



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

**ΚΑΤΑΣΤΟΛΗ ΑΝΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ
ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ
ΙΣΧΥΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Χειμωνίδης

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Ιάσων-Ηρακλής Αβραμίδης, Υποψήφιος Διδάκτορας

Αθήνα, Οκτώβριος 2021



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

**ΚΑΤΑΣΤΟΛΗ ΑΝΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ
ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ
ΙΣΧΥΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Χειμωνίδης

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Ιάσων-Ηρακλής Αβραμίδης, Υποψήφιος Διδάκτορας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 05 Οκτωβρίου 2021

.....
Παύλος Γεωργιλάκης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....
Ιωάννης Γκόνος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

.....
Γεώργιος Χειμωνίδης

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

Copyright © Γεώργιος Χειμωνίδης, 2021.

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

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η δυνατότητα καταστολής των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου σε προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος (OPF) καθώς και σε προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος υπό περιορισμούς ασφαλείας (SCOPF). Αναπτύσσεται μεθοδολογία τριών βημάτων, η οποία στηρίζεται στη λογική της εύρεσης του ιδανικού συνολικού κόστους στο 1^ο Βήμα και την εύρεση του ελάχιστου απαραίτητου αριθμού ενεργειών ελέγχου, για την επίλυση του προβλήματος, στο 2^ο Βήμα. Το 3^ο Βήμα εστιάζει στην εύρεση της κατάλληλης, από τον χρήστη καθοριζόμενης, ισορροπίας μεταξύ του ιδανικού κόστους και των ελάχιστων ενεργειών ελέγχου, μέσω του καθορισμού της τιμής του συντελεστή απόκλισης ϵ από το ιδανικό κόστος.

Η μεθοδολογία αρχικά εφαρμόζεται σε προβλήματα OPF, όπου ως ενέργειες ελέγχου λαμβάνονται αρχικά μόνο οι απορρίψεις φορτίου και στη συνέχεια τυχόν απαραίτητες μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητριών. Τα δύο αυτά προβλήματα επιλύονται για λόγους σύγκρισης με τρεις τρόπους. Η Συμβατική Μέθοδος κάνει χρήση δυαδικών μεταβλητών και αποτελεί το μέτρο σύγκρισης (benchmark) για την Μέθοδο Προσέγγισης με συντελεστή a_i και την Μέθοδο Προσέγγισης L_1 . Για την εξέταση προβλημάτων SCOPF πραγματοποιήθηκε επέκταση της μεθοδολογίας, ώστε να λαμβάνει υπόψη και περιορισμούς ασφαλείας. Έτσι, εφαρμόζεται σε παραλλαγή προβλήματος Preventive SCOPF, το οποίο στην παρούσα διπλωματική εργασία ονομάστηκε PG–CC SCOPF. Επιπλέον εφαρμόζεται σε AC Preventive Corrective – SCOPF, το οποίο αντιμετωπίστηκε αρχικά μέσω DC προσέγγισης και όπου επιπρόσθετα έγινε χρήση δύο διαφορετικών τρόπων απαρίθμησης των ενεργειών ελέγχου. Τα αποτελέσματα των DC προσεγγίσεων στη συνέχεια εφαρμόστηκαν στο πλήρες πρόβλημα AC–SCOPF για την αξιολόγηση της πραγματοποιούμενης προσέγγισης.

Η προσομοίωση των αναφερόμενων προβλημάτων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό GAMS όπου αναπτύχθηκαν 3 διαφορετικά δίκτυα, 3, 74 και 118 ζυγών, με την πολυπλοκότερη περίπτωση του PG–CC SCOPF να είναι κλίμακας 10500 εξισώσεων και 7022 μεταβλητών. Ως διαταραχές στα προβλήματα OPF πραγματοποιήθηκαν διακοπές γραμμών μεταφοράς και ως περιορισμοί ασφαλείας στα προβλήματα SCOPF λήφθηκαν υπόψη 10 διακοπές γραμμών μεταφοράς.

Συμβατικές προσεγγίσεις προβλημάτων OPF και SCOPF παρέχουν στον διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς (TSO) λύσεις αποκλειστικά ακαδημαϊκού χαρακτήρα, με ιδιαίτερα υψηλό αριθμό ενεργειών ελέγχου, η πρακτική κατανόηση και εφαρμογή των οποίων παρουσιάζει σαφώς δυσκολίες, και χωρίς διαφάνεια ως προς το γιατί πραγματοποιείται κάποια από αυτές και πώς συνδέεται με το συνολικό κόστος λειτουργίας. Αντίθετα, η παρατηρούμενη επιτυχής εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας τροφοδοτεί τον TSO αρχικά με τον ελάχιστο απαραίτητο αριθμό ενεργειών ελέγχου, δίνοντάς του ένα σαφές φυσικό όριο, και στη συνέχεια με αριθμό πραγματικά αποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου, δίνοντάς του την δυνατότητα να κατανοήσει ευκολότερα την σχέση που έχουν με τη λειτουργία του δικτύου και να εκτιμήσει εάν αυτό συμβαδίζει με τις εμπειρίες του ίδιου και να πράξει ανάλογα. Ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα δραστικής μείωσης του χρόνου εκτέλεσης των προβλημάτων, μέσω της παρουσιαζόμενης προσεγγιστικής μεθόδου με συντελεστή a_i , η οποία βασίζεται σε συνάρτηση προσέγγισης δυαδικών μεταβλητών και παρουσιάζει την καλύτερη ισορροπία μεταξύ χρόνου εκτέλεσης και ακρίβειας υπολογισμών. Η παρούσα διπλωματική εργασία υιοθετεί σαφώς πρακτική προσέγγιση παρέχοντας αποτελέσματα ευκολότερα ερμηνεύσιμα και εφαρμόσιμα στον πραγματικό κόσμο.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Βέλτιστη ροή ισχύος, βέλτιστη ροή ισχύος υπό περιορισμούς ασφαλείας, βέλτιστες ενέργειες ελέγχου: πρόληψη, διόρθωση και καταστολή αναποτελεσματικότητας.

ABSTRACT

The scope of this thesis is to research the possibility of suppressing ineffective control actions in optimal power flow (OPF) problems and in security constrained OPF (SCOPF) problems. A 3-step methodology is developed, which is based on calculating the optimal operating cost in Step 1 and calculating the minimum number of control actions needed to solve the problem in Step 2. Step 3 focuses on finding the right, user-defined, balance between the number of control actions applied and overall operating cost, based on the objective deterioration tolerance ε .

The 3-step methodology is firstly applied to two OPF problems, one considering only load curtailment as control actions, and one considering also changes to active generator production. For comparison purposes these 2 problems are solved in 3 different ways. The conventional method uses binary variables and is the benchmark for the a_i approximation method and the L_1 approximation method. For the examination of SCOPF problems the methodology was extended to take into account contingencies that may occur. Thus, it is applied to a variation of a preventive SCOPF problem, which in this thesis is called PG-CC SCOPF. In addition, it is applied to an AC Preventive Corrective – SCOPF, which was initially addressed through a DC power flow approach, where two different ways of counting control actions were used. The results of the DC-SCOPF approaches were then applied to the complete AC-SCOPF problem in order to evaluate the performed approach.

The simulation of all the aforementioned problems was carried out in GAMS with the use of 3 different networks, a 3-bus network, a 74-bus network and a 118-bus network, with the most complex PG-CC SCOPF consisting of 10500 equations and 7022 variables. In the OPF problems a system emergency state is created by disconnection of a transmission line. In the SCOPF problems 10 transmission line disconnections are used as contingencies.

Conventional approaches of OPF and SCOPF problems supply the transmission system operator (TSO) with pure academic solutions, consisting of an extremely high number of control actions, which results in difficulties in understanding and practical application, and solutions without transparency as to why each control action has to be implemented and how it connects to total operating cost. On the contrary, the observed successful implementation of the proposed methodology feeds the TSO first with the minimum number of control actions that are necessary, providing a hard physical threshold, and then with a number of only effective control actions, enabling him to more easily understand the practical relationship these have with system operation and whether this matches their experience so that they can decide accordingly. At the same time, it is possible to drastically reduce the execution time of the problems via the presented a_i approximation method that uses a smooth continuous approximation function to approximate the binary variables of the conventional approach and presents the best trade-off among execution time and sub-optimality. The presented thesis clearly adopts a more practical than academic approach, providing results that are easier interpreted and applied in real world conditions.

KEYWORDS

Optimal power flow, security-constrained optimal power flow, optimal control actions: prevention, correction and suppression of inefficiency.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2020–2021 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή του ΕΠΜ της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, τον οποίο οφείλω να ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση ενός τόσο δημιουργικού και ενδιαφέροντος θέματος. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Ιάσωνα Αβραμίδα για την υπομονή και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τη μητέρα μου Γιαννούλα, τον πατέρα μου Βασίλη και την αδερφή μου Μαρία, οι οποίοι αποτελούν πηγή έμπνευσης και δύναμης σε όλη τη διάρκεια της ζωής μου και χωρίς αυτούς όλα αυτά δεν θα ήταν δυνατά.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Εισαγωγή | 15 |
| 1.2 | Οικονομική Κατανομή Φορτίου σε Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας | 16 |
| 1.3 | Ενέργειες Ελέγχου σε Προβλήματα Βέλτιστης Ροής Ισχύος | 17 |
| 1.4 | Αντικείμενο της Εργασίας | 17 |
| 1.5 | Δομή της Εργασίας | 18 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Εισαγωγή | 21 |
| 2.2 | Βέλτιστη Ροή Ισχύος | 21 |
| 2.3 | Βέλτιστη Ροή Ισχύος υπό Περιορισμούς Ασφαλείας | 23 |
| 2.4 | Η Ανάγκη Περιορισμού των Ενεργειών Ελέγχου σε Προβλήματα OPF και SCOPF | 26 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | Εισαγωγή και Ανάλυση του Προβλήματος | 29 |
| 3.2 | Προτεινόμενη Μεθοδολογία τριών Βημάτων | 30 |
| 3.3 | Συμβατική Μέθοδος με χρήση Δυναδικών Μεταβλητών | 33 |
| 3.3.1 | Βήμα 1 : C-OPF | 33 |
| 3.3.2 | Βήμα 2: MNC – OPF | 35 |
| 3.3.3 | Βήμα 3: EC – OPF | 36 |
| 3.4 | Μέθοδος Συνάρτησης Προσέγγισης με Συντελεστή a_i | 37 |
| 3.4.1 | Συνάρτηση Προσέγγισης | 37 |
| 3.4.2 | Βήμα 1: C-OPF | 38 |

| | | |
|-------|---------------------------|----|
| 3.4.3 | Βήμα 2: MNC-OPF | 38 |
| 3.4.4 | Βήμα 3: EC-OPF | 38 |
| 3.5 | Μέθοδος Προσέγγισης L_1 | 39 |
| 3.5.1 | Βήμα 1: C-OPF | 39 |
| 3.5.2 | Βήμα 2: MNC-OPF | 40 |
| 3.5.3 | Βήμα 3: EC-OPF | 40 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Εισαγωγή και Ανάλυση του Προβλήματος SCOPF | 40 |
| 4.1.1 | Preventive Security – Constrained Optimal Power Flow (PSCOPF) | 40 |
| 4.1.2 | Corrective Security – Constrained Optimal Power Flow (CSCOPF) | 42 |
| 4.1.3 | Preventive – Corrective Security – Constrained Optimal Power Flow (PCSCOPF) | 43 |
| 4.2 | Preventive Generation – Corrective Curtailment SCOPF | 44 |
| 4.2.1 | Διαφορές με Συμβατικό Preventive SCOPF | 44 |
| 4.2.2 | Προσαρμογή Εξισώσεων | 45 |
| 4.3 | Preventive-Corrective SCOPF | 50 |
| 4.3.1 | DC Προσέγγιση Προβλήματος | 50 |
| 4.3.2 | Προτεινόμενη Μέθοδος A | 52 |
| 4.3.3 | Προτεινόμενη Μέθοδος B | 55 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

| | | |
|-----|-----------------------|----|
| 5.1 | Εισαγωγή | 59 |
| 5.2 | Περιβάλλον GAMS | 59 |
| 5.3 | Εξαγωγή Αποτελεσμάτων | 61 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

| | | |
|---------|--|-----|
| 6.1 | Εισαγωγή | 65 |
| 6.2 | Δεδομένα Δικτύων | 65 |
| 6.2.1 | Δεδομένα Δικτύου 3 Ζυγών | 65 |
| 6.2.2 | Δεδομένα Δικτύου 74 Ζυγών | 67 |
| 6.2.3 | Δεδομένα Δικτύου 118 Ζυγών | 74 |
| 6.3 | Τιμές Συντελεστών | 89 |
| 6.4 | Αποτελέσματα με Ενέργειες Ελέγχου τις Απορρίψεις Φορτίου | 90 |
| 6.4.1 | Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών | 91 |
| 6.4.2 | Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών | 92 |
| 6.4.3 | Αποτελέσματα Δικτύου 118 Ζυγών | 93 |
| 6.4.4 | Σύγκριση και Συμπεράσματα | 94 |
| 6.5 | Αποτελέσματα με Ενέργειες Ελέγχου τις Απορρίψεις Φορτίου και τις Μεταβολές Ενεργού Παραγωγής Γεννητριών | 95 |
| 6.5.1 | Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών | 98 |
| 6.5.2 | Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών | 99 |
| 6.5.3 | Αποτελέσματα Δικτύου 118 Ζυγών | 100 |
| 6.5.4 | Σύγκριση και Συμπεράσματα | 101 |
| 6.6 | Αποτελέσματα PG-CC SCOPF | 102 |
| 6.6.1 | Αποτελέσματα δικτύου 3 Ζυγών | 103 |
| 6.6.2 | Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών | 104 |
| 6.6.3 | Συμπεράσματα | 105 |
| 6.7 | Αποτελέσματα Preventive-Corrective DC-SCOPF | 106 |
| 6.7.1 | Αποτελέσματα DC Μεθόδου A | 107 |
| 6.7.1.1 | Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών | 107 |
| 6.7.1.2 | Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών | 107 |
| 6.7.2 | Αποτελέσματα DC Μεθόδου B | 108 |
| 6.7.2.1 | Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών | 108 |
| 6.7.2.2 | Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών | 109 |
| 6.7.3 | Συμπεράσματα | 109 |
| 6.8 | Δυνατότητα Εφαρμογής Αποτελεσμάτων DC-SCOPF στο Πλήρες AC- SCOPF | 111 |
| 6.8.1 | Πλήρες AC-SCOPF | 112 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 6.8.2 | Εφαρμογή Αποτελεσμάτων DC-SCOPF | 114 |
| 6.8.3 | Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών | 115 |
| 6.8.4 | Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών | 115 |
| 6.8.5 | Συμπεράσματα | 118 |
| 6.9 | Αποτελέσματα Επιρροής Συντελεστή Προσέγγισης a_i | 120 |
| 6.9.1 | Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών | 120 |
| 6.9.2 | Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών | 120 |
| 6.9.3 | Αποτελέσματα Δικτύου 118 Ζυγών | 121 |
| 6.9.4 | Συμπεράσματα | 121 |
| 6.10 | Αποτελέσματα Επιρροής Συντελεστή Απόκλισης ϵ | 122 |
| 6.10.1 | Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών | 122 |
| 6.10.2 | Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών | 123 |
| 6.10.3 | Αποτελέσματα Δικτύου 118 Ζυγών | 123 |
| 6.10.4 | Συμπεράσματα | 124 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

| | | |
|-----|--------------------------------|-----|
| 7.1 | Αντικείμενο της Εργασίας | 127 |
| 7.2 | Συμπεράσματα | 128 |
| 7.3 | Πιθανές Μελλοντικές Επεκτάσεις | 131 |

| | |
|---------------------|-----|
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 133 |
|---------------------|-----|

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Για ένα ΣΗΕ οι βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας είναι οι παρακάτω:

- Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση.
- Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με το ελάχιστο δυνατό κόστος.
- Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις.
- Η εξασφάλιση σταθερής συχνότητας.
- Η εξασφάλιση σταθερής τάσης.
- Η εξασφάλιση υψηλής αξιοπιστίας τροφοδότησης [1].

Τα σημερινά ΣΗΕ είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 60 Hz στα δίκτυα της Αμερικής και 50 Hz στα δίκτυα της Ευρώπης. Σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας και συστήματα συνεχούς ρεύματος. Τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του ΣΗΕ απαιτούνται για την τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια: η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.

Υπεύθυνοι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου γίνεται η μετατροπή πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως η μετατροπή κάποιας άλλης μορφής ενέργειας σε μηχανική (κινητήρες, μηχανές, στρόβιλοι) και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω γεννητριών. Έτσι οι κύριοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί (άνθρακα, λιγνίτη, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί και οι πυρηνικοί σταθμοί. Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται μεγάλη διεύθυνση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στα ΣΗΕ όπου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται ο άνεμος (αιολική ενέργεια), η ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκοί σταθμοί), τα θαλάσσια κύματα, η γεωθερμία και η βιομάζα. Η διεύθυνση αυτή προκύπτει ως αντίμετρο στις δυσμενείς οικολογικές επιπτώσεις των συμβατικών μορφών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ορυκτών καυσίμων. Η νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) έχει εξελιχθεί σημαντικά κατά τα τελευταία έτη και

οδηγία της ΕΕ ορίζει ως στόχο μέχρι το 2030 ένα μερίδιο 32% της κατανάλωσης ενέργειας της ΕΕ να προέρχεται από ΑΠΕ, με πρόσφατη πρόταση αύξησης του μεριδίου αυτού στο 40% [2].

Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται σε μεγάλες ποσότητες από τους σταθμούς παραγωγής στις περιοχές κατανάλωσης, μέσω των γραμμών υψηλής και υπερυψηλής τάσης. Αυτές μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια στους υποσταθμούς, οι οποίοι αποτελούν κεντρικά σημεία του συστήματος, και από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Μέσω των γραμμών αυτών τροφοδοτούνται και μεγάλοι καταναλωτές υψηλής τάσης (μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις), οι οποίοι κατασκευάζουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού υψηλής σε μέση τάση και στη συνέχεια εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης.

Με τον όρο διανομή ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων τροφοδοτούνται οι καταναλωτές και οι σταθμοί υποβιβασμού τάσης, οι οποίοι αποτελούν τον σύνδεσμο με το σύστημα μεταφοράς. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι συνήθως οικονομικά εξαρτημένες και συνεπώς ο τεχνικός και οικονομικός σχεδιασμός των σταθμών παραγωγής, κύριων γραμμών μεταφοράς και των κεντρικών υποσταθμών είναι ενιαίος, ενώ η διανομή σχεδιάζεται και αναπτύσσεται συνήθως ανεξάρτητα και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής και των καταναλωτών [1]. Τα συστήματα διανομής τις επόμενες δύο δεκαετίες θα αντιμετωπίσουν ένα πλήθος σημαντικών προκλήσεων όπως είναι η μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ που σημαίνει διείσδυση μονάδων μεταβλητής παραγωγής, αυξημένη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, και αύξηση της διανεμημένης παραγωγής κ.α. [3].

Βασικοί παράγοντες βάσει των οποίων σχεδιάζεται η σύνθεση ενός ΣΗΕ είναι το μέγεθός του, το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η χρονική μεταβολή αυτής και η χωροταξική της κατανομή. Με στόχο την σωστή σχεδίαση και την αξιόπιστη λειτουργία, ένα ΣΗΕ μελετάται από διάφορες σκοπιές, τόσο μόνιμης, όσο και μεταβατικής κατάστασης. Έτσι πραγματοποιούνται μελέτες που αφορούν την ανάλυση ροών ισχύος, την οικονομική κατανομή φορτίου, την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων, την ευστάθεια και τα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα.

1.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η βελτιστοποίηση της κατανομής του συνολικού φορτίου του συστήματος ανάμεσα στις μονάδες παραγωγής αποτελεί αντικείμενο της οικονομικής κατανομής φορτίου. Λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς του συστήματος, πραγματοποιείται καθορισμός της ενεργού και άεργου παραγωγής των γεννητριών του συστήματος με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνεται το ελάχιστο δυνατό συνολικό κόστος λειτουργίας. Οι περιορισμοί του συστήματος που οφείλουν να τηρούνται αφορούν τα όρια τάσεων των ζυγών του συστήματος, τα όρια ενεργού και άεργου παραγωγής, τα θερμικά όρια των γραμμών μεταφοράς κ.α.

1.3 ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Άμεσα συνυφασμένη με την οικονομική κατανομή φορτίου είναι η ανάλυση ροών ισχύος, η οποία πραγματεύεται τον υπολογισμό των τάσεων κατά μέτρο και γωνία σε όλους τους ζυγούς, καθώς και των ροών ενεργού και αέργου ισχύος σε όλες τις γραμμές ενός ΣΗΕ. Ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον για την παρούσα διπλωματική εργασία κατέχουν τα προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος. Η βέλτιστη ροή ισχύος αποτελεί πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο βελτιστοποιεί κάποια αντικειμενική συνάρτηση, για παράδειγμα αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η βελτιστοποίηση αυτή πραγματοποιείται υπό αριθμό περιορισμών του συστήματος, οι οποίοι λαμβάνουν μορφή ισοτήτων και ανισοτήτων που οφείλουν να τηρούνται και αφορούν τα ισοζύγια των ροών ενεργού και αέργου ισχύος σε όλους τους ζυγούς του συστήματος, τα όρια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας των γραμμών μεταφοράς, τα όρια μέτρου και γωνίας τάσης ζυγών κ.α. Έτσι τελικά προσφέρεται ιδανική λύση, η οποία βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση και καθορίζει την ιδανική κατάσταση λειτουργίας του συστήματος που εξετάζεται.

Επιπλέον, η επίλυση ενός προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος προσφέρει, πέραν του ελέγχου τήρησης των καθοριζόμενων ορίων λειτουργίας του συστήματος, και την δυνατότητα μελέτης των επιπτώσεων ενδεχόμενων διαταραχών, όπως η απώλεια γεννήτριας ή η βλάβη γραμμής μεταφοράς. Όταν εισάγεται κάποια διαταραχή, επιλύεται το πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου εκ νέου, το οποίο πραγματοποιεί βελτιστοποίηση, σύμφωνα τώρα με τα νέα δεδομένα του δικτύου. Η λύση που προσφέρεται σε αυτή τη περίπτωση είναι προφανώς διαφορετική από την λύση του αρχικού δικτύου, στο οποίο δεν υφίσταται η διαταραχή. Η αντιμετώπιση της διαταραχής προϋποθέτει την πραγματοποίηση ορισμένων ενεργειών. Αυτές οι ενέργειες συνήθως λαμβάνουν τη μορφή της μεταβολής ορισμένων μεγεθών σε σχέση με την αρχική κατάσταση, όπως είναι π.χ. η μεταβολή ενεργού παραγωγής γεννητριών, η απόρριψη φορτίου σε ζυγό του συστήματος κ.α. και ονομάζονται *ενέργειες ελέγχου*. Οι ενέργειες ελέγχου σε ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος, και συγκεκριμένα η καταστολή των αναποτελεσματικών μεταξύ αυτών αποτελούν το επίκεντρο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι παρεχόμενες «βέλτιστες λύσεις» που παρέχονται από συμβατικές προσεγγίσεις προβλημάτων OPF και SCOPF και οι συνεπακόλουθα προτεινόμενες ενέργειες ελέγχου συνήθως αποτελούνται από μεταβολές των περισσότερων ή ακόμη και όλων των μεταβλητών ελέγχου. Ο μεγάλος αυτός αριθμός ενεργειών ελέγχου, αποτελεί ουσιαστικά κομμάτι μιας περισσότερο «ακαδημαϊκής» λύσης, η οποία ερμηνεύεται και εφαρμόζεται δύσκολα από κάποιον διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς (TSO), ο οποίος είναι απομονωμένος από την διαδικασία επίλυσης και δεν δύναται να συνδέσει εύκολα το πως κάθε ενέργεια ελέγχου σχετίζεται με τον τελικό του σκοπό, την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος, ή την αντιμετώπιση κάποιας διαταραχής. Επιπλέον, από λειτουργικής άποψης του δικτύου, η ανάγκη καταστολής των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου γίνεται επιτακτική όταν αναρωτηθεί κανείς εάν είναι δυνατόν να επιλυθεί ένα πρόβλημα με πολύ λιγότερες ενέργειες

ελέγχου, θυσιάζοντας μόνο μικρό μερίδιο της «ιδανικότητας» της βέλτιστης λύσης. Δύναται δηλαδή να εκκαθαρισθεί μια διαταραχή ρυθμίζοντας όχι όλες τις γεννήτριες του συστήματος, αλλά μόνο μερικές γεννήτριες, αυξάνοντας μόνο ελαφρώς το συνολικό κόστος λειτουργίας έναντι του ιδανικού;

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο να αντιμετωπίσει τις παραπάνω αδυναμίες συμβατικών OPF και SCOPF προσεγγίσεων. Εξετάζεται η δυνατότητα αναγνώρισης και καταστολής των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου σε προβλήματα OPF και SCOPF. Στόχος είναι να παρέχεται στον TSO του συστήματος μια ευκολότερα ερμηνεύσιμη λύση, η οποία αποτελείται από λιγότερες ενέργειες ελέγχου, δίνοντάς του τη δυνατότητα να κατανοήσει το πως συνδέονται με το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος και τις οποίες μπορεί να εφαρμόσει πρακτικά με βάση την εμπειρία του. Μελετάται η σύνδεση αριθμού ενεργειών ελέγχου με το συνολικό κόστος λειτουργίας και επιδιώκεται η εύρεση ισορροπίας μεταξύ των δύο για μια ικανοποιητική και ασφαλέστερη λειτουργία του συστήματος. Επιπλέον μελετάται, μέσω προσεγγιστικών μεθόδων, η δυνατότητα μείωσης του χρόνου εκτέλεσης, κυρίως των πολυπλοκότερων προβλημάτων.

Για τους σκοπούς αυτούς αναπτύχθηκε μεθοδολογία 3 βημάτων, η οποία εφαρμόστηκε αρχικά σε προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος. Συγκρίθηκαν 3 τρόποι εφαρμογής αυτής, εξετάζοντας την αποτελεσματικότητα δύο προσεγγιστικών μεθόδων έναντι μιας συμβατικής. Επιπλέον, επεκτάθηκε η μεθοδολογία 3 βημάτων σε διάφορα προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος υπό περιορισμούς ασφαλείας. Τα προβλήματα αυτά λαμβάνουν υπόψη τόσο προληπτικές όσο και διορθωτικές ενέργειες ελέγχου και εξετάζονται τόσο AC όσο και DC προσεγγίσεις των προβλημάτων. Συγκεκριμένα, η παρούσα διπλωματική εργασία εμπλουτίζει την υφιστάμενη βιβλιογραφία που ανασκοπείται στο Κεφάλαιο 2 με:

1. Μεθοδολογία για την καταστολή μη αποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου σε προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος λαμβάνοντας υπόψη και τις μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητριών.
2. Μεθοδολογία για την καταστολή μη αποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου σε προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος υπό περιορισμούς ασφαλείας.
3. Πραγματοποίηση των παραπάνω μέσω ανάπτυξης προσεγγιστικής μεθόδου, η οποία μειώνει δραστικά τον χρόνο εκτέλεσης των ιδιαίτερα περίπλοκων προβλημάτων, μέσω συνάρτησης προσέγγισης δυαδικών μεταβλητών.

1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία απαρτίζεται συνολικά από 8 κεφάλαια:

- Στο **Κεφάλαιο 2** πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος και τα προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος υπό περιορισμούς ασφαλείας, καθώς και την ανάγκη περιορισμού των ενεργειών ελέγχου σε αυτά.

- Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται η μεθοδολογία – μοντελοποίηση που ακολουθείται στην συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας με σκοπό την καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου σε προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος.
- Στο **Κεφάλαιο 4** αναλύεται η επέκταση της μεθοδολογίας του Κεφαλαίου 3 λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς ασφαλείας, με σκοπό την καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου σε προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος υπό περιορισμούς ασφαλείας.
- Στο **Κεφάλαιο 5** πραγματοποιείται μια συνοπτική περιγραφή του λογισμικού GAMS, το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, αναφέροντας τα βασικά στοιχεία και εντολές καθώς και τους διάφορους τρόπους εξαγωγής αποτελεσμάτων.
- Στο **Κεφάλαιο 6** αναλύονται αρχικά τα στοιχεία των δικτύων που προσομοιώθηκαν και στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται όλα τα αποτελέσματα των προβλημάτων που ορίστηκαν στα Κεφάλαια 3 και 4.
- Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μια σύνοψη της διπλωματικής εργασίας και προτείνονται τρόποι πιθανής μελλοντικής επέκτασης αυτής.
- Στο **Κεφάλαιο 8** παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε σε όλη την διπλωματική εργασία.

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν Κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος (OPF) και τα προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος υπό περιορισμούς ασφαλείας (SCOPF). Γίνεται αναφορά στην φύση των προβλημάτων καθώς και σε έρευνες που προτείνουν μεθοδολογίες επίλυσης αυτών. Τέλος, γίνεται αναφορά στην ανάγκη περιορισμού των ενεργειών ελέγχου σε προβλήματα OPF και SCOPF και ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με την προσπάθεια αυτή.

2.2 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ

Η ανάλυση ροών ισχύος πραγματοποιείται τον υπολογισμό των τάσεων κατά μέτρο και γωνία σε όλους τους ζυγούς, καθώς και των ροών ενεργού και αέργου ισχύος σε όλες τις γραμμές ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται για διάφορα σημεία λειτουργίας, τα οποία ορίζονται από την παραγωγή ενεργού ισχύος και τις τάσεις των γεννητριών, καθώς και από τις καταναλώσεις των φορτίων [1]. Η βέλτιστη ροή ισχύος είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο βελτιστοποιεί κάποια αντικειμενική συνάρτηση (για παράδειγμα, ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας), και στους περιορισμούς του προβλήματος βελτιστοποίησης, μεταξύ άλλων περιορισμών, περιλαμβάνει ως περιορισμούς ισότητας τα ισοζύγια των ροών ενεργού και αέργου ισχύος σε όλους τους ζυγούς του συστήματος. Ο όρος βέλτιστη ροή ισχύος (Optimal Power Flow – OPF) εισήχθη το 1962 και έκτοτε κατέχει ουσιώδη ρόλο στην λειτουργία και τον σχεδιασμό των ΣΗΕ [4]. Προσφέρει έλεγχο τήρησης των καθοριζόμενων ορίων λειτουργίας του συστήματος, όπως είναι τα θερμικά όρια των γραμμών και συμβάλλει στην μελέτη των επιπτώσεων ενδεχόμενων διαταραχών, όπως την απώλεια γεννήτριας ή γραμμής. Επιπλέον, κατέχει σημαντικό ρόλο στον μελλοντικό σχεδιασμό και την ανάπτυξη και επέκταση του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, συνδέεται άμεσα με την οικονομική πλευρά της διαχείρισης του ΣΗΕ λαμβάνοντας την μορφή του προβλήματος της οικονομικότερης κατανομής φορτίου (Economic Dispatch – ED). Αυτό στοχεύει στον προγραμματισμό των διαθέσιμων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος λειτουργίας τους, με ταυτόχρονη εξυπηρέτηση των φορτίων του συστήματος και την τήρηση των καθοριζόμενων ορίων [5].

Το OPF αποτελεί συνεπώς πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο από την δεκαετία του 1960, για την ικανοποίηση των μη γραμμικών εξισώσεων των ροών ισχύος, αντιμετωπίστηκε

με επαναληπτικές μεθοδολογίες, όπου κάθε επανάληψη βασιζόταν σε ένα απλοποιημένο γραμμικό υποπρόβλημα. Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές μη-γραμμικού προγραμματισμού οι οποίες στηρίζονταν στην μέθοδο διαδοχικών προσεγγίσεων (successive approximation), στην κλίση (gradient), καθώς και στον διαδοχικό γραμμικό προγραμματισμό (successive linear programming) [6]. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 και έπειτα χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του OPF για πρώτη φορά η μέθοδος Newton (Newton strategy), ο διαδοχικός τετραγωνικός προγραμματισμός (successive quadratic programming) καθώς και ο παραμετρικός προγραμματισμός (parametric programming). Οι σημερινοί αλγόριθμοι επίλυσης στηρίζονται κυρίως στον μη γραμμικό προγραμματισμό (Non Linear Programming – NLP), ο οποίος περιλαμβάνει μη γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμούς, αυξάνοντας έτσι την πολυπλοκότητα αλλά και την ακρίβεια των παρεχόμενων λύσεων. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο κατέχουν σήμερα οι αλγόριθμοι, οι οποίοι στηρίζονται σε μεθόδους εσωτερικών σημείων (Interior Point Method – IPM) και χρησιμοποιούνται ευρέως και στην παρούσα εργασία στα Κεφάλαια 3 και 4. Το 1994 χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος βασισμένος στην IPM για τον υπολογισμό της βέλτιστης κατανομής αέργου ισχύος, όπου έδειξε μεγάλη ταχύτητα σύγκλισης, μικρή ευαισθησία στο μέγεθος του δικτύου και των αριθμό των μεταβλητών ελέγχου καθώς και αριθμητική σταθερότητα [7]. Οι έκτοτε αναπτυσσόμενοι αλγόριθμοι βασισμένοι στην ίδια φιλοσοφία είναι αρκετά ελκυστικοί στην αντιμετώπιση προβλημάτων βέλτιστης ροής ισχύος χάρη στα ακόλουθα χαρακτηριστικά τους [8]:

- Μεγάλη ταχύτητα σύγκλισης
- Ευκολία διαχείρισης περιορισμών ανισότητας
- Δεν απαιτείται αυστηρά εφικτό σημείο εκκίνησης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο IPM αλγόριθμος που χρησιμοποιείται είναι ο IPOPT [9], ο οποίος αναπτύχθηκε το 2002.

Επιπλέον τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες που ενσωματώνουν μηχανισμούς τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) για την επίλυση ιδιαίτερα περίπλοκων προβλημάτων OPF, με σημαντικότερες τις παρακάτω:

- Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms - GA)
- Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO)
- Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Network - ANN)
- Βελτιστοποίηση Αποικίας Μελισσών (Bee Colony Optimization - BCO)
- Αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης (Differential Evolution - DE)
- Βελτιστοποίηση Γκρίζου Λύκου (Grey Wolf Optimizer - GWO)
- Αλγόριθμος Άλματος Βατράχου (Shuffled Frog-Leaping - SFL)

Ως κύρια πλεονεκτήματα των μηχανισμών τεχνητής νοημοσύνης για την επίλυση προβλημάτων OPF αναφέρονται η ευκολότερη προσαρμογή στους περιορισμούς του προβλήματος, η δυνατότητα εύρεσης πολλαπλών βέλτιστων λύσεων ταυτόχρονα σε μια εκτέλεση προσομοίωσης και η δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις προς βελτιστοποίηση [10].

Σήμερα, το OPF εμφανίζεται στην πλήρη μορφή του ως ένα μη γραμμικό πρόβλημα που περιλαμβάνει δυαδικές μεταβλητές απόφασης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως

μεταβλητές κατάστασης (status variable), επιτρέποντας ή όχι την μεταβολή μεταβλητών εντός των ορίων που καθορίζονται. Συνεπώς, η OPF αποτελεί ένα πρόβλημα μεικτού ακέραϊου μη γραμμικού προγραμματισμού (Mixed Integer Non-Linear Problem – MINLP). Οι τελευταίες τρεις δεκαετίες απέδωσαν στον τομέα των MINLP προβλημάτων ποικίλες συνεισφορές από πλευράς μηχανικών, μαθηματικών και άλλων ερευνητών οδηγώντας στην ανάπτυξη και βελτίωση των αλγορίθμων επίλυσης και συνεπώς του χρόνου επίλυσης αυτών [11]. Παρά ταύτα, τα MINLP προβλήματα παρουσιάζουν επαυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα, κυρίως όσο αυξάνεται το μέγεθος του υπό εξέταση συστήματος, πράγμα το οποίο τα καθιστά δύσκαμπτα σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπου πιθανόν να απαιτείται επίλυση διαδοχικών προβλημάτων βέλτιστης ροής ισχύος σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τα υπολογιστικά κωλύματα του παρελθόντος, όπως η υπολογιστική δύναμη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και η αδυναμία των διαθέσιμων αλγορίθμων και προγραμματιστικών μεθόδων, οδήγησαν στη σαφή διάκριση στη βιβλιογραφία μεταξύ του μικρότερου σε κλίμακα OPF προβλήματος και του OPF υπό περιορισμούς ασφαλείας, το οποίο αποτελεί μεγαλύτερης κλίμακας πρόβλημα [12].

Όσον αφορά το αντικείμενο της βελτιστοποίησης σε ένα OPF, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να εκφραστεί σε ποικίλες μορφές. Οι συνηθέστερες περιπτώσεις αφορούν την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, την ελαχιστοποίηση των απωλειών του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ή/και την μεγιστοποίηση του κέρδους της ηλεκτρικής εταιρίας [13]. Ακόμη, δύναται να συνυπολογίζονται διάφοροι περιβαλλοντολογικοί παράγοντες, όπως είναι π.χ. η συνεκτίμηση της αιολικής ενέργειας με την βοήθεια πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου σε βάθος 120 δευτερολέπτων [14]. Το μαθηματικό υπόβαθρο, οι σχέσεις και περιορισμοί που διέπουν τα προβλήματα OPF, τα οποία επιλύονται στην παρούσα εργασία, αναπτύσσονται στα Κεφάλαια 3 και 4.

2.3 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΥΠΟ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Τα ΣΗΕ ανά τον κόσμο υφίστανται συνεχώς αλλαγές και επαναδιαμορφώσεις βασισμένες στην βελτιστοποίηση του δικτύου και την λειτουργία αυτού, την εξυπηρέτηση των υφιστάμενων φορτίων, τον ανταγωνισμό της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, την κερδοσκοπία, την εξέλιξη των τεχνολογιών, τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, και περιβαλλοντολογικούς παράγοντες. Η συνεχώς εξελισσόμενη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και η αυξημένη εξάρτηση του ανθρώπου από αυτήν, η οποία προκαλεί συνεχή αύξηση του φορτίου και φόρτιση του δικτύου, οδήγησαν τους διαχειριστές των ΣΗΕ να λειτουργούν τα δίκτυα με περιορισμένη εφεδρεία και ανέδειξαν την ανάγκη για την καθίδρυση αρχών ελέγχου και ηλεκτρονικών μέσων επιτήρησης μεγάλης ακρίβειας για την αποφυγή διακοπών παροχής μικρής και μεγάλης κλίμακας [15]. Προκειμένου να υπάρξει ικανοποίηση της αγοράς δεν επαρκεί μόνο η εξασφάλιση διαθεσιμότητας ηλεκτρικής ενέργειας στους πελάτες, αλλά είναι επιτακτική η αξιοπιστία, η ασφάλεια, η ποιότητα καθώς και η αδιάκοπη παροχή αυτής. Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτείται ένα ΣΗΕ, ικανό να αντιμετωπίσει διαταραχές, όπως είναι βλάβες γεννητριών και διακοπές γραμμών, λειτουργώντας παρά ταύτα εντός καθοριζόμενων ορίων και χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η γενικότερη λειτουργία του.

