών με φορτία σταθερής αντίστασης για σκοπούς ανάλυσης ροής φορτίου και μεταβατικής ευστάθειας. Παρόλο που η μέθοδος της απαλοιφής κατά Gauss μειώνει αποτελεσματικά τον αριθμό των ζυγών, δεν υπάρχει εγγύηση ότι θα μειωθεί και ο αριθμός των γραμμών. Αυτό είναι σημαντικό, αφού στα σύγχρονα προγράμματα προσομοίωσης μεταβατικής ευστάθειας, ο συνολικός χρόνος υπολογισμού εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των γραμμών και όχι από τον αριθμό των ζυγών.

Το δίκτυο που αντιπροσωπεύει το αρχικό σύστημα ισχύος είναι φυσικά πολύ αραιό συνήθως, ο αριθμός των γραμμών είναι μόνο 1,5-2,0 φορές ο αριθμός των ζυγών. Όταν εκτελείται μια μείωση δικτύου και οι ζυγοί εξαλείφονται, εισάγονται επιπλέον ισοδύναμες γραμμές στο δίκτυο. Στη χειρότερη περίπτωση, όταν συμπληρώνεται πλήρως ο πίνακας αγωγιμοτήτων των ζυγών, ο αριθμός των κλάδων θα είναι ίσος με $N \times (N - 1) / 2$ (όπου N είναι ο αριθμός των ζυγών που διατηρούνται). Επειδή το N μπορεί εύκολα να υπερβεί τις αρκετές εκατοντάδες, είναι προφανές ότι η εξάλειψη των κόμβων πρέπει να εφαρμόζεται με σύνεση διαφορετικά, το ισοδύναμο δίκτυο μπορεί να έχει πολύ περισσότερους κλάδους από το αρχικό.

Οι τεχνικές αραιοποίησης μπορούν να εφαρμοστούν με επιτυχία στο πρόβλημα μείωσης του δικτύου, προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των κλάδων που εισάγονται στο ισοδύναμο δίκτυο [14]. Στην ελάττωση βασισμένη στην αραιοποίηση, εντοπίζονται ορισμένοι βασικοί ζυγοί που είναι σημαντικοί λόγω της τοπολογίας τους και διατηρούνται στο ισοδύναμο δίκτυο. Αυτοί οι βασικοί ζυγοί τείνουν να είναι ζυγοί που είτε έχουν μεγάλο αριθμό συνδέσεων είτε συνδέουν υποπεριοχές που έχουν λίγες συνδέσεις με το υπόλοιπο σύστημα.

Αυτή τη στιγμή, η πιο αποτελεσματική αυτόματη μέθοδος για τον εντοπισμό των βασικών ζυγών είναι να ορίσουμε τις εξαλείψεις ζυγών χρησιμοποιώντας ένα σχήμα με βάση την αραιοποίηση και να τερματίσουμε τις εξαλείψεις ζυγών όταν ο αριθμός των όρων στον ισοδύναμο πίνακα αγωγιμοτήτων αρχίσει να αυξάνεται αντί να μειώνεται. Έχουν περιγραφεί τρία εναλλακτικά συστήματα/τρόποι διάταξης ζυγών [15], και το σύστημα που αναφέρεται ως "Scheme II" έχει χρησιμοποιηθεί στο λογισμικό DYNRED. Σε αυτό το σύστημα, σε κάθε βήμα εξαλείφεται ο ζυγός με τον ελάχιστο αριθμό συνδέσεων.

Η ανάγκη για διατήρηση των ζυγών των γεννητριών στο παρελθόν αποτέλεσε περιοριστικό παράγοντα στη μείωση του δικτύου, ακόμα και όταν εφαρμόζονται τεχνικές αραιοποίησης. Οι ζυγοί των γεννητριών τείνουν να συνδέονται ακτινικά και να είναι διασκορπισμένοι σε όλο το δίκτυο. Η διατήρησή τους δεν βελτιώνει την αραιοποίηση και παρεμποδίζει τη διαδικασία δημιουργίας ενός μικρού ισοδύναμου δικτύου. Για παράδειγμα, αν διατηρηθούν μόνο οι ζυγοί των γεννητριών, τότε ο ισοδύναμος πίνακας αγωγιμοτήτων θα είναι πλήρως συμπληρωμένος για σχεδόν όλα τα πιθανά δίκτυα. Η ελάττωση των ζυγών των γεννητριών χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της συνεκτικότητας έχει το όφελος της ελάττωσης του πλήθους των ζυγών που πρέπει να διατηρηθούν, και έτσι δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού ενός ισοδύναμου συστήματος που έχει πολύ λιγότερες αγωγιμότητες από ό,τι θα ήταν δυνατό σε άλλη περίπτωση.

Το πρόγραμμα DYNRED επιτρέπει τη μείωση μη γραμμικών φορτίων που αποτελούνται από συνιστώσες σταθερής αντίστασης, σταθερού ρεύματος (σε σταθερό συντελεστή ισχύος) και σταθερής ισχύος. Η διαδικασία της Γκαουσιανής (Gaussian) απαλοιφής επεκτείνεται για να χειριστεί τις μη γραμμικές συνιστώσες σταθερού ρεύματος και σταθερής ισχύος προσεγγίζοντάς τες ως ιδανικούς αποδέκτες ρεύματος. Εισάγεται ένα ζεύγος αποδεκτών ρεύματος για να αντικαταστήσουν τις συνιστώσες σταθερού ρεύματος και σταθερής ισχύος σε κάθε ζυγό. Οι τάσεις του αρχικού σεναρίου ροής φορτίου χρησιμοποιούνται για αυτή τη μετατροπή. Οι αποδέκτες ρεύματος μειώνονται χρησιμοποιούντας τον τυπικό τύπο Γκαουσιανής απαλοιφής. Κάθε ζεύγος ισοδύναμων πηγών ρεύματος σε κάθε διατηρούμενο ζυγό μετατρέπεται ξανά σε ένα ισοδύναμο στοιχείο σταθερού ρεύματος και ισοδύναμο στοιχείο σταθερής ισχύος, αντίστοιχα.

Για να διατηρηθεί η ακρίβεια με τη μέθοδο ελάττωσης των αποδεκτών ρεύματος, το δίκτυο διαιρείται σε υποπεριοχές που είναι περίπου συνεκτικές. Οι διασυνδέσεις μεταξύ των υποπεριοχών διατηρούνται κατά τη διαδικασία της ελάττωσης. Ως αποτέλεσμα, όταν ένα μη γραμμικό φορτίο μέσα σε μια υποπεριοχή εξαλείφεται, τα ισοδύναμα μη γραμμικά φορτία που το αντικαθιστούν περιορίζονται στην ίδια υποπεριοχή. Για να διατηρηθεί η αραιοποίηση του ισοδύναμου δικτύου, είναι επίσης απαραίτητο οι υποπεριοχές να συνδέονται χαλαρά όσον αφορά την τοπολογία τους.

3.5 Δυναμική Άθροιση των Μοντέλων των Γεννητριών

Η διαδικασία ελάττωσης του μεγέθους του συστήματος σύμφωνα με τη συνεκτικότητα, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ηλεκτρικά ισοδύναμου δικτύου με μειωμένο αριθμό ζυγών. Κάθε ένας από αυτούς τους ισοδύναμους ζυγούς αντιπροσωπεύει μια συνεκτική περιοχή του αρχικού ΣΗΕ, και οι μονάδες παραγωγής κάθε συνεκτικής περιοχής είναι συνδέονται παράλληλα στον ισοδύναμο ζυγό για αυτήν την περιοχή. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 3.3 για το σύστημα των 39 ζυγών. Η τάξη του διαφορικού συστήματος που αντιπροσωπεύει το δυναμικό μέρος του συστήματος μπορεί τώρα να μειωθεί με την ομαδοποίηση των μονάδων παραγωγής που είναι συνδεδεμένες παράλληλα στον ίδιο ζυγό και την αντικατάστασή τους από μια ισοδύναμη μονάδα παραγωγής. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται δυναμική συνάθροιση (dynamic aggregation). Μετά τη δυναμική συνάθροιση, το σύστημα του Σχήματος 4.3 θα μετατρέπεται στο ισοδύναμο σύστημα του Σχήματος 3.4. Τα κριτήρια για να θεωρηθεί ένα ισοδύναμο μοντέλο μονάδων παραγωγής αποδεκτό, από δυναμική άποψη, είναι ότι η απόκριση της ηλεκτρικής ισχύος του ισοδύναμου μοντέλου πρέπει να αντιστοιχεί στην ολική ηλεκτρική ισχύ των μονάδων που αντικαθιστά, και ότι η απόκριση της τάσης στον ζυγό του πρέπει να αντιστοιχεί στην απόκριση της τάσης του ζυγού με τα μεμονωμένα μοντέλα των μονάδων.

Στην απλή περίπτωση όπου οι μονάδες που πρόκειται να ομαδοποιηθούν αναπαρίστανται όλες από το κλασικό μοντέλο μηχανής, με το ίδιο μοντέλο συστήματος διέγερσης και το ίδιο μοντέλο ρυθμιστή στροφών-στροβίλου, διαπιστώθηκε εμπειρικά ότι οι παράμετροι των ισοδύναμων μοντέλων διέγερσης και ρυθμιστή στροφών-στροβίλου μπορούν να υπολογιστούν ως λογαριθμικοί μέσοι όροι των επιμέρους παραμέτρων των μοντέλων διέγερσης και ρυθμιστή στροφών-στροβίλου αντίστοιχα.

Στην γενική περίπτωση, τα μοντέλα των συστημάτων διέγερσης και των ρυθμιστών στροφών των επιμέρους μονάδων μπορεί να είναι διαφορετικών τύπων. Η μέθοδος συγκέντρωσης απαιτεί οι μονάδες που πρόκειται να συνδυαστούν να είναι συνδεδεμένες στον ίδιο ζυγό και να έχουν την ίδια τερματική τάση. Υποθέτει ότι αυτές οι γεννήτριες είναι συνεκτικές και έχουν την ίδια ταχύτητα. Συνεπώς, κάθε σύστημα διέγερσης σε μια ομάδα συνεκτικών γεννητριών μετρά το ίδιο σήμα τάσης εισόδου. Επίσης, κάθε σύστημα ρυθμιστή στροφών-στροβίλου σε μια ομάδα συνεκτικών γεννητριών μετρά το ίδιο σήμα ταχύτητας εισόδου.

3.5.1 Άθροιση των Συστημάτων Ρυθμιστή Στροφών-Στροβίλου

Η απόκριση του κάθε συστήματος ρυθμιστή στροφών-στροβίλου μπορεί να υπολογιστεί για μια δεδομένη διαταραχή του σήματος εισόδου της ταχύτητας. Η συνολική μηχανική ισχύς εξόδου για την ομάδα συνεκτικών μονάδων λαμβάνεται αθροίζοντας τις αποκρίσεις της μηχανικής ισχύος εξόδου των επιμέρους μονάδων.

Το πρόβλημα του αθροίσματος (συνδυασμού, συγχώνευσης) των μοντέλων ρυθμιστή στροφών-στροβίλου έγκειται στην ταυτοποίηση των παραμέτρων ενός ισοδύναμου μοντέλου, με στόχο η έξοδός του να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τη συνολική

μηχανική ισχύ εξόδου, αν εφαρμοστεί το ίδιο σήμα ταχύτητας στην είσοδο. Εξετάζονται δύο τύποι σημάτων ταχύτητας εισόδου: Περιοδικές είσοδοι μικρού πλάτους και βηματικές είσοδοι. Για περιοδικές εισόδους μικρού πλάτους, το πρόβλημα επιλύεται ως εξής: οι μη γραμμικότητες στα μοντέλα ρυθμιστή στροφών-στροβίλου αγνοούνται, υπολογίζεται η συνάρτηση μεταφοράς κάθε μοντέλου για διακριτές τιμές της συχνότητας στην περιοχή 0.01–10 Hz και αυτές οι συναρτήσεις μεταφοράς προστίθενται. Η συνάρτηση μεταφοράς που προκύπτει από την πρόσθεση των επιμέρους, ονομάζεται «συγκεντρωμένη συνάρτηση μεταφοράς».

Επιλέγεται ένα μοντέλο για τον ισοδύναμο ρυθμιστή στροφών-στροβίλου και οι παράμετροί του προσαρμόζονται μέχρι η συνάρτηση μεταφοράς του να ταιριάζει στη «συγκεντρωμένη συνάρτηση μεταφοράς» εντός μιας καθορισμένης ακρίβειας. Η τεχνική για την προσαρμογή αυτών των παραμέτρων είναι μια αριθμητική μέθοδος αναζήτησης κλίσης. Η αντικειμενική συνάρτηση που ελαχιστοποιείται είναι το άθροισμα, στην περιοχή των διάφορων συχνοτήτων, των τετραγώνων του σχετικού σφάλματος μεταξύ της ισοδύναμης και της συγκεντρωμένης συνάρτησης μεταφοράς.

