



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

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Χ. Καρακίτσος

Επίβλεψη : Πάυλος Σ. Γεωργιάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013



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

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Χ. Καρακίτσος

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .. Μαρτίου 2013.

.....
Παύλος Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Κορρές
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

.....

Ιωάννης Χ. Καρακίτσος

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

Copyright © Ιωάννης Καρακίτσος, 2013.
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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση στατικής ασφάλειας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση μεθόδων Ροής Φορτίου. Η στατική ασφάλεια ενός δικτύου παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και την επέκταση του συστήματος μεταφοράς αυτού. Πραγματοποιείται λοιπόν η θεωρητική προσέγγιση, και στη συνέχεια το πρόβλημα επιλύεται με τη βοήθεια προσομοιώσεων. Η εργασία αυτή έγινε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος “Intergration of TIMES based energy system modeling with electricity grid modelling”, που χρηματοδοτήθηκε από το Joint Research Center (JRC) της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Για όλες τις απαραίτητες προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας Neplan BCP.

Στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκε υπολογιστική εφαρμογή που πραγματοποιεί αυτοματοποιημένη ενίσχυση ενός δικτύου, προκειμένου να καταστεί στατικά ασφαλές. Η εφαρμογή κατασκευάστηκε με τη βοήθεια της NPL (Neplan Programming Library) του προγράμματος Neplan BCP, και εφαρμόστηκε στο σύστημα 13 ζυγών, και στο ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα των 893 ζυγών. Αρχικά, για κάθε ένα από τα δίκτυα επιλύεται η AC και η DC Ροή Φορτίου, και συγκρίνονται τα αποτελέσματα. Έπειτα, διενεργείται ανάλυση στατικής ασφάλειας, και με χρήση του κριτηρίου της μέγιστης συνολικής υπερφόρτισης, ο αλγόριθμος υπολογίζει τις απαραίτητες ενισχύσεις που απαιτούνται στο δίκτυο που εξετάζεται, για κάθε μία από τις μεθόδους AC και DC Ροής Φορτίου. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεθόδων, συγκρίνονται μεταξύ τους και προτείνονται τρόποι επέκτασης της εργασίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ανάλυση στατικής ασφάλειας, Ροή Φορτίου, υπερφόρτιση, διαταραχή, νησιδοποίηση, ενίσχυση δικτύου, ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα, κριτήριο μέγιστης συνολικής υπερφόρτισης.

ABSTRACT

The target of this thesis is the static security assessment of an electrical energy system, using Load Flow methods. Static security of an electrical network is of vital importance at the design and planning of its transmission network. This thesis was carried out in the frame of the research program entitled “Integration of TIMES based energy system modeling with electricity grid modelling”, funded by Joint Research Center (JRC) of the European Union. All necessary simulations are performed via Neplan BCP, a software specialised in the analysis of electrical networks.

In the present diploma thesis, a computer software was created, with the purpose of automated reinforcement of an electrical network, in order to ensure static security. The application was developed using the Neplan Programming Library of the Neplan software, and it was applied at a 13 bus network, and at the 893 bus hellenic interconnected system. Initially, for each network, the problem of AC and DC Load Flow is solved, and the derived results are compared. Afterwards, the algorithm computes the necessary reinforcements to be done to the examined network, in order to ensure the desired static security, using both methods of AC and DC Load Flow. Results of each method are presented and comparisons on the results are discussed. Finally, aspects on expanding the diploma thesis are proposed.

KEY WORDS

Static security assessment, Load Flow, overloading, contingency, dc load flow, islanding, network reinforcement, hellenic interconnected system, maximum total overloading criteria.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιλάκη, καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την πολύτιμη βοήθεια του. Η αγάπη του για το αντικείμενο και το ενδιαφέρον του με ενθάρρυναν ιδιαίτερος να αναζητήσω και να αποκτήσω ενδιαφέρουσες γνώσεις στα πλαίσια της εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Ε.Μ.Π κ. Κωνσταντίνο Βουρνά, καθώς οι επιστημονικές του γνώσεις, η πολύ ουσιαστική καθοδήγηση και η συνεχής επικοινωνία μαζί του συνέβαλλαν τα μέγιστα στην ολοκλήρωση της εργασίας. Κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας, ήταν διαρκώς διαθέσιμος και πρόθυμος να μου παρέχει πολύτιμες συμβουλές σχετικά με τα προβλήματα που προέκυπταν.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στους συμφοιτητές μου, που με τη συνεργασία κάναμε την πορεία μας στη σχολή πιο εύκολη και ευχάριστη. Τέλος, θα ήθελα να δώσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, και στους φίλους μου, που χωρίς την αγάπη τους και την υποστήριξή τους, δε θα κατάφερνα να φτάσω μέχρι εδώ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	1
1.2	Διερεύνηση δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	1
1.3	Αντικείμενο και δομή της εργασίας	3
1.3.1	Αντικείμενο της εργασίας	3
1.3.2	Δομή της εργασίας	4
1.4	Βιβλιογραφία	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	7
2.1	Εισαγωγή	7
2.2	Ανάλυση ενδεχομένων διαταραχών	9
2.3	Μαθηματικές μέθοδοι επίλυσης	11
2.3.1	Μελέτη διακοπών γραμμών με τη DC Ροή Φορτίου	11
2.3.2	Μελέτη διακοπών γραμμών με την ταχεία αποζευγμένη μέθοδο	19
2.3.3	Μελέτη διακοπών γραμμών με τους συντελεστής κατανομής ροής ισχύος	20
2.4	Ιεράρχηση διαταραχών	24
2.5	Βιβλιογραφία	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ NEPLAN	29
3.1	Περιγραφή περιβάλλοντος	29
3.1.1	Εισαγωγή	29
3.1.2	Ανάλυση στατικής ασφάλειας δικτύου στο Neplan	31
3.1.3	Ενίσχυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	36
3.2	Προγραμματισμός για αυτοματοποιημένη ενίσχυση δικτύου	38
3.2.1	Εισαγωγή	38
3.2.2	Εκπόνηση Αλγορίθμου	39
3.2.2.1	Ανάλυση της δομής	39
3.2.2.2	Ανασκόπηση των αποτελεσμάτων	51
3.3	Βιβλιογραφία	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	57

4.1	Εισαγωγή	57
4.2	Το δίκτυο 13 ζυγών	57
4.2.1	Δεδομένα	57
4.2.2	AC και DC Ροή Φορτίου με Nerlan	60
4.2.3	Εκτέλεση αλγορίθμου	64
4.2.3.1	Επίλυση με AC Ροή Φορτίου	64
4.2.3.2	Επίλυση με DC Ροή Φορτίου	66
4.3	Το ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα	67
4.3.1	Δεδομένα	67
4.3.2	AC και DC Ροή Φορτίου με Nerlan	68
4.3.2.1	Επίλυση με AC Ροή Φορτίου	68
4.3.2.2	Επίλυση με DC Ροή Φορτίου	69
4.3.3	Εκτέλεση αλγορίθμου	71
4.3.3.1	Επίλυση με AC Ροή Φορτίου	71
4.3.3.2	Επίλυση με DC Ροή Φορτίου	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ		81

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί ένα βασικό αγαθό για την ευημερία και την ανάπτυξη των σύγχρονων κοινωνιών. Συνδέεται με την παρουσία και την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία οδήγησαν στην ευρεία εξάπλωση της χρήσης της, είναι τα εξής:

- Είναι εύκολη και αποδοτική η μετάφορά της.
- Είναι εύκολη η μετάτροπή της σε άλλες μορφές ενέργειας.
- Είναι άμεσα διαθέσιμη όταν ζητηθεί.
- Είναι καθαρή στη χρήση της.

Βασικότερο μειονέκτημά της είναι ότι είναι δύσκολο να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες. Ως αποτέλεσμα της δυσκολίας αυτής, απαιτείται η ανάπτυξη εκτεταμένων δικτύων για τη μετάφορά και διανομή της, για να επιτευχθεί η άμεση παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας στους κατάναλωτές.

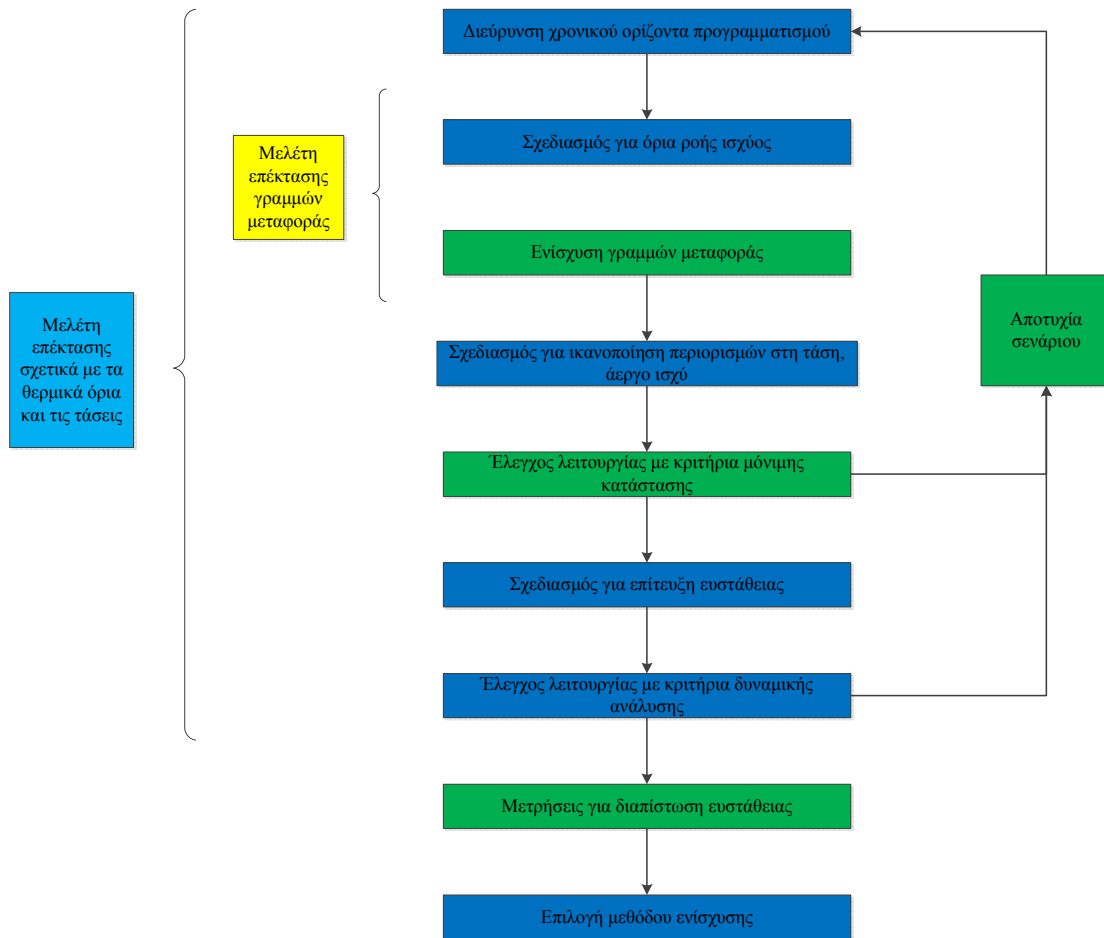
Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) ονομάζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή της ηλεκτρικής ισχύος στον τελικό κατάναλωτή. Τα βασικότερα τμήματα ενός ΣΗΕ είναι τα εξής:

- Οι σταθμοί παραγωγής
- Τα δίκτυα μεταφοράς, που αποτελούν τη διασύνδεση των σταθμών παραγωγής και μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης.
- Τα δίκτυα διανομής, που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους κατάναλωτές Μέσης και Χαμηλής Τάσης.

Βασικές απαιτήσεις για τη σωστή λειτουργία ενός ΣΗΕ είναι η συνεχής παροχή ηλεκτρικής ενέργειας όπου υπάρχει ζήτηση, η εξασφάλιση ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος, δηλαδή σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης, με το ελάχιστο οικονομικό και οικολογικό κόστος [1.1].

1.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μια από τις πολλές οπτικές από την οποία μπορεί να εξεταστεί η λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυτή της μελέτης του δικτύου μεταφοράς αυτού.



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα ροής για τη μελέτη επέκτασης συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

. Ο σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι να αποφασίσει την εγκατάσταση δικτύου μεταφοράς, υποσταθμών, υπό το ελάχιστο δυνατό κόστος, που καθιστά το σύστημα ικανό να τροφοδοτήσει τα φορτία και να διευκολύνει την χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικές από τις παράμετρος που διαμορφώνουν τη συνολική μελέτη είναι η περίοδος προγραμματισμού, η πρόβλεψη του φορτίου, οι πόροι παραγωγής ισχύος, η οικονομική κλίμακα που είναι διαθέσιμη, οι οικονομικοί και πολιτικοί περιορισμοί, η ανάπτυξη της νέας τεχνολογίας, η αβεβαιότητα σε διάφορες προβλέψεις, η αξιοπιστία των υπηρεσιών και το κόστος των ενεργειών.

Η διαδικασία που ακολουθείται σε μια μελέτη επέκτασης του δικτύου είναι [1.2]:

- 1) Προβλέψεις και Καθορισμός Αβεβαιοτήτων
 - Πρόβλεψη Φορτίου.
 - Προβλέψεις σε παραγωγή και σε άλλους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τις ανάγκες του δικτύου μεταφοράς.
- 2) Καθορισμός των εναλλακτικών τρόπων ενίσχυσης του συστήματος
- 3) Ανάλυση και έλεγχος αξιοπιστίας για τις εναλλακτικές επέκτασης

- Ανάλυση Ροής Φορτίου για καθορισμό ροής ισχύος, τάσεως, και απωλειών στις γραμμές μεταφοράς.
 - Ανάλυση στατικής ασφάλειας για εξασφάλιση της αξιοπιστίας.
 - Ανάλυση ευστάθειας για έλεγχο ικανοποίησης του κριτηρίου αξιοπιστίας.
 - Δοκιμές βραχυκύκλωσης προκειμένου να διαπιστωθεί ότι οι υπάρχοντες ή νέοι διακόπτες θα είναι ικανοί να εξυγιάνουν το σφάλμα.
- 4) Ιεράρχηση και ενδεικτικό χρονοδιάγραμμα των επεκτάσεων του συστήματος που θα πραγματοποιηθούν.

Ένα σύστημα πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε να χαρακτηρίζεται από επάρκεια, ισορροπία, ασφάλεια. Η μεθοδολογία ενίσχυσης από την πλευρά της τεχνική διαδικασίας της υλοποίησης απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1.

1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.3.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην ανάλυση στατικής ασφάλειας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, και στην επέκταση του δικτύου μεταφοράς για την επίτευξή της. Η ανάλυση της N-1 κατάστασης διερευνά την περίπτωση της αποκοπής λειτουργίας μιας γραμμής μεταφοράς με επίδραση στις υπόλοιπες γραμμές του συστήματος. Η βασική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε σε διάφορες παραλλαγές, κατάλληλη για την κατάγραφή και κατανόηση της λειτουργίας ενός συστήματος είναι η Ανάλυση Ροής Φορτίου. Ο σκοπός της εργασίας ήταν η ανάπτυξη λογισμικού που πραγματοποιεί αυτοματοποιημένη ενίσχυση σε ένα δίκτυο, ώστε να καταστεί στατικά ασφαλές.

Τα εργαλείο υλοποίησης του λογισμικού είναι το πρόγραμμα προσομοίωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας της Nerplan BCP, και η γλώσσα προγραμματισμού C/C++. Το πρώτο χρησιμοποιήθηκε για όλες τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής, και η σύνταξη κώδικα ήταν απαραίτητη για τη δημιουργία της επιθυμητής εφαρμογής. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε στηρίχθηκε σε ήδη υπάρχουσες συναρτήσεις και ρουτίνες υπολογισμού που παρείχε έτοιμα το πρόγραμμα Nerplan BCP. Καθώς το πρόγραμμα δεν περιλάμβανε πολλές από τις υπορουτίνες υπολογισμών απαραίτητες για την λειτουργία του λογισμικού, ήταν πραγματική πρόκληση να δημιουργηθούν εκ νέου και να ενταχθούν στον κώδικα. Το γεγονός αυτό έκανε απαραίτητη την κατάρτιση κριτηρίου βελτιστοποίησης και την αλγοριθμική κατασκευή αυτού. Το παραγόμενο λογισμικό έπρεπε να δοκιμαστεί και να τροποποιηθεί κάθε φορά που προέκυπταν νέα δεδομένα, αποτελώντας έτσι τη πιο χρονοβόρα φάση της διπλωματικής.

Συγχρόνως, διερευνήθηκε εκτενώς το πρόγραμμα Nerplan BCP και οι δυνατότητές του, ξεκινώντας από τα βασικά συστατικά του μέρη, και κατάληγοντας στις πιο εξειδικευμένες εφαρμογές του. Το συμπέρασμα είναι ότι αποτελεί κατάλληλο εργαλείο για γρήγορη και ευχερή επεξεργασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, και συγχρόνως δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ανάπτυξει δικές του εφαρμογές σε ζητήματα ενεργειακής φύσης,

παρέχοντας αρκετές υπορουτίνες που απλουστεύουν αρκετά τους απαραίτητους χειρισμούς του.

1.3.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο παρόν Κεφάλαιο δόθηκαν οι βασικές έννοιες για την περιγραφή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, αναλύθηκαν οι λόγοι για τους οποίους διεξάγεται η επέκταση του συστήματος μεταφοράς, και αναφέρθηκαν συνοπτικά οι μεθοδολογίες και διαφορετικές προσεγγίσεις που μπορούν να αναπτυχθούν.

Στο **Κεφάλαιο 2** διερευνάται η ανάλυση στατικής ασφάλειας δικτύου, και γίνεται εμβάθυνση στη μελέτη της επίδρασης αποκοπής λειτουργίας γραμμών μεταφοράς. Εξηγείται η έννοια της παραβίασης των ορίων ροής ισχύος μιας γραμμής μεταφοράς μετά από εφαρμογή διαταραχής, και η διαδικασία ενίσχυσης για την εξομάλυνση του προβλήματος. Έπειτα, γίνεται αναφορά στις μαθηματικές μεθόδους υπολογισμού της ανάλυσης N-1 ασφάλειας, που αποτελούν προσεγγιστικές λύσεις βασισμένες στην απλούστευση που παρέχει το λήμμα αντιστροφής. Έτσι, αντί να εξετάζεται μια προς μια η διαταραχή και να επιλύεται εκ νέου η Ροή Φορτίου, τα μαθηματικά αυτά εργαλεία δίνουν γρήγορες και ικανοποιητικές λύσεις. Τελικά, αναφέρεται και μια μέθοδος ιεράρχησης των επιπτώσεων των διαταραχών, με τη βοήθεια κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας, και επίλυσης ενός προβλήματος μερικών παραγώγων.

Στο **Κεφάλαιο 3** πραγματοποιείται μια εισαγωγή στα βασικά μέρη του προγράμματος Nerplan για λόγους εξοικείωσης. Εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο εκτελούνται οι προσομοιώσεις Ροής Φορτίου, η ανάλυση N-1 ασφάλειας (απλή διαταραχή), και η ενίσχυση ενός δικτύου. Έπειτα, εξετάζεται αναλυτικά ο τρόπος κατασκευής του αλγορίθμου για την αυτοματοποιημένη ενίσχυση του δικτύου, δίνεται ένα βοηθητικό διάγραμμα ροής, ο κύριος κορμός αυτού εκφρασμένος υπό τη μορφή ψευδοκώδικα, και κάποια αναλυτικά παραδείγματα για την ευκολότερη κατανόηση της διαδικασίας επιλογής της γραμμής προς ενίσχυση. Επίσης, αναφέρεται ο τρόπος παρουσίασης αποτελεσμάτων του λογισμικού και κάποια γενικά χαρακτηριστικά σχετικά με την εκτέλεσή του.

Στο **Κεφάλαιο 4** το λογισμικό που αναπτύχθηκε δοκιμάζεται σε δύο διαφορετικά δίκτυα: σε ένα των 13 ζυγών, και σε ένα μοντέλο του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος των 893 ζυγών. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Ροής Φορτίου με Nerplan, γίνεται μια σύγκριση μεταξύ της AC και DC μεθοδολογίας, και παρατίθενται οι παραβιάσεις των γραμμών μεταφοράς, και οι ενισχύσεις στις οποίες πρέπει να προβεί το λογισμικό για να είναι κάθε σύστημα στατικά ασφαλές.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται περιοχές για περαιτέρω μελέτη.

1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Κ. Βουρνά , Γ. Κονταξή , *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας* , ΕΜΠ , Αθήνα 2001.
- [1.2] ABB Library. Transmission Planning : An Introduction. [Online] Διαθέσιμο : <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=Con0038&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. Προσπελάστηκε τον Ιανουάριο του 2013.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

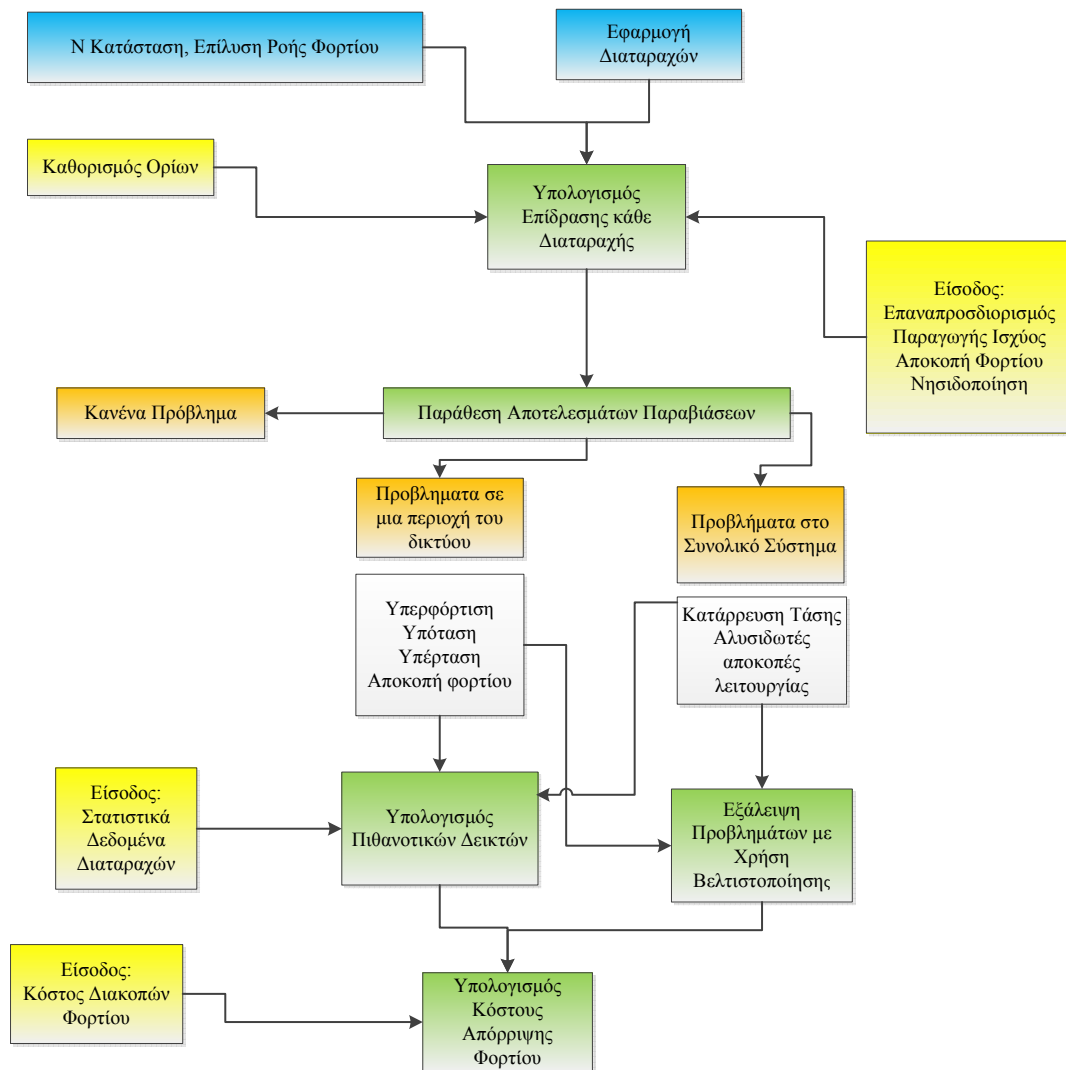
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Καθώς η ζήτηση για κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται, εμφανίζεται επιπρόσθετη επιβάρυνση στα ηλεκτρικά δίκτυα, καθιστώντας τις βλάβες των στοιχείων του συστήματος πιο συχνές. Είναι φανερή λοιπόν η αναγκαιότητα της εξασφάλισης ενός αξιόπιστου δικτύου, όπου θα αποφεύγονται όσο είναι δυνατό οι ανεπιθύμητες κατάστασεις λειτουργίας (Πίνακας 2.1).

Η ανάλυση στατικής ασφάλειας δικτύου συνεπάγεται την εξέταση της συμπεριφοράς του συστήματος υπό διάφορες διαταραχές, ώστε να καθοριστεί η επάρκεια και ευρωστία αυτού (Σχήμα 2.1).

Πίνακας 2.1: Έλεγχος αξιοπιστίας για διάφορες κατάστασεις

	Συνθήκες Ελέγχου	Ανάλυση	Αποδεκτή Κατάσταση Συστήματος
Απαραίτητος Έλεγχος Αξιοπιστίας	Κανονική Λειτουργία (N Κατάσταση)	Ροή Φορτίου	Το σύστημα βρίσκεται στα αποδεκτά όρια φόρτισης γραμμών και τάσεων των ζυγών.
	Απλή Διαταραχή (N-1 Κατάσταση)	Ροή Φορτίου	Το σύστημα βρίσκεται στα όρια έκτακτης ανάγκης αμέσως μετά την εφαρμογή διαταραχής, και στα κανονικά όρια μετά τον κατάλληλο χειρισμό ανάλογα με την περίπτωση της βλάβης.
	Δύο Ταυτόχρονες Διαταραχές (N-2 Κατάσταση)	Ροή Φορτίου	Το σύστημα βρίσκεται στα όρια έκτακτης ανάγκης μετά τον κατάλληλο χειρισμό ανάλογα με την περίπτωση της βλάβης.
	Δυναμικές Διαταραχές (N-3 Κατάσταση ή περισσότερο)	Ανάλυση Μόνιμης Κατάστασης	Δεν συμβαίνει κατάρρευση τάσης ή αλυσιδωτές υπερφορτίσεις στις γραμμές.
		Δυναμική Ανάλυση	Μετάβατικά και δυναμικά ευσταθές.
Περαιτέρω Έλεγχος για Αξιολόγηση της Αξιοπιστίας	Σοβαρές Διαταραχές	Ανάλυση Μόνιμης και Μεταβατικής Κατάστασης	Αποφυγή εξάπλωσης της αποκοπής φορτίου, μπλακ άουτ.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής για την ανάλυση στατικής ασφάλειας.

Εάν το σύστημα δεν είναι στατικά ασφαλές η διακοπή λειτουργίας ενός στοιχείου μπορεί να πυροδοτήσει επιπρόσθετες βλάβες με στοιχεία που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, που στη χειρότερη περίπτωση θα προκαλούσε ολική κατάρρευση του συστήματος [2.1]. Οι εξεταζόμενες συνθήκες λειτουργίας που συνιστούν ένα υποσύνολο ενδεχομένων διαταραχών (contingencies) μπορεί να είναι:

1. Μόνιμη διακοπή μίας ή περισσότερων γραμμών μεταφοράς
2. Απώλεια μιας γεννήτριας
3. Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα.

Η υλοποίηση της ανάλυσης ασφάλειας σε περιβάλλον πραγματικής λειτουργίας επιτυγχάνεται με συστήματα τηλεμετρίας ή SCADA. Ο διαχειριστής ενημερώνεται εξετάζοντας τις ενδεχόμενες διαταραχές ιεραρχημένες σύμφωνα με τη μεγαλύτερη επίπτωση στη λειτουργία του συστήματος, προκειμένου να ενεργήσει ανάλογα σε περίπτωση ανάγκης [2.1].

2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ

Η κατάσταση του συστήματος όπου ένα στοιχείο έχει τεθεί εκτός λειτουργίας καλείται N-1 κατάσταση. Εάν μελετηθεί η περίπτωση όπου 2, 3, ..n στοιχεία τίθενται ταυτόχρονα εκτός λειτουργίας και εξετάζεται η συμπεριφορά των υπολοίπων, τότε γίνεται λόγος για N-2, N-3 , ..N-n ανάλυση. Σε περίπτωση που για όλες τις διαταραχές που εξετάζονται, δεν παραβιάζεται κανένα όριο, το σύστημα καλείται N-1 ή στατικά ασφαλές.

Στο πλαίσιο ανάλυσης της παρούσας εργασίας, κάθε φορά που γίνεται λόγος για ανάλυση N-1 κατάστασης (απλή διαταραχή), θα πραγματοποιούνται οι εξής ενέργειες:

1. Μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας τίθεται εκτός λειτουργίας
2. Διενεργείται μελέτη Ροής Φορτίου και εξετάζεται εάν τα όρια φόρτισης στις υπόλοιπες γραμμές μεταφοράς, και τάσεων στους ζυγούς βρίσκονται σε αποδεκτά πλαίσια.
3. Επανάλαμβάνονται τα βήματα 1, 2 για όλες τις γραμμές μεταφοράς του συστήματος, εξαιρουμένων αυτών που προκαλούν νησιδοποίηση του δικτύου εάν τεθούν εκτός λειτουργίας.