Μέσω OPF υπό περιορισμούς ασφαλείας (Security-Constrained Optimal Power Flow – SCOPF) επιδιώκεται η εξασφάλιση αυτών των επιθυμητών χαρακτηριστικών του ΣΗΕ. Αποτελεί ουσιαστικά μια επέκταση του OPF, κατά την οποία συνυπολογίζονται ποικίλα

ενδεχόμενα διαταραχής της φυσιολογικής λειτουργίας του συστήματος. Τέτοια σενάρια διαταραχών πιθανόν να είναι η διακοπή ή βλάβη γραμμής μεταφοράς/διανομής, γεννήτριας, μετασχηματιστή, φορτίου, και αντισταθμιστή. Συνεκτιμώντας αριθμό πιθανών διαταραχών στην λειτουργία του συστήματος, το SCOPF υπολογίζει τις βέλτιστες απαραίτητες προληπτικές (preventive SCOPF) ή/και διορθωτικές (corrective SCOPF) κινήσεις που απαιτούνται για την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση αυτών και την διατήρηση εφικτής κατάστασης δικτύου μετά από βλάβη. Οι αρχικές προσπάθειες συνυπολογισμού βλαβών σε μελέτες ροών ισχύος χρησιμοποιούσαν κυρίως DC προσεγγίσεις της ροής ισχύος [15], ενώ το 1973 προτάθηκε μια ακριβέστερη μέθοδος με δυνατότητα ενσωμάτωσης περιορισμών ασφαλείας σε OPF, η οποία επέτρεψε να ληφθούν υπόψη και να εξασφαλιστούν ικανοποιητικά επίπεδα της αέργου ισχύος και να τηρούνται τα όρια τάσεων στις περιπτώσεις των διαταραχών [16]. Το 1987 παρουσιάστηκε μελέτη οικονομικής κατανομής φορτίου υπό περιορισμούς ασφαλείας, η οποία λάμβανε υπόψη τις διορθωτικές ικανότητες του συστήματος, μετά την εκδήλωση διαταραχών, διαχώριζε την οικονομική κατανομή φορτίου στην βασική κατάσταση από την ανάλυση διαταραχών, τις οποίες έλυνε ξεχωριστά [17]. Το 1994 προτείνεται μεθοδολογία ασύγχρονου προγραμματισμού όπου παραλληλίζονται οι υπολογισμοί ενός SCOPF, με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη αποδοτικότητα και φορητότητα [18]. Το 1997 παρουσιάζεται μεθοδολογία βασισμένη στην ασαφή λογική (fuzzy logic), η οποία αποσκοπεί σε ταυτόχρονη βελτιστοποίηση δύο μεγεθών, την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής βασικής κατάστασης και της χρονικής διάρκειας των διορθωτικών ενεργειών μετά την διαταραχή [19]. Την δεκαετία του 1990 το SCOPF μετατρέπεται σε ουσιαστικό εργαλείο για τους διαχειριστές των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Transmission System Operators – TSO) τόσο για τον σχεδιασμό και για την λειτουργία του συστήματος, όσο και για την καθιέρωση των τοπικών τιμών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, κάνοντας χρήση μοντελοποίησης DC ροής ισχύος, οπότε το πρόβλημα ήταν DC SCOPF [20]. Στη συνέχεια, το SCOPF αποτελεί την βάση ποικίλων μελετών. Έτσι, πραγματοποιείται ανάπτυξη γενετικών αλγορίθμων για την βελτίωση της ασφάλειας γραμμών μέσω της ανακατανομής παραγωγής και προσαρμογής μετασχηματιστών ρύθμισης [15]. Επιπλέον, εφαρμόζεται σε οικονομική κατανομή φορτίου με την βοήθεια γραμμικού προγραμματισμού και μεθόδου εσωτερικών σημείων [21].

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως η κλίμακα ενός προβλήματος SCOPF είναι άμεσα εξαρτώμενη από τον αριθμό των ενδεχόμενων βλαβών που επιλέγεται να συμπεριληφθούν στην ανάλυση. Η κλίμακα ενός AC SCOPF είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του AC OPF προβλήματος, καθώς για κάθε ενδεχόμενο βλάβης το οποίο συνυπολογίζεται αυξάνεται ο αριθμός των περιορισμών, των μεταβλητών απόφασης καθώς και τον δυαδικών μεταβλητών που περιλαμβάνονται στο πρόβλημα. Η αδυναμία των ηλεκτρονικών υπολογιστών (H/Y) του παρελθόντος να αντιμετωπίσουν ένα SCOPF σε σχέση με ένα αντίστοιχο OPF οδήγησε την δεκαετία του 1990 σε γενικότερη ασυμφωνία ορολογίας, η οποία δυσκόλευε τη σαφή διάκριση μεταξύ των δύο προβλημάτων. Ωστόσο, η ραγδαία εξέλιξη των προγραμματιστικών μεθόδων και η εκθετική αύξηση των δυνατοτήτων των H/Y, σε συνδυασμό με την απαίτηση του ΣΗΕ να ικανοποιεί το κριτήριο ασφαλείας N-1, ωθεί αριθμό ερευνητών στο συμπέρασμα πως μια διάκριση μεταξύ των δύο προβλημάτων είναι απαραίτητη, καθώς ένα OPF στον πραγματικό κόσμο πρέπει να συνυπολογίζει περιορισμούς ασφαλείας για να είναι πρακτικά εφαρμόσιμο [12]. Συνεπώς, γίνεται εμφανής η ανάγκη μελέτης μεθόδων επιλογής κατάλληλου αριθμού ενδεχομένων βλάβης καθώς η κλίμακα του προβλήματος εξαρτάται άμεσα από αυτές. Το μέγεθος του SCOPF αποτελεί την

κύρια δυσκολία στην αντιμετώπισή του, και μπορεί να λάβει υπολογιστικά απαγορευτικές διαστάσεις κυρίως για μεγαλύτερα δίκτυα ή/και όταν λαμβάνεται υπόψη μεγάλος αριθμός πιθανών βλαβών. Καθώς στην πραγματικότητα δεν είναι όλες οι βλάβες ίδιας βαρύτητας και οι περισσότερες δεν επηρεάζουν το σύνολο του ΣΗΕ, εάν συμπεριληφθούν όλες ταυτόχρονα στην ανάλυση (άμεση προσέγγιση) αυξάνεται η πολυπλοκότητα των υπολογισμών και μειώνεται η εφικτή περιοχή της λύσης, πράγμα το οποίο δύναται να οδηγήσει σε αλγοριθμικά και αριθμητικά προβλήματα, κυρίως σε φορτισμένα δίκτυα, όπου το SCOPF είναι ιδιαίτερα χρήσιμο [22].

Αντικείμενο πολλών ερευνών υπήρξε συνεπώς ο τρόπος επιλογής των ενδεχομένων βλάβης και η αποσύνθεση του προβλήματος (decomposition) σε μικρότερα υποπροβλήματα, τα οποία απλοποιούν το αρχικό πρόβλημα και επιτρέπουν παράλληλους υπολογισμούς. Έτσι, σε γενικές γραμμές, η αντιμετώπιση ενός προβλήματος SCOPF περιγράφεται με τα εξής, κοινά μεταξύ των μεθοδολογιών, βήματα, τα οποία είναι αλληλένδετα και συνθέτουν μια επαναληπτική διαδικασία [12]:

- *Βελτιστοποίηση κύριου προβλήματος* (Master Problem Optimizer – MPO). Αφορά τους περιορισμούς της βασικής κατάστασης προ σφάλματος καθώς και πιθανόν δεσμευτικούς περιορισμούς ενδεχομένων βλαβών. Αποτελεί συνήθως μη-γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης (NLP), το οποίο μπορεί να προσεγγιστεί περαιτέρω με τετραγωνικό προγραμματισμό (Quadratic Programming – QP), γραμμικό προγραμματισμό (Linear Programming – LP) κ.α.
- *Βελτιστοποίηση υποπροβλήματος k* (Slave Problem k Optimizer – SPO _{k}). Αφορά την κατάσταση μετά από κάθε σφάλμα k , ελέγχοντας την επιτυχή αντιμετώπιση της διαταραχής με τις διαθέσιμες διορθωτικές ενέργειες ελέγχου.
- *Διαχείριση διακριτών μεταβλητών* (Management of discrete variables – MDV). Περιλαμβάνει προσεγγιστικές μεθόδους προκειμένου να υπολογιστούν οι τιμές των διακριτών μεταβλητών, οι οποίες συμβάλουν άμεσα στη μείωση της πολυπλοκότητας των υπολογισμών.
- *Ανάλυση Ασφαλείας* (Security Analysis module – SA module). Επιλύεται συμβατικό πρόβλημα OPF με βάση την παρεχόμενη λύση από το MPO, προκειμένου να αναγνωριστούν τυχόν παραβιάσεις ορίων, οι οποίες καταδεικνύουν τα κρίσιμα ενδεχόμενα σφάλματος.
- *Φίλτρο ενδεχομένων σφαλμάτων* (Contingency Filter – CF module). Επιλέγονται από τα κρίσιμα ενδεχόμενα του SA module, αυτά τα οποία πιθανόν να είναι δεσμευτικά για την επίλυση του SCOPF.

Η αποσύνθεση του SCOPF, με απώτερο σκοπό την σμίκρυνση της κλίμακας του προβλήματος, έχει συγκεντρώσει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Ορισμένες μεθοδολογίες αποσύνθεσης είναι η αποσύνθεση Benders (Benders Decomposition – BD) [17, 23], η μέθοδος εναλλακτικής κατεύθυνσης πολλαπλασιαστών (Alternating Direction Method of Multipliers – ADMM) [23], και η συγκέντρωση μόνο των περιορισμών που προκύπτουν από τα πιθανά

δεσμευτικά, για την λύση του SCOPF, ενδεχόμενα βλαβών [24]. Επιπρόσθετα, για την μείωση της πολυπλοκότητας και την επιτάχυνση της διαδικασίας επίλυσης ενός SCOPF εφαρμόζονται τεχνικές συμπίεσης δικτύου (network compression) [25], αποσύνθεση βασισμένη σε αλγόριθμο εσωτερικών σημείων [26]-[28] καθώς και συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων. Σήμερα, οι αναφερόμενες τεχνικές προσφέρουν τη δυνατότητα (προσεγγιστικής) επίλυσης ενός προβλήματος AC SCOPF μεγάλης κλίμακας σε λογικά χρονικά πλαίσια [29].

Το Κεφάλαιο 4 παρουσιάζει το μαθηματικό υπόβαθρο, τις σχέσεις και τους περιορισμούς που διέπουν τα προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος υπό περιορισμούς ασφαλείας, τα οποία επιλύονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

2.4 Η ΑΝΑΓΚΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ OPF ΚΑΙ SCOPF

Ένας παράγοντας, ο οποίος έλαβε λιγότερη προσοχή από την ερευνητική κοινότητα αφορά τις ενέργειες ελέγχου σε προβλήματα OPF με ή χωρίς περιορισμούς ασφαλείας. Συγκεκριμένα, η ενασχόληση με τις ενέργειες ελέγχου σε ένα OPF πρόβλημα πραγματεύεται τα εξής [30]:

- Ο διαχειριστής του συστήματος αναζητεί έναν μικρό αριθμό ενεργειών ελέγχου, που μπορούν να εφαρμοστούν πρακτικά σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα τόσο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, όπου επιθυμεί να αντιμετωπίσει κάποια διαταραχή και να εξασφαλίσει την ακεραιότητα του συστήματος, όσο και υπό φυσιολογικές συνθήκες, όπου σκοπεύει να βελτιστοποιήσει την λειτουργία του συστήματος.
- Ιδιαίτερα χρήσιμη πληροφορία για τον διαχειριστή του συστήματος αποτελεί η σχέση και η ισορροπία μεταξύ της αντικειμενικής συνάρτησης και του αριθμού των ενεργειών ελέγχου που οφείλουν να εφαρμοστούν.
- Σε περίπτωση διαταραχής, ο ελάχιστος αριθμός ενεργειών ελέγχου, ο οποίος είναι απαραίτητος για τη εκκαθάριση της διαταραχής, αποτελεί ουσιώδη πληροφορία για τον διαχειριστή του συστήματος, ο οποίος στη συνέχεια δύναται να εκτιμήσει τον διαθέσιμο χρόνο και την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων ενεργειών ελέγχου.

Τα περισσότερα προβλήματα OPF και SCOPF, τα οποία δεν εξετάζουν με κάποιο τρόπο τον αριθμό των ενεργειών ελέγχου καταλήγουν σε μια βέλτιστη λύση, η οποία συνήθως προκύπτει από μεταβολή των περισσότερων ή ακόμη και όλων των μεταβλητών ελέγχου. Συνεπώς, προκύπτει μια βέλτιστη λύση ακαδημαϊκού χαρακτήρα με μεγάλο αριθμό ενεργειών ελέγχου, η πρακτική εφαρμογή των οποίων παρουσιάζει δυσκολίες. Επιπλέον, ένας μεγάλος αριθμός ενεργειών ελέγχου δυσκολεύει την επιλογή της σειράς, με την οποία θα εφαρμοστούν αυτές και δυσκολεύει τον διαχειριστή να ακολουθήσει τις επιπτώσεις εφαρμογής κάθε ενέργειας.

Αρχικά, οι σχετικές έρευνες επικεντρώθηκαν σε επίλυση OPF προβλήματος, όπου ο αριθμός των ενεργειών ελέγχου καθορίστηκε εκ των προτέρων, το οποίο ονομάστηκε «OPFLC» [31] και στη συνέχεια «OPF-LNC (OPF Limited Number of Controls)» [30]. Η

επιλογή του επιτρεπόμενου αριθμού βασίστηκε αρχικά σε ανθρώπινη κρίση ύστερα από εκτέλεση ενός συμβατικού OPF, όπου επιτρέπεται η μεταβολή όλων των μεταβλητών ελέγχου. Στη συνέχεια εξετάστηκαν για την επιλογή αυτή ευρετικές μέθοδοι, όπως είναι η χρήση των ευαισθησιών πρώτης τάξης (first order sensitivities) της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών στην μεταβολή των μεταβλητών ελέγχου [32]. Επίσης, προτάθηκε προσέγγιση της δυαδικής σχέσης περιορισμού των ενεργειών ελέγχου μέσω ασαφούς συνεχούς μη γραμμικής συνάρτησης (fuzzy continuous nonlinear function) [31] και μέσω σιγμοειδούς συνάρτησης (sigmoid function) [33]. Προσπάθεια πραγματοποιήθηκε και μέσω γενετικού αλγορίθμου [34], όπου λήφθηκε υπόψη το κόστος των μεταβολών στις συσκευές ρύθμισης, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους των ενεργειών ελέγχου ταυτόχρονα με την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος.

Πέραν του εκ των προτέρων καθορισμού των ενεργειών ελέγχου, δεν συναντώνται πολλές ερευνητικές προσπάθειες που να εστιάζουν στον καθορισμό του ελάχιστου απαραίτητου αριθμού ενεργειών ελέγχου. Έτσι, αναπτύχθηκε μεθοδολογία OPF-MNC (OPF-Minimum Number of Controls), βασισμένη σε μεικτό ακέραιο γραμμικό πρόβλημα (Mixed Integer Linear Problem – MILP), με την οποία υπολογίζεται ο ελάχιστος αριθμός ενεργειών ελέγχου που είναι απαραίτητος για την εκκαθάριση διαταραχής/παραβίασης ορίων, παρέχοντας και μια εκτίμηση της σχέσης μεταξύ αντικειμενικής συνάρτησης και ενεργειών ελέγχου μέσω ανάλυσης ευαισθησιών [30].

Μικρός αριθμός ερευνητικών προσπαθειών εστίασε στον προσδιορισμό του αριθμού των ενεργειών ελέγχου σε προβλήματα SCOPF. Χρησιμοποιήθηκε μέθοδος για την ελαχιστοποίηση των ενεργειών ελέγχου σε SCOPF με χρήση νόρμας L1, η οποία, στην παρούσα εργασία, αναφέρεται ως Μέθοδος προσέγγισης L1 και αναλύεται στο Κεφάλαιο 3 [35,36].

Επιπλέον, μεθοδολογία MILP βασισμένη σε DC ροή ισχύος αποσκοπεί στον περιορισμό του αριθμού των διορθωτικών ενεργειών ενός SCOPF [37]. Χρησιμοποιείται DC ροή ισχύος για την αναγνώριση των δεσμευτικών ενδεχόμενων διαταραχών, προκειμένου στη συνέχεια να τεθεί αντίστοιχο ανώτατο όριο ενεργειών ελέγχου σε επαναληπτική μέθοδο επίλυσης AC SCOPF. Η μέθοδος παρέχει συντομότερο χρόνο επίλυσης, χάρη σε πιο αποτελεσματική αναγνώριση δεσμευτικών ενδεχομένων βλάβης και σε ταχύτερη και ευκολότερη επιλογή αριθμού μέγιστων επιτρεπόμενων ενεργειών ελέγχου.

Τα Κεφάλαια 3 και 4 παρουσιάζουν το μαθηματικό υπόβαθρο, τις σχέσεις και τους περιορισμούς που διέπουν τα προβλήματα OPF και SCOPF που επιλύονται στην παρούσα εργασία, καθώς και την προτεινόμενη μεθοδολογία για την καταστολή των μη αποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου σε αυτά.

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στο παρόν Κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία και παρουσιάζεται η μοντελοποίηση που ακολουθείται στην συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας με σκοπό την καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου σε προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal Power Flow – OPF).

Ένα πρόβλημα OPF αποτελείται από μια αντικειμενική συνάρτηση, ως προς την οποία πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση, από μεταβλητές απόφασης και κατάστασης καθώς και από αριθμό περιορισμών σε μορφή ισοτήτων και ανισοτήτων.

Η γενική μορφή ενός συμβατικού προβλήματος OPF είναι η εξής:

$$f^* = \min f(u, x) \quad (3.1)$$

$$g(u, x) = 0 \quad (3.2)$$

$$h(u, x) \leq 0 \quad (3.3)$$

$$\underline{u} \leq u \leq \bar{u} \quad (3.4)$$

όπου:

- f είναι η αντικειμενική συνάρτηση, όπως είναι το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Με f^* συμβολίζεται η βέλτιστη τιμή αυτής.
- u είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης, οι οποίες είναι η ενεργός και άεργος παραγωγή των γεννητριών, η απόρριψη φορτίου, και άλλες μεταβλητές.
- \underline{u} και \bar{u} είναι το κατώτατο και ανώτατο, αντίστοιχα, όριο των μεταβλητών απόφασης. Τα όρια αυτά προκύπτουν από τους φυσικούς περιορισμούς του υπό εξέταση συστήματος, όπως είναι η μέγιστη και ελάχιστη παραγωγή των γεννητριών, η μέγιστη και ελάχιστη επιτρεπόμενη απόρριψη φορτίου, και άλλοι φυσικοί περιορισμοί.

- x είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης, όπως είναι το μέτρο και η γωνία της τάσης των ζυγών του συστήματος.
- g είναι διάνυσμα εξισώσεων το οποίο περιλαμβάνει τους περιορισμούς ισότητας του προβλήματος.
- h είναι διάνυσμα ανισώσεων το οποίο περιλαμβάνει τους περιορισμούς ανισότητας του προβλήματος.

Οι περιορισμοί ισότητας (3.2) αποτελούνται από τις εξισώσεις ροών ενεργού και αέργου ισχύος, καθώς και από τα ισοζύγια ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς του συστήματος. Οι περιορισμοί ανισότητας (3.3) αποτελούνται από τα φυσικά όρια λειτουργίας του συστήματος, όπως είναι τα θερμικά όρια των γραμμών μεταφοράς και τα όρια του μέτρου και της γωνίας της τάσης των ζυγών.

Στη συνέχεια του παρόντος Κεφαλαίου αναλύονται οι ειδικές μορφές τις οποίες λαμβάνουν οι παραπάνω γενικές σχέσεις και μεταβλητές στα διάφορα βήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

3.2 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΡΙΩΝ ΒΗΜΑΤΩΝ

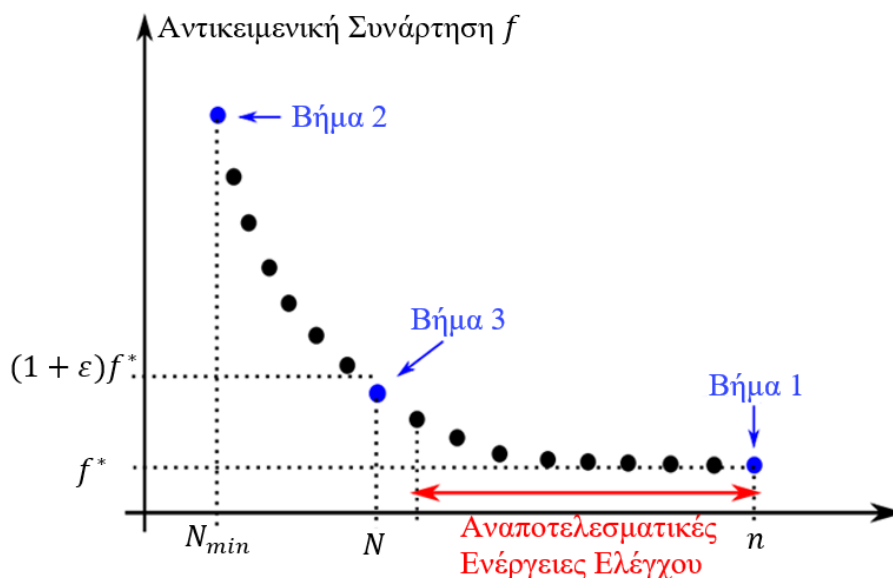
Χρήσιμο εργαλείο στην προσπάθεια περιορισμού των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου σε προβλήματα OPF και SCOPF είναι η επίγνωση της σχέσης μεταξύ αντικειμενικής συνάρτησης και αριθμού ενεργειών ελέγχου. Η απεικόνιση της εξάρτησης αυτής σε μορφή καμπύλης απαιτεί υψηλούς υπολογιστικούς πόρους, καθώς απαιτεί την επίλυση ενός MINLP για κάθε δυνατό αριθμό ενεργειών ελέγχου [38]. Η προτεινόμενη μεθοδολογία πραγματοποιεί την εύρεση της ισορροπίας μεταξύ ενεργειών ελέγχου και αντικειμενικής συνάρτησης με την διαδοχική επίλυση τριών προβλημάτων OPF. Στο Σχήμα 3.1 αναπαρίσταται, σε μορφή καμπύλης (trade-off curve), η προτεινόμενη μεθοδολογία τριών βημάτων.

Στο **1^ο Βήμα** της μεθοδολογίας λύνεται ένα συμβατικό OPF (Conventional OPF, C-OPF), όπως αυτό περιγράφεται από τις γενικές εξισώσεις (3.1) έως (3.4). Αυτό παρέχει την βέλτιστη λύση, δηλαδή την βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f^* . Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας η αντικειμενική συνάρτηση του 1^{ου} βήματος είναι το άθροισμα του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και του κόστους απόρριψης φορτίου. Το C-OPF δεν υπόκειται σε περιορισμούς σχετικά με τον αριθμό των ενεργειών ελέγχου, πράγμα το οποίο σημαίνει πως παρέχει την βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f^* , η οποία υλοποιείται **με οποιονδήποτε αριθμό ενεργειών ελέγχου** απαιτείται, και ο απαιτούμενος αριθμός ενεργειών ελέγχου συμβολίζεται με n .

Στο **2^ο Βήμα** της μεθοδολογίας επιλύεται ένα OPF με βελτιστοποίηση ως προς τον αριθμό ενεργειών ελέγχου, ο οποίος είναι απαραίτητος για την επίλυση του προβλήματος, το οποίο ονομάζεται OPF-MNC (OPF with Minimum Number of Controls). Το OPF-MNC δεν υπόκειται σε περιορισμούς σχετικά με το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και το κόστος απόρριψης φορτίου, συνεπώς παρέχει τον ελάχιστο απαραίτητο αριθμό ενεργειών ελέγχου N_{min} , **με οποιαδήποτε προκύπτουσα τιμή συνολικού κόστους** (αντικειμενικής συνάρτησης f).

Στο **3^ο Βήμα** της Μεθοδολογίας επιλύεται πρόβλημα OPF–EC (OPF with Effective Controls), όπου υπολογίζεται ο ελάχιστος αριθμός ενεργειών ελέγχου N , με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην γίνεται υπέρβαση της βέλτιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του 1^{ου} Βήματος f^* , πέρα από κάποιο καθοριζόμενο ποσοστό. Αυτό το ποσοστό ρυθμίζεται μέσω του καθορισμού του συντελεστή απόκλισης ε από την βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f^* . Το 3^ο βήμα ελαχιστοποιεί τις ενέργειες ελέγχου και δεν επιτρέπει το συνολικό κόστος να υπερβεί την τιμή $(1 + \varepsilon)f^*$. Επιτυγχάνεται με αυτόν τον τρόπο ισορροπία μεταξύ των αποτελεσμάτων των Βημάτων 1 και 2, δηλαδή του αριθμού των ενεργειών ελέγχου και της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης (του συνολικού κόστους), χωρίς να υπολογίζεται ξεχωριστά κάθε διαφορετικό σημείο της καμπύλης.

Με την εκτέλεση του 3^{ου} Βήματος ολοκληρώνεται η καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου, οι οποίες βρίσκονται στο διάστημα $[N + 1 ; n]$ και σημειώνονται με κόκκινο στο Σχήμα 3.1. Χαρακτηρίζονται ως αναποτελεσματικές, καθώς η ενσωμάτωση των ενεργειών αυτών θα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των ενεργειών ελέγχου, χωρίς σημαντική βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης.



Σχήμα 3.1 : Καμπύλη Μεθοδολογίας [38].

Τονίζεται πως σε ένα συμβατικό πρόβλημα OPF αυτές οι αναποτελεσματικές ενέργειες ελέγχου υλοποιούνται παρά ταύτα, καθώς δεν υφίστανται περιορισμοί ως προς τις ενέργειες ελέγχου. Το Σχήμα 3.2 περιλαμβάνει διάγραμμα ροής, το οποίο απεικονίζει την ακολουθία των βημάτων της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι δεν είναι πάντοτε απαραίτητη η εκτέλεση όλων των βημάτων, καθώς η μεθοδολογία μπορεί να περατωθεί ύστερα από κάθε επί μέρους Βήμα.

Έτσι, μετά την επίλυση του προβλήματος C–OPF στο 1^ο Βήμα, μπορεί να περατωθεί η μεθοδολογία, εάν ο αριθμός ενεργειών ελέγχου που προκύπτει είναι ικανοποιητικός. Εάν ο αριθμός ενεργειών ελέγχου είναι μεγαλύτερος από τον επιθυμητό, εκτελείται το 2^ο Βήμα.

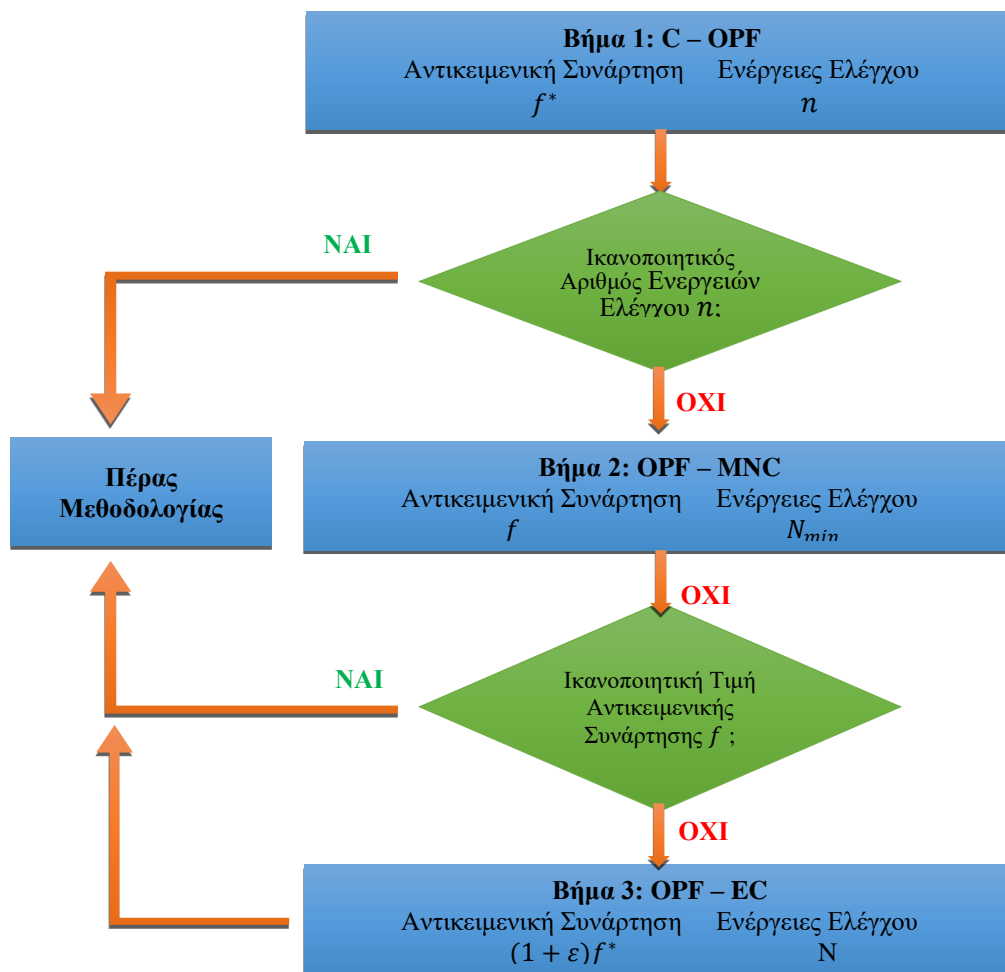
Μετά την επίλυση του προβλήματος OPF–MNC, μπορεί να περατωθεί η μεθοδολογία, εάν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (κόστος) f είναι ικανοποιητική. Εάν η αντικειμενική συνάρτηση προκύψει μη ικανοποιητική εκτελείται το 3^ο Βήμα.

Τέλος, επιλύεται το 3^ο Βήμα όπου η επίλυση του προβλήματος OPF–EC εξασφαλίζει τον ελάχιστο αριθμό ενεργειών ελέγχου N , χωρίς η αντικειμενική συνάρτηση να αποκλίνει

περισσότερο από τον συντελεστή απόκλισης ε από την ιδανική της τιμή f^* . Η μεγαλύτερη δυνατή απόκλιση από την βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f^* , μετά το πέρας του 3^{ου} Βήματος είναι $(1 + \varepsilon)f^*$.

Όσον αφορά τα κριτήρια, σύμφωνα με την ικανοποίηση των οποίων αποφασίζεται η περάτωση της μεθοδολογίας στο 1^ο ή στο 2^ο Βήμα, αυτά μπορούν να καθοριστούν εκ των προτέρων, προγραμματίζοντας αντίστοιχο έλεγχο στο τέλος των Βημάτων. Έτσι, στο τέλος του 1^{ου} και 2^{ου} Βήματος δύναται να πραγματοποιηθεί αυτόματος έλεγχος για τον έλεγχο του ικανοποιητικού αριθμού ενεργειών ελέγχου ή του συνολικού κόστους, αντίστοιχα. Ακόμη, μπορούν να αποφασιστούν και επί τόπου από κάποιον διαχειριστή με βάση την εμπειρία και τις διαθέσιμες πληροφορίες.

Η μεθοδολογία τριών βημάτων υλοποιείται στη συνέχεια για λόγους σύγκρισης με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Αρχικά αναπτύσσεται η συμβατική μέθοδος, η οποία κάνει χρήση δυαδικών μεταβλητών για την επίλυση του 2^{ου} και 3^{ου} Βήματος και αποτελεί το βασικό μέτρο σύγκρισης για τις άλλες δύο μεθόδους. Στη συνέχεια αναλύεται η Μέθοδος Προσέγγισης με Συντελεστή α , η οποία κάνει χρήση συνάρτησης προσέγγισης, με σκοπό την προσέγγιση των δυαδικών μεταβλητών του 2^{ου} και 3^{ου} Βήματος, άρα και την απαλοιφή από αυτές. Τέλος, αναλύεται η Μέθοδος Προσέγγισης $L1$, η οποία χρησιμοποιεί νόρμα l_1 για την αποφυγή των δυαδικών μεταβλητών στα Βήματα 2 και 3. Το μαθηματικό υπόβαθρο και οι ακριβείς σχέσεις που διέπουν κάθε μέθοδο υλοποίησης των 3 βημάτων αναλύονται στη συνέχεια.



Σχήμα 3.2 : Διάγραμμα Ροής Μεθοδολογίας [38].

3.3 ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΥΑΔΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Η συμβατική υλοποίηση της μεθοδολογίας τριών βημάτων κάνει χρήση δυαδικών μεταβλητών στο 2^ο Βήμα καθώς και στο 3^ο Βήμα της μεθοδολογίας. Χρησιμοποιείται στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας ως βασικό μέτρο σύγκρισης (benchmark), με το οποίο θα συγκριθούν οι δύο προσεγγιστικές μέθοδοι. Στη συνέχεια αναλύεται το μαθηματικό υπόβαθρο και οι ακριβείς σχέσεις ανά βήμα.

3.3.1 Βήμα 1: C-OPF

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$OF = f^* = \min \sum_{g=1}^G (P_{gen,g}^2 \cdot a_g + P_{gen,g} \cdot b_g + c_g) + \sum_{i=1}^n VOLL \cdot cur_i \cdot Demand_{P,i} \quad (3.5)$$

Οι περιορισμοί ισότητας είναι:

$$P_{ij} = V_i^2 (g_{sij} + g_{ij}) - V_i V_j [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.6)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (b_{sij} + b_{ij}) - V_i V_j [g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (3.7)$$

$$\sum P_{gen,g} - ([1 - cur_i] \cdot Demand_{P,i}) = \sum P_{ij} \quad (3.8)$$

$$\sum Q_{gen,g} - ([1 - cur_i] \cdot Demand_{Q,i}) + V_i \cdot shunt_i = \sum Q_{ij} \quad (3.9)$$

Οι περιορισμοί ανισότητας είναι:

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq Limit_{ij}^2 \quad (3.10)$$

$$\underline{P_{gen,g}} \leq P_{gen,g} \leq \overline{P_{gen,g}} \quad (3.11)$$

$$\underline{Q_{gen,g}} \leq Q_{gen,g} \leq \overline{Q_{gen,g}} \quad (3.12)$$

$$\underline{V_i} \leq V_i \leq \overline{V_i} \quad (3.13)$$

$$\underline{\delta_i} \leq \delta_i \leq \overline{\delta_i} \quad (3.14)$$

$$\underline{cur} \leq cur_i \leq \overline{cur} \quad (3.15)$$

όπου:

- i ο αριθμός των ζυγών του συστήματος
- G ο αριθμός γεννητριών του συστήματος

- $P_{gen,g}$ η ενεργός παραγωγή κάθε γεννήτριας g
- $Q_{gen,g}$ η άεργος παραγωγή κάθε γεννήτριας g
- a_g, b_g και c_g οι παράγοντες κόστους κάθε γεννήτριας g
- VOLL (Value Of Lost Load) η χρηματική επιβάρυνση για την περικοπή φορτίου
- cur_i η ποσοστιαία περικοπή φορτίου στον ζυγό i
- $Demand_{P,i}$ η ζήτηση ενεργού ισχύος (φορτίο) στον ζυγό i
- $Demand_{Q,i}$ η ζήτηση αέργου ισχύος (φορτίο) στον ζυγό i
- P_{ij} η ενεργός ροή ισχύος μεταξύ των ζυγών i και j
- Q_{ij} η άεργος ροή ισχύος μεταξύ των ζυγών i και j
- V_i το μέτρο της τάσης του ζυγού i
- V_j το μέτρο της τάσης του ζυγού j
- δ_i η γωνία της τάσης του ζυγού i
- δ_j η γωνία της τάσης του ζυγού j
- g_{ij} η ωμική αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών i και j
- g_{sij} η εγκάρσια ωμική αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών i και j
- b_{ij} η χωρητικότητα της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών i και j
- b_{sij} η εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών i και j
- $shunt_i$ τυχόν αντιστάθμιση στον ζυγό i
- $Limit_{ij}$ το ανώτατο επιτρεπτό όριο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των ζυγών i και j
- $\underline{P_{gen,g}}$ το κάτω όριο παραγωγής ενεργούς ισχύος της γεννήτριας g
- $\overline{P_{gen,g}}$ το άνω όριο παραγωγής ενεργούς ισχύος της γεννήτριας g
- $\underline{Q_{gen,g}}$ το κάτω όριο παραγωγής αέργου ισχύος της γεννήτριας g
- $\overline{Q_{gen,g}}$ το άνω όριο παραγωγής αέργου ισχύος της γεννήτριας g
- \underline{cur} το κάτω όριο απόρριψης φορτίου στον ζυγό i
- \overline{cur} το άνω όριο απόρριψης φορτίου στον ζυγό i
- $\underline{V_i}$ το κάτω όριο του μέτρου τάσης του ζυγού i
- $\overline{V_i}$ το άνω όριο του μέτρου τάσης του ζυγού i

Η εξίσωση (3.5) της αντικειμενικής συνάρτησης (objective function – OF) αποτελείται από δύο επί μέρους τμήματα. Το 1^ο τμήμα $\{\sum_{g=1}^G (P_{gen,g}^2 \cdot a_g + P_{gen,g} \cdot b_g + c_g)\}$ αποτελεί το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όλων των γεννητριών. Το 2^ο τμήμα της αντικειμενικής συνάρτησης $\{\sum_{i=1}^n VOLL \cdot cur_i \cdot Demand_{P,i}\}$ αποτελεί το συνολικό κόστος απόρριψης φορτίου για όλους τους ζυγούς. Με την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει το βέλτιστο συνολικό κόστος f^* . Οι εξισώσεις (3.6) και (3.7) αποτελούν τις εξισώσεις ροών ενεργού και αέργου ισχύος, αντίστοιχα. Οι εξισώσεις (3.8) και (3.9) αποτελούν τα ισοζύγια ενεργού και αέργου ισχύος, αντίστοιχα, και ισχύουν προφανώς για τις παραγωγές και καταναλώσεις που πραγματοποιούνται στον εκάστοτε ζυγό. Η εξίσωση (3.10) αφορά τα φυσικά θερμικά όρια των γραμμών μεταφοράς, και δεν επιτρέπει την μεταφερόμενη ηλεκτρική ενέργεια να ξεπεράσει το ανώτατο επιτρεπτό όριο. Οι εξισώσεις (3.11) και (3.12) θέτουν τα κατώτατα και ανώτατα όρια στην ενεργό και άεργο, αντίστοιχα,

παραγωγή κάθε γεννήτριας. Οι εξισώσεις (3.13) και (3.14) θέτουν τα κατώτατα και ανώτατα όρια του μέτρου και της γωνίας της τάσης, αντίστοιχα, για κάθε ζυγό. Τέλος, η εξίσωση (3.15) καθορίζει το κατώτατο και ανώτατο επιτρεπτό όριο απόρριψης φορτίου ανά ζυγό.

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το 1^ο Βήμα της μεθοδολογίας, το οποίο είναι ένα NLP πρόβλημα και επιλύεται με τον solver IPOPT [9].

3.3.2 Βήμα 2: MNC–OPF

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$OF = N_{min} = \min \sum_{i=1}^n s_i \quad (3.16)$$

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (3.6)–(3.9).

Οι περιορισμοί ανισότητας και δυαδικών μεταβλητών είναι οι σχέσεις (3.10)–(3.14), (3.17), και (3.18).

$$s_i \in \{0,1\} \quad (3.17)$$

$$s_i (\underline{cur}_i - cur_i^0) \leq cur_i - cur_i^0 \leq s_i (\overline{cur}_i - cur_i^0) \quad (3.18)$$

Επιπλέον, υπολογίζεται το συνολικό κόστος μέσω της σχέσης:

$$f = \sum_{g=1}^G (P_{gen,g}^2 \cdot a_g + P_{gen,g} \cdot b_g + c_g) + \sum_{i=1}^n VOLL \cdot cur_i \cdot Demand_{p,i} \quad (3.19)$$

Με cur_i^0 συμβολίζεται η αρχική κατάσταση της μεταβλητής cur_i , η οποία είναι $cur_i^0 = 0$ καθώς αρχικά δεν πραγματοποιείται απόρριψη φορτίου.