3.5.2 Άθροιση των Σύγχρονων Γεννητριών

Η ίδια αρχή της προσαρμογής συναρτήσεων μεταφοράς εφαρμόζεται στις αγωγιμότητες στην κατάσταση λειτουργίας (operational admittances), ξεχωριστά στον ευθύ (direct) και κάθετο άξονα (quadrature). Αυτό είναι εφικτό, δεδομένου ότι όλες οι σύγχρονες μηχανές μιας συνεκτικής ομάδας παρουσιάζουν την ίδια τάση ακροδεκτών.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά (δυναμική δρομέα) της ισοδύναμης μηχανής προκύπτουν από το άθροισμα των αδρανειών και των συντελεστών απόσβεσης των επιμέρους γεννητριών, αντίστοιχα.

3.5.3 Αθροιση του Συστήματος Διέγερσης και των Μοντέλων των Σταθεροποιητών του ΣΗΕ

Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς που πρέπει να προσεγγιστεί είναι ένα σταθμισμένο άθροισμα των συναρτήσεων μεταφοράς των επιμέρους συστημάτων διέγερσης. Ο συντελεστής στάθμισης για κάθε σύστημα διέγερσης εξαρτάται από τις παραμέτρους της σύγχρονης μηχανής στην οποία είναι συνδεδεμένο, καθώς και από τις παραμέτρους της ισοδύναμης σύγχρονης μηχανής. Οι συντελεστές λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι η τάση πεδίου των μεγαλύτερων μονάδων έχει μεγαλύτερη επίδραση στην τάση ακροδεκτών της συνεκτικής ομάδας από ό,τι η τάση πεδίου των μικρότερων μονάδων.

Τέλος, μετά την αξιολόγηση των παραμέτρων για το ισοδύναμο σύστημα διέγερσης, υπολογίζεται και προσεγγίζεται η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του σταθεροποιητή του ΣΗΕ (Power System Stabilizer).

3.6 PowerFactory

To PowerFactory, της εταιρείας DIgSILENT, είναι ένα εργαλείο-λογισμικό Μηχανικής για ανάλυση συστημάτων μεταφοράς και διανομής, αλλά και για τη μελέτη βιομηχανικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει σχεδιαστεί ως ένα προηγμένο και διαδραστικό πακέτο λογισμικού αφιερωμένο στα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) και στην ανάλυση ελέγχου τους, προκειμένου να επιτευχθούν οι κύριοι στόχοι του σχεδιασμού τους και της βελτιστοποίησης της λειτουργίας τους.

To "DIgSILENT" είναι ακρωνύμιο του "DIgital SImuLation of Electrical NeTworks". Η έκδοση 7 του DIgSILENT ήταν το πρώτο λογισμικό ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο με ενσωματωμένο γραφικό περιβάλλον μονογραμμικών διαγραμμάτων. Το τότε διαδραστικό μονογραμμικό διάγραμμα περιλάμβανε δυνατότητες σχεδίασης, επεξεργασίας και διάφορες δυνατότητες στατικών και δυναμικών υπολογισμών.

To PowerFactory έχει σχεδιαστεί και αναπτυχθεί από μηχανικούς και προγραμματιστές με εμπειρία πολλών χρόνων τόσο στην ανάλυση των ΣΗΕ, όσο και στον προγραμματισμό. Η ακρίβεια και εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του PowerFactory έχει επιβεβαιωθεί μέσα από ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών, από οργανισμούς υπεύθυνους για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία ΣΗΕ σε όλο τον κόσμο.

Για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων ανάλυσης συστημάτων ισχύος των χρηστών, το PowerFactory σχεδιάστηκε ως ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για την παροχή ενός μεγάλου εύρους λειτουργιών ανάλυσης συστημάτων ισχύος σε ένα ενιαίο εκτελέσιμο πρόγραμμα.

Ορισμένες από τις δυνατότητες που προσφέρει το λογισμικό, κάποιες από τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν και στη συγκεκριμένη διπλωματική είναι:

- Ανάλυση ροής φορτίου για μονοφασικά, διφασικά και τριφασικά AC συστήματα, και για συστήματα DC.
- Ανάλυση Βραχυκυκλωμάτων για μονοφασικά, διφασικά και τριφασικά AC συστήματα.
- Ανάλυση Ενδεχόμενων Σφαλμάτων. (Contingency Analysis).
- Ανάλυση Προστασίας. (Protection Analysis)
- Ανάλυση Καλωδίων. (Cable Analysis)
- Βέλτιστη Ροή Φορτίου. (OPF)
- Εκτίμηση Κατάστασης. (State Estimation)
- Μείωση/ Απλοποίηση Δικτύου/ Συστήματος (Network Reduction)
- Προσομοίωση RMS (Root Mean Square): Προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου για τη μελέτη ηλεκτρομηχανικών μεταβατικών καταστάσεων.
- Προσομοίωση EMT (Electromagnetic Transient): Προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου για τη μελέτη ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών καταστάσεων.
- Αναγνώριση των Παραμέτρων του Συστήματος. (System Parameter Identification)

3.6.1 Ελάττωση Δικτύου

Αυτή η ενότητα εξηγεί πώς να χρησιμοποιηθεί το εργαλείο Ελάττωσης Δικτύου (Network Reduction) του PowerFactory. Μία τυπική εφαρμογή της Ελάττωσης Δικτύου είναι όταν ένα δίκτυο που πρέπει να αναλυθεί, αποτελεί μέρος ενός πολύ μεγαλύτερου Συστήματος, ή βρίσκεται δίπλα σε αυτό και δεν μπορεί να μελετηθεί ανεξάρτητα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μία επιλογή είναι η λεπτομερής μοντελοποίηση και των δύο Συστημάτων. Ωστόσο, ενδέχεται να υπάρξουν καταστάσεις όπου δεν είναι επιθυμητό να γίνουν μελέτες με το πλήρες μοντέλο, π.χ. όταν οι χρόνοι υπολογισμού αυξηθούν σημαντικά ή όταν τα δεδομένα του γειτονικού δικτύου είναι εμπιστευτικά και δεν μπορούν να δημοσιοποιηθούν.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι συχνό να παρέχεται μία απλοποιημένη αναπαράσταση του γειτονικού δικτύου που περιλαμβάνει μόνο τα σημεία διασύνδεσης αυτού με το υπόλοιπο σύστημα. Σε αυτά μπορούν στη συνέχεια να συνδεθούν ισοδύναμες αντιστάσεις και οι κατάλληλες πηγές τάσης, ώστε η απόκριση βραχυκυκλώματος και ροής φορτίου στο διατηρούμενο (μη μειωμένο) σύστημα να είναι η ίδια όπως όταν χρησιμοποιείται το λεπτομερές μοντέλο.

To PowerFactory προσφέρει δύο μεθόδους για την παραγωγή ισοδύναμης αναπαράστασης του μειωμένου μέρους του δικτύου και τον υπολογισμό των παραμέτρων του για στατικές μελέτες, όπως είναι οι μελέτες ροής φορτίου όσο και βραχυκυκλωμάτων. Η πρώτη είναι η μέθοδος Ward και η δεύτερη είναι η μέθοδος REI (Radial-Equivalent-Independent).

Εάν το μειωμένο σε μέγεθος μοντέλο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων RMS, αυτό μπορεί να δημιουργηθεί επιλέγοντας την εντολή «Dynamic equivalent» (δυναμικό ισοδύναμο), στο λογισμικό. Αυτή χρησιμοποιεί τη βασίζεται στην ομαδοποίηση των συνεκτικών σύγχρονων γεννητριών για την διατήρηση των δυναμικών χαρακτηριστικών του Συστήματος.

3.6.2 Δυναμική Απλοποίηση

Η δυναμική απλοποίηση (dynamic reduction) δικτύου βασίζεται στη συνάθροιση συνεκτικών ομάδων σύγχρονων γεννητριών. Για να βρεθούν οι συνεκτικές ομάδες, το δίκτυο επιβάλλεται είτε κάποιος θόρυβος είτε μια σειρά γεγονότων προσομοίωσης τα οποία ορίζει ο χρήστης, και οι γεννήτριες ομαδοποιούνται με βάση την απόκρισή τους. Στη συνέχεια, οι συνεκτικές γεννήτριες συνδυάζονται σε μια ισοδύναμη γεννήτρια. Το υπόλοιπο του προς μείωση δικτύου θεωρείται παθητικό και συνεπώς μειώνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο REI. Στη συνέχεια, επιλέγεται από το χρήστη ο τύπου των controller που θα προστεθεί ισοδύναμες γεννήτριες που προκύπτουν, και πραγματοποιείται μια διαδικασία αναγνώρισης παραμέτρων για την κατάλληλη ρύθμιση των ελεγκτών ώστε να ταιριάζει η δυναμική απόκριση του μειωμένου δικτύου με τη συμπεριφορά του συστήματος πριν την απλοποίηση.

Δεδομένου ότι αυτή η μέθοδος βασίζεται στην λειτουργία του Συστήματος υπό συνθήκες συγχρονισμού, δυναμικά ισοδύναμα συστήματα μπορούν να προκύψουν μόνο εάν το σύστημα που πρόκειται να μειωθεί περιέχει σύγχρονες γεννήτριες. Εάν δεν υπάρχουν σύγχρονες γεννήτριες στο προς μείωση σύστημα, εκτελείται μια απλοποιημένη στατική μείωση REI, όπου όλα τα στοιχεία του δικτύου συγκεντρώνονται σε στατικά φορτία. Γενικά, το απλοποιημένο σύστημα που προκύπτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για συμμετρικές (balanced) προσομοιώσεις RMS και όχι για ασύμμετρες (unbalanced) προσομοιώσεις RMS ή προσομοιώσεις EMT.

Κεφάλαιο 4: Η Μεθοδολογία της Απλοποίησης

4.1 Το Μοντέλο του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το πλήρες Μοντέλο του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας έχει αναπτυχθεί από τον ΑΔΜΗΕ. Για λόγους εμπιστευτικότητας θα παρουσιαστούν μόνο κάποια από τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του πλήρους μοντέλου.

Το σύστημα αποτελείται από:

- 1616 Ζυγούς
- 13342 Γραμμές και
- 142 Σύγχρονες Γεννήτριες

Επιπλέον, στο σενάριο που εξετάζεται ισχύει ότι:

- Το Φορτίο του Συστήματος είναι περίπου 10.500 MW
- Η Ισχύς από τις σύγχρονες γεννήτριες είναι περίπου 9.800 MW
- Η Ισχύς από αιολική ενέργεια είναι περίπου 9.800 MW
- Η Ισχύς από τις διασυνδέσεις είναι περίπου 200 MW

Το σενάριο αντιστοιχεί σε μια κατάσταση του Συστήματος κατά τη διάρκεια του Χειμώνα, γι' αυτό και δεν υπάρχει καθόλου φωτοβολταϊκή παραγωγή.

Τέλος, το σύστημα χωρίζεται σε 20 Ζώνες, οι περισσότερες από τις οποίες αντιστοιχούν σε κάποια γεωγραφική περιοχή της χώρας (πχ. Πελοπόννησος, Στερεά Ελλάδα κ.α.). Ωστόσο, υπάρχουν και κάποιες Ζώνες, οι οποίες δηλώνουν τον τύπο των φορτίων ή της παραγωγής που ανήκουν σε αυτές (πχ. Βιομηχανική, PV).

Για την δημιουργία του απλοποιημένου συστήματος χρησιμοποιήθηκαν οι ήδη ορισμένες γεωγραφικές ζώνες, καθώς χωρίζουν το σύστημα της χώρας με τέτοιο τρόπο ώστε οι μεγαλύτερες γραμμές μεταφοράς διατηρούνται και στο απλοποιημένο μοντέλο.

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται το πλήρες μοντέλο του Συστήματος, όπου κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετική Ζώνη.



Σχήμα 4.1: Το πλήρες μοντέλο του Συστήματος.

4.2 Η Διαδικασία Απλοποίησης του Συστήματος

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αρχικά το σύστημα ήταν χωρισμένο σε 20 Ζώνες και για την απλοποίηση του χρησιμοποιήθηκαν οι ήδη ορισμένες γεωγραφικές ζώνες. Αυτό οδήγησε στην χρήση της συνάρτησης «Dynamic Reduction» 9 φορές, όπου κάθε μια από τις 9 φορές απλοποιήθηκε μία από τις παρακάτω Ζώνες, με τη σειρά που αναφέρονται:

- Πελοπόννησος
- Μακεδονία-Θράκη
- Βόρεια Μακεδονία
- Κεντρική Μακεδονία
- Θεσσαλία
- Αττική
- Δυτική Ελλάδα
- Ιόνιο
- Κυκλάδες

Για την απλοποίηση κάθε Ζώνης ήταν απαραίτητος ο ορισμός κάποιων ορίων εντός των οποίων θα γινόταν η απλοποίηση. Κάθε ομάδα ορίων οριζόταν κάθε φορά με τέτοιο τρόπο, ώστε στο εσωτερικό του να περικλείεται μια ολόκληρη Ζώνη. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένων τα όρια επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε οι γραμμές μεταξύ των Ζωνών να παραμένουν στο μοντέλο και μετά τη διαδικασία της απλοποίησης. Μετά τον ορισμό κάθε ομάδας ορίων, η οποία αντιστοιχεί σε μια Ζώνη, εκτελούνταν η συνάρτηση της απλοποίησης με κατάλληλη επιλογή των διαθέσιμων παραμέτρων.