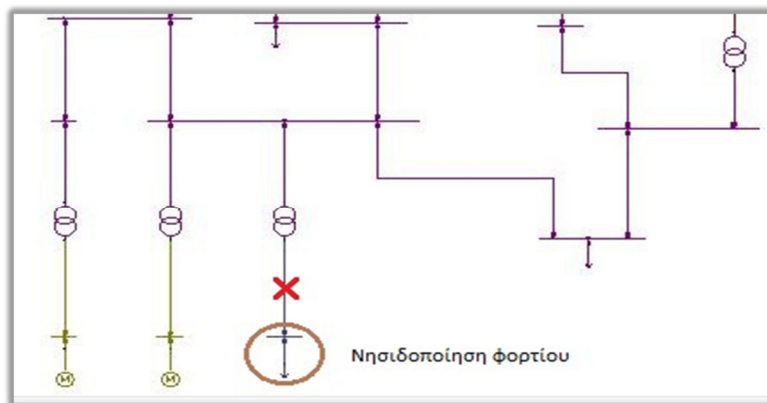
Συγκεκριμένα σε αυτή την ανάλυση, εξετάζεται η συμπεριφορά των υπόλοιπων στοιχείων, για τη διαταραχή της διακοπής λειτουργίας κάποιων γραμμών μεταφοράς. Διερευνείται κατά πόσο οι γραμμές μεταφοράς, και οι μετασχηματιστές λειτουργούν στα όρια φόρτισής τους, και εάν οι τάσεις των ζυγών βρίσκονται σε αποδεκτά όρια μετά τη διακοπή λειτουργίας μιας γραμμής. Στη συνέχεια, μελετάται η κατάλληλη ενίσχυση ή επέκταση του δικτύου προκειμένου να καταστεί στατικά ασφαλές, λαμβάνοντας υπόψη και κριτήρια ελαχιστοποίησης κόστους. Η ανάγκη για αδιάλειπτη τροφοδότηση του φορτίου καθιστά σημαντική τη στατική ασφάλεια ενός συστήματος.

Τα όρια που ελέγχονται για κάθε διαταραχή απεικονίζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2.2. Συγκεκριμένα, η φόρτιση μίας γραμμής μεταφοράς L_{k-m} αναφέρεται στη φαινόμενη ισχύ που ρέει σε αυτή S_{k-m} , σε σχέση με την ονομαστική S_n :

$$L_{k-m} = \frac{S_{k-m}}{S_n} \quad (2.1)$$

Πίνακας 2.2: Επιτρεπτά όρια λειτουργίας συστήματος

Στοιχείο	Κατάσταση Λειτουργίας Συστήματος	
	N	N-1
Γραμμή Μεταφοράς	100%	100%
Τάση Ζυγού	95-105%	90-110%



Σχήμα 2.2 : Παράδειγμα διακοπής λειτουργίας στοιχείου που προκαλεί νησιδοποίηση.

Σημειώνεται ότι για την ονομαστική ισχύ, η τάση λειτουργίας λαμβάνεται ως η ονομαστική της γραμμής μεταφοράς, οπότε το όριο φόρτισης εξαρτάται από τη τιμή του ρεύματος που ρέει στη γραμμή, όπως φαίνεται από τη σχέση:

$$S = \sqrt{3} * V_{\pi} * I \quad (2.2)$$

Νησιδοποίηση είναι το φαινόμενο όπου ένα τμήμα του δικτύου δεν τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια (Σχήμα 2.2).

Συνεπώς, εφόσον είναι πιθανόν εφαρμόζοντας διαταραχές στις γραμμές να προκληθεί νησιδοποίηση, εξαιρούνται από την ανάλυση αυτές που οδηγούν σε νησιδοποίηση.

Ύστερα από την ανάλυση ενδεχομένων διαταραχών οι εξής ενέργειες μπορούν να εκτελεστούν κάποιες από τις ακόλουθες ενέργειες ώστε το σύστημα να καταστεί N-1 ασφαλές:

- Μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (φορτίο) με τη βοήθεια αναλύσεων διαχείρισης και επάρκειας ενέργειας.
- Αύξηση δυναμικότητας παραγωγής ισχύος κοντά στην περιοχή που έχει μεγαλύτερη ζήτηση.
- Ενίσχυση δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να είναι ικανό να μεταφέρει μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος.

Η μέθοδος στην οποία εστιάζεται η παρούσα εργασία είναι η ενίσχυση των γραμμών μεταφοράς, η οποία επιτυγχάνεται προσθέτοντας μια παράλληλη γραμμή δίπλα σε μία ήδη υπάρχουσα.

Βασικό εργαλείο για την εύρεση των ροών ισχύος και τάσεων αποτελεί η μέθοδος της Ροής Φορτίου. Με τη βοήθεια της AC Ροής Φορτίου που μπορεί να πραγματοποιείται με κάποια από τις γνωστές μεθόδους (Newton-Raphson, Gauss-Siedel, Ταχεία Αποζευγμένη Μέθοδος ..) , προκύπτουν τα αποτελέσματα συγκριτικά με τα όρια, και ελέγχεται εάν εξαλείφεται το πρόβλημα μετά από τυχόν ενίσχυση του δικτύου.

Σε κάποιες περιπτώσεις είναι αναγκαίο να επιλυθεί το πρόβλημα Βέλτιστης Ροής Φορτίου (OPF) , προκειμένου να εξασφαλισθεί η στατική ασφάλεια του συστήματος. Ουσιαστικά, η εισροή ισχύος από τις γεννήτριες δεν είναι καθορισμένη, αλλά αποτελεί άγνωστο ενός συστήματος που οδηγείται από μία αντικειμενική συνάρτηση. Η συνάρτηση αυτή μπορεί να σχετίζεται με την οικονομικότερη λειτουργία γεννητριών, ελαχιστοποίηση απωλειών, και στην περίπτωση της εργασίας αυτής ελαχιστοποίηση παραβιάσεων σχετικά με τις ροές ισχύος και τάσεις του συστήματος. Γίνεται τότε λόγος για ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος με περιορισμούς ασφάλειας (Security Constrained Optimal Power Flow , SCOPF) [2.2].

Για την επίλυση του προβλήματος N-1 ασφάλειας χρησιμοποιείται μια πληθώρα διαφορετικών προσεγγίσεων, όπως είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι, τα νευρωνικά δίκτυα, και οι προσεγγιστικές μαθηματικές τεχνικές που κάνουν χρήση των μεθόδων Ροής Φορτίου.

2.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

2.3.1 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΚΟΠΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕ DC ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η μεθολογία αυτή στηρίζεται σε ένα απλουστευμένο σύστημα εξισώσεων που εξάγεται από τη DC Ροή Φορτίου [2.3], και δίνει τη λύση του προβλήματος για κάθε διαταραχή στις γραμμές μεταφοράς, χωρίς να χρειάζεται να επιλυθεί εκ νέου το σύστημα με AC Ροή Φορτίου. Αφετηρία στην κατάστροψη των εξισώσεων αποτελεί το λήμμα αντιστροφής μήτρας, που διατυπώνεται ως εξής:

Έστω:

- $A = n \times n$ αντιστρεπτή μήτρα
- $C, D = n \times m$ μήτρες (συνήθως $m \ll n$)
- $I_m = m \times m$ μοναδιαία μήτρα

Τότε ισχύει:

$$(A + CD^T)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}C(I_m + D^T A^{-1}C)^{-1}D^T A^{-1} \quad (2.3)$$

Η σχέση αυτή επιτρέπει την αντιστροφή της μήτρας $U = I_m + D^T A^{-1}C$ που είναι διαστάσεων $m \times m$, αντί της $L = A + CD^T$ που είναι διαστάσεων $n \times n$, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι ο A^{-1} έχει υπολογιστεί. Συγκεκριμένα, θεωρώντας ότι $m=1$ και :

$$\begin{aligned} C &= k\underline{c} \\ D &= \underline{d} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Υποθέτοντας ότι έχει γίνει τριγωνική παραγοντοποίηση της μήτρας A , ορίζεται διάνυσμα $\underline{\Phi}$, όπου για τον υπολογισμό του απαιτείται μια ευθεία και αντίστροφη αντικατάσταση στο διάνυσμα \underline{c} :

$$\underline{\Phi} = A^{-1} \underline{c} \quad (2.5)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.4), (2.5) στην (2.3) λαμβάνεται:

$$(A + k \underline{c} \underline{d}^T)^{-1} = A^{-1} - \frac{k}{1 + k \underline{d}^T \underline{\Phi}} \underline{\Phi} \underline{d}^T A^{-1} \quad (2.6)$$

Στη συνέχεια, θα θεωρηθεί ότι:

$$\underline{c} = \underline{d} = \underline{e}_{ij} \quad (2.7)$$

όπου το διάνυσμα \underline{e}_{ij} παριστά ένα διάνυσμα διαστάσεως n με όλα τα στοιχεία μηδενικά εκτός των στοιχείων i και j που έχουν τη τιμή 1 και -1 αντίστοιχα:

$$e_{ij} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ i \text{ γραμμή} \\ \\ \\ \\ \\ \\ j \text{ γραμμή} \\ \\ \end{matrix} \quad (2.8)$$

Επιπλέον, θα ισχύει:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cc}
 & \begin{array}{cc}
 i \text{ στήλη} & j \text{ στήλη}
 \end{array} \\
 \begin{array}{c}
 \\ \\ \\ \\ \\ \\
 \end{array}
 \end{array}
 \left[\begin{array}{cccccc}
 0 & 0 & 0.. & 0 & 0 & .. \\
 0 & k & 0.. & 0 & -k & 0 \\
 .. & 0 & 0.. & 0 & 0 & 0 \\
 .. & 0 & 0.. & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -k & 0.. & 0 & k & 0 \\
 .. & 0 & 0.. & 0 & 0 & 0
 \end{array} \right]
 \begin{array}{c}
 \\ \\
 i \text{ γραμμή} \\ \\ \\ \\
 j \text{ γραμμή}
 \end{array}
 \end{array}
 \quad (2.9)$$

Συνεπώς, από τη (2.6) λαμβάνεται :

$$(A + k e_{ij} e_{ij}^T)^{-1} = A^{-1} - \frac{k}{1 + k(\Phi_i - \Phi_j)} \Phi e_{ij}^T A^{-1} \quad (2.10)$$

όπου Φ_i, Φ_j είναι το i-οστό και j-οστό στοιχείο του διανύσματος $\underline{\Phi}$ όπως υποδεικνύει η σχέση:

$$\underline{\Phi} = A^{-1} e_{ij} \quad (2.11)$$

Συνοπτικά οι σχέσεις που διέπουν το πρόβλημα της DC Ροής Φορτίου για ένα σύστημα n ζυγών, για κάθε ζυγό εκτός από το ζυγό ταλαντώσεως είναι:

$$\underline{P} = |C| \underline{\delta}$$

$$C_{km} = V_k V_m b_{km} \quad (2.12)$$

$$C_{kk} = - \sum_{m \in a(k)} C_{km}$$

$$P_{km} = -C_{km} (\delta_k - \delta_m)$$

όπου:

$$\underline{P} = \begin{pmatrix} P_2 \\ P_3 \\ \dots \\ P_n \end{pmatrix}, \quad \underline{\delta} = \begin{pmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \\ \dots \\ \delta_n \end{pmatrix}, \quad |C| = \begin{pmatrix} C_{22} & \dots & \dots & C_{2n} \\ \dots & C_{33} & \dots & C_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n2} & \dots & \dots & C_{nn} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Το διάνυσμα \underline{P} δηλώνει την έγχυση ενεργού ισχύος σε κάθε ζυγό, το $\underline{\delta}$ τη γωνία της τάσεως σε αυτόν, και τα στοιχεία της μήτρας \underline{C} υπολογίζονται από τις σχέσεις (2.12). Το μέγεθος b_{km} αποτελεί το φανταστικό μέρος της αγωγιμότητας μεταξύ των ζυγών k και m , και η P_{km} την ενεργό ισχύ που ρέει μεταξύ των ζυγών k και m .

Έστω ένα σύστημα n ζυγών που οι εξισώσεις (2.12) εκφράζουν τις ροές πριν εφαρμοστεί μια διαταραχή. Η διακοπή της γραμμής μεταξύ των ζυγών k και m προκαλεί τη μετάβολή της μήτρας \underline{C} και τη μετάβολή του διανύσματος $\underline{\delta}$. Ορίζονται τώρα οι μήτρες \underline{C}' και $\underline{\delta}'$ που περιέχουν την ανάνεωμένες τιμές λειτουργίας του συστήματος μετά τη διακοπή της γραμμής km . Οι εξισώσεις ροών φορτίου πλέον είναι:

$$\underline{P} = |C'| \underline{\delta}' \quad (2.14)$$

Με τη βοήθεια της σχέσης (2.9) μπορεί να προκύψει η ανάβάθμιση της μήτρας από \underline{C} σε \underline{C}' για την περίπτωση διακοπής λειτουργίας της γραμμής km ως εξής:

$$|C'| = |C| + C_{km} \underline{e}_{km} \underline{e}_{km}^T \quad (2.15)$$

Από τη (2.14) εξάγεται :

$$\underline{\delta}' = |C'|^{-1} \underline{P} = (C + C_{km} \underline{e}_{km} \underline{e}_{km}^T)^{-1} \underline{P} \quad (2.16)$$

Στη συνέχεια, τροποιώντας με χρήση της (2.10) λαμβάνεται:

$$\begin{aligned} \underline{\delta}' &= |C|^{-1} \underline{P} - \frac{C_{km}}{1 + C_{km} (\Phi_k - \Phi_m)} \Phi \underline{e}_{km}^T |C|^{-1} \underline{P} \Rightarrow \\ \underline{\delta}' &= \underline{\delta} - \frac{C_{km}}{1 + C_{km} (\Phi_k - \Phi_m)} \Phi \underline{e}_{km}^T \underline{\delta} \Rightarrow \\ \underline{\delta}' &= \underline{\delta} - \frac{C_{km} (\delta_k - \delta_m)}{1 + C_{km} (\Phi_k - \Phi_m)} \Phi \end{aligned} \quad (2.17)$$

όπου:

$$\underline{\Phi} = |C|^{-1} e_{km} \quad (2.18)$$

Παρατηρώντας τον αριθμητή της (2.17) , προκύπτει ότι αποτελεί, σύμφωνα με τις σχέσεις (2.12), τη ροή P_{km} πριν από τη διακοπή της γραμμής km. Συνεπώς η εξίσωση (2.17) μπορεί να γραφεί:

$$\underline{\delta}' = \underline{\delta} + \frac{P_{km}}{1 + C_{km}(\Phi_k - \Phi_m)} \underline{\Phi} \quad (2.19)$$

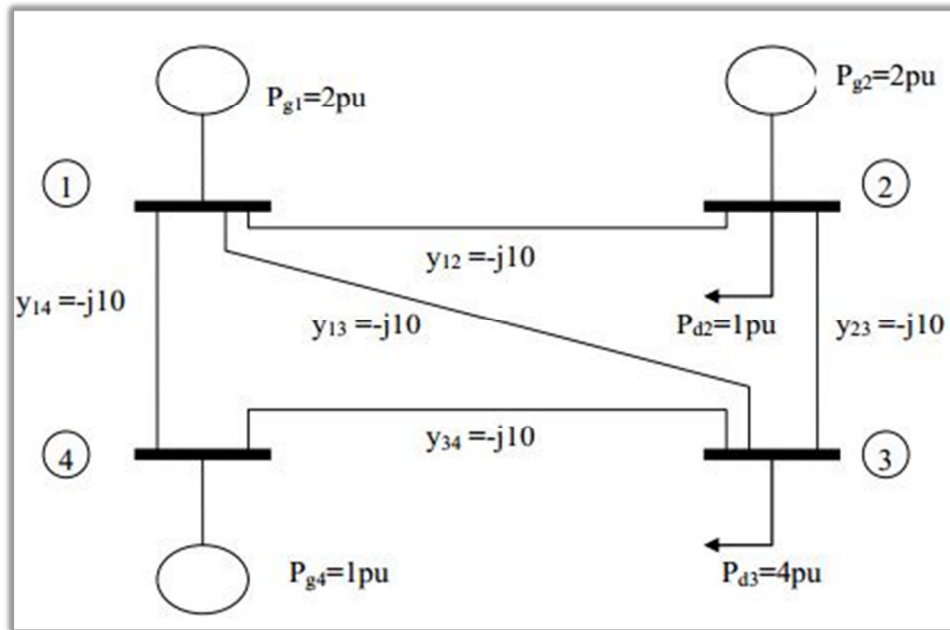
Άρα τελικά η μετάβολή του διανύσματος $\underline{\delta}$, εξαιτίας της διακοπής της γραμμής km είναι:

$$\Delta \underline{\delta} = \underline{\delta}' - \underline{\delta} = \frac{P_{km}}{1 + C_{km}(\Phi_k - \Phi_m)} \underline{\Phi} \quad (2.20)$$

Η μετάβολή της ροής ισχύος σε μια γραμμή ij, εξαιτίας της διακοπής της γραμμής km υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ij} &= -C_{ij}(\Delta \delta_i - \Delta \delta_j) = -C_{ij} e_{ij}^T \Delta \underline{\delta} \Rightarrow \\ \Delta P_{ij} &= -C_{ij} \frac{P_{km}}{1 + C_{km}(\Phi_k - \Phi_m)} e_{ij}^T \underline{\Phi} \Rightarrow \\ \Delta P_{ij} &= -\frac{C_{ij} P_{km} (\Phi_i - \Phi_j)}{1 + C_{km}(\Phi_k - \Phi_m)} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Για να γίνει περισσότερο κατανητή, η μέθοδος αυτή θα εφαρμοστεί σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας 4 ζυγών [2.4], προκειμένου να διερευνηθούν οι αλλαγές στη ροή ισχύος σε περίπτωση διακοπής κάποιων γραμμών . Τα στοιχεία του συστήματος συνοπτικά απεικονίζονται στο Σχήμα 2.3:



Σχήμα 2.3 : Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος 4 ζυγών.

Εφόσον η έγχυση ενεργού ισχύος σε ένα ζυγό δίδεται από τη σχέση:

$$P_k = P_{GK} - P_{DK} \quad (2.22)$$

και η μήτρα αγωγιμότητας υπολογίζεται:

$$|Y| = j \begin{vmatrix} -30 & 10 & 10 & 10 \\ 10 & -20 & 10 & 0 \\ 10 & 10 & -30 & 10 \\ 10 & 0 & 10 & -20 \end{vmatrix} \text{ p.u}$$

Σύμφωνα με τις μήτρες που ορίστηκαν στη θεμελίωση του προβλήματος D.C Ροής Φορτίου εξάγεται για το άνω σύστημα:

$$\underline{P} = \begin{vmatrix} 2 \\ 1 \\ -4 \\ 1 \end{vmatrix} \text{ p.u} , \quad |C| = \begin{vmatrix} 30 & -10 & -10 & -10 \\ -10 & 20 & -10 & 0 \\ -10 & -10 & 30 & -10 \\ -10 & 0 & -10 & 20 \end{vmatrix} \text{ p.u}$$

Στη συνέχεια, επειδή οι τέσσερις άγνωστες μεταβλητές δεν είναι ανεξάρτητες, η γωνία δ_1 λαμβάνεται ως αναφορά και δίνεται σε αυτήν η τιμή 0 προκειμένου να έχει λύση το σύστημα.

Με άλλα λόγια ο ζυγός 1 είναι ζυγός ταλάντωσης ή αναφοράς. Το σύστημα προς επίλυση με βάση την (2.12) δίνει:

$$\underline{P} = \begin{vmatrix} 1 \\ -4 \\ 1 \end{vmatrix} \text{ p.u.}, \quad |C| = \begin{vmatrix} 20 & -10 & 0 \\ -10 & 30 & -10 \\ 0 & -10 & 20 \end{vmatrix} \text{ p.u.}$$

$$\underline{\delta} = \begin{vmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ -0.025 \\ -0.15 \\ -0.025 \end{vmatrix} \text{ rad} \quad (2.23)$$

$$P_{12} = -C_{12}(\delta_1 - \delta_2) = -(-10) * (0 - (-0.025)) = 0.25 \text{ p.u.}$$

$$P_{13} = 1.5 \text{ p.u.}$$

$$P_{14} = 0.25 \text{ p.u.}$$

$$P_{23} = 1.25 \text{ p.u.}$$

$$P_{34} = -1.25 \text{ p.u.}$$

Από την επίλυση των (2.18), (2.21) λαμβάνονται τα εξής:

Εάν τεθεί εκτός λειτουργίας η γραμμή 2-3, για τους πίνακες e_{km} , και $\underline{\Phi}$ ισχύει:

$$e_{km} = \begin{vmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad \underline{\Phi} = \begin{vmatrix} \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \end{vmatrix} = C^{-1} e_{km} = \begin{vmatrix} 0.0625 & 0.025 & 0.0125 \\ 0.025 & 0.05 & 0.025 \\ 0.0125 & 0.025 & 0.0625 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.0375 \\ -0.025 \\ -0.0125 \end{vmatrix}$$

Η αλλαγή στη ροή ισχύος στη γραμμή 3-4 είναι:

$$\Delta P_{34} = -\frac{C_{34} P_{23} (\Phi_3 - \Phi_4)}{1 + C_{23} (\Phi_2 - \Phi_3)} = -0.4167 \text{ p.u.}$$

$$P'_{34} = P_{34} + \Delta P_{34} = -1.25 - 0.4167 \approx -1.67 \text{ p.u.} \quad (2.24)$$

Αντίστοιχα για διακοπή της γραμμής 3-4, η γραμμή 2-3 επηρεάζεται ως εξής:

$$e_{km} = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{vmatrix}, \quad \underline{\Phi} = \begin{vmatrix} \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \end{vmatrix} = C^{-1} e_{km} = \begin{vmatrix} 0.0625 & 0.025 & 0.0125 \\ 0.025 & 0.05 & 0.025 \\ 0.0125 & 0.025 & 0.0625 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.0125 \\ 0.025 \\ -0.0375 \end{vmatrix}$$

$$\Delta P_{23} = -\frac{C_{23} P_{34} (\Phi_2 - \Phi_3)}{1 + C_{34} (\Phi_3 - \Phi_4)} = 0.4167 p.u$$

$$P'_{23} = P_{23} + \Delta P_{23} = 1.25 + 0.4167 \approx 1.67 p.u \quad (2.25)$$

Η προσέγγιση των νέων ροών ισχύος σε περίπτωση εφαρμογής διαταραχών απεικονίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.3. Είναι φανερή η επιβάρυνση που προκύπτει στα υπόλοιπα στοιχεία, εάν συμβεί μια βλάβη σε κάποια γραμμή μεταφοράς. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να επεκταθεί ώστε για ένα δίκτυο πολλών ζυγών, να εξεταστούν οι επιπτώσεις της εφαρμογής διαταραχών στο σύστημα, σε ικανοποιητικό χρόνο και με μικρή πολυπλοκότητα στους υπολογισμούς. Η έλλειψη ακρίβειας, που προκύπτει λόγω των παραδοχών που λήφθηκαν σε σχέση με τη DC Ροή Φορτίου, ισοσταθμίζεται με την αποφυγή μαθηματικών πράξεων που απαιτεί η AC Ροή Φορτίου, (LRU παραγοντοποίηση..), οι οποίες για μεγαλύτερα συστήματα προσδίδουν περισσότερο κόστος σε χρόνο.

Γενικά τα πλεονεκτήματα της DC Ροής Φορτίου είναι:

- Υπολογιστική ταχύτητα, δεν απαιτούνται ανακυκλώσεις.
- Τα θερμικά και τα όρια ενεργού ισχύος δεν αμελούνται.
- Η τοπολογία του δικτύου επιλύεται με απλές γραμμικές μεθόδους.
- Αποτελεί πολύ καλή προσέγγιση για ένα μεγάλο εύρος περιπτώσεων και συνθηκών. Δεν απαιτεί μεγάλη γνώση των δεδομένων ενός συστήματος.

Υστερεί όμως στα παρακάτω σημεία:

- Δεν λαμβάνονται υπόψη τα όρια της τάσεως των ζυγών, αφού όλα θεωρείται ότι έχουν τιμή ίση με την ονομαστική.
- Δεν είναι ακριβής στις περιπτώσεις όπου η ροή αέργου ισχύος και οι διακυμάνσεις της τάσεως λαμβάνουν σημαντικές τιμές.
- Η αντιμετώπιση του συστήματος ως γραμμικό, καθώς αυξάνεται η πολυπλοκότητα του προσδίδει περισσότερο σφάλμα στα αποτελέσματα.

Πίνακας 2.3: Επίδραση διακοπής γραμμών στο σύστημα

Γραμμή εκτός λειτουργίας	Επίδραση στη γραμμή	Ροή ισχύος στη N κατάσταση (p.u)	Ροή ισχύος στη N-1 κατάσταση (p.u)	Αλλαγή στη ροή ισχύος εξαιτίας αποκοπής γραμμής p.u
2-3	3-4	1.25	1.67	0.42
3-4	2-3	-1.25	-1.67	0.42

2.3.2 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΚΟΠΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΤΑΧΕΙΑ ΑΠΟΖΕΥΓΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟ

Η παρούσα μέθοδος έχει ως θεμέλιο την ταχεία αποζευγμένη μέθοδο Ροής Φορτίου [2.3], όπου με χρήση του λήμματος αντιστροφής (2.3), (2.6) οδηγούμαστε σε μια συστηματοποιημένη διαδικασία προσεγγιστικού υπολογισμού της απόκρισης του συστήματος σε περίπτωση διακοπής μίας γραμμής. Αρχικά για κανονική κατάσταση λειτουργίας, οι μητρικές εξισώσεις που απαιτούν λύση σε κάθε ανάκύκλωση της μεθόδου είναι:

$$|B'| \Delta \delta = \left| \frac{\Delta P}{V} \right| \quad (2.26)$$

$$|B''| \Delta V = \left| \frac{\Delta Q}{V} \right| \quad (2.27)$$

Έχοντας ως αφετηρία την Ν κατάσταση λειτουργίας, υποτίθεται ότι οι μήτρες \underline{B}' , \underline{B}'' έχουν τριγωνοποιηθεί, και ότι το διάνυσμα κατάστασης ($\underline{\delta}$, \underline{V}) περιγράφει το λειτουργικό σημείο του συστήματος που έχει υπολογιστεί πριν από τη διακοπή της γραμμής km. Στη συνέχεια, για να ενσωματωθεί η απομάκρυνση της γραμμής στο μαθηματικοποιημένο σύστημα, θεωρείται ότι αυτή προκαλεί την παρακάτω μετάβολή στις μήτρες \underline{B}' , \underline{B}'' , ορίζοντας τις νέες μήτρες \underline{B}'_N , \underline{B}''_N :

$$|B'_N| = |B'| + B'_{km} e'_{km} e'^T_{km} \quad (2.28)$$

$$|B''_N| = |B''| + B''_{km} e''_{km} e''^T_{km} \quad (2.29)$$

όπου:

B'_{km} , B''_{km} : στοιχεία των μητρών \underline{B}' , \underline{B}'' αντίστοιχα.

e'_{km} : διάνυσμα διαστάσεως (n-1) x 1 και ορίζεται ως εξής: όλα τα στοιχεία είναι μηδέν εκτός από το στοιχείο (k-1) που είναι 1, και το στοιχείο (m-1) που είναι 0.

e''_{km} : διάνυσμα διαστάσεως ίσης με τον αριθμό των ζυγών φορτίου (PQ) και ορίζεται ως εξής: όλα τα στοιχεία είναι μηδέν εκτός από το στοιχείο που αντιστοιχεί στο ζυγό k, που είναι 1, και το στοιχείο που αντιστοιχεί στο ζυγό m, όπου είναι -1. Αν κάποιος από τους δύο ζυγούς k και m δεν είναι ζυγός φορτίου, το αντίστοιχο στοιχείο είναι επίσης 0. Αν και οι δύο ζυγοί δεν είναι ζυγοί φορτίου τότε όλα τα στοιχεία του διανύσματος είναι μηδενικά.

Έπειτα, λαμβάνοντας υπόψη τη διακοπή της γραμμής km, κατάστρώνονται οι παρακάτω μητρικές εξισώσεις, που θα πρέπει να επιλυθούν επανάληπτικά:

$$|B'_N| \Delta \delta = \left| \frac{\Delta P}{V} \right| \quad (2.30)$$

$$|B''_N| \Delta V = \left| \frac{\Delta Q}{V} \right| \quad (2.31)$$

Υπολογίζεται το διάνυσμα $\Delta P/V$ για τα νέα δεδομένα και εφαρμόζοντας το λήμμα αντιστροφής (2.10) στη (2.30) προκύπτει:

$$\Delta \underline{\delta} = \underline{\delta}_1 - \frac{B'_{km} (\delta_{1,k} - \delta_{1,m})}{1 + B'_{km} (\Phi'_k - \Phi'_m)} \underline{\Phi}' \quad (2.32)$$

όπου :

$$\underline{\delta}_1 = |B'|^{-1} \left| \frac{\Delta P}{V} \right| \quad (2.33)$$

$$\underline{\Phi}' = |B'|^{-1} \underline{e}'_{km} \quad (2.34)$$

Με τη βοήθεια της (2.32) υπολογίζεται το διάνυσμα $\Delta \underline{\delta}$, και στη συνέχεια ανανεώνεται το διάνυσμα γωνιών $\underline{\delta} + \Delta \underline{\delta} \rightarrow \underline{\delta}$. Επιπλέον, βρίσκεται το διάνυσμα $\Delta Q/V$ για τη N-1 κατάσταση, και από τη (2.31) υπολογίζεται το $\Delta \underline{V}$. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ανανέωση του διανύσματος μέτρων τάσεων $\underline{V} + \Delta \underline{V} \rightarrow \underline{V}$. Τέλος πραγματοποιείται έλεγχος για σύγκλιση και εάν υπάρχει η διαδικασία τερματίζεται αλλιώς επανλαμβάνεται από το πρώτο βήμα.