Στους περιορισμούς προστίθενται πλέον οι εξισώσεις (3.17) και (3.18), οι οποίες αφορούν την χρήση δυαδικών μεταβλητών. Η εξίσωση (3.17) ορίζει την μεταβλητή s_i ως δυαδική. Η μεταβλητή s_i έχει τον ρόλο της μεταβλητής κατάστασης (status variable), επιτρέποντας ή μη την μεταβολή της μεταβλητής απόφασης cur_i στα πλαίσια των καθοριζόμενων ορίων αυτής.

Όταν η μεταβλητή s_i λαμβάνει τιμή 1, η εξίσωση (3.18) γίνεται:

$$(3.18) \stackrel{s_i=1}{\Leftrightarrow} (\underline{cur}_i - cur_i^0) \leq cur_i - cur_i^0 \leq (\overline{cur}_i - cur_i^0) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \underline{cur} \leq cur_i \leq \overline{cur} \quad \text{που είναι η σχέση (3.15)}$$

Όταν η μεταβλητή s_i λαμβάνει τιμή 0, η εξίσωση (3.18) γίνεται:

$$\begin{aligned}
(3.18) \quad & \stackrel{s_i=0}{\iff} 0 \leq cur_i - cur_i^0 \leq 0 \iff \\
& \iff cur_i^0 \leq cur_i \leq cur_i^0 \iff \\
& \iff cur_i = cur_i^0
\end{aligned}$$

Συνεπώς, όταν ισχύει $s_i = 1$ η μεταβλητή cur_i επιτρέπεται να μεταβάλλεται μεταξύ των ορίων cur_i και \overline{cur} , ενώ όταν ισχύει $s_i = 0$ η μεταβλητή cur_i δεν επιτρέπεται να μεταβάλλεται και διατηρεί την αρχική της τιμή cur_i^0 . Τονίζεται ότι ως ενέργειες ελέγχου αρχικά λαμβάνονται οι απορρίψεις φορτίου που πραγματοποιούνται στους ζυγούς του συστήματος. Έτσι, με τον παραπάνω μηχανισμό είναι δυνατή η αναγνώριση των ενεργειών ελέγχου από τις μεταβλητές s_i που έχουν τιμή 1, καθώς οι αντίστοιχες μεταβλητές απόφασης cur_i θα έχουν μεταβληθεί.

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.16) του Βήματος 2 κάνει χρήση του παραπάνω μηχανισμού με σκοπό την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των μεταβλητών s_i , άρα και την ελαχιστοποίηση του αριθμού των συνολικών ενεργειών ελέγχου (απορρίψεις φορτίου). Ο ελάχιστος αριθμός ενεργειών ελέγχου που υπολογίζεται συμβολίζεται με N_{min} .

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το 2^ο Βήμα της μεθοδολογίας, το οποίο είναι ένα MINLP πρόβλημα και επιλύεται με τον solver BONMIN [39].

3.3.3 Βήμα 3: EC–OPF

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η σχέση (3.16).

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (3.6)–(3.9) και (3.19).

Οι περιορισμοί ανισότητας και δυαδικών μεταβλητών είναι οι σχέσεις (3.10)–(3.14), (3.17), (3.18), και (3.20).

$$f \leq (1 + \varepsilon) \cdot f^* \quad (3.20)$$

Παρατηρείται ότι η αντικειμενική συνάρτηση παραμένει η ίδια με αυτή του 2^{ου} Βήματος, συνεπώς πάλι πραγματοποιείται ελαχιστοποίηση ως προς τον αριθμό ενεργειών ελέγχου. Επίσης, παραμένουν ίδιοι οι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας με μόνη διαφορά ότι προστίθεται επιπλέον η εξίσωση (3.20) στους τελευταίους. Η εξίσωση (3.20) αποσκοπεί στο να μην επιτρέψει το συνολικό κόστος f να αποκλίνει περισσότερο από τον καθοριζόμενο συντελεστή απόκλισης ε , από το ιδανικό κόστος f^* , το οποίο υπολογίστηκε στο 1^ο Βήμα της μεθοδολογίας. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μια ισορροπία μεταξύ αριθμού ενεργειών ελέγχου και συνολικού κόστους, καταστέλλονται οι αναποτελεσματικές ενέργειες ελέγχου και περατώνεται το 3^ο Βήμα της μεθοδολογίας.

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το 3^ο Βήμα της μεθοδολογίας, το οποίο είναι ένα MINLP πρόβλημα και επιλύεται με τον solver BONMIN [39].

3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΜΕ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ a_i

Η συμβατική υλοποίηση της μεθοδολογίας τριών βημάτων, η οποία κάνει χρήση δυαδικών μεταβλητών, παρουσιάζει μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα και απαιτεί ισχυρούς υπολογιστικούς πόρους. Καθώς οι δυαδικές μεταβλητές αυξάνουν σε μεγάλο βαθμό την υπολογιστική βαρύτητα ενός προβλήματος, κυρίως όσο αυξάνεται η κλίμακα του υπό εξέταση συστήματος, προτείνεται στη συνέχεια τρόπος προσέγγισης αυτών μέσω συνάρτησης προσέγγισης.

3.4.1 Συνάρτηση Προσέγγισης

Η γενική μορφή της συνάρτησης που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της δυαδικής τιμής της μεταβλητής s_i , η οποία δηλώνει την κατάσταση (status) της αντίστοιχης μεταβλητής απόφασης u_i , είναι:

$$s_i \cong \frac{(u_i - u_i^0)^2}{a_i + (u_i - u_i^0)^2} \quad (3.21)$$

όπου u_i^0 η αρχική τιμή της μεταβλητής απόφασης u_i και a_i μικρός θετικός αριθμός. Όσο μικρότερη η τιμή του συντελεστή a_i , τόσο ακριβέστερη η προσέγγιση της δυαδικής τιμής της μεταβλητής s_i . Στην οριακή περίπτωση όπου $a_i \rightarrow 0$ η συνάρτηση προσέγγισης (3.21) θα τείνει είτε στο 0 (όταν $u_i = u_i^0$), είτε στο 1 (όταν $u_i \neq u_i^0$), δηλώνοντας έτσι μεταβολή ή μη, αντίστοιχα, της μεταβλητής απόφασης u_i . Με τον τρόπο αυτό προσεγγίζεται η δυαδική μεταβλητή s_i , χωρίς να χρησιμοποιούνται πραγματικές δυαδικές μεταβλητές στον προγραμματισμό και στην επίλυση του προβλήματος.

Καθώς λαμβάνονται ως ενέργειες ελέγχου οι απορρίψεις φορτίου cur_i , η εξίσωση (3.21) γίνεται:

$$(3.21) \xrightarrow{u_i=cur_i} s_i \cong \frac{(cur_i - cur_i^0)^2}{a_i + (cur_i - cur_i^0)^2} \quad (3.22)$$

Όταν δεν πραγματοποιείται απόρριψη φορτίου στον ζυγό i θα είναι $cur_i = cur_i^0 = 0 \Leftrightarrow s_i \cong 0$ οπότε δεν υπολογίζεται ως ενέργεια ελέγχου. Αντίθετα, όταν πραγματοποιείται απόρριψη φορτίου στον ζυγό i θα είναι $cur_i \neq cur_i^0 \Leftrightarrow s_i \cong 1$ οπότε υπολογίζεται ως ενέργεια ελέγχου.

Όσον αφορά την ακριβή τιμή, την οποία λαμβάνει ο συντελεστής a_i και το πως αυτή επηρεάζει την προσέγγιση των δυαδικών μεταβλητών καθώς και τα αποτελέσματα του προβλήματος, πραγματοποιείται ανάλυση στην Ενότητα 6.9. Στη συνέχεια αναλύεται το μαθηματικό υπόβαθρο της Μεθόδου Συνάρτησης Προσέγγισης με συντελεστή a , καθώς και οι ακριβείς σχέσεις ανά βήμα.

3.4.2 Βήμα 1: C-OPF

Το 1^ο Βήμα δεν περιλαμβάνει δυαδικές μεταβλητές, συνεπώς δεν απαιτείται η χρήση της συνάρτησης προσέγγισης. Πρακτικά το 1^ο Βήμα της Μεθοδολογίας είναι κοινό με την συμβατική μέθοδο και περιγράφεται από τις σχέσεις (3.5)–(3.15).

3.4.3 Βήμα 2: MNC-OPF

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η σχέση (3.16).

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (3.6)–(3.9), (3.19), και (3.23).

$$s_i = \frac{(cur_i - cur_i^0)^2}{a_i + (cur_i - cur_i^0)^2} \quad (3.23)$$

Οι περιορισμοί ανισότητας και δυαδικών μεταβλητών είναι οι σχέσεις (3.10)–(3.14), (3.17) και (3.18).

Ο επιπλέον περιορισμός ισότητας (3.23) που προστίθεται ορίζει την μεταβλητή s_i μέσω της συνάρτησης προσέγγισης. Έτσι, οπουδήποτε συναντάται η μεταβλητή s_i , λαμβάνει την τιμή της σχέσης (3.23).

Ισοδύναμα, η αντικειμενική συνάρτηση (3.16) μπορεί να γραφεί:

$$(3.16) \stackrel{(3.23)}{\iff} OF = N_{min} = \min \sum_{i=1}^n \frac{(cur_i - cur_i^0)^2}{a_i + (cur_i - cur_i^0)^2} \quad (3.24)$$

Ισοδύναμα, η σχέση (3.18) μπορεί να γραφεί:

$$(3.18) \stackrel{(3.23)}{\iff} \frac{(cur_i - cur_i^0)^2}{a_i + (cur_i - cur_i^0)^2} (cur_i - cur_i^0) \leq cur_i - cur_i^0 \\ \leq \frac{(cur_i - cur_i^0)^2}{a_i + (cur_i - cur_i^0)^2} (\overline{cur_i} - cur_i^0) \quad (3.25)$$

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το 2^ο Βήμα της μεθοδολογίας, το οποίο είναι ένα NLP πρόβλημα και επιλύεται με τον solver IPOPT[9].

3.4.4 Βήμα 3: EC-OPF

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η σχέση (3.16).

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (3.6)–(3.9), (3.19), και (3.23).

Οι περιορισμοί ανισότητας και δυαδικών μεταβλητών είναι οι σχέσεις (3.10)–(3.14), (3.17), (3.18), και (3.20).

Παρατηρείται, όπως και στην συμβατική μέθοδο, ότι το 3^ο Βήμα διαφέρει από το 2^ο Βήμα μόνο ως προς την προσθήκη της σχέσης (3.20), η οποία περιορίζει την απόκλιση του συνολικού κόστους f από το ιδανικό κόστος f^* , το οποίο υπολογίζεται στο 1^ο Βήμα.

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το 3^ο Βήμα της μεθοδολογίας, το οποίο είναι ένα NLP πρόβλημα και επιλύεται με τον solver IPOPT [9].

3.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ L_1

Η Μέθοδος Προσέγγισης L_1 κάνει χρήση l_1 νόρμας προκειμένου να πραγματοποιηθεί η απαλοιφή των δυαδικών μεταβλητών της συμβατικής μεθοδολογίας. Η νόρμα (μέτρο) διανυσμάτων στο \mathbb{C}^V ορίζεται ως εξής [40]:

Μια συνάρτηση $\|\cdot\| : \mathbb{C}^V \rightarrow \mathbb{R}$ ονομάζεται νόρμα διανυσμάτων αν για κάθε $x, y \in \mathbb{C}^V$, ικανοποιεί τα ακόλουθα:

- $\|x\| \geq 0$ (μη αρνητική)
- $\|x\| = 0$ αν και μόνο αν $x = 0$
- $\|ax\| = |a|\|x\|$ για κάθε $a \in \mathbb{C}$
- $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$

Η νόρμα l_1 ονομάζεται και αθροιστική νόρμα ή νόρμα του Μανχάταν και ορίζεται ως [40]:

$$\|x\|_1 = \|[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T\| = |x_1| + |x_2| + \dots + |x_n|$$

Η νόρμα l_1 χρησιμοποιείται για να ελαχιστοποιήσει την απόκλιση των μεταβλητών απόφασης u_i από τις αρχικές τιμές αυτών u_i^0 με στόχο την συνεπακόλουθη ελαχιστοποίηση των ενεργειών ελέγχου [35,36]. Έτσι, η γενική μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης στο 2^ο και 3^ο Βήμα της μεθοδολογίας γίνεται:

$$OF = \min \sum_{i=1}^n |u_i - u_i^0| \quad (3.26)$$

3.5.1 Βήμα 1: C–OPF

Το 1^ο Βήμα δεν περιλαμβάνει δυαδικές μεταβλητές, συνεπώς δεν απαιτείται η χρήση προσέγγισης αυτών. Πρακτικά το 1^ο Βήμα της Μεθοδολογίας είναι κοινό με την συμβατική μέθοδο και περιγράφεται από τις σχέσεις (3.5)–(3.15).

3.5.2 Βήμα 2: MNC–OPF

Καθώς λαμβάνονται ως ενέργειες ελέγχου οι απορρίψεις φορτίου, η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$(3.26) \xleftrightarrow{u_i=cur_i} OF = \min \sum_{i=1}^n |cur_i - cur_i^0| \quad (3.27)$$

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (3.6)–(3.9), και (3.19).

Οι περιορισμοί ανισότητας είναι οι σχέσεις (3.10)–(3.15).

Παρατηρείται ότι με την χρήση της σχέσης (3.27) πλέον δεν υφίστανται στον ορισμό του 2^{ου} Βήματος δυαδικές μεταβλητές. Η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιεί την συνολική απόκλιση των μεταβλητών απόφασης (απορρίψεων φορτίου) από τις αρχικές τους τιμές, συνεπώς δεν υπολογίζει πλέον απευθείας τον αριθμό των ενεργειών ελέγχου. Αυτός καθορίζεται στη συνέχεια από τα αποτελέσματα του 2^{ου} Βήματος, δηλαδή από τις απορρίψεις φορτίου cur_i που πραγματοποιήθηκαν.

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το 2^ο Βήμα της μεθοδολογίας, το οποίο είναι ένα πρόβλημα DNLP (Discontinuous Non-Linear Problem) και επιλύεται με τον solver IPOPT [9].

3.5.3 Βήμα 3: EC–OPF

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η σχέση (3.27).

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (3.6)–(3.9), και (3.19).

Οι περιορισμοί ανισότητας είναι οι σχέσεις (3.10)–(3.15), και (3.20).

Παρατηρείται πάλι ότι το 3^ο Βήμα διαφέρει από το 2^ο Βήμα μόνο ως προς την προσθήκη της σχέσης (3.20), η οποία περιορίζει την απόκλιση του συνολικού κόστους f από το ιδανικό κόστος f^* , το οποίο υπολογίζεται στο 1^ο Βήμα.

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το 3^ο Βήμα της μεθοδολογίας, το οποίο είναι ένα πρόβλημα DNLP (Discontinuous Non-Linear Problem) και επιλύεται με τον solver IPOPT [9].

Τονίζεται, ότι ως ενέργειες ελέγχου λαμβάνονται και στις τρεις μεθόδους αρχικά μόνο οι απορρίψεις φορτίου που πραγματοποιούνται στους ζυγούς του συστήματος. Σε περίπτωση που προσμετρούνται στις ενέργειες ελέγχου και μεταβολές της ενεργού παραγωγής των γεννητριών, πραγματοποιούνται προσθήκες και τροποποιήσεις στις σχέσεις των τριών μεθόδων, όπως αναλύεται στην Ενότητα 6.5.

ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ SCOPF

Στο παρόν Κεφάλαιο αναλύεται η επέκταση της μεθοδολογίας λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς ασφαλείας, με σκοπό την καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου σε προβλήματα SCOPF. Ως περιορισμοί ασφαλείας θεωρούνται πιθανές βλάβες ή/και διαταραχές της βασικής κατάστασης (base case) του συστήματος, τις οποίες ένα SCOPF σκοπεύει να επιλύσει με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο.

Ένα πρόβλημα SCOPF αποτελεί πρακτικά ένα πρόβλημα OPF, στο οποίο προστίθεται ένα πλήθος περιορισμών ασφαλείας, που συνυπολογίζονται κατά την επίλυση αυτού. Τα προβλήματα SCOPF, σύμφωνα με τον τρόπο με τον οποίο χειρίζονται οι ενέργειες ελέγχου για την αντιμετώπιση των πιθανών διαταραχών, λαμβάνουν τις εξής τρεις μορφές:

1. Preventive Security – Constrained Optimal Power Flow (PSCOPF)
2. Corrective Security – Constrained Optimal Power Flow (CSCOPF)
3. Preventive – Corrective Security – Constrained Optimal Power Flow (PCSCOPF)

4.1.1 Preventive Security – Constrained Optimal Power Flow (PSCOPF)

Ένα PSCOPF πρόβλημα βασίζεται σε προληπτικές ενέργειες ελέγχου για την αντιμετώπιση των περιορισμών ασφαλείας. Οι προληπτικές αυτές ενέργειες ελέγχου περιλαμβάνουν μεταβολές στην βασική κατάσταση του συστήματος, όπως είναι η προληπτική ρύθμιση των γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, για την αντιμετώπιση επικείμενων διαταραχών. Σε ένα PSCOPF ρυθμίζεται ουσιαστικά η βασική κατάσταση με τέτοιο τρόπο, ώστε το σύστημα να επιδεικνύει μεγαλύτερη «ετοιμότητα» για την καλύτερη αντιμετώπιση των περιορισμών ασφαλείας που τίθενται. Τονίζεται ότι αφού έχουν πραγματοποιηθεί οι απαραίτητες προληπτικές ενέργειες ελέγχου, δηλαδή έχουν μεταβληθεί οι αντίστοιχες μεταβλητές ελέγχου στη βασική κατάσταση του συστήματος, δεν επιτρέπονται μεταβολές των μεγεθών αυτών για την αντιμετώπιση κάποιας παρουσιαζόμενης διαταραχής. Αυτό σημαίνει πως η αρχική προληπτική ρύθμιση της βασικής κατάστασης οφείλει να πραγματοποιηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε οι περιορισμοί του συστήματος να τηρούνται τόσο στη βασική κατάσταση, όσο και για κάθε διαταραχή που συνυπολογίζεται, χωρίς επιπλέον διορθωτικές κινήσεις. Καθώς οι απαραίτητες ενέργειες ελέγχου πραγματοποιούνται προληπτικά και όχι ως αντίδραση σε κάποια διαταραχή, ο χρόνος υλοποίησης αυτών συνήθως δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα σε ένα πρόβλημα PSCOPF.

Σε αντιστοιχία με το OPF πρόβλημα, το οποίο αναλύθηκε στην Ενότητα 3.1, η γενική μορφή ενός PSCOPF προβλήματος είναι η εξής:

$$\min_{x_0, \dots, x_c, u_0} f(u_0, x_0) \quad (4.1)$$

$$g_k(u_0, x_k) = 0 \quad k = 0, \dots, c \quad (4.2)$$

$$h_k(u_0, x_k) \leq 0 \quad k = 0, \dots, c \quad (4.3)$$

όπου:

- Η σχέση (4.1) είναι η αντικειμενική συνάρτηση.
- \mathbf{u}_0 είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης στην βασική κατάσταση.
- \mathbf{x} είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης.
- \mathbf{g}_k είναι διάνυσμα εξισώσεων το οποίο περιλαμβάνει τους περιορισμούς ισότητας του προβλήματος.
- \mathbf{h}_k είναι διάνυσμα ανισώσεων το οποίο περιλαμβάνει τους περιορισμούς ανισότητας του προβλήματος.
- Με τον δείκτη \mathbf{k} συμβολίζεται ο αριθμός της διαταραχής. Ο δείκτης $\mathbf{0}$ συμβολίζει την βασική κατάσταση, ενώ με τον δείκτη $\mathbf{1}$ έως \mathbf{c} συμβολίζεται η αντίστοιχη διαταραχή.

Καθώς πρόκειται για PSCOPF πρόβλημα, παρατηρείται πως οι μεταβλητές απόφασης \mathbf{u} της αντικειμενικής συνάρτησης (4.1) αφορούν την βασική κατάσταση μόνο. Επίσης, καθώς οι μεταβλητές απόφασης λαμβάνουν τιμές στην βασική κατάσταση και στη συνέχεια δεν μεταβάλλονται, συναντάται το διάνυσμα αυτών μόνο με τον δείκτη 0, δηλαδή \mathbf{u}_0 . Αντίθετα, οι περιορισμοί ισότητας (4.2) και ανισότητας (4.3) πρέπει πλέον να ισχύουν για κάθε διαταραχή k , όπως και στην βασική κατάσταση.

Εάν ληφθεί υπόψη μόνο η βασική κατάσταση και όχι οι πιθανές διαταραχές, δηλαδή αν τεθεί $k = 0$, προκύπτει το συμβατικό OPF πρόβλημα, όπως της Ενότητας 3.1. Με την παρουσία των περιορισμών ελέγχου το μέγεθος ενός PSCOPF προβλήματος είναι $(c + 1)$ φορές μεγαλύτερο του αντίστοιχου OPF προβλήματος.

4.1.2 Corrective Security – Constrained Optimal Power Flow (CSCOPF)

Σε αντίθεση με ένα PSCOPF πρόβλημα, το CSCOPF δεν επιτρέπει προληπτικές ενέργειες ελέγχου, δηλαδή δεν πραγματοποιεί μεταβολές στην βασική κατάσταση του συστήματος. Στηρίζεται στο γεγονός, ότι αφού εμφανιστεί κάποια διαταραχή, το σύστημα είναι σε θέση να αντέξει για σύντομο χρονικό διάστημα κάποια παραβίαση ορίων (π.χ. τάση ζυγών,

θερμική καταπόνηση γραμμών μεταφοράς), μέχρι να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες ελέγχου για την αποκατάσταση της φυσιολογικής λειτουργίας του συστήματος. Σε ένα CSCOPF πρόβλημα συνεπώς δεν μεταβάλλονται οι μεταβλητές απόφασης στην βασική κατάσταση, αλλά ρυθμίζονται για κάθε διαταραχή k που εξετάζεται ξεχωριστά.

Σε αντιστοιχία με το OPF πρόβλημα, το οποίο αναλύθηκε στην Ενότητα 3.1, η γενική μορφή ενός CSCOPF προβλήματος είναι η εξής:

$$\min_{x_0, \dots, x_c, u_0, \dots, u_c} f(u_0, x_0) \quad (4.4)$$

$$g_k(u_k, x_k) = 0 \quad k = 0, \dots, c \quad (4.5)$$

$$h_k(u_k, x_k) \leq 0 \quad k = 0, \dots, c \quad (4.6)$$

$$|u_k - u_0| \leq \Delta u_k^{max} \quad k = 1, \dots, c \quad (4.7)$$

όπου:

- Δu_k^{max} η μέγιστη επιτρεπόμενη μεταβολή των μεταβλητών απόφασης μεταξύ της βασικής κατάστασης και της k -οστής διαταραχής.

Παρατηρείται ότι στη γενική μορφή του προβλήματος, παρόλο που πλέον οι μεταβλητές απόφασης u λαμβάνουν επιπλέον διαστάσεις k , η αντικειμενική συνάρτηση (4.4) δύναται να αφορά πάλι μόνο την βασική κατάσταση. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί όμως επίσης να προσαρμοστεί ανά περίπτωση και π.χ. να περιλαμβάνει και κόστος διορθωτικών (corrective) ενεργειών ελέγχου. Οι μεταβλητές απόφασης u_k υπολογίζονται για κάθε διαταραχή και συμβολίζονται με τον δείκτη k . Η βασική τους τιμή u_0 όμως, καθορίζεται εκ των προτέρων και δεν μεταβάλλεται με προληπτικές ενέργειες ελέγχου. Έτσι, οι περιορισμοί ισότητας (4.5) και ανισότητας (4.6) πρέπει να τηρούνται για κάθε τιμή του k ($0, \dots, c$), επιτρέποντας, σε αντίθεση με το PSCOPF πρόβλημα, τις διορθωτικές μεταβολές των μεταβλητών απόφασης ανά διαταραχή k . Για την αποφυγή μη ρεαλιστικά μεγάλων μεταβολών των μεταβλητών απόφασης από την βασική τους κατάσταση στην κατάσταση k , ορίζεται η σχέση (4.7), η οποία περιορίζει την μεταβολή αυτή στην τιμή Δu_k^{max} . Η τιμή αυτή καθορίζεται από φυσικά όρια, όπως είναι ο δυνατός ρυθμός μεταβολής μιας μεταβλητής ελέγχου (π.χ. η μεταβολή ενεργού παραγωγής γεννήτριας) καθώς και τον διαθέσιμο χρόνο για την αντιμετώπιση της διαταραχής.

4.1.3 Preventive – Corrective Security – Constrained Optimal Power Flow (PCSCOPF)

Το PCSCOPF πρόβλημα αποτελεί συνδυασμό των περιπτώσεων PSCOPF και CSCOPF. Μπορεί να περιγραφεί από τις σχέσεις (4.4)–(4.7) με τη διαφορά ότι οι αρχικές τιμές των μεταβλητών απόφασης u_0 δεν καθορίζονται εκ των προτέρων αλλά υπόκεινται σε προληπτικές μεταβολές. Αυτό σημαίνει πως δεν υπάρχει μια, εκ των προτέρων δεδομένη,

βασική κατάσταση, από την οποία το σύστημα εκκινεί και καλείται να ανταπεξέλθει στους περιορισμούς ασφαλείας. Αντίθετα, και η ίδια βασική κατάσταση αποτελεί αντικείμενο της λύσης του προβλήματος σε συνδυασμό με τις απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες ελέγχου. Έτσι, το PCSCOPF πρόβλημα κάνει χρήση τόσο προληπτικών, όσο και διορθωτικών ενεργειών ελέγχου για κάθε διαταραχή, με στόχο την βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

Συνήθως προτιμάται η αντιμετώπιση των διαταραχών να πραγματοποιείται με διορθωτικές ενέργειες ελέγχου, καθώς η κοστολογική επιβάρυνση είναι μικρότερη συγκριτικά με αυτή των προληπτικών ενεργειών ελέγχου. Επίσης, εισέρχεται και ο παράγοντας της συνήθως άγνωστης πιθανότητας εμφάνισης κάποιας διαταραχής, συνεπώς μια μεγάλη απομάκρυνση της βασικής κατάστασης του συστήματος από την ιδανική, μέσω προληπτικών ενεργειών, είναι μη επιθυμητή. Ανεξάρτητα από την εμφάνιση κάποιας διαταραχής ή όχι, η μεταβολή της βασικής κατάστασης επιφέρει αύξηση του συνολικού κόστους καθώς το σύστημα απομακρύνεται από την οικονομικότερη κατάσταση. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να επηρεαστεί από την διαφορετική σύνταξη της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία δύναται να περιλαμβάνει και μεταβλητές απόφασης όχι μόνο της βασικής κατάστασης αλλά και των k -οστών καταστάσεων του συστήματος, κόστος διορθωτικών ενεργειών ελέγχου, πιθανότητες εμφάνισης διαταραχών, κ.α.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι περιπτώσεις SCOPF που εξετάζονται καθώς και ο τρόπος με τον οποίο ενσωματώνεται η μεθοδολογία τριών βημάτων του Κεφαλαίου 3 στα προβλήματα αυτά.

4.2 PREVENTIVE GENERATION – CORRECTIVE CURTAILMENT SCOPF

Η πρώτη επέκταση της μεθοδολογίας τριών βημάτων για την καταστολή μη αποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου πραγματοποιείται σε παραλλαγή προβλήματος PSCOPF, το οποίο στο εξής αναφέρεται ως Preventive Generation – Corrective Curtailment SCOPF (PG–CC SCOPF) πρόβλημα και αναλύεται στη συνέχεια.

4.2.1 Διαφορές με Συμβατικό Preventive SCOPF

Η βασική κατάσταση ενός SCOPF, στην οποία έχει γίνει αναφορά, προέρχεται ουσιαστικά από την λύση ενός OPF προβλήματος, χωρίς περιορισμούς ελέγχου. Υπολογίζεται η βέλτιστη κατάσταση του συστήματος, η οποία, εάν έχει ως μέτρο οικονομικούς παράγοντες, θα είναι και η οικονομικότερη. Οι προληπτικές ενέργειες ελέγχου σε ένα πρόβλημα SCOPF, είτε αυτό είναι PSCOPF είτε PCSCOPF, απομακρύνουν το σημείο λειτουργίας του συστήματος από την βασική κατάσταση, άρα και από την βέλτιστη κατάσταση. Πρακτικά η προσέγγιση αυτή μπορεί να θεωρηθεί συντηρητική, καθώς δύναται να επιφέρει απόκλιση από τη βέλτιστη κατάσταση (αύξηση του συνολικού κόστους), χωρίς τελικά να παρουσιαστεί κάποια από τις διαταραχές που συμπεριλαμβάνονται στους περιορισμούς ασφαλείας.

Πέραν τούτου, στην περίπτωση ενός PSCOPF προβλήματος, ο υπολογισμός των κατάλληλων προληπτικών ενεργειών, δηλαδή ο κατάλληλος υπολογισμός της νέας βασικής κατάστασης, μπορεί να παρουσιαστεί ιδιαίτερα δύσκολος. Η ανάγκη ικανοποίησης ταυτόχρονα όλων των περιορισμών, τόσο στην βασική κατάσταση, όσο και σε όλες τις διαταραχές k , μόνο

με προληπτικές ενέργειες ελέγχου, δύναται να οδηγήσει σε μη επιλύσιμο πρόβλημα, κυρίως σε δίκτυα τα οποία είναι ιδιαίτερα φορτισμένα. Για την αντιμετώπιση αυτής της δυσχέρειας μπορεί να επιλεγθεί χαλάρωση των περιορισμών (π.χ. στα όρια γραμμών ή/και στο μέτρο τάσης ζυγών) στις καταστάσεις διαταραχών k , έναντι των περιορισμών στη βασική κατάσταση. Με τον τρόπο αυτό, ένα αρχικά μη επιλύσιμο PSCOPF πρόβλημα, δύναται να επιδέχεται πλέον πιθανή λύση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν πραγματοποιείται χαλάρωση των περιορισμών αλλά χρησιμοποιείται διαφορετική προσέγγιση για την αποφυγή της μη επιλυσιμότητας του προβλήματος PSCOPF, η οποία στηρίζεται στη δυνατότητα απόρριψης φορτίου. Έτσι κατά την επίλυση του PSCOPF, όταν συναντάται μη επιλυσιμότητα, επιτρέπεται η απόρριψη φορτίου στους ζυγούς με σκοπό την αποφόρτιση του συστήματος και την επίλυση του προβλήματος. Η απόρριψη φορτίου αυτή αποτελεί ουσιαστικά μια «έξοδο κινδύνου» προκειμένου να εξασφαλιστεί η επίλυση του PSCOPF, αλλά συνοδεύεται από κάποιο κόστος, καθώς γενικά αποτελεί μη επιθυμητή ενέργεια. Επιδιώκεται η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ προληπτικών ενεργειών ελέγχου και (εάν απαιτούνται) απορρίψεων φορτίου για την επίλυση του προβλήματος, το οποίο στην παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται ως ένα πρόβλημα PG–CC SCOPF. Προκειμένου η λύση του προβλήματος να μην στηρίζεται αποκλειστικά σε απορρίψεις φορτίου ή αποκλειστικά σε προληπτικές ενέργειες, συνυπολογίζονται και οι δύο αυτές ενέργειες στις συνολικές ενέργειες ελέγχου του προβλήματος, ώστε στη συνέχεια να περιοριστούν οι αναποτελεσματικές ενέργειες. Είναι δηλαδή:

$$\text{Ενέργειες Ελέγχου} = \text{Προληπτικές Ενέργειες} + \text{Απορρίψεις Φορτίου} \quad (4.8)$$

4.2.2 Προσαρμογή Εξισώσεων

Η επέκταση της μεθοδολογίας τριών βημάτων στο πρόβλημα PG–CC SCOPF απαιτεί την προσαρμογή και επέκταση των εξισώσεων που έχουν αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 3 καθώς και την προσθήκη νέων. Τα βήματα που ακολουθούνται για τον περιορισμό των μη αποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου στο πρόβλημα PG–CC SCOPF, καθώς και οι σχέσεις που δίδουν κάθε ένα από αυτά αναλύονται στη συνέχεια.

- **Προπαρασκευαστικό Βήμα**

Το Προπαρασκευαστικό Βήμα επικεντρώνεται στον υπολογισμό της αρχικής βασικής κατάστασης του συστήματος. Επιλύεται ένα συμβατικό OPF πρόβλημα χωρίς περιορισμούς ασφαλείας και χωρίς απόρριψη φορτίου και σημειώνεται ως βασική κατάσταση τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την ενεργό παραγωγή των γεννητριών του συστήματος. Επιπλέον της βασικής κατάστασης μπορούν να σημειωθούν και τα αποτελέσματα της αέργου παραγωγής των γεννητριών του συστήματος, με σκοπό την παροχή καλύτερου σημείου εκκίνησης (initial point) για τον solver του προγράμματος σε επόμενα βήματα. Οι σχέσεις του Προπαρασκευαστικού Βήματος είναι:

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$\begin{aligned}
OF = \min \sum_{g=1}^g (P_{gen,g0}^2 \cdot a_g + P_{gen,g0} \cdot b_g + c_g) \\
+ \sum_{i=1}^n VOLL \cdot cur_i \cdot Demand_{P,i}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (3.6) – (3.9) και (4.10).

$$cur_i = 0 \tag{4.10}$$

Οι περιορισμοί ανισότητας είναι οι σχέσεις (3.10) – (3.14).

Η βασική κατάσταση περιλαμβάνει την ενεργό παραγωγή των γεννητριών του συστήματος η οποία λαμβάνει τον δείκτη 0 και συμβολίζεται με $P_{gen,g0}$. Η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει την ενεργό παραγωγή γεννητριών στη βασική κατάσταση $P_{gen,g0}$. Το Προπαρασκευαστικό Βήμα αποτελείται από τις σχέσεις του συμβατικού OPF με τη διαφορά ότι μέσω της προσθήκης της σχέσης (4.10) δεν επιτρέπεται η απόρριψη του φορτίου στους ζυγούς, προκειμένου να εξασφαλιστεί μια βέλτιστη οικονομικά βασική κατάσταση, η οποία είναι επιλύσιμη χωρίς την πραγματοποίηση απορρίψεων φορτίου.

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το Προπαρασκευαστικό Βήμα της μεθοδολογίας, το οποίο είναι ένα NLP πρόβλημα και επιλύεται με τον solver IPOPT [9].

- **Βήμα 1: C-OPF**

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$\begin{aligned}
OF = f^* = \min \sum_{g=1}^G (P_{gen,g0,new}^2 \cdot a_g + P_{gen,g0,new} \cdot b_g + c_g) \\
+ \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^n VOLL \cdot cur_{i,k} \cdot Demand_{P,i}
\end{aligned} \tag{4.11}$$

Οι περιορισμοί ισότητας είναι:

$$P_{ij,k} = V_{i,k}^2 (g_{sij} + g_{ij}) - V_{i,k} V_{j,k} [g_{ij} \cos(\delta_{i,k} - \delta_{j,k}) + b_{ij} \sin(\delta_{i,k} - \delta_{j,k})] \tag{4.12}$$

$$\begin{aligned}
Q_{ij,k} = -V_{i,k}^2 (b_{sij} + b_{ij}) \\
- V_{i,k} V_{j,k} [g_{ij} \sin(\delta_{i,k} - \delta_{j,k}) - b_{ij} \cos(\delta_{i,k} - \delta_{j,k})]
\end{aligned} \tag{4.13}$$

$$\sum P_{gen,g,k} - ([1 - cur_{i,k}] \cdot Demand_{P,i}) = \sum P_{ij,k} \quad (4.14)$$

$$\sum Q_{gen,g,k} - ([1 - cur_{i,k}] \cdot Demand_{Q,i}) + V_i \cdot shunt_i = \sum Q_{ij,k} \quad (4.15)$$

Οι περιορισμοί ανισότητας είναι οι σχέσεις (3.11) - (3.12) και (4.16) – (4.19).

$$P_{ij,k}^2 + Q_{ij,k}^2 \leq Limit_{ij}^2 \quad (4.16)$$

$$\underline{V}_i \leq V_{i,k} \leq \overline{V}_i \quad (4.17)$$

$$-\pi \leq \delta_{i,k} \leq +\pi \quad (4.18)$$

$$\underline{cur} \leq cur_{i,k} \leq \overline{cur} \quad (4.19)$$

Οι μεταβλητές που αφορούν την απόρριψη φορτίου, την ενεργό και άεργο ροή ισχύος, το μέτρο και τη γωνία της τάσης αποκτούν μια επιπλέον διάσταση k καθώς έχουν τη δυνατότητα να μεταβληθούν σε κάθε κατάσταση k . Παρατηρείται ότι η αντικειμενική συνάρτηση (4.11) περιλαμβάνει πάλι δύο τμήματα. Το 1^ο τμήμα αφορά το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη βασική κατάσταση, το οποίο προκύπτει από την υπολογιζόμενη ενεργό παραγωγή $P_{gen,g0,new}$. Αυτή αποτελεί την νέα βασική κατάσταση, η οποία προκύπτει από τις προληπτικές ενέργειες ελέγχου, οι οποίες εφαρμόζονται στην αρχική βασική κατάσταση που υπολογίστηκε στο Προπαρασκευαστικό Βήμα. Το 2^ο τμήμα της αντικειμενικής συνάρτησης αφορά το κόστος απόρριψης φορτίου, το οποίο τώρα δύναται να πραγματοποιηθεί σε κάθε ζυγό και σε κάθε κατάσταση k . Οι περιορισμοί ισότητας αποτελούνται από τις ροές και τα ισοζύγια ενεργού και αέργου ισχύος (4.12)–(4.15), και πρέπει να τηρούνται τώρα για όλες τις τιμές του k . Οι περιορισμοί ανισότητας αποτελούνται από τα όρια των γραμμών (4.16), του μέτρου (4.17) και της γωνίας (4.18) της τάσης, καθώς και τα όρια απόρριψης φορτίου (4.19), και πρέπει να τηρούνται για όλες τις τιμές του k . Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι τηρούνται όλοι οι περιορισμοί τόσο στην νέα βασική κατάσταση όσο και για κάθε διαταραχή k που συνυπολογίζεται.

Ως γνωστόν το 1^ο Βήμα πραγματοποιεί ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, χωρίς την ύπαρξη περιορισμών ως προς τον αριθμό των (προληπτικών) ενεργειών ελέγχου. Για την απαρίθμηση των προληπτικών ενεργειών ελέγχου που πραγματοποιήθηκαν αρκεί να εντοπιστούν οι μεταβλητές ενεργού παραγωγής των γεννητριών, οι οποίες μεταβλήθηκαν από την αρχική βασική κατάσταση $P_{gen,g0}$ (Προπαρασκευαστικό Βήμα) στην νέα βασική κατάσταση $P_{gen,g0,new}$ που προκύπτει στο τέλος τους 1^{ου} Βήματος.

Επιπλέον, καταμετρούνται οι απορρίψεις φορτίου που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε ζυγό i και κατάσταση k και μέσω της σχέσης (4.8) προκύπτουν οι συνολικές ενέργειες ελέγχου n του 1^{ου} Βήματος.