Στο τέλος της απλοποίησης κάθε Ζώνης γίνεται σύγκριση της αρχικοποίησης μεταξύ του νέου μοντέλου τόσο με την προηγούμενη έκδοσή του, όσο και με την αρχική. Κάθε φορά συγκρίνονται οι συχνότητες των δύο Συστημάτων, αλλά και οι τάσεις σε κάποιον οριακό Ζυγό της Ζώνης που κάθε φορά απλοποιείται, και διατηρείται και μετά την απλοποίηση.

Για την πλήρη κατανόηση της διαδικασία θα παρουσιαστούν με λεπτομέρεια όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την απλοποίηση της πρώτης Ζώνης (Πελοπόννησος). Στη συνέχεια θα γίνει παράθεση των αποτελεσμάτων της σύγκρισης των μοντέλων μετά από κάθε απλοποίηση.

4.2.1 Ορισμός Ορίων

Αρχικά, καθώς ο ορισμός των ορίων γίνεται χειροκίνητα, κάθε φορά που πρόκειται να απλοποιηθεί μία Ζώνη, αλλάζουμε το χρώμα των στοιχείων του μοντέλου με τον παρακάτω τρόπο:

- Τα στοιχεία της Ζώνης που κάθε φορά απλοποιείται έχουν κόκκινο χρώμα.
- Τα στοιχεία που ανήκουν σε κάποια άλλη γεωγραφική Ζώνη εμφανίζονται με πράσινο χρώμα, ώστε να είναι εύκολα εμφανή τα όρια κάθε Ζώνης.
- Τα στοιχεία που ανήκουν σε κάποια από τις Ζώνες που δεν αντιστοιχούν σε κάποια γεωγραφική περιοχή φαίνονται με μαύρο χρώμα.
- Τα στοιχεία που αντιπροσωπεύουν κάποια από τις γειτονικές χώρες με τις οποίες συνδέεται η Ελλάδα μέσω κάποιας διασύνδεσης, εμφανίζονται με γαλάζιο χρώμα, ώστε να είναι εύκολα αντιληπτά και να αποφευχθεί η κατά λάθος απλοποίησή τους.

Στο Σχήμα 4.2 το μοντέλο του Συστήματος.

Στη συνέχεια, επιλέγονται τα στοιχεία που αποτελούν τα όρια της Ζώνης και δίνεται ένα όνομα στην ομάδα των ορίων. Δίνεται κάθε φορά ένα όνομα στην ομάδα των ορίων ώστε να είναι εύκολα αντιληπτό σε ποια Ζώνη αντιστοιχεί.



Σχήμα 4.2: Το πλήρες μοντέλο του Συστήματος, όπου με κόκκινο χρώμα φαίνεται η Ζώνη που θα μειωθεί.

4.2.2 Εκτέλεση της Απλοποίησης (Dynamic Reduction)

Αφού έχουν επιλεγεί κατάλληλα τα όρια, η περιοχή εντός των οποίων θα απλοποιηθεί, επιλέγεται η συνάρτηση Μείωσης Συστήματος (Network Reduction) από τη γραμμή εργασιών του λογισμικού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: Η γραμμή εργασιών του PowerFactory και η Συνάρτηση Μείωσης Συστήματος.

Στη συνέχεια χρειάζεται να επιλεγούν όλες οι παράμετροι σύμφωνα με τις οποίες θα γίνει η απλοποίηση.

Στο «παράθυρο» «Basic Options», επιλέγεται ως τύπος της απλοποίησης το «Dynamic Equivalent», καθώς και η ομάδα των ορίων η περιοχή εντός των οποίων θα απλοποιηθεί (Εικόνα 4.2).

Στο «παράθυρο» «Dynamic Equivalent», επιλέγεται το «Noise Injection» ως ο τύπος της διαταραχής σύμφωνα με την οποία θα γίνει η ομαδοποίηση των συνεκτικών γεννητριών. Όλες οι υπόλοιπες επιλογές αφήνονται ως είναι (Εικόνα 4.3).

🛞 Network Reduction	y Cases\1. Original Study C	ase (1st Area Iso)\Network Reduction.ComRed*		×
Basic Options	Reduction type		Evecute	
Ward Equivalent	O Static equivalent		Execute	1
REI Equivalent	 Dynamic equivale 	nt	Close	
Regional Equivalent			Cancel	
Dynamic Equivalent				
Outputs				
Advanced Options				
Verification				
	Boundary To be reduced	\checkmark → PELLPONNE Interior of the boundary \checkmark		
	Load Flow Initial Conditions Simulation	 → Study Case (1st Area Iso)\Load Flow Calculation →st Area Iso)\Calculation of Initial Conditions →al Study Case (1st Area Iso)\Run Simulation 		

Εικόνα 4.2: Το «παράθυρο» όπου επιλέγονται οι βασικά επιλογές που προσφέρει η συνάρτηση μείωσης Συστήματος.

Στο «παράθυρο» «Outputs», επιλέγεται να μην αντικατασταθεί το μοντέλο από την απλοποιημένη έκδοσή του, αλλά να δημιουργηθεί ως μια νέα παραλλαγή, για να υπάρχει πρόσβαση και στα δύο μοντέλα μετά την απλοποίηση. Όλες οι υπόλοιπες επιλογές αφήνονται ως είναι (Εικόνα 4.4).

Basic Options	Coherency Controllers Advanced	Everute
Ward Equivalent REI Equivalent Regional Equivalent Dynamic Equivalent	Disturbance Noise injections Existing simulation events Noise settings	Close Cancel
Outputs Advanced Options Verification	Coherency identification method Based on correlation coefficients Hierarchical / Agglomerative clustering Correlation threshold 0.8	
	Monitored signal s:phi ~ According to local controller According to model type and plant category Stop after coherency identification	

Εικόνα 4.3: Το «παράθυρο» στο οποίο επιλέγεται ο τύπος της διαταραχής σύμφωνα με την οποία θα γίνει η ομαδοποίηση των συνεκτικών γεννητριών.

🛞 Network Reduction)	y Cases\1. Original Study Case (1st Area Iso)\Network Reduction.ComRed*	×
 Network Reduction Basic Options Ward Equivalent REI Equivalent Regional Equivalent Dynamic Equivalent Outputs Advanced Options Verification 	y Cases\1. Original Study Case (1st Area Iso)\Network Reduction.ComRed* Representation of equivalent Calculation of parameters only Create a new variation for reduced network Change existing network Clean up empty substations and bays Show detailed output	× Execute Close Cancel

Εικόνα 4.4: Το «παράθυρο» στο οποίο επιλέγεται ο τρόπος αποθήκευσης του νέου μοντέλου.

Στο «παράθυρο» «Advanced Options», δεν γίνεται καμία αλλαγή (Εικόνα 4.5).

🛞 Network Reduction	y Cases∖1. Original Study	Case (1st Area Iso)\Ne	twork Reduction.ComRed*	×
Basic Options Ward Equivalent REI Equivalent	Mutual impedance	1000. p.u.	based on 100 MVA	Execute Close
Regional Equivalent Dynamic Equivalent Outputs				Cancel
Advanced Options Verification				

Εικόνα 4.5: Το «παράθυρο» στο οποίο επιλέγονται άλλα χαρακτηριστικά της συνάρτησης μείωσης του Συστήματος.

Στο «παράθυρο» «Verification», επιλέγεται να γίνουν όλοι οι διαθέσιμοι έλεγχοι και οι συγκρίσεις μεταξύ του απλοποιημένου και του αρχικού μοντέλου. Όλες οι υπόλοιπες επιλογές αφήνονται ως είναι. (Εικόνα 4.6).

Network Reduction	y Cases\1. Original Study Case (1st Area Iso)\Network Reduction.ComRed*	×
 Network Reduction Basic Options Ward Equivalent REI Equivalent Regional Equivalent Dynamic Equivalent Outputs Advanced Options Verification 	y Cases\1. Original Study Case (1st Area Iso)\Network Reduction.ComRed* General Advanced Check equivalent results Check load flow results after reduction Check simulation results after reduction Generate curve comparison plot Threshold for check 1. %	X Execute Close Cancel

Εικόνα 4.6: Το «παράθυρο» στο οποίο επιλέγονται οι έλεγχοι που μπορεί να γίνουν μεταξύ του απλοποιημένου και του αρχικού μοντέλου.

4.2.3 Αποτελέσματα

Μετά από κάθε απλοποίηση γίνεται έλεγχος της ροής ισχύος στους οριακούς Ζυγούς της Ζώνης που απλοποιείται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα μεταξύ του μοντέλου πριν και μετά την απλοποίηση. Επιπλέον συγκρίνονται οι αποκρίσεις τάσεις και συχνότητας του απλοποιημένου μοντέλου που προκύπτει τόσο με το αρχικό μοντέλο, όσο και με το μοντέλο πριν την απλοποίηση. Στην περίπτωση της 1^{ης} απλοποίησης, το προηγούμενο μοντέλο είναι και το αρχικό, άρα έχουμε δύο λιγότερες συγκρίσεις.

Στον Πίνακα 4.1, φαίνονται τα αποτελέσματα της Ροής Ισχύος στου οριακούς Ζυγούς πριν και μετά το πρώτο στάδιο απλοποίησης, στο οποίο απλοποιήθηκε η Ζώνη της Πελοποννήσου. Παρατηρείται πως τόσο στα πλάτη όσο και στις γωνίες των τάσεων, η διαφορά μεταξύ του αρχικού και του απλοποιημένου Συστήματος είναι μικρότερη του 0,001%.

Validation of reduc	ced network							
Boundary bus	Voltage Magnitude, p.u. Voltage Angle, deg							
	Original	Reduced	Error (%)	Original	Reduced	Error (
60031 KORINTH1	1.022772	1.022772	0.00001	15.067829	15.067843	-0.000096		
63331 PANAHAIK	1.025693	1.025693	0.000001	14.451431	14.451449	-0.000121		
64331 PATRA3	1.019731	1.019731	0.000001	13.854895	13.854912	-0.000126		
65335 KYLLHNH	1.029689	1.029689	0.000001	17.113495	17.113514	-0.000107		

Πίνακας 4.1: Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: Πελοπόννησος. Στο Σχήμα 4.3 φαίνονται οι αποκρίσεις τόσο του αρχικού Συστήματος όσο και του Συστήματος μετά το πρώτο στάδιο της απλοποίησης. Αριστερά συγκρίνονται οι τάσεις σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που απλοποιήθηκε, πριν και μετά την απλοποίηση, και δεξιά η συχνότητες των δύο Συστημάτων. Η σύγκριση γίνεται για διάστημα 2000 sec.



Σχήμα 4.3: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.

Παρατηρείται πως μετά την απλοποίηση, οι ταλαντώσεις που εμφανίζονται τόσο στην τάση όσο και στη συχνότητα μειώνονται σημαντικά. Αυτό το φαινόμενο εντείνεται μετά από κάθε απλοποίηση.

4.3 Απλοποίηση των υπόλοιπων Ζωνών

Τώρα θα παρουσιαστούν οι αποκρίσεις τάσεις και συχνότητας των Συστημάτων που προκύπτουν μετά από κάθε απλοποίηση, τόσο με τα Συστήματα του προηγούμενου βήματος, όσο και με το αρχικό μοντέλο. Οι συγκρίσεις των Τάσεων γίνονται σε οριακούς Ζυγούς της Ζώνης που κάθε φορά απλοποιείται.

4.3.1 Μακεδονία-Θράκη

Στον Πίνακα 4.2, φαίνονται τα αποτελέσματα της Ροής Ισχύος στου οριακούς Ζυγούς πριν και μετά το πρώτο στάδιο απλοποίησης, στο οποίο απλοποιήθηκε η Ζώνη της Μακεδονίας-Θράκης. Παρατηρείται πως τόσο στα πλάτη όσο και στις γωνίες των τάσεων, η διαφορά μεταξύ του αρχικού και του απλοποιημένου Συστήματος είναι μικρότερη του 0,001%.