2.3.3 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΚΟΠΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Βασική προϋπόθεση για την ανάλυση αυτή αποτελεί η θεώρηση ότι μελετώνται γραμμικά συστήματα, όπου οι πηγές τάσεις και έντασης συνδέονται απλά με καθαρές αγωγιμότητες, όπως και στη DC Ροή Φορτίου [2.5]. Έστω ένα σύστημα n ζυγών, όπου η

μήτρα αγωγιμοτήτων είναι κατάσκευασμένη να έχει ως σημείο αναφοράς το μηδενικό δυναμικό της γης. Για μια κατάσταση λειτουργίας A, εφαρμόζοντας το νόμο ρευμάτων του Kirchhoff σε κάθε ζυγό προκύπτει η σχέση:

$$\begin{pmatrix} I_1^A \\ \vdots \\ I_n^A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1^A \\ \cdots \\ V_n^A \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

όπου η εισροή ρεύματος I_i^A σε κάθε ζυγό, θεωρείται ότι πηγάζει από τη γή μέσα από μια διαδρομή που δε συμπεριλαμβάνεται στη μήτρα Y. Η μήτρα αγωγιμοτήτων μπορεί να περιέχει οποιαδήποτε αγωγιμότητα που αντιπροσωπεύει γραμμή μεταφοράς, μετασχηματιστή, φορτίο και βρίσκεται είτε μεταξύ δύο ζυγών, είτε ενός ζυγού και της γής.

Στην περίπτωση της γεννήτριας, η έγχυση ρεύματος ταυτίζεται με το ρεύμα της γεννήτριας, ενώ για το φορτίο, (το οποίο δε συμπεριλαμβάνεται στη μήτρα αγωγιμότητας Y), λαμβάνεται ως αντίθετη από το ρεύμα του φορτίου. Όλα τα άνω μεγέθη είναι εκφρασμένα ανά μονάδα.

Αφετηρία της ανάλυσης θα αποτελέσει η παραδοχή ότι ο ζυγός 1 είναι μια ιδανική πηγή τάσης, με σταθερή τιμή ως εξής:

$$V_1 \equiv V_1^0 \quad (2.36)$$

Εξαλείφοντας το ρεύμα του ζυγού 1 από το μοντέλο του δικτύου ισχύει:

$$\begin{pmatrix} I_2^A \\ \vdots \\ I_n^A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2^A \\ \cdots \\ V_n^A \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y_{21} \\ \vdots \\ Y_{n1} \end{pmatrix} V_1^0 \quad (2.37)$$

Επιλύοντας ως προς τη μήτρα των τάσεων είναι:

$$\begin{pmatrix} V_2^A \\ \vdots \\ V_n^A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2^A - Y_{21}V_1^0 \\ \cdots \\ V_n^A - Y_{n1}V_1^0 \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

Για το ρεύμα στην κατάσταση λειτουργίας A προκύπτει:

$$I_{ij}^A = \frac{V_i^A - V_j^A}{Z_{ij}} \quad (2.39)$$

όπου η \bar{Z}_{ij} αποτελεί την αντίσταση της γραμμής μεταξύ των ζυγών i και j .

Στη συνέχεια, εάν θεωρηθούν αλλαγές στις εγχύσεις ρεύματος από την κατάσταση A σε μια άλλη έστω B , για αμετάβλητη μήτρα αντιστάσεων λαμβάνεται:

$$\begin{bmatrix} V_2^B \\ \vdots \\ V_n^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2^B - Y_{21}V_1^0 \\ \cdots \\ V_n^B - Y_{n1}V_1^0 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Τα ρεύματα αντίστοιχα είναι:

$$I_{ij}^B = \frac{V_i^B - V_j^B}{\bar{Z}_{ij}} \quad (2.41)$$

Από τις σχέσεις (2.37) έως (2.41) η αλλαγή μεταξύ των κατάστάσεων A και B στις τάσεις και στα ρεύματα μεταξύ των ζυγών i, j είναι:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_2 \\ \vdots \\ \Delta I_n \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$\Delta I_{ij} = I_{ij}^B - I_{ij}^A = \sum_{k=2}^n \left[\frac{Z_{ik} - Z_{jk}}{\bar{Z}_{ij}} \right] \Delta I_k \quad (2.43)$$

όπου

$$\Delta I_k = I_k^B - I_k^A \quad (2.44)$$

Η σχέση (2.43) γράφεται:

$$\Delta I_{ij} = \sum_{k=2}^n T_{ij,k} \Delta I_k \quad (2.45)$$

όπου ο όρος:

$$T_{ij,k} \equiv \left(\frac{Z_{ik} - Z_{jk}}{\bar{Z}_{ij}} \right) \quad (2.46)$$

αποτελεί το συντελεστή κατανομής ροής “ρεύματος” (CTDF). Στις μελέτες ροών φορτίου είναι σύνηθες και βολικό να μετάτρέπονται αυτοί οι δείκτες αμελώντας την ωμική αντίσταση, και θεωρώντας όλες τις τάσεις των ζυγών κοντά στη μονάδα, ορίζοντας το συντελεστή κατανομής ροής ισχύος (Power Transfer Distribution Factor-PTDF) ως ακολούθως:

$$PTDF_{ij,k} \equiv \left(\frac{X_{ik} - X_{jk}}{\bar{X}_{ij}} \right) \quad (2.47)$$

Η μετάβολή στη ροή ενεργού ισχύος στις γραμμές μεταφοράς προσεγγίζεται ως συνάρτηση της μετάβολής των εγχύσεων ενεργού ισχύος από τη σχέση:

$$\Delta P_{ij} \approx \sum_{k=2}^n PTDF_{ij,k} \Delta P_k \quad (2.48)$$

Οι σχέσεις που πρόκειται να εξαχθούν παρακάτω στηρίζονται στην παραδοχή ότι για κάθε μετάβολή από την κατάσταση A σε B, η τοπολογία του δικτύου διατηρείται σταθερή, και οι αγωγιμότητες μεταξύ των ζυγών αμετάβλητες. Για παράδειγμα, η μετάβολή στο σύστημα λόγω διακοπής λειτουργίας μιας γραμμής δεν είναι στην πραγματικότητα μια μετάβολή από μια κατάσταση A σε B όπως δείχθηκε παραπάνω. Παρόλα αυτά, θα χρησιμοποιηθούν πλασματικές αλλαγές στις εγχύσεις ρεύματος προκειμένου να υπολογιστεί η επίδραση αφαίρεσης μιας γραμμής στις ροές ισχύος και στις τάσεις. Αυτές οι αλλαγές θα εφαρμοστούν στο δίκτυο είτε με τη γραμμή σε λειτουργία, είτε εκτός λειτουργίας, ανάλογα με την περίπτωση που χρειάζεται να προσομοιωθεί. Αντίστοιχοι συντελεστές θα οριστούν για την εκάστοτε περίπτωση.

Τα CTDF είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για να προσεγγίσουν τα αποτελέσματα της αποκοπής μιας γραμμής μεταφοράς σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Θεωρείται μια μετάβολή στο ρεύμα έγχυσης στο ζυγό i ίσο με:

$$\Delta I_i = -\frac{I_{ij}^{IN}}{T_{ij,i}^{IN}} \quad (2.49)$$

όπου το ρεύμα I_{ij}^{IN} είναι το ρεύμα που ρέει στη γραμμή ij και $T_{ij,i}^{IN}$ το CTDF, πριν την αποκοπή της γραμμής. Η νέα έγχυση που προσομοιώνει την αποκοπή της γραμμής ij θα μηδενίσει το ρεύμα στην ij, και θα προκαλέσει την ακόλουθη αλλαγή στις υπόλοιπες γραμμές:

$$\Delta I_{ab} = -T_{ab,i}^{IN} \left(\frac{I_{ij}^{IN}}{T_{ij,i}^{IN}} \right) \quad (2.50)$$

Εφόσον η ροή της γραμμής ij πλέον θεωρείται μηδενική, η γραμμή μπορεί να θεωρηθεί ανοικτή χωρίς να προκαλεί περαιτέρω αλλαγές στις ροές ισχύος του συστήματος. Οι νέες εξισώσεις του δικτύου με τη γραμμή ij εκτός λειτουργίας έχουν νέα CTDF, που ορίζονται ως $T_{ab,i}^{OUT}$. Αφού αφαιρεθεί η έγχυση που υποδεικνύει η (2.49), (εφόσον θεωρείται ότι η γραμμή είναι εκτός λειτουργίας), για να επανάφερθούν όλες οι εγχύσεις στις αρχικές τους τιμές, η μετάβολή στη ροή ρεύματος είναι:

$$\Delta I_{ab} = -T_{ab,i}^{IN} \left(\frac{I_{ij}^{IN}}{T_{ij,i}^{IN}} \right) + T_{ab,i}^{OUT} \left(\frac{I_{ij}^{IN}}{T_{ij,i}^{IN}} \right) \quad (2.51)$$

ή

$$\Delta I_{ab} = \left(\frac{T_{ab,i}^{OUT} - T_{ab,i}^{IN}}{T_{ij,i}^{IN}} \right) I_{ij}^{IN} \quad (2.52)$$

Στη συνέχεια, αμελώντας την ωμική αντίσταση και θεωρώντας τις τάσεις των ζυγών κοντά στην ονομαστική τιμή (1 ανά μονάδα), ορίζεται ο συντελεστής κατανομής ανοικτοκυκλώσεως γραμμής, LODF:

$$LODF_{ab,ij} \equiv \left(\frac{PTDF_{ab,i}^{OUT} - PTDF_{ab,i}^{IN}}{PTDF_{ij,i}^{IN}} \right) \quad (2.53)$$

Τελικά, η αλλαγή στη ροή ισχύος της γραμμής ab , ως αποτέλεσμα της αποκοπής της γραμμής ij , είναι:

$$\Delta P_{ab} \approx LODF_{ab,ij} P_{ij}^{IN} \quad (2.54)$$

2.4 ΙΕΡΑΡΧΗΣΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ

Όπως τονίσθηκε στην Ενότητα 2.2, η ανάλυση ασφάλειας συνεπάγεται την εξέταση ενός μεγάλου αριθμού ενδεχομένων διαταραχών. Για μεγάλο αριθμό τέτοιων διαταραχών, ο χρόνος εκτελέσεως των αντίστοιχων προγραμμάτων Η/Υ αυξάνεται σε σημείο μη αποδεκτό για λειτουργία σε πραγματικό χρόνο (on-line). Γίνεται έτσι επιθυμητή η εκλογή των πλέον σοβαρών διαταραχών για τις οποίες πρέπει να γίνει πιο λεπτομερής ανάλυση. Η διαδικασία αυτή εκλογής ονομάζεται συνήθως ιεράρχηση διαταραχών ή αυτόματη εκλογή διαταραχών.

Για την ιεράρχηση των διαταραχών ορίζεται ένας ή περισσότεροι δείκτες απόδοσης. Δύο τέτοιοι δείκτες είναι:

$$J_1 = \sum_k w_k \left(\frac{T_k}{\bar{T}_k} \right)^{2n} \quad (2.55)$$

$$J_2 = \sum_i w_i (V_i - \bar{V}_i)^{2n} \quad (2.56)$$

όπου:

T_k : φαινόμενη ισχύς κυκλώματος k.

\bar{T}_k : ονομαστική φαινόμενη ισχύς κυκλώματος k.

V_i : μέτρο τάσεως ζυγού i.

\bar{V}_i : επιθυμητό μέτρο τάσεως ζυγού i.

w_k, w_i : κατάλληλοι συντελεστές βαρύτητας.

Μεγάλες τιμές του δείκτη J_1 φανερώνουν ότι ένα ή περισσότερα κυκλώματα είναι υπερφορτισμένα. Ομοίως, μεγάλες τιμές του δείκτη J_2 φανερώνουν ότι ένας ή περισσότεροι ζυγοί είναι μακριά από τις επιθυμητές τάσεις. Μια διαταραχή προκαλεί μετάβολή των δεικτών J_1 και J_2 . Ο ακριβής υπολογισμός των μεταβολών αυτών απαιτεί σημαντικό χρόνο εκτελέσεως. Στην ιεράρχηση των διαταραχών, ενδιαφέρουν οι μεταβολές των δεικτών απόδοσης εξαιτίας της διακοπής γραμμής ή γεννήτριας. Έτσι, οι διαταραχές ιεραρχούνται όχι βάσει των μεταβολών που προκαλούν στους δείκτες J_1 και J_2 , αλλά βάσει των παραγώγων:

$$\frac{\partial J_1}{\partial p_i} \quad \text{ή} \quad \frac{\partial J_2}{\partial p_i}$$

που αποτελούν κάποιο μέτρο μετάβολής των δεικτών, και p_i είναι η παράμετρος που περιγράφει τη διακοπή i.

Έτσι, το πρόβλημα της ιεράρχησης συνίσταται στον υπολογισμό των ευαισθησιών (παραγώγων) των δεικτών αποδόσεως J_1 και J_2 και στη συνέχεια στην ιεράρχηση των διαταραχών σύμφωνα με τις αριθμητικές τιμές των ευαισθησιών αυτών. Η γενική μορφή του δείκτη αποδόσεως είναι:

$$J = f(\underline{x}, \underline{p}) \quad (2.57)$$

όπου \underline{x} είναι το διάνυσμα κατάστασεως και \underline{p} είναι το διάνυσμα των παραμέτρων.

Η ευαισθησία του δείκτη αποδόσεως δίνεται από την:

$$\frac{\partial J}{\partial p_i} = \frac{\partial f(x, p)}{\partial p_i} + \left[\frac{\partial f(x, p)}{\partial x} \right]^T \frac{\partial x}{\partial p_i} \quad (2.58)$$

Οι εξισώσεις ρών φορτίου έχουν τη μορφή:

$$g(\underline{x}, \underline{p}) = 0 \quad (2.59)$$

Γραμμικοποιώντας τις εξισώσεις ρών φορτίου γύρω από το λειτουργικό σημείο λαμβάνεται:

$$\frac{\partial g(x, p)}{\partial p_i} = \frac{\partial g(x, p)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial p_i} = 0 \quad (2.60)$$

Λύνοντας ως προς $\frac{\partial x}{\partial p_i}$ εξάγεται:

$$\frac{\partial g(x, p)}{\partial p_i} = \frac{\partial g(x, p)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial p_i} = 0 \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial x}{\partial p_i} = \left(\frac{\partial g(x, p)}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial g(x, p)}{\partial p_i} \right) \quad (2.62)$$

Αντικαθιστώντας τη (2.62) στη (2.58) λαμβάνεται:

$$\frac{\partial J}{\partial p_i} = \frac{\partial f(x, p)}{\partial p_i} - \left[\frac{\partial f(x, p)}{\partial x} \right]^T \left(\frac{\partial g(x, p)}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial g(x, p)}{\partial p_i} \right) \quad (2.63)$$

Η ποσότητα $\left[\frac{\partial f(x, p)}{\partial x} \right]^T \left(\frac{\partial g(x, p)}{\partial x} \right)^{-1}$ είναι διάνυσμα ανεξάρτητο των διαταραχών.

Έτσι υπολογίζεται μόνο μια φορά για όλες τις διαταραχές που πρέπει να ιεραρχηθούν.

Καλώντας το διάνυσμα αυτό \hat{x} τότε θα ισχύει:

$$\frac{\partial J}{\partial p_i} = \frac{\partial f(x, p)}{\partial p_i} - \hat{x} \left(\frac{\partial g(x, p)}{\partial p_i} \right) \quad (2.64)$$

Τα διανύσματα $\frac{\partial f(x, p)}{\partial p_i}$ και $\left(\frac{\partial g(x, p)}{\partial p_i} \right)$ πρέπει να υπολογιστούν για κάθε διαταραχή.

2.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] M. D. Khardenvis, V. N. Pande and V. N. Jade , “Transmission Network Expansion Planning using Contingency Analysis”, in *Proc. International Conference on Signal, Image Processing and Applications, 2011*.
- [2.2] A. Marano-Marcolini, F. Capitanescu, J. L. Martinez-Ramos, Senior Member, IEEE, and L. Wehenkel, “Exploiting the Use of DC SCOPF Approximation to Improve Iterative AC SCOPF Algorithms,” . *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, No 3, August 2012.
- [2.3] Γ. Κονταξής, Ν. Χατζηαργυρίου, *Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2003, σελ. 147-162.
- [2.4] J Sun and L. Tesfatsion, “The DC Power Flow Equations” [Online]. Διαθέσιμο: home.eng.iaeste.edu/~jdm/ee553/DCPowerFlowEquations.pdf προσπελάστηκε τον Νοέμβριο του 2012.
- [2.5] P. W. Sauer, K. E. Reinhard, and T. J. Overbye, “Extended Factors for Linear Contingency Analysis,” in *Proc. 34th Hawaii International Conference on System Sciences, 2001*.

ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ NEPLAN

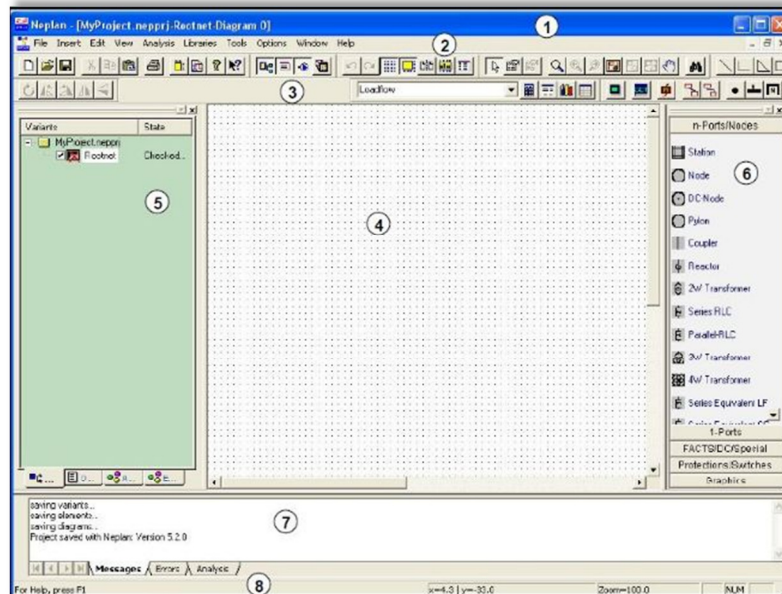
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

3.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

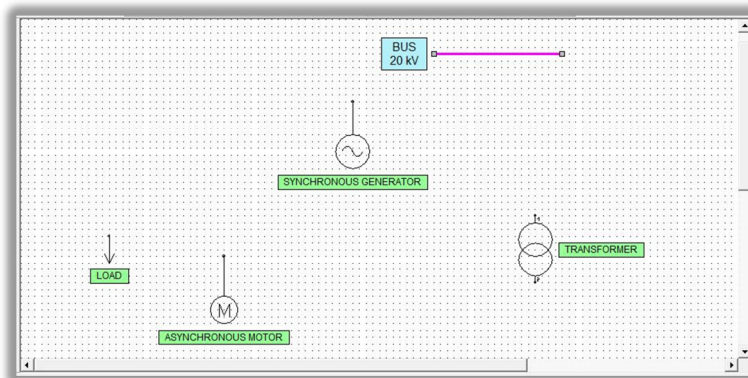
Στα πλαίσια της ανάλυσης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη, και ευρέως διαδεδομένη η χρήση κάποιου προγράμματος προσομοίωσης. Τέτοια προγράμματα βασίζονται σε θεωρίες επεξεργασίας συστημάτων, όπως αυτές που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, που συνήθως επεκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα, όπου με κατάλληλη εισαγωγή δεδομένων ο χρήστης προσομοιώνει κατάστάσεις λειτουργίας δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Το λογισμικό Neplan αποτελεί ένα φιλικό προς το χρήστη πρόγραμμα ανάλυσης, προσομοίωσης, και έρευνας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ιδανικό για συστήματα μεγάλης πολυπλοκότητας και πλήθους δεδομένων, όπου οι μαθηματικοί υπολογισμοί εκτελούνται σε ελάχιστο χρόνο, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με ευανάγνωστο τρόπο για περαιτέρω επεξεργασία. Το Neplan διαθέτει γραφικό περιβάλλον για την επικοινωνία του προγράμματος με το χρήστη, κατάλληλο για την εύκολη εισαγωγή δεδομένων, και ρύθμιση των παραμέτρων από το πρόγραμμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, όπου οι αριθμοί που υποδεικνύονται έχουν την ακόλουθη σημασία:

- | | |
|--|--|
| 1: Γραμμή Τίτλου | 5: Διαχείριση Επιλογής Σχηματικής Παράστασης |
| 2: Γραμμή Μενού Επιλογών | 6: Παράθυρο Συμβόλων |
| 3: Γραμμή Εργαλείων | 7: Παράθυρο Μηνυμάτων |
| 4: Επιφάνεια Εργασίας με Διαγράμματα & Πίνακες Δεδομένων | 8: Γραμμή Κατάστασης Συστήματος |

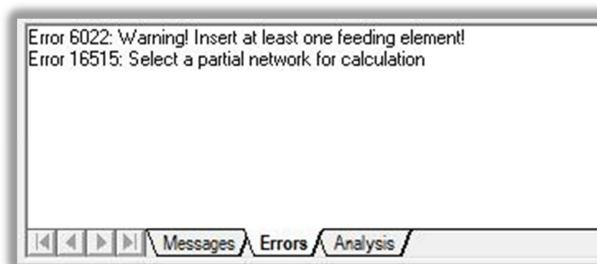
Στο γραφικό περιβάλλον αυτό είναι δυνατό να εισαχθεί ένα οποιοδήποτε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, είτε γραφικά με τη βοήθεια των κατάλληλων επιλογών, είτε μέσω πινάκων δεδομένων, κατάλληλο για δίκτυα μεγαλύτερου πλήθους στοιχείων [3.1]. Μερικά βασικά μέρη που συνιστούν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζονται όπως τα χρησιμοποιεί το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος (Σχήμα 3.2). Σε περίπτωση λανθασμένης ή ελλιπούς εισαγωγής δεδομένων μπορεί να εμφανιστεί ένα μήνυμα όπως στο Σχήμα 3.3.



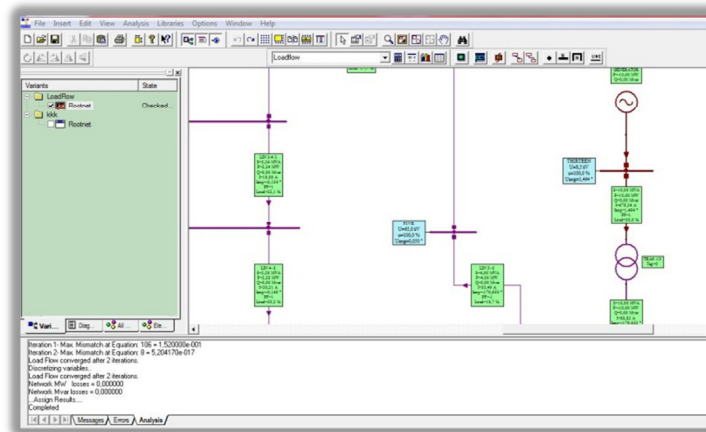
Σχήμα 3.1: Γραφικό περιβάλλον του προγράμματος Nerplan.



Σχήμα 3.2: Δομικά στοιχεία δικτύου.

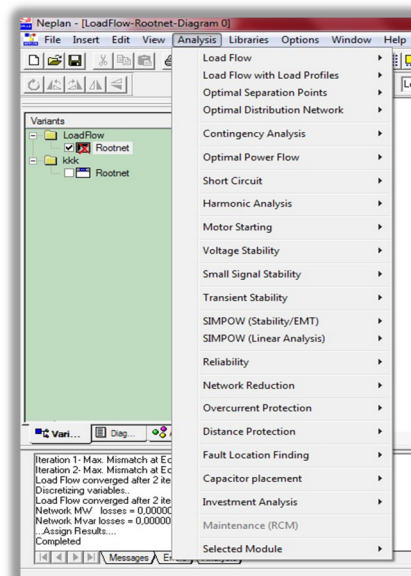


Σχήμα 3.3: Μήνυμα λανθασμένης εισαγωγής δεδομένων.



Σχήμα 3.4: Προσομοίωση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Υστερα από επιτυχημένη εισαγωγή και εφόσον η Ροή Φορτίου συγκλίνει, το λογισμικό θα εκτελέσει τους υπολογισμούς και θα παρουσιάσει τα αποτελέσματα των ροών ισχύος, τάσεων των ζυγών, ισχύς φορτίων και γεννητριών, κατάλληλα τοποθετημένα στο γραφικό περιβάλλον, ώστε να είναι ευδιάκριτα από το χρήστη (Σχήμα 3.4). Επιπλέον, η ανάλυση διευρύνεται προς πολλές κατευθύνσεις, αφού είναι δυνατό να εφαρμοσθεί πληθώρα υπολογισμών και αναλύσεων, όπως AC Ροή Φορτίου, Ανάλυση Αξιοπιστίας, Ανάλυση Αρμονικών, Μεταβατικής Ευστάθειας, κ.α (Σχήμα 3.5).

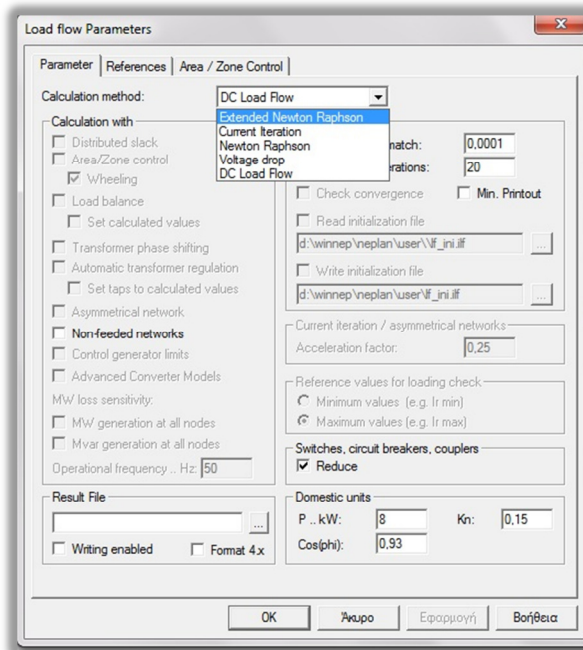


Σχήμα 3.5: Επιλογή επιθυμητής ανάλυσης.

3.1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΤΟ NEPLAN

Η μεθοδολογία εξέτασης της N-1 ασφάλειας ενός συστήματος, όπως αναπτύχθηκε στην Ενότητα 2.2, δύναται να πραγματοποιηθεί αυτοματοποιημένα μέσω του Neplan.

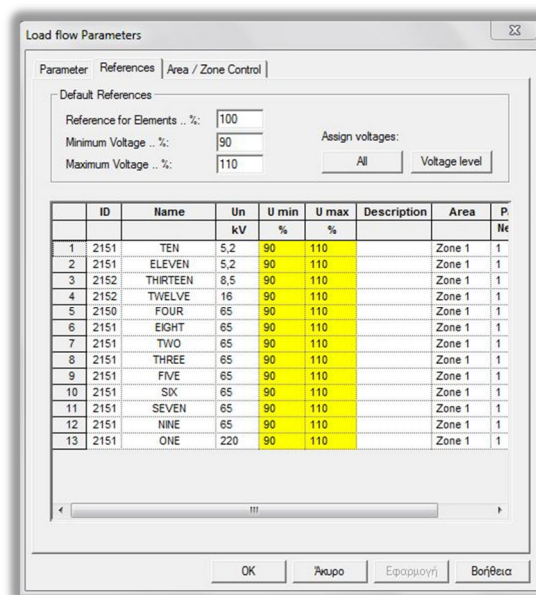
Δοθέντος ενός συστήματος, διενεργείται αρχικά η Ροή Φορτίου, δίνοντας στο χρήστη τη δυνατότητα να επιλέξει μία από τις παρακάτω μεθόδους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6.



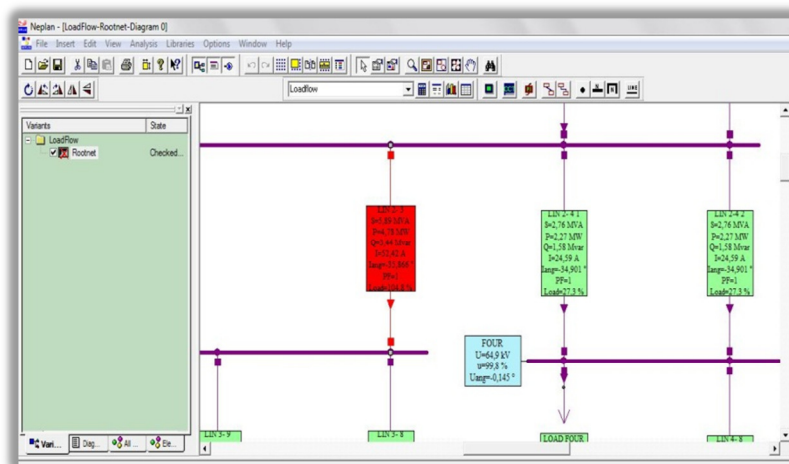
Σχήμα 3.6: Επιλογή μεθοδολογίας ανάλυσης Ροής Φορτίου.

Τα πεδία εφαρμογών κάθε μεθόδου είναι:

- Εκτεταμένη Μέθοδος Newton Raphson (Extended Newton Raphson)
 - Συμμετρικά δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
 - Έλεγχος περιοχών ή ζωνών για ανταλλαγή ισχύος σε διασυνδεδεμένα δίκτυα.
 - Δίκτυα που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος, FACTS, HVDC στοιχεία για έλεγχο της λειτουργίας.
- Μέθοδος Newton Raphson (Newton Raphson)
 - Δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
 - Ασύμμετρη Ροή Φορτίου.
 - Ανάλυση με εξισορρόπηση φορτίου.
- Μέθοδος Τρέχουσας Επανάληψης (Current Iteration)
 - Δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
 - Ασύμμετρη Ροή Φορτίου.
 - Παρουσία μικρού πλήθους γεννητριών που λειτουργούν ως PV ζυγοί.
 - Απουσία συστημάτων απομακρυσμένου ελέγχου.
- Μέθοδος Πτώσης Τάσης (Voltage Drop)
 - Δίκτυα διανομής, ακτινικά με οικιακές μονάδες (νοικοκυριά).
- Μέθοδος DC Ροής Φορτίου (DC Load Flow)
 - Δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου μια προσεγγιστική λύση είναι αποδεκτή (Ενότητα 2.3.1).