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το 1^ο Βήμα της μεθοδολογίας, το οποίο είναι ένα NLP πρόβλημα και επιλύεται με τον solver IPOPT [9].

- **Βήμα 2: MNC–OPF**

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$OF = N_{min} = \min \left\{ \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^n s_{i,k} + \sum_{g=1}^G sP_g \right\} \quad (4.20)$$

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (4.12) – (4.15) και (4.21) – (4.23).

$$s_{i,k} = \frac{(cur_{i,k} - cur_i^0)^2}{a_i + (cur_{i,k} - cur_i^0)^2} \quad (4.21)$$

$$sP_g = \frac{(P_{gen,g0,new} - P_{gen,g0})^2}{a_i + (P_{gen,g0,new} - P_{gen,g0})^2} \quad (4.22)$$

$$cur_i^0 = 0 \quad (4.23)$$

Οι περιορισμοί ανισότητας και δυαδικών μεταβλητών είναι οι σχέσεις (3.12), (4.16) (4.18) και (4.24) – (4.25).

$$s_{i,k} (\underline{cur}_i - cur_i^0) \leq cur_{i,k} - cur_i^0 \leq s_{i,k} (\overline{cur}_i - cur_i^0) \quad (4.24)$$

$$sP_g (\underline{P}_{gen,g} - P_{gen,g0}) \leq P_{gen,g0,new} - P_{gen,g0} \leq sP_g (\overline{P}_{gen,g} - P_{gen,g0}) \quad (4.25)$$

Επιπλέον υπολογίζεται το συνολικό κόστος μέσω της σχέσης:

$$\begin{aligned} & \sum_{g=1}^G (P_{gen,g0,new}^2 \cdot a_g + P_{gen,g0,new} \cdot b_g + c_g) \\ & + \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^n VOLL \cdot cur_{i,k} \cdot Demand_{P,i} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (4.20) αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού ενεργειών ελέγχου N_{min} και συνεπώς αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα αφορά τις ενέργειες ελέγχου, οι οποίες σχετίζονται με τις απορρίψεις φορτίου, που πραγματοποιούνται σε κάθε ζυγό και για κάθε διαταραχή k . Το δεύτερο τμήμα αφορά τις προληπτικές ενέργειες ελέγχου, οι οποίες επιδρούν στην αρχική κατάσταση του συστήματος. Η σχέσεις (4.21) και (4.22) ορίζουν μέσω της συνάρτησης προσέγγισης (3.21) τις μεταβλητές $s_{i,k}$ και sP_g αντίστοιχα, αναιρώντας την ανάγκη για χρήση δυαδικών μεταβλητών στη θέση

τους. Η σχέση (4.23) απαγορεύει την ύπαρξη απόρριψης φορτίου στην υπολογιζόμενη νέα βασική κατάσταση του συστήματος, όπου απαιτείται το σύστημα να λειτουργεί δίχως ανάγκη απόρριψης φορτίου. Η σχέση (4.24) λειτουργεί αντίστοιχα με την σχέση (3.18) και, ανάλογα με την τιμή της μεταβλητής $s_{i,k}$, επιτρέπει ή όχι την μεταβολή της μεταβλητής $cur_{i,k}$ εντός των ορίων που τίθενται. Αντίστοιχα, η σχέση (4.25), ανάλογα με την τιμή της μεταβλητής sP_g , επιτρέπει ή όχι την μεταβολή της μεταβλητής $P_{gen,g0,new}$ εντός των ορίων που τίθενται.

Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι για την υλοποίηση του 2^{ου} και 3^{ου} Βήματος της μεθοδολογίας επιλέχθηκε η προτεινόμενη Μέθοδος με Συνάρτηση Προσέγγισης με συντελεστή a , καθώς η υλοποίηση με χρήση δυαδικών μεταβλητών καθιστά το πρόβλημα σε μεγάλο βαθμό υπολογιστικά περίπλοκο. Ο αριθμός των δυαδικών μεταβλητών που θα απαιτούνταν θα ήταν ιδιαίτερα μεγάλος. Συγκεκριμένα, θα γινόταν χρήση μιας δυαδικής μεταβλητής για κάθε γεννήτρια, καθώς και μιας δυαδικής μεταβλητής για κάθε απόρριψη φορτίου σε κάθε ζυγό i και για κάθε κατάσταση k . Συνεπώς θα απαιτούνταν $(G + i \cdot k)$ δυαδικές μεταβλητές (όπου G ο αριθμός των γεννητριών, i ο αριθμός των ζυγών και k ο αριθμός των διαταραχών που εξετάζονται). Έτσι, η προσπάθεια επίλυσης του 2^{ου} Βήματος του προβλήματος PG-CC SCOPF σε H/Y μέσω χρήσης δυαδικών μεταβλητών δεν κατάφερε να βρει λύση εντός έξι ωρών, οπότε κρίθηκε χρονικά ασύμφορη.

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το 2^ο Βήμα της μεθοδολογίας, το οποίο είναι ένα NLP πρόβλημα και επιλύεται με τον solver IPOPT [9].

- **Βήμα 3: EC-OPF**

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η σχέση (4.20)

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (4.12) – (4.15), (4.21) – (4.23) και (4.26).

Οι περιορισμοί ανισότητας και δυαδικών μεταβλητών είναι οι σχέσεις (3.12), (3.20), (4.16) – (4.18) και (4.24) – (4.25).

Παρατηρείται εκ νέου ότι με την προσθήκη της σχέσης (3.20) στο 2^ο Βήμα της μεθοδολογίας προκύπτει το 3^ο Βήμα αυτής, το οποίο αποσκοπεί στην εύρεση του ελάχιστου δυνατού αριθμού ενεργειών ελέγχου N (προληπτικών ενεργειών ελέγχου + απορρίψεων φορτίου), ώστε το συνολικό κόστος να μην υπερβαίνει το ιδανικό κόστος που υπολογίστηκε στο Βήμα 1, πέραν του καθοριζόμενου συντελεστή απόκλισης ε .

Όπως στο 2^ο Βήμα, έτσι και για την υλοποίηση του 3^{ου} Βήματος της Μεθοδολογίας επιλέχθηκε η προτεινόμενη Μέθοδος με Συνάρτηση Προσέγγισης με συντελεστή a , καθώς η προσπάθεια επίλυσης του 3^{ου} Βήματος του προβλήματος PG-CC SCOPF σε H/Y μέσω χρήσης δυαδικών μεταβλητών δεν κατάφερε να βρει λύση εντός έξι ωρών, οπότε κρίθηκε χρονικά ασύμφορη.

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το 3^ο Βήμα της μεθοδολογίας, το οποίο είναι ένα NLP πρόβλημα και επιλύεται με τον solver IPOPT [9].

4.3 PREVENTIVE – CORRECTIVE SCOPF

Η δεύτερη επέκταση της μεθοδολογίας τριών βημάτων για την καταστολή μη αποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου πραγματοποιείται στο πρόβλημα PCSCOPF. Ο προληπτικός (preventive) χαρακτήρας του προβλήματος αφορά την μεταβολή της ενεργού παραγωγής των γεννητριών στη βασική κατάσταση, όπως και στο πρόβλημα PG–CC SCOPF. Επιπρόσθετα των απορρίψεων φορτίου, οι οποίες πραγματοποιούνται στις διάφορες καταστάσεις k , προστίθεται η δυνατότητα μεταβολής της ενεργού παραγωγής των γεννητριών από την βασική κατάσταση σε κάποια κατάσταση k . Αυτές οι μεταβολές της ενεργού παραγωγής αποτελούν τις διορθωτικές ενέργειες ελέγχου και δίνουν στο πρόβλημα τον διορθωτικό (corrective) του χαρακτήρα.

Παρατηρείται ότι η δυνατότητα μεταβολής της ενεργού παραγωγής των γεννητριών από την βασική κατάσταση σε μια κατάσταση k , προσθέτει k επιπλέον διαστάσεις στις μεταβλητές ενεργού παραγωγής των γεννητριών, αυξάνοντας έτσι σημαντικά την πολυπλοκότητα του προβλήματος έναντι του προηγουμένως εξεταζόμενου προβλήματος PG–CC SCOPF. Έτσι θα απαιτούνταν επιπλέον $(G + i) \cdot k$ δυαδικές μεταβλητές, πράγμα το οποίο θα καθιστούσε απαγορευτικό τον χρόνο επίλυσης του προβλήματος PCSCOPF, κυρίως με την αύξηση της κλίμακας του εξεταζόμενου δικτύου (όπου G ο αριθμός των γεννητριών, i ο αριθμός των ζυγών και k ο αριθμός των διαταραχών που εξετάζονται). Επιπλέον, και η προτεινόμενη Μέθοδος με Συνάρτηση Προσέγγισης με συντελεστή a είναι χρονικά ασύμφορη, λόγω του μεγάλου αριθμού μεταβλητών δυαδικού χαρακτήρα που καλείται να προσεγγίσει. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος αποφασίστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία να πραγματοποιηθεί DC προσέγγιση του προβλήματος, η οποία αναλύεται στη συνέχεια.

4.3.1 DC Προσέγγιση Προβλήματος

Η DC ροή ισχύος αποτελεί μια μέθοδο προσέγγισης της AC ροής ισχύος, η οποία χρησιμοποιείται για την απόκτηση μιας ταχύτερης και προσεγγιστικής λύσης του προβλήματος ροών ισχύος. Οι παραδοχές που γίνονται κατά την DC προσέγγιση ενός συστήματος είναι:

- Τα ωμικά στοιχεία των γραμμών μεταφοράς θεωρούνται αμελητέα.

Θεωρείται $R_{ij} \ll X_{ij}$ άρα:

$$g_{ij} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \rightarrow 0 \quad (4.27)$$

$$b_{ij} = \frac{-X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \rightarrow -\frac{1}{X_{ij}} \quad (4.28)$$

όπου R_{ij} η ωμική αντίσταση και X_{ij} η επαγωγική αντίδραση της γραμμής $i - j$.

- Η συνολική εγκάρσια αγωγιμότητα των γραμμών μεταφοράς είναι μηδέν. Άρα είναι:

$$g_{sij} = 0 \text{ και } b_{sij} = 0 \quad (4.29)$$

- Τα μέτρα των τάσεων όλων των ζυγών είναι ίσα με ένα ανά μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι η τάση όλων των ζυγών θεωρείται ίση με την ονομαστική τάση.

$$V_i = 1 \text{ pu} \quad (4.30)$$

- Η διαφορά μεταξύ των γωνιών των τάσεων $(\delta_i - \delta_j)$ μεταξύ των ζυγών i και j είναι πολύ μικρή, συνεπώς γίνεται η παραδοχή ότι:

$$\sin(\delta_i - \delta_j) = (\delta_i - \delta_j) \quad (4.31)$$

$$\cos(\delta_i - \delta_j) = 1 \quad (4.32)$$

- Οι εξισώσεις ρών φορτίου διαμορφώνονται ως εξής:

$$(3.6) \xleftrightarrow{(4.27)-(4.32)} P_{ij} = \frac{V_i \cdot V_j \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)}{X_{ij}} \Leftrightarrow P_{ij} = \frac{\delta_i - \delta_j}{X_{ij}} \quad (4.33)$$

$$(3.7) \xleftrightarrow{(4.27)-(4.32)} Q_{ij} = \frac{V_i^2}{X_{ij}} - \frac{V_i \cdot V_j \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)}{X_{ij}} \Leftrightarrow Q_{ij} = 0 \quad (4.34)$$

- Η ροή ενεργού ισχύος από τον ζυγό j στον ζυγό i είναι αντίστοιχα:

$$P_{ji} = \frac{V_j \cdot V_i \cdot \sin(\delta_j - \delta_i)}{X_{ji}} \Leftrightarrow P_{ji} = \frac{\delta_j - \delta_i}{X_{ji}} = -P_{ij} \quad (4.35)$$

Συμπεραίνεται από τις σχέσεις (4.33) και (4.35) πως στην DC ροή ισχύος οι ενεργές απώλειες της γραμμής $i - j$ είναι μηδενικές καθώς είναι:

$$P_{loss} = P_{ij} + P_{ji} = 0 \quad (4.36)$$

- Η ροή αέργου ισχύος είναι μηδενική κατά την χρήση DC ροής ισχύος όπως φαίνεται από την σχέση (4.34) και δεν συνυπολογίζεται κατά την επίλυση του προβλήματος.

- Επιπλέον κατά την χρήση DC προσέγγισης σε προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος, μετατρέπεται η συνάρτηση του συνολικού κόστους από μη γραμμική σε γραμμική, όπως στη συνέχεια.

Οι παραπάνω παραδοχές οδηγούν σε ένα απλουστευμένο πρόβλημα, το οποίο έχει τη δυνατότητα να επιλυθεί σαφώς ταχύτερα και να επιφέρει προσεγγιστική λύση ενός αντίστοιχου AC προβλήματος. Η χρήση DC προσέγγισης για την ευκολότερη και ταχύτερη επίλυση ενός

προβλήματος PCSCOPF ενσωματώνεται στην μεθοδολογία τριών βημάτων που έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3 και έχει ως απώτερο σκοπό τον περιορισμό των μη αποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου του PCSCOPF προβλήματος. Στο σημείο αυτό γίνεται διάκριση μεταξύ δύο, στη συνέχεια παρουσιαζόμενων, μεθόδων εφαρμογής A και B. Συγκεκριμένα, η διάκριση πραγματοποιείται με μοναδικό κριτήριο τον τρόπο επιλογής των ενεργειών που θα συμπεριληφθούν στις συνολικές ενέργειες ελέγχου του προβλήματος, όπως αναλύεται στη συνέχεια.

4.3.2 Προτεινόμενη Μέθοδος A

Στην Μέθοδο εφαρμογής A οι συνολικές ενέργειες ελέγχου του προβλήματος απαρτίζονται από τρία τμήματα. Οι προληπτικές ενέργειες επί της ενεργού παραγωγής των γεννητριών στη βασική κατάσταση, οι διορθωτικές μεταβολές της ενεργού παραγωγής των γεννητριών από την βασική κατάσταση σε κάθε διαταραχή k , καθώς και οι απορρίψεις φορτίου στους ζυγούς για κάθε διαταραχή k , συγκροτούν τις συνολικές ενέργειες ελέγχου, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στην επίλυση του προβλήματος. Είναι δηλαδή:

$$\begin{aligned} \text{Ενέργειες Ελέγχου} & \quad (4.37) \\ & = \text{Προληπτικές Ενέργειες} + \text{Απορρίψεις Φορτίου} \\ & + \text{Διορθωτικές Ενέργειες} \end{aligned}$$

Η σχέση (4.37) καθορίζει τις ενέργειες ελέγχου, από τις οποίες καταστέλλονται στη συνέχεια οι αναποτελεσματικές, μέσω εφαρμογής της μεθοδολογίας τριών βημάτων. Τα επί μέρους βήματα καθώς και οι μαθηματικές σχέσεις από τις οποίες αποτελούνται περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

- **Προπαρασκευαστικό Βήμα**

Το Προπαρασκευαστικό Βήμα επικεντρώνεται στον υπολογισμό της αρχικής βασικής κατάστασης του συστήματος. Επιλύεται ένα πρόβλημα DC OPF χωρίς περιορισμούς ασφαλείας και χωρίς απορρίψεις φορτίου και σημειώνεται ως βασική κατάσταση τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την ενεργό παραγωγή των γεννητριών του συστήματος. Οι σχέσεις του Προπαρασκευαστικού Βήματος είναι:

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$OF = \min \sum_{g=1}^g (P_{gen,g0} \cdot b_g) + \sum_{i=1}^n VOLL \cdot cur_i \cdot Demand_{P,i} \quad (4.38)$$

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (3.8), (4.10), (4.30) και (4.33).

Οι περιορισμοί ανισότητας είναι οι σχέσεις (3.11), (3,14) και (4.39).

$$|P_{ij}| \leq Limit \quad (4.39)$$

Παρατηρείται από την αντικειμενική συνάρτηση (4.38) ότι απλοποιείται η συνάρτηση του κόστους, στην οποία λαμβάνεται υπόψη μόνο ο παράγοντας κόστους γεννητριών b_g , καθιστώντας την συνάρτηση κόστους πλέον γραμμική. Η σχέση (4.39) αφορά τα φυσικά θερμικά όρια των γραμμών μεταφοράς, και δεν επιτρέπει την μεταφερόμενη ηλεκτρική ενέργεια να ξεπεράσει το ανώτατο επιτρεπτό όριο. Καθώς στην DC προσέγγιση δεν λαμβάνεται υπόψη η άεργος ισχύς, το όριο αυτό εφαρμόζεται μόνο για την ενεργό ισχύ των γραμμών μεταφοράς.

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το Προπαρασκευαστικό Βήμα, το οποίο είναι ένα NLP πρόβλημα και επιλύεται με τον solver IPOPT [9].

- **Βήμα 1: C-OPF**

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$OF = \min \sum_{g=1}^g (P_{gen,g0,new} \cdot b_g) + \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^n VOLL \cdot cur_{i,k} \cdot Demand_{P,i} \quad (4.40)$$

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (4.23) και (4.41) – (4.43).

$$V_{i,k} = 1 \text{ pu} \quad (4.41)$$

$$P_{ij,k} = \frac{\delta_{i,k} - \delta_{j,k}}{X_{ij}} \quad (4.42)$$

$$\sum P_{gen,g,k} - ([1 - cur_{i,k}] \cdot Demand_{P,i}) = \sum P_{ij,k} \quad (4.43)$$

Οι περιορισμοί ανισότητας είναι οι σχέσεις (3.11), (3.14), (3.15), (4.39) και (4.44).

$$|P_{gen,g,k} - P_{gen,g0}| \leq \Delta P_{gen,max} \cdot \overline{P_{gen,g}} \quad (4.44)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (4.40) απαρτίζεται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα αφορά το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και περιλαμβάνει μόνο τον παράγοντα κόστους γεννητριών b_g . Παρατηρείται ότι στο κόστος παραγωγής λαμβάνεται υπόψη μόνο το κόστος παραγωγής στη νέα βασική κατάσταση (δηλαδή για $k = 0$) και όχι το κόστος παραγωγής κατά την εμφάνιση των διαταραχών k (δηλαδή για $k \neq 0$). Το δεύτερο τμήμα αφορά το κόστος απόρριψης φορτίου για κάθε ζυγό και κάθε διαταραχή k . Η σχέση (4.42) εκφράζει την ενεργό ροή ισχύος και πρέπει να ισχύει για κάθε τιμή του k . Η σχέση (4.43) αφορά το ισοζύγιο ενεργού ισχύος στους ζυγούς του συστήματος και πρέπει να ισχύει για κάθε τιμή του k . Η σχέση (4.44) αφορά τις διορθωτικές ενέργειες ελέγχου και περιορίζει το μέτρο της μεταβολής της ενεργού παραγωγής των γεννητριών από την βασική κατάσταση σε κάποια

κατάσταση k . Ως ανώτατο όριο τίθεται ποσοστό $\Delta P_{gen,max}$ της μέγιστης δυνατότητας παραγωγής $\overline{P_{gen,g}}$ της εκάστοτε γεννήτριας.

Το 1^ο Βήμα πραγματοποιεί ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, χωρίς την ύπαρξη περιορισμών ως προς τον αριθμό των ενεργειών ελέγχου. Για την απαρίθμηση των προληπτικών ενεργειών ελέγχου που πραγματοποιήθηκαν αρκεί να εντοπιστούν οι μεταβλητές ενεργού παραγωγής των γεννητριών, οι οποίες μεταβλήθηκαν από την αρχική βασική κατάσταση $P_{gen,g0}$ (Προπαρασκευαστικό Βήμα) στην νέα βασική κατάσταση $P_{gen,g0,new}$ που προκύπτει στο τέλος τους 1^{ου} Βήματος. Αντίστοιχα, απαρίθμηση των διορθωτικών ενεργειών ελέγχου πραγματοποιείται μέσω του εντοπισμού των μεταβλητών ενεργού παραγωγής των γεννητριών, οι οποίες μεταβλήθηκαν από την νέα βασική κατάσταση $P_{gen,g0,new}$ σε κάποια κατάσταση k . Απαρίθμηση των απορρίψεων φορτίου γίνεται εύκολα μέσω των μεταβλητών $cur_{i,k} \neq 0$.

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το 1^ο Βήμα της μεθοδολογίας, το οποίο είναι ένα NLP πρόβλημα και επιλύεται με τον solver IPOPT [9].

- **Βήμα 2: MNC–OPF**

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$OF = N_{min} = \min \left\{ \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^n s_{i,k} + \sum_{k=0}^c \sum_{g=1}^G sP_{g,k} \right\} \quad (4.45)$$

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (4.23) και (4.41) – (4.43).

Οι περιορισμοί ανισότητας και δυαδικών μεταβλητών είναι οι σχέσεις (3.11), (3.14), (4.24), (4.39) και (4.46) – (4.47).

$$s_{i,k}, sP_{g,k} \in \{0,1\} \quad (4.46)$$

$$\begin{aligned} -sP_{g,k} \cdot (\Delta P_{gen,max} \cdot \overline{P_{gen,g}}) &\leq P_{gen,g,k} - P_{gen,g0} \\ &\leq sP_{g,k} \cdot (\Delta P_{gen,max} \cdot \overline{P_{gen,g}}) \end{aligned} \quad (4.47)$$

Επιπλέον υπολογίζεται το συνολικό κόστος μέσω της σχέσης:

$$f = \sum_{g=1}^G (P_{gen,g0,new} \cdot b_g) + \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^n VOLL \cdot cur_{i,k} \cdot Demand_{P,i} \quad (4.48)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (4.45) αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού ενεργειών ελέγχου N_{min} και συνεπώς αποτελείται από τα τμήματα τα οποία περιγράφονται στη σχέση (4.37). Το πρώτο τμήμα αφορά τις ενέργειες ελέγχου, οι οποίες σχετίζονται με τις απορρίψεις φορτίου και πραγματοποιούνται σε κάθε ζυγό και για κάθε

διαταραχή k . Το δεύτερο τμήμα αφορά τόσο τις προληπτικές ενέργειες ελέγχου, οι οποίες επιδρούν στην αρχική κατάσταση του συστήματος, όσο και τις διορθωτικές ενέργειες ελέγχου επί της ενεργού παραγωγής των γεννητριών για τις διάφορες τιμές του k . Η σχέση (4.46) ορίζει ως δυαδικές τις μεταβλητές $s_{i,k}$ και $sP_{g,k}$. Η μεταβλητή $s_{i,k}$ ορίζεται για κάθε ζυγό i και κάθε διαταραχή k , και έχει μέσω της σχέσης (4.24) τον ρόλο της μεταβλητής κατάστασης (status variable) επιτρέποντας ή μη την μεταβολή της μεταβλητής απόφασης $cur_{i,k}$ στα πλαίσια των καθοριζόμενων ορίων αυτής. Αντίστοιχα, η μεταβλητή $sP_{g,k}$ ορίζεται για κάθε γεννήτρια g και κάθε διαταραχή k , και έχει μέσω της σχέσης (4.47) τον ρόλο της μεταβλητής κατάστασης επιτρέποντας ή μη την μεταβολή της μεταβλητής απόφασης $P_{gen,g,k}$ στα πλαίσια των καθοριζόμενων ορίων αυτής.

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν το 2^ο Βήμα της μεθοδολογίας, το οποίο είναι ένα πρόβλημα, το οποίο περιλαμβάνει δυαδικές μεταβλητές και είναι γραμμικό. Η χρήση DC προσέγγισης του AC PCSCOPF προβλήματος οδήγησε στην μετατροπή του προβλήματος από MINLP σε ένα πρόβλημα τύπου MILP (Mixed Integer Linear Problem), το οποίο λύνεται σαφώς ταχύτερα. Για την επίλυση αυτού χρησιμοποιείται αυτόματα από το πρόγραμμα GAMS ο solver CPLEX [41].

- **Βήμα 3: EC-OPF**

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η σχέση (4.45)

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (4.23), (4.41) – (4.43) και (4.48)

Οι περιορισμοί ανισότητας και δυαδικών μεταβλητών είναι οι σχέσεις (3.11), (3.14), (3.20), (4.24), (4.39), (4.46) και (4.47).

Παρατηρείται ότι με την προσθήκη της σχέσης (3.20) στο 2^ο Βήμα της μεθοδολογίας προκύπτει το 3^ο Βήμα αυτής, το οποίο αποσκοπεί στην εύρεση του ελάχιστου δυνατού αριθμού ενεργειών ελέγχου N ώστε το συνολικό κόστος να μην υπερβαίνει το ιδανικό κόστος f^* που υπολογίστηκε στο Βήμα 1, πέραν του καθοριζόμενου συντελεστή απόκλισης ϵ .

4.3.3 Προτεινόμενη Μέθοδος B

Στην Μέθοδο εφαρμογής B οι συνολικές ενέργειες ελέγχου του προβλήματος απαρτίζονται από δύο τμήματα: τις προληπτικές ενέργειες επί της ενεργού παραγωγής των γεννητριών στη βασική κατάσταση, καθώς και τις απορρίψεις φορτίου στους ζυγούς για κάθε διαταραχή k . Είναι δηλαδή:

$$\text{Ενέργειες Ελέγχου} = \text{Προληπτικές Ενέργειες} + \text{Απορρίψεις Φορτίου} \quad (4.49)$$

Παρατηρείται πως δεν συνυπολογίζονται στις ενέργειες ελέγχου του προβλήματος πλέον οι διορθωτικές ενέργειες επί της ενεργού παραγωγής των γεννητριών. Αυτές συνήθως

παρουσιάζονται με μικρότερη οικονομική επιβάρυνση έναντι των προληπτικών ενεργειών ελέγχου επί της βασικής κατάστασης του συστήματος. Συνεπώς, μη προσμετρώντας αυτές στις συνολικές ενέργειες ελέγχου, δίνεται η δυνατότητα η παρεχόμενη λύση του προβλήματος να στηρίζεται περισσότερο σε διορθωτικές ενέργειες επί της ενεργού παραγωγής των γεννητριών για την αντιμετώπιση των διαταραχών k . Η σχέση (4.49) καθορίζει τις ενέργειες ελέγχου, από τις οποίες καταστέλλονται στη συνέχεια οι αναποτελεσματικές, μέσω εφαρμογής της μεθοδολογίας τριών βημάτων. Τα επί μέρους βήματα καθώς και οι μαθηματικές σχέσεις από τις οποίες αποτελούνται περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω και διαφέρουν από τη Μέθοδο Α μόνο ως προς τον τρόπο υπολογισμού των ενεργειών ελέγχου.

- **Προπαρασκευαστικό Βήμα:**

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η σχέση (4.38).

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (3.8), (4.10), (4.30) και (4.33).

Οι περιορισμοί ανισότητας είναι οι σχέσεις (3.11), (3.14) και (4.39).

- **Βήμα 1: C-OPF**

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η σχέση (4.40).

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (4.23) και (4.41) – (4.43).

Οι περιορισμοί ανισότητας είναι οι σχέσεις (3.11), (3.14), (3.15), (4.39) και (4.44).

Για την απαρίθμηση των προληπτικών ενεργειών ελέγχου που πραγματοποιήθηκαν αρκεί να εντοπιστούν οι μεταβλητές ενεργού παραγωγής των γεννητριών, οι οποίες μεταβλήθηκαν από την αρχική βασική κατάσταση $P_{gen,g0}$ (Προπαρασκευαστικό Βήμα) στην νέα βασική κατάσταση $P_{gen,g0,new}$ που προκύπτει στο τέλος τους 1^{ου} Βήματος. Απαρίθμηση των απορρίψεων φορτίου γίνεται εύκολα μέσω των μεταβλητών $cur_{i,k} \neq 0$.

- **Βήμα 2: MNC-OPF**

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$OF = N_{min} = \min \left\{ \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^n s_{i,k} + \sum_{g=1}^G sP_{g,0} \right\} \quad (4.50)$$

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (4.23) και (4.41) – (4.43).

Οι περιορισμοί ανισότητας και δυαδικών μεταβλητών είναι οι σχέσεις (3.11), (3.14), (4.24), (4.39), (4.46) και (4.47).

Επιπλέον υπολογίζεται το συνολικό κόστος από την σχέση (4.48).

Παρατηρείται ότι στη Μέθοδο Εφαρμογής Β το 2^ο Βήμα διαφέρει ως προς το δεύτερο τμήμα της αντικειμενικής συνάρτησης (4.50). Το άθροισμα των δυαδικών μεταβλητών $SP_{g,k}$ δεν αφορά πλέον κάθε γεννήτρια g και κάθε διαταραχή k , αλλά αφορά μόνο κάθε γεννήτρια g στη βασική κατάσταση, δηλαδή για $k = 0$. Τονίζεται ότι, καθώς συνυπολογίζονται στις ενέργειες ελέγχου μόνο οι μεταβολές ενεργού παραγωγής στη βασική κατάσταση, θα μπορούσε να οριστεί η δυαδική μεταβλητή $SP_{g,k}$ χωρίς διάσταση k (δηλαδή ως SP_g , μόνο για κάθε γεννήτρια g στη βασική κατάσταση). Επιλέγεται όμως να ορίζεται τόσο για κάθε γεννήτρια g όσο για κάθε διαταραχή k , καθώς παρέχεται μεγαλύτερη ευκολία στην αναγνώριση των διορθωτικών ενεργειών που πραγματοποιούνται στη συνέχεια για κάθε διαταραχή k . Παρόλο που αυτές δεν συμπεριλαμβάνονται στην αντικειμενική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση, η ύπαρξη των επιπλέον αυτών δυαδικών μεταβλητών επιβαρύνει ασήμαντα την πολυπλοκότητα του MILP προβλήματος και ταυτόχρονα παρέχει μια καλύτερη εικόνα για τις ενέργειες που πραγματοποιούνται κατά την επίλυση του προβλήματος.

- **Βήμα 3: EC–OPF**

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η σχέση (4.50).

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (4.23), (4.41) – (4.43) και (4.48).

Οι περιορισμοί ισότητας και δυαδικών μεταβλητών είναι οι σχέσεις (3.11), (3.14), (3.20), (4.24), (4.39), (4.46) και (4.47).

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν Κεφάλαιο πραγματοποιείται μια συνοπτική περιγραφή του λογισμικού GAMS, το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας για την επίλυση των προβλημάτων OPF και SCOPF και την εφαρμογή της μεθοδολογίας τριών βημάτων για τον περιορισμό των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου. Αναφέρονται τα βασικά στοιχεία και εντολές του λογισμικού GAMS καθώς και οι διάφοροι τρόποι εξαγωγής αποτελεσμάτων από την επίλυση ενός προβλήματος.

5.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GAMS

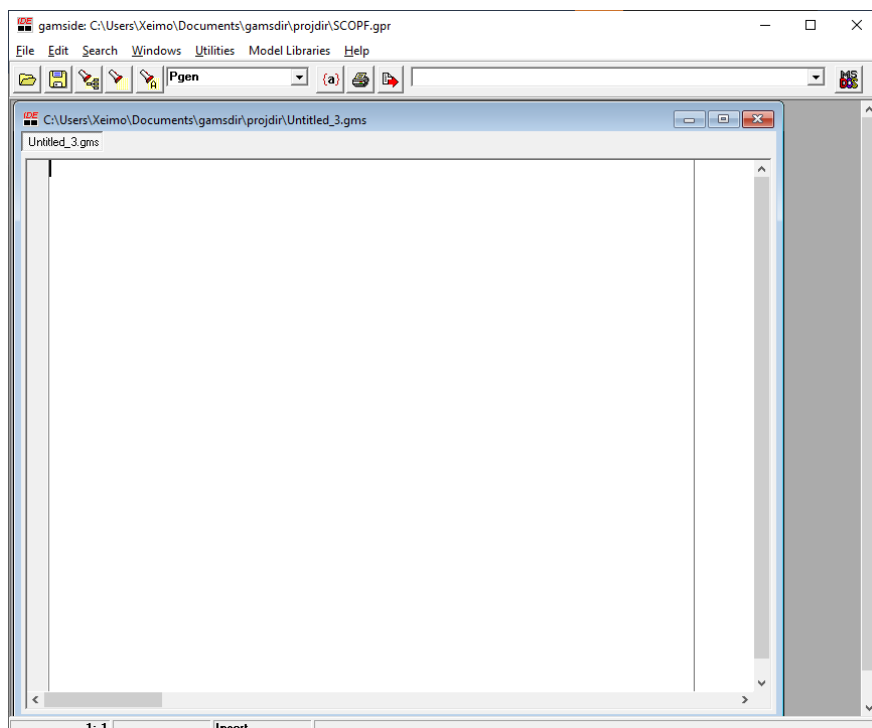
Το πρόγραμμα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική εργασία για την προσομοίωση των διαφόρων προβλημάτων είναι το λογισμικό GAMS (General Algebraic Modeling System) έκδοσης 28.2 [42]. Η ανάπτυξη του ξεκίνησε την δεκαετία του 1970 ως έργο οικονομικής μοντελοποίησης της Παγκόσμιας Τράπεζας (World Bank) και το 1987, με την ίδρυση της Εταιρίας Ανάπτυξης GAMS (GAMS Development Corporation), έγινε εμπορικό προϊόν. Αποτελέσε το πρώτο λογισμικό, το οποίο συνδύασε την γλώσσα της μαθηματικής άλγεβρας με τον προγραμματισμό H/Y, δίνοντάς του την δυνατότητα να περιγράφει και να επιλύει αποτελεσματικά διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης. Σήμερα η αλγεβρική μοντελοποίηση μέσω του GAMS θεωρείται η πλέον αποδοτική μέθοδος αντιμετώπισης προβλημάτων βελτιστοποίησης καθώς και υλοποίησης μεθόδων αποσύνθεσης αυτών. Η γλώσσα μοντελοποίησης του GAMS επιτρέπει στον χρήστη, μέσω της διεπαφής χρήστη του λογισμικού, να μοντελοποιήσει προβλήματα βελτιστοποίησης σε μορφή κώδικα. Ο μεταγλωττιστής του GAMS (Gams Language Compiler) στη συνέχεια μεταφράζει τον κώδικα αυτό στην επιθυμητή μορφή κάθε solver. Αυτό σημαίνει πως ο χρήστης δεν απασχολείται με την διατύπωση του προβλήματος σε μορφή συγκεκριμένη για κάποιον solver αλλά ορίζει το πρόβλημα γενικά και στη συνέχεια απλώς επιλέγει τον κατάλληλο solver. Η δυνατότητα αλλαγής του solver που χρησιμοποιείται, χωρίς την διαφορετική διατύπωση του προβλήματος, επιτρέπει την εύκολη επίλυση και σύγκριση του ίδιου προβλήματος με διαφορετικούς solvers, το οποίο αποτελεί ουσιώδες πλεονέκτημα του GAMS, καθώς η αποδοτικότητα μεταξύ των solvers ποικίλει ανάλογα με την διατύπωση του προβλήματος.

Τα κυριότερα στοιχεία μοντελοποίησης των προβλημάτων στο λογισμικό GAMS, στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι τα παρακάτω:

- **Sets:** Χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των δεικτών κατά την αλγεβρική αναπαράσταση των μοντέλων (π.χ. set γεννητριών με δείκτες $g1$ έως $g10$, δείκτες ζυγών i από 1 έως 50 κ.α.)

- **Data:** Τα δεδομένα του προβλήματος αποτελούνται από:
 - **Parameters:** Παράμετροι που ορίζονται επί των καθοριζόμενων δεικτών (π.χ. απόρριψη φορτίου ανά ζυγό $cur(i)$ ή ανά ζυγό και κατάσταση απόρριψης φορτίου $cur(i, k)$ κ.α.).
 - **Tables:** Πίνακες τουλάχιστον δύο διαστάσεων.
 - **Scalars:** Σταθερές.
- **Variables:** Οι μεταβλητές απόφασης, οι τιμές των οποίων προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος. Δύναται να καθοριστούν διάφορα χαρακτηριστικά αυτών όπως είναι:
 - Άνω και κάτω όριο αυτών.
 - Σταθερή τιμή συγκεκριμένων μεταβλητών απόφασης.
 - Τιμή εκκίνησης (initial value) υπολογισμών.
 - Το είδος της μεταβλητής π.χ. δυαδική (binary), θετική (positive) κ.α.
- **Equations:** Εξισώσεις και περιορισμοί, που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των δεδομένων και των μεταβλητών απόφασης, συμπεριλαμβανομένης της αντικειμενικής συνάρτησης.
- **Model:** Επιλέγεται όνομα για το μοντέλο που αναπτύσσεται και καθορίζεται από ποιες εξισώσεις αποτελείται, συμπεριλαμβανομένης της αντικειμενικής συνάρτησης.
- **Solve:** Επιλέγεται το είδος του προβλήματος (NLP, MIP, MINLP κ.α.) και το είδος της βελτιστοποίησης που πραγματοποιείται επί της αντικειμενικής συνάρτησης (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση).
- **Option:** Δίνεται η δυνατότητα καθορισμού μεγάλου αριθμού ρυθμίσεων όπως είναι:
 - Το χρονικό όριο εκτέλεσης του προγράμματος.
 - Ο αριθμός των δεκαδικών ψηφίων των αποτελεσμάτων.
 - Η επιλογή συγκεκριμένου solver κ.α.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η διεπαφή χρήστη (User Interface) του λογισμικού GAMS.



Σχήμα 5.1 : Διεπαφή χρήστη λογισμικού GAMS.