Voltage Magni	tude, p.u.		Voltage Angle,	deg	
 Original	Reduced	Error (%)	 Original	Reduced	Error (%
1.032215	1.032215	-0.000003	23.911917	23.911938	-0.000086
1.023758	1.023758	-0.000004	22.696057	22.696060	-0.000014
1.027178	1.027178	-0.000004	22.818554	22.818560	-0.000024
1.016348	1.016348	-0.000003	16.392128 17.446705	16.392134	-0.000035
	Original 1.032215 1.023758 1.000394 1.027178 1.016348 1.016586	Original Reduced 1.032215 1.032215 1.023758 1.023758 1.00394 1.000394 1.027178 1.027178 1.016348 1.016348 1.016586 1.016586	Original Reduced Error (%) 1.032215 1.032215 -0.000003 1.023758 1.023758 -0.000004 1.000394 1.000394 -0.000003 1.027178 1.027178 -0.000003 1.016348 1.016348 -0.000003 1.016586 1.016586 -0.000003	Original Reduced Error (%) Original 1.032215 1.032215 -0.000003 23.911917 1.023758 1.023758 -0.000004 22.696057 1.000394 1.000394 -0.000003 15.812839 1.027178 1.027178 -0.000004 22.818554 1.016348 1.016348 -0.000003 16.392128 1.016586 1.016586 -0.000002 17.446705	Original Reduced Error 0% Original Reduced 1.032215 1.032215 -0.000003 23.911917 23.911938 1.023758 1.023758 -0.000003 23.911917 23.911938 1.000394 1.000394 -0.000003 15.812839 15.812845 1.027178 1.027178 -0.000003 16.392128 16.392134 1.016348 1.016348 -0.000003 16.392128 16.392134 1.016586 -0.000002 17.446705 17.446711

Πίνακας 4.2: Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: Μακεδονία-Θράκη.

Στο Σχήμα 4.4 γίνεται η σύγκριση της τάσης και της συχνότητας μεταξύ του μοντέλου πριν και του μοντέλου μετά την απλοποίηση. Ενώ, στο Σχήμα 4.5 συγκρίνεται η τάση και η συχνότητα μεταξύ του μοντέλου μετά την απλοποίηση και του αρχικού Συστήματος.



Σχήμα 4.4: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.



Σχήμα 4.5: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.

4.3.2 Βόρεια Μακεδονία

Στον Πίνακα 4.3, φαίνονται τα αποτελέσματα της Ροής Ισχύος στου οριακούς Ζυγούς πριν και μετά το πρώτο στάδιο απλοποίησης, στο οποίο απλοποιήθηκε η Ζώνη της Μακεδονίας-Θράκης. Παρατηρείται πως τόσο στα πλάτη όσο και στις γωνίες των τάσεων, η διαφορά μεταξύ του αρχικού και του απλοποιημένου Συστήματος είναι μικρότερη του 0,001%.

Στο Σχήμα 4.6 γίνεται η σύγκριση της τάσης και της συχνότητας μεταξύ του μοντέλου πριν και του μοντέλου μετά την απλοποίηση. Ενώ, στο Σχήμα 4.7 συγκρίνεται η τάση αι η συχνότητα μεταξύ του μοντέλου μετά την απλοποίηση και του αρχικού Συστήματος.

Boundary bus Vo (Voltage Magnitu	Voltage Magnitude, p.u.			Voltage Angle, deg		
	Original	Reduced	Error (%) Original	Reduced	Error (%	
23011 KKARD1 EHV	1.036014	1.036014	0.000007	24.106087	24.106131	-0.000181	
22011 KAGDIM1 EHV	1.036767	1.036767	0.000001	24.342496	24.342542	-0.000190	
28531 N.PELLA	0.997513	0.997509	0.000397	15.786683	15.786664	0.000122	
21011 KAMYD EHV	1.030634	1.030634	0.000015	23.787327	23.787364	-0.000156	
26934 MAKROC T1	1.024474	1.024461	0.001278	19.354346	19.354485	-0.000716	
26833 OSE11 T1	1.015447	1.015440	0.000677	17.210180	17.210223	-0.000250	
26931 VEROIA	1.025554	1.025544	0.000917	19.760863	19.760951	-0.000450	
20136 GREVEN T2	1.003570	1.003568	0.000191	15.639698	15.639531	0.001070	
20531 ILARION	1.048437	1.048436	0.000112	25.279859	25.279875	-0.000064	
27135 MAKROC T3	1.034546	1.034544	0.000159	14.379215	14.379235	-0.000138	
29331 VOUNENA	1.025765	1.025765	0.000024	15.487421	15.487439	-0.000120	

Πίνακας 4.3: Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: Βόρεια Μακεδονία.



Σχήμα 4.6: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.



Σχήμα 4.7: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.

4.3.3 Κεντρική Μακεδονία

Στον Πίνακα 4.4, φαίνονται τα αποτελέσματα της Ροής Ισχύος στου οριακούς Ζυγούς πριν και μετά το πρώτο στάδιο απλοποίησης, στο οποίο απλοποιήθηκε η Ζώνη της Μακεδονίας-Θράκης. Παρατηρείται πως τόσο στα πλάτη όσο και στις γωνίες των τάσεων, η διαφορά μεταξύ του αρχικού και του απλοποιημένου Συστήματος είναι μικρότερη του 0,001%.

Validation of reduced	network							
Boundary bus	Voltage Magnitude, p.u.			Voltage Angle, deg				
	Original	Reduced	Error	(%)	Original	Reduced	Error	(%)
	4.040464				46.0704.44	46.070440		
35636 KALAMP 12 32131 LAMTA	1.018461	1.018461	-0.0000	01 01	15.0/9141	15.079142	-0.0000	05 06
30011 KLARIS EHV	1.032470	1.032470	-0.0000	00	20.399455	20.399456	-0.0000	03 I
34011 KTRIKAL EHV	1.035358	1.035358	0.00000	0	22.515171	22.515172	-0.0000	02
30731 LARISA 2	1.036395	1.036395	-0.0000	01	14.348887	14.348888	-0.0000	09
32531 SPERCHIA	1.030004	1.030004	-0.0000	00	18.085156	18.085157	-0.0000	05
33631 ACLADI	1.027792	1.027792	-0.0000	01	13.022748	13.022750	-0.0000	09
36531 KVOURLA	1.026071	1.026071	-0.0000	00	14.207461	14.207462	-0.0000	06

Πίνακας 4.4: Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: Κεντρική Μακεδονία. Στο Σχήμα 4.8 γίνεται η σύγκριση της τάσης και της συχνότητας μεταξύ του μοντέλου πριν και του μοντέλου μετά την απλοποίηση. Ενώ, στο Σχήμα 4.9 συγκρίνεται η τάση και η συχνότητα μεταξύ του μοντέλου μετά την απλοποίηση και του αρχικού Συστήματος.



Σχήμα 4.8: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.





Σχήμα 4.9: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.

4.3.4 Θεσσαλία

Στον Πίνακα 4.5, φαίνονται τα αποτελέσματα της Ροής Ισχύος στου οριακούς Ζυγούς πριν και μετά το πρώτο στάδιο απλοποίησης, στο οποίο απλοποιήθηκε η Ζώνη της Μακεδονίας-Θράκης. Παρατηρείται πως τόσο στα πλάτη όσο και στις γωνίες των τάσεων, η διαφορά μεταξύ του αρχικού και του απλοποιημένου Συστήματος είναι μικρότερη του 0,001%.

Στο Σχήμα 4.10 γίνεται η σύγκριση της τάσης και της συχνότητας μεταξύ του μοντέλου πριν και του μοντέλου μετά την απλοποίηση. Ενώ, στο Σχήμα 4.11 συγκρίνεται η τάση και η συχνότητα μεταξύ του μοντέλου μετά την απλοποίηση και του αρχικού Συστήματος.

Validation of reduced	network						
Boundary bus	Voltage Magnitude, p.u.			Voltage Angle, deg			
	Original	Reduced	Error (%)	Original	Reduced	Error (%)	
140011 KLARYMN_MV1	1.027892	1.027892	-0.000000	18.010601	18.010601	-0.000000	
40011 KLARMN EHV	1.022900	1.022900	-0.000000	18.010665	18.010666	-0.000000	
41/31 ATALADI	1.044423	1.044423	-0.000000	13./19885	13./19885	-0.000001	
44334 GIUNA TI	1.029760	1.029760	-0.000000	16 946724	16 946724	-0.000001	
44551 AMETKI T1	1 033082	1 033082	0.000000	14 176362	14 176362	-0.000000	
70011 KDISTOMO EHV	1.027435	1.027435	-0.000000	19.953749	19.953750	-0.000000	
40631 LARYMNA	1.033664	1.033664	0.000000	12.422346	12.422347	-0.000003	
41131 SCHMATAR	1.024922	1.024922	0.000000	10.050369	10.050369	-0.000000	
42031 SKOURTA	1.014340	1.014340	-0.000000	9.851002	9.851002	-0.000001	
42733 POLYP T1	1.028035	1.028035	-0.000000	9.115722	9.115721	0.000010	
42734 POLYP T2	1.028035	1.028035	-0.000000	9.115722	9.115721	0.000010	
43036 AMARNTH C2	1.052147	1.052147	-0.00000	12.004069	12.004069	-0.000002	
44611 AG NIK EHV	1.027414	1.027414	-0.000000	20.863082	20.863082	-0.000000	
44631 ALOUMIN1	1.000795	1.000795	-0.000000	18.239092	18.239092	-0.000000	
44632 ALOUMIN2	1.027710	1.027710	-0.000000	18.214436	18.214436	-0.000000	
45833 ANDRO_T3	1.060910	1.060910	-0.000001	5.435090	5.435092	-0.000032	
49234 AEDIPS C	1.026743	1.026743	0.000000	12.777419	12.777419	-0.000000	
52636 KALM T2	1.045339	1.045339	-0.000000	11.183785	11.183785	-0.000001	
43031 KALIVER1 HV	1.053445	1.053445	-0.000000	12.259244	12.259244	-0.000003	

Πίνακας 4.5: Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: Θεσσαλία.



Σχήμα 4.10: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.



Σχήμα 4.11: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.

4.3.5 Αττική

Στον Πίνακα 4.6, φαίνονται τα αποτελέσματα της Ροής Ισχύος στου οριακούς Ζυγούς πριν και μετά το πρώτο στάδιο απλοποίησης, στο οποίο απλοποιήθηκε η Ζώνη της Μακεδονίας-Θράκης. Παρατηρείται πως τόσο στα πλάτη όσο και στις γωνίες των τάσεων, η διαφορά μεταξύ του αρχικού και του απλοποιημένου Συστήματος είναι μικρότερη του 0,001%

Στο Σχήμα 4.12 γίνεται η σύγκριση της τάσης και της συχνότητας μεταξύ του μοντέλου πριν και του μοντέλου μετά την απλοποίηση. Ενώ, στο Σχήμα 4.13 συγκρίνεται η τάση και η συχνότητα μεταξύ του μοντέλου μετά την απλοποίηση και του αρχικού Συστήματος.

Validation of reduced r	network					
Boundary bus	Voltage Magnitud	e, p.u.		Voltage Angle, deg		
	Original	Reduced	Error (%)	Original	Reduced	Error (%)
50011 KACARN EHV	1.010726	1.010726	-0.000010	15.358990	15.358988	0.000015
52011 KAGSTF EHV	1.010601	1.010602	-0.000010	15.153790	15.153788	0.000012
51132 KKOUM2 HV	1.009802	1.009802	-0.000035	10.059345	10.059336	0.000097
40731 OINOFÕTA	1.026510	1.026510	-0.000016	9.864266	9.864263	0.000025
53631 ELVAL	1.021778	1.021778	-0.000019	9.634353	9.634350	0.000034
53333 TITAN T1	1.009806	1.009806	-0.000027	9.408975	9.408969	0.000063
52435 N MAKR T1	1.030163	1.030163	-0.000011	8.780301	8.780301	-0.000007
52436 N MAKR T2	1.030163	1.030163	-0.000011	8.780301	8.780301	-0.000007
43013 KALIVER C2	1.025631	1.025631	-0.000007	17.563015	17.563016	-0.000004
52531 KALAMOS	1.051864	1.051865	-0.000010	11.712334	11.712334	-0.000004
50231 KALLISTI	1.009581	1.009582	-0.000064	10.423438	10.423418	0.000196
50334 EPLE2 T2	1.018431	1.018431	-0.000027	11.438115	11.438106	0.000080
51011 KKOUM EHV	1.009645	1.009645	-0.000011	15.521142	15.521138	0.000020
57134 MOTROIL T1	1.018501	1.018501	-0.000016	13.759934	13.759926	0.000056
58334 KPOWER T2	1.027949	1.027949	-0.000013	14.935074	14.935066	0.000053
58434 KPOWER T4	1.027940	1.027940	-0.000013	14.934923	14.934915	0.000053
58436 KPOWER T6	1.027936	1.027936	-0.000013	14.934793	14.934785	0.000053
59531 KLAVR HV	1.035527	1.035527	-0.000011	8.515034	8.515035	-0.000012
43011 KALIVER EHV	1.012854	1.012855	-0.000007	17.397313	17.397316	-0.000019
52132 KAGSTF2 HV	1.033079	1.033079	-0.000011	9.803505	9.803505	-0.000002

Πίνακας 4.6: Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: Αττική.



Σχήμα 4.12: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.



Σχήμα 4.13: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.

4.3.6 Ióvio

Στον Πίνακα 4.7, φαίνονται τα αποτελέσματα της Ροής Ισχύος στου οριακούς Ζυγούς πριν και μετά το πρώτο στάδιο απλοποίησης, στο οποίο απλοποιήθηκε η Ζώνη της Μακεδονίας-Θράκης. Παρατηρείται πως τόσο στα πλάτη όσο και στις γωνίες των τάσεων, η διαφορά μεταξύ του αρχικού και του απλοποιημένου Συστήματος είναι μικρότερη του 0,001%.