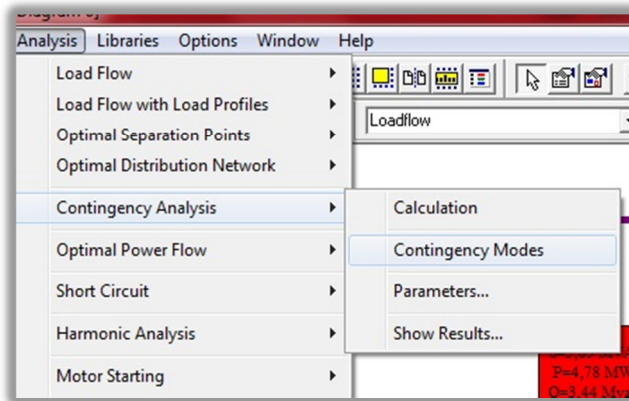
Σχήμα 3.7: Καθορισμός επιτρεπτών ορίων λειτουργίας συστήματος.



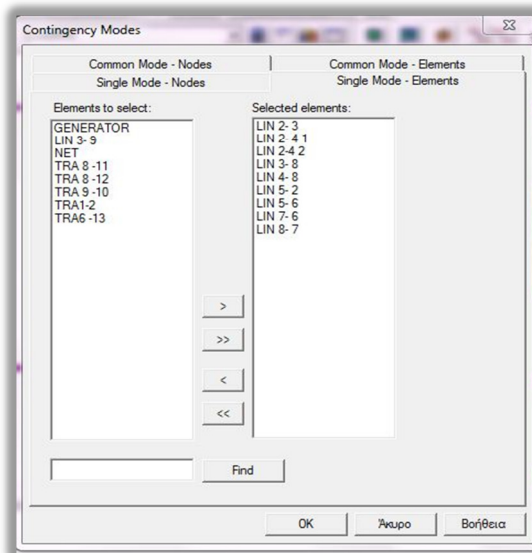
Σχήμα 3.8: Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων Ροής Φορτίου.

Γενικά, είναι δυνατή η ρύθμιση ενός ευρέως φάσματος παραμέτρων γύρω από τη Ροή Φορτίου, όπως ο αριθμός ανακυκλώσεων και το αντίστοιχο σφάλμα, ανάλυση ευαισθησιών, ρύθμιση τάσης από μετασηματιστές, λειτουργία για ασύμμετρα δίκτυα κ.α [3.2].

Όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 2.2, συνηθίζονται να λαμβάνονται συγκεκριμένα όρια λειτουργίας για την Ν κατάσταση του συστήματος, όπου αυτά μπορούν να καθοριστούν μέσα από την καρτέλα ρύθμισης παραμέτρων Ροής Φορτίου (Σχήμα 3.7). Επιπλέον, τα αποτελέσματα απεικονίζονται γραφικά, όπου οι ροές ισχύος των γραμμών μεταφοράς περικλείονται σε πράσινο πλαίσιο εφόσον είναι εντός ορίων, και κόκκινο εάν είναι εκτός αυτών (Σχήμα 3.8). Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να διεξαχθεί μελέτη στατικής ασφάλειας, με την επιλογή της Contingency Analysis (Σχήμα 3.9) ως εξής:



Σχήμα 3.9: Επιλογή ανάλυσης N-1 κατάστασης.



Σχήμα 3.10: Καθορισμός διαταραχών που θα εφαρμοστούν στην ανάλυση.

1. Εισάγονται τα δεδομένα του συστήματος, και επιλέγεται η επιθυμητή μέθοδος ανάλυσης Ροής Φορτίου (Σχήμα 3.6).
2. Καθορίζονται τα όρια λειτουργίας της N-1 κατάστασης (Πίνακας 2.1 & Σχήμα 3.7).
3. Επιλέγονται χειροκίνητα ποια στοιχεία του συστήματος επιθυμεί ο χρήστης να τεθούν εκτός λειτουργίας μέσω της επιλογής Contingency Modes (Σχήματα 3.9 και 3.10). Το πρόγραμμα θέτει τα στοιχεία που υποβάλλονται στη λίστα ένα-ένα εκτός λειτουργίας, εφαρμόζει εκ νέου Ροή Φορτίου και αποθηκεύει αυτόματα τα αποτελέσματα. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα της εξέτασης ταυτόχρονης αποκοπής λειτουργίας στοιχείων μέσω της καρτέλας Common Modes. Παρατηρείται ότι το πρόγραμμα διαχωρίζει τα μέρη του συστήματος σε δύο κατηγορίες:

- Κόμβοι (Nodes) : Αναφέρεται στους ζυγούς.
- Στοιχεία (Elements) : Σχετίζεται με όλα τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, φορτία ,πυκνωτές, κ.α).

	Contingency	Violated	Element	Violation	Number of
	Element/Mode	Element	Type	%	Violations
1	LIN 4- 8				1
2	LIN 4- 8	LIN 2- 3	Line	103,91	
3	LIN 8- 7				1
4	LIN 8- 7	LIN 2- 3	Line	104,18	
5	LIN 7- 6				1
6	LIN 7- 6	LIN 2- 3	Line	119,07	

Σχήμα 3.11: Παρουσίαση αποτελεσμάτων της Contingency Analysis.

4. Στη συνέχεια, αφού ολοκληρωθεί η ανάλυση, ανατρέχοντας στα αποτελέσματα αυτής (Σχήμα 3.9), ο χρήστης λαμβάνει ως έξοδο τον πίνακα του Σχήματος 3.11, που έχει την εξής σημασία:

1^η Στήλη

Αύξων αριθμός στοιχείου που τίθεται εκτός λειτουργίας.

2^η Στήλη (Contingency Element/Mode):

Αποτελεί το όνομα το στοιχείου που τίθεται εκτός λειτουργίας, με αποτέλεσμα να διεξάγεται ανάλυση Ροής Φορτίου εκ νέου, αμελώντας το στοιχείο αυτό στο δίκτυο.

3^η Στήλη (Violated Element):

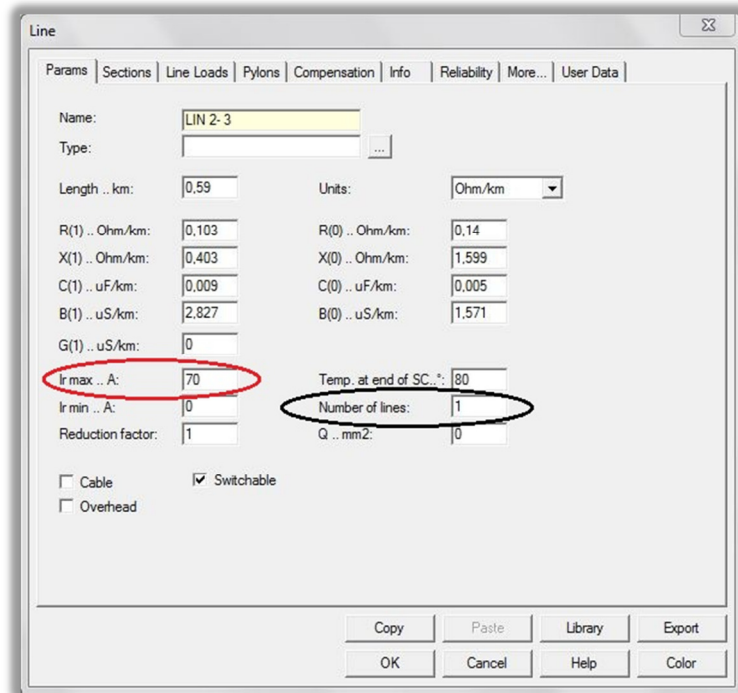
Αποτελεί το όνομα του στοιχείου το οποίο υφίσταται παραβίαση σύμφωνα με τα όρια που τέθηκαν στο βήμα 2.

4^η Στήλη (Element Type):

Αποτελεί τον τύπο του στοιχείου στο οποίο συμβαίνει η παραβίαση, αν δηλαδή πρόκειται για γραμμή μεταφοράς, μετασχηματιστή, κ.α.

5^η Στήλη (Violation) :

Σχετίζεται με το ποσοστό της ισχύος που ρέει στο αντίστοιχο στοιχείο, έχοντας ως άνω όριο το 100% για τα στοιχεία (Πίνακας 2.2). Σημειώνεται ότι στον πίνακα αποτελεσμάτων εμφανίζονται μόνο τα στοιχεία που υπερβαίνουν το όριο. Για παράδειγμα, για το δίκτυο που εκτελείται η ανάλυση στο Σχήμα 3.11, παρατηρείται ότι η γραμμή 2-3, εμφανίζει 119.07% υπερφόρτιση, όταν η γραμμή 7-6 τεθεί εκτός λειτουργίας. Το ποσοστό αυτό σημαίνει ότι η ισχύς βρίσκεται κατά 19.07 %, και όχι κατά 119.07%, πάνω από την τιμή αυτής που λήφθηκε ως όριο.



Σχήμα 3.12: Ρύθμιση παραμέτρων σε μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

6^η Στήλη (Number of Violations):

Είναι ο αριθμός των παραβιάσεων που συμβαίνουν στα διάφορα στοιχεία του συστήματος, για το στοιχείο της 1^{ης} στήλης εκτός λειτουργίας. Αναφέρεται για λόγους ευκρίνειας, και αποτύπωσης μιας συνοπτικής εικόνας των πιο σημαντικών παραβιάσεων σε περίπτωση δικτύων μεγαλύτερου πλήθους δεδομένων.

3.1.3 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Γενικά, το βασικό πρόβλημα που ανακύπτει με την υπερφόρτιση μιας γραμμής μεταφοράς, είναι η υπερθέρμανσή της, και τελικά η αποκοπή λειτουργίας της λόγω βλάβης. Συνεπώς, είναι ανεπιθύμητη μια κατάσταση όπου η αποκοπή ενός στοιχείου οδηγεί σε μια ή περισσότερες αλυσιδωτές βλάβες του συστήματος. Συνηθισμένο σενάριο αποτελεί ο επαναπροσδιορισμός της παραγωγής ισχύος από τις γεννήτριες προκειμένου να διοχετευθεί η ισχύς από διαδρομές που δεν προκαλούν υπερφόρτιση. Αυτή η μεθοδολογία, παρόμοια με την απόρριψη μέρους του φορτίου αποτελούν ενέργειες που ακολουθεί ο διαχειριστής του συστήματος, για την εξομάλυνση του προβλήματος σε πραγματικό χρόνο. Σε επίπεδο έρευνας και σχεδιασμού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, μια μέθοδος που εφαρμόζεται για την επίλυση του προβλήματος αυτού, είναι η ενίσχυση κάποιων γραμμών μεταφοράς του δικτύου, προσθέτοντας μια παράλληλη γραμμή ίδια με την προηγούμενη, όπου κριθεί σκόπιμο ώστε το σύστημα να είναι N-1 ασφαλές. Η νέα τοπολογία του συστήματος θα οδηγήσει σε διαφορετική κατανομή ισχύος στις γραμμές, με αποτέλεσμα να μην εμφανίζονται υπερφορτίσεις και παραβιάσεις ορίων.

Δοθέντος ενός δικτύου, μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του Neplan, μπορεί να πραγματοποιηθεί η ενίσχυσή του, και να μελετηθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Η τοποθέτηση νέας παράλληλης γραμμής γίνεται από την καρτέλα ρύθμισης παραμέτρων (Σχήμα 3.12), όπου σε μαύρο πλαίσιο υποδεικνύεται ο αριθμός των παράλληλων γραμμών που επιθυμεί να εισάγει ο χρήστης. Τα όρια φόρτισης της κάθε γραμμής μεταφοράς τίθενται ουσιαστικά από το μέγιστο ρεύμα που βρίσκεται σε κόκκινο πλαίσιο (Σχήμα 3.12), όπως αναφέρεται και στη (2.2) , αφού για την τιμή της τάσης λαμβάνεται η ονομαστική.

Για λόγους πληρότητας, θα γίνει διερεύνηση σχετικά με τον καθορισμό των ορίων στη ροή ισχύος των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [3.3]. Προσεγγιστικά, αγνοώντας την ωμική αντίσταση της γραμμής, η ενεργός ισχύς εξόδου αυτής είναι ίση με την ενεργό ισχύ εισόδου και ίση με:

$$P = \frac{3V_s V_R \sin \delta}{X_L} \tag{3.1}$$

όπου:

V_s, V_R : Το μέτρο της μιγαδικής τάσης στην αφετηρία και τέλος της γραμμής, αντίστοιχα.

δ : Η γωνία μεταξύ των V_s και V_R .

X_L : Η επαγωγική αντίδραση της γραμμής.

Για γραμμές μεταφοράς μικρού μήκους, όπου η επαγωγική αντίδραση της γραμμής έχει σχετικά μικρή τιμή, η θέρμανση των αγωγών καθορίζει τα θερμικά όρια αυτής λόγω των απωλειών που υφίσταται (Πίνακας 3.1). Σε περίπτωση ροής ρεύματος τιμής μεγαλύτερης από την συνηθισμένη, οι αγωγοί μπορούν να καμφθούν και να γείρουν προς το έδαφος, ή ενδέχεται το υλικό αυτών να φθαρεί λόγω υπερθέρμανσης. Σχετικά με γραμμές μεσαίου μήκους, της τάξεως των 100 χιλιομέτρων, το όριο καθορίζεται από την πτώση τάσης στη γραμμή που υπερισχύει του άνω φαινομένου, και δεν πρέπει να ξεπερνά το 5% κατά προσέγγιση. Τέλος, στην περίπτωση των γραμμών μεγάλου μήκους, η μέγιστη επιτρεπτή ροή ισχύος καθορίζεται από τα όρια στατικής ευστάθειας του συστήματος, και κατά επέκταση από την τιμή της γωνίας δ (3.1), όπου αυτή είναι συνήθως κοντά στις 30°.

Πίνακας 3.1: Ενδεικτικά θερμικά όρια εναέριων γραμμών μεταφοράς (μικρού μήκους).

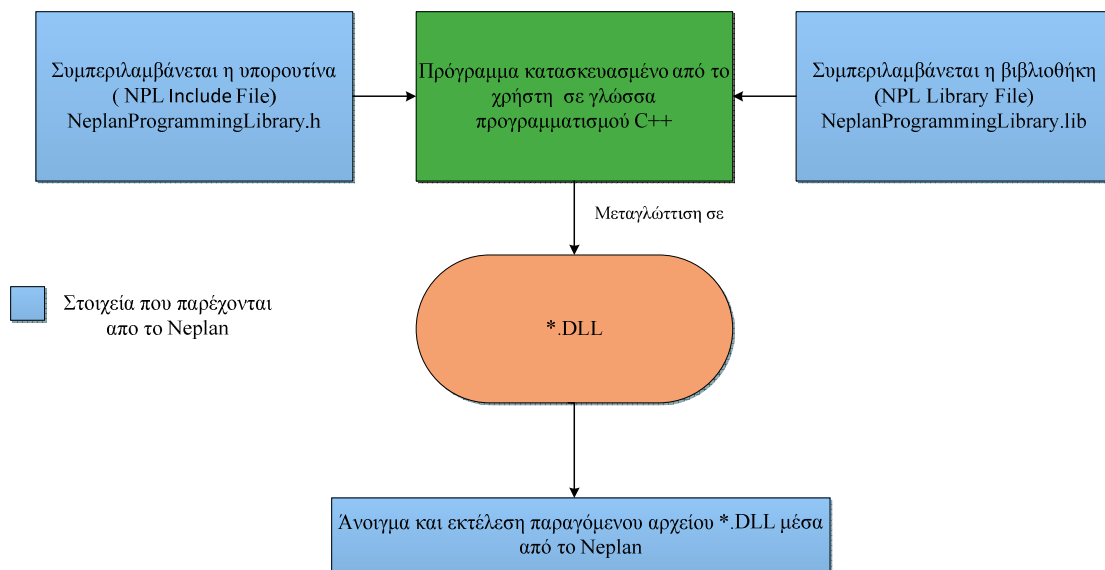
Ονομαστική Τάση (kV)	X_L (Ω/km)	X_C (μF/km)	Θερμικό Όριο (MW)
230	0.47	0.11	440
345	0.37	0.09	1500
500	0.36	0.09	3000
765	0.35	0.09	8000

3.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ

3.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα προς επίλυση αφορά την ενίσχυση των απαραίτητων γραμμών μεταφοράς σε ένα σύστημα ώστε αυτό να καταστεί στατικά ασφαλές. Αναφέρεται ότι η λύση παρέχεται μέσω της ενίσχυσης (Reinforcement), που αποτελεί την προσθήκη μιας γραμμής μεταφοράς παράλληλα, σε μια υφιστάμενη γραμμή μεταφοράς αυτήν που κρίνεται, μέσω της επέκτασης (Transmission Expansion), που σχετίζεται με δημιουργία νέων γραμμών μεταφοράς. Πραγματοποιώντας συνεπώς ανάλυση N-1 κατάστασης, όπου διάφορες σχετικές μαθηματικές μέθοδοι παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, με τη βοήθεια του λογισμικού Neplan (Ενότητα 3.1.2), είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι γραμμές μεταφοράς που υπερφορτίζονται, για τις γραμμές μεταφοράς που τίθενται εκτός λειτουργίας (Σχήμα 3.11). Προφανώς, ενισχύοντας όλες τις γραμμές που εμφανίζουν υπερφόρτιση το πρόβλημα θα εξαλειφόταν, και οι ροές ισχύος θα ήταν εντός ορίων. Στην πραγματικότητα, η δημιουργία μιας παράλληλης γραμμής σε μία ήδη υπάρχουσα, γεννά ζητήματα κόστους, κυρίως από την πλευρά των απαραίτητων πόρων (υλικά, εργατοώρες) που θα δαπανηθούν, αλλά και λόγω της επίπτωσης που θα επιφέρει η μη διαθεσιμότητα του συγκεκριμένου στοιχείου στο υπόλοιπο σύστημα, μέχρι το τέλος των εργασιών. Έτσι, ανάκύπτει το πρόβλημα του καθορισμού της κατάλληλης γραμμής για ενίσχυση σε ένα δίκτυο που εμφανίζει υπερφορτίσεις. Ύστερα, είναι πιθανό το δίκτυο μετά την ενίσχυση να παραμένει μη στατικά ασφαλές. Ένα μείζον ζήτημα λοιπόν που περιβάλλει το πρόβλημα είναι η ενίσχυση των γραμμών εκείνων, που θα οδηγήσουν σε όσο το δυνατόν λιγότερες ενισχύσεις, μέχρι το σύστημα να καταστεί N-1 ασφαλές. Είναι προφανής η πολυπλοκότητα που εισάγεται σε ένα δίκτυο εκατοντάδων ζυγών, και χιλιάδων γραμμών, εάν γίνει η απόπειρα χειροκίνητης αποκοπής κάθε γραμμής, εκ νέου επίλυση και έλεγχος για υπερφορτίσεις, ενίσχυση γραμμών, και επανάληψη μέχρι την επιθυμητή N-1 ασφάλεια. Το πρόγραμμα Neplan είναι ικανό να διενεργήσει ανάλυση N-1 κατάστασης, όμως θα έπρεπε κανείς να ενισχύει χειροκίνητα τις γραμμές μεταφοράς (Σχήμα 3.12) μέχρι να οδηγηθεί στο τελικό αποτέλεσμα. Πάλι, καθόλου πρακτικό και πολύ χρονοβόρο σε ένα μεγάλο δίκτυο, τόσο από την πλευρά των επαναλαμβανόμενων ενισχύσεων, αλλά και από τη δυσχέρεια επιλογής της κατάλληλης γραμμής προς ενίσχυση μέσα σε ένα πλήθος χιλιάδων στοιχείων.

Συνεπώς, το ζητούμενο είναι η ανάπτυξη μιας διαδικασίας που να βρίσκει την κατάλληλη γραμμή προς ενίσχυση, να ελέγχει για παραβιάσεις, και να πραγματοποιεί αυτόματα τις απαραίτητες ενέργειες μέχρι να μην υπάρχουν καθόλου υπερφορτίσεις. Το λογισμικό Neplan δεν παρέχει μια εφαρμογή ικανή να καλύψει τις ανάγκες του προβλήματος, δίνει όμως την ευκαιρία στο χρήστη να δημιουργήσει δικά του εργαλεία υπολογισμού, μέσω μιας ενότητας που ονομάζεται Neplan Programming Library [3.4]. Το μέσο εισαγωγής είναι η γλώσσα C/C++, οπότε το αποτέλεσμα των εφαρμογών που μπορεί να παραχθεί επεκτείνεται σε πολλά επίπεδα, όπως για παράδειγμα η δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος. Ουσιαστικά, η Neplan Programming Library περιέχει ένα σύνολο από συναρτήσεις σε C/C++ , δίνοντας τη δυνατότητα να παρέμβουν σε ένα δίκτυο που έχει εισαχθεί στο Neplan, μέσω κώδικα γραμμένου από το χρήστη.



Σχήμα 3.13: Δημιουργία εφαρμογής από το χρήστη με τη βοήθεια της γλώσσας C/C++.

Οι συναρτήσεις αυτές επιτρέπουν στο χρήστη να εκτελέσει μέσω κώδικα οποιαδήποτε μαθηματική ανάλυση του Neplan (Κεφάλαιο 3.1.1), να προσπελάσει και να επεξεργαστεί οποιαδήποτε μεταβλητή στοιχείου (π.χ μήκος γραμμής μεταφοράς, τάση ζυγού), καθώς και παράμετρο ανάλυσης. Το αποτέλεσμα που παράγεται είναι ένα αρχείο DLL (Dynamic Link Library), όπου μπορεί να εκτελεστεί μέσω του Neplan.

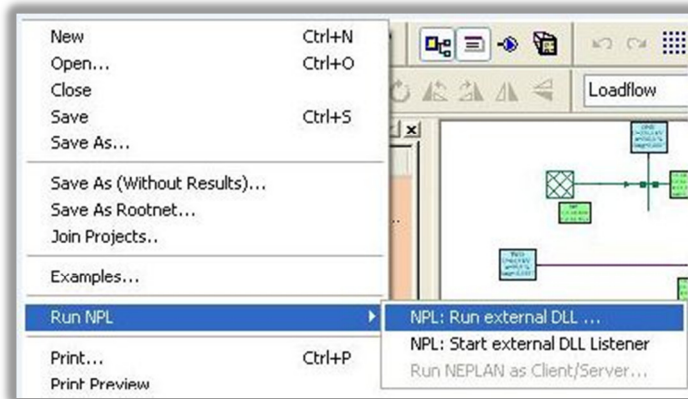
3.2.2 ΕΚΠΟΝΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

3.2.2.1 Ανάλυση της δομής

Συνοψίζοντας το πρόβλημα στη τελική του μορφή αυτό αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

1. Δοθέντος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας διενεργείται ανάλυση N-1 κατάστασης, θέτοντας σε αποκοπή μόνο τις γραμμές μεταφοράς (Κεφάλαιο 2.2). Για κάθε γραμμή που είναι εκτός λειτουργίας, εκτελείται κάθε φορά Ροή Φορτίου με κάποια από τις διαθέσιμες μεθόδους (Κεφάλαιο 3.1), και αποθηκεύονται οι υπερφορτίσεις (εάν υπάρχουν) στις υπόλοιπες γραμμές του δικτύου.
2. Επιλέγεται η γραμμή μεταφοράς που πρέπει να ενισχυθεί, οπότε παράλληλα σε αυτήν προστίθεται μια νέα όμοια γραμμή μεταφοράς.
3. Διεξάγεται ανάλυση N-1 κατάστασης για το νέο ενισχυμένο δίκτυο.

4. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 και 3 μέχρι να μην εμφανίζεται καμία υπερφόρτιση σε όλες τις γραμμές, και κατά συνέπεια το δίκτυο να είναι στατικά ασφαλές.

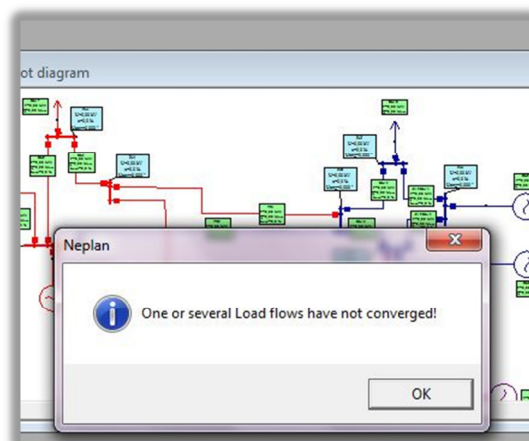


Σχήμα 3.14: Εκτέλεση της εφαρμογής για αυτοματοποιημένη ενίσχυση από το Neplan

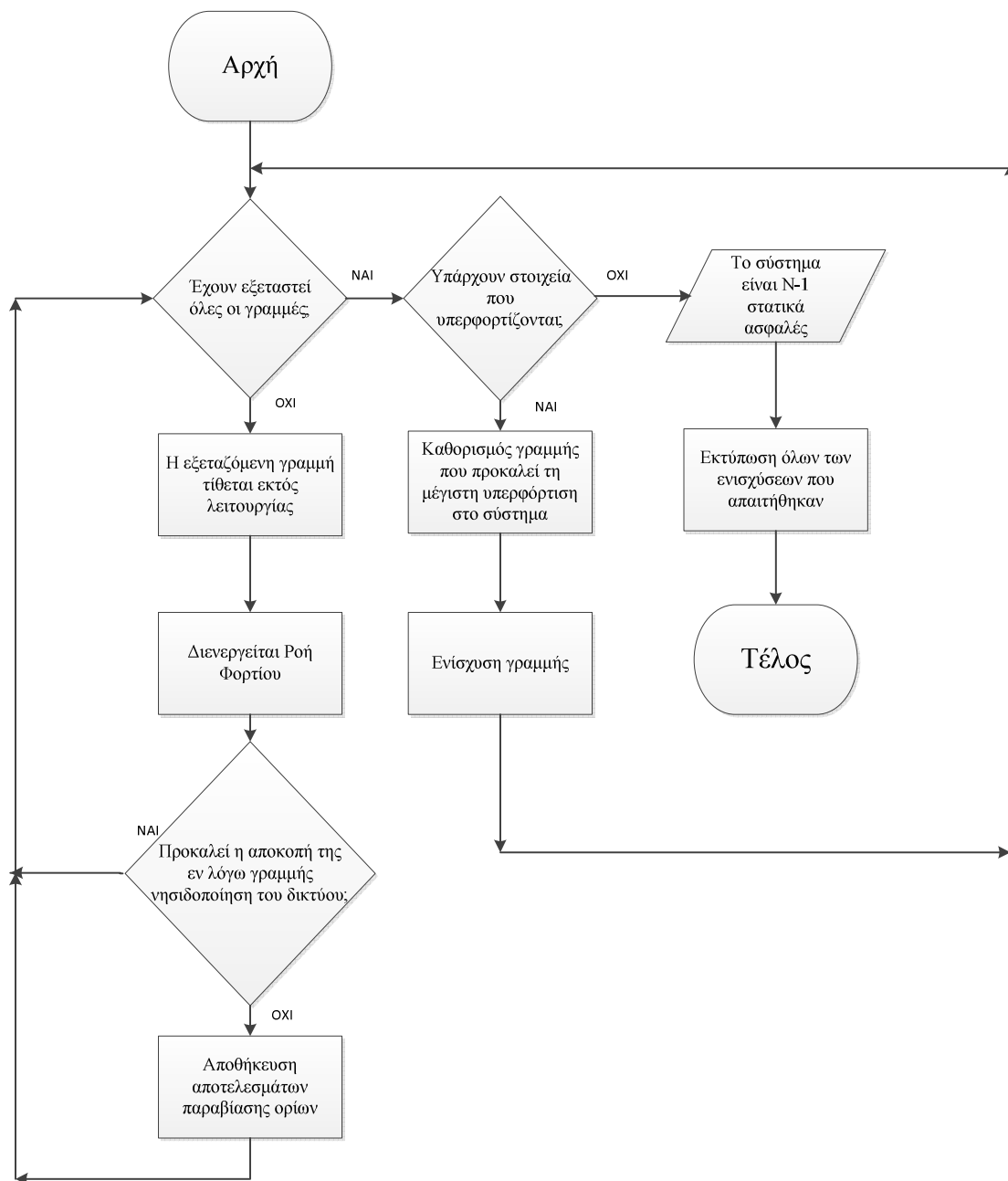
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εκπονήθηκε αλγόριθμος κατάσκευασμένος σε γλώσσα C/C++ που υλοποιεί αυτόματα την παραπάνω διαδικασία.

Με τη βοήθεια του γραφικού περιβάλλοντος του Neplan, αφού εισαχθεί ένα σύστημα, από την καρτέλα εκκίνησης DLL αρχείου (Σχήμα 3.14) , ο αλγόριθμος υλοποιεί την άνω διαδικασία, και εμφανίζει τα αποτελέσματα σε κατάλληλο αρχείο εξόδου. Το αρχείο DLL που παράγεται εφαρμόζεται σε οποιοδήποτε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, που πληρεί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Το σύστημα βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων στην N κατάσταση. Είναι φανερό ότι δεν έχει νόημα να επιχειρηθεί η επίτευξη N-1 ασφάλειας, όταν δεν υπάρχει N ασφάλεια.
- Η Ροή Φορτίου συγκλίνει. Σε περίπτωση μη σύγκλισης, το πρόγραμμα εμφανίζει κατάλληλο μήνυμα στο γραφικό περιβάλλον του Neplan (Σχήμα 3.15), και δε μπορούν να δοθούν αποτελέσματα.