5.3 ΕΞΑΓΩΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Διάφοροι τρόποι προσφέρονται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, που προκύπτουν από την επίλυση των μοντέλων. Οι κυριότεροι είναι:

- Αυτόματη Έξοδος του GAMS (**Gams Output**). Αποτελείται από τα εξής τμήματα:
 - *Compilation*: Περιλαμβάνει τον κώδικα του προβλήματος με αριθμημένες γραμμές, πιθανά μηνύματα σφαλμάτων (π.χ. σφάλματα σύνταξης).
 - *Execution*: Περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της εντολής Display και πιθανά σφάλματα εκτέλεσης του προγράμματος.
 - *Model Generation*: Περιλαμβάνει λίστα των εξισώσεων και περιορισμών του προβλήματος, καθώς και των μεταβλητών απόφασης. Επιπλέον εμφανίζονται στατιστικά του προβλήματος όπως είναι ο αριθμός των εξισώσεων/περιορισμών, των δυαδικών μεταβλητών, των μηδενικών στοιχείων κ.α. Αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2.
 - *Solution*: Τα αποτελέσματα της επίλυσης του προβλήματος από τον επιλεγμένο solver. Περιλαμβάνει την περίληψη επίλυσης (Solve Summary, Σχήμα 5.3), όπου αναφέρονται στοιχεία όπως ο επιλεγμένος solver, το είδος του προβλήματος, το όνομα της αντικειμενικής συνάρτησης και το είδος βελτιστοποίησης αυτής, η κατάσταση της λύσης του μοντέλου (π.χ. μη επιλύσιμο, τοπικά βέλτιστη λύση κ.α.). Στη συνέχεια εμφανίζεται λίστα με την επίλυση κάθε εξίσωσης/περιορισμού και μεταβλητής απόφασης (Solution Listing).
 - *Post – Solution*: Περιλαμβάνει τον χρόνο εκτέλεσης και την χρησιμοποιημένη μνήμη του H/Y για την επίλυση του προβλήματος.

```

General Algebraic Modeling System
Model Statistics   SOLVE EC_OPF Using MINLP From line 429

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS      13      SINGLE EQUATIONS      923
BLOCKS OF VARIABLES      11      SINGLE VARIABLES      698   73 projected
NON ZERO ELEMENTS       2,982   NON LINEAR N-Z       1,720
DERIVATIVE POOL         20      CONSTANT POOL        153
CODE LENGTH             6,765   DISCRETE VARIABLES    94
  
```

Σχήμα 5.2 : Στατιστικά μοντέλου GAMS.

```

Solution Report      SOLVE EC_OPF Using MINLP From line 429

          S O L V E      S U M M A R Y

MODEL   EC_OPF           OBJECTIVE   OF
TYPE    MINLP            DIRECTION  MINIMIZE
SOLVER  BONMIN           FROM LINE  429

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS       8 Integer Solution
**** OBJECTIVE VALUE    -1.2385117293E-0036

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.407      1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT     0      20000000000
EVALUATION ERRORS          0          0

```

Σχήμα 5.3 : Η περίληψη της λύσης του μοντέλου GAMS (Solve Summary)

• Η χρήση της εντολής **Display** (σε συνεργασία με την εντολή **Option**). Παράδειγμα εμφάνισης αποτελεσμάτων μέσω της εντολής Display παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4. Αυτή καθορίζει ποια στοιχεία, με τι σειρά και σε τι μορφή θα εμφανιστούν στο τέλος της εκτέλεσης του προγράμματος. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα, μεταξύ άλλων, της επιλογής:

- Της σειράς εμφάνισης των δεδομένων.
- Της σειράς των δεικτών με την οποία παρουσιάζονται δεδομένα με περισσότερες από μία διάσταση.
- Του αριθμού των δεκαδικών ψηφίων των αποτελεσμάτων.
- Του αριθμού των στηλών ενός πίνακα που εμφανίζονται.
- Της εμφάνισης των αποτελεσμάτων σε μορφή πίνακα ή σε μορφή λίστας.

```

----- 476 VARIABLE cur.L

4  0.279,    43 0.275,    51 0.276

----- 476 PARAMETER curtailment_MW      =      702.249
      PARAMETER curtailmentCost        =      70.225
      VARIABLE cost.L                  =      0.328
      PARAMETER Total_Cost              =     328.446
      PARAMETER D                       =      4.693
      PARAMETER N_Pgen                   =      1.000
      PARAMETER N_cur                    =      3.000
      PARAMETER N                        =      4.000

EXECUTION TIME      =      0.016 SECONDS

```

Σχήμα 5.4 : Εμφάνιση αποτελεσμάτων μέσω εντολής Display

- Η δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε μορφή συμβατή με άλλα λογισμικά Η/Υ. Η εντολή **Execute_Unload** επιτρέπει την αποθήκευση των αποτελεσμάτων σε μορφή (.gdx) (Gams Data Exchange). Αυτός ο τύπος αρχείου δίνει στο GAMS τη δυνατότητα να μοιράζεται αποτελέσματα με άλλα λογισμικά όπως είναι το Microsoft Excel, το MATLAB κ.α. Επιπλέον, το GAMS έχει τη δυνατότητα να διαβάζει απευθείας δεδομένα από το Microsoft Excel σε μορφή xls ήxlsx μετατρέποντάς τα αρχικά σε (.gdx) μορφή.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε τα δεδομένα εισόδου να εισάγονται απευθείας στον κώδικα του προγράμματος. Επίσης, για την καταγραφή των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε η ανάγνωση αυτών μέσω της εντολής Display καθώς και του GAMS Output.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

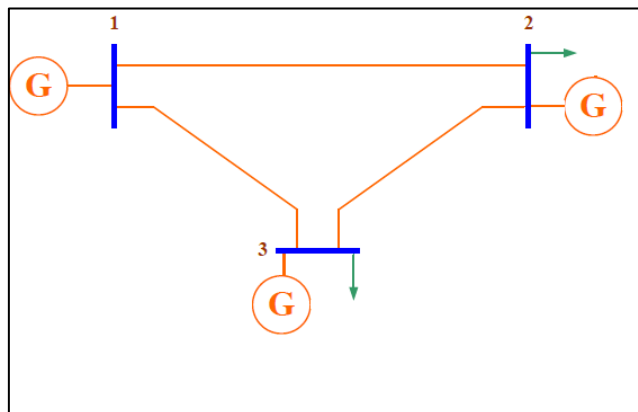
Στο παρόν Κεφάλαιο αναλύονται αρχικά τα στοιχεία των δικτύων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση των προβλημάτων OPF και SCOPF. Στη συνέχεια αναγράφονται, σχολιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα αυτών, τα οποία προκύπτουν από την εφαρμογή των μεθόδων που αναλύθηκαν στα Κεφάλαια 3 και 4. Τέλος, σημειώνονται οι τιμές που τίθενται στους διάφορους συντελεστές για κάθε πρόβλημα και εξετάζεται η επιρροή της τιμής των συντελεστών αυτών στην επίλυση των προβλημάτων.

6.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΩΝ

Στη συνέχεια αναλύονται τα χαρακτηριστικά των τριών δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία για την επίλυση των προβλημάτων OPF και SCOPF μέσω των μεθοδολογιών των Κεφαλαίων 3 και 4.

6.2.1 Δεδομένα Δικτύου 3 Ζυγών

Για την βασική ανάπτυξη της μεθοδολογίας και την αντίστοιχη συγγραφή του κώδικα GAMS κάθε προβλήματος χρησιμοποιήθηκε απλό δίκτυο τριών ζυγών και τριών γεννητριών. Τα χαρακτηριστικά του δικτύου αναγράφονται στον Πίνακα 6.1. Οι παράγοντες κόστους των γεννητριών αναγράφονται στον Πίνακα 6.2, όπου ο παράγοντας a εκφράζεται σε χρηματικές μονάδες ανά μονάδα στο τετράγωνο [$\text{m.u.}/\text{pu}^2$], ο παράγοντας b εκφράζεται σε χρηματικές μονάδες ανά μονάδα (και οι δύο παράγοντες αναφέρονται στο ανά μονάδα σύστημα) και τέλος ο παράγοντας c εκφράζεται σε χρηματικές μονάδες [$\text{m.u.} - \text{monetary units}$]. Η διάταξη του δικτύου τριών ζυγών παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1 : Διάταξη Δικτύου 3 Ζυγών

Στους Πίνακες 6.3 και 6.4 αναγράφονται τα όρια ενεργού/αέργου παραγωγής των γεννητριών καθώς και τα όρια του μέτρου και της γωνίας της τάσης των ζυγών, αντίστοιχα. Σε παρένθεση δίπλα στο όνομα κάθε γεννήτριας αναγράφεται ο ζυγός στον οποίο αυτή συνδέεται. Ο Πίνακας 6.5 περιλαμβάνει τα στοιχεία των γραμμών μεταφοράς $i - j$, όπου r_{ij} η ωμική αντίσταση σε αμ τιμές, x_{ij} η επαγωγική αντίδραση σε αμ τιμές και $Limit_{ij}$ το όριο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της γραμμής σε αμ τιμές. Στον Πίνακα 6.6 αναγράφονται τα φορτία του δικτύου σε αμ τιμές (ενεργός και άεργος ζήτηση) καθώς και ο Συντελεστής Ισχύος (Power Factor – PF) κάθε φορτίου.

Πίνακας 6.1 : Γενικά Χαρακτηριστικά Δικτύου 3 Ζυγών.

| | |
|------------------------------|---|
| Ζυγοί | 3 |
| Γεννήτριες | 3 |
| Φορτία | 2 |
| Γραμμές | 3 |
| Μ/Σ | 0 |
| Αντισταθμιστές Αέργου Ισχύος | 0 |
| Ζυγός Ταλάντωσης | 1 |

Πίνακας 6.2 : Παράγοντες Κόστους Γεννητριών Δικτύου 3 Ζυγών.

| Γεννήτρια (Ζυγός) | $a [m. u./pu^2]$ | $b [m. u./pu]$ | $c [m. u.]$ |
|-------------------|------------------|----------------|-------------|
| g1 (1) | 0.2 | 1 | 5 |
| g2 (2) | 0.1 | 0.7 | 10 |
| g3 (3) | 0.05 | 0.5 | 20 |

Πίνακας 6.3 : Όρια Λειτουργίας Γεννητριών Δικτύου 3 Ζυγών.

| Γεννήτρια (Ζυγός) | $\underline{P}_{gen,g} [pu]$ | $\overline{P}_{gen,g} [pu]$ | $\underline{Q}_{gen,g} [pu]$ | $\overline{Q}_{gen,g} [pu]$ |
|-------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| g1 (1) | 0 | 1 | -2 | 2 |
| g2 (2) | 0 | 1 | -2 | 2 |
| g3 (3) | 0 | 1 | -2 | 2 |

Πίνακας 6.4 : Όρια Μέτρου και Γωνίας Τάσης των Ζυγών Δικτύου 3 Ζυγών.

| Ζυγός | $\underline{V}_i [pu]$ | $\overline{V}_i [pu]$ | $\underline{\delta}_i [pu]$ | $\overline{\delta}_i [pu]$ |
|--------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| \forall ζυγό i | 0.9 | 1.1 | $-\pi$ | $+\pi$ |

Πίνακας 6.5 : Χαρακτηριστικά Γραμμών Μεταφοράς Δικτύου 3 Ζυγών.

| Ζυγός i | Ζυγός j | $r_{ij} [pu]$ | $x_{ij} [pu]$ | $Limit_{ij} [pu]$ |
|-----------|-----------|---------------|---------------|-------------------|
| 1 | 2 | 0.001 | 0.01 | 0.7 |
| 2 | 3 | 0.001 | 0.01 | 0.7 |
| 2 | 3 | 0.001 | 0.01 | 0.7 |

Πίνακας 6.6 : Χαρακτηριστικά Φορτίων Δικτύου 3 Ζυγών.

| Ζυγός i | $Demand_{P,i}$ [pu] | PF | $Demand_{Q,i}$ [pu] |
|-----------|---------------------|------|---------------------|
| 1 | - | - | - |
| 2 | 2 | 0.95 | 0.657 |
| 3 | 1 | 0.95 | 0.329 |

Τα όρια απόρριψης φορτίου ανά ζυγό τίθενται:

$$0 \leq cur_i \leq 100\% \cdot Demand_{P,i}$$

Η χρηματική επιβάρυνση για την απόρριψη φορτίου τίθεται:

$$VOLL = 1000 [m. u.]$$

Τονίζεται ότι η επιβάρυνση απόρριψης φορτίου τίθεται, συγκριτικά με τα υπόλοιπα χρηματικά μεγέθη (παράγοντες κόστους γεννητριών), σε ιδιαίτερα υψηλή τιμή, προκειμένου κατά την επίλυση του προβλήματος να αποφεύγεται, καθώς θα αυξάνει κατά πολύ το συνολικό κόστος. Έτσι, θα πραγματοποιείται μόνο σε περιπτώσεις όπου το πρόβλημα δεν επιλύεται δίχως απόρριψη φορτίου. Με την ίδια λογική προσαρμόζεται η τιμή του VOLL και για τα υπόλοιπα δίκτυα, ανάλογα με τα υπόλοιπα χρηματικά μεγέθη και τη βάση ισχύος που επιλέγεται.

6.2.2 Δεδομένα Δικτύου 74 Ζυγών

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε, με κάποιες τροποποιήσεις, το δίκτυο Nordic32 [43], το οποίο αποτελείται από 74 ζυγούς και 20 γεννήτριες. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η διάταξη του δικτύου. Σε αντιστοιχία με το Δίκτυο 3 Ζυγών, αναγράφονται στους Πίνακες 6.7 έως 6.14 τα χαρακτηριστικά του Δικτύου Nordic32. Οι ζυγοί του δικτύου συμβολίζονται ως εξής:

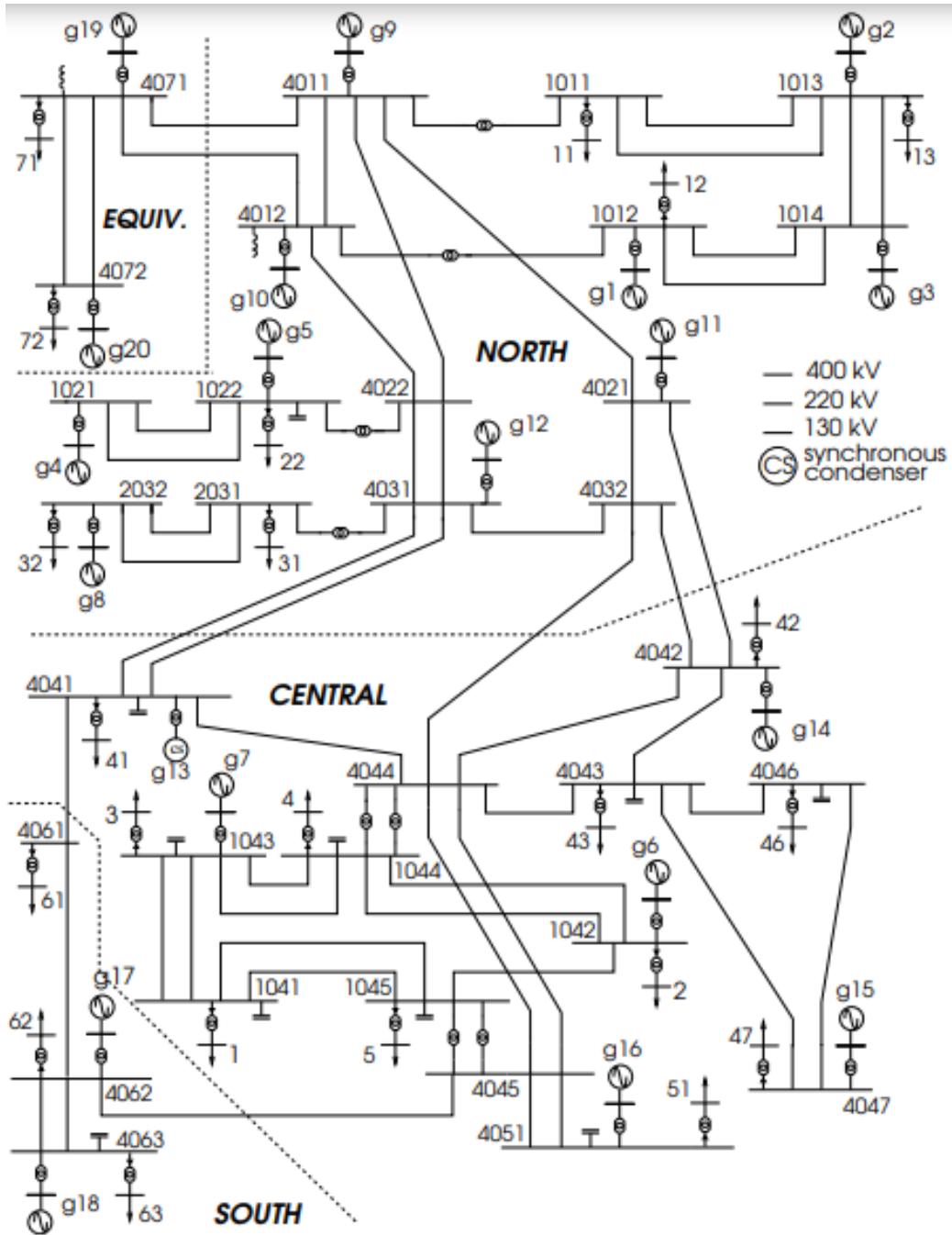
- Ζυγοί Γεννήτριας 15 kV $\rightarrow g1$ έως $g20$
- Ζυγοί 400 kV \rightarrow Ξεκινούν με "40"
- Ζυγοί 220 kV \rightarrow Ξεκινούν με "20"
- Ζυγοί 130 kV \rightarrow Ξεκινούν με "10"
- Ζυγοί 20 kV (Ζυγοί Φορτίου) \rightarrow Μονοψήφιοι Αριθμοί

Πίνακας 6.7 : Γενικά Χαρακτηριστικά Δικτύου 74 Ζυγών.

| | |
|------------------------------|-------|
| Ζυγοί | 74 |
| Γεννήτριες | 20 |
| Φορτία | 22 |
| Γραμμές | 37 |
| Μ/Σ | 48 |
| Αντισταθμιστές Αέργου Ισχύος | 11 |
| Ζυγός Ταλάντωσης | $g20$ |
| Βάση Ισχύος [MVA] | 1000 |

Πίνακας 6.8 : Παράγοντες Κόστους Γεννητριών Δικτύου 74 Ζυγών.

| Γεννήτρια (Ζυγός) | $a [m.u./pu^2]$ | $b [m.u./pu]$ | $c [m.u.]$ |
|-------------------|-----------------|---------------|------------|
| g1 (g1) | 0.2 | 1.0 | 5 |
| g2 (g2) | 0.1 | 0.7 | 10 |
| g3 (g3) | 0.05 | 0.5 | 20 |
| g4 (g4) | 0.15 | 0.6 | 15 |
| g5 (g5) | 0.1 | 0.7 | 10 |
| g6 (g6) | 0.15 | 0.6 | 15 |
| g7 (g7) | 0.1 | 0.7 | 10 |
| g8 (g8) | 0.15 | 0.6 | 15 |
| g9 (g9) | 0.05 | 0.5 | 20 |
| g10 (g10) | 0.2 | 1.0 | 5 |
| g11 (g11) | 0.15 | 0.6 | 15 |
| g12 (g12) | 0.05 | 0.5 | 20 |
| g13 (g13) | 0.1 | 0.7 | 10 |
| g14 (g14) | 0.2 | 0.4 | 5 |
| g15 (g15) | 0.1 | 0.5 | 20 |
| g16 (g16) | 0.2 | 1.0 | 5 |
| g17 (g17) | 0.15 | 0.6 | 15 |
| g18 (g18) | 0.1 | 0.7 | 10 |
| g19 (g19) | 0.05 | 0.5 | 20 |
| g20 (g20) | 0.2 | 1.0 | 5 |



Σχήμα 6.2 : Διάταξη Δικτύου 74 Ζυγών [43].

Πίνακας 6.9 : Ορια Λειτουργίας Γεννητριών Δικτύου 74 Ζυγών.

| Γεννήτρια (Ζυγός) | $P_{gen,g}$ [MW] | $\overline{P_{gen,g}}$ [MW] | $Q_{gen,g}$ [MW] | $\overline{Q_{gen,g}}$ [MW] |
|----------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| g1 (g1) | 0 | 760 | -250 | 250 |
| g2 (g2) | 0 | 570 | -187 | 187 |
| g3 (g3) | 0 | 665 | -219 | 219 |
| g4 (g4) | 0 | 570 | -187 | 187 |
| g5 (g5) | 0 | 237.5 | -78 | 78 |
| g6 (g6) | 0 | 360 | -174 | 174 |
| g7 (g7) | 0 | 180 | -87 | 87 |

Πίνακας 6.9 : Όρια Λειτουργίας Γεννητριών Δικτύου 74 Ζυγών (συνέχεια).

| Γεννήτρια (Ζυγός) | $P_{gen,g}$ [MW] | $\overline{P_{gen,g}}$ [MW] | $Q_{gen,g}$ [MW] | $\overline{Q_{gen,g}}$ [MW] |
|----------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| g8 (g8) | 0 | 807.5 | -265 | 265 |
| g9 (g9) | 0 | 950 | -312 | 312 |
| g10 (g10) | 0 | 760 | -250 | 250 |
| g11 (g11) | 0 | 285 | -94 | 94 |
| g12 (g12) | 0 | 332.5 | -109 | 109 |
| g13 (g13) | 0 | 0 | -300 | 300 |
| g14 (g14) | 0 | 630 | -305 | 305 |
| g15 (g15) | 0 | 1080 | -523 | 523 |
| g16 (g16) | 0 | 630 | -305 | 305 |
| g17 (g17) | 0 | 1080 | -523 | 523 |
| g18 (g18) | 0 | 1080 | -523 | 523 |
| g19 (g19) | 0 | 475 | -156 | 156 |
| g20 (g20) | 0 | 4275 | -1405 | 1405 |

Πίνακας 6.10 : Όρια Μέτρου και Γωνίας Τάσης των Ζυγών Δικτύου 74 Ζυγών.

| Ζυγός | \underline{V}_i [pu] | \overline{V}_i [pu] | $\underline{\delta}_i$ [pu] | $\overline{\delta}_i$ [pu] |
|--------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| \forall ζυγό i | 0.9 | 1.1 | $-\pi$ | $+\pi$ |

Ο Πίνακας 6.11 περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς, όπου $\frac{\omega C}{2}$ η εγκάρσια χωρητικότητα σε μS .

Πίνακας 6.11 : Χαρακτηριστικά Γραμμών Μεταφοράς Δικτύου 74 Ζυγών.

| Ζυγός i | Ζυγός j | r_{ij} [Ω] | x_{ij} [Ω] | $\frac{\omega C}{2}$ [μS] | $Limit_{ij}$ [MVA] |
|-----------|-----------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------|
| 1011 | 1013 | 0.845 | 5.915 | 20.4205 | 700 |
| 1012 | 1014 | 1.185 | 7.605 | 26.7035 | 700 |
| 1013 | 1014 | 0.59 | 4.225 | 14.9225 | 700 |
| 1021 | 1022 | 2.535 | 16.9 | 44.7675 | 700 |
| 1041 | 1043 | 0.845 | 5.07 | 18.064 | 700 |
| 1041 | 1045 | 1.265 | 10.14 | 36.9135 | 700 |
| 1042 | 1044 | 3.21 | 23.66 | 88.75 | 700 |
| 1042 | 1045 | 8.45 | 50.70 | 177.5 | 350 |
| 1043 | 1044 | 0.845 | 6.76 | 23.562 | 700 |
| 2031 | 2032 | 2.905 | 21.78 | 7.854 | 1000 |
| 4011 | 4012 | 1.6 | 12.8 | 62.832 | 1400 |
| 4011 | 4021 | 9.6 | 96 | 562.34 | 1400 |
| 4011 | 4022 | 6.4 | 64 | 375.42 | 1400 |
| 4011 | 4071 | 8 | 72 | 438.25 | 1400 |
| 4012 | 4022 | 6.4 | 56 | 328.30 | 1400 |
| 4012 | 4071 | 8 | 80 | 468.10 | 1400 |

Πίνακας 6.11 : Χαρακτηριστικά Γραμμών Μεταφοράς Δικτύου 74 Ζυγών (συνέχεια).

| Ζυγός i | Ζυγός j | r_{ij} [Ω] | x_{ij} [Ω] | $\frac{\omega C}{2}$ [μS] | $Limit_{ij}$ [MVA] |
|-----------|-----------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------|
| 4021 | 4032 | 6.4 | 64 | 375.42 | 1400 |
| 4021 | 4042 | 16 | 96 | 937.77 | 1400 |
| 4022 | 4031 | 3.2 | 32 | 187.71 | 2800 |
| 4031 | 4032 | 1.6 | 16 | 94.248 | 1400 |
| 4031 | 4041 | 4.8 | 32 | 374.635 | 2800 |
| 4032 | 4042 | 16 | 64 | 625.18 | 1400 |
| 4032 | 4044 | 9.6 | 80 | 749.27 | 1400 |
| 4041 | 4044 | 4.8 | 48 | 281.17 | 1400 |
| 4041 | 4061 | 9.6 | 72 | 406.84 | 1400 |
| 4042 | 4043 | 3.2 | 24 | 155.51 | 1400 |
| 4042 | 4044 | 3.2 | 32 | 186.93 | 1400 |
| 4043 | 4044 | 1.6 | 16 | 94.248 | 1400 |
| 4043 | 4046 | 1.6 | 16 | 94.248 | 1400 |
| 4043 | 4047 | 3.2 | 32 | 186.93 | 1400 |
| 4044 | 4045 | 1.6 | 16 | 93.465 | 2800 |
| 4045 | 4051 | 3.2 | 32 | 187.71 | 2800 |
| 4045 | 4062 | 17.6 | 128 | 749.27 | 1400 |
| 4046 | 4047 | 1.6 | 24 | 155.51 | 1400 |
| 4061 | 4062 | 3.2 | 32 | 186.93 | 1400 |
| 4062 | 4063 | 2.4 | 24 | 140.585 | 2800 |
| 4071 | 4072 | 2.4 | 24 | 468.885 | 2800 |

Ο Πίνακας 6.12 περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά των Μ/Σ του δικτύου, όπου n ο λόγος μετασχηματισμού του Μ/Σ σε αμ προς αμ [pu/pu].

Πίνακας 6.12 : Χαρακτηριστικά Μ/Σ Δικτύου 74 Ζυγών.

| Ζυγός i | Ζυγός j | x_{ij} [pu] | n [pu/pu] | $Limit_{ij}$ [MVA] |
|-----------|-----------|-------------------|-----------------|--------------------|
| g1 | 1012 | 0.15 | 1 | 800 |
| g2 | 1013 | 0.15 | 1 | 600 |
| g3 | 1014 | 0.15 | 1 | 700 |
| g4 | 1021 | 0.15 | 1 | 600 |
| g5 | 1022 | 0.15 | 1.05 | 250 |
| g6 | 1042 | 0.15 | 1.05 | 400 |
| g7 | 1043 | 0.15 | 1.05 | 200 |
| g8 | 2032 | 0.15 | 1.05 | 850 |
| g9 | 4011 | 0.15 | 1.05 | 1000 |
| g10 | 4012 | 0.15 | 1.05 | 800 |
| g11 | 4021 | 0.15 | 1.05 | 300 |
| g12 | 4031 | 0.15 | 1.05 | 350 |
| g13 | 4041 | 0.10 | 1.05 | 300 |

Πίνακας 6.12 : Χαρακτηριστικά Μ/Σ Δικτύου 74 Ζυγών (συνέχεια).

| Ζυγός i | Ζυγός j | x_{ij} [pu] | n [pu/pu] | $Limit_{ij}$ [MVA] |
|-----------|-----------|---------------|-------------|--------------------|
| g14 | 4042 | 0.15 | 1.05 | 700 |
| g15 | 4047 | 0.15 | 1.05 | 1200 |
| g16 | 4051 | 0.15 | 1.05 | 700 |
| g17 | 4062 | 0.15 | 1.05 | 600 |
| g18 | 4063 | 0.15 | 1.05 | 1200 |
| g19 | 4071 | 0.15 | 1.05 | 500 |
| g20 | 4072 | 0.15 | 1.05 | 4500 |
| 1011 | 4011 | 0.1 | 0.95 | 1250 |
| 1012 | 4012 | 0.1 | 0.95 | 1250 |
| 1022 | 4022 | 0.1 | 0.93 | 833.3 |
| 2031 | 4031 | 0.1 | 1 | 833.3 |
| 1044 | 4044 | 0.05 | 1.03 | 2000 |
| 1045 | 4045 | 0.05 | 1.04 | 2000 |
| 11 | 1011 | 0.1 | 1.04 | 400 |
| 12 | 1012 | 0.1 | 1.05 | 600 |
| 13 | 1013 | 0.1 | 1.04 | 200 |
| 22 | 1022 | 0.1 | 1.04 | 560 |
| 1 | 1041 | 0.1 | 1 | 1200 |
| 2 | 1042 | 0.1 | 1 | 600 |
| 3 | 1043 | 0.1 | 1.01 | 460 |
| 4 | 1044 | 0.1 | 0.99 | 1600 |
| 5 | 1045 | 0.1 | 1 | 1400 |
| 31 | 2031 | 0.1 | 1.01 | 200 |
| 32 | 2032 | 0.1 | 1.06 | 400 |
| 41 | 4041 | 0.1 | 1.04 | 1080 |
| 42 | 4042 | 0.1 | 1.03 | 800 |
| 43 | 4043 | 0.1 | 1.02 | 1800 |
| 46 | 4046 | 0.1 | 1.02 | 1400 |
| 47 | 4047 | 0.1 | 1.04 | 200 |
| 51 | 4051 | 0.1 | 1.05 | 1600 |
| 61 | 4061 | 0.1 | 1.03 | 1000 |
| 62 | 4062 | 0.1 | 1.04 | 600 |
| 63 | 4063 | 0.1 | 1.03 | 1180 |
| 71 | 4071 | 0.1 | 1.03 | 600 |
| 72 | 4072 | 0.1 | 1.05 | 4000 |

Πίνακας 6.13 : Χαρακτηριστικά Φορτίων Δικτύου 74 Ζυγών.

| Ζυγός i | $Demand_{P,i}$ [MW] | $Demand_{Q,i}$ [MW] |
|-----------|---------------------|---------------------|
| 1 | 600 | 148.2 |
| 2 | 330 | 71 |
| 3 | 260 | 83.8 |
| 4 | 840 | 252 |
| 5 | 720 | 190.4 |
| 11 | 200 | 68.8 |
| 12 | 300 | 83.8 |
| 13 | 100 | 34.4 |
| 22 | 280 | 79.9 |
| 31 | 100 | 24.7 |
| 32 | 200 | 39.6 |
| 41 | 540 | 131.4 |
| 42 | 400 | 127.4 |
| 43 | 900 | 254.6 |
| 46 | 700 | 211.8 |
| 47 | 100 | 44 |
| 51 | 800 | 258.2 |
| 61 | 500 | 122.5 |
| 62 | 300 | 83.8 |
| 63 | 590 | 264.6 |
| 71 | 300 | 83.8 |
| 72 | 2000 | 396.1 |

Στον Πίνακα 6.14 παρουσιάζεται η άεργος ισχύς των αντισταθμιστών αέργου ισχύος που απορροφάται / εγχέεται στους ζυγούς.

Πίνακας 6.14 : Χαρακτηριστικά Αντισταθμιστών Ισχύος Δικτύου 74 Ζυγών.

| Ζυγός i | $shunt_i$ [MVar] |
|-----------|------------------|
| 1022 | 500 |
| 1041 | 250 |
| 1043 | 200 |
| 1044 | 200 |
| 1045 | 200 |
| 4012 | -100 |
| 4041 | 200 |
| 4043 | 200 |
| 4046 | 100 |
| 4051 | 100 |
| 4071 | -400 |

Τα όρια απόρριψης φορτίου ανά ζυγό τίθενται:

$$0 \leq cur_i \leq 30\% \cdot Demand_{P,i}$$

Η χρηματική επιβάρυνση για την απόρριψη φορτίου τίθεται:

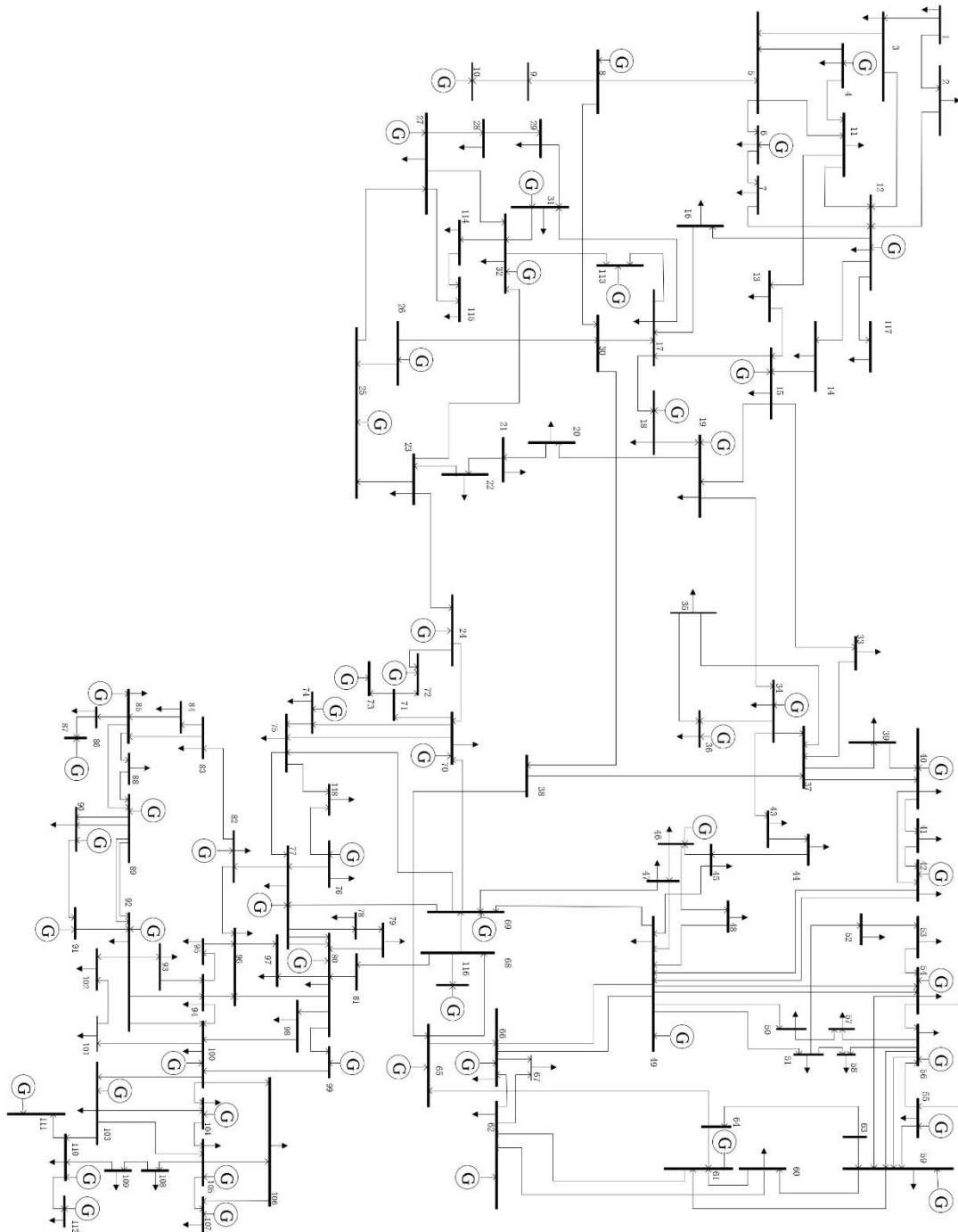
$$VOLL = 100 [m. u.]$$

6.2.3 Δεδομένα Δικτύου 118 Ζυγών

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε, με κάποιες τροποποιήσεις, το δίκτυο IEEE118 [44], το οποίο αποτελείται από 118 ζυγούς και 54 γεννήτριες. Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η διάταξη του δικτύου. Σε αντιστοιχία με τα Δίκτυα 3 και 74 Ζυγών, αναγράφονται στους Πίνακες 6.15 έως 6.21 τα χαρακτηριστικά του Δικτύου IEEE118.