Boundary bus	Voltage Magnitude, p.u.			Voltage Angle. deg		
-	 Original	Reduced	Error (%)	 Original	Reduced	Error (%)
85431 MOURTOS	1.016907	1.016907	-0.000000	23.796218	23.796217	0.000003
88011 KARACH EHV	1.028936	1.028936	-0.000000	25.148143	25.148143	0.000000
64436 PATRA3 T2	1.020495	1.020495	0.000001	13.733372	13.733373	-0.000007
82231 ZAKYNTHO	1.025961	1.025961	0.000000	16.858536	16.858537	-0.000003
80031 KARACTHO HV	1.047388	1.047388	-0.000000	26.898742	26.898742	0.000001
81031 LAMPRAK1	1.049184	1.049184	-0.000000	25.240379	25.240379	0.000000
83635 AETOLK C	1.028920	1.028920	0.000001	14.659785	14.659787	-0.000009
87133 AMFLC T1	1.048797	1.048797	-0.000001	25.265281	25.265281	0.000000

Πίνακας 4.7: Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: Ιόνιο.

Στο Σχήμα 4.14 γίνεται η σύγκριση της τάσης και της συχνότητας μεταξύ του μοντέλου πριν και του μοντέλου μετά την απλοποίηση. Ενώ, στο Σχήμα 4.15 συγκρίνεται η τάση και η συχνότητα μεταξύ του μοντέλου μετά την απλοποίηση και του αρχικού Συστήματος.



Σχήμα 4.14: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.


Σχήμα 4.15: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.

4.3.7 Κυκλάδες

Στον Πίνακα 4.8, φαίνονται τα αποτελέσματα της Ροής Ισχύος στου οριακούς Ζυγούς πριν και μετά το πρώτο στάδιο απλοποίησης, στο οποίο απλοποιήθηκε η Ζώνη της Μακεδονίας-Θράκης. Παρατηρείται πως τόσο στα πλάτη όσο και στις γωνίες των τάσεων, η διαφορά μεταξύ του αρχικού και του απλοποιημένου Συστήματος είναι μικρότερη του 0,001%.

Validation of reduc	ed network						
Boundary bus	Voltage Magni	Voltage Magnitude, p.u.			Voltage Angle, deg		
	Original	Reduced	Error (%)	Original	Reduced	Error	(%)
45831 ANDROS C2 46433 SYROS C1	1.064916 1.064648	1.064916 1.064648	-0.000000 -0.000000	4.943687 4.219547	4.943687 4.219547	-0.0000 -0.0000	08 10

Πίνακας 4.8: Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: Κυκλάδες.

Στο Σχήμα 4.16 γίνεται η σύγκριση της τάσης και της συχνότητας μεταξύ του μοντέλου πριν και του μοντέλου μετά την απλοποίηση. Ενώ, στο Σχήμα 4.17 συγκρίνεται η τάση και η συχνότητα μεταξύ του μοντέλου μετά την απλοποίηση και του αρχικού Συστήματος.



Σχήμα 4.16: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.



Σχήμα 4.17: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.

4.3.8 Δυτική Ελλάδα

Στον Πίνακα 4.9, φαίνονται τα αποτελέσματα της Ροής Ισχύος στου οριακούς Ζυγούς πριν και μετά το πρώτο στάδιο απλοποίησης, στο οποίο απλοποιήθηκε η Ζώνη της Μακεδονίας-Θράκης. Παρατηρείται πως τόσο στα πλάτη όσο και στις γωνίες των τάσεων, η διαφορά μεταξύ του αρχικού και του απλοποιημένου Συστήματος είναι μικρότερη του 0,001%.

Boundary bus	Voltage Magnitu	de, p.u.		Voltage Angle,	Voltage Angle, deg		
	Original	Reduced	Error (%)	Original	Reduced	Error (%	
70011 KDISTOMO EHV	1.027549	1.027549	0.000000	19.753400	19.753400	0.000000	
40135 KITHER T1	1.017177	1.017177	0.000000	12.870083	12.870083	-0.000000	
40531 KORON_WP	1.026164	1.026164	0.000000	16.013864	16.013864	0.000001	
71011 KACHEL1 EHV	1.030645	1.030645	0.000000	23.234474	23.234474	0.000000	
73031 MPAKOGIA	1.036791	1.036791	0.000000	23.595377	23.595377	-0.000000	
73334 KARPEN Ô2	1.027660	1.027660	0.000000	19.997939	19.997939	-0.00000	
75031 KDISTOMO HV	1.026417	1.026417	0.000000	17.820704	17.820704	0.000000	
71831 BOUNIXORA	1.029406	1.029406	0.000000	19.722622	19.722622	0.000002	
71931 MARATHIAS	1.021512	1.021512	0.000000	21.067057	21.067057	-0.000000	
71131 KACHELO1 HV	1.049539	1.049539	0.000000	25.183720	25.183720	-0.000000	
81231 PETALAS	1.050146	1.050146	0.000000	25.742479	25.742479	-0.000000	
87134 AMFLC T2	1.048870	1.048870	0.000000	25.257782	25.257782	-0.000000	

Πίνακας 4.9: Τα αποτελέσματα της ροής ισχύος πριν και μετά τη μείωση της Ζώνης: Δυτική Ελλάδα.

Στο Σχήμα 4.18 γίνεται η σύγκριση της τάσης και της συχνότητας μεταξύ του μοντέλου πριν και του μοντέλου μετά την απλοποίηση. Ενώ, στο Σχήμα 4.19 συγκρίνεται η τάση και η συχνότητα μεταξύ του μοντέλου μετά την απλοποίηση και του αρχικού Συστήματος.



Σχήμα 4.18: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του Συστήματος, πριν και μετά την μείωση.





Σχήμα 4.19: Η Τάση σε έναν οριακό Ζυγό της Ζώνης που μειώθηκε και η Συχνότητα του συστήματος, στο αρχικό σύστημα και στο σύστημα μετά την μείωση.

Με την απλοποίηση της Ζώνης της Δυτικής Ελλάδας, ολοκληρώνεται και διαδικασία απλοποίησης του Συστήματος

4.4 Το Τελικό Μοντέλο

Συγκρίνοντας το πλήθος των στοιχείων του «μειωμένου» και του πλήρους Συστήματος προκύπτουν τα παρακάτω:

- Οι Ζυγοί είναι πλέον 218 από 1616
- Οι Γραμμές είναι 167 από 13342
- Οι Γεννήτριες είναι 61 από 142

Αξίζει να σημειωθούν τα εξής:

- Οι περισσότερες γραμμές που δεν έχουν απλοποιηθεί είναι αυτές που συνδέουν τις Ζώνες μεταξύ τους.
- 7 από τις 61 γεννήτριες αντιπροσωπεύουν τις γειτονικές χώρες με τις οποίες υπάρχουν διασυνδέσεις, επομένως σε καμία περίπτωση δε θα είχαν απλοποιηθεί.
- Ορισμένες από τις μεγαλύτερες γεννήτριες του αρχικού μοντέλου δεν εντάχθηκαν σε κάποια συνεκτική ομάδα γεννητριών και έχουν επομένως διατηρηθεί χωρίς αλλαγές.
- Οι περισσότεροι Ζυγοί του Συστήματος, είναι οι οριακοί Ζυγοί κάθε Ζώνης.

Κεφάλαιο 5: Πιστοποίηση του Ισοδύναμου Μοντέλου

Στο Κεφάλαιο 4 ολοκληρώθηκε η διαδικασία ελάττωσης του μεγέθους του Συστήματος. Ωστόσο, για τη χρήση του ελαττωμένου μοντέλου με σκοπό την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, απαιτείται η πιστοποίησή του. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μελέτης διαφόρων σεναρίων τόσο στο απλοποιημένο όσο και στο αρχικό σύστημα, και της σύγκρισης των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων.

Σε κάθε σενάριο, για μια δεδομένη διαταραχή που επιβάλλεται στο Δίκτυο, συγκρίνονται η Τάση σε έναν Ζυγό κοντά στη διαταραχή καθώς και οι συχνότητες των δύο Συστημάτων.

Συνολικά εξετάζονται εννιά (9) Σενάρια και τρεις (3) τύποι Σεναρίων:

- 3 τριφασικά σφάλματα
- 3 βηματικές αυξήσεις φορτίων
- 3 απώλειες γεννητριών

Με αυτόν τον τρόπο, επιχειρήθηκε να ελεγχθεί το μέγιστο δυνατό εύρος διαταραχών και να λαμβάνουν χώρα σε διάφορα σημεία του Συστήματος.

Σε ορισμένα από τα Σενάρια, συγκρίνονται επίσης οι χρόνοι προσομοίωσης του πλήρους και του ισοδύναμου μοντέλου, όπου διαπιστώνεται η σημαντική μείωση που προσφέρει το ισοδύναμο μοντέλο στον συνολικό χρόνο προσομοίωσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι τιμές της Τάσης και της Συχνότητας αναγράφονται και πάνω στα διαγράμματα, για να είναι πιο ευδιάκριτη η διαφορές που αυτές εμφανίζουν. Σε όλα τα διαγράμματα οι τιμές της Τάσης και της Συχνότητας είναι σε α.μ.

5.1 Σενάριο 1: Βραχυκύκλωμα στη Διασύνδεση Ελλάδας - Βουλγαρίας

Στο 1° Σενάριο, εξετάζεται ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή διασύνδεσης Ελλάδας – Βουλγαρίας. Το σφάλμα εμφανίζεται και 0,2 sec αργότερα, ανοίγει ο διακόπτης και το σφάλμα απομονώνεται. Επομένως χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος είναι 0,2 sec.

Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται η τάση στο ζυγό KTHES1 και στα δύο συστήματα μέχρι και 2 sec μετά το σφάλμα, ενώ στο Σχήμα 5.2 φαίνεται η τάση στο ζυγό KTHES1 και στα δύο συστήματα μέχρι και 12 sec μετά το σφάλμα, όπου η τιμή της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η συχνότητα και των δύο συστημάτων μέχρι και 12 sec μετά το σφάλμα, ενώ στο Σχήμα 5.4 φαίνεται η συχνότητα των συστημάτων μέχρι και 80 sec μετά το σφάλμα, όπου η τιμή της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Σε όλα τα σενάρια η προσομοίωση γίνεται για τέτοιο χρόνο ώστε το σύστημα να σταθεροποιηθεί πριν γίνει το σφάλμα, αλλά και να παρατηρηθεί ολόκληρο το δυναμικό φαινόμενο που εμφανίζεται και να εξασφαλισθεί πως και πάλι το σύστημα θα καταλήξει σε ευσταθή κατάσταση.



Κεφάλαιο 5: Πιστοποίηση του Ισοδύναμου Μοντέλου

Σχήμα 5.1: Η Τάση στο Ζυγό ΚΤΗΕS1 μέχρι και 2 sec μετά το σφάλμα.



Σχήμα 5.2: Η Τάση στο Ζυγό KTHES1 μέχρι και 12 sec μετά το σφάλμα.



Κεφάλαιο 5: Πιστοποίηση του Ισοδύναμου Μοντέλου

Σχήμα 5.3: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 12 sec μετά το σφάλμα.



Σχήμα 5.4: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 80 sec μετά το σφάλμα.

Για λόγους πληρότητας και μόνο για το σενάριο 1, θα δειχθεί και ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται το βραχυκύκλωμα, αλλά και η εκκαθάρισή του στο PowerFactory.

Αρχικά αφού επιλεγεί η γραμμή στην οποία θα πραγματοποιηθεί το βραχυκύκλωμα, ορίζεται η χρονική στιγμή και το σημείο στο οποίο αυτό εμφανίζεται, αλλά και ο τύπος του βραχυκυκλώματος. Όπως αναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 3**, με εφαρμογή της μεθόδου της συνεκτικότητας, το ισοδύναμο μοντέλο που προκύπτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για συμμετρικές προσομοιώσεις RMS και όχι για ασύμμετρες προσομοιώσεις RMS ή προσομοιώσεις EMT.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.1, το σφάλμα του 1^{ου} Σεναρίου είναι ένα τριφασικό σφάλμα που λαμβάνει χώρα στο μέσο της διασυνδετικής γραμμής μεταξύ της Ελλάδας και της Βουλγαρίας.

5 Short-Circuit Ever	ntulation Events/Fault\1. Short-Circuit Event.EvtShc	×
 Out of Service Execution Time A hours minutes seconds 4 	Absolute h min 1000. s	
Object Fault Location 5	 ✓ → BG - GR\Ine_14101_15011_1 50. 	
Fault Type 3	3-Phase Short-Circuit 🗸 🗸	
Fault Impedance		
Input R	Resistance, Reactance 🗸 🗸	
Resistance 0). Ohm Reactance 0. Ohm	

Εικόνα 5.1: Ορισμός του βραχυκυκλώματος.