Σχήμα 3.15: Εμφάνιση μηνύματος στην περίπτωση μη σύγκλισης της Ροής Φορτίου.



Σχήμα 3.16: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου.

Η βασική δομή του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε φαίνεται στο Σχήμα 3.16. Κάθε γραμμή μεταφοράς αντιπροσωπεύεται από έναν ακέραιο αριθμό, ο οποίος είναι μοναδικός για κάθε στοιχείο σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στο Neplan. Γενικά, με την εισαγωγή οποιουδήποτε συστήματος, σε όλα τα στοιχεία αντιστοιχίζεται αυτόματα ένας αριθμός ταυτότητας (Identification Number), που χρησιμοποιείται κατά κόρον από το πρόγραμμα κάθε φορά που χρειάζεται να προσπελαστεί, ή να επεξεργαστεί το κάθε στοιχείο. Κάθε στοιχείο σε λειτουργία είναι συνδεδεμένο με το σύστημα μέσω εικονικών διακοπών δύο καταστάσεων (ON, OFF) σε όλα τα άκρα του. Τροποποιώντας την κατάσταση των διακοπών, με τη βοήθεια της κατάλληλης συνάρτησης που παρέχεται από τις έτοιμες βιβλιοθήκες, επιτυγχάνεται η αποκοπή λειτουργίας της γραμμής που εξετάζεται κάθε φορά.

Επίσης, η ανάλυση N-1 κατάστασης μελετά την επίπτωση που έχει μια διαταραχή σε μια γραμμή στο υπόλοιπο σύστημα. Εάν λοιπόν η γραμμή στην οποία συμβαίνει αυτή είναι απλού κυκλώματος, τότε κατά την N-1 κατάσταση, αυτή θα θεωρηθεί εκτός λειτουργίας, εάν όμως πρόκειται για γραμμή διπλού ή τριπλού κυκλώματος, (2 ή 3 παράλληλες γραμμές) , τότε θα μελετηθεί η κατάσταση στην οποία αυτή έχει μία λιγότερη παράλληλη γραμμή. Αναλυτικότερα, εάν σε μία γραμμή μεταφοράς που αποτελείται από 3 παράλληλες γραμμές διενεργηθεί Contingency Analysis, τότε για αυτή, η N-1 κατάσταση είναι να αποτελείται από 2 παράλληλες γραμμές, και όχι να αποκοπεί τελείως από το σύστημα. Η μελέτη ταυτόχρονων αποκοπών όλων των παράλληλων κυκλωμάτων, ή και διαφορετικών γραμμών του δικτύου ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας εργασίας [3.5].

Προκειμένου να αναλυθεί ο αλγόριθμος με τη βοήθεια ψευδοκώδικα, θα χρησιμοποιηθούν τα ακόλουθα σύμβολα:

Διαταραχή (*contingency*) m : η αποκοπή λειτουργίας της γραμμής μεταφοράς m

k : δείκτης της γραμμής μεταφοράς

n_{lines} : συνολικός αριθμός των γραμμών μεταφοράς

m : δείκτης της γραμμής στην οποία εφαρμόζεται διαταραχή (αλλιώς διαταραχή m)

n_{cont} : συνολικός αριθμός γραμμών στις οποίες εφαρμόζεται διαταραχή

S_{k-m} : ροή ισχύος της γραμμής k , θέτοντας τη γραμμή m εκτός λειτουργίας

S_k^{max} : όριο επιτρεπτής ροής ισχύος στη γραμμή k

L_{k-m} : συνολικός δείκτης υπερφόρτισης της γραμμής k για τη γραμμή m εκτός λειτουργίας

U_{k-m} : δείκτης καθαρής υπερφόρτισης της γραμμής k για τη γραμμή m εκτός λειτουργίας

r : δείκτης πλήθους των γραμμών που υφίστανται υπερφόρτιση

N : πλήθος των υπερφορτισμένων γραμμών

Ο δείκτης L_{k-m} υπολογίζεται ως εξής:

$$L_{k-m} = \begin{cases} \frac{S_{k-m}}{S_k^{max}} & , \text{αν } S_{k-m} \geq S_k^{max} \\ 0 & , \text{αν } S_{k-m} < S_k^{max} \end{cases} \quad (3.2)$$

Ουσιαστικά, ο δείκτης L_{k-m} αποτελεί την ανά μονάδα υπερφόρτιση της ροής ισχύος σε μία γραμμή μεταφοράς (2.1), και λαμβάνει μη μηδενική τιμή μόνο στην περίπτωση που είναι μεγαλύτερος του 100%, δηλαδή η γραμμή που εξετάζεται ξεπερνά το επιτρεπτό όριο φόρτισής της. Στο πρόγραμμα Neplan, μετά τη διενέργεια της Contingency Analysis, ο

δείκτης αυτός εμφανιζόταν ως Violation (Σχήμα 3.11). Οι δείκτες υπερφόρτισης της ροής ισχύος συνδέονται με τη σχέση:

$$U_{k-m} = L_{k-m} - 1 \quad (3.3)$$

Στην συνέχεια, θα οριστούν οι κατάλληλοι δείκτες που σχετίζονται με την επιλογή της κατάλληλης γραμμής προς ενίσχυση. Η μεθοδολογία ιεράρχησης των επιπτώσεων που προκαλεί μια διαταραχή σε μια γραμμή μεταφοράς μπορεί να επιλεγθεί από μια πληθώρα διαφορετικών κατευθύνσεων όπως είναι ο υπολογισμός των κατάλληλων δεικτών απόδοσης (Κεφάλαιο 2.4), τα νευρωνικά δίκτυα κ.α. Στον αλγόριθμο που δημιουργήθηκε επιλέχθηκε η μέθοδος της μέγιστης συνολικής υπερφόρτισης, η οποία παρότι είναι βασισμένη σε απλή διαισθητική προσέγγιση του προβλήματος και όχι σε κάποιο σύνθετο μαθηματικό μοντέλο, δίνει ακριβή και ικανοποιητικά αποτελέσματα, όπως θα φανεί στη συνέχεια. Το κριτήριο της μέγιστης συνολικής υπερφόρτισης στηρίζεται στην εξής ιδέα:

Έστω ότι η αποκοπή της γραμμής m_t προκαλεί υπερφόρτιση στις γραμμές k_v τιμής ίσης με $U_{k_v-m_t}$, όπου $t=1,2,\dots,t_{tot}$ με t_{tot} το πλήθος των διαταραχών που οδηγούν σε παραβιάσεις, και $v=1,2,\dots,v_{tot}$ με v_{tot} το συνολικό αριθμό των παραβιάσεων που προκαλεί η κάθε διαταραχή m_t . Εάν το συνολικό μέγιστο άθροισμα των υπερφορτίσεων σε όλες τις γραμμές k_v που προκαλεί μια διαταραχή m_t είναι μεγαλύτερο από το συνολικό μέγιστο άθροισμα των υπερφορτίσεων που συμβαίνει σε μια γραμμή k_v για διάφορα m_t , τότε ενισχύεται η γραμμή m_t , αλλιώς ενισχύεται η γραμμή k_v .

Θα οριστούν οι δείκτες που προσδίδουν ευχέρεια στους απαραίτητους υπολογισμούς:

$$I_m = \sum_{k=1}^{n_{lines}} U_{k-m} \quad (3.4)$$

Ο δείκτης I_m αποτελεί το άθροισμα των υπερφορτίσεων που προκαλεί η διαταραχή m στις υπόλοιπες γραμμές k του συστήματος.

$$J_k = \sum_{m=1}^{n_{cont}} U_{k-m} \quad (3.5)$$

Ο δείκτης J_k αποτελεί το άθροισμα των υπερφορτίσεων που εμφανίζει η γραμμή k για όλες τις διαταραχές m .

$$J_j = \max_k \{J_k\} \quad (3.6)$$

Ο δείκτης J_j είναι ουσιαστικά το μέγιστο άθροισμα των υπερφορτίσεων στις υπόλοιπες γραμμές, που συμβαίνει όταν η γραμμή j τεθεί εκτός λειτουργίας.

$$I_i = \max_m \{I_m\} \quad (3.7)$$

Ο δείκτης I_i αφορά το μέγιστο άθροισμα των υπερφορτίσεων που προκαλείται στη γραμμή i υπό όλες τις διαταραχές.

Τελικά, η γραμμή που πρέπει να ενισχυθεί προκύπτει από:

$$\text{Γραμμή προς ενίσχυση} = x = \begin{cases} \text{καμία, εάν } I_i = J_j = 0 \\ i, \text{ εάν } I_i \geq J_j \\ j, \text{ εάν } I_i < J_j \end{cases} \quad (3.8)$$

Διατυπώνοντας διαφορετικά το κριτήριο της μέγιστης συνολικής υπερφόρτισης, διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

- Η αποκοπή μιας γραμμής προκαλεί υπερφορτίσεις στις υπόλοιπες γραμμές του συστήματος.
- Σε κάποια συγκεκριμένη γραμμή εμφανίζεται υπερφόρτιση όταν διάφορες γραμμές τεθούν εκτός λειτουργίας.

Η απόφαση για το εάν είναι πιο συμφέρον να ενισχυθεί η γραμμή η οποία δημιουργεί πρόβλημα ως διαταραχή, ή αυτή που υπερφορτίζεται όταν κάποιες άλλες είναι εκτός λειτουργίας λαμβάνεται με τη βοήθεια του αθροίσματος των υπερφορτίσεων κάθε γραμμής. Συγκεκριμένα, προστίθενται οι υπερφορτίσεις U_{k-m} , και από αυτές επιλέγεται η μέγιστη για την μία και την άλλη περίπτωση. Όποια εκ των δύο λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή υποδεικνύει και τη γραμμή που πρέπει να ενισχυθεί.

Η διαδικασία που υλοποιήθηκε ανάπτυσσεται με τη βοήθεια ψευδοκώδικα ως εξής:

Start

while (Network_Is_N-1_Secure == False) do (1)

For $m = 1$ to n_{cont} (2)

Επίλυση προβλήματος Ροής Φορτίου

If (η διαταραχή γραμμής m προκαλεί νησιδοποίηση του δικτύου)

Αγνόησε τη διαταραχή της γραμμής m **continue**; (loop for $m = 1$ to n_{cont})

Else

For $k = 1$ to n_{lines} (3)

Υπολογισμός S_{km}

If ($S_{km} > S_k^{max}$)

ResultsTable[r][0]=m

ResultsTable[r][1]=k

ResultsTable[r][2]= L_{km}

End if

End (loop for $k = 1$ to n_{lines})

End if

End (loop for $m = 1$ to n_{cont})

If (Δε σημειώθηκε καμία παραβίαση)

Network_Is_N-1_Secure = True

break; (loop while)

Επιλογή γραμμής προς ενίσχυση

Υπολογισμός I_m

Υπολογισμός J_k

Υπολογισμός I_i

Υπολογισμός J_j

If ($I_i = J_j = 0$)

Καμία γραμμή δε χρειάζεται ενίσχυση

Else if ($I_i > J_j$)

Ενίσχυση γραμμής i
 Else if ($I_i < J_j$)
 Ενίσχυση γραμμής j
 Else if ($I_i = J_j$)
 Ενίσχυση γραμμής i ή j ,επιλέγοντας αυτή με το μικρότερο μήκος
 Εάν το μήκος είναι ίδιο επιλογή της i

End (loop while)

End

Παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος είναι χτισμένος με τρεις βρόχους επανάληψης (1), (2), (3). Στον (2) οι γραμμές μεταφοράς τίθενται εκτός λειτουργίας μία-μία, και μέσα σε αυτόν βρίσκεται φωλιασμένος ο (3), όπου εξετάζονται για κάθε διαταραχή όλες οι γραμμές για υπερφορτίσεις. Για τις γραμμές που διαπιστωθεί ότι προκαλούν νησιδοποίηση του δικτύου, η εντολή continue επιτρέπει στο βρόχο (2) να συνεχίσει κανονικά την ανάλυση προχωρώντας στην εξέταση της επόμενης γραμμής ως διαταραχή.

Πίνακας 3.2: Ενδεικτικός πίνακας αποθήκευσης υπερφορτίσεων στις γραμμές κατά τη N-1 κατάσταση.

1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η
A/A Παραβιάσεων	Γραμμή εκτός Λειτουργίας	Υπερφορτισμένη Γραμμή	L_{k-m}
1	LINE A m=2	LINE B k=1	L_{1-2}
2	LINE A m=2	LINE C k=7	L_{7-2}
3	LINE D m=35	LINE E k=78	L_{78-35}
4	LINE D m=35	LINE F k=67	L_{67-35}
R
N	LINE G m=123	LINE H k=111	$L_{111-123}$

Ο βρόχος επανάληψης (1) αποτελεί τον συνολικό έλεγχο της στατικής ασφάλειας του δικτύου, όπου εάν δεν υπάρχει υπερφόρτιση σε κανένα στοιχείο, ο αλγόριθμος βγαίνει από το βρόχο με τη βοήθεια της εντολής break, και το σύστημα είναι στατικά ασφαλές. Στην πράξη, ελέγχεται εάν δεν υπάρχει καμία κατάχρηση στον πίνακα αποτελεσμάτων ResultsTable[N][4] με τη βοήθεια του δείκτη r, έτσι ώστε να αποφευχθούν περιττοί υπολογισμοί των δεικτών επιλογής της γραμμής προς ενίσχυση στην περίπτωση που αυτή δεν απαιτείται.

Αναλυτικότερα, ο ResultsTable[N][4] (Πίνακας 3.2) που συμπληρώνεται στο πρόγραμμα αποτελεί τον πίνακα καταγραφής των παραβιάσεων που εμφανίζονται στις γραμμές μεταφοράς του συστήματος, ο οποίος είναι αρκετά παρόμοιος στη δομή του με τη δομή που παρουσιάζει το Neplan στα αποτελέσματα της Contingency Analysis (Σχήμα 3.11). Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.11, στην 1^η στήλη γράφεται ο αύξων αριθμός του στοιχείου που τίθεται εκτός λειτουργίας, στην 2^η στήλη αποθηκεύεται η διαταραχή που εφαρμόζεται στο σύστημα (m), στη 3^η η γραμμή στην οποία εμφανίζεται υπερφόρτιση στη ροή ισχύος (n), στην 4^η στήλη το είδος του στοιχείου που συμβαίνει η παραβίαση, στην 5^η η εκατοστιαία φόρτιση (ροή ισχύος) του στοιχείου της 3^{ης} στήλης, και στην 6^η στήλη το πλήθος των παραβιάσεων. Όλες οι γραμμές μεταφοράς της 2^{ης} στήλης του πίνακα είναι υπερφορτισμένες καθώς έχουν φόρτιση μεγαλύτερη από το 100% της ονομαστικής φορτίσεως.

Πίνακας 3.3: Παραβιάσεις στα όρια ροής ισχύος για το δίκτυο του παραδείγματος.

Διαταραχή	Υπερφορτισμένη Γραμμή	Φόρτιση (% της Ονομαστικής Φορτίσεως)	Αριθμός Παραβιάσεων
LIN 2-3	LIN 4-8	153.4	4
	LIN 7-6	135.27	
	LIN 2-4 2	101.13	
	LIN 2-4 1	101.13	
LIN 7-6	LIN 5-6	222.06	3
	LIN 5-2	222.06	
	LIN 4-8	124.32	
LIN 8-7	LIN 5-2	177.65	2
	LIN 5-6	177.65	
LIN 5-6	LIN 7-6	222.06	2
	LIN 8-7	177.65	
LIN 5-2	LIN 7-6	222.06	2
	LIN 8-7	177.65	
LIN 2-4 1	LIN 7-6	133.89	1
LIN 3-8	LIN 7-6	133.62	1
LIN 4-8	LIN 7-6	134.48	1

Πίνακας 3.4: Πίνακας αποτελεσμάτων (ResultsTable [N][4]) όπως παράγεται από τον αλγόριθμο με βάση τις υπερφορτίσεις του δικτύου του παραδείγματος (Πίνακας 3.3).

1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
A/A Παραβίασης	Διαταραχή: Γραμμή εκτός Λειτουργίας (Αύξων Αριθμός Γραμμής εκτός Λειτουργίας)	Υπερφορτισμένη Γραμμή (Αύξων Αριθμός Υπερφορτισμένης Γραμμής)	Φόρτιση L_{k-m} (%)	Υπερφόρτιση U_{k-m} (%)
1	LIN 2-3 (m=1)	LIN 4-8 (k=1)	$L_{1-1} = 153.40$	$U_{1-1} = 53.40$
2	LIN 2-3 (m=1)	LIN 7-6 (k=2)	$L_{2-1} = 135.27$	$U_{2-1} = 35.27$
3	LIN 2-3 (m=1)	LIN 2-4 2 (k=3)	$L_{3-1} = 101.13$	$U_{3-1} = 1.13$
4	LIN 2-3 (m=1)	LIN 2-4 1 (k=4)	$L_{4-1} = 101.13$	$U_{4-1} = 1.13$
5	LIN 7-6 (m=2)	LIN 5-6 (k=5)	$L_{5-2} = 222.06$	$U_{5-2} = 122.06$
6	LIN 7-6 (m=2)	LIN 5-2 (k=6)	$L_{6-2} = 222.06$	$U_{6-2} = 122.06$
7	LIN 7-6 (m=2)	LIN 4-8 (k=1)	$L_{1-2} = 124.32$	$U_{1-2} = 24.32$
8	LIN 8-7 (m=3)	LIN 5-2 (k=6)	$L_{6-3} = 177.65$	$U_{6-3} = 77.65$
9	LIN 8-7 (m=3)	LIN 5-6 (k=5)	$L_{5-3} = 177.65$	$U_{5-3} = 77.65$
10	LIN 5-6 (m=4)	LIN 7-6 (k=2)	$L_{2-4} = 222.06$	$U_{2-4} = 122.06$
11	LIN 5-6 (m=4)	LIN 8-7 (k=7)	$L_{7-4} = 177.65$	$U_{7-4} = 77.65$
12	LIN 5-2 (m=5)	LIN 7-6 (k=2)	$L_{2-5} = 222.06$	$U_{2-5} = 122.06$
13	LIN 5-2 (m=5)	LIN 8-7 (k=7)	$L_{7-5} = 177.65$	$U_{7-5} = 77.65$
14	LIN 2-4 1 (m=6)	LIN 7-6 (k=2)	$L_{2-6} = 133.89$	$U_{2-6} = 33.89$
15	LIN 3-8 (m=7)	LIN 7-6 (k=2)	$L_{2-7} = 133.62$	$U_{2-7} = 33.62$
16	LIN 4-8 (m=8)	LIN 7-6 (k=2)	$L_{2-8} = 134.48$	$U_{2-8} = 34.48$

Θα δοθεί ένα αναλυτικό παράδειγμα για την κατανόηση της αλγοριθμικής διαδικασίας. Έστω ότι η ανάλυση N-1 κατάστασης ενός δικτύου έδωσε τον πίνακα παραβιάσεων (Πίνακας 3.3). Ο πίνακας αποτελεσμάτων που σχηματίζεται από τον αλγόριθμο φαίνεται στον Πίνακα 3.4.

Παρατηρείται ότι ο προκύπτων Πίνακας 3.4 είναι διαστάσεων 16 x 4 (N=16), στη 2^η στήλη του Πίνακα 3.4, σε κάθε γραμμή μεταφοράς που τίθεται εκτός λειτουργίας αντιστοιχίζεται ένας μοναδικός ακέραιος αριθμός m. Στην 3^η στήλη του Πίνακα 3.4, αντιστοιχίζεται ένας μοναδικός ακέραιος αριθμός k. Οι ακέραιοι αυτοί αριθμοί λειτουργούν ως δείκτες για κάθε γραμμή και ο καθορισμός αυτών είναι αυθαίρετος και πραγματοποιείται καθαρά για λόγους επεξήγησης της λειτουργίας του αλγορίθμου. Μια γραμμή λαμβάνει μία σταθερή τυχαία τιμή δείκτη m, όταν εξετάζεται ως διαταραχή, και μία σταθερή τυχαία τιμή k όταν εξετάζεται ως υπερφορτισμένο στοιχείο, με τη δυνατότητα οι τιμές αυτές να είναι διαφορετικές. Για παράδειγμα, η 8^η παραβίαση του Πίνακα 3.4 δηλώνει ότι για την αποκοπή λειτουργίας της γραμμής LIN 8-7 (με m=3), η γραμμή LIN 5-2 (με k=6) σημειώνει φόρτιση $L_{k-m} = L_{6-3} = 177.65\%$, ξεπερνώντας το επιτρεπτό όριο του 100% κατά 77.65%. Παρατηρείται ότι η LIN 8-7 όταν εξετάζεται ως διαταραχή (2^η στήλη Πίνακας 3.4) λαμβάνει για δείκτη την τιμή m=3, ενώ ως υπερφορτισμένη γραμμή (3 στήλη Πίνακας 3.4) λαμβάνει την τιμή k=7. Στη συνέχεια, θα υπολογιστούν οι δείκτες J_k και I_m , για την απόφαση της γραμμής προς ενίσχυση με βάση τον Πίνακα 3.4. Με βάση τη σχέση (3.4) μπορεί να υπολογιστεί ο δείκτης I_1 για διαταραχή στη γραμμή με m=1, δηλαδή στη γραμμή LIN 2-3:

$$I_1 = \sum_{k=1}^{n_{lines}} U_{k-m} = U_{1-1} + U_{2-1} + U_{3-1} + U_{4-1} = 53.40 + 35.27 + 1.13 + 1.13 = 90.93\%$$

Ο δείκτης I_1 εκφράζει την υπερφόρτιση που προκαλεί συνολικά σε όλες τις γραμμές η αποκοπή λειτουργίας της γραμμής LIN 2-3 (m=1).

Με βάση τη σχέση (3.5) μπορεί να υπολογιστεί ο δείκτης J_2 για την υπερφορτισμένη γραμμή με k=2, δηλαδή τη LIN 7-6:

$$J_2 = \sum_{m=1}^{n_{cont}} U_{k-m} = U_{2-1} + U_{2-4} + U_{2-5} + U_{2-6} + U_{2-7} + U_{2-8} = 35.27 + 122.06 + 122.06 + 33.89 + 33.62 + 34.48$$

$$J_2 = 381.92\%$$

Ο δείκτης J_2 εκφράζει την υπερφόρτιση που εμφανίζεται συνολικά στη γραμμή LIN 7-6 (k=2), για τις διάφορες διαταραχές που εξετάζονται.

Οι αντίστοιχοι δείκτες και για τις υπόλοιπες γραμμές υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο και απεικονίζονται αναλυτικά στους Πίνακες 3.5 και 3.6.

Ύστερα, με τον υπολογισμό των δεικτών J_j και I_i εξάγεται:

$$J_j = \max_k \{J_k\} = \max \{J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6, J_7\} = 381.83\% \text{ με } j = 2$$

Συνεπώς, η γραμμή που υφίσταται τη μεγαλύτερη συνολική υπερφόρτιση για τις διαταραχές που εφαρμόζονται είναι η LIN 7-6 (k=2).

$$I_i = \max_m \{I_m\} = \max \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8\} = 268.44\% \text{ με } i = 2$$

Πίνακας 3.5: Οι τιμές των δεικτών I_m για την επίλυση του παραδείγματος.

m	Σύμβολο δείκτη I_m	Τιμή Υπερφόρτισης (%)
1	I_1	90.93
2	I_2	268.44
3	I_3	155.30
4	I_4	199.71
5	I_5	199.71
6	I_6	33.89
7	I_7	33.62
8	I_8	34.48
	$I_i = \max_m \{I_m\}$	268.44

Άρα, η γραμμή η οποία όταν βρίσκεται σε αποκοπή λειτουργίας, προκαλεί τη μεγαλύτερη συνολική υπερφόρτιση στις υπόλοιπες γραμμές του συστήματος είναι η LIN 7-6 ($m=2$).

Τελικά, ισχύει:

$$J_{j=2} > I_{i=2}$$

που σημαίνει ότι η γραμμή $j=k=2$ LIN 7-6 πρέπει να ενισχυθεί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση και οι δύο δείκτες J_j και I_i έχουν ταύτιση αποτελεσμάτων, αφού και οι δύο υποδεικνύουν την ενίσχυση της γραμμής LIN 7-6. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η LIN 7-6 προκαλεί μεγαλύτερη υπερφόρτιση στο σύστημα όταν αποκόπτονται οι υπόλοιπες γραμμές, παρά όταν αυτή τίθεται ως διαταραχή (381.83% έναντι 268.44 %), έτσι η ενίσχυση αυτής εξομαλύνει και τις δύο περιπτώσεις.

Πίνακας 3.6: Οι τιμές των δεικτών J_k για την επίλυση του παραδείγματος.

k	Σύμβολο δείκτη J_k	Τιμή Υπερφόρτισης (%)
1	J_1	77.72
2	J_2	381.83
3	J_3	1.13
4	J_4	1.13
5	J_5	199.71
6	J_6	199.71
7	J_7	155.30
	$J_j = \max_k \{J_k\}$	381.83

Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό των δεικτών χρησιμοποιείται ο δείκτης U_{k-m} και όχι ο L_{k-m} και ο λόγος θα γίνει ξεκάθαρος με την παρακάτω διευκρίνιση. Έστω ότι λαμβάνεται ο δείκτης L_{k-m} για τον υπολογισμό του I_1 :

$$I_1 = \sum_{k=1}^{n_{lines}} L_{k-m} = L_{1-1} + L_{2-1} + L_{3-1} + L_{4-1} = 153.40 + 135.27 + 101.13 + 101.13 = 490.93\%$$

οπότε

$$I_i = \max_m \{I_m\} = \max \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8\} = 490.93\% \text{ με } i = 1$$

και επειδή

$$I_{i=1} > J_{j=2}$$

προκύπτει ότι η γραμμή $i = m = 1$ LIN 2-3 πρέπει να ενισχυθεί, που δεν έρχεται σε συμφωνία με τη LIN 7-6 που υπολογίστηκε παραπάνω.

Παρατηρείται ότι η χρήση του L_{k-m} έχει ως αποτέλεσμα να προστίθεται κάθε φορά η μονάδα στο συνολικό άθροισμα, οδηγώντας σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Ουσιαστικά, με αυτό το τρόπο φαίνονται λανθασμένα ότι οι περισσότερες σε πλήθος υπερφορτίσεις, έχουν πάντα μεγαλύτερο άθροισμα.

Τέλος, σημειώνεται ότι η πρώτη επανάληψη που εκτελεί ο βρόχος (1), αποτελεί ουσιαστικά ανάλυση N-1 ασφάλειας και τα αποτελέσματα του ResultsTable[N][4] στο τέλος αυτής, ταυτίζονται με αυτά που δίνει η μονάδα Contingency Analysis του Neplan.

3.2.2.2 Ανασκόπηση-Αποτελέσματα

Τελικά, η ρουτίνα υπολογισμού, έγινε με σύμβαση UNICODE σε C/C++, αποτελείται από 654 γραμμές κώδικα μαζί με σχόλια, και καλεί κατά περίπτωση τις συναρτήσεις του Πίνακα 3.7 από τη βιβλιοθήκη του Neplan.

Πίνακας 3.7: Συναρτήσεις της Neplan Programming Library για την κατασκευή του αλγορίθμου.

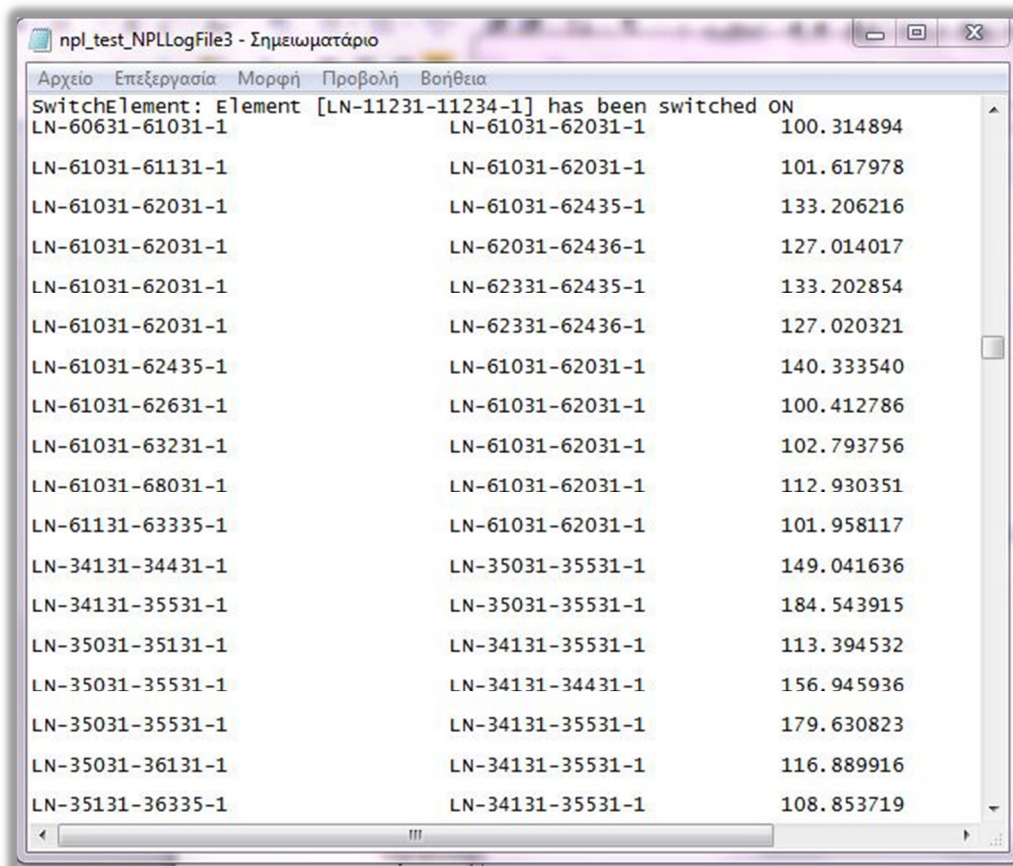
Όνομα Συνάρτησης στο Neplan και Ορίσματα	Περιγραφή
BOOL ShowReport()	Εμφανίζει το αρχείο εξόδου όταν εκτελείται ένα αρχείο DLL που παράχθηκε μέσω NPL. Επιστρέφει αληθή τιμή όταν η αναφορά μπορεί να εμφανιστεί.
BOOL GetParameterDouble(unsigned long IID, TCHAR* sParameter, double& dValue)	Δίνει πρόσβαση σε μία παράμετρο τύπου Double ενός στοιχείου Ορίσματα Εισόδου: IID =Αριθμός ID του στοιχείου, sParameter = Όνομα της παραμέτρου του στοιχείου, Επιστρέφει: dValue = Τιμή της παραμέτρου. Η συνάρτηση λαμβάνει αληθη τιμή εάν η πρόσβαση είναι επιτυχής.