Πίνακας 6.15 : Γενικά Χαρακτηριστικά Δικτύου 118 Ζυγών.

| | |
|------------------------------|-----|
| Ζυγοί | 118 |
| Γεννήτριες | 54 |
| Φορτία | 91 |
| Γραμμές | 179 |
| Μ/Σ | 9 |
| Αντισταθμιστές Αέργου Ισχύος | 14 |
| Ζυγός Ταλάντωσης | 69 |
| Βάση Ισχύος [MVA] | 100 |



Σχήμα 6.3 : Διάταξη Δικτύου 118 Ζυγών [44]

Πίνακας 6.16 : Παράγοντες Κόστους Γεννητριών Δικτύου 118 Ζυγών.

| Γεννήτρια (Ζυγός) | a [$m. u./MW^2$] | b [$m. u./MW$] | c [$m. u.$] |
|-------------------|----------------------|--------------------|-----------------|
| g1 (4) | 0.069663 | 26.2438 | 31.67 |
| g2 (6) | 0.069663 | 26.2438 | 37.67 |
| g3 (8) | 0.069663 | 26.2438 | 31.67 |
| g4 (10) | 0.010875 | 12.8875 | 6.78 |
| g5 (12) | 0.010875 | 12.8875 | 6.78 |
| g6 (15) | 0.069663 | 26.2438 | 31.67 |
| g7 (18) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |

Πίνακας 6.16 : Παράγοντες Κόστους Γεννητριών Δικτύου 118 Ζυγών (συνέχεια).

| Γεννήτρια (Ζυγός) | a [m. u./MW ²] | b [m. u./MW] | c [m. u.] |
|-------------------|------------------------------|----------------|-------------|
| g8 (19) | 0.069663 | 26.2438 | 31.67 |
| g9 (24) | 0.069663 | 26.2438 | 31.67 |
| g10 (25) | 0.010875 | 12.8875 | 6.78 |
| g11 (26) | 0.003 | 10.76 | 32.96 |
| g12 (27) | 0.069663 | 26.2438 | 31.67 |
| g13 (31) | 0.069663 | 26.2438 | 31.67 |
| g14 (32) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |
| g15 (34) | 0.069663 | 26.2438 | 31.67 |
| g16 (36) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |
| g17 (40) | 0.069663 | 26.2438 | 31.67 |
| g18 (42) | 0.069663 | 26.2438 | 31.67 |
| g19 (46) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |
| g20 (49) | 0.002401 | 12.3299 | 28 |
| g21 (54) | 0.002401 | 12.3299 | 28 |
| g22 (55) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |
| g23 (56) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |
| g24 (59) | 0.0044 | 13.29 | 39 |
| g25 (61) | 0.0044 | 13.29 | 39 |
| g26 (62) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |
| g27 (65) | 0.01059 | 8.3391 | 64.16 |
| g28 (66) | 0.01059 | 8.3391 | 64.16 |
| g29 (69) | 0.010875 | 12.8875 | 6.78 |
| g30 (70) | 0.045923 | 15.4708 | 74.33 |
| g31 (72) | 0.069663 | 26.2438 | 31.67 |
| g32 (73) | 0.069663 | 26.2438 | 31.67 |
| g33 (74) | 0.028302 | 37.6968 | 17.95 |
| g34 (76) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |
| g35 (77) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |
| g36 (80) | 0.010875 | 12.8875 | 6.78 |
| g37 (82) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |
| g38 (85) | 0.069663 | 26.2438 | 31.67 |
| g39 (87) | 0.003 | 10.76 | 32.96 |
| g40 (89) | 0.010875 | 12.8875 | 6.78 |
| g41 (90) | 0.028302 | 37.6968 | 17.95 |
| g42 (91) | 0.009774 | 22.9424 | 58.81 |
| g43 (92) | 0.010875 | 12.8875 | 6.78 |
| g44 (99) | 0.010875 | 12.8875 | 6.78 |
| g45 (100) | 0.010875 | 12.8875 | 6.78 |
| g46 (103) | 0.028302 | 37.6968 | 17.95 |
| g47 (104) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |

Πίνακας 6.16 : Παράγοντες Κόστους Γεννητριών Δικτύου 118 Ζυγών (συνέχεια).

| Γεννήτρια (Ζυγός) | a [m. u./MW ²] | b [m. u./MW] | c [m. u.] |
|-------------------|------------------------------|----------------|-------------|
| g48 (105) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |
| g49 (107) | 0.028302 | 37.6968 | 17.95 |
| g50 (110) | 0.009774 | 22.9423 | 58.81 |
| g51 (111) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |
| g52 (112) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |
| g53 (113) | 0.0128 | 17.82 | 10.15 |
| g54 (116) | 0.009774 | 22.9423 | 58.81 |

Πίνακας 6.17 : Όρια Λειτουργίας Γεννητριών Δικτύου 118 Ζυγών.

| Γεννήτρια (Ζυγός) | $P_{gen,g}$ [MW] | $\overline{P_{gen,g}}$ [MW] | $Q_{gen,g}$ [MW] | $\overline{Q_{gen,g}}$ [MW] |
|-------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| g1 (4) | 0 | 30 | -300 | 300 |
| g2 (6) | 0 | 30 | -13 | 50 |
| g3 (8) | 0 | 30 | -300 | 300 |
| g4 (10) | 0 | 500 | -147 | 200 |
| g5 (12) | 0 | 300 | -35 | 120 |
| g6 (15) | 0 | 30 | -10 | 30 |
| g7 (18) | 0 | 100 | -16 | 50 |
| g8 (19) | 0 | 30 | -8 | 24 |
| g9 (24) | 0 | 30 | -300 | 300 |
| g10 (25) | 0 | 300 | -47 | 140 |
| g11 (26) | 0 | 350 | -1000 | 1000 |
| g12 (27) | 0 | 30 | -300 | 300 |
| g13 (31) | 0 | 30 | -300 | 300 |
| g14 (32) | 0 | 100 | -14 | 42 |
| g15 (34) | 0 | 30 | -8 | 24 |
| g16 (36) | 0 | 100 | -8 | 24 |
| g17 (40) | 0 | 30 | -300 | 300 |
| g18 (42) | 0 | 30 | -300 | 300 |
| g19 (46) | 0 | 100 | -100 | 100 |
| g20 (49) | 0 | 250 | -85 | 210 |
| g21(54) | 0 | 250 | -300 | 300 |
| g22 (55) | 0 | 100 | -8 | 23 |
| g23 (56) | 0 | 100 | -8 | 15 |
| g24 (59) | 0 | 200 | -60 | 180 |
| g25 (61) | 0 | 200 | -100 | 300 |
| g26 (62) | 0 | 100 | -20 | 20 |
| g27 (65) | 0 | 420 | -67 | 200 |
| g28 (66) | 0 | 420 | -67 | 200 |
| g29 (69) | 0 | 300 | -300 | 300 |

Πίνακας 6.17 : Όρια Λειτουργίας Γεννητριών Δικτύου 118 Ζυγών (συνέχεια).

| Γεννήτρια (Ζυγός) | $P_{gen,g}$ [MW] | $\overline{P}_{gen,g}$ [MW] | $Q_{gen,g}$ [MW] | $\overline{Q}_{gen,g}$ [MW] |
|----------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| g30 (70) | 0 | 80 | -10 | 32 |
| g31 (72) | 0 | 30 | -100 | 100 |
| g32 (73) | 0 | 30 | -100 | 100 |
| g33 (74) | 0 | 20 | -6 | 9 |
| g34 (76) | 0 | 100 | -8 | 23 |
| g35 (77) | 0 | 100 | -20 | 70 |
| g36 (80) | 0 | 500 | -165 | 280 |
| g37 (82) | 0 | 100 | -9900 | 9900 |
| g38 (85) | 0 | 30 | -8 | 23 |
| g39 (87) | 0 | 650 | -100 | 1000 |
| g40 (89) | 0 | 500 | -210 | 300 |
| g41 (90) | 0 | 20 | -300 | 300 |
| g42 (91) | 0 | 50 | -100 | 100 |
| g43 (92) | 0 | 300 | -3 | 9 |
| g44 (99) | 0 | 300 | -100 | 100 |
| g45 (100) | 0 | 300 | -50 | 155 |
| g46 (103) | 0 | 20 | -15 | 40 |
| g47 (104) | 0 | 100 | -8 | 23 |
| g48 (105) | 0 | 100 | -8 | 23 |
| g49 (107) | 0 | 20 | -200 | 200 |
| g50 (110) | 0 | 50 | -8 | 23 |
| g51 (111) | 0 | 100 | -100 | 1000 |
| g52 (112) | 0 | 100 | -100 | 1000 |
| g53 (113) | 0 | 100 | -100 | 200 |
| g54 (116) | 0 | 50 | -1000 | 1000 |

Πίνακας 6.18 : Όρια Μέτρου και Γωνίας Τάσης των Ζυγών Δικτύου 118 Ζυγών.

| Ζυγός | \underline{V}_i [pu] | \overline{V}_i [pu] | $\underline{\delta}_i$ [pu] | $\overline{\delta}_i$ [pu] |
|-------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1 | 0.94 | 1.05 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 2 | 0.95 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 3 | 0.95 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 4 | 0.99 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 5 | 0.99 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 6 | 0.97 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 7 | 0.97 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 8 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 9 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 10 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |

Πίνακας 6.18 : Όρια Μέτρου και Γωνίας Τάσης των Ζυγών Δικτύου 118 Ζυγών (συνέχεια).

| Ζυγός | $\underline{V}_i [pu]$ | $\overline{V}_i [pu]$ | $\underline{\delta}_i [pu]$ | $\overline{\delta}_i [pu]$ |
|-------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 11 | 0.97 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 12 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 13 | 0.95 | 1.05 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 14 | 0.98 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 15 | 0.98 | 1.05 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 16 | 0.98 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 17 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 18 | 0.98 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 19 | 0.98 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 20 | 0.96 | 1.04 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 21 | 0.95 | 1.03 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 22 | 0.97 | 1.04 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 23 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 24 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 25 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 26 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 27 | 0.96 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 28 | 0.94 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 29 | 0.93 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 30 | 0.98 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 31 | 0.94 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 32 | 0.97 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 33 | 0.96 | 1.04 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 34 | 0.97 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 35 | 0.96 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 36 | 0.96 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 37 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 38 | 0.95 | 1.04 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 39 | 0.93 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 40 | 0.93 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 41 | 0.93 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 42 | 0.92 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 43 | 0.96 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 44 | 1.06 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 45 | 0.98 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 46 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 47 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 48 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 49 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 50 | 0.99 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |

Πίνακας 6.18 : Όρια Μέτρου και Γωνίας Τάσης των Ζυγών Δικτύου 118 Ζυγών (συνέχεια).

| Ζυγός | $\underline{V}_i [pu]$ | $\overline{V}_i [pu]$ | $\underline{\delta}_i [pu]$ | $\overline{\delta}_i [pu]$ |
|-------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 51 | 0.97 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 52 | 0.97 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 53 | 0.96 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 54 | 0.97 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 55 | 0.97 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 56 | 0.97 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 57 | 0.98 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 58 | 0.97 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 59 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 60 | 0.99 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 61 | 0.99 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 62 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 63 | 0.96 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 64 | 0.98 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 65 | 0.98 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 66 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 67 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 68 | 0.98 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 69 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 70 | 0.98 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 71 | 0.99 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 72 | 0.99 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 73 | 0.99 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 74 | 0.93 | 1.03 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 75 | 0.94 | 1.04 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 76 | 0.93 | 1.02 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 77 | 0.98 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 78 | 0.99 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 79 | 0.99 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 80 | 0.99 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 81 | 0.98 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 82 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 83 | 0.99 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 84 | 0.96 | 1.03 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 85 | 0.96 | 1.02 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 86 | 0.93 | 0.96 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 87 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 88 | 0.98 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 89 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 90 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |

Πίνακας 6.18 : Όρια Μέτρου και Γωνίας Τάσης των Ζυγών Δικτύου 118 Ζυγών (συνέχεια).

| Ζυγός | \underline{V}_i [pu] | \overline{V}_i [pu] | $\underline{\delta}_i$ [pu] | $\overline{\delta}_i$ [pu] |
|-------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 91 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 92 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 93 | 0.98 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 94 | 0.98 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 95 | 0.98 | 1.05 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 96 | 0.98 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 97 | 0.98 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 98 | 0.98 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 99 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 100 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 101 | 0.98 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 102 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 103 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 104 | 0.99 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 105 | 0.98 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 106 | 0.96 | 1.07 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 107 | 0.94 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 108 | 0.98 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 109 | 0.98 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 110 | 0.97 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 111 | 0.97 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 112 | 0.97 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 113 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 114 | 0.96 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 115 | 0.96 | 1.08 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 116 | 0.98 | 1.09 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 117 | 0.95 | 1.06 | $-\pi$ | $+\pi$ |
| 118 | 0.93 | 1.03 | $-\pi$ | $+\pi$ |

Πίνακας 6.19 : Χαρακτηριστικά Γραμμών Μεταφοράς Δικτύου 118 Ζυγών.

| Ζυγός i | Ζυγός j | r_{ij} [pu] | x_{ij} [pu] | b_{sij} [pu] | $Limit_{ij}$ [MVA] |
|-----------|-----------|---------------|---------------|----------------|--------------------|
| 1 | 2 | 0.0303 | 0.0999 | 0.0254 | 175 |
| 1 | 3 | 0.0129 | 0.0424 | 0.01082 | 175 |
| 4 | 5 | 0.00176 | 0.00798 | 0.0021 | 500 |
| 3 | 5 | 0.0241 | 0.108 | 0.0284 | 175 |
| 5 | 6 | 0.0119 | 0.054 | 0.01426 | 175 |
| 6 | 7 | 0.00459 | 0.0208 | 0.0055 | 175 |
| 8 | 9 | 0.00244 | 0.0305 | 1.162 | 500 |
| 8 | 5 | 0 | 0.0267 | 0 | 500 |

| Ζυγός i | Ζυγός j | r_{ij} [pu] | x_{ij} [pu] | b_{sij} [pu] | $Limit_{ij}$ [MVA] |
|-----------|-----------|---------------|---------------|----------------|--------------------|
| 9 | 10 | 0.00258 | 0.0322 | 1.23 | 500 |
| 4 | 11 | 0.0209 | 0.0688 | 0.01748 | 175 |
| 5 | 11 | 0.0203 | 0.0682 | 0.01738 | 175 |
| 11 | 12 | 0.00595 | 0.0196 | 0.00502 | 175 |
| 2 | 12 | 0.0187 | 0.0616 | 0.01572 | 175 |
| 3 | 12 | 0.0484 | 0.16 | 0.0406 | 175 |
| 7 | 12 | 0.00862 | 0.034 | 0.00874 | 175 |
| 11 | 13 | 0.02225 | 0.0731 | 0.01876 | 175 |
| 12 | 14 | 0.0215 | 0.0707 | 0.01816 | 175 |
| 13 | 15 | 0.0744 | 0.2444 | 0.06268 | 175 |
| 14 | 15 | 0.0595 | 0.195 | 0.0502 | 175 |
| 12 | 16 | 0.0212 | 0.0834 | 0.0214 | 175 |
| 15 | 17 | 0.0132 | 0.0437 | 0.0444 | 500 |
| 16 | 17 | 0.0454 | 0.1801 | 0.0466 | 175 |
| 17 | 18 | 0.0123 | 0.0505 | 0.01298 | 175 |
| 18 | 19 | 0.01119 | 0.0493 | 0.01142 | 175 |
| 19 | 20 | 0.0252 | 0.117 | 0.0298 | 175 |
| 15 | 19 | 0.012 | 0.0394 | 0.0101 | 175 |
| 20 | 21 | 0.0183 | 0.0849 | 0.0216 | 175 |
| 21 | 22 | 0.0209 | 0.097 | 0.0246 | 175 |
| 22 | 23 | 0.0342 | 0.159 | 0.0404 | 175 |
| 23 | 24 | 0.0135 | 0.0492 | 0.0498 | 175 |
| 23 | 25 | 0.0156 | 0.08 | 0.0864 | 500 |
| 26 | 25 | 0 | 0.0382 | 0 | 500 |
| 25 | 27 | 0.0318 | 0.163 | 0.1764 | 500 |
| 27 | 28 | 0.01913 | 0.0855 | 0.0216 | 175 |
| 28 | 29 | 0.0237 | 0.0943 | 0.0238 | 175 |
| 30 | 17 | 0 | 0.0388 | 0 | 500 |
| 8.3 | 30 | 0.00431 | 0.0504 | 0.514 | 175 |
| 26 | 30 | 0.00799 | 0.086 | 0.908 | 500 |
| 17 | 31 | 0.0474 | 0.1563 | 0.0399 | 175 |
| 29 | 31 | 0.0108 | 0.0331 | 0.0083 | 175 |
| 23 | 32 | 0.0317 | 0.1153 | 0.1173 | 140 |
| 31 | 32 | 0.0298 | 0.0985 | 0.0251 | 175 |
| 27 | 32 | 0.0229 | 0.0755 | 0.01926 | 175 |
| 15 | 33 | 0.038 | 0.1244 | 0.03194 | 175 |
| 19 | 34 | 0.0752 | 0.247 | 0.0632 | 175 |
| 35 | 36 | 0.00224 | 0.0102 | 0.00268 | 175 |
| 35 | 37 | 0.011 | 0.0497 | 0.01318 | 175 |
| 33 | 37 | 0.0415 | 0.142 | 0.0366 | 175 |
| 34 | 36 | 0.00871 | 0.0268 | 0.00568 | 175 |

Πίνακας 6.19 : Χαρακτηριστικά Γραμμών Μεταφοράς Δικτύου 118 Ζυγών (συνέχεια).

| Ζυγός i | Ζυγός j | r_{ij} [pu] | x_{ij} [pu] | b_{sij} [pu] | $Limit_{ij}$ [MVA] |
|-----------|-----------|---------------|---------------|----------------|--------------------|
| 34 | 37 | 0.00256 | 0.0094 | 0.00984 | 500 |
| 38 | 37 | 0 | 0.0375 | 0 | 500 |
| 37 | 39 | 0.0321 | 0.106 | 0.027 | 175 |
| 37 | 40 | 0.0593 | 0.168 | 0.042 | 175 |
| 30 | 38 | 0.00464 | 0.054 | 0.422 | 175 |
| 39 | 40 | 0.0184 | 0.0605 | 0.01552 | 175 |
| 40 | 41 | 0.0145 | 0.0487 | 0.01222 | 175 |
| 40 | 42 | 0.0555 | 0.183 | 0.0466 | 175 |
| 41 | 42 | 0.041 | 0.135 | 0.0344 | 175 |
| 43 | 44 | 0.0608 | 0.2454 | 0.06068 | 175 |
| 34 | 43 | 0.0413 | 0.1681 | 0.04226 | 175 |
| 44 | 45 | 0.0224 | 0.0901 | 0.0224 | 175 |
| 45 | 46 | 0.04 | 0.1356 | 0.0332 | 175 |
| 46 | 47 | 0.038 | 0.127 | 0.0316 | 175 |
| 46 | 48 | 0.0601 | 0.189 | 0.0472 | 175 |
| 47 | 49 | 0.0191 | 0.0625 | 0.01604 | 175 |
| 42 | 49 | 0.03575 | 0.1615 | 0.043 | 350 |
| 45 | 49 | 0.0684 | 0.186 | 0.0444 | 175 |
| 48 | 49 | 0.0179 | 0.0505 | 0.01258 | 175 |
| 49 | 50 | 0.0267 | 0.0752 | 0.01874 | 175 |
| 49 | 51 | 0.0486 | 0.137 | 0.0342 | 175 |
| 51 | 52 | 0.0203 | 0.0588 | 0.01396 | 175 |
| 52 | 53 | 0.0405 | 0.1635 | 0.04058 | 175 |
| 53 | 54 | 0.0263 | 0.122 | 0.031 | 175 |
| 49 | 54 | 0.020627 | 0.0859 | 0.02183 | 350 |
| 54 | 55 | 0.0169 | 0.0707 | 0.0202 | 175 |
| 54 | 56 | 0.00275 | 0.00955 | 0.00732 | 175 |
| 55 | 56 | 0.00488 | 0.0151 | 0.00374 | 175 |
| 56 | 57 | 0.0343 | 0.0966 | 0.0242 | 175 |
| 50 | 57 | 0.0474 | 0.134 | 0.0332 | 175 |
| 56 | 58 | 0.0343 | 0.0966 | 0.0242 | 175 |
| 51 | 58 | 0.0255 | 0.0719 | 0.01788 | 175 |
| 54 | 59 | 0.0503 | 0.2293 | 0.0598 | 175 |
| 56 | 59 | 0.04069 | 0.122428 | 0.0276 | 350 |
| 55 | 59 | 0.04739 | 0.2158 | 0.05646 | 175 |
| 59 | 60 | 0.0317 | 0.145 | 0.0376 | 175 |
| 59 | 61 | 0.0328 | 0.15 | 0.0388 | 175 |
| 60 | 61 | 0.00264 | 0.0135 | 0.01456 | 500 |
| 60 | 62 | 0.0123 | 0.0561 | 0.01468 | 175 |
| 61 | 62 | 0.00824 | 0.0376 | 0.0098 | 175 |

Πίνακας 6.19 : Χαρακτηριστικά Γραμμών Μεταφοράς Δικτύου 118 Ζυγών (συνέχεια).

| Ζυγός i | Ζυγός j | r_{ij} [pu] | x_{ij} [pu] | b_{sij} [pu] | $Limit_{ij}$ [MVA] |
|-----------|-----------|---------------|---------------|----------------|--------------------|
| 63 | 59 | 0 | 0.0386 | 0 | 500 |
| 63 | 64 | 0.00172 | 0.02 | 0.216 | 500 |
| 64 | 61 | 0 | 0.0268 | 0 | 500 |
| 38 | 65 | 0.00901 | 0.0986 | 1.046 | 500 |
| 64 | 65 | 0.00269 | 0.0302 | 0.38 | 500 |
| 49 | 66 | 0.0009 | 0.04595 | 0.0124 | 1000 |
| 62 | 66 | 0.0482 | 0.218 | 0.0578 | 175 |
| 62 | 67 | 0.0258 | 0.117 | 0.031 | 175 |
| 65 | 66 | 0 | 0.037 | 0 | 500 |
| 66 | 67 | 0.0224 | 0.1015 | 0.02682 | 175 |
| 65 | 68 | 0.00138 | 0.016 | 0.638 | 500 |
| 47 | 69 | 0.0844 | 0.2778 | 0.07092 | 175 |
| 49 | 69 | 0.0985 | 0.324 | 0.0828 | 175 |
| 68 | 69 | 0 | 0.037 | 0 | 500 |
| 69 | 70 | 0.03 | 0.127 | 0.122 | 500 |
| 24 | 70 | 0.00221 | 0.4115 | 0.10198 | 175 |
| 70 | 71 | 0.00882 | 0.0355 | 0.00878 | 175 |
| 24 | 72 | 0.0488 | 0.196 | 0.0488 | 175 |
| 71 | 72 | 0.0446 | 0.18 | 0.04444 | 175 |
| 71 | 73 | 0.00866 | 0.0454 | 0.01178 | 175 |
| 70 | 74 | 0.0401 | 0.1323 | 0.03368 | 175 |
| 70 | 75 | 0.0428 | 0.141 | 0.036 | 175 |
| 69 | 75 | 0.0405 | 0.122 | 0.124 | 500 |
| 74 | 75 | 0.0123 | 0.0406 | 0.01034 | 175 |
| 76 | 77 | 0.0444 | 0.148 | 0.0368 | 175 |
| 69 | 77 | 0.0309 | 0.101 | 0.1038 | 175 |
| 75 | 77 | 0.0601 | 0.1999 | 0.04978 | 175 |
| 77 | 78 | 0.00376 | 0.0124 | 0.01264 | 175 |
| 78 | 79 | 0.00546 | 0.0244 | 0.00648 | 175 |
| 77 | 80 | 0.01088 | 0.03321 | 0.01537 | 1000 |
| 79 | 80 | 0.0156 | 0.0704 | 0.0187 | 175 |
| 68 | 81 | 0.00175 | 0.0202 | 0.808 | 500 |
| 81 | 80 | 0 | 0.037 | 0 | 500 |
| 77 | 82 | 0.0298 | 0.0853 | 0.08174 | 200 |
| 82 | 83 | 0.0112 | 0.03665 | 0.03796 | 200 |
| 83 | 84 | 0.0625 | 0.132 | 0.0258 | 175 |
| 83 | 85 | 0.043 | 0.148 | 0.0348 | 175 |
| 84 | 85 | 0.0302 | 0.0641 | 0.01234 | 175 |
| 85 | 86 | 0.035 | 0.123 | 0.0276 | 500 |
| 86 | 87 | 0.02828 | 0.2074 | 0.0445 | 500 |

Πίνακας 6.19 : Χαρακτηριστικά Γραμμών Μεταφοράς Δικτύου 118 Ζυγών (συνέχεια).

| Ζυγός i | Ζυγός j | r_{ij} [pu] | x_{ij} [pu] | b_{sij} [pu] | $Limit_{ij}$ [MVA] |
|-----------|-----------|---------------|---------------|----------------|--------------------|
| 85 | 88 | 0.02 | 0.102 | 0.0276 | 175 |
| 85 | 89 | 0.0239 | 0.173 | 0.047 | 175 |
| 88 | 89 | 0.0139 | 0.0712 | 0.01934 | 500 |
| 89 | 90 | 0.01638 | 0.06517 | 0.08828 | 1000 |
| 90 | 91 | 0.0254 | 0.0836 | 0.0214 | 175 |
| 89 | 92 | 0.00799 | 0.03829 | 0.02358 | 1000 |
| 91 | 92 | 0.0387 | 0.1272 | 0.03268 | 175 |
| 92 | 93 | 0.0258 | 0.0848 | 0.0218 | 175 |
| 92 | 94 | 0.0481 | 0.158 | 0.0406 | 175 |
| 93 | 94 | 0.0223 | 0.0732 | 0.01876 | 175 |
| 94 | 95 | 0.0132 | 0.0434 | 0.0111 | 175 |
| 80 | 96 | 0.0356 | 0.182 | 0.0494 | 175 |
| 82 | 96 | 0.0162 | 0.053 | 0.0544 | 175 |
| 94 | 96 | 0.0269 | 0.0869 | 0.023 | 175 |
| 80 | 97 | 0.0183 | 0.0934 | 0.0254 | 175 |
| 80 | 98 | 0.0238 | 0.108 | 0.0286 | 175 |
| 80 | 99 | 0.0454 | 0.206 | 0.0546 | 200 |
| 92 | 100 | 0.0648 | 0.295 | 0.0472 | 175 |
| 94 | 100 | 0.0178 | 0.058 | 0.0604 | 175 |
| 95 | 96 | 0.0171 | 0.0547 | 0.01474 | 175 |
| 96 | 97 | 0.0173 | 0.0885 | 0.024 | 175 |
| 98 | 100 | 0.0397 | 0.179 | 0.0476 | 175 |
| 99 | 100 | 0.018 | 0.0813 | 0.0216 | 175 |
| 100 | 101 | 0.0277 | 0.1262 | 0.0328 | 175 |
| 92 | 102 | 0.0123 | 0.0559 | 0.01464 | 175 |
| 101 | 102 | 0.0246 | 0.112 | 0.0294 | 175 |
| 100 | 103 | 0.016 | 0.0525 | 0.0536 | 500 |
| 100 | 104 | 0.0451 | 0.204 | 0.0541 | 175 |
| 103 | 104 | 0.0466 | 0.1584 | 0.0407 | 175 |
| 103 | 105 | 0.0535 | 0.1625 | 0.0408 | 175 |
| 100 | 106 | 0.0605 | 0.229 | 0.062 | 175 |
| 104 | 105 | 0.00994 | 0.0378 | 0.00986 | 175 |
| 105 | 106 | 0.014 | 0.0547 | 0.01434 | 175 |
| 105 | 107 | 0.053 | 0.183 | 0.0472 | 175 |
| 105 | 108 | 0.0261 | 0.0703 | 0.01844 | 175 |
| 106 | 107 | 0.053 | 0.183 | 0.0472 | 175 |
| 108 | 109 | 0.0105 | 0.0288 | 0.0076 | 175 |
| 103 | 110 | 0.03906 | 0.1813 | 0.0461 | 175 |
| 109 | 110 | 0.0278 | 0.0762 | 0.0202 | 175 |
| 110 | 111 | 0.022 | 0.0755 | 0.02 | 175 |

Πίνακας 6.19 : Χαρακτηριστικά Γραμμών Μεταφοράς Δικτύου 118 Ζυγών (συνέχεια).

| Ζυγός i | Ζυγός j | r_{ij} [pu] | x_{ij} [pu] | b_{sij} [pu] | $Limit_{ij}$ [MVA] |
|-----------|-----------|---------------|---------------|----------------|--------------------|
| 110 | 112 | 0.0247 | 0.064 | 0.062 | 175 |
| 17 | 113 | 0.00913 | 0.0301 | 0.00768 | 175 |
| 32 | 113 | 0.0615 | 0.203 | 0.0518 | 500 |
| 32 | 114 | 0.0135 | 0.0612 | 0.01628 | 175 |
| 27 | 115 | 0.0164 | 0.0741 | 0.01972 | 175 |
| 114 | 115 | 0.0023 | 0.0104 | 0.00276 | 175 |
| 68 | 116 | 0.00034 | 0.00405 | 0.164 | 500 |
| 12 | 117 | 0.0329 | 0.14 | 0.0358 | 175 |
| 75 | 118 | 0.0145 | 0.0481 | 0.01198 | 175 |
| 76 | 118 | 0.0164 | 0.0544 | 0.01356 | 175 |

Πίνακας 6.20 : Χαρακτηριστικά Φορτίων Δικτύου 118 Ζυγών.

| Ζυγός i | $Demand_{P,i}$ [MW] | $Demand_{Q,i}$ [MW] |
|-----------|---------------------|---------------------|
| 1 | 54.14 | 8.66 |
| 2 | 21.23 | 9.55 |
| 3 | 41.4 | 10.62 |
| 4 | 31.85 | 12.74 |
| 6 | 55.2 | 23.35 |
| 7 | 20.17 | 2.12 |
| 11 | 74.31 | 24.42 |
| 12 | 49.89 | 10.62 |
| 13 | 36.09 | 16.99 |
| 14 | 14.86 | 1.06 |
| 15 | 95.54 | 31.85 |
| 16 | 26.54 | 10.62 |
| 17 | 11.68 | 3.18 |
| 18 | 63.69 | 36.09 |
| 19 | 47.77 | 26.54 |
| 20 | 19.11 | 3.18 |
| 21 | 14.86 | 8.49 |
| 22 | 10.62 | 5.31 |
| 23 | 7.43 | 3.18 |
| 27 | 65.82 | 13.8 |
| 28 | 18.05 | 7.43 |
| 29 | 25.48 | 4.25 |
| 31 | 45.65 | 28.66 |
| 32 | 62.63 | 24.42 |
| 33 | 24.42 | 9.55 |
| 34 | 62.63 | 27.6 |

Πίνακας 6.20 : Χαρακτηριστικά Φορτίων Δικτύου 118 Ζυγών (συνέχεια).

| Ζυγός i | $Demand_{P,i}$ [MW] | $Demand_{Q,i}$ [MW] |
|-----------|---------------------|---------------------|
| 35 | 35.03 | 9.55 |
| 36 | 32.91 | 18.05 |
| 39 | 27 | 11 |
| 40 | 20 | 23 |
| 41 | 37 | 10 |
| 42 | 37 | 23 |
| 43 | 18 | 7 |
| 44 | 16 | 8 |
| 45 | 53 | 22 |
| 46 | 28 | 10 |
| 47 | 34 | 0 |
| 48 | 20 | 11 |
| 49 | 87 | 30 |
| 50 | 17 | 4 |
| 51 | 17 | 8 |
| 52 | 18 | 5 |
| 53 | 23 | 11 |
| 54 | 113 | 32 |
| 55 | 63 | 22 |
| 56 | 84 | 18 |
| 57 | 12 | 3 |
| 58 | 12 | 3 |
| 59 | 277 | 113 |
| 60 | 78 | 3 |
| 62 | 77 | 14 |
| 66 | 39 | 18 |
| 67 | 28 | 7 |
| 70 | 66 | 20 |
| 74 | 68 | 27 |
| 75 | 47 | 11 |
| 76 | 68 | 36 |
| 77 | 61 | 28 |
| 78 | 71 | 26 |
| 79 | 39 | 32 |
| 80 | 130 | 26 |
| 82 | 54 | 27 |
| 83 | 20 | 10 |
| 84 | 11 | 7 |
| 85 | 24 | 15 |
| 86 | 21 | 10 |

Πίνακας 6.20 : Χαρακτηριστικά Φορτίων Δικτύου 118 Ζυγών (συνέχεια).

| Ζυγός i | $Demand_{P,i}$ [MW] | $Demand_{Q,i}$ [MW] |
|-----------|---------------------|---------------------|
| 88 | 48 | 10 |
| 90 | 78 | 42 |
| 92 | 65 | 10 |
| 93 | 12 | 7 |
| 94 | 30 | 16 |
| 95 | 42 | 31 |
| 96 | 38 | 15 |
| 97 | 15 | 9 |
| 98 | 34 | 8 |
| 100 | 37 | 18 |
| 101 | 22 | 15 |
| 102 | 5 | 3 |
| 103 | 23 | 16 |
| 104 | 38 | 25 |
| 105 | 31 | 26 |
| 106 | 43 | 16 |
| 107 | 28 | 12 |
| 108 | 2 | 1 |
| 109 | 8 | 3 |
| 110 | 39 | 30 |
| 112 | 25 | 13 |
| 114 | 8.49 | 3.18 |
| 115 | 23.35 | 7.43 |
| 117 | 21.23 | 8.49 |
| 118 | 33 | 15 |

Πίνακας 6.21 : Χαρακτηριστικά Αντισταθμιστών Ισχύος Δικτύου 118 Ζυγών.

| Ζυγός i | $shunt_i$ [MVar] |
|-----------|------------------|
| 5 | -40 |
| 34 | 14 |
| 37 | -25 |
| 44 | 40 |
| 45 | 10 |
| 46 | 10 |
| 48 | 15 |
| 74 | 12 |
| 79 | 20 |
| 82 | 20 |
| 83 | 10 |
| 105 | 20 |

Πίνακας 6.21 : Χαρακτηριστικά Αντισταθμιστών Ισχύος Δικτύου 118 Ζυγών (συνέχεια).

| Ζυγός i | $shunt_i$ [MVar] |
|-----------|------------------|
| 107 | 6 |
| 110 | 6 |

Τα όρια απόρριψης φορτίου ανά ζυγό τίθενται:

$$0 \leq cur_i \leq 60\% \cdot Demand_{p,i}$$

Η χρηματική επιβάρυνση για την απόρριψη φορτίου τίθεται:

$$VOLL = 10000 [m.u.]$$

6.3 ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ

Σημαντικό ρόλο στην επίλυση των προβλημάτων που τίθενται στην παρούσα διπλωματική εργασία τελούν ο συντελεστής απόκλισης ε και ο συντελεστής a_i της συνάρτησης προσέγγισης.

- Ο συντελεστής απόκλισης ε χρησιμοποιείται στο 3^ο Βήμα της Μεθοδολογίας τριών Βημάτων μέσω της σχέσης (3.20) και αποσκοπεί στο να μην επιτρέψει το συνολικό κόστος f να αποκλίνει περισσότερο από τον καθοριζόμενο συντελεστή απόκλισης ε , από το ιδανικό κόστος f^* , το οποίο υπολογίστηκε στο 1^ο Βήμα της μεθοδολογίας. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μια ισορροπία μεταξύ αριθμού ενεργειών ελέγχου και συνολικού κόστους με ταυτόχρονη καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου. Εάν δεν αναφέρεται διαφορετικά, η τιμή του συντελεστή απόκλισης τίθεται

$$\varepsilon = 0.05 \text{ ή } (5\%)$$

- Ο συντελεστής a_i συμπεριλαμβάνεται στη συνάρτηση προσέγγισης (3.21) των δυαδικών μεταβλητών και συνεπώς επηρεάζει μόνο τα προβλήματα, τα οποία κάνουν χρήση αυτής στο 2^ο και 3^ο Βήμα της Μεθοδολογίας τριών Βημάτων. Όσο μικρότερη η τιμή του συντελεστή a_i , τόσο ακριβέστερη η προσέγγιση της δυαδικής τιμής της μεταβλητής s_i . Εάν δεν αναφέρεται διαφορετικά, η τιμή του συντελεστή προσέγγισης τίθεται:

$$a_i = 0.0001$$

- Επιπλέον τονίζεται ότι οπουδήποτε συναντάται σχέση περιορισμού μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε γραμμή μεταφοράς του δικτύου, όπως στις σχέσεις (3.10), (4.16) και (4.39), δίνεται μια επιπλέον ανοχή 10%, δηλαδή η μεταβλητή $Limit_{ij}$ τίθεται $1.1 \cdot Limit_{ij}$.

6.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΙΣ ΑΠΟΡΡΙΨΕΙΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

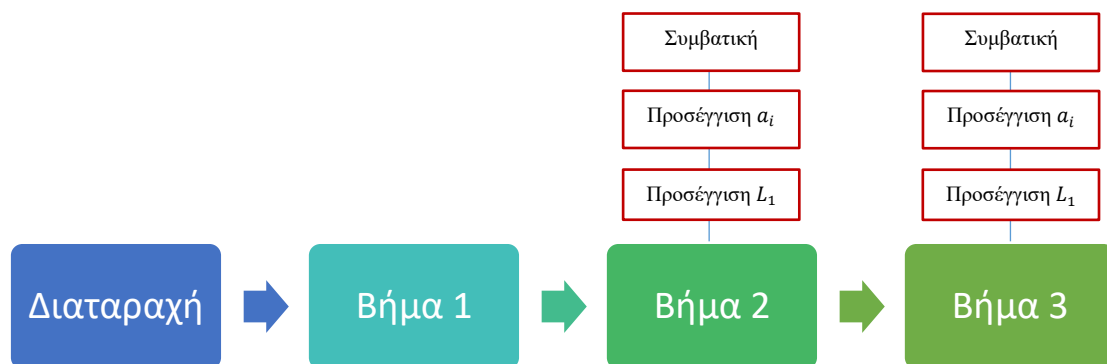
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση των διαφόρων προβλημάτων OPF που προκύπτουν από την εφαρμογή της Μεθοδολογίας τριών Βημάτων για τα τρία δίκτυα που εξετάζονται καθώς και για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3. Το διάγραμμα ροής της συλλογής των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.4.

Ως ενέργειες ελέγχου προσμετρούνται αρχικά μόνο οι απορρίψεις φορτίου που πραγματοποιούνται στους ζυγούς του συστήματος σύμφωνα με τις σχέσεις που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3. Προκειμένου να απαιτείται για την επίλυση των προβλημάτων να πραγματοποιηθούν απορρίψεις φορτίου, πρέπει το σύστημα, το οποίο αρχικά βρίσκεται σε βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας, να απομακρυνθεί από αυτήν μέσω κάποιας διαταραχής. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα καλείται να «αντιδράσει» σε αυτήν μέσω απορρίψεων φορτίου, οι οποίες στη συνέχεια αναγνωρίζονται και περιορίζονται οι αναποτελεσματικές εξ αυτών.

Ως διαταραχή εισάγεται σε κάθε δίκτυο η διακοπή γραμμής μεταφοράς και σημειώνονται αποτελέσματα σε μορφή Πίνακα σχετικά με:

- Τον αριθμό ενεργειών ελέγχου N
- Την απόρριψη φορτίου
- Το κόστος απόρριψης φορτίου
- Το συνολικό κόστος
- Τον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος

για κάθε Βήμα και συγκεκριμένα για τα Βήματα 2 και 3 για κάθε μία από τις τρεις μεθόδους (Συμβατική, Προσέγγιση με Συντελεστή a_i , Προσέγγιση L_1).



Σχήμα 6.4 : Διάγραμμα Ροής Συλλογής Αποτελεσμάτων, με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου

6.4.1 Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών

Διαταραχή: Διακοπή Γραμμής Μεταφοράς 1–2

Πίνακας 6.22: Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών, με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου, για διακοπή της γραμμής μεταφοράς 1–2.

| | ΒΗΜΑ 1 C–OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC–OPF | | | ΒΗΜΑ 3 EC–OPF | | |
|---------------------------------|--------------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | COPF | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 |
| N | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Απόρριψη Φορτίου [pu] | 0,301 | 1,423 | 0,301 | 0,301 | 0,314 | 0,301 | 0,301 |
| Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 300,980 | 1422,859 | 300,980 | 300,980 | 314,371 | 300,980 | 300,98 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 338,128 | 1459,004 | 338,128 | 338,128 | 351,506 | 338,128 | 338,128 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 0,211 | 0,542 | 0,362 | 0,228 | 0,324 | 0,364 | 0,509 |

Διαταραχή: Διακοπή Γραμμής Μεταφοράς 1–3

Πίνακας 6.23: Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών, με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου, για διακοπή της γραμμής μεταφοράς 1–3.

| | ΒΗΜΑ 1 C–OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC–OPF | | | ΒΗΜΑ 3 EC–OPF | | |
|---------------------------------|--------------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | COPF | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 |
| N | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Απόρριψη Φορτίου [pu] | 0,300 | 1,354 | 0,300 | 0,300 | 0,314 | 0,300 | 0,300 |
| Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 300,490 | 1353,713 | 300,490 | 300,490 | 313,843 | 300,490 | 300,490 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 337,638 | 1389,880 | 337,638 | 337,638 | 350,978 | 337,638 | 337,638 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 0,220 | 0,367 | 0,268 | 0,204 | 0,339 | 0,414 | 0,271 |

6.4.2 Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών

Διαταραχή: Διακοπή Γραμμής Μεταφοράς 4031–4041

Πίνακας 6.24: Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών, με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου, για διακοπή της γραμμής μεταφοράς 4031–4041.

| | ΒΗΜΑ 1 C-OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC-OPF | | | ΒΗΜΑ 3 EC-OPF | | |
|---------------------------------|--------------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | COPF | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 |
| N | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Απόρριψη Φορτίου [MW] | 544,682 | 738,460 | 561,832 | 567,918 | 695,857 | 551,540 | 586,72 |
| Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 54,468 | 73,846 | 56,183 | 56,792 | 69,586 | 55,154 | 58,672 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 313,724 | 333,296 | 316,025 | 316,611 | 328,968 | 315,015 | 318,484 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 0,938 | 36,271 | 3,764 | 1,148 | 37,775 | 2,366 | 10,280 |

Διαταραχή: Διακοπή Γραμμής Μεταφοράς 4022–4031

Πίνακας 6.25: Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών, με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου, για διακοπή της γραμμής μεταφοράς 4022–4031.

| | ΒΗΜΑ 1 C-OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC-OPF | | | ΒΗΜΑ 3 EC-OPF | | |
|---------------------------------|--------------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | COPF | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 |
| N | 6 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Απόρριψη Φορτίου [MW] | 772,470 | 948,880 | 777,107 | 776,630 | 930,196 | 773,081 | 776,630 |
| Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 77,247 | 94,888 | 77,711 | 77,663 | 93,020 | 77,308 | 77,663 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 335,796 | 353,617 | 336,954 | 336,906 | 351,712 | 336,549 | 336,907 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 0,977 | 52,975 | 4,021 | 19,942 | 52,726 | 3,702 | 89,803 |

6.4.3 Αποτελέσματα Δικτύου 118 Ζυγών

Σημειώνεται ότι, καθώς τα δεδομένα του δικτύου 118 ζυγών δεν το καθιστούν ιδιαίτερα φορτισμένο, πολλαπλασιάζονται, για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων των Κεφαλαίων 6.4.3 και 6.5.3, τα ενεργά και άεργα φορτία επί 1.8. Με τον τρόπο αυτό το δίκτυο καθίσταται περισσότερο φορτισμένο και απαιτούνται περισσότερες ενέργειες ελέγχου για την αντιμετώπιση της διαταραχής.