Αφού οριστεί το σφάλμα, πρέπει να οριστεί και η στιγμή εκκαθάρισής του. Αυτή ορίζεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2, όπου 0,2 sec μετά το σφάλμα, ανοίγουν οι διακόπτες ισχύος στα άκρα της γραμμής που συνδέει την Ελλάδα και την Βουλγαρία, και το σφάλμα απομονώνεται.

Basic Data		
Description	Ut of Service	ОК
Load Flow	Absolute	Cancel
Short-Circuit VDE/IEC	hours 0 h	
Short-Circuit Complete	minutes 0 min	
Short-Circuit ANSI	seconds 4000.2 s	
Short-Circuit IEC 61363		
Short-Circuit DC		
Simulation RMS	-	
Simulation EMT	Breaker or Element	
Power Quality/Harmonics	Action	
Reliability	Open	
Hosting Capacity Analysis	○ Close	
Power Park Energy Analysis		
Optimal Power Flow	All phases	

Εικόνα 5.2: Ορισμός της εκκαθάρισης του σφάλματος.

Στην Εικόνα 5.3, φαίνονται και τα δύο γεγονότα που αναφέρθηκαν προηγουμένως στο αντίστοιχο παράθυρο του λογισμικού, το οποίο επιτρέπει την εποπτεία όλων των συμβάντων που λαμβάνουν χώρα κατά της διάρκεια της προσομοίωσης.

🗉 Sin	Simulation Events/Fault - Study Cases\11. FINAL + Crete\Simulation Events/Fault								
	🖍 亩 🐇 🎬 📾 🖬 🔛 🔳 🝸 🕱 🧟 🗛								
	Name	Time	Object						
~	~	~	~						
5	1. Short-Circuit Event	4000.	Ine_14101_15011_1						
5	1. Switch Event	4000.2	Ine_14101_15011_1						

Εικόνα 5.3:Το βραχυκύκλωμα και η εκκαθάριση του σφάλματος.

5.2 Σενάριο 2: Βραχυκύκλωμα σε Γραμμή Σύνδεσης Αττικής - Δυτικής Ελλάδας

Στο 2° Σενάριο, εξετάζεται ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή που συνδέει την Αττική με τη Δυτική Ελλάδα. Το σφάλμα εμφανίζεται και 0,2 sec αργότερα, ανοίγει ο διακόπτης και το σφάλμα απομονώνεται. Επομένως χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος είναι 0,2 sec.

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται η τάση στο ζυγό KKOUM και στα δύο συστήματα μέχρι και 2 sec μετά το σφάλμα, ενώ στο Σχήμα 5.6 φαίνεται η τάση στο ζυγό KKOUM και στα δύο συστήματα μέχρι και 12 sec μετά το σφάλμα, όπου η τιμή της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται η συχνότητα και των δύο συστημάτων μέχρι και 12 sec μετά το σφάλμα, ενώ στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η συχνότητα των συστημάτων μέχρι και 100 sec μετά το σφάλμα, όπου η τιμή της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στην Εικόνα 5.4 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 2 στο αρχικό μοντέλο, ενώ στην Εικόνα 5.5 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 2 στο τελικό ισοδύναμο μοντέλο.

```
[7/15/2024 4:06:06 PM,569] (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated.
[7/15/2024 4:07:59 PM,426] (t=01:11:40 h) Simulation successfully executed.
```

Εικόνα 5.4: Οι χρονικές στιγμές έναρζης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.

[7/15/2024	1:52:25	PM,837]	(t=-100:000	ms)	Initial	conditions	calculated.
[7/15/2024	1:52:59	PM,322]	(t=01:11:40	h) S	imulation	successful	ly executed.

Εικόνα 5.5: Οι χρονικές στιγμές έναρζης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.

Προκύπτει ότι η προσομοίωση στο αρχικό μοντέλο διήρκεσε 113 δευτερόλεπτα, ενώ στο ισοδύναμο μοντέλο διήρκεσε 34 δευτερόλεπτα. Επομένως, ο χρόνος προσομοίωσης στο ισοδύναμο μοντέλο αντιστοιχεί στο 30,08% του χρόνου προσομοίωσης του αρχικού μοντέλου ή, αλλιώς, ο χρόνος προσομοίωσης μειώθηκε κατά 69,92% με τη χρήση του ισοδύναμου μοντέλου.



Σχήμα 5.5: Η Τάση στο Ζυγό ΚΚΟUΜ μέχρι και 2 sec μετά το σφάλμα.



Σχήμα 5.6: Η Τάση στο Ζυγό ΚΚΟUΜ μέχρι και 12 sec μετά το σφάλμα.



Σχήμα 5.7: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 12 sec μετά το σφάλμα.



Σχήμα 5.8: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 100 sec μετά το σφάλμα.

5.3 Σενάριο 3: Βραχυκύκλωμα σε Γραμμή Σύνδεσης Αττικής - Πελοποννήσου

Στο 3° Σενάριο, εξετάζεται ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή που συνδέει την Αττική με την Πελοπόννησο. 0,3 δευτερόλεπτα μετά την εμφάνιση του σφάλματος, ανοίγει ο διακόπτης και το σφάλμα απομονώνεται. Επομένως χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος είναι 0,3 sec.

Στο Σχήμα 5.9 φαίνεται η τάση στο ζυγό KORINTH1 και στα δύο συστήματα μέχρι και 4 sec μετά το σφάλμα, ενώ στο Σχήμα 5.10 φαίνεται η τάση στο ζυγό KKOUM και στα δύο συστήματα μέχρι και 14 sec μετά το σφάλμα, όπου η τιμή της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται η συχνότητα και των δύο συστημάτων μέχρι και 10 sec μετά το σφάλμα, ενώ στο Σχήμα 5.12 φαίνεται η συχνότητα των συστημάτων μέχρι και 50 sec μετά το σφάλμα, όπου η τιμή της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Αξίζει να σημειωθεί πως ο χρόνοι εκκαθάρισης των σφαλμάτων που εμφανίζονται σε καθένα από τα Σενάρια 1,2 και 3, είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους τυπικούς χρόνου εκκαθάρισης σφαλμάτων στην υψηλή και στην υπερυψηλή τάση, οι οποίοι, σύμφωνα με το [16], είναι 75ms και 65ms αντίστοιχα.

Ωστόσο, η μελέτη των Σεναρίων δεν αποσκοπεί στη διερεύνηση πραγματικών σφαλμάτων, αλλά στην πιστοποίηση των αποτελεσμάτων του ισοδύναμου μοντέλου που δημιουργήθηκε. Επομένως, με την αύξηση του χρόνου εκκαθάρισης του σφάλματος, επιβεβαιώνεται η παρόμοια συμπεριφορά του αρχικού και του ισοδύναμου μοντέλου, ανεξάρτητα από το μέγεθος της διαταραχής.

Στην Εικόνα 5.6 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 3 στο αρχικό μοντέλο, ενώ στην Εικόνα 5.7 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 3 στο τελικό ισοδύναμο μοντέλο.

[7/15/2024 3:07:38 PM,145] (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated. [7/15/2024 3:15:19 PM,911] (t=01:11:40 h) Simulation successfully executed.

> Εικόνα 5.6: Οι χρονικές στιγμές έναρζης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.

[7/15/2024 3:15:52 PM,406] (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated. [7/15/2024 3:17:38 PM,780] (t=01:11:40 h) Simulation successfully executed.

> Εικόνα 5.7: Οι χρονικές στιγμές έναρξης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.

Προκύπτει ότι η προσομοίωση στο αρχικό μοντέλο διήρκεσε 461 δευτερόλεπτα, ενώ στο ισοδύναμο μοντέλο διήρκεσε 106 δευτερόλεπτα. Επομένως, ο χρόνος προσομοίωσης στο ισοδύναμο μοντέλο αντιστοιχεί στο 22,99% του χρόνου προσομοίωσης του αρχικού μοντέλου ή, αλλιώς, ο χρόνος προσομοίωσης μειώθηκε κατά 77,01% με τη χρήση του ισοδύναμου μοντέλου.



Original Network

Simplified Network

Σχήμα 5.9: Η Τάση στο Ζυγό KORINTΗ1 μέχρι και 4 sec μετά το σφάλμα.



Σχήμα 5.10: Η Τάση στο Ζυγό KORINTΗ1 μέχρι και 14 sec μετά το σφάλμα.



Σχήμα 5.11: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 10 sec μετά το σφάλμα.



Σχήμα 5.12: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 50 sec μετά το σφάλμα.

5.4 Σενάριο 4: Βηματική Αύξηση φορτίου -480MW και 50MVAR

Στο 4° Σενάριο, εξετάζεται η βηματική αύξηση ενός φορτίου του συστήματος από το 0 στο 100%. Το φορτίο είναι αυτό που αντιπροσωπεύει την Ιταλία στο μοντέλο και είναι -480MW και 50MVAR.

Στο Σχήμα 5.13 φαίνεται η τάση στο ζυγό KARACH και στα δύο συστήματα μέχρι και 3 sec μετά την αύξηση, ενώ στο Σχήμα 5.14 φαίνεται η τάση στο ζυγό KARACH και στα δύο συστήματα μέχρι και 100 sec μετά την αύξηση του φορτίου, όπου η τιμή της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στο Σχήμα 5.15 φαίνεται η συχνότητα και των δύο συστημάτων μέχρι και 12 sec μετά την αύξηση, ενώ στο Σχήμα 5.16 φαίνεται η συχνότητα των συστημάτων μέχρι και 100 sec μετά την αύξηση του φορτίου, όπου η τιμή της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.





Σχήμα 5.13: Η Τάση στο Ζυγό KARACH μέχρι και 3 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.14: Η Τάση στο Ζυγό KARACH μέχρι και 100 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.15: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 20 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.16: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 300 sec μετά τη διαταραχή.

5.5 Σενάριο 5: Βηματική Αύξηση φορτίου 338MW και 172MVAR

Στο 5° Σενάριο, εξετάζεται η βηματική αύξηση ενός φορτίου του συστήματος από το 0 στο 100%. Το φορτίο είναι ένα βιομηχανικό φορτίο συνολικής ισχύος 338MW και 172MVAR.

Στο Σχήμα 5.17 φαίνεται η τάση στο ζυγό ALOUMIN1 και στα δύο συστήματα μέχρι και 2 sec μετά την αύξηση, ενώ στο Σχήμα 5.18 φαίνεται η τάση στο ζυγό ALOUMIN1 και στα δύο συστήματα μέχρι και 50 sec μετά την αύξηση του φορτίου, όπου η τιμής της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στο Σχήμα 5.19 φαίνεται η συχνότητα και των δύο συστημάτων μέχρι και 10 sec μετά την αύξηση, ενώ στο Σχήμα 5.20 φαίνεται η συχνότητα των συστημάτων μέχρι και 170 sec μετά την αύξηση του φορτίου, όπου η τιμής της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στην Εικόνα 5.8 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 5 στο αρχικό μοντέλο, ενώ στην Εικόνα 5.9 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 5 στο τελικό ισοδύναμο μοντέλο.

[7/16/2024	12:13:07	PM,560]	(t=-100:000	ms)	Initial	conditions	calculated.
[7/16/2024	12:19:44	PM,471]	(t=01:11:40	h) S:	imulation	successful	ly executed.

Εικόνα 5.8: Οι χρονικές στιγμές έναρζης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.

[7/16/2024 1:05:37 PM,280] (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated. [7/16/2024 1:07:33 PM,350] (t=01:11:40 h) Simulation successfully executed.

> Εικόνα 5.9: Οι χρονικές στιγμές έναρζης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.

Προκύπτει ότι η προσομοίωση στο αρχικό μοντέλο διήρκεσε 397 δευτερόλεπτα, ενώ στο ισοδύναμο μοντέλο διήρκεσε 116 δευτερόλεπτα. Επομένως, ο χρόνος προσομοίωσης στο ισοδύναμο μοντέλο αντιστοιχεί στο 29,22% του χρόνου προσομοίωσης του αρχικού μοντέλου ή, αλλιώς, ο χρόνος προσομοίωσης μειώθηκε κατά 70,78% με τη χρήση του ισοδύναμου μοντέλου.



Κεφάλαιο 5: Πιστοποίηση του Ισοδύναμου Μοντέλου

Σχήμα 5.17: Η Τάση στο Ζυγό ALOUMIN1 μέχρι και 2 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.18: Η Τάση στο Ζυγό ALOUMIN1 μέχρι και 50 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.19: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 10 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.20: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 70 sec μετά τη διαταραχή.

5.6 Σενάριο 6: Βηματική Αύξηση συνολικού φορτίου 111MW και 69MVAR

Στο 6° Σενάριο, εξετάζεται η ταυτόχρονη βηματική αύξηση τριών φορτίων του Συστήματος από το 0 στο 100%. Τα φορτίο βρίσκονται σε διάφορα σημεία του Συστήματος και η ισχύς τους είναι:

- 1° Φορτίο: 47,137 MW και 29,224 MVAR
- 2° Φορτίο: 32,984 MW και 20,451 MVAR
- 3° Φορτίο: 30,613 MW και 18,98 MVAR

Η αύξησή τους αύξηση συμβαίνει στα 4000 sec.