Πίνακας 3.7: Συναρτήσεις της Neplan Programming Library για την κατασκευή του αλγορίθμου (Συνέχεια).

Όνομα Συνάρτησης στο Neplan και Ορίσματα	Περιγραφή
BOOL SetParameterDouble(unsigned long IID, TCHAR*sParameter, double dValue)	<p>Θέτει μια τιμή τύπου Double μιας παραμέτρου ενός στοιχείου. Ορίσματα Εισόδου: IID = Αριθμός ID του στοιχείου, sParameter = Όνομα της παραμέτρου του στοιχείου, dValue = Επιθυμητή τιμή της παραμέτρου Η συνάρτηση λαμβάνει αληθή τιμή εάν η πρόσβαση είναι επιτυχής.</p> <p>Η συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον για την απενεργοποίηση των γραμμών μέσα στους βρόχους επανάληψης, αλλά και την ενίσχυση αυτών.</p>
void GetElements(TCHAR* sType, int& nCount, unsigned long*& pElementIDs);	<p>Δημιουργία λίστας με όλους τους αριθμούς ID ενός συγκεκριμένου τύπου στοιχείου. Αυτή η λίστα χρησιμοποιείται για προσπέλαση ενός τύπου στοιχείου με ένα βρόχο for. Όρισμα Εισόδου: sType = Τύπος στοιχείου (π.χ LINE) Επιστρέφει: nCount = πλήθος στοιχείων της λίστας pElementIDs = δείκτης στο πρώτο στοιχείο της λίστας</p> <p>Η συνάρτηση ήταν απαραίτητη για την πρόσβαση σε όλες τις γραμμές μεταφοράς ώστε να γίνει η εφαρμογή διαταραχών, αλλά και ο έλεγχος για υπερφόρτιση.</p>
BOOL GetResultDouble(unsigned long IID, TCHAR* sResultType, double& dValue);	<p>Λήψη αποτελέσματος από μία ανάλυση Ορίσματα Εισόδου: IID = Αριθμός ID του στοιχείου που ζητείται το αποτέλεσμα sResultType = Τύπος αποτελέσματος (π.χ Boolean, Double, Integer) Επιστρέφει: dValue = τιμή αποτελέσματος. Η συνάρτηση λαμβάνει αληθή τιμή εάν η πρόσβαση είναι επιτυχής.</p> <p>Μια εφαρμογή αυτής στον αλγόριθμο ήταν η λήψη των τιμών ροών ισχύος στις γραμμές μεταφοράς με σκοπό την αποθήκευση και έλεγχο για υπερφόρτιση.</p>

Πίνακας 3.7: Συναρτήσεις της Neplan Programming Library για την κατασκευή του αλγορίθμου (Συνέχεια).

Όνομα Συνάρτησης στο Neplan και Ορίσματα	Περιγραφή
BOOL RunAnalysisLF(BOOL bStopIFNonConv=TRUE);	Εκτελείται Ροή Φορτίου. Αν η μεταβλητή bStopIFNonConv λάβει την τιμή FALSE, τότε εμφανίζεται μήνυμα σχετικό με την αποτυχία σύγκλισης της μεθόδου .
void ShowMessage(TCHAR* wcMessage, int nMessageWnd=0)	Εμφανίζει ένα κατάλληλο μήνυμα στο γραφικό περιβάλλον του Neplan. Η μεταβλητή nMessageWnd χρησιμοποιείται για την παραγωγή των παρακάτω διαφορετικών τύπων μηνυμάτων: - nMessageWnd = 0 -> Παράθυρο μηνυμάτων - nMessageWnd = 1 -> Μήνυμα σφάλματος - nMessageWnd = 2 -> Μήνυμα με πληροφορίες για την ανάλυση



Σχήμα 3.17: Αρχείο παρουσίασης αποτελεσμάτων του DLL.

Η συναρμολόγηση του κώδικα με τις παραπάνω συναρτήσεις, μέχρι την επίτευξη του τελικού αποτελέσματος αποτέλεσε την πιο χρονοβόρα διαδικασία της διπλωματικής εργασίας. Προγραμματιστικές τεχνικές απαιτήθηκαν ώστε να ενσωματωθεί στον αλγόριθμο η εξαίρεση των γραμμών που προκαλούν νησιδοποίηση (Σχήμα 2.1), και ο καθορισμός της γραμμής προς ενίσχυση με την κατάλληλη επεξεργασία του πίνακα αποτελεσμάτων, εξισώσεις 3.4 έως 3.8. Ο αλγόριθμος επίσης ήταν αναγκαίο να θωρακιστεί από περιπτώσεις που παρουσίαζαν μη αναμενόμενα σφάλματα, οπότε ανασυντάχθηκε πολλές φορές μέχρι να καταλήξει στην τελική του μορφή. Η δομή του αλγορίθμου κατασκευάστηκε με τρόπο ώστε να λειτουργεί όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά και με λιγότερη πολυπλοκότητα, προσδίδοντας κέρδος σε χρόνο εκτέλεσης, που είναι καθοριστικός παράγοντας για την εφαρμογή του σε μεγάλα δίκτυα.

Με το πέρας της εφαρμογής του DLL αρχείου, το Neplan παράγει αυτόματα ένα αρχείο *.txt, που περιέχει αναλυτική αναφορά των αποτελεσμάτων (Σχήμα 3.17). Παρουσιάζονται οι γραμμές που τέθηκαν εκτός λειτουργίας, αυτές που προκαλούν νησιδοποίηση, και αυτές που είναι αναγκαίο να ενισχυθούν μαζί με πόσες θα είναι τελικά οι παράλληλες γραμμές που χρειάζονται ώστε να είναι στατικά ασφαλές το δίκτυο.

3.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] NEPLAN® by BCP Busarello + Cott + Partner AG, “NEPLAN User's Guide V5” [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.die.unipd.it/files/TutorialNeplan.pdf> προσπελάστηκε τον Δεκέμβριο του 2012.
- [3.2] NEPLAN® by BCP Busarello + Cott + Partner AG, “Element Data Input and Models” [Online]. Διαθέσιμο: http://www.neplan.ch/html/e/e_home.htm προσπελάστηκε τον Δεκέμβριο του 2012.
- [3.3] G. V. Tcheslavski, “Transmission Lines” , *ELEN 3441 Fundamentals of Power Engineering* [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.ee.lamar.edu/gleb/power/Lecture%2009%20%20Transmission%20lines.ppt> προσπελάστηκε τον Ιανουάριο του 2013.
- [3.4] NEPLAN® “NPL - NEPLAN Programming Library Manual (Version 5.4.3)”, *BCP Busarello + Cott + Partner Power Systems Engineering* , Erlenbach 2001.
- [3.5] B. Keel, Salt River Project, “WECC Experience in the Collection of Transmission Common-Mode and Dependant Outages,” *IEEE Power and Energy Society, April 2012*.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του λογισμικού και του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του. Για τον έλεγχο της εφαρμογής επιλέχθηκαν δύο διαφορετικά δίκτυα, ένα των 13 ζυγών, και ένα μοντέλο του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος των 893 ζυγών. Το πρώτο σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βρίσκεται αποθηκευμένο μέσα στο λογισμικό Nerplan.

Δίδονται αρχικά τα δεδομένα του κάθε δικτύου, και στη συνέχεια θα διεξαχθεί AC Ροή Φορτίου (Extended Newton Raphson, Ενότητα 3.1), και DC Ροή Φορτίου με χρήση του Nerplan. Θα γίνει παρουσίαση και σύγκριση των υπολογισμών και στη συνέχεια παράθεση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου, και σχολιασμός σχετικά με την ορθότητά τους. Αναφέρεται ότι όλη η ανάλυση θα διεξαχθεί με τις πραγματικές τιμές των στοιχείων και όχι σε ανά μονάδα σύστημα, διότι ήταν πιο ευχερές από τη στιγμή που το Nerplan τις επεξεργάζεται με αυτό τον τρόπο.

4.2 ΔΙΚΤΥΟ 13 ΖΥΓΩΝ

4.2.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Το εν λόγω δίκτυο αποτελείται από 13 ζυγούς και 10 γραμμές μεταφοράς. Παρατίθενται τα δεδομένα του συστήματος στους Πίνακες 4.1 έως 4.6.

Πίνακας 4.1: Δεδομένα ζυγών του δικτύου.

Όνομα Ζυγού	Ονομαστική Τάση V_n (kV)
11	5.2
1	220
10	5.2
9	65
7	65
6	65
5	65
3	65

Πίνακας 4.1: Δεδομένα ζυγών του δικτύου (Συνέχεια).

Όνομα Ζυγού	Ονομαστική Τάση V_n (kV)
8	65
4	65
12	16
2	65
13	8.5

Ως ζυγός ταλάντωσης λαμβάνεται ο Ζυγός 1.

Πίνακας 4.2: Δεδομένα γραμμών μεταφοράς του δικτύου.

Όνομα Γραμμής	Από Ζυγό	Προς Ζυγό	Μήκος (km)	R (Ohm/km)	X (Ohm/km)	C (μ F/km)	B (μ S/km)	I_{max} (A)
LIN 5-6	5	6	11.9	0.141	0.413	0.009	2.827	190
LIN 2-4-2	2	4	1.16	0.103	0.403	0.009	2.827	90
LIN 2-4-1	2	4	1.16	0.103	0.403	0.009	2.827	90
LIN 2-3	2	3	0.59	0.103	0.403	0.009	2.827	70
LIN 4-8	4	8	0.199	0.113	0.41	0.009	2.827	100
LIN 8-7	8	7	19.1	0.112	0.4	0.009	2.827	200
LIN 3-8	3	8	0.37	0.113	0.413	0.009	2.827	75
LIN 3-9	3	9	0.156	0.113	0.413	0.009	2.827	60
LIN 7-6	7	6	1.612	0.066	0.382	0.01	3.142	400
LIN 5-2	5	2	7.797	0.091	0.415	0.009	2.827	200

Πίνακας 4.3: Δεδομένα μετασχηματιστών του δικτύου.

Όνομα Μ/Σ	Από Ζυγό	Προς Ζυγό	Ονομαστική Ισχύς (MVA) S_n	Ονομαστική Τάση Προτεύοντος V_{n1} (kV)	Ονομαστική Τάση Δευτερεύοντος V_{n2} (kV)	Τάση Βραχυκύκλωσης (%)
TRA 1-2	1	2	200	220	65	9
TRA 8-12	8	12	60	65	16	10
TRA 6-13	6	13	50	65	8.5	10
TRA 8-11	8	11	12	65	5.2	10
TRA 9-10	9	10	6	65	5.2	8.5

Πίνακας 4.4: Δεδομένα σύγχρονων γεννητριών του δικτύου.

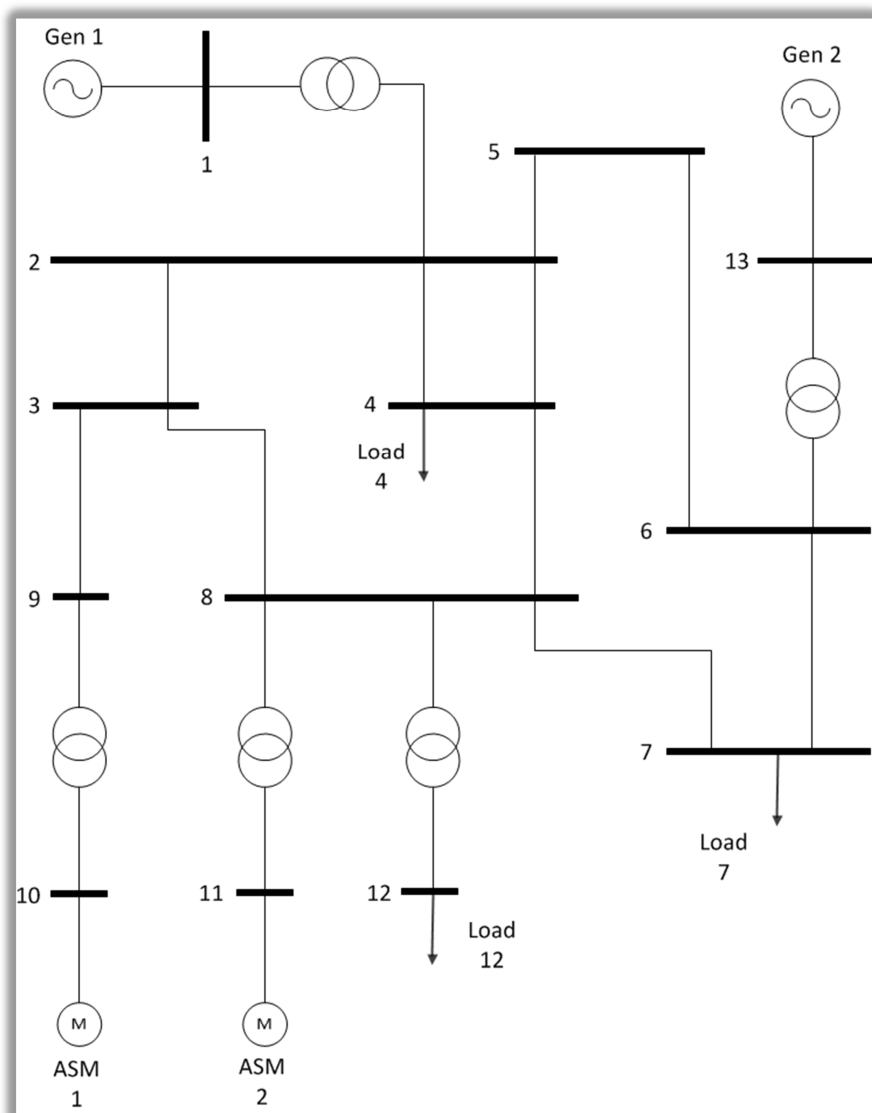
Όνομα Γεννητριας	Ζυγός Σύνδεσης	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	Q_{min} (Mvar)	Q_{max} (Mvar)
GEN 1	1	-4000	4000	-4000	4000
GEN 2	13	-10000	10000	-10000	10000

Πίνακας 4.5: Δεδομένα ασύγχρονων κινητήρων του δικτύου.

Όνομα Κινητήρα	Ζυγός Σύνδεσης	Ονομαστική Ισχύς S_n (MVA)	Ονομαστική Τάση V_n (kV)	$\cos\phi$	Αδράνεια J (kgm^2)	P (MW)	Q (Mvar)
ASM 2	11	6.649	5.2	0.8	100	2	1
ASM 1	10	6.649	5.2	0.8	100	4	3

Πίνακας 4.6: Δεδομένα φορτίων του δικτύου.

Όνομα Φορτίου	Ζυγός Σύνδεσης	P (MW)	Q (Mvar)	$\cos\phi$
LOAD 4	4	2.2	2.13	0.718
LOAD 12	12	5	4	0.781
LOAD 7	7	2	2	0.707



Σχήμα 4.1: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας 13 ζυγών.

4.2.2 AC ΚΑΙ DC ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ NEPLAN

Παραβάλλονται τα αποτελέσματα της AC Ροής Φορτίου για το σύστημα 13 ζυγών στους Πίνακες 4.7 έως 4.8.

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα στους ζυγούς με AC Ροή Φορτίου.

Ζυγός	Τάση V (kV)	Τάση ανά Μονάδα (%)	Γωνία Τάσης (°)	P _{load} (MW)	Q _{load} (Mvar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (Mvar)
4	66.23	101.89	-0.1	2.2	2.13	0	0
8	66.228	101.89	-0.1	0	0	0	0
2	66.245	101.92	-0.1	0	0	0	0
3	66.228	101.89	-0.1	0	0	0	0
5	66.481	102.28	0	0	0	0	0
6	66.868	102.87	0.2	0	0	0	0
7	66.805	102.78	0.1	2	2	0	0
9	66.224	101.88	-0.1	0	0	0	0
10	5.035	96.82	-3.2	4	3	0	0
1	220	100	0	0	0	5.296	2.564
11	5.248	100.92	-1	2	1	0	0
13	8.913	104.86	1.2	0	0	10	10
12	16.19	101.19	-0.6	5	4	0	0

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα ροών ισχύος με AC Ροή Φορτίου.

Όνομα Στοιχείου	Τύπος	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	P (MW)	Q (Mvar)	I (kA)	Γωνία I (°)	Φόρτιση %	P _{loss} (MW)	Q _{loss} (Mvar)
ASM 1	Ασύγχρονος Κινητήρας	10		4	3	0.573	-40.1			
ASM 2	Ασύγχρονος Κινητήρας	11		2	1	0.246	-27.6			
GEN 1	Σύγχρονη Γεννήτρια	1		-5.296	-2.564	0.015	154.2			
GEN 2	Σύγχρονη Γεννήτρια	13		-10	-10	0.916	136.2			
LIN 2-3	Γραμμή		3	-4.782	-3.424	0.051	144.3	73.25	0.0005	-0.0054
LIN 2-3	Γραμμή	2		4.782	3.419	0.051	-35.7	73.19	0.0005	-0.0054
LIN 2-4-1	Γραμμή		4	-2.27	-1.58	0.024	145	26.79	0.0002	-0.0136
LIN 2-4-1	Γραμμή	2		2.27	1.566	0.024	-34.7	26.71	0.0002	-0.0136
LIN 2-4-2	Γραμμή		4	-2.27	-1.58	0.024	145	26.79	0.0002	-0.0136
LIN 2-4-2	Γραμμή	2		2.27	1.566	0.024	-34.7	26.71	0.0002	-0.0136
LIN 3-8	Γραμμή		8	-0.746	-0.054	0.007	175.7	8.7	0	-0.0046
LIN 3-8	Γραμμή	3		0.746	0.05	0.007	-4	8.69	0	-0.0046
LIN 3-9	Γραμμή		9	-4.036	-3.376	0.046	139.9	76.45	0.0001	-0.0015
LIN 3-9	Γραμμή	3		4.036	3.375	0.046	-40	76.43	0.0001	-0.0015
LIN 4-8	Γραμμή		8	-2.34	-1.032	0.022	156.1	22.29	0	-0.0023
LIN 4-8	Γραμμή	4		2.34	1.03	0.022	-23.9	22.28	0	-0.0023
LIN 5-2	Γραμμή		5	4.033	3.929	0.049	-44.2	24.45	0.0052	-0.0736
LIN 5-2	Γραμμή	2		-4.028	-4.003	0.049	135	24.74	0.0052	-0.0736
LIN 5-6	Γραμμή		5	-4.033	-3.929	0.049	135.8	25.74	0.0118	-0.115
LIN 5-6	Γραμμή	6		4.045	3.814	0.048	-43.1	25.26	0.0118	-0.115
LIN 7-6	Γραμμή		7	-5.936	-5.835	0.072	135.6	17.98	0.0016	-0.0131
LIN 7-6	Γραμμή	6		5.937	5.822	0.072	-44.3	17.95	0.0016	-0.0131
LIN 8-7	Γραμμή		8	-3.921	-4.021	0.049	134.1	24.48	0.0149	-0.1856
LIN 8-7	Γραμμή	7		3.936	3.835	0.047	-44.1	23.75	0.0149	-0.1856
LOAD 4	Φορτίο		4	2.2	2.13	0.027	-44.2			
LOAD 7	Φορτίο		7	2	2	0.024	-44.9			
LOAD 12	Φορτίο		12	5	4	0.228	-39.2			
TRA 8-11	ΜΣ		8	2.003	1.041	0.02	-27.6	18.81	0.0033	0.0408
TRA 8-11	ΜΣ		11	-2	-1	0.246	152.4	18.63	0.0033	0.0408

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα ροών ισχύος με AC Ροή Φορτίου (Συνέχεια).

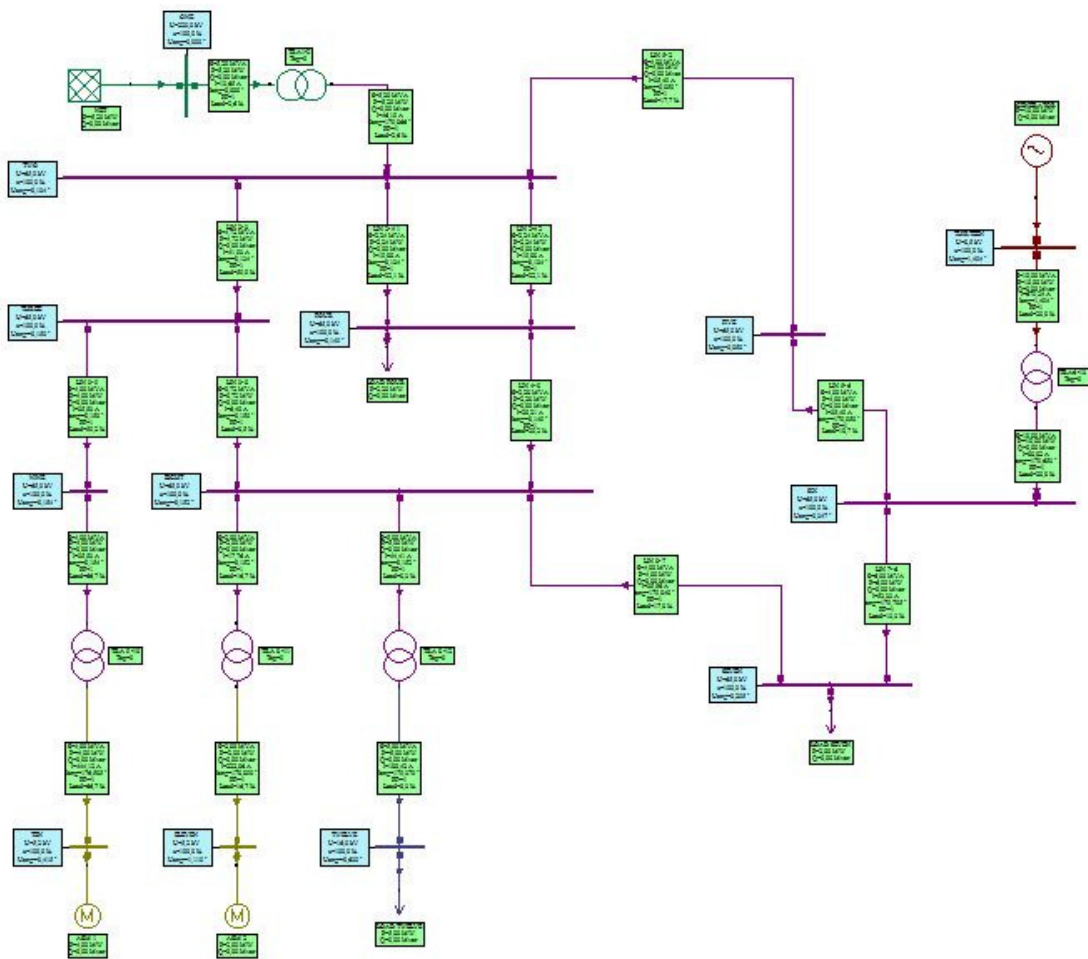
Όνομα Στοιχείου	Τύπος	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	P (MW)	Q (Mvar)	I (kA)	Γωνία I (°)	Φόρτιση %	P _{loss} (MW)	Q _{loss} (Mvar)
TRA 8-12	ΜΣ	8		5.003	4.067	0.056	-39.2	10.75	0.0033	0.0667
TRA 8-12	ΜΣ		12	-5	-4	0.228	140.8	10.67	0.0033	0.0667
TRA 9-10	ΜΣ	9		4.036	3.376	0.046	-40.1	87.69	0.0356	0.3762
TRA 9-10	ΜΣ		10	-4	-3	0.573	139.9	83.33	0.0356	0.3762
TRA 1-2	ΜΣ	1		5.296	2.564	0.015	-25.8	2.94	0.0008	0.0149
TRA 1-2	ΜΣ		2	-5.295	-2.549	0.051	154.2	2.94	0.0008	0.0149
TRA 6-13	ΜΣ	6		-9.982	-9.637	0.12	136.2	27.75	0.0182	0.3633
TRA 6-13	ΜΣ		13	10	10	0.916	-43.8	28.28	0.0182	0.3633

Σημειώνεται ότι η σύμβαση σχετικά με την ισχύ στο Nerplan είναι να λαμβάνει αρνητικό πρόσημο όταν εξέρχεται από κάποιο στοιχείο, και θετικό όταν εισέρχεται σε αυτό.

Στη συνέχεια, εκτελείται DC Ροή Φορτίου, όπου αμελούνται οι ωμικές αντιστάσεις, η άεργος ισχύς, και όλες οι τάσεις των ζυγών θεωρούνται ονομαστικές. Από τις παραδοχές αυτές, προκύπτει ότι οι απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος είναι μηδενικές στη DC Ροή Φορτίου, όπως φαίνεται στο Πίνακα 4.9:

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα ροών ισχύος με DC Ροή Φορτίου.

Όνομα Στοιχείου	Τύπος	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	P (MW)	Q (Mvar)	I (kA)	Γωνία I (°)	Φόρτιση %	P _{loss} (MW)	Q _{loss} (Mvar)
ASM 1	Ασύγχρονος Κινητήρας	10		4	0	0.444	-3.4			
ASM 2	Ασύγχρονος Κινητήρας	11		2	0	0.222	-1.1			
GEN 1	Σύγχρονη Γεννήτρια	1		-5.2	0	0.014	-180			
GEN 2	Σύγχρονη Γεννήτρια	13		-10	0	0.679	-178.5			
LIN 2-3	Γραμμή		3	-4.721	0	0.042	179.8	59.9	0	0
LIN 2-3	Γραμμή	2		4.721	0	0.042	-0.1	59.9	0	0
LIN 2-4-1	Γραμμή		4	-2.238	0	0.02	179.9	22.08	0	0
LIN 2-4-1	Γραμμή	2		2.238	0	0.02	-0.1	22.08	0	0
LIN 2-4-2	Γραμμή		4	-2.238	0	0.02	179.9	22.08	0	0
LIN 2-4-2	Γραμμή	2		2.238	0	0.02	-0.1	22.08	0	0
LIN 3-8	Γραμμή		8	-0.721	0	0.006	179.8	8.54	0	0
LIN 3-8	Γραμμή	3		0.721	0	0.006	-0.2	8.54	0	0
LIN 3-9	Γραμμή		9	-4	0	0.036	179.8	59.22	0	0
LIN 3-9	Γραμμή	3		4	0	0.036	-0.2	59.22	0	0
LIN 4-8	Γραμμή		8	-2.275	0	0.02	179.8	20.21	0	0
LIN 4-8	Γραμμή	4		2.275	0	0.02	-0.1	20.21	0	0
LIN 5-2	Γραμμή	5		3.996	0	0.035	0	17.75	0	0
LIN 5-2	Γραμμή		2	-3.996	0	0.035	179.9	17.75	0	0
LIN 5-6	Γραμμή		5	-3.996	0	0.035	-180	18.68	0	0
LIN 5-6	Γραμμή	6		3.996	0	0.035	0.3	18.68	0	0
LIN 7-6	Γραμμή		7	-6.004	0	0.053	-179.7	13.33	0	0
LIN 7-6	Γραμμή	6		6.004	0	0.053	0.3	13.33	0	0
LIN 8-7	Γραμμή		8	-4.004	0	0.036	179.8	17.78	0	0
LIN 8-7	Γραμμή	7		4.004	0	0.036	0.3	17.78	0	0
LOAD 4	Φορτίο	4		2.2	0	0.02	-0.1			
LOAD 7	Φορτίο	7		2	0	0.018	0.3			
LOAD 12	Φορτίο	12		5	0	0.18	-0.6			
TRA 8-11	ΜΣ	8		2	0	0.018	-0.2	16.67	0	0
TRA 8-11	ΜΣ		11	-2	0	0.222	178.9	16.67	0	0
TRA 8-12	ΜΣ	8		5	0	0.044	-0.2	8.33	0	0
TRA 8-12	ΜΣ		12	-5	0	0.18	179.4	8.33	0	0
TRA 9-10	ΜΣ	9		4	0	0.036	-0.2	66.67	0	0
TRA 9-10	ΜΣ		10	-4	0	0.444	176.6	66.67	0	0
TRA 1-2	ΜΣ	1		5.2	0	0.014	0	2.6	0	0
TRA 1-2	ΜΣ		2	-5.2	0	0.046	179.9	2.6	0	0
TRA 6-13	ΜΣ	6		-10	0	0.089	-179.7	20	0	0
TRA 6-13	ΜΣ		13	10	0	0.679	1.5	20	0	0



Σχήμα 4.2: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της Ροής Φορτίου για το δίκτυο των 13 ζυγών στο Nerplan.

Συγκεντρωτικά, στοιχεία για την ισχύ που ρέει στο κύκλωμα σχετικά με τις απώλειες, την παραγωγή, και την κατανάλωση για τις δύο μεθόδους φαίνονται στον Πίνακα 4.10.