Διαταραχή: Διακοπή Γραμμής Μεταφοράς 5–8

Πίνακας 6.26: Αποτελέσματα Δικτύου 118 Ζυγών, με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου, για διακοπή της γραμμής μεταφοράς 5–8.

| | ΒΗΜΑ 1 C-OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC-OPF | | | ΒΗΜΑ 3 EC-OPF | | |
|---------------------------------|-----------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | COPF | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 |
| N | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 |
| Απόρριψη Φορτίου [MW] | 88,573 | 182,753 | 172,034 | 101,050 | 149,299 | 119,771 | 98,562 |
| Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 8857,252 | 18275,291 | 17203,365 | 10105,012 | 14929,861 | 11977,064 | 9856,207 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 122254,008 | 135770,197 | 135990,101 | 129308,237 | 128249,782 | 128366,708 | 128290,728 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 1,463 | 26,887 | 14,880 | 1,318 | 176,739 | 10,655 | 2,987 |

Διαταραχή: Διακοπή Γραμμής Μεταφοράς 9–10

Πίνακας 6.27: Αποτελέσματα Δικτύου 118 Ζυγών, με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου, για διακοπή της γραμμής μεταφοράς 9–10.

| | ΒΗΜΑ 1 C-OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC-OPF | | | ΒΗΜΑ 3 EC-OPF | | |
|---------------------------------|-----------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | COPF | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 |
| N | 5 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 |
| Απόρριψη Φορτίου [MW] | 151,270 | 241,703 | 240,594 | 159,479 | 213,547 | 164,720 | 157,453 |
| Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 15126,960 | 24170,293 | 24059,448 | 15947,929 | 21354,733 | 16472,022 | 15745,261 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 127476,960 | 140928,311 | 141302,411 | 134178,152 | 133706,944 | 133820,905 | 133460,664 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 1,374 | 15,308 | 23,898 | 1,324 | 433,460 | 19,372 | 37,898 |

6.4.4 Σύγκριση και Συμπεράσματα

Καθώς λαμβάνονται ως ενέργειες ελέγχου μόνο οι απορρίψεις φορτίου που δύναται να πραγματοποιηθούν στους ζυγούς του συστήματος, παρατηρείται ότι η μικρή κλίμακα του δικτύου 3 ζυγών δεν δίνει περιθώριο για την πραγματοποίηση μεγάλου αριθμού ενεργειών ελέγχου (ο μέγιστος δυνατός αριθμός ενεργειών ελέγχου είναι 3). Η διακοπή μιας γραμμής επιλύεται, σε κάθε Βήμα της μεθοδολογίας και σε κάθε μέθοδο εφαρμογής, με μία μόνο ενέργεια ελέγχου. Επίσης λόγω της μικρής κλίμακας του δικτύου παρατηρείται ότι ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος είναι πρακτικά πανομοιότυπος μεταξύ των Βημάτων και μεθόδων εφαρμογής. Διαφορές παρουσιάζονται στην σύνθεση της λύσης, όπου η Μέθοδος Προσέγγισης a_i και η Μέθοδος Προσέγγισης L_1 παρουσιάζουν στο 2^ο Βήμα χαμηλότερο συνολικό κόστος και απόρριψη φορτίου από την Συμβατική Μέθοδο. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα αυτά συμπίπτουν με το ιδανικό κόστος του 1^{ου} Βήματος, πράγμα το οποίο σημαίνει πως η μεθοδολογία θα περατωθεί στο 2^ο Βήμα εάν επιλεγθούν οι δύο αυτές προσεγγιστικές μέθοδοι. Αντίθετα, η συμβατική μέθοδος παρουσιάζει μεγάλο συνολικό κόστος και απόρριψη φορτίου στο 2^ο Βήμα και συνεπώς απαιτείται η εκτέλεση του 3^{ου} Βήματος για να μην υπερβεί το συνολικό κόστος το +5% του ιδανικού (καθώς ο συντελεστής απόκλισης ε ορίστηκε 5%). Επιπλέον παρουσιάζει στο 3^ο Βήμα υψηλότερο συνολικό κόστος και απόρριψη φορτίου σχετικά με τις άλλες μεθόδους.

Όσον αφορά το δίκτυο 74 ζυγών, παρατηρείται ότι στο 2^ο Βήμα οι τρεις μέθοδοι καταλήγουν στον ίδιο αριθμό ενεργειών ελέγχου (ο οποίος και στις δύο περιπτώσεις διαταραχών τυχαίνει να είναι και ο ιδανικός αριθμός του 3^{ου} Βήματος). Η Μέθοδος Προσέγγισης a_i και η Μέθοδος Προσέγγισης L_1 παρουσιάζουν πάλι αρκετά χαμηλό κόστος (εντός του +5% του ιδανικού κόστους του Βήματος 1), ώστε να μην απαιτείται η εκτέλεση του 3^{ου} Βήματος. Εάν επιλεγθεί παρά ταύτα να εκτελεστεί το 3^ο Βήμα της Μεθοδολογίας, παρατηρείται αδυναμία της Μεθόδου Προσέγγισης L_1 να καταστείλει όλες τις αναποτελεσματικές ενέργειες ελέγχου, παρουσιάζοντας υψηλό αριθμό N ίσο με 11 και ελαφρώς μεγαλύτερο συνολικό κόστος και απόρριψη φορτίου έναντι της Μεθόδου Προσέγγισης a_i . Η συμβατική Μέθοδος απαιτεί την εκτέλεση και του τρίτου Βήματος και εμφανίζει υψηλότερο συνολικό κόστος και απόρριψη φορτίου τόσο στο 2^ο όσο και στο 3^ο Βήμα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει πλέον και ο χρόνος εκτέλεσης των προγραμμάτων καθώς η κλίμακα του δικτύου είναι μεγαλύτερη. Παρατηρείται πολύ γρήγορη εκτέλεση του 1^{ου} Βήματος. Η Συμβατική Μέθοδος έχει συνήθως τον μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης, γεγονός αναμενόμενο, καθώς περιλαμβάνει δυαδικές μεταβλητές. Η Μέθοδος Προσέγγισης a_i παρουσιάζεται γενικά ταχύτερη της Μεθόδου Προσέγγισης L_1 , η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλό χρόνο εκτέλεσης κυρίως στο 3^ο Βήμα κατά την διακοπή της γραμμής μεταφοράς 4022–4031. Τονίζεται ότι σε προσπάθεια αλλαγής του επιλεγμένου solver παρουσιάστηκε σημαντική βελτίωση της Μεθόδου Προσέγγισης L_1 , καθιστώντας την ταχύτερη ακόμα και της Προσέγγισης a_i , και καταστέλλοντας καλύτερα τις αναποτελεσματικές ενέργειες ελέγχου ($N = 3$ έναντι $N = 11$), όμως παρουσιάζοντας μειονεκτήματα σε αργότερες εκτελέσεις προβλημάτων. Η σύγκριση απόδοσης διαφόρων solvers για κάθε μέθοδο και πρόβλημα δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής αυτής, συνεπώς διατηρείται η επιλογή του solver IPOPT για όλες της μεθόδους.

Όσον αφορά το δίκτυο 118 ζυγών παρατηρείται εκ νέου η γρήγορη εκτέλεση του 1^{ου} Βήματος. Στο 2^ο Βήμα, η Συμβατική Μέθοδος και η Μέθοδος Προσέγγισης a_i παρουσιάζουν

τον ίδιο αριθμό ενεργειών ελέγχου, έχοντας μικρές διαφορές συνολικού κόστους και απόρριψης φορτίου, με την Συμβατική Μέθοδο να παρουσιάζει ελαφρώς μικρότερο συνολικό κόστος και μεγαλύτερη απόρριψη φορτίου. Η Μέθοδος Προσέγγισης L_1 αδυνατεί να βρει τον ελάχιστο δυνατό αριθμό ενεργειών ελέγχου, παρουσιάζοντας και στις δύο διαταραχές μια περισσότερη ενέργεια ελέγχου στο Βήμα 2. Στο 3^ο Βήμα υπάρχει συμφωνία στον αριθμό ενεργειών ελέγχου μεταξύ Συμβατικής Μεθόδου και Προσέγγισης L_1 , με μικρές διαφορές συνολικού κόστους και μικρότερη απόρριψη φορτίου στη δεύτερη.

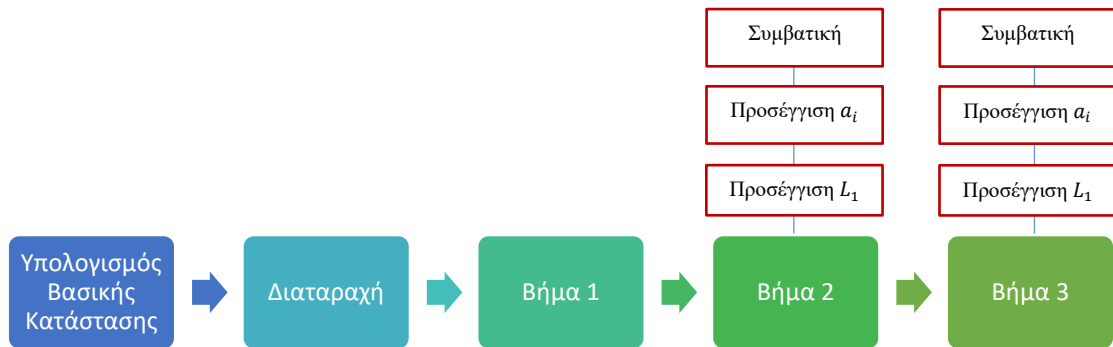
Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται μια ιδιαιτερότητα / αδυναμία χρήσης προσεγγιστικών μεθόδων. Η αναγνώριση των ενεργειών ελέγχου στην Συμβατική Μέθοδο είναι ξεκάθαρη καθώς ορίζεται από την χρήση των δυαδικών μεταβλητών. Στις προσεγγιστικές μεθόδους, στη συγκεκριμένη περίπτωση στην προσέγγιση μέσω συντελεστή a_i , γίνεται προσέγγιση των δυαδικών αυτών μεταβλητών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στους ζυγούς όπου δεν πραγματοποιείται απόρριψη φορτίου, η τιμή αυτής να μην είναι ακριβώς μηδενική αλλά κάποιος πολύ μικρός αριθμός (π.χ. 10^{-5} MW). Καθώς τίθεται από τον χρήστη όριο / φίλτρο, άνω του οποίου μετράται κάποια απόρριψη φορτίου ως ενέργεια ελέγχου, είναι φυσικό, μεγέθη μικρότερα από το όριο αυτό να μην προσμετρούνται ως ενέργειες ελέγχου, παρόλο που αποτελούν τμήμα της λύσης. Στην επίλυση όλων των προβλημάτων της διπλωματικής εργασίας λαμβάνεται ως ενέργεια ελέγχου απόρριψη φορτίου η οποία είναι τουλάχιστον μεγέθους 1MW. Έτσι, στο 3^ο Βήμα της Προσέγγισης a_i είναι δυνατόν να εμφανίζεται παραδόξως μικρότερος αριθμός ενεργειών ελέγχου (έναντι του ακριβέστερου της Συμβατικής Μεθόδου), καθώς κατά την επίλυση λήφθηκαν υπόψη απορρίψεις φορτίου μικρότερες του 1MW, τις οποίες όμως το φίλτρο που τέθηκε δεν προσμετρά. Πιθανή επίλυση της αδυναμίας αυτής μπορεί να επιτευχθεί με την αναπροσαρμογή του ορίου αναγνώρισης απόρριψης φορτίου, ανάλογα με τις ανάγκες του διαχειριστή του συστήματος.

Όσον αφορά τον χρόνο εκτέλεσης, η Συμβατική Μέθοδος, λόγω της χρήσης των δυαδικών μεταβλητών, είναι με διαφορά η πιο αργή, με την Προσέγγιση L_1 να παρουσιάζεται συνήθως ελαφρώς ταχύτερη της Προσέγγισης a_i .

6.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΙΣ ΑΠΟΡΡΙΨΕΙΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της Ενότητας 6.4, στην ενότητα αυτή προσμετρούνται στις ενέργειες ελέγχου του προβλήματος και τυχόν απαραίτητες μεταβολές στην ενεργό παραγωγή των γεννητριών, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η παρουσιαζόμενη διαταραχή. Η διαδικασία που ακολουθείται για την συλλογή των αποτελεσμάτων φαίνεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 6.5. Αρχικά απαιτείται η επίλυση ενός συμβατικού προβλήματος OPF χωρίς την διακοπή κάποιας γραμμής μεταφοράς (ουσιαστικά το 1^ο Βήμα χωρίς διακοπή γραμμής). Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η βέλτιστη (βασική) κατάσταση λειτουργίας του συστήματος και σημειώνεται η ενεργός παραγωγή κάθε γεννήτριας σε αυτήν $P_{gen,g0}$.

Η Μεθοδολογία τριών Βημάτων που εκτελείται στη συνέχεια βασίζεται πάλι στις σχέσεις του Κεφαλαίου 3 αλλά για την αναγνώριση του συνόλου των ενεργειών ελέγχου, οι οποίες πλέον περιλαμβάνουν και μεταβολές της ενεργού παραγωγής, πραγματοποιούνται οι εξής τροποποιήσεις και προσθήκες:



Σχήμα 6.5 : Διάγραμμα Ροής Συλλογής Αποτελεσμάτων, με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου και τις μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητριών.

- **Συμβατική Μέθοδος, Μέθοδος Προσέγγισης με Συντελεστή a_i και Μέθοδος Προσέγγισης L_1 (κοινό 1^ο Βήμα):**

➤ *Βήμα 1 (C-OPF)*

Στο τέλος του 1^{ου} Βήματος, για την αναγνώριση των ενεργειών ελέγχου που σχετίζονται με την αλλαγή ενεργού παραγωγής, αρκεί να εντοπιστούν οι μεταβλητές ενεργού παραγωγής $P_{gen,g}$, οι οποίες είναι διαφορετικές από τις αντίστοιχες της βέλτιστης κατάστασης $P_{gen,g0}$. Το Βήμα 1 παραμένει κοινό και στις τρεις μεθόδους εφαρμογής. Τα Βήματα 2 και 3 προσαρμόζονται ως εξής ανά μέθοδο:

- **Συμβατική Μέθοδος:**

➤ *Βήμα 2 (MNC-OPF)*

- Τροποποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (3.16) ώστε να είναι:

$$(3.16) \rightarrow OF = N_{min} = \min \sum_{i=1}^n s_i + \min \sum_g^G sP_g \quad (6.1)$$

- Προσθήκη στην (3.17) μιας επιπλέον δυαδικής μεταβλητής sP_g που αφορά την αναγνώριση των μεταβολών ενεργού παραγωγής:

$$(3.17) \rightarrow s_i, sP_g \in \{0,1\} \quad (6.2)$$

- Προσθήκη σχέσης αναγνώρισης μεταβολών ενεργού παραγωγής, με χρήση της μεταβλητής sP_g (σε αντιστοιχία με την λειτουργία της σχέσης (3.18), η οποία αναγνωρίζει απορρίψεις φορτίου):

$$sP_g \cdot (P_{gen,g} - P_{gen,g0}) \leq P_{gen,g} - P_{gen,g0} \leq sP_g \cdot (\overline{P_{gen,g}} - P_{gen,g0}) \quad (6.3)$$

➤ *Βήμα 3 (EC-OPF)*

- Ίδιες τροποποιήσεις με το Βήμα 2.

▪ **Μέθοδος Προσέγγισης με Συντελεστή a_i :**

➤ *Βήμα 2 (MNC-OPF)*

- Ίδιες τροποποιήσεις με το Βήμα 2 της Συμβατικής Μεθόδου.
- Επιπλέον προσθήκη σχέσης προσέγγισης της νέας δυαδικής μεταβλητής sP_g (σε αντιστοιχία με την σχέση (3.23), η οποία προσεγγίζει την μεταβλητή s_i):

$$sP_g = \frac{(P_{gen,g} - P_{gen,g0})^2}{a_i + (P_{gen,g} - P_{gen,g0})^2} \quad (6.4)$$

➤ *Βήμα 3 (EC-OPF)*

- Ίδιες τροποποιήσεις με το Βήμα 2.
- Επιπλέον, μόνο για το δίκτυο των 118 ζυγών, τροποποιείται ο συντελεστής προσέγγισης στην τιμή $a_i = 0,00001$, καθώς εμφανίζει στη συγκεκριμένη περίπτωση καλύτερα αποτελέσματα.

▪ **Μέθοδος Προσέγγισης L_1 :**

▪ *Βήμα 2 (MNC-OPF)*

- Τροποποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (3.27) ώστε να είναι

$$(3.27) \rightarrow OF = \min \left\{ \sum_i^n (fplus_i + fminus_i) + \sum_g^G (gplus_g + gminus_g) \right\} \quad (6.5)$$

- Προσθήκη της σχέσης

$$cur_i = fplus_i - fminus_i \quad (6.6)$$

- Προσθήκη της σχέσης

$$P_{gen,g} - P_{gen,g0} = gplus_i - gminus_i \quad (6.7)$$

➤ Βήμα 3 (EC-OPF)

- Ίδιες τροποποιήσεις με το Βήμα 2.

Τονίζεται ότι η απλή προσθήκη στην αντικειμενική συνάρτηση (3.27) ενός επιπλέον όρου με χρήση απόλυτου (για την αναγνώριση των μεταβολών της ενεργού παραγωγής), θα καθιστούσε το DNLP πρόβλημα ιδιαίτερα περίπλοκο στην επίλυσή του. Έτσι, κάνοντας χρήση των διαφορών (6.6) και (6.7) στην αντικειμενική συνάρτηση (6.5), πραγματοποιείται μετατροπή του DNLP προβλήματος σε NLP πρόβλημα, το οποίο επιλύεται σαφώς ευκολότερα.

Στη συνέχεια αναγράφονται σε μορφή πινάκων τα αποτελέσματα όλων των δικτύων και μεθόδων, για τις διάφορες διαταραχές που σημειώνονται. Επιπλέον του συνολικού αριθμού ενεργειών ελέγχου N σημειώνονται ξεχωριστά ο αριθμός απορρίψεων φορτίου N_{cur} καθώς και ο αριθμός μεταβολών ενεργού παραγωγής γεννητριών N_{Pgen} .

6.5.1 Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών

Διαταραχή: Διακοπή Γραμμής Μεταφοράς 1-2

Πίνακας 6.28: Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών, με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου και τις μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητριών, για διακοπή της γραμμής μεταφοράς 1-2.

| | ΒΗΜΑ 1 C-OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC-OPF | | | ΒΗΜΑ 3 EC-OPF | | |
|---------------------------------|--------------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | COPF | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 |
| N | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| N_{cur} | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| N_{Pgen} | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Απόρριψη Φορτίου [pu] | 0,301 | 0,308 | 0,301 | 0,301 | 0,304 | 0,301 | 0,301 |
| Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 300,980 | 308,133 | 301,180 | 300,980 | 303,557 | 301,180 | 300,98 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 338,128 | 345,272 | 338,328 | 338,128 | 340,702 | 338,328 | 338,128 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 1,278 | 1,119 | 1,030 | 0,841 | 0,961 | 1,171 | 0,950 |

Διαταραχή: Διακοπή Γραμμής Μεταφοράς 1–3**Πίνακας 6.29:** Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών, με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου και τις μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητρών, για διακοπή της γραμμής μεταφοράς 1–3.

| | ΒΗΜΑ 1 C-OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC-OPF | | | ΒΗΜΑ 3 EC-OPF | | |
|---------------------------------|-----------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | COPF | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 |
| N | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| N_{cur} | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| N_{Pgen} | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Απόρριψη Φορτίου [pu] | 0,300 | 0,522 | 0,301 | 0,300 | 0,312 | 0,301 | 0,3 |
| Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 300,490 | 521,695 | 300,690 | 300,490 | 311,705 | 300,690 | 300,49 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 337,638 | 558,570 | 337,838 | 337,638 | 348,839 | 337,838 | 337,638 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 0,859 | 1,172 | 0,935 | 0,822 | 0,965 | 1,238 | 0,846 |

6.5.2 Αποτελέσματα Δικτύου 74 ΖυγώνΔιαταραχή: Διακοπή Γραμμής Μεταφοράς 4031–4041**Πίνακας 6.30:** Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών, με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου και τις μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητρών, για διακοπή της γραμμής μεταφοράς 4031–4041

| | ΒΗΜΑ 1 C-OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC-OPF | | | ΒΗΜΑ 3 EC-OPF | | |
|---------------------------------|-----------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | COPF | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 |
| N | 13 | 4 | 4 | 5 | 4 | 6 | 5 |
| N_{cur} | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| N_{Pgen} | 9 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| Απόρριψη Φορτίου [MW] | 544,682 | 724,085 | 654,992 | 658,629 | 702,249 | 584,116 | 658,629 |
| Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 54,468 | 72,409 | 65,449 | 65,863 | 70,225 | 58,412 | 65,863 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 313,724 | 330,614 | 323,740 | 324,171 | 328,446 | 316,974 | 324,171 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 1,024 | 5,318 | 3,942 | 1,043 | 6,538 | 5,307 | 1,050 |

Διαταραχή: Διακοπή Γραμμής Μεταφοράς 4022–4031

Πίνακας 6.31: Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών, με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου και τις μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητρών, για διακοπή της γραμμής μεταφοράς 4022–4031

| | ΒΗΜΑ 1 C–OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC–OPF | | | ΒΗΜΑ 3 EC–OPF | | |
|---------------------------------|-----------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | COPF | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 |
| N | 13 | 5 | 5 | 9 | 5 | 6 | 9 |
| N_{cur} | 6 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| N_{pgen} | 7 | 1 | 1 | 5 | 1 | 2 | 5 |
| Απόρριψη Φορτίου [MW] | 772,470 | 836,968 | 831,161 | 804,416 | 836,960 | 803,115 | 804,416 |
| Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 77,247 | 83,697 | 83,116 | 80,442 | 83,696 | 80,311 | 80,442 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 335,796 | 341,951 | 341,374 | 338,576 | 341,950 | 338,558 | 338,576 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 1,048 | 33,485 | 4,686 | 1,050 | 34,323 | 3,233 | 1,109 |

6.5.3 Αποτελέσματα Δικτύου 118 ΖυγώνΔιαταραχή: Διακοπή Γραμμής Μεταφοράς 5–8

Πίνακας 6.32: Αποτελέσματα Δικτύου 118 Ζυγών, με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου και τις μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητρών, για διακοπή της γραμμής μεταφοράς 5–8

| | ΒΗΜΑ 1 C–OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC–OPF | | | ΒΗΜΑ 3 EC–OPF | | |
|---------------------------------|-----------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | COPF | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 | Συμβατική | Προσ. a_i | Προσ. L_1 |
| N | 25 | 6 | 9 | 7 | 8 | 10 | 17 |
| N_{cur} | 3 | 5 | 6 | 5 | 4 | 4 | 4 |
| N_{pgen} | 22 | 1 | 3 | 2 | 4 | 6 | 13 |
| Απόρριψη Φορτίου [MW] | 88,573 | 393,798 | 280,416 | 370,274 | 171,799 | 175,416 | 171,413 |
| Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 8857,252 | 39379,821 | 28041,571 | 37027,443 | 17179,935 | 17541,641 | 17141,265 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 122254,008 | 145047,859 | 135597,007 | 143043,209 | 128362,183 | 128366,708 | 128366,708 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 1,563 | 538,048 | 20,594 | 1,434 | 83,300 | 10,714 | 1,298 |

6.5.4 Σύγκριση και Συμπεράσματα

Όσον αφορά το δίκτυο 3 ζυγών, οι παρατηρήσεις της ενότητας 6.4.4 εφαρμόζονται και στην περίπτωση όπου προσμετρούνται στις ενέργειες ελέγχου πλέον και οι μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητριών. Η μικρή του κλίμακα επιτρέπει την άμεση επίλυση κάθε βήματος και κάθε μεθόδου εφαρμογής με δύο ενέργειες ελέγχου, μια απόρριψη φορτίου και μια μεταβολή ενεργού παραγωγής γεννήτριας. Η Συμβατική Μέθοδος εμφανίζει ελαφρώς υψηλότερο συνολικό κόστος και απόρριψη φορτίου και απαιτεί την επίλυση και του 3^{ου} Βήματος της μεθοδολογίας.

Στο δίκτυο 74 ζυγών διευκολύνεται η εξαγωγή συμπερασμάτων διότι με την προσμέτρηση των μεταβολών ενεργού παραγωγής εμφανίζεται πλέον μεγαλύτερος αριθμός ενεργειών ελέγχου. Έτσι στο 1^ο Βήμα πλέον εμφανίζονται και στις δύο διαταραχές 13 ενέργειες ελέγχου συνολικά. Στο 2^ο Βήμα υπάρχει συμφωνία ενεργειών ελέγχου μεταξύ Συμβατικής Μεθόδου και της Μεθόδου Προσέγγισης a_i , με την δεύτερη να παρουσιάζει ελαφρώς χαμηλότερο συνολικό κόστος και απόρριψη φορτίου. Αντίθετα, η Μέθοδος Προσέγγισης L_1 αδυνατεί να αναγνωρίσει τον ελάχιστο αριθμό ενεργειών ελέγχου, εμφανίζοντας στην διαταραχή 4031–4041 μια περισσότερη και στην διαταραχή 4022–4031 4 περισσότερες ενέργειες ελέγχου. Και στις 3 μεθόδους απαιτείται η επίλυση του 3^{ου} Βήματος, στο οποίο η Συμβατική Μέθοδος επιβεβαιώνεται ως η ακριβέστερη, καταστέλλοντας καλύτερα τις αναποτελεσματικές ενέργειες ελέγχου. Η Μέθοδος Προσέγγισης a_i αδυνατεί να καταστείλει δύο και μία ενέργεια ελέγχου αντίστοιχα ανά διαταραχή. Η Μέθοδος Προσέγγισης L_1 αδυνατεί να καταστείλει μία και 4 ενέργειες ελέγχου αντίστοιχα ανά διαταραχή. Η Συμβατική Μέθοδος είναι η αργότερη και η Προσέγγιση L_1 η ταχύτερη.

Στο δίκτυο 118 ζυγών εκτελείται το 1^ο Βήμα με 25 ενέργειες ελέγχου, 3 των οποίων απορρίψεις φορτίου και 22 μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητριών. Παρατηρείται εκ νέου ότι η Συμβατική Μέθοδος παρουσιάζει την μεγαλύτερη ακρίβεια τόσο στο 2^ο όσο και στο 3^ο Βήμα. Στο 2^ο Βήμα παρατηρείται η Μέθοδος Προσέγγισης a_i να παρουσιάζει τρεις περισσότερες και στο 3^ο Βήμα δύο περισσότερες ενέργειες ελέγχου. Η Μέθοδος Προσέγγισης L_1 παρουσιάζει στο 2^ο Βήμα μία παραπάνω ενέργεια ελέγχου και στο 3^ο Βήμα 9 παραπάνω ενέργειες ελέγχου ενώ το συνολικό κόστος των τριών μεθόδων στο 3^ο Βήμα είναι πρακτικά ίσο. Όσον αφορά τον χρόνο εκτέλεσης πάλι υπάρχει η ίδια εικόνα, με την Προσέγγιση L_1 να είναι η ταχύτερη και η Συμβατική Μέθοδος η αργότερη.

Συνολικά, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω καθώς και τις παρατηρήσεις της Ενότητας 6.4.4 παρατηρείται πως η Μεθοδολογία τριών Βημάτων λειτουργεί αποτελεσματικά. Στο 1^ο Βήμα υπολογίζεται το ελάχιστο δυνατό κόστος, με οποιονδήποτε αριθμό ενεργειών ελέγχου προκύψει, άρα συνήθως με υψηλό αριθμό N . Στο 2^ο Βήμα υπολογίζεται ο ελάχιστος αριθμός ενεργειών ελέγχου για την επίλυση του προβλήματος, με οποιονδήποτε (συνήθως υψηλό) κόστος προκύψει. Τέλος, στο 3^ο Βήμα επιτυγχάνεται η ισορροπία μεταξύ κόστους και ενεργειών ελέγχου σύμφωνα με τον συντελεστή απόκλισης ε .

Κατά την εκτέλεση των τριών Βημάτων ακριβέστερα είναι τα αποτελέσματα της Συμβατικής Μεθόδου, άρα αποτελούν και μέτρο σύγκρισης για τις άλλες δύο μεθόδους. Αυτή όμως απαιτεί με διαφορά τον μεγαλύτερο χρόνο επίλυσης (Σε περιπτώσεις φτάνει και τα 10 λεπτά έναντι δευτερολέπτων των άλλων δύο μεθόδων), κυρίως στην περίπτωση όπου προσμετρούνται και οι μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητριών, καθώς προστίθενται επιπλέον δυαδικές μεταβλητές. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός, ότι το συνολικό κόστος

του 3^{ου} Βήματος βρίσκεται συνήθως πάρα πολύ κοντά στο όριο που τίθεται από τον συντελεστή απόκλισης ε (δηλαδή στο +5% του ιδανικού), ενώ οι προσεγγιστικές μέθοδοι δύναται να παρουσιάσουν χαμηλότερο. Η Μέθοδος Προσέγγισης L_1 συνήθως απαιτεί τον μικρότερο χρόνο επίλυσης, αλλά παρουσιάζει και την μεγαλύτερη ασυνέπεια στην αναγνώριση του ελάχιστου αριθμού ενεργειών ελέγχου (Βήμα 2) και στην καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου (Βήμα 3). Η Μέθοδος Προσέγγισης a_i εμφανίζεται ως η καλύτερη ισορροπία μεταξύ ακρίβειας αποτελεσμάτων και χρόνου εκτέλεσης του προγράμματος. Εκτελείται σε χρόνο, ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί πως έχει ακόμη πρακτικές διαστάσεις και τα αποτελέσματα απέχουν σε ικανοποιητικό βαθμό από την ακρίβεια της Συμβατικής Μεθόδου. Τυχόν προσεγγιστικές ανακρίβειες σχετικά με την καταμέτρηση του αριθμού των ενεργειών ελέγχου δύναται να επιλυθούν με κατάλληλα τοποθετημένα φίλτρα/όρια προσμέτρησης. Έτσι, ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος και την εμπειρία του διαχειριστή, μπορούν να προσμετρούνται και μικρότερες μεταβολές ενεργού παραγωγής ή απορρίψεις φορτίου στις συνολικές ενέργειες ελέγχου. Η Μέθοδος Προσέγγισης a_i θεωρείται αποτελεσματική και αποτελεί την βάση για την επίλυση του PG-CC SCOPF προβλήματος που ακολουθεί.

6.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ PG-CC SCOPF

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης του προβλήματος PG-CC SCOPF, το οποίο ορίστηκε στο Κεφάλαιο 4, για τα δίκτυα 3 και 74 ζυγών. Σημειώθηκε προηγουμένως ότι δίνεται η δυνατότητα απόρριψης φορτίου στο πρόβλημα PG-CC SCOPF, με σκοπό την αποφυγή ενδεχόμενης μη επιλυσιμότητας. Αυτή, παρόλα αυτά, σε ένα πρόβλημα SCOPF (κυρίως με προληπτικό χαρακτήρα) είναι δυνατόν να υπάρξει. Συνεπώς, επιπλέον πραγματοποιήθηκε ελαφριά αποφόρτιση των δικτύων για την εξασφάλιση της επίλυσης των προβλημάτων. Έτσι η αποφόρτιση του δικτύου πραγματοποιήθηκε με την μείωση των φορτίων ως εξής:

- Δίκτυο 3 Ζυγών:

Πίνακας 6.33 : Χαρακτηριστικά Φορτίων Δικτύου 3 Ζυγών PG-CC SCOPF προβλήματος.

| Ζυγός i | $Demand_{p,i}$ [pu] | PF | $Demand_{Q,i}$ [pu] |
|-----------|---------------------|------|---------------------|
| 1 | - | - | - |
| 2 | 0.9 | 0.95 | 0.296 |
| 3 | 1 | 0.95 | 0.329 |

Επιπλέον περιορίζεται και για το δίκτυο 3 ζυγών η απόρριψη φορτίου στο 30% έναντι του 100% που υπήρξε προηγουμένως.

$$0 \leq cur_i \leq 30\% \cdot Demand_{p,i}$$

- Δίκτυο 74 Ζυγών:

Περιορισμός του φορτίου του Πίνακα 6.13 στο 70% δηλαδή

$$Demand'_{p,i} = 0.7 \cdot Demand_{p,i} \quad \text{και} \quad Demand'_{Q,i} = 0.7 \cdot Demand_{Q,i}$$

Οι πίνακες 6.35 και 6.37 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της επίλυσης του PG-CC SCOPF προβλήματος για τα δίκτυα 3 και 74 ζυγών αντίστοιχα και περιλαμβάνουν στοιχεία σχετικά με:

- Τον αρχικό κόστος παραγωγής βασικής κατάστασης
- Τον συνολικό αριθμό ενεργειών ελέγχου N
- Τον αριθμό απορρίψεων φορτίου N_{cur}
- Τον αριθμό των προληπτικών ενεργειών ελέγχου N_{pgen}
- Το νέο κόστος παραγωγής μετά τις προληπτικές ενέργειες ελέγχου
- Το πιθανό κόστος απόρριψης φορτίου
- Το συνολικό κόστος
- Τον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος

Τονίζεται εκ νέου ότι η επίλυση του PG-CC SCOPF προβλήματος πραγματοποιείται για το δίκτυο 74 ζυγών μόνο με την Μέθοδο Προσέγγισης με συντελεστή a_i , καθώς αποδείχτηκε να υπερτερεί έναντι της Προσέγγισης L_1 και επιπλέον η προσπάθεια επίλυσης μέσω της συμβατικής μεθόδου με χρήση δυαδικών μεταβλητών δεν κατάφερε να βρει λύση εντός έξι ωρών.

6.6.1 Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών

Διαταραχές:

Ως διαταραχές (περιορισμοί ασφαλείας) κατά την επίλυση του PG-CC SCOPF προβλήματος στο δίκτυο 3 ζυγών λαμβάνεται η διακοπή/βλάβη των τριών γραμμών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.33.

Πίνακας 6.34 : Περιορισμοί Ασφαλείας PG-CC SCOPF προβλήματος Δικτύου 3 Ζυγών.

| Διαταραχή k | Κατάσταση |
|---------------|--|
| 0 | Βασική Κατάσταση χωρίς διακοπή γραμμής |
| 1 | Διακοπή Γραμμής 1 – 2 |
| 2 | Διακοπή Γραμμής 1 – 3 |
| 3 | Διακοπή Γραμμής 2 – 3 |

Πίνακας 6.35 : Αποτελέσματα PG-CC SCOPF προβλήματος Δικτύου 3 Ζυγών.

| | ΒΗΜΑ 1 C-OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC-OPF | ΒΗΜΑ 3 EC-OPF |
|--|---|----------------|---------------|
| | Αρχικό Κόστος Παραγωγής Βασικής κατάστασης: 36,261 | | |
| N | 0 | 0 | 0 |
| N_{cur} | 0 | 0 | 0 |
| N_{Pgen} | 0 | 0 | 0 |
| Νέο Κόστος Παραγωγής Βασικής Κατάστασης [m.u.] | 36,261 | 36,261 | 36,261 |
| Πιθανό Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 0 | 0 | 0 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 36,261 | 36,261 | 36,261 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 0,851 | 0,818 | 0,801 |

6.6.2 Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών

Διαταραχές:

Ως διαταραχές (περιορισμοί ασφαλείας) κατά την επίλυση του PG-CC SCOPF προβλήματος στο δίκτυο 74 ζυγών λαμβάνεται η διακοπή/βλάβη των 10 γραμμών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.36.

Πίνακας 6.36 : Περιορισμοί Ασφαλείας PG-CC SCOPF προβλήματος Δικτύου 74 Ζυγών.

| Διαταραχή k | Κατάσταση |
|---------------|--|
| 0 | Βασική Κατάσταση χωρίς διακοπή γραμμής |
| 1 | Διακοπή Γραμμής 1011 – 1013 |
| 2 | Διακοπή Γραμμής 4022 – 4031 |
| 3 | Διακοπή Γραμμής 4011 – 4012 |
| 4 | Διακοπή Γραμμής 1041 – 1045 |
| 5 | Διακοπή Γραμμής 4041 – 4061 |
| 6 | Διακοπή Γραμμής 4031 – 4041 |
| 7 | Διακοπή Γραμμής 4042 – 4044 |
| 8 | Διακοπή Γραμμής 4043 – 4047 |
| 9 | Διακοπή Γραμμής 4043 – 4044 |
| 10 | Διακοπή Γραμμής 1043 – 1044 |

Πίνακας 6.37 : Αποτελέσματα PG-CC SCOPF προβλήματος Δικτύου 74 Ζυγών.

| | ΒΗΜΑ 1 C-OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC-OPF | ΒΗΜΑ 3 EC-OPF |
|--|--|----------------|---------------|
| | Αρχικό Κόστος Παραγωγής Βασικής κατάστασης: 255,000 | | |
| N | 17 | 13 | 11 |
| N_{cur} | 2 | 5 | 2 |
| N_{Pgen} | 15 | 8 | 9 |
| Νέο Κόστος Παραγωγής Βασικής Κατάστασης [m.u.] | 256,106 | 256,092 | 256,266 |
| Πιθανό Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 11,124 | 154,487 | 24,326 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 267,230 | 410,579 | 280,592 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [mins] | 2 sec | 24,5 mins | 28,5 mins |

6.6.3 Συμπεράσματα

Το δίκτυο 3 ζυγών χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας και την συγγραφή του κώδικα εντός του προγράμματος GAMS και λόγω του μικρού μεγέθους του δεν ενδείκνυται για την εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του PG-CC SCOPF προβλήματος και τα 3 Βήματα της μεθοδολογίας επιλύονται χωρίς ενέργειες ελέγχου. Ως γνωστών, κατά την επίλυση του Προπαρασκευαστικού Βήματος καθορίζεται η βασική κατάσταση ενεργού παραγωγής των γεννητριών. Οι τρεις περιορισμοί ασφαλείας (διακοπή γραμμών), που λαμβάνονται υπόψη στη συνέχεια, δύναται να αντιμετωπιστούν χωρίς να υπάρξει μεταβολή της ενεργού παραγωγής στη βασική κατάσταση (προληπτικές ενέργειες) και χωρίς την πραγματοποίηση απορρίψεων φορτίου. Αυτό σημαίνει πως στην συγκεκριμένη περίπτωση η αρχική ρύθμιση των παραγωγών στις τιμές του Προπαρασκευαστικού Βήματος είναι αρκετή για την αντιμετώπιση των διαταραχών που εξετάζονται στη συνέχεια. Αποτελεί ιδιαίτερη περίπτωση λόγω των ιδιοτήτων του δικτύου 3 ζυγών, καθώς συνήθως δεν επιτυγχάνεται η ικανοποίηση περιορισμών ασφαλείας χωρίς την πραγματοποίηση ενεργειών ελέγχου. Ο χρόνος επίλυσης εμφανίζεται αναμενόμενα ιδιαίτερα σύντομος και κοντά στο ένα δευτερόλεπτο.