Στο Σχήμα 5.21 φαίνεται η Τάση στο Ζυγό ALOUMIN1 και στα δύο συστήματα μέχρι και 3 sec μετά την αύξηση, ενώ στο Σχήμα 5.22 φαίνεται η τάση στο ζυγό ALOUMIN1 και στα δύο συστήματα μέχρι και 100 sec μετά την αύξηση του φορτίου, όπου η τιμή της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στο Σχήμα 5.23 φαίνεται η συχνότητα και των δύο συστημάτων μέχρι και 12 sec μετά την αύξηση, ενώ στο Σχήμα 5.24 φαίνεται η συχνότητα των συστημάτων μέχρι και 100 sec μετά την αύξηση του φορτίου, όπου η τιμής της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στην Εικόνα 5.10 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 6 στο αρχικό μοντέλο, ενώ στην Εικόνα 5.11 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 6 στο τελικό ισοδύναμο μοντέλο.

[7/16/2024	2:51:04	PM,043]	(t=-100:000	ms)	Initial	conditions	calculated.
[7/16/2024	2:58:26	PM,085]	(t=01:11:40	1) S	imulation	successful	ly executed.

Εικόνα 5.10: Οι χρονικές στιγμές έναρζης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.

[7/16/2024 2:58:45 PM,169] (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated. [7/16/2024 3:00:39 PM,854] (t=01:11:40 h) Simulation successfully executed.

> Εικόνα 5.11: Οι χρονικές στιγμές έναρζης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.

Προκύπτει ότι η προσομοίωση στο αρχικό μοντέλο διήρκεσε 442 δευτερόλεπτα, ενώ στο ισοδύναμο μοντέλο διήρκεσε 114 δευτερόλεπτα. Επομένως, ο χρόνος προσομοίωσης στο ισοδύναμο μοντέλο αντιστοιχεί στο 25,79% του χρόνου προσομοίωσης του αρχικού μοντέλου ή, αλλιώς, ο χρόνος προσομοίωσης μειώθηκε κατά 74,21% με τη χρήση του ισοδύναμου μοντέλου.



Σχήμα 5.21: Η Τάση στο Ζυγό KARACH μέχρι και 3 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.22: Η Τάση στο Ζυγό KARACH μέχρι και 60 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.23: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 15 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.24: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 80 sec μετά τη διαταραχή.

5.7 Σενάριο 7: Απώλεια Γεννήτριας 307MW

Στο 7° Σενάριο, εξετάζεται μίας εκ των μεγαλύτερων γεννητριών του αρχικού μοντέλου που δεν έχει απλοποιηθεί. Την ώρα της αποσύνδεσης, η γεννήτρια παράγει 307MW και απορροφά 31MVAR. Η απώλεια της γεννήτριας συμβαίνει με άνοιγμα των διακοπτών ισχύος της γραμμής που την συνδέει στο υπόλοιπο σύστημα.

Στο Σχήμα 5.25 φαίνεται η τάση στο ζυγό KDISTOMO και στα δύο συστήματα μέχρι και 5 sec μετά την απώλεια της γεννήτριας, ενώ στο Σχήμα 5.26 φαίνεται η τάση στο ζυγό KDISTOMO στα δύο συστήματα μέχρι και 50 sec μετά την απώλεια της γεννήτριας, όπου η τιμής της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στο Σχήμα 5.27 φαίνεται η συχνότητα και των δύο συστημάτων μέχρι και 15 sec μετά την απώλεια της γεννήτριας, ενώ στο Σχήμα 5.28 φαίνεται η συχνότητα των συστημάτων μέχρι και 80 sec μετά την απώλεια της γεννήτριας, όπου η τιμής της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στην Εικόνα 5.12 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 7 στο αρχικό μοντέλο, ενώ στην Εικόνα 5.13 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 7 στο τελικό ισοδύναμο μοντέλο.

[7/16/2024 3:37:57 PM,613] (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated. [7/16/2024 3:45:40 PM,724] (t=01:11:40 h) Simulation successfully executed.

> Εικόνα 5.12: Οι χρονικές στιγμές έναρζης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.

[7/16/2024 3:47:13 PM,010] (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated. [7/16/2024 3:49:07 PM,063] (t=01:11:40 h) Simulation successfully executed.

> Εικόνα 5.13: Οι χρονικές στιγμές έναρζης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.

Προκύπτει ότι η προσομοίωση στο αρχικό μοντέλο διήρκεσε 463 δευτερόλεπτα, ενώ στο ισοδύναμο μοντέλο διήρκεσε 114 δευτερόλεπτα. Επομένως, ο χρόνος προσομοίωσης στο ισοδύναμο μοντέλο αντιστοιχεί στο 24,62% του χρόνου προσομοίωσης του αρχικού μοντέλου ή, αλλιώς, ο χρόνος προσομοίωσης μειώθηκε κατά 75,38% με τη χρήση του ισοδύναμου μοντέλου.



Σχήμα 5.25: Η Τάση στο Ζυγό KDISTOMO μέχρι και 5 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.26: Η Τάση στο Ζυγό KDISTOMO μέχρι και 50 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.27: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 15 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.28: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 80 sec μετά τη διαταραχή.

5.8 Σενάριο 8: Απώλεια Γεννήτριας 380MW

Στο 8° Σενάριο, εξετάζεται μίας εκ των μεγαλύτερων γεννητριών του αρχικού μοντέλου που δεν έχει απλοποιηθεί. Την ώρα της αποσύνδεσης, η γεννήτρια παράγει 380MW και 133MVAR. Η απώλεια της γεννήτριας συμβαίνει με άνοιγμα των διακοπτών ισχύος της γραμμής που την συνδέει στο υπόλοιπο σύστημα.

Στο Σχήμα 5.29 φαίνεται η τάση στο ζυγό HERON και στα δύο συστήματα μέχρι και 5 sec μετά την απώλεια της γεννήτριας, ενώ στο Σχήμα 5.30 φαίνεται η τάση στο ζυγό HERON στα δύο συστήματα μέχρι και 80 sec μετά την απώλεια της γεννήτριας, όπου η τιμής της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στο Σχήμα 5.31 φαίνεται η συχνότητα και των δύο συστημάτων μέχρι και 15 sec μετά την απώλεια της γεννήτριας, ενώ στο Σχήμα 5.32 φαίνεται η συχνότητα των συστημάτων μέχρι και 70 sec μετά την απώλεια της γεννήτριας, όπου η τιμής της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στην Εικόνα 5.14 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 8 στο αρχικό μοντέλο, ενώ στην Εικόνα 5.15 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 8 στο τελικό ισοδύναμο μοντέλο.

[7/17/2024 11:16:22 AM,945] (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated. [7/17/2024 11:23:01 AM,692] (t=01:11:40 h) Simulation successfully executed.

> Εικόνα 5.14: Οι χρονικές στιγμές έναρζης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.

[7/17/2024 11:25:45 AM,332] (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated. [7/17/2024 11:27:39 AM,148] (t=01:11:40 h) Simulation successfully executed.

> Εικόνα 5.15: Οι χρονικές στιγμές έναρζης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.

Προκύπτει ότι η προσομοίωση στο αρχικό μοντέλο διήρκεσε 399 δευτερόλεπτα, ενώ στο ισοδύναμο μοντέλο διήρκεσε 114 δευτερόλεπτα. Επομένως, ο χρόνος προσομοίωσης στο ισοδύναμο μοντέλο αντιστοιχεί στο 28,57% του χρόνου προσομοίωσης του αρχικού μοντέλου ή, αλλιώς, ο χρόνος προσομοίωσης μειώθηκε κατά 71,43% με τη χρήση του ισοδύναμου μοντέλου.



Κεφάλαιο 5: Πιστοποίηση του Ισοδύναμου Μοντέλου

Σχήμα 5.29: Η Τάση στο Ζυγό HERON μέχρι και 5 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.30: Η Τάση στο Ζυγό HERON μέχρι και 80 sec μετά τη διαταραχή.





Σχήμα 5.31: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 15 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.32: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 70 sec μετά τη διαταραχή.

5.9 Σενάριο 9: Απώλεια της Διασύνδεσης Ελλάδας – Βουλγαρίας 300MW

Στο 9° Σενάριο, εξετάζεται η απώλεια της διασύνδεσης της Ελλάδας με τη Βουλγαρία, τη στιγμή που μέσω της διασύνδεσης μεταφέρονταν 300MW προς την Ελλάδα και 100MVAR προς τη Βουλγαρία. Η απώλεια της διασύνδεσης συμβαίνει με άνοιγμα των διακοπτών ισχύος στα άκρα της.

Στο Σχήμα 5.33 φαίνεται η τάση στο ζυγό HERON και στα δύο συστήματα μέχρι και 5 sec μετά την απώλεια της γεννήτριας, ενώ στο Σχήμα 5.34 φαίνεται η τάση στο ζυγό HERON στα δύο συστήματα μέχρι και 80 sec μετά την απώλεια της γεννήτριας, όπου η τιμής της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στο Σχήμα 5.35 φαίνεται η συχνότητα και των δύο συστημάτων μέχρι και 15 sec μετά την απώλεια της γεννήτριας, ενώ στο Σχήμα 5.36 φαίνεται η συχνότητα των συστημάτων μέχρι και 70 sec μετά την απώλεια της γεννήτριας, όπου η τιμής της σταθεροποιείται και στα δύο μοντέλα.

Στην Εικόνα 5.16 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 9 στο αρχικό μοντέλο, ενώ στην Εικόνα 5.17 φαίνεται πότε ακριβώς άρχισε και τελείωσε η προσομοίωση του Σεναρίου 9 στο τελικό ισοδύναμο μοντέλο.

```
[7/18/2024 11:35:57 AM,222] (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated.
[7/18/2024 11:42:52 AM,064] (t=01:11:40 h) Simulation successfully executed.
```

Εικόνα 5.16: Οι χρονικές στιγμές έναρζης και περάτωσης της προσομοίωσης στο αρχικό μοντέλο.

[7/18/2024 11:52:31 AM,636] (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated. [7/18/2024 11:54:37 AM,543] (t=01:11:40 h) Simulation successfully executed.

> Εικόνα 5.17: Οι χρονικές στιγμές έναρζης και περάτωσης της προσομοίωσης στο μειωμένο μοντέλο.

Προκύπτει ότι η προσομοίωση στο αρχικό μοντέλο διήρκεσε 415 δευτερόλεπτα, ενώ στο ισοδύναμο μοντέλο διήρκεσε 126 δευτερόλεπτα. Επομένως, ο χρόνος προσομοίωσης στο ισοδύναμο μοντέλο αντιστοιχεί στο 30,36% του χρόνου προσομοίωσης του αρχικού μοντέλου ή, αλλιώς, ο χρόνος προσομοίωσης μειώθηκε κατά 69,64% με τη χρήση του ισοδύναμου μοντέλου.



Σχήμα 5.33: Η Τάση στο Ζυγό KTHES1 μέχρι και 5 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.34: Η Τάση στο Ζυγό KTHES1 μέχρι και 80 sec μετά τη διαταραχή.



Κεφάλαιο 5: Πιστοποίηση του Ισοδύναμου Μοντέλου

Σχήμα 5.35: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 10 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 5.36: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 80 sec μετά τη διαταραχή.

5.10 Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της σύγκρισης των αποτελεσμάτων του απλοποιημένου και του αρχικού μοντέλου, προκύπτει πως σε όλα τα σενάρια είχαν παρόμοια συμπεριφορά. Σημαντικό είναι πως σε όλες τις διαταραχές που εξετάστηκαν, οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές που λάμβανε κάθε φορά η τάση το χρονικό διάστημα αμέσως μετά τη διαταραχή, είχαν ελάχιστες αποκλίσεις μεταξύ του αρχικού και του ισοδύναμου μοντέλου. Τέλος, αν και ήταν αναμενόμενο, σε όλες τα διαγράμματα σύγκρισης της τάσης και της συχνότητας, παρατηρείται πως το πλήρες μοντέλο του συστήματος παρουσιάζει ταλαντώσεις που δεν εμφανίζονται στο ισοδύναμο. Αυτό συμβαίνει καθώς ορισμένες από αυτές απαλείφθηκαν με μείωση της τάξης του συστήματος κατά τη διαδικασία της ομαδοποίησης.

Ιδιαίτερα στα Σενάρια 1,2 και 3, όπου οι διαταραχές που εξετάζονται είναι βραχυκυκλώματα, η Τάση και στα δύο μοντέλα λαμβάνει παρόμοιες τιμές καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αντιθέτως, στα Σενάρια όπου η διαταραχή προκαλεί πολλές ταλαντώσεις στην κυματομορφή της τάσης στο αρχικό μοντέλο, υπάρχει κάποια απόκλιση στις τιμές που λαμβάνει η τάση, ή όπως στο Σενάριο 7, η μέγιστη τιμή που αυτή λαμβάνει εμφανίζεται με χρονική διαφορά 5 δευτερολέπτων.