Η φόρτιση των γραμμών μεταφοράς που υπολογίστηκε στους Πίνακες 4.8 και 4.9 αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα απόφασης για παραβίαση των ορίων, και κατά επέκταση για την ενίσχυση του δικτύου. Αντιπαραβάλλοντας τις φορτίσεις των γραμμών που υπολογίστηκαν με τις δύο μεθόδους (Πίνακας 4.11) προκύπτουν κάποιες ασυμφωνίες.

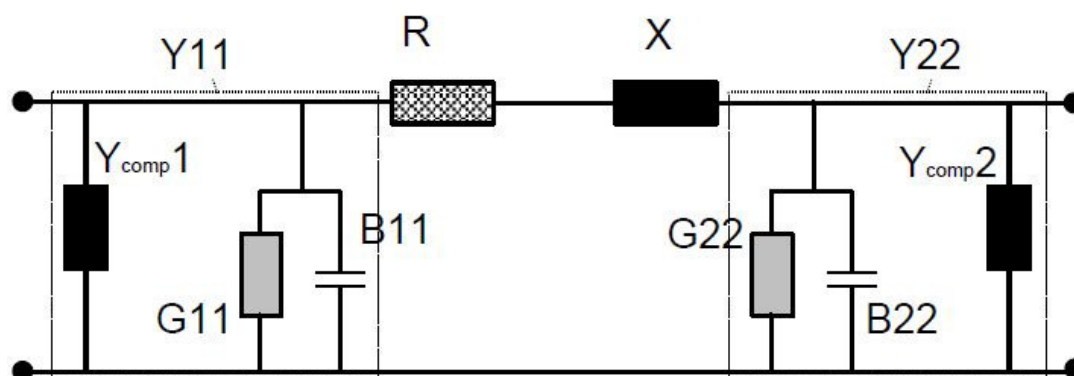
Πίνακας 4.10: Ισχύς δικτύου με τις δυο μεθόδους Ροής Φορτίου (AC και DC).

	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (Mvar)	P_{load} (MW)	Q_{load} (Mvar)	P_{loss} (MW)	Q_{loss} (Mvar)
AC	15.296	12.564	15.2	12.13	0.096	0.434
DC	15.2	0	15.2	0	0	0

Πίνακας 4.11: Φορτίσεις των γραμμών στις δύο μεθόδους Ροής Φορτίου.

Γραμμή Μεταφοράς	Φόρτιση στη AC Ροή Φορτίου (%)	Φόρτιση στη DC Ροή Φορτίου (%)	Διαφορά (%)
LIN 2-3	73.25	59.90	13.35
LIN 2-4-1	26.79	22.08	4.71
LIN 2-4-1	26.71	22.08	4.63
LIN 2-4-2	26.79	22.08	4.71
LIN 3-8	8.70	8.54	0.16
LIN 3-9	76.45	59.22	17.23
LIN 4-8	22.29	20.21	2.08
LIN 5-2	24.74	17.75	6.99
LIN 5-6	25.74	18.68	7.06
LIN 7-6	17.98	13.33	4.65
LIN 8-7	23.75	17.78	5.97

Αναφέρεται ότι στο πρόγραμμα Nerlan, η γραμμή μεταφοράς αντιπροσωπεύεται κυκλωματικά από το ισοδύναμο μοντέλο Π (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Κυκλωματικό μοντέλο γραμμής μεταφοράς στο NERLAN.

Συνεπώς, ανάλογα με τις τιμές των αντιδράσεων, ωμικών αντιστάσεων, χωρητικοτήτων στην άφιξη της γραμμής δύναται να εισρέει διαφορετική τιμή ρεύματος και ισχύος από ότι στην αναχώρησή της. Όπως παρατηρείται στους Πίνακες 4.8 και 4.9 το λογισμικό υπολογίζει διαφορετικές τιμές ισχύος στα δύο άκρα της γραμμής για την AC Ροή Φορτίου, όπου οι απώλειες λαμβάνονται υπόψη. Ο αλγόριθμος έχει κατασκευαστεί να λαμβάνει ως φόρτιση μιας γραμμής πάντα τη μέγιστη εκ των δύο (φόρτιση στην αναχώρηση και φόρτιση στην άφιξη της γραμμής), προκειμένου να ληφθεί η χειρότερη περίπτωση υπερφόρτισης και να εξασφαλιστεί η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια του αποτελέσματος αυτού.

Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ της φόρτισης στην AC και DC Ροή Φορτίου είναι αποδεκτές (της τάξεως του 0 έως 7%) για τις περισσότερες γραμμές, εκτός από τις γραμμές LIN 2-3, και LIN 3-9, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.11.

Γενικά, η ροή ισχύος σε μια γραμμή εξαρτάται από την επαγωγική αντίδραση και ωμική αντίσταση αυτής, τα μέτρα των τάσεων άφιξης και αναχώρησης, και τη γωνία μεταξύ

των τάσεων αναχώρησης και άφιξης. Οι παραπάνω γραμμές εμφανίζουν ανομοιομορφία, η οποία οφείλεται στη ροή αέργου ισχύος σε αυτές, που δεν λαμβάνεται υπόψη στη DC Ροή Φορτίου. Η τοπολογία, και ο συνδυασμός των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν αυτές, έχουν ως αποτέλεσμα να είναι μεγαλύτερη η ροή αέργου ισχύος αναλογικά με τις υπόλοιπες, έτσι ώστε να εμφανίζουν διαφορετικές φορτίσεις για τις δύο μεθόδους. Καθοριστικό ρόλο παίζει το σχετικά χαμηλό τους μήκος που οδηγεί σε χαμηλή επαγωγική αντίδραση, και τα όρια ροής ρεύματος που τους έχουν δοθεί.

4.2.3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

4.2.3.1 Επίλυση με AC Ροή Φορτίου

Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης N-1 κατάστασης από τον αλγόριθμο, και πριν ενισχυθεί το δίκτυο, οι παραβιάσεις των ορίων όπως υπολογίστηκαν φαίνονται στον Πίνακα 4.12:

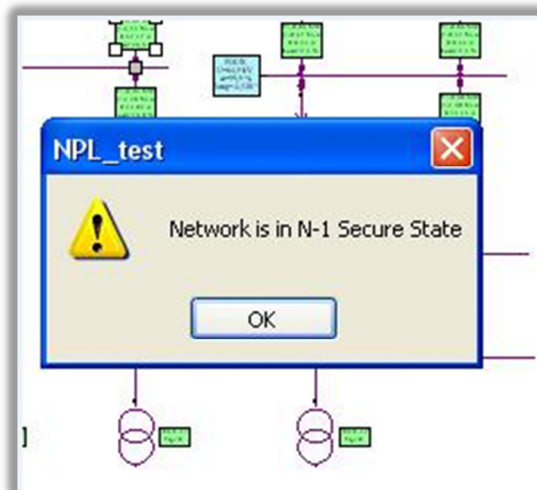
Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα ανάλυσης N-1 κατάστασης στο αρχικό δίκτυο από τον αλγόριθμο.

Διαταραχή (Contingency)	Υπερφορτισμένη Γραμμή	Φόρτιση στη N Κατάσταση (%)	Φόρτιση στη N-1 Κατάσταση (%)	Αριθμός Παραβιάσεων στη N-1 Κατάσταση
LIN 4-8	LIN 2-3	73.25	103.91	1
LIN 8-7	LIN 2-3	73.25	104.18	1
LIN 7-6	LIN 2-3	73.25	119.7	1

Αναφέρεται ότι υπάρχει απόλυτη ταύτιση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου σε σχέση με την μονάδα ανάλυσης N-1 κατάστασης που παρέχει το Nerplan, όπως φανερώνει το Σχήμα 3.11, για την εξαγωγή του οποίου χρησιμοποιήθηκε το ίδιο δίκτυο.

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία της μέγιστης συνολικής υπερφόρτισης, εξισώσεις 3.4 έως 3.8, είναι εμφανές ότι η γραμμή που είναι απαραίτητο να ενισχυθεί είναι η LIN 2-3, καθώς τρεις διαφορετικές διαταραχές (απομάκρυνση γραμμής 4-8 ή γραμμής 8-7 ή γραμμής 7-6) προκαλούν υπερφόρτιση της ίδια πάντα γραμμής (γραμμή 2-3).

Μετά από την επιτυχημένη εκτέλεση του αλγορίθμου, η οποία πραγματοποιήθηκε σε πρακτικά μηδενικό υπολογιστικό χρόνο, προκύπτει ότι η ενίσχυση της γραμμής LIN 2-3, θα έχει ως αποτέλεσμα τη στατική ασφάλεια του δικτύου. Αρχικά, το πρόγραμμα εμφανίζει ένα μήνυμα που δηλώνει ότι η LIN 2-3 θα ενισχυθεί και στη συνέχεια εκτελεί ανάλυση N-1 κατάστασης προκειμένου να διαπιστωθεί εάν έχει αντιμετωπιστεί το πρόβλημα υπερφόρτισης, εμφανίζοντας το αντίστοιχο μήνυμα (Σχήμα 4.4). Τελικά, παράγεται το τελικό αρχείο εξόδου *.txt, που παραθέτει τις όποιες ενισχύσεις πραγματοποιήθηκαν (Σχήμα 4.5). Αφού ενισχυθεί η LIN 2-3, οι παραβιάσεις έχουν εξομαλυνθεί πλήρως και το δίκτυο είναι στατικά ασφαλές. Αναφέρεται ότι η αποκοπή λειτουργίας της LIN 3-9 προκαλεί νησιδοποίηση του συστήματος, οπότε αυτή δεν συνυπολογίζεται στα αποτελέσματα των παραβιάσεων από τον αλγόριθμο (Σχήμα 4.5).



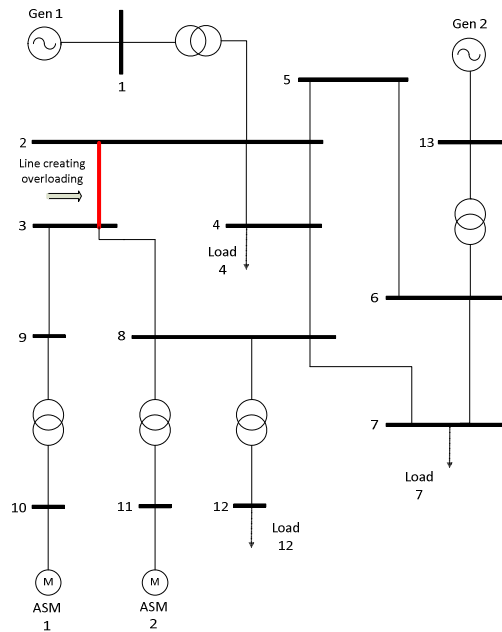
Σχήμα 4.4: Μηνύμα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου.

```

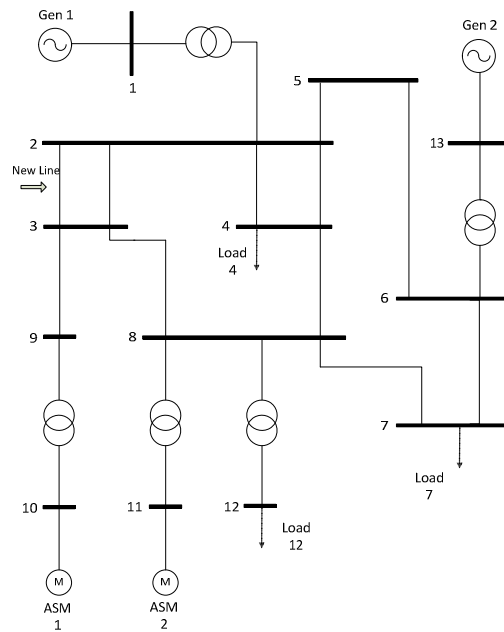
npl_test_NPLLogFile.out - Notepad
File Edit Format View Help
SetElements: Returning List of Elements of Type [BUSBAR-NODE]
GetElements: Returning List of Elements of Type [LINE]
SwitchElement: Element [LIN 5- 6] has been switched OFF
SwitchElement: Element [LIN 5- 6] has been switched ON
SwitchElement: Element [LIN 2-4 2] has been switched OFF
SwitchElement: Element [LIN 2-4 2] has been switched ON
SwitchElement: Element [LIN 2- 4 1] has been switched OFF
SwitchElement: Element [LIN 2- 4 1] has been switched ON
SwitchElement: Element [LIN 2- 3] has been switched OFF
SwitchElement: Element [LIN 2- 3] has been switched ON
SwitchElement: Element [LIN 4- 8] has been switched OFF
SwitchElement: Element [LIN 4- 8] has been switched ON
SwitchElement: Element [LIN 8- 7] has been switched OFF
SwitchElement: Element [LIN 8- 7] has been switched ON
SwitchElement: Element [LIN 3- 8] has been switched OFF
SwitchElement: Element [LIN 3- 8] has been switched ON
SwitchElement: Element [LIN 3- 9] has been switched OFF
----->
outage of LIN 3- 9 causes Islanding of Network.
----->
SwitchElement: Element [LIN 3- 9] has been switched ON
SwitchElement: Element [LIN 7- 6] has been switched OFF
SwitchElement: Element [LIN 7- 6] has been switched ON
SwitchElement: Element [L5-2] has been switched OFF
SwitchElement: Element [L5-2] has been switched ON
SetParameterInt: Parameter [ParallelLines] of Element [LIN 2- 3] has been changed to [2]
----->
Line overloaded
LIN 2- 3 caused 3 violations with total overload of (34.46) percent.
Reinforce LIN 2- 3
----->
SwitchElement: Element [LIN 5- 6] has been switched OFF
SwitchElement: Element [LIN 5- 6] has been switched ON
SwitchElement: Element [LIN 2-4 2] has been switched OFF

```

Σχήμα 4.5: Τελικό αρχείο εξόδου από την εκτέλεση του αλγορίθμου.



Σχήμα 4.6: Γραμμή του δικτύου που προκαλεί υπερφόρτιση στη N-1 κατάσταση.



Σχήμα 4.7: Ενισχυμένο δίκτυο με προσθήκη παράλληλης γραμμής.

4.2.3.2 Επίλυση με DC Ροή Φορτίου

Διενεργώντας ανάλυση N-1 κατάστασης με την υπάρχουσα εφαρμογή του Nerplan Contingency Analysis, επιλέγοντας όμως DC Ροή Φορτίου αυτή τη φορά, δεν εμφανίζεται καμία παραβίαση.

Η εκτέλεση του αλγορίθμου έρχεται σε συμφωνία με την ανάλυση του Nerplan, και αφού δεν εμφανίζεται καμία παραβίαση δε χρειάζεται καμία ενίσχυση, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτή τη μεθοδολογία.

Η αδυναμία εντοπισμού του προβλήματος υπερφόρτισης που προκαλεί η LIN 2-3 με τη μέθοδο της DC Ροής Φορτίου, οφείλεται καθαρά στη χαμηλότερη φόρτιση που υπολογίζει η DC Ροή Φορτίου για τη γραμμή LIN 2-3 (Πίνακας 4.11), όπου προφανώς ούτε κατά τη διάρκεια της N-1 κατάστασης ξεπέρασε τα αποδεκτά όρια (φόρτιση 100%). Η μεθοδολογία αυτή λοιπόν πιθανόν να χαρακτηρίσει ένα δίκτυο στατικά ασφαλές, ενώ στην πραγματικότητα δεν είναι, εφόσον η AC Ροή Φορτίου που κατέληξε σε διαφορετικό αποτέλεσμα αποτελεί πιο ακριβή μέθοδο.

Αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα από διαφορετική οπτική, θα μπορούσε κανείς από την αρχή να παρατηρήσει ότι η υπερφόρτιση που παρουσιάζεται στη γραμμή LIN 2-3, οφείλεται στην άεργο ισχύ, οπότε θα ήταν πιο συμφέρον αντί για κατασκευή νέας παράλληλης γραμμής, να εγκατασταθεί συστοιχία πυκνωτών, που θα μειώνε τη ροή αέργου ισχύος, και κατά επέκταση την αυξημένη φόρτιση. Η μελέτη τέτοιου είδους σεναρίων ξεφεύγει από το πλαίσιο της αλγοριθμικής διαδικασίας που αναπτύχθηκε.

4.3 ΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

4.3.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Για τις ανάγκες της εκτέλεσης και ελέγχου της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου, χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος, προσαρμοσμένο στις ανάγκες της μελέτης N-1 ασφάλειας, με τα βασικά του στοιχεία να απεικονίζονται στους Πίνακες 4.13 έως 4.18.

Πίνακας 4.13: Χαρακτηριστικά μοντέλου ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος.

Όνομα Πηγαίου Αρχείου (*.raw)	diktyo_gia_jrc_v30_simplified_test_times2
Αριθμός Ζυγών	893
Αριθμός Γραμμών Μεταφοράς	1124
Αριθμός Περιοχών	12
Συνολική Ζήτηση Ενεργού Ισχύος (MW)	7281.4
Συνολική Ζήτηση Άεργου Ισχύος (Mvar)	5333.2

Πίνακας 4.14: Ενδεικτικά δεδομένα ζυγών του δικτύου.

Πλήθος Ζυγών	Πρώτο Επίπεδο Ονομαστικής Τάσης V_n (kV)	Δεύτερο Επίπεδο Ονομαστικής Τάσης V_n (kV)
893	150	400

Πίνακας 4.15: Ενδεικτικό εύρος τιμών των δεδομένων των γραμμών μεταφοράς του δικτύου.

Πλήθος Γραμμών	Μήκος (km)	R (Ohm/km)	X (Ohm/km)	C (μ F/km)	B (μ S/km)	I_{max} (A)
1124	0.06-176	0.020649-1.017	0.0225-4.095	0.008209-0.406	2.556-127.51	442.64-3849

Πίνακας 4.16: Ενδεικτικό εύρος τιμών των δεδομένων των μετασχηματιστών του δικτύου.

Πλήθος M/Σ	Ονομαστική Ισχύς S_n (MVA)	Τάση Βραχυκύκλωσης (%)
59	100	7.03-8.11

Πίνακας 4.17: Ενδεικτικό εύρος τιμών των δεδομένων των σύγχρονων γεννητριών του δικτύου.

Πλήθος Γεννητριών	Ονομαστική Ισχύς (MVA) S_n	$\cos\phi$	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	Q_{min} (Mvar)	Q_{max} (Mvar)
200	0.118-1800	0.9	-9999	1456	-9999	9999

Πίνακας 4.18: Ενδεικτικό εύρος τιμών των δεδομένων των φορτίων του δικτύου.

Πλήθος Φορτίων	P (MW)	Q (Mvar)	cosφ
272	0.2-244	0.098-151.21	0.839-0.898

4.3.2 AC ΚΑΙ DC ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ NEPLAN

4.3.2.1 Επίλυση με AC Ροή Φορτίου

Η ανάλυση AC Ροής Φορτίου χρειάστηκε 4 ανακυκλώσεις για να προσεγγίσει το αποδεκτό σφάλμα, με τα συνοπτικά αποτελέσματα να απεικονίζονται στους Πίνακες 4.19 έως 4.23.

Πίνακας 4.19: Αποτελέσματα για την ισχύ του συνολικού δικτύου με AC Ροή Φορτίου .

Συνολική Παραγωγή Ενεργού Ισχύος P_{gen} (MW)	7521.2
Συνολικές Απώλειες Ενεργού Ισχύος P_{loss} (MW)	239.8
Ζυγός Ταλάντωσης	XBLAGOEVRAD

Πίνακας 4.20: Αποτελέσματα για την ισχύ ανά περιοχή του συστήματος με AC Ροή Φορτίου.

Περιοχή του Δικτύου	P_{loss} (MW)	P_{imp} (MW)	Q_{imp} (Mvar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (Mvar)	P_{load} (MW)	Q_{load} (Mvar)
1	24.600	1750.247	-291.966	842.453	66.530	2568.100	1631.582
10	0.115	2.428	19.289	3.987	-16.299	6.300	3.876
12	22.950	243.65	-533.324	431.500	-122.546	652.2	366.673
13	16.941	388.479	-187.417	54.262	5.714	425.8	259.776
14	26.528	-2471.729	267.714	2648.557	-571.711	150.3	277.997
15	2.808	-352.022	266.641	354.829	-158.570	0.000	270.99
2	16.385	423.434	322.303	748.751	-569.399	1155.8	948.083
22	0.002	0.002	-0.040	0.000	0.000	0.000	0.000
3	9.773	1188.408	72.201	104.065	-566.85	1282.7	818.947
5	43.755	-486.849	-263.339	930.304	-177.961	399.7	241.744
6	3.651	187.951	54.831	15.000	0.000	199.3	249.449
9	72.337	-874.000	273.107	1387.537	-150.852	441.2	264.031

Στον Πίνακα 4.20 παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα της παραγωγής, κατανάλωσης, απωλειών ανά περιοχή στην οποία είναι χωρισμένη το δίκτυο . Επίσης, στις στήλες P_{imp} , Q_{imp} σημειώνεται η εισαγωγή , ή εξαγωγή ισχύος, (θετικό ή αρνητικό πρόσημο αντίστοιχα), προς ή από την περιοχή προς όλες τις υπόλοιπες συνολικά. Για παράδειγμα, η Περιοχή 14 παράγει ενεργό ισχύ ίση με 2648.557 MW, και εξάγει στις υπόλοιπες περιοχές 2471.729 MW.

Πίνακας 4.21: Απώλειες για τις γραμμές μεταφοράς και μετασχηματιστές του συστήματος.

Τάση V (kV)	Απώλειες Ενεργού Ισχύος στις Γραμμές P_{loss} (MW)	Απώλειες Ενεργού Ισχύος στους Μ/Σ P_{loss} (MW)
150	194.327	0
400	41.178	4.34

Η ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των περιοχών παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.22, όπου η σύμβαση που ακολουθείται είναι – για την εξαγωγή, και + για την εισαγωγή από μια περιοχή σε μια άλλη.

Πίνακας 4.22: Ανταλλαγή ισχύος στις περιοχές του συστήματος με AC Ροή Φορτίου.

Από Περιοχή	Πρός Περιοχή	P (MW)	Q (Mvar)
1	2	-1268.925	120.683
1	9	-481.322	171.283
10	2	-2.428	-19.289
12	14	-2069.350	318.869
12	2	1576.037	192.047
12	3	-18.592	7.653
12	6	268.255	14.755
13	2	92.359	45.634
13	6	-80.304	40.076
13	9	-400.535	101.707
14	15	0.268	221.974
14	2	34.692	-6.334
14	3	367.419	-164.485
15	3	352.296	-100.613
15	5	-0.007	55.946
2	22	0.002	-0.040
2	3	0.061	-0.105
2	5	0.38	10.467
2	9	7.857	0.117
3	5	-487.223	-329.751

4.3.2.2 Επίλυση με DC Ροή Φορτίου

Σε αυτή την προσέγγιση αμελούνται οι απώλειες ενεργού ισχύος και η άεργος ισχύς (Κεφάλαιο 2.3.1). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.23 έως 4.25.

Πίνακας 4.23: Αποτελέσματα για την ισχύ του συνολικού δικτύου με DC Ροή Φορτίου.

Συνολική Παραγωγή Ενεργού Ισχύος P_{gen} (MW)	7281.4
Ζυγός Ταλάντωσης	XBLAGOEVRAD

Πίνακας 4.24: Αποτελέσματα για την ισχύ ανά περιοχή του συστήματος με DC Ροή Φορτίου.

Περιοχή του Δικτύου	P_{imp} (MW)	P_{gen} (MW)	P_{load} (MW)
1	1725.647	842.453	2568.1
10	2.313	3.987	6.3
12	220.700	431.5	652.2
13	371.538	54.262	425.8
14	-2498.26	2648.557	150.3
15	-114.984	114.984	0
2	407.049	748.751	1155.8
22	0.000	0.000	0
3	1178.635	104.065	1282.7
5	-530.604	930.304	399.7
6	184.300	15.000	199.3
9	-946.337	1387.537	441.2

Πίνακας 4.25: Ανταλλαγή ισχύος στις περιοχές του συστήματος με DC Ροή Φορτίου.

Από Περιοχή	Πρός Περιοχή	P (MW)
1	2	-1193.26
1	9	-532.39
10	2	-2.31
12	14	-1916.33
12	2	1464.35
12	3	-16.43
12	6	247.71
13	2	113.69
13	6	-63.41
13	9	-421.81
14	15	0.00
14	2	32.82
14	3	549.10
15	3	114.98
15	5	0.00
2	22	0.00
2	3	0.00
2	5	0.37
2	9	7.86
3	5	-530.98

4.3.3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

4.3.3.1 Επίλυση με AC Ροή Φορτίου

Τα αποτελέσματα των παραβιάσεων των ορίων, όπως προέκυψαν από τον αλγόριθμο, αλλά και από την Contingency Analysis του Neplan, φαίνονται στους Πίνακες 4.26 έως 4.28.

Πίνακας 4.26: Παραβίαση των τάσεων των ζυγών στη N-1 κατάσταση με AC Ροή Φορτίου.

Διαταραχή (Contingency)	Ζυγός με Τάση Εκτός Ορίων	Τάση στη N Κατάσταση (%)	Τάση στη N-1 Κατάσταση (%)	Αριθμός Παραβιάσεων στη N-1 Κατάσταση
LN-11031-11033-1	10331_GSAPKA	102.97	112.18	12
LN-11031-11033-1	10336_GSAPKA_2	102.67	112.15	
LN-11031-11033-1	11234_GKERVE_T	102.48	112.12	
LN-11031-11033-1	11033_GNSANT_1	101.78	112.11	
LN-11031-11033-1	11233_GKERVE_T	102.13	112.11	
LN-11031-11033-1	11231_GKERVERO	102.28	112.10	
LN-11031-11033-1	10335_GSAPKA_1	102.93	111.86	
LN-11031-11033-1	10734_GKECHROS	102.90	111.59	
LN-11031-11033-1	10731_GKECHROS	102.90	111.59	
LN-11031-11033-1	10733_GKECHROS	102.90	111.58	
LN-11031-11033-1	11334_GPATRIA_	102.90	111.48	
LN-11031-11033-1	11331_GPATRIAR	102.69	111.31	
LN-11033-11233-1	10331_GSAPKA	102.97	111.87	11
LN-11033-11233-1	10336_GSAPKA_2	102.67	111.83	
LN-11033-11233-1	11234_GKERVE_T	102.48	111.80	
LN-11033-11233-1	11233_GKERVE_T	102.13	111.77	
LN-11033-11233-1	11231_GKERVERO	102.28	111.77	
LN-11033-11233-1	10335_GSAPKA_1	102.93	111.56	
LN-11033-11233-1	10734_GKECHROS	102.90	111.30	
LN-11033-11233-1	10731_GKECHROS	102.90	111.30	
LN-11033-11233-1	10733_GKECHROS	102.90	111.29	
LN-11033-11233-1	11334_GPATRIA_	102.90	111.20	
LN-11033-11233-1	11331_GPATRIAR	102.69	111.03	

Πίνακας 4.26: Παραβίαση των τάσεων των ζυγών στη N-1 κατάσταση με AC Ροή Φορτίου (Συνέχεια).

Διαταραχή (Contingency)	Ζυγός με Τάση Εκτός Ορίων	Τάση στη N Κατάσταση (%)	Τάση στη N-1 Κατάσταση (%)	Αριθμός Παραβιάσεων στη N-1 Κατάσταση
LN-11231-11233-1	10331_GSAPKA	102.97	111.74	10
LN-11231-11233-1	10336_GSAPKA_2	102.67	111.69	
LN-11231-11233-1	11234_GKERVE_T	102.48	111.66	
LN-11231-11233-1	11231_GKERVERO	102.28	111.63	
LN-11231-11233-1	10335_GSAPKA_1	102.93	111.43	
LN-11231-11233-1	10734_GKECHROS	102.9	111.18	
LN-11231-11233-1	10731_GKECHROS	102.9	111.17	
LN-11231-11233-1	10733_GKECHROS	102.9	111.16	
LN-11231-11233-1	11334_GPATRIA_	102.9	111.07	
LN-11231-11233-1	11331_GPATRIAR	102.69	110.90	
LN-11231-11234-1	11234_GKERVE_T	102.48	113.73	
LN-11231-11234-1	10336_GSAPKA_2	102.67	113.72	
LN-11231-11234-1	10331_GSAPKA	102.97	113.72	
LN-11231-11234-1	10335_GSAPKA_1	102.93	113.35	
LN-11231-11234-1	10734_GKECHROS	102.90	113.06	
LN-11231-11234-1	10731_GKECHROS	102.90	113.05	
LN-11231-11234-1	10733_GKECHROS	102.90	113.04	
LN-11231-11234-1	11334_GPATRIA_	102.90	112.93	
LN-11231-11234-1	11331_GPATRIAR	102.69	112.77	
LN-11231-11234-1	10231_GORESTIA	104.18	110.56	
LN-10336-11234-1	10336_GSAPKA_2	102.67	113.61	9
LN-10336-11234-1	10331_GSAPKA	102.97	113.61	
LN-10336-11234-1	10335_GSAPKA_1	102.93	113.25	
LN-10336-11234-1	10734_GKECHROS	102.90	112.95	
LN-10336-11234-1	10731_GKECHROS	102.90	112.94	
LN-10336-11234-1	10733_GKECHROS	102.90	112.94	
LN-10336-11234-1	11334_GPATRIA_	102.90	112.83	
LN-10336-11234-1	11331_GPATRIAR	102.69	112.66	

Πίνακας 4.26: Παραβίαση των τάσεων των ζυγών στη N-1 κατάσταση με AC Ροή Φορτίου (Συνέχεια).