Στο δίκτυο 74 ζυγών, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε μόνο η Μέθοδος Προσέγγισης a_i λόγω του απαγορευτικά μεγάλου χρόνου επίλυσης μέσω της Συμβατικής Μεθόδου. Το Προπαρασκευαστικό Βήμα, το οποίο καθορίζει την βασική κατάσταση, παρουσιάζει το αρχικό κόστος παραγωγής βασικής κατάστασης ίσο με 255,000 m.u. Στη

συνέχεια εισάγονται οι 10 περιπτώσεις διαταραχών και εκτελείται το 1^ο Βήμα. Αυτό δίνει συνολικό αριθμό ενεργειών ελέγχου 17, δύο εκ των οποίων είναι απορρίψεις φορτίου και 15 μεταβολές ενεργού παραγωγής (προληπτικές ενέργειες). Αυτό σημαίνει ότι 15 από τις 20 γεννήτριες πρέπει να ρυθμιστούν σε διαφορετικές τιμές ενεργού παραγωγής σε σχέση με την αρχική βασική κατάσταση. Η αντιμετώπιση των 10 διαταραχών πραγματοποιείται συνεπώς με σημείο «εκκίνησης» την νέα αυτή βασική κατάσταση που προκύπτει και την πραγματοποίηση 2 απορρίψεων φορτίου στη συνέχεια. Το νέο κόστος παραγωγής βασικής κατάστασης είναι μόνο ελαφρώς υψηλότερο, ενώ το συνολικό κόστος προκύπτει με την προσθήκη του κόστους απόρριψης φορτίου. Ο χρόνος εκτέλεσης είναι ιδιαίτερα σύντομος και δεν υπερβαίνει τα 2 δευτερόλεπτα. Το 2^ο Βήμα παρουσιάζει τον ελάχιστο δυνατό αριθμό ενεργειών ελέγχου για την αντιμετώπιση των 10 περιορισμών ασφαλείας, ο οποίος είναι 13, εκ των οποίων 5 απορρίψεις φορτίου και 8 προληπτικές ενέργειες. Το νέο κόστος παραγωγής βασικής κατάστασης είναι πρακτικά ίδιο με αυτό του 1^{ου} Βήματος. Παρουσιάζεται όμως πολύ υψηλότερο συνολικό κόστος με αύξηση 53% έναντι του 1^{ου} Βήματος, συνεπώς είναι αναγκαία η επίλυση του 3^{ου} Βήματος. Ο χρόνος επίλυσης ανέρχεται σε 24,5 λεπτά, το οποίο επιβεβαιώνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος, εάν ληφθεί υπόψη ότι εκτελείται προσεγγιστική μέθοδος, δηλαδή επίλυση NLP προβλήματος χωρίς δυαδικές μεταβλητές. Στο 3^ο Βήμα επιτυγχάνεται η μείωση των ενεργειών ελέγχου έναντι του 1^{ου} Βήματος και ταυτόχρονα η μείωση του συνολικού κόστους έναντι του 2^{ου} Βήματος, ώστε να μην υπερβαίνει το +5% του ιδανικού κόστους. Το νέο κόστος παραγωγής βασικής κατάστασης είναι μόνο ελαφρώς υψηλότερο συγκριτικά με αυτό των προηγούμενων βημάτων. Παρατηρείται πάλι η ιδιαιτερότητα που δύναται να εμφανίσει η προσεγγιστική μέθοδος, η οποία αναφέρθηκε και στην Ενότητα 6.4.4. Το 3^ο Βήμα δύναται να παρουσιάσει μικρότερο αριθμό ενεργειών ελέγχου έναντι του 2^{ου}, πράγμα το οποίο οφείλεται στη σύνθεση της λύσης, όπου μεταβολές ενεργού παραγωγής ή απορρίψεις φορτίου, οι οποίες είναι μικρότερες από το καθοριζόμενο όριο, δεν προσμετρούνται στις συνολικές ενέργειες ελέγχου. Ο χρόνος εκτέλεσης του 3^{ου} Βήματος ανέρχεται σε 28,5 λεπτά.

Η επέκταση της Μεθοδολογίας τριών Βημάτων για την επίλυση του PG-CC SCOPF προβλήματος κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματική καθώς πραγματοποιείται επιτυχώς η καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου, χωρίς η απόκλιση του συνολικού κόστους να υπερβαίνει το ιδανικό κόστος πέραν του καθοριζόμενου ορίου. Από πλευράς χρονικής εκτέλεσης, εάν συγκριθεί με την προσπάθεια επίλυσης μέσω Συμβατικής Μεθόδου, η οποία δεν κατάφερε να βρει λύση εντός έξι ωρών εκτέλεσης προγράμματος, γίνεται εμφανές το τεράστιο χρονικό πλεονέκτημα το οποίο παρουσιάζει η προτεινόμενη Μέθοδος Προσέγγισης a_i , κυρίως όσο αυξάνεται η κλίμακα του εξεταζόμενου δικτύου ή ο αριθμός περιορισμών ασφαλείας.

6.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ PREVENTIVE – CORRECTIVE DC – SCOPF

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης του Preventive – Corrective DC – SCOPF προβλήματος, το οποίο ορίστηκε στο Κεφάλαιο 4, για τα δίκτυα 3 και 74 ζυγών.

6.7.1 Αποτελέσματα DC Μεθόδου A

Τα αποτελέσματα της επίλυσης του Preventive – Corrective DC – SCOPF προβλήματος για τα δίκτυα 3 και 74 Ζυγών παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.38 και 6.39 αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι κατά την εφαρμογή της Μεθόδου A λαμβάνονται ως ενέργειες ελέγχου σύμφωνα με την σχέση (4.37) οι προληπτικές ενέργειες (επί της ενεργού παραγωγής γεννητριών της βασικής κατάστασης), οι απορρίψεις φορτίου καθώς και οι διορθωτικές ενέργειες (επί της ενεργού παραγωγής γεννητριών).

6.7.1.1 Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών

Πίνακας 6.38 : Αποτελέσματα Preventive – Corrective DC – SCOPF προβλήματος Δικτύου 3 Ζυγών, με εφαρμογή Μεθόδου A.

| | ΒΗΜΑ 1 C-OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC-OPF | ΒΗΜΑ 3 EC-OPF |
|--|--|-----------------------|----------------------|
| | Αρχικό Κόστος Παραγωγής Βασικής κατάστασης: 1,130 | | |
| N | 9 | 6 | 6 |
| N_{cur} | 0 | 0 | 0 |
| N_{Pgen} | 9 | 6 | 6 |
| Νέο Κόστος Παραγωγής Βασικής Κατάστασης [m.u.] | 1,130 | 1,130 | 1,130 |
| Πιθανό Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 0 | 0 | 0 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 1,130 | 1,130 | 1,130 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 0,941 | 0,925 | 0,933 |

6.7.1.2 Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών

Πίνακας 6.39 : Αποτελέσματα Preventive – Corrective DC – SCOPF προβλήματος Δικτύου 74 Ζυγών, με εφαρμογή Μεθόδου A.

| | ΒΗΜΑ 1 C-OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC-OPF | ΒΗΜΑ 3 EC-OPF |
|------------|--|-----------------------|----------------------|
| | Αρχικό Κόστος Παραγωγής Βασικής κατάστασης: 4,246 | | |
| N | 194 | 5 | 22 |
| N_{cur} | 0 | 4 | 0 |
| N_{Pgen} | 194 | 1 | 22 |

Πίνακας 6.39 : Αποτελέσματα Preventive – Corrective DC – SCOPF προβλήματος Δικτύου 74 Ζυγών, με εφαρμογή Μεθόδου Α (συνέχεια).

| | ΒΗΜΑ 1 C–OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC–OPF | ΒΗΜΑ 3 EC–OPF |
|--|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Νέο Κόστος Παραγωγής Βασικής Κατάστασης [m.u.] | 4,246 | 4,246 | 4,333 |
| Πιθανό Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 0 | 449,682 | 0 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 4,246 | 453,929 | 4,333 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 1,562 | 1,139 | 1,377 |

6.7.2 Αποτελέσματα DC Μεθόδου Β

Τα αποτελέσματα της επίλυσης του Preventive – Corrective DC – SCOPF προβλήματος για τα δίκτυα 3 και 74 Ζυγών παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.40 και 6.41 αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι κατά την εφαρμογή της Μεθόδου Β λαμβάνονται ως ενέργειες ελέγχου σύμφωνα με την σχέση (4.49) οι προληπτικές ενέργειες (επί της ενεργού παραγωγής γεννητριών της βασικής κατάστασης) καθώς και οι απορρίψεις φορτίου. Οι διορθωτικές ενέργειες επί της ενεργού παραγωγής των γεννητριών δεν συνυπολογίζονται στις ενέργειες ελέγχου και στην βελτιστοποίηση αυτών, αλλά σημειώνονται στους Πίνακες 6.40 και 6.41 ως $N_{Pgen,corrective}$ για την καλύτερη κατανόηση των ρυθμίσεων που πραγματοποιούνται στο δίκτυο κατά την επίλυση του προβλήματος. Οι προληπτικές μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητριών συμβολίζονται με $N_{Pgen,0}$.

6.7.2.1 Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών

Πίνακας 6.40 : Αποτελέσματα Preventive – Corrective DC – SCOPF προβλήματος Δικτύου 3 Ζυγών, με εφαρμογή Μεθόδου Β.

| | ΒΗΜΑ 1 C–OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC–OPF | ΒΗΜΑ 3 EC–OPF |
|--|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Αρχικό Κόστος Παραγωγής Βασικής κατάστασης: 1,130 | | | |
| N | 0 | 0 | 0 |
| N_{cur} | 0 | 0 | 0 |
| N_{Pgen} | 0 | 0 | 0 |
| Νέο Κόστος Παραγωγής Βασικής Κατάστασης [m.u.] | 1,130 | 1,130 | 1,130 |

Πίνακας 6.40 : Αποτελέσματα Preventive – Corrective DC – SCOPF προβλήματος Δικτύου 3 Ζυγών, με εφαρμογή Μεθόδου Β (συνέχεια).

| | ΒΗΜΑ 1 C-OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC-OPF | ΒΗΜΑ 3 EC-OPF |
|--|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Πιθανό Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 0 | 0 | 0 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 1,130 | 1,130 | 1,130 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 0,942 | 0,920 | 0,930 |
| $N_{Pgen,corrective}$ | 9 | 6 | 6 |

6.7.2.2 Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών

Πίνακας 6.41 : Αποτελέσματα Preventive – Corrective DC – SCOPF προβλήματος Δικτύου 74 Ζυγών, με εφαρμογή Μεθόδου Β.

| | ΒΗΜΑ 1 C-OPF | ΒΗΜΑ 2 MNC-OPF | ΒΗΜΑ 3 EC-OPF |
|--|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Αρχικό Κόστος Παραγωγής Βασικής κατάστασης: 4,246 | | | |
| N | 7 | 1 | 2 |
| N_{cur} | 0 | 1 | 0 |
| $N_{Pgen,0}$ | 7 | 0 | 2 |
| Νέο Κόστος Παραγωγής Βασικής Κατάστασης [m.u.] | 4,246 | 4,289 | 4,313 |
| Πιθανό Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 0 | 113,400 | 0 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 4,246 | 117,689 | 4,313 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 1,324 | 1,255 | 1,271 |
| $N_{Pgen,corrective}$ | 183 | 133 | 144 |

6.7.3 Συμπεράσματα

Όσον αφορά το δίκτυο 3 ζυγών, η δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων εμφανίζεται εκ νέου περιορισμένη. Παρατηρείται ότι είτε χρησιμοποιείται η Μέθοδος Α, είτε η Μέθοδος Β για την επίλυση του Preventive – Corrective DC SCOPF, τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται και είναι πανομοιότυπα. Έτσι, δεν απαιτείται απόρριψη φορτίου για την αντιμετώπιση των τριών διαταραχών που συνυπολογίζονται. Η επίλυση του προβλήματος στηρίζεται και στις δύο περιπτώσεις καθαρά στην εκτέλεση διορθωτικών μεταβολών της ενεργού παραγωγής

γεννητριών, χωρίς την πραγματοποίηση προληπτικών διορθωτικών ενεργειών ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι στο συγκεκριμένο δίκτυο μικρής κλίμακας και για τους συγκεκριμένους περιορισμούς ασφαλείας, η επίλυση βασίζεται σε διορθωτικούς ελέγχους, τόσο στην περίπτωση όπου αυτοί συνυπολογίζονται στις συνολικές ενέργειες N (Μέθοδος Α), όσο και στην περίπτωση όπου δεν συνυπολογίζονται (Μέθοδος Β). Αποτελεί ιδιαίτερη περίπτωση, καθώς είναι δυνατή η αντιμετώπιση των περιορισμών ασφαλείας στο Βήμα 2, με συνολικό κόστος ίσο με το ιδανικό του Βήματος 1, πράγμα το οποίο σημαίνει πως «συνυπάρχουν» ταυτόχρονα το ιδανικό κόστος και ο ελάχιστος αριθμός ενεργειών ελέγχου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να μην απαιτείται η επίλυση του 3^{ου} Βήματος, καθώς παρουσιάζεται πανομοιότυπο με το Βήμα 2. Επιπλέον, είναι ακριβώς ίδια μεταξύ των Μεθόδων Α και Β τα αποτελέσματα των τιμών της ενεργού παραγωγής για κάθε γεννήτρια και κάθε κατάσταση k . Ο χρόνος επίλυσης όλων των Βημάτων ανεξαρτήτως μεθόδου είναι πολύ σύντομος και περίπου 1 δευτερόλεπτο.

Στο δίκτυο 74 Ζυγών παρατηρείται εκ νέου περισσότερο αναμενόμενη συμπεριφορά της Μεθοδολογίας τριών Βημάτων.

Κατά την εφαρμογή της Μεθόδου Α παρατηρούνται τα εξής: Το 1^ο Βήμα κατορθώνει να αντιμετωπίσει τις 10 διαταραχές που συνυπολογίζονται χωρίς την μεταβολή του κόστους παραγωγής βασικής κατάστασης έναντι του Προπαρασκευαστικού Βήματος. Επιπλέον, καθώς δεν απαιτούνται απορρίψεις φορτίου, και συνεπώς δεν υπάρχει πιθανό κόστος απόρριψης φορτίου, το συνολικό κόστος είναι ακριβώς όσο είναι το κόστος παραγωγής βασικής κατάστασης. Για την επίτευξη όμως του ιδανικού αυτού κόστους απαιτούνται συνολικά 194 ενέργειες ελέγχου, οι οποίες αποτελούνται από προληπτικές και διορθωτικές μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητριών. Το 2^ο Βήμα υπολογίζει τον ελάχιστο απαραίτητο αριθμό συνολικών ενεργειών ελέγχου ίσο με 5, εκ των οποίων 4 απορρίψεις φορτίου και μία μεταβολή ενεργού παραγωγής γεννήτριας. Το κόστος παραγωγής βασικής κατάστασης παραμένει σταθερό. Το πιθανό κόστος, το οποίο δύναται να προκύψει από τις απορρίψεις φορτίου, αυξάνει κατά πολύ το συνολικό κόστος σε 453,929 m.u. έναντι 4,246 m.u. του 1^{ου} Βήματος και συνεπώς απαιτείται η επίλυση του 3^{ου} Βήματος. Το 3^ο Βήμα εξισορροπεί τις ενέργειες ελέγχου και το συνολικό κόστος, καταλήγοντας σε συνολικό αριθμό ενεργειών ελέγχου $N = 22$, εκ των οποίων όλες αποτελούν μεταβολές ενεργού παραγωγής και καμία απόρριψη φορτίου. Οι μεταβολές αυτές οδηγούν σε πολύ μικρή αύξηση του κόστους παραγωγής βασικής κατάστασης και, καθώς δεν υφίσταται πιθανό κόστος απόρριψης φορτίου, ταυτίζεται με το συνολικό κόστος, το οποίο είναι πλέον εντός των καθοριζόμενων ορίων και ίσο με 4,333 m.u. Ο χρόνος εκτέλεσης είναι εκ νέου μηδαμινός και δεν ξεπερνά τα 2 δευτερόλεπτα.

Κατά την εφαρμογή της Μεθόδου Β δεν συνυπολογίζονται στις συνολικές ενέργειες ελέγχου οι διορθωτικές μεταβολές ενεργού παραγωγής. Έτσι κατά την επίλυση του 1^{ου} Βήματος απαιτούνται συνολικά 7 ενέργειες ελέγχου, όλες εκ των οποίων προληπτικές μεταβολές ενεργού παραγωγής και καμία απόρριψη φορτίου. Αυτές πραγματοποιούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε το κόστος παραγωγής βασικής κατάστασης να παραμένει ιδανικό και ίσο με αυτό του Προπαρασκευαστικού Βήματος. Ο ελάχιστος απαραίτητος αριθμός ενεργειών ελέγχου, ο οποίος υπολογίζεται στο 2^ο Βήμα, είναι ίσος με 1 και αποτελείται από μία απόρριψη φορτίου. Το πιθανό κόστος αυτής αυξάνει το συνολικό κόστος σε 117,689 m.u. έναντι 4,246 m.u. του 1^{ου} Βήματος, ξεπερνώντας την καθοριζόμενη απόκλιση του +5%. Η εκτέλεση του 3^{ου} Βήματος οδηγεί σε συνολικό αριθμό ενεργειών ελέγχου ίσο με 2, όλες εκ των οποίων είναι προληπτικές μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητριών, χωρίς την πραγματοποίηση απορρίψεων φορτίου. Οι μεταβολές αυτές οδηγούν σε πολύ μικρή αύξηση του κόστους

παραγωγής βασικής κατάστασης και, καθώς δεν υφίσταται πιθανό κόστος απόρριψης φορτίου, ταυτίζεται με το συνολικό κόστος, το οποίο είναι πλέον εντός των καθοριζόμενων ορίων και ίσο με 4,313 m.u. Καθώς η λύση του προβλήματος βασίζεται περισσότερο σε διορθωτικές ενέργειες ελέγχου, αφού αυτές δεν προσμετρούνται στον συνολικό αριθμό ενεργειών ελέγχου N , παρατηρείται και στα 3 Βήματα υψηλός αριθμός διορθωτικών ενεργειών, ίσος με 183, 133 και 144 αντίστοιχα.

Συμπερασματικά παρατηρείται πως η Μεθοδολογία τριών Βημάτων εφαρμόζεται και είναι αποτελεσματική και στις δύο περιπτώσεις Α και Β Μεθόδου εφαρμογής. Τα μεγέθη, τα οποία συνυπολογίζονται στις συνολικές ενέργειες ελέγχου, δεν επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της Μεθοδολογίας τριών Βημάτων, η οποία επιτυγχάνει την καταστολή των εκάστοτε αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου. Έτσι, ανάλογα με τις ανάγκες εξέτασης κάποιου συστήματος, μπορεί να επιλεγεί τρόπος, από τον οποίο προκύπτει ο αριθμός ενεργειών ελέγχου N , και στη συνέχεια να εφαρμοστούν τα 3 Βήματα της μεθοδολογίας. Στους συγκεκριμένους δύο τρόπους υπολογισμού του αριθμού N (Μέθοδος Α και Β), ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύνθεση της τελικής λύσης, παρόλο που το συνολικό κόστος στο τέλος του 3^{ου} Βήματος πρακτικά υπολογίζεται ίδιο. Έτσι η Μέθοδος Β πραγματοποιεί μόνο 2 (προληπτικές) ενέργειες ελέγχου, αλλά στηρίζεται ιδιαίτερα στην εκτέλεση διορθωτικών μεταβολών ενεργού παραγωγής, καθώς αυτές δεν προσμετρούνται στις συνολικές ενέργειες ελέγχου και συνεπώς δεν αναζητείται ο εντοπισμός των αναποτελεσματικών ανάμεσα σε αυτές. Έτσι η Μέθοδος Β πραγματοποιεί ταυτόχρονα και 144 διορθωτικές μεταβολές ενεργού παραγωγής, έναντι της Μεθόδου Α, η οποία πραγματοποιεί συνολικά (προληπτικές + διορθωτικές) «μόνο» 22 ενέργειες ελέγχου. Η σύγκριση μεταξύ αυτών εξαρτάται καθαρά από τους ερευνητικούς στόχους, καθώς κάθε μέθοδος καταστέλλει τις αναποτελεσματικές ενέργειες ελέγχου που τις δίνονται για την εξέταση κάποιου συγκεκριμένου συστήματος. Έτσι π.χ. σε ένα σύστημα, στο οποίο δίνεται ιδιαίτερη βάση στη βασική κατάσταση, άρα στις προληπτικές ενέργειες ελέγχου, και όπου θεωρείται αμελητέο το κόστος διορθωτικών ενεργειών ελέγχου, μπορεί να επιλεγεί η Μέθοδος Β. Το ίδιο ισχύει και σε περίπτωση όπου η πιθανότητα εμφάνισης των διαταραχών θεωρείται ιδιαίτερα χαμηλή, συνεπώς κύριος στόχος είναι η διατήρηση χαμηλού βασικού κόστους παραγωγής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πέραν της αποτελεσματικής εφαρμογής της Μεθοδολογίας τριών Βημάτων στο Preventive – Corrective DC – SCOPF, εξετάζεται η δυνατότητα εφαρμογής των αποτελεσμάτων του DC – SCOPF στο αντίστοιχο πλήρες AC – SCOPF του συστήματος.

6.8 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΦΑΡΜΟΦΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩ DC – SCOPF ΣΤΟ ΠΛΗΡΕΣ AC – SCOPF

Η επίλυση του Preventive – Corrective DC – SCOPF, με οποιαδήποτε εκ των μεθόδων Α και Β, υλοποιεί μια προσεγγιστική επίλυση ενός πλήρες προβλήματος Preventive – Corrective AC – SCOPF. Στη συνέχεια εξετάζεται ο βαθμός, κατά τον οποίο αυτή η προσεγγιστική λύση, αντιπροσωπεύει το πλήρες πρόβλημα και μπορεί να εφαρμοστεί για την ευκολότερη επίλυση αυτού, λαμβάνοντας υπόψη τους ίδιους περιορισμούς ασφαλείας. Σημαντικό κριτήριο συνεπώς αποτελεί η εφαρμοσιμότητα των αποτελεσμάτων της DC προσέγγισης στο πλήρες AC πρόβλημα, το οποίο αντιπροσωπεύει τις πραγματικές συνθήκες

του συστήματος με μεγαλύτερη ακρίβεια, και ως εκ τούτου λαμβάνει πρακτικά απαγορευτικά μεγάλη πολυπλοκότητα κατά την επίλυσή του.

6.8.1 Πλήρες AC – SCOPF

Το πλήρες AC – SCOPF πρόβλημα έχει την εξής μορφή:

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$OF = f^* = \min \left\{ \sum_{g=1}^G (P_{gen,g0,DC}^2 \cdot a_g + P_{gen,g0,DC} \cdot b_g + c_g) + \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^n VOLL \cdot cur_{i,k} \cdot Demand_{P,i} + Slacks \right\} \quad (6.8)$$

Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι σχέσεις (4.12), (4.13), (4.15) και (6.9) – (6.10).

$$\sum P_{gen,g,k,DC} - ([1 - cur_{i,k}] \cdot Demand_{P,i}) = \sum P_{ij,k} \quad (6.9)$$

$$Slacks = slackCost \cdot \sum_{k=0}^c \sum_{i=1}^n (slackVup_{i,k} + slackVdown_{i,k}) + \sum_{k=0}^c \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n SlackLine_{ij,k} \quad (6.10)$$

Οι περιορισμοί ανισότητας είναι οι σχέσεις (3.12), (4.18) και (6.11) – (6.17).

$$P_{ij,k}^2 + Q_{ij,k}^2 \leq Limit_{ij}^2 + SlackLine_{ij,k} \quad (6.11)$$

$$\underline{cur}_{i,k} \leq cur_{i,k} \leq \overline{cur}_{i,k} \quad (6.12)$$

$$slackVup_{i,k} + 1.1 \geq V_{i,k} \quad (6.13)$$

$$-slackVdown_{i,k} + 0.9 \leq V_{i,k} \quad (6.14)$$

$$0 \leq slackVdown_{i,k} \leq 0.9 \quad (6.15)$$

$$0 \leq slackVup_{i,k} \leq 1.1 \quad (6.16)$$

$$0 \leq SlackLine_{ij,k} \leq 10 \quad (6.17)$$

όπου:

- $P_{gen,g0,DC}$ η ενεργός παραγωγή κάθε γεννήτριας στη βασική κατάσταση, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Preventive – Corrective DC – SCOPF προβλήματος.
- $\sum P_{gen,g,k,DC}$ η ενεργός παραγωγή κάθε γεννήτριας για κάθε διαταραχή k , σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Preventive – Corrective DC – SCOPF προβλήματος.
- $Slacks$ το συνολικό κόστος των χαλαρών μεταβλητών (slack variables).
- $slackCost$ η ποινή των slack variables.
- $slackVup_{i,k}$ η άνω slack variable που εφαρμόζεται στα όρια του μέτρου της τάσης των ζυγών
- $slackVdown_{i,k}$ η κάτω slack variable που εφαρμόζεται στα όρια του μέτρου της τάσης των ζυγών
- $SlackLine_{ij,k}$ η slack variable που εφαρμόζεται στα όρια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας των γραμμών μεταφοράς

Τονίζεται ότι η τεχνική προσθήκης slack variables, δίνει τη δυνατότητα επίλυσης ενός προβλήματος με καθοριζόμενη χαλάρωση των περιορισμών τους οποίους αφορούν αυτές. Έτσι επιλύεται ένα πρόβλημα, το οποίο χωρίς slack variables θα παρουσίαζε μη επιλυσιμότητα, και ταυτόχρονα μέσω των τιμών των slack variables αναγνωρίζονται οι περιορισμοί οι οποίοι «παραβιάζονται / χαλαρώνονται» για την επίλυση του προβλήματος.

Παρατηρείται ότι η αντικειμενική συνάρτηση (6.8) αποτελείται από τρία τμήματα. Περιλαμβάνει το κόστος παραγωγής βασικής κατάστασης, η οποία πλέον δεν υπολογίζεται, αλλά καθορίζεται από τα αποτελέσματα της επίλυσης του Preventive – Corrective DC – SCOPF προβλήματος, τα οποία καθορίζουν την ενεργό παραγωγή των γεννητριών για κάθε διαταραχή k . Το δεύτερο τμήμα αφορά το κόστος απόρριψης φορτίου. Το τρίτο τμήμα, το οποίο δίνεται αναλυτικά από την σχέση (6.10), περιγράφει το συνολικό κόστος/ποινή των slack variables που εισάγονται στο πρόβλημα. Η σχέση (6.9) αφορά το ισοζύγιο ενεργού ισχύος και αποτελεί τροποποίηση της σχέσης (4.14) με τη διαφορά ότι η ενεργός παραγωγή γεννητριών καθορίζεται από τα αποτελέσματα του Preventive – Corrective DC – SCOPF. Η σχέση (6.11) αφορά τα όρια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας των γραμμών, αποτελεί τροποποίηση της σχέσης (4.16) με τη διαφορά της προσθήκης της slack variable $SlackLine_{ij,k}$. Η σχέση (6.12) περιορίζει την απόρριψη φορτίου ανά ζυγό i και κατάσταση k , ανάλογα με τα αποτελέσματα του Preventive – Corrective DC – SCOPF προβλήματος. Οι σχέσεις (6.13) έως (6.17) καθορίζουν τα όρια των slack variables.

Οι παραπάνω σχέσεις συγκροτούν ένα NLP πρόβλημα, το οποίο επιλύεται με τον solver IPOPT [9].

6.8.2 Εφαρμογή Αποτελεσμάτων DC – SCOPF

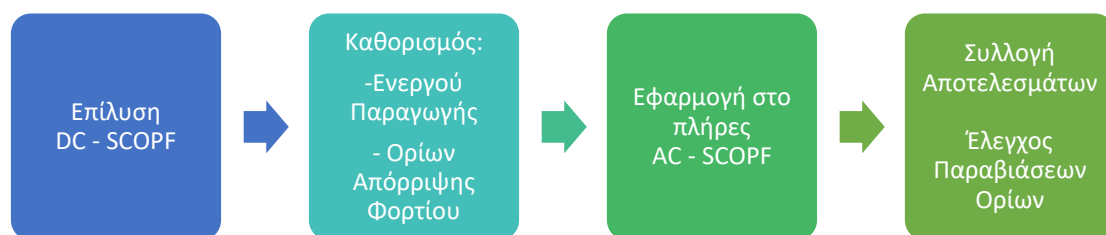
Από την επίλυση του DC – SCOPF λαμβάνονται πέραν των αποτελεσμάτων των Ενοτήτων 6.7.1 και 6.7.2 και δεδομένα για:

- την ενεργό παραγωγή των γεννητριών για κάθε κατάσταση k ($P_{gen,g0,DC}$ για την βασική κατάσταση και $P_{gen,g,k,DC}$ για $k \neq 0$).
- τις απορρίψεις φορτίου που πραγματοποιούνται για κάθε ζυγό i και κάθε κατάσταση k

Τα στοιχεία αυτά λαμβάνονται από την επίλυση του **3^{ου} Βήματος** του DC – SCOPF και αποτελούν τα δεδομένα, τα οποία εφαρμόζονται στο πλήρες AC – SCOPF που αναλύθηκε στην Ενότητα 6.8.1. Έτσι, η ενεργός παραγωγή των γεννητριών του AC – SCOPF δεν αποτελεί αντικείμενο υπολογισμού αλλά τίθεται σταθερή και ίση με τις τιμές που υπολογίστηκαν κατά την επίλυση του DC – SCOPF, επηρεάζοντας τόσο την αντικειμενική συνάρτηση (6.8) μέσω της μεταβλητής $P_{gen,g0,DC}$ όσο και τα ισοζύγια ισχύος (6.9) μέσω της μεταβλητής $P_{gen,g,k,DC}$. Επιπλέον, τα δεδομένα απόρριψης φορτίου του DC – SCOPF δίνουν το άνω επιτρεπτό όριο της απόρριψης φορτίου ανά ζυγό i και κατάσταση k του AC – SCOPF σύμφωνα με τη σχέση (6.12).

Για την εφαρμογή των slack variables τίθεται η ποινή χρήσης αυτών υψηλή και ίση με $slackCost = 100$, αποτρέποντας όσο το δυνατόν την χαλάρωση/παραβίαση των ορίων τάσης και γραμμών μεταφοράς για την επίλυση του προβλήματος. Στη συνέχεια, όποιες slack variables είναι διαφορετικές του μηδενός, καταδεικνύουν τους περιορισμούς που παραβιάζονται για την επίλυση του προβλήματος, καθώς και το μέγεθος της παραβίασης αυτής.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την συλλογή αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 6.6.



Σχήμα 6.6 : Διάγραμμα Ροής Συλλογής Αποτελεσμάτων Εφαρμογής DC – SCOPF δεδομένων στο πλήρες AC – SCOPF πρόβλημα.

6.8.3 Εφαρμογή Αποτελεσμάτων Δικτύου 3 Ζυγών

Καθώς τα αποτελέσματα του Preventive – Corrective DC – SCOPF για το δίκτυο 3 ζυγών υπήρξαν πανομοιότυπα μεταξύ των Μεθόδων εφαρμογής A και B, ακολουθεί ο Πίνακας 6.42 με τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτών στο πλήρες AC – SCOPF.

Πίνακας 6.42 : Αποτελέσματα Εφαρμογής DC – SCOPF αποτελεσμάτων στο πλήρες AC – SCOPF πρόβλημα Δικτύου 3 Ζυγών.

| Αρχικό Κόστος Παραγωγής Βασικής κατάστασης: 36,261 | |
|--|--------|
| N_{cur} | 0 |
| Νέο Κόστος Παραγωγής [m.u.] | 36,261 |
| Πιθανό Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 0 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 36,261 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 0,954 |

Παραβιάσεις Περιορισμών:

Δεν πραγματοποιήθηκε παραβίαση περιορισμών για την επίλυση του προβλήματος. Όλα τα slack variables είναι μηδενικά.

6.8.4 Εφαρμογή Αποτελεσμάτων Δικτύου 74 Ζυγών

Καθώς τα αποτελέσματα του Preventive – Corrective DC – SCOPF για το δίκτυο 74 ζυγών διαφέρουν μεταξύ των Μεθόδων εφαρμογής A και B, ακολουθούν οι Πίνακες 6.43 έως 6.46 με τα αποτελέσματα της εφαρμογής στο πλήρες AC – SCOPF των αποτελεσμάτων της Μεθόδου A και B αντίστοιχα.

Πίνακας 6.43 : Αποτελέσματα Εφαρμογής DC – SCOPF (Μέθοδος A) αποτελεσμάτων στο πλήρες AC – SCOPF πρόβλημα Δικτύου 74 Ζυγών.

| Αρχικό Κόστος Παραγωγής Βασικής κατάστασης: 255,000 | |
|---|----------|
| N_{cur} | 193 |
| Νέο Κόστος Παραγωγής [m.u.] | 254,934 |
| Πιθανό Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 2554,031 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 3315,403 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 17,922 |

Παραβιάσεις Περιορισμών:

- $slackVup_{i,k} = 0 \forall i, k$
- $slackVdown_{i,k} = 0 \forall i, k$
- $slackLine_{g17-4062,k} = \text{από } 0,229 \text{ έως } 0,234$
- $slackLine_{4062-g17,k} = \text{από } 0,226 \text{ έως } 0,228$

Πίνακας 6.44 : Απόρριψη φορτίου κατά την Εφαρμογή DC – SCOPF (Μέθοδος A) αποτελεσμάτων στο πλήρες AC – SCOPF πρόβλημα Δικτύου 74 Ζυγών.

| k | Αριθμός Απορρίψεων Φορτίου | Συνολική Απόρριψη Φορτίου [MW] |
|--------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 20 | 251,040 |
| 1 | 21 | 266,924 |
| 2 | 19 | 254,558 |
| 3 | 18 | 249,797 |
| 4 | 19 | 256,178 |
| 5 | 20 | 252,447 |
| 6 | 0 | 0 |
| 7 | 19 | 256,092 |
| 8 | 19 | 253,577 |
| 9 | 18 | 250,206 |
| 10 | 20 | 263,212 |
| Σύνολο | 193 | 2554,031 |

Πίνακας 6.45 : Αποτελέσματα Εφαρμογής DC – SCOPF (Μέθοδος Β) αποτελεσμάτων στο πλήρες AC – SCOPF πρόβλημα Δικτύου 74 Ζυγών.

| Αρχικό Κόστος Παραγωγής Βασικής κατάστασης: 255,000 | |
|---|----------|
| N_{cur} | 188 |
| Νέο Κόστος Παραγωγής [m.u.] | 254,806 |
| Πιθανό Κόστος Απόρριψης Φορτίου [m.u.] | 3149,260 |
| Συνολικό Κόστος [m.u.] | 3482,635 |
| Χρόνος Εκτέλεσης [sec] | 14,777 |

Παραβιάσεις Περιορισμών:

- $slackVup_{i,k} = 0 \forall i, k$
- $slackVdown_{i,k} = 0 \forall i, k$
- $slackLine_{g17-4062,6} = 0,227 = slackLine_{4062-g17,6}$
- $slackLine_{1012-1014,1} = 0,156$
- $slackLine_{1014-1012,1} = 0,176$

Πίνακας 6.46 : Απόρριψη φορτίου κατά την Εφαρμογή DC – SCOPF (Μέθοδος Β) αποτελεσμάτων στο πλήρες AC – SCOPF πρόβλημα Δικτύου 74 Ζυγών.

| k | Αριθμός Απορρίψεων Φορτίου | Συνολική Απόρριψη Φορτίου [MW] |
|--------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 12 | 256,600 |
| 1 | 22 | 339,072 |
| 2 | 18 | 306,371 |
| 3 | 19 | 319,948 |
| 4 | 21 | 333,715 |
| 5 | 18 | 306,652 |
| 6 | 0 | 0 |
| 7 | 19 | 317,285 |
| 8 | 20 | 328,131 |
| 9 | 18 | 305,878 |
| 10 | 21 | 335,608 |
| Σύνολο | 188 | 3149,260 |

6.8.5 Συμπεράσματα

Η εφαρμογή των αποτελεσμάτων του Preventive – Corrective DC – SCOPF στο πλήρες AC – SCOPF του δικτύου 3 ζυγών αποδεικνύεται αποτελεσματική. Έχοντας υπολογίσει κατά την DC προσέγγιση τις τιμές ενεργού παραγωγής των γεννητριών για κάθε κατάσταση k , και απαγορεύοντας, σύμφωνα με τα DC αποτελέσματα, την απόρριψη φορτίου σε όλους τους ζυγούς, το πλήρες πρόβλημα επιλύεται αποτελεσματικά. Μάλιστα εκτελείται σε χρόνο ενός δευτερολέπτου και διατηρεί το ιδανικό κόστος παραγωγής βασικής κατάστασης. Σημειώνεται ότι για αριθμητικούς λόγους, οι οποίοι σχετίζονται με τον επιλεγόμενο solver, και για την αποφυγή εμφάνισης σφάλματος επίλυσης, το άνω όριο απόρριψης φορτίου δεν τίθεται ακριβώς μηδέν αλλά ίσο με πολύ μικρό αριθμό 0,0001 στον κώδικα του GAMS.

Περισσότερο ενδιαφέρουσα είναι η εφαρμογή των αποτελεσμάτων του DC – SCOPF στο δίκτυο 74 ζυγών. Κατά την εφαρμογή των αποτελεσμάτων της Μεθόδου Α παρατηρούνται τα εξής: Οι τιμές ενεργού παραγωγής γεννητριών για κάθε κατάσταση k της DC προσέγγισης, οι οποίες προκύπτουν ύστερα από 22 ενέργειες ελέγχου, εφαρμόζονται αυτούσιες στο πλήρες πρόβλημα. Επιπλέον, καθώς το 3^ο Βήμα της DC Μεθόδου δεν πραγματοποιεί απορρίψεις φορτίου, αυτές οφείλουν να απαγορευτούν κατά την επίλυση του πλήρους AC – SCOPF. Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται μια αδυναμία της DC μεθόδου προσέγγισης ενός AC προβλήματος, καθώς με πλήρης απαγόρευση απόρριψης φορτίου, το πρόβλημα καθίσταται μη επιλύσιμο. Μια ελαφριά χαλάρωση της απαγόρευσης αυτής, θέτοντας το άνω όριο απόρριψης φορτίου ανά ζυγό ίσο με 3,5% του φορτίου του εκάστοτε ζυγού, επιτρέπει την επίλυση του προβλήματος. Έτσι πραγματοποιούνται και για τις 10 διαταραχές που συνυπολογίζονται συνολικά 193 απορρίψεις φορτίου (από τις $74 \cdot 10 = 740$ δυνατές απορρίψεις), οι οποίες κατανέμονται σύμφωνα με τον Πίνακα 6.44. Η μεγαλύτερη συνολική απόρριψη φορτίου πραγματοποιείται για $k = 1$ και είναι ίση με 266,924 MW, το οποίο αντιστοιχεί στο 2,4% του συνολικού φορτίου του δικτύου, και δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί. Αναμενόμενα το συνολικό πιθανό κόστος απόρριψης φορτίου για όλες τις διαταραχές αυξάνει το συνολικό κόστος σε 3315,403 m.u. Ταυτόχρονα το κόστος παραγωγής της βασικής κατάστασης μειώνεται ελαφρώς. Από τις τιμές των slack variables παρατηρείται πως δεν παραβιάζεται κανένα όριο μέτρου τάσης ζυγού. Όμως παρατηρείται παραβίαση του περιορισμού μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της γραμμής μεταφοράς g17–4062, για διάφορες τιμές του k . Αυτό σημαίνει πως για την επίλυση του προβλήματος, απαιτείται, για την συγκεκριμένη γραμμή μεταφοράς, χαλάρωση του περιορισμού αυτού από 0,229 pu έως 0,234 pu. Ο χρόνος εκτέλεσης είναι ιδιαίτερα σύντομος και ίσος με περίπου 18 δευτερόλεπτα, εάν ληφθεί υπόψη το συμβατικό μέγεθος ενός AC – SCOPF προβλήματος.

Αντίστοιχες είναι και οι παρατηρήσεις από την εφαρμογή των αποτελεσμάτων της Μεθόδου Β στο πλήρες AC – SCOPF. Πάλι η πλήρης απαγόρευση απόρριψης φορτίου καθιστά το πρόβλημα μη επιλύσιμο. Τώρα απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος να τεθεί το άνω όριο απόρριψης φορτίου ελαφρώς υψηλότερο, συγκεκριμένα 4,4% του φορτίου του εκάστοτε ζυγού. Έτσι πραγματοποιούνται και για τις 10 διαταραχές που συνυπολογίζονται συνολικά 188 απορρίψεις φορτίου, οι οποίες κατανέμονται σύμφωνα με τον Πίνακα 6.46. Η μεγαλύτερη συνολική απόρριψη φορτίου πραγματοποιείται για $k = 1$ και είναι ίση με 339,072 MW, το οποίο αντιστοιχεί στο 3,07% του συνολικού φορτίου του δικτύου, και δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί. Το συνολικό πιθανό κόστος απόρριψης για όλες τις διαταραχές αυξάνει το συνολικό κόστος σε 3482,635 m.u. ενώ το κόστος παραγωγής της βασικής κατάστασης

μειώνεται ελαφρώς. Από τις τιμές των slack variables παρατηρείται πως δεν παραβιάζεται κανένα όριο μέτρου τάσης ζυγού. Όμως παρατηρείται παραβίαση του περιορισμού μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας των γραμμών μεταφοράς g17 – 4