Όσον αφορά τη Συχνότητα, αυτή παρουσιάζει τη μικρότερη απόκλιση μεταξύ των δύο μοντέλων στα Σενάρια 1,2 και 3. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις είτε στις μέγιστες είτε στις ελάχιστες τιμές που αυτή λαμβάνει, υπάρχουν ορισμένες αποκλίσεις. Επιπλέον παρατηρείται πως σε ορισμένα Σενάρια, όπως το Σενάριο 8, αν και οι ελάχιστες τιμές που λαμβάνει η Συχνότητα και στα δύο μοντέλα είναι σχεδόν ίσες, αυτές εμφανίζονται με χρονική διαφορά 3 δευτερολέπτων. Πρώτα εμφανίζεται στο απλοποιημένο μοντέλο.

Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στο Σενάριο 5, όπου η κυματομορφή του ισοδύναμου μοντέλου παρουσιάζει ταλαντώσεις αντίστοιχες με αυτές του αρχικού, αλλά η Συχνότητα λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της 3 δευτερόλεπτα αργότερα στο αρχικό μοντέλο απ' ότι στο απλοποιημένο.

Αξίζει να σημειωθεί πως σε όσα σενάρια έγινε καταγραφή του χρόνου εκτέλεσης της προσομοίωσης, παρατηρήθηκε μείωσή του από 69,64% έως 77,01% όταν γινόταν χρήση του ισοδύναμου μοντέλου σε σύγκριση με το αρχικό. Η μείωση αυτή είναι αρκετά σημαντική, καθώς είναι και ένας από τους βασικότερους στόχους της δημιουργίας ισοδύναμων ελαττωμένων Συστημάτων.
Κεφάλαιο 6: Προσθήκη της Κρήτης στο Μοντέλο

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιήθηκε η πιστοποίηση του ισοδύναμου ελαττωμένου μοντέλου του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, που έγινε με χρήση του PowerFactory. Στο Κεφάλαιο 6 στο ισοδύναμο ελαττωμένο μοντέλο προστίθεται και η Κρήτη, η οποία δεν υπήρχε στο αρχικό σύστημα. Η προσθήκη γίνεται με σχετικά απλό τρόπο, με την προσθήκη μίας γραμμής, ενός Ζυγού και ενός φορτίου στο σύστημα. Στη συνέχεια γίνεται και προσομοίωση βηματικής αύξησης του φορτίου της Κρήτης και παρουσιάζεται η επίδραση που αυτή θα έχει στο σύστημα.

6.1 Μοντελοποίηση της Κρήτης

Καθώς η μοντελοποίηση διασυνδέσεων DC είναι σύνθετη, αλλά και επειδή μέχρι σήμερα η DC διασύνδεση Αττικής-Κρήτης δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα, στο μοντέλο προστίθεται μόνο η AC διασύνδεση της Κρήτης με την Πελοπόννησο. Αυτή, σύμφωνα με στοιχεία του ΑΔΜΗΕ, αποτελείται από 2 κυκλώματα Εναλλασσόμενου Ρεύματος 150 kV, ονομαστικής μεταφορικής ικανότητας 200 MVA έκαστο [17].

Αρχικά προστίθεται στο μοντέλο ένα Ζυγός που αναπαριστά την Κρήτη, οποίος στη συνέχεια συνδέεται στον πλησιέστερο στην Κρήτη Ζυγό της Πελοποννήσου, που έχει διατηρηθεί στο σύστημα. Στο Ζυγό KORINTH1. Στο μοντέλο προστίθεται μόνο το υποθαλάσσιο τμήμα της διασύνδεσης, μήκους 135km [18].

Σύμφωνα με τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς των 200MVA, το ονομαστικό ρεύμα κάθε γραμμής υπολογίζεται 1,333 kA. Καθώς δεν υπάρχουν παραπάνω διαθέσιμες πληροφορίες για τα τεχνικά χαρακτηριστικά του καλωδίου, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές ενός παρόμοιου υποθαλάσσιου AC καλωδίου, που ήδη υπάρχει στο σύστημα.

Τέλος, αν και το μέγιστο φορτίο της Κρήτης είναι περίπου 700MW [19], λόγω του περιορισμού μεταφοράς ισχύος των 400MVA από τα δύο καλώδια AC, στο μοντέλο για την αναπαράσταση της Κρήτης προστίθεται ένα φορτίο 300MW.

6.2 Μελέτη Βηματικής Αύξησης του Φορτίου της Κρήτης

Αρχικά ορίζεται η βηματική αύξηση του Φορτίου της Κρήτης στο Power Factory 1000 δευτερόλεπτα μετά την έναρξη της προσομοίωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1.

,☆ Load Event + Crete\Simulation Events/Fault\Load Event.EvtLod*	×
Out of Service Execution Time Absolute hours 0 minutes 0 seconds	OK Cancel Loads
Event for Single Load Multiple Loads Load ✓ → 30 GR\Crete Load 	
 Event of Load Step Ramp 	
Proportional Load Step Active Power 100. Reactive Power 100. %	

Εικόνα 6.1: Ορισμός της βηματικής αύξησης του φορτίου της Κρήτης.

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 6.1, αποτυπώνεται η Τάση στο Ζυγό KORINTH1 στο Σχήμα 6.2, αποτυπώνεται η Τάση στο Ζυγό KKOUM και στο Σχήμα 6.3, αποτυπώνεται η Συχνότητα του Συστήματος.





Σχήμα 6.1: Η Τάση στο Ζυγό KORINTH1 μέχρι και 50 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 6.2: Η Τάση στο Ζυγό ΚΚΟUΜ μέχρι και 50 sec μετά τη διαταραχή.



Σχήμα 6.3: Η Συχνότητα του Συστήματος μέχρι και 50 sec μετά τη διαταραχή.

6.3 Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω Σχήματα, παρατηρείται πως η βηματική αύξηση του Φορτίου επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο την Τάση σε διάφορα σημεία του Συστήματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1, η Τάση στον Ζυγό KORINTH1, ο οποίος βρίσκεται πολύ κοντά στο Φορτίο της Κρήτης, αν και σταθεροποιείται ξανά 15 δευτερόλεπτα μετά τη βηματική αύξηση του φορτίου, η τελική τιμή που λαμβάνει είναι μειωμένη κατά 0,045 α.μ. σε σχέση με την αρχική. Αντιθέτως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2, η Τάση στον Ζυγό KKOUM, ο οποίος βρίσκεται πιο μακριά από το Φορτίο της Κρήτης, σταθεροποιείται σε αντίστοιχο χρονικό διάστημα μετά τη βηματική αύξηση του φορτίου, η τελική τιμή που λαμβάνει είναι μειωμένη κατά 0,005 α.μ. σε σχέση με την αρχική. Τέλος, η Συχνότητα του Συστήματος, αν και αρχικά ταλαντώνεται, μετά από 30 δευτερόλεπτα λαμβάνει και αυτή μια νέα σταθερή τιμή, μικρότερη από την αρχική κατά 0,0004 α.μ.

Κεφάλαιο 7: Σύνοψη και Συμπεράσματα

7.1 Σύνοψη

Η διπλωματική εργασία αυτή εστίασε στην απλοποίηση του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, με στόχο τη δημιουργία ενός ισοδύναμου ελαττωμένου μοντέλου κατάλληλου για τη διεξαγωγή δυναμικών μελετών. Η απλοποίηση επιτυγχάνεται με τη χρήση της μεθόδου της συνεκτικότητας, η οποία επιτρέπει την ομαδοποίηση γεννητριών και την απλοποίηση των ζυγών του συστήματος, διατηρώντας παράλληλα τα κύρια δυναμικά χαρακτηριστικά του πλήρους μοντέλου.

Η διαδικασία απλοποίησης ακολούθησε τα εξής βήματα:

- Αναγνώριση των ζωνών του Συστήματος που κάθε φορά απλοποιούνταν.
- Ομαδοποίηση γεννητριών βάσει της δυναμικής τους απόκρισης.
- Απαλοιφή ζυγών γεννητριών και φορτίων.
- Δημιουργία ενός μειωμένης τάξης μοντέλου που διατηρεί την επιθυμητή ακρίβεια των δυναμικών προσομοιώσεων σε σχέση με το πλήρες μοντέλο.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ελαττωμένο μοντέλο είναι αρκετά ακριβές στην προσομοίωση διαφόρων σεναρίων, όπως σφάλματα σε γραμμές μεταφοράς, βηματικές αυξήσεις φορτίων και απώλειες γεννητριών. Η σύγκριση μεταξύ των προσομοιώσεων στο πλήρες και το απλοποιημένο μοντέλο έδειξε μικρές αποκλίσεις, επιβεβαιώνοντας την εγκυρότητα της διαδικασίας απλοποίησης.

7.2 Κύρια Συμπεράσματα

Συνοπτικά, τα κυριότερα συμπεράσματα της διπλωματικής είναι τα εξής:

- Το ισοδύναμο μειωμένης τάξης μοντέλο που αναπτύχθηκε παρουσιάζει σημαντική μείωση της πολυπλοκότητας, διατηρώντας παράλληλα τα κύρια δυναμικά χαρακτηριστικά του αρχικού συστήματος, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για την ανάλυση δυναμικών φαινομένων.
- Η μέθοδος της συνεκτικότητας που εφαρμόστηκε αποδείχθηκε αξιόπιστη για την απλοποίηση του συστήματος, καθώς η ομαδοποίηση των γεννητριών έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε το ισοδύναμο σύστημα να έχει παρόμοια συμπεριφορά με το αρχικό.
- Η μείωση του μεγέθους του Συστήματος βελτίωσε σημαντικά τον χρόνο προσομοίωσης, μειώνοντάς τον έως και 77% σε σχέση με το αρχικό μοντέλο.

7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Από την παρούσα διπλωματική εργασία προκύπτουν διάφορα ζητήματα που προσφέρονται για περαιτέρω διερεύνηση και ανάλυση:

- Προσθήκη στο μοντέλο της DC διασύνδεσης της Κρήτης με την Αττική, για τη μελέτη της επιρροής που αυτή θα έχει στο υπόλοιπο σύστημα.
- Ενσωμάτωση στο μοντέλο των υπεράκτιων αιολικών πάρκων που θα υλοποιηθούν στο μέλλον σε διάφορα σημεία του Συστήματος, ώστε να εξεταστεί η δυναμική συμπεριφορά και η απόδοση του δικτύου.
- Απλοποίηση του Συστήματος με τη χρήση μιας διαφορετικής μεθόδου πέραν της συνεκτικότητας, και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους για την αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και αδυναμιών της κάθε μεθόδου.

Βιβλιογραφία

[1] Prabha Kundur, Power System Stability And Control. S.L.: Mcgraw-Hill Education, 2022.

[2] Ν. Α. Βόβος, Ανάλυση, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις: ΖΗΤΗ, 2004 .

[3] ΑΔΜΗΕ, Βασικά Στοιχεία του Ελληνικού Συστήματος.

[4] ADMHE, MEAETH EIIAPKEIAS ISXYOS ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2020 – 2030.

[5] N. Hatziargyriou et al., "Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 4, pp. 3271–3281, Jul. 2021.

[6] Hannah Ritchie and Pablo Rosado (2020) - "Electricity Mix" Published online at OurWorldinData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/electricity-mix'.

[7] J. B. Ward, Equivalent Circuits in Power System Studies, PhD.

[8] S. Djukic and A. Saric, "Dynamic model reduction: An overview of available techniques with application to power systems," Serbian Journal of Electrical Engineering, vol. 9, no. 2, pp. 131–169, 2012.

[9] F. Ma, V. Vittal: Right-sized Power System Dynamic Equivalents for Power System Operation, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 4, Nov. 2011, pp. 1998 – 2005.

[10] J. H. Chow, Power System Coherency and Model Reduction. Springer Science & Business Media, 2014.

[11] H.W. Dommel, N. Sato, Fast Transient Stability Solutions. IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-91, 1643-1650 (1972).

[12] B. Stott, O. Alsac, Fast decoupled power flow. IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-93(3), 859–869 (1974).

[13] J.B. Ward, Equivalent circuits for power-flow studies. AIEE Trans. 68, 373–382 (1949).

[14] W.F. Tinney, W.L. Powell, N.M. Peterson, Sparsity-Oriented Network Reduction in *PICA Conference Proceedings* (Minneapolis, 1973), pp. 384–390.

[15] W.F. Tinney, J.W.Walker, Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization. in *Proceedings of IEEE*55 (1967) pp. 1801–1809.

[16] S. Meier, T. Werner, and Constantin Popescu-Cirstucescu, "Performance considerations in digital substations," Jan. 2016.

[17] ΑΔΜΗΕ - Διασύνδεση της Κρήτης με την Πελοπόννησο.

[18] Hellenic Cables - Διασύνδεση Κρήτης-Πελοποννήσου.

[19] PAE - Προτεινόμενο Υβριδικό Μοντέλο Λειτουργίας Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Κρήτη.