Διαταραχή (Contingency)	Ζυγός με Τάση Εκτός Ορίων	Τάση στη N Κατάσταση (%)	Τάση στη N-1 Κατάσταση (%)	Αριθμός Παραβιάσεων στη N-1 Κατάσταση
LN-10336-11234-1	10231_GORESTIA	104.18	110.50	8
LN-10331-10336-1	10331_GSAPKA	102.97	113.42	
LN-10331-10336-1	10335_GSAPKA_1	102.93	113.07	
LN-10331-10336-1	10734_GKECHROS	102.90	112.78	
LN-10331-10336-1	10731_GKECHROS	102.90	112.77	
LN-10331-10336-1	10733_GKECHROS	102.90	112.76	
LN-10331-10336-1	11334_GPATRIA_	102.90	112.66	
LN-10331-10336-1	11331_GPATRIAR	102.69	112.49	
LN-10331-10336-1	10231_GORESTIA	104.18	110.39	

Πίνακας 4.27: Παραβιάσεις ορίων φόρτισης γραμμών μεταφοράς στη N-1 κατάσταση με AC Ροή Φορτίου.

Διαταραχή (Contingency)	Υπερφορτισμένη Γραμμή	Φόρτιση στη N Κατάσταση (%)	Φόρτιση στη N-1 Κατάσταση (%)	Αριθμός Παραβιάσεων στη N-1 Κατάσταση
LN-61031-62031-1	LN-61031-62435-1	48.33	133.21	4
LN-61031-62031-1	LN-62331-62435-1	48.33	133.2	
LN-61031-62031-1	LN-62331-62436-1	42.15	127.02	
LN-61031-62031-1	LN-62031-62436-1	42.14	127.01	
LN-10431-10931-1	LN-10431-10931-2	82.84	111.1	3
LN-10431-10931-1	LN-10431-10831-1	88.06	110.3	
LN-10431-10931-1	LN-10431-10931-3	78.60	105.42	
LN-10431-10931-2	LN-10431-10931-1	82.84	111.1	3
LN-10431-10931-2	LN-10431-10831-1	88.06	110.3	
LN-10431-10931-2	LN-10431-10931-3	78.60	105.42	
LN-10431-10931-3	LN-10431-10931-1	82.84	109.19	3
LN-10431-10931-3	LN-10431-10931-2	82.84	109.19	
LN-10431-10931-3	LN-10431-10831-1	88.06	108.79	

Πίνακας 4.27: Παραβιάσεις ορίων φόρτισης γραμμών μεταφοράς στη N-1 κατάσταση με AC Ροή Φορτίου (Συνέχεια).

Διαταραχή (Contingency)	Υπερφορτισμένη Γραμμή	Φόρτιση στη N Κατάσταση (%)	Φόρτιση στη N-1 Κατάσταση (%)	Αριθμός Παραβιάσεων στη N-1 Κατάσταση
LN-10431-10831-1	LN-10431-10931-1	82.84	105.91	3
LN-10431-10831-1	LN-10431-10931-2	82.84	105.91	
LN-10431-10831-1	LN-10431-10931-3	78.60	100.49	
LN-35031-35531-1	LN-34131-35531-1	96.56	179.63	2
LN-35031-35531-1	LN-34131-34431-1	83.21	156.95	
LN-29435-34431-1	LN-35031-35531-1	93.41	101.14	1
LN-32131-36131-1	LN-34131-35531-1	96.56	111.77	1
LN-32131-36336-1	LN-34131-35531-1	96.56	103.32	1
LN-34131-34431-1	LN-35031-35531-1	93.41	149.04	1
LN-34131-35531-1	LN-35031-35531-1	93.41	184.54	1
LN-35031-35131-1	LN-34131-35531-1	96.56	113.39	1
LN-10431-10631-1	LN-10431-10831-1	88.06	112.06	1
LN-35031-36131-1	LN-34131-35531-1	96.56	116.89	1
LN-35131-36335-1	LN-34131-35531-1	96.56	108.85	1
LN-36335-36431-1	LN-34131-35531-1	96.56	108.85	1
LN-36336-36431-1	LN-34131-35531-1	96.56	103.33	1
LN-60031-60231-1	LN-60031-60335-1	73.77	100.32	1
LN-60031-60632-1	LN-60031-60335-1	73.77	101.32	1
LN-60031-63231-1	LN-61031-62031-1	94.56	103.54	1
LN-60031-63336-1	LN-61031-62031-1	94.56	102.76	1
LN-60231-60631-1	LN-61031-62031-1	94.56	100.76	1
LN-60231-62631-1	LN-61031-62031-1	94.56	100.57	1
LN-60631-61031-1	LN-61031-62031-1	94.56	100.31	1
LN-61031-61131-1	LN-61031-62031-1	94.56	101.62	1
LN-29331-29435-1	LN-35031-35531-1	93.41	101.14	1
LN-61031-62435-1	LN-61031-62031-1	94.56	140.33	1
LN-61031-62631-1	LN-61031-62031-1	94.56	100.41	1
LN-61031-63231-1	LN-61031-62031-1	94.56	102.79	1
LN-61031-68031-1	LN-61031-62031-1	94.56	112.93	1
LN-61131-63335-1	LN-61031-62031-1	94.56	101.96	1
LN-62031-62436-1	LN-61031-62031-1	94.56	134.46	1
LN-62331-62435-1	LN-61031-62031-1	94.56	140.33	1

Πίνακας 4.27: Παραβιάσεις ορίων φόρτισης γραμμών μεταφοράς στη N-1 κατάσταση με AC Ροή Φορτίου (Συνέχεια).

Διαταραχή (Contingency)	Υπερφορτισμένη Γραμμή	Φόρτιση στη N Κατάσταση (%)	Φόρτιση στη N-1 Κατάσταση (%)	Αριθμός Παραβιάσεων στη N-1 Κατάσταση
LN-62331-62436-1	LN-61031-62031-1	94.56	134.46	1
LN-62731-65531-1	LN-61031-62031-1	94.56	105.25	1
LN-63331-63335-1	LN-61031-62031-1	94.56	101.96	1
LN-63331-63336-1	LN-61031-62031-1	94.56	102.74	1
LN-65131-68031-1	LN-61031-62031-1	94.56	112.02	1
LN-65132-65134-1	LN-61031-62031-1	94.56	100.56	1
LN-65134-65231-1	LN-61031-62031-1	94.56	100.56	1
LN-65231-65531-1	LN-61031-62031-1	94.56	104.09	1
			Σύνολο	53

Μετά τη διεξαγωγή της ανάλυσης υπολογίστηκαν 53 παραβιάσεις του όριου φόρτισης στις γραμμές μεταφοράς. Από το κριτήριο της μέγιστης συνολικής υπερφόρτισης εξάγεται ότι η γραμμή LN-61031-62031-1 χρειάζεται ενίσχυση. Στη συνέχεια, εκτελούνται οι υπόλοιπες ανακυκλώσεις και γίνονται οι μετατροπές, ώστε το σύστημα να καταστεί στατικά ασφαλές.

Ο αλγόριθμος αυτοματοποιημένης ενίσχυσης χρειάστηκε 3 ώρες και 45 λεπτά για να ολοκληρώσει τους υπολογισμούς. Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα των παράλληλων γραμμών που πρέπει να προστεθούν απεικονίζονται στον Πίνακα 4.28. Το αρχείο εξόδου που παράγεται υποδεικνύει αναλυτικά τις γραμμές που πρέπει να ενισχυθούν, καθώς και αυτές που αν τεθούν εκτός λειτουργίας μετατρέπουν το δίκτυο σε ακτινικό (Σχήμα 4.8).

```
SwitchElement: Element [LN-14231-15031-2] has been switched ON
SwitchElement: Element [LN-14231-94233-1] has been switched OFF
----->
Outage of LN-14231-94233-1 causes Islanding of Network.
----->
SwitchElement: Element [LN-14231-94233-1] has been switched ON
SwitchElement: Element [LN-14231-94333-1] has been switched OFF
----->
Outage of LN-14231-94333-1 causes Islanding of Network.
----->
```

```
SetParameterInt: Parameter [ParallelLines] of Element [LN-10431-10831-1] has been changed to [2]
----->
Line overloaded
LN-10431-10831-1 caused 4 violations with total overload of (41.45) percent.
Reinforce LN-10431-10831-1
----->
```

Σχήμα 4.8: Αναλυτική αναφορά που παράγει το αρχείο DLL μετά την εκτέλεσή του στο σύστημα.

Πίνακας 4.28: Γραμμές προς ενίσχυση για την επίτευξη στατικής ασφάλειας.

Α/Α	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Άφιξης	Αριθμός Νέων Κυλωμάτων	Χαρακτηριστικά κάθε Κυκλώματος		
				Τάση (kV)	Όριο Ροής Ισχύος (MVA)	Μήκος (km)
1	61031_GMEG.1TE	62031_GMEG.2TE	1	150	202	3.75
2	34131_GTRIKALA	35531_GTRIKALA	2	150	202	6.06
3	34131_GTRIKALA	34431_G-TRIKA	1	150	202	8.66
4	10431_GKOMOT_T	10831_GKOMOTIN	1	150	202	13
5	10431_GKOMOT_T	10931_GIASMOS	1	150	202	28
6	60031_GKORINQ	60632_GKOR1	1	150	202	19.61
7	15011_GKTHES	17011_GELPE	1	400	513	4
Σύνολο			8			

Επίσης, στον Πίνακα 4.29 σημειώνονται και οι υπερφορτίσεις που παρουσίασαν οι γραμμές για τις οποίες αποφασίστηκε ότι απαιτείται ενίσχυση.

Πίνακας 4.29: Υπερφόρτιση που εμφανίζουν οι γραμμές προς ενίσχυση.

Όνομα Γραμμής	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Άφιξης	Μέγιστη Υπερφόρτιση (%)
LN-61031-62031-1	61031_GMEG.1TE	62031_GMEG.2TE	204.42
LN-34131-35531-1	34131_GTRIKALA	35531_GTRIKALA	146.07(1 ^η Ενίσχυση) & 1.91(2 ^η Ενίσχυση)
LN-34131-34431-1	34131_GTRIKALA	34431_G-TRIKA	62.19
LN-10431-10831-1	10431_GKOMOT_T	10831_GKOMOTIN	41.45
LN-10431-10931-1	10431_GKOMOT_T	10931_GIASMOS	2.69
LN-60031-60632-1	60031_GKORINQ	60632_GKOR1	0.99
LN-15011-17011-1	15011_GKTHES	17011_GELPE	0.17

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι γραμμές LN-60031-60632-1, LN-15011-17011-1, και η LN-34131-35531-1 όταν γίνεται λόγος για δημιουργία 3^{ης} παράλληλης γραμμής, εμφανίζουν αρκετά χαμηλή τιμή υπερφόρτισης (0.17-1.91%). Συνεπώς, μια διαφορετική αντιμετώπιση του προβλήματος, θα ήταν κάποιος να θεωρήσει πιο συμφέρουσα την τροποποίηση της ροής ισχύος, με την αποκοπή κάποιου φορτίου, ή με αλλαγή της παραγωγής, ώστε να μην ξεπερνά η φόρτιση των γραμμών αυτών το επιτρεπτό όριο, και έτσι να μην χρειαστεί δημιουργία νέων παράλληλων κυκλωμάτων. Άλλωστε, εφόσον οι υπερφορτίσεις παρουσιάζουν τέτοιες χαμηλές τιμές, η μικρή αυτή αλλαγή στη ροή της ισχύος δύσκολα θα επέφερε μεταβολές που πρακτικά επηρεάζουν τη συνολική εικόνα του συστήματος.

Εκτελώντας N-1 ανάλυση στο νέο ενισχυμένο δίκτυο παρατηρείται ότι καμία γραμμή μεταφοράς, ούτε ζυγός λαμβάνει τιμή για την φόρτιση και τάση αντίστοιχα, που ξεφεύγει από το επιτρεπτό πλαίσιο. Ενδεικτικά αποτελέσματα μετά τη διεξαγωγή Ροής Φορτίου στο νέο σύστημα απεικονίζονται στον Πίνακα 4.30.

Πίνακας 4.30: Αποτελέσματα Ροής Φορτίου στο ενισχυμένο σύστημα με AC Ροή Φορτίου.

Συνολική Παραγωγή Ενεργού Ισχύος (MW)	7514.7
Συνολικές Απώλειες Ενεργού Ισχύος (MW)	233.3

4.3.3.2 Επίλυση με DC Ροή Φορτίου

Η επίλυση της αλγοριθμικής διαδικασίας με εργαλείο τη DC Ροή Φορτίου, έδωσε τα αποτελέσματα των υπερφορτίσεων, τα οποία συμφωνούν με αυτά που εξάγονται εάν εκτελεστεί Contingency Analysis με χρήση DC Ροής Φορτίου στο σύστημα Πίνακας 4.31. Εφόσον οι τάσεις των ζυγών θεωρούνται σταθερές και ίσες με τις ονομαστικές, δεν υφίστανται η έννοια της παραβίασης των τάσεων όπως στην AC Ροή Φορτίου.

Πίνακας 4.31: Παραβιάσεις ορίων φόρτισης γραμμών μεταφοράς στη N-1 κατάσταση με DC Ροή Φορτίου.

Διαταραχή (Contingency)	Υπερφορτισμένη Γραμμή	Φόρτιση στη N Κατάσταση (%)	Φόρτιση στη N-1 Κατάσταση (%)	Αριθμός Παραβιάσεων στη N-1 Κατάσταση
LN-61031-62031-1	LN-61031-62435-1	49.07	135.29	4
LN-61031-62031-1	LN-62331-62435-1	49.07	135.29	
LN-61031-62031-1	LN-62031-62436-1	42.54	128.76	
LN-61031-62031-1	LN-62331-62436-1	42.54	128.76	
LN-10431-10931-1	LN-10431-10931-2	84.80	114.02	3

Πίνακας 4.31: Παραβιάσεις ορίων φόρτισης γραμμών μεταφοράς στη N-1 κατάσταση με DC Ροή Φορτίου (Συνέχεια).

Διαταραχή (Contingency)	Υπερφορτισμένη Γραμμή	Φόρτιση στη N Κατάσταση (%)	Φόρτιση στη N-1 Κατάσταση (%)	Αριθμός Παραβιάσεων στη N-1 Κατάσταση
LN-10431-10931-1	LN-10431-10831-1	89.94	112.97	
LN-10431-10931-1	LN-10431-10931-3	80.46	108.18	
LN-10431-10931-2	LN-10431-10931-1	84.80	114.02	3
LN-10431-10931-2	LN-10431-10831-1	89.94	112.97	
LN-10431-10931-2	LN-10431-10931-3	80.46	108.18	
LN-10431-10931-3	LN-10431-10931-1	84.80	112.04	3
LN-10431-10931-3	LN-10431-10931-2	84.80	112.04	
LN-10431-10931-3	LN-10431-10831-1	89.94	111.41	
LN-10431-10831-1	LN-10431-10931-1	84.80	108.67	3
LN-10431-10831-1	LN-10431-10931-2	84.80	108.67	
LN-10431-10831-1	LN-10431-10931-3	80.46	103.1	
LN-35031-35531-1	LN-34131-35531-1	95.13	176.29	2
LN-35031-35531-1	LN-34131-34431-1	77.31	150.62	
LN-10831-10931-1	LN-10431-10931-1	84.80	102.51	2
LN-10831-10931-1	LN-10431-10931-2	84.80	102.51	
LN-32131-36336-1	LN-34131-35531-1	95.13	101.87	1
LN-34131-34431-1	LN-35031-35531-1	81.16	138.00	1
LN-34131-35531-1	LN-35031-35531-1	81.16	176.29	1
LN-35031-35131-1	LN-34131-35531-1	95.13	112.01	1
LN-10431-10631-1	LN-10431-10831-1	89.94	114.05	1
LN-35031-36131-1	LN-34131-35531-1	95.13	115.38	1
LN-35131-36335-1	LN-34131-35531-1	95.13	107.41	1
LN-36335-36431-1	LN-34131-35531-1	95.13	107.41	1
LN-36336-36431-1	LN-34131-35531-1	95.13	101.87	1
LN-60031-60632-1	LN-60031-60335-1	72.78	100.51	1
LN-60031-63231-1	LN-61031-62031-1	95.89	105.33	1
LN-60031-63336-1	LN-61031-62031-1	95.89	104.49	1
LN-60231-60631-1	LN-61031-62031-1	95.89	102.41	1
LN-60231-62631-1	LN-61031-62031-1	95.89	102.21	1
LN-60631-61031-1	LN-61031-62031-1	95.89	101.96	1
LN-61031-61131-1	LN-61031-62031-1	95.89	103.33	1
LN-32131-36131-1	LN-34131-35531-1	95.13	110.22	1
LN-61031-62435-1	LN-61031-62031-1	95.89	142.45	1
LN-61031-62631-1	LN-61031-62031-1	95.89	102.06	1
LN-61031-63231-1	LN-61031-62031-1	95.89	104.58	1
LN-61031-68031-1	LN-61031-62031-1	95.89	113.97	1
LN-61131-63335-1	LN-61031-62031-1	95.89	103.67	1
LN-61731-61834-1	LN-61031-62031-1	95.89	100.87	1
LN-62031-62436-1	LN-61031-62031-1	95.89	136.25	1

Πίνακας 4.31: Παραβιάσεις ορίων φόρτισης γραμμών μεταφοράς στη N-1 κατάσταση με DC Ροή Φορτίου (Συνέχεια).

Διαταραχή (Contingency)	Υπερφορτισμένη Γραμμή	Φόρτιση στη N Κατάσταση (%)	Φόρτιση στη N-1 Κατάσταση (%)	Αριθμός Παραβιάσεων στη N-1 Κατάσταση
LN-62331-62435-1	LN-61031-62031-1	95.89	142.45	1
LN-62331-62436-1	LN-61031-62031-1	95.89	136.25	1
LN-62731-65531-1	LN-61031-62031-1	95.89	106.47	1
LN-63331-63335-1	LN-61031-62031-1	95.89	103.67	1
LN-63331-63336-1	LN-61031-62031-1	95.89	104.49	1
LN-65131-68031-1	LN-61031-62031-1	95.89	113.30	1
LN-65132-65134-1	LN-61031-62031-1	95.89	101.90	1
LN-65134-65231-1	LN-61031-62031-1	95.89	101.90	1
LN-65231-65531-1	LN-61031-62031-1	95.89	105.47	1
			Σύνολο	53

Η ολοκλήρωση της πρώτης ανάκύκλωσης εμφανίζει 53 παραβιάσεις, ίδια τιμή με αυτή που υπολογίστηκε σύμφωνα με τη AC Ροή Φορτίου (Κεφάλαιο 4.3.2.1). Πάλι, συμπεραίνεται ότι η γραμμή που εμφανίζει τη μέγιστη συνολική υπερφόρτιση, και πρέπει να ενισχυθεί είναι η LN-61031-62031-1.

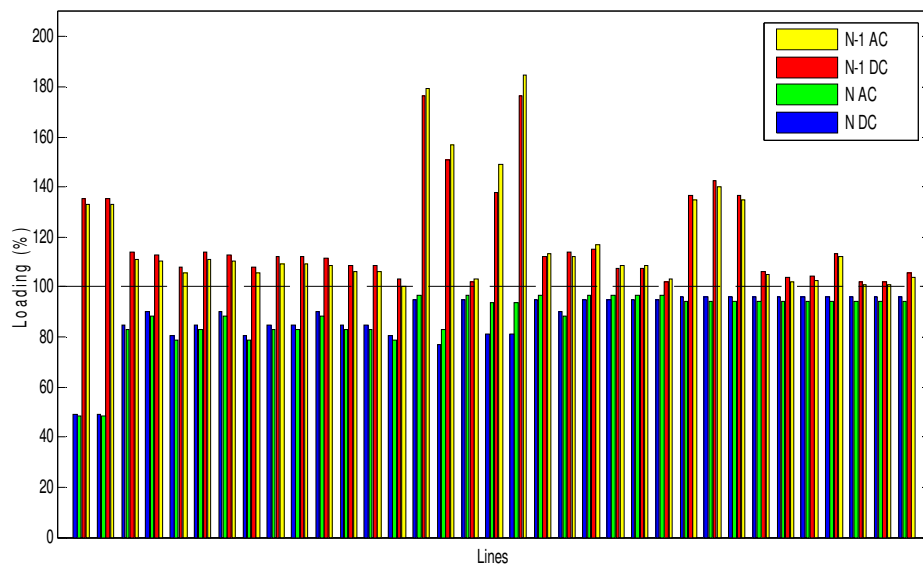
Τελικά, το αρχείο DLL χρειάστηκε 2 ώρες και 30 λεπτά προκειμένου να ολοκληρώσει την ανάλυση, και οι ενισχύσεις που κρίνει ότι θα καταστήσουν το σύστημα στατικά ασφαλές φαίνονται στον Πίνακα 4.28.

Πίνακας 4.32: Γραμμές προς ενίσχυση για την επιτευξη στατικής ασφάλειας με DC Ροή Φορτίου.

Α/Α	Ζυγός Ανάχώρησης	Ζυγός Αφιξης	Αριθμός Νέων Κυλωμάτων	Χαρακτηριστικά κάθε Κυκλώματος		
				Τάση (kV)	Όριο Ροής Ισχύος (MVA)	Μήκος (km)
1	61031_GMEG.1TE	62031_GMEG.2TE	1	150	202	3.75
2	34131_GTRIKALA	35531_GTRIKALA	1	150	202	6.06
3	34131_GTRIKALA	34431_G-TRIKA	1	150	202	8.66
4	10431_GKOMOT_T	10831_GKOMOTIN	1	150	202	13
5	10431_GKOMOT_T	10931_GIASMOS	1	150	202	28
			Σύνολο	5		

Οι ενισχύσεις που υποδεικνύονται με αυτή τη μέθοδο είναι λιγότερες από αυτές που υπολογίστηκαν στην Ενότητα 4.3.3.1, και οι βασικές διαφορές οφείλονται στο γεγονός ότι αμελείται η άεργος ισχύς, όπως αναπτύχθηκε και στην Ενότητα 4.2.3.2. Παρόλα αυτά, εάν οι παραπάνω υπερφορτίσεις που εμφανίστηκαν στην εκτέλεση με AC Ροή Φορτίου, θεωρηθούν αμελητέες, όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 4.3.3.1, τα αποτελέσματα των γραμμών προς ενίσχυση ταυτίζονται και με τις δύο μεθόδους.

Στη συνέχεια, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των υπερφορτίσεων για την πρώτη ανακύκλωση, (Contingency Analysis) από τους Πίνακες 4.27 και 4.31, παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα δεν είναι πανομοιότυπα. Για τις διαταραχές που εμφανίζουν υπερφορτίσεις σε γραμμές που παρουσιάζονται και στις δύο μεθόδους, τα αποτελέσματα των φορτίσεων αντιπαραβάλλονται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.9.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα φορτίσεων ενδεικτικών γραμμών υπολογισμένες με τις δύο διαφορετικές μεθόδους (AC και DC Ροή Φορτίου).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η εργασία αυτή ασχολήθηκε με την ανάπτυξη μεθοδολογίας και λογισμικού που πραγματοποιεί αυτοματοποιημένη ενίσχυση ενός ηλεκτρικού δικτύου, προκειμένου να επιτευχθεί η N-1 ασφάλεια αυτού. Ο αλγόριθμος που εκπονήθηκε χρησιμοποιεί ως μαθηματικά εργαλεία για την ανάλυση της λειτουργίας του δικτύου, την Ανάλυση AC και DC Ροής Φορτίου, και για την επιλογή της γραμμής που πρέπει να ενισχυθεί το κριτήριο της μέγιστης συνολικής υπερφόρτισης. Η κύρια διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθόδους Ροών Φορτίου είναι ότι η DC Ροή Φορτίου θυσιάζει ένα μέρος της ακρίβειας σε αντάλλαγμα με το χρόνο που δαπανά για την εκτέλεση μαθηματικών υπολογισμών η AC Ροή Φορτίου (Ενότητα 2.3.1). Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής, οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν έδειξαν διαφορετικά αποτελέσματα για το μικρό δίκτυο των 13 ζυγών, και αρκετά κοντινά για το ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα (Πίνακας 5.1). Για την εκτέλεση της ανάλυσης N-1 κατάστασης το λογισμικό που δημιουργήθηκε, καθώς και το Nerplan, αποσυνδέει κάθε γραμμή του δικτύου και επιλύει το πρόβλημα Ροής Φορτίου κάθε φορά. Μπορεί κανείς να φανταστεί ότι για συστήματα που διαθέτουν πλήθος γραμμών μεταφοράς της τάξεως του 1000, όπως είναι και το μοντέλο του ελληνικού συστήματος, το λογισμικό απαιτεί την επίλυση της Ροής Φορτίου αρκετές χιλιάδες φορές, γεγονός που κάνει το ζήτημα της πολυπλοκότητας αρκετά αισθητό. Η ταχύτητα εκτέλεσης που προσδίδει η απλότητα της μεθόδου της DC Ροής Φορτίου σε τέτοιες περιπτώσεις παίζει καθοριστικό ρόλο ώστε να προτιμηθεί από τη μέθοδο AC. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας η μελέτη υλοποιείται σε μορφή έρευνας του συστήματος μεταφοράς, όπου ο χρόνος εκτέλεσης δεν είναι τόσο σημαντικός παράγοντας, εάν όμως η εφαρμογή απευθυνόταν σε on-line σύστημα υπολογισμών, και το δίκτυο προς ανάλυση είχε μεγαλύτερο πλήθος ζυγών, η ταχύτητα της DC Ροής Φορτίου θα ήταν ζωτικής σημασίας. Αναφορικά με το θέμα της ακρίβειας, η DC Ροή Φορτίου φάνηκε να έδωσε επίσης ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με την AC Ροή Φορτίου. Η εκτέλεση στο δίκτυο των 13 ζυγών εμφανίζει τη μεγαλύτερη ασυμφωνία ανάμεσα στις δύο μεθόδους, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στις Ενότητες 4.2.2.1 και 4.2.2.2, αλλά και σε πιθανή μη ορθότητα των δεδομένων του. Στο ελληνικό σύστημα οι γραμμές προς ενίσχυση που υπολογίστηκαν με την AC μέθοδο αποτελούν υπερσύνολο αυτών που υπολογίστηκαν με τη DC, και οι διαφορές μπορούν να αμεληθούν για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 4.3.3.2.

Η ορθότητα του αλγορίθμου έχει επιβεβαιωθεί συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για την ανάλυση της N-1 κατάστασης με αυτά που παρέχει το Nerplan, μέσω της μονάδας Contingency Analysis. Σχετικά με το κριτήριο ενίσχυσης, τα αποτελέσματα ελέγχθηκαν και χειροκίνητα από τους πίνακες των παραβιάσεων που εξάγονταν με κάθε ενίσχυση, και σε κάθε περίπτωση υπήρχε απόλυτη ταύτιση.

Ενώ το αλγοριθμικό μοντέλο που κατασκευάστηκε είναι εύρωστο σε σχέση με την ταχύτητα εκτέλεσης και την ύπαρξη περιπτώσεων που μπορούν να δημιουργήσουν μη αναμενόμενα σφάλματα (Bugs), είναι δυνατή η επέκτασή του προς πολλές κατευθύνσεις. Αρχικά, το λογισμικό μπορεί να εμπλουτιστεί με τη διερεύνηση των ταυτόχρονων διαταραχών (Common Mode Contingencies), φαινόμενο συχνό στα πραγματικά συστήματα (π.χ ταυτόχρονη αποκοπή δύο παράλληλων γραμμών), όπου προσδίδεται αυξημένη ακρίβεια στα αποτελέσματα σχετικά με την αξιοπιστία ενός δικτύου.

Πίνακας 5.1: Συνοπτικά αποτελέσματα για την εκτέλεση του λογισμικού με τις δυο διαφορετικές μεθόδους.

Δίκτυο 13 Ζυγών			
Επίλυση με AC Ροή Φορτίου		Επίλυση με DC Ροή Φορτίου	
Γραμμές προς Ενίσχυση		Γραμμές προς Ενίσχυση	
Αριθμός Ενισχύσεων	Ονόματα Γραμμών	Αριθμός Ενισχύσεων	Ονόματα Γραμμών
1	LIN 2-3	0	-

Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα 893 Ζυγών					
Επίλυση με AC Ροή Φορτίου			Επίλυση με DC Ροή Φορτίου		
Χρόνος Εκτέλεσης Λογισμικού	Γραμμές προς Ενίσχυση		Χρόνος Εκτέλεσης Λογισμικού	Γραμμές προς Ενίσχυση	
3 ώρες και 45 λεπτά	Αριθμός Ενισχύσεων	Ονόματα Γραμμών	2 ώρες και 30 λεπτά	Αριθμός Ενισχύσεων	Ονόματα Γραμμών
	8	LN-61031-62031-1		5	LN-61031-62031-1
		LN-34131-35531-1			LN-34131-35531-1
		LN-34131-34431-1			LN-34131-34431-1
		LN-10431-10831-1			LN-10431-10831-1
		LN-10431-10931-1			LN-10431-10931-1
		<i>LN-34131-35531-1</i>			
		<i>(2^η Ενίσχυση)</i>			
		<i>LN-60031-60632-1</i>			
		<i>LN-15011-17011-1</i>			

Επίσης, η διενέργεια N-1 κατάστασης είναι δυνατό να περιλαμβάνει την αποκοπή λειτουργίας ζυγών, γεννητριών ή ακόμα και μετασχηματιστών σε ένα σύστημα, φαινόμενο που δεν αναλύθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής. Επιπλέον, η ενίσχυση του συστήματος είναι δυνατό να μελετηθεί όχι μόνο θέτοντας ως πρόβλημα την υπερφόρτιση των γραμμών μεταφοράς, αλλά και την υπέρταση ή υπόταση των ζυγών, και την υπερφόρτιση των μετασχηματιστών. Τέλος, το κριτήριο ενίσχυσης των γραμμών που χρησιμοποιεί το λογισμικό, μπορεί να εμπλουτισθεί με τον υπολογισμό πιθανοτικών δεικτών (Κεφάλαιο 2.4) , και ταυτόχρονα να λαμβάνει υπόψη τον παράγοντα του κόστους ενίσχυσης (Σχήμα 2.1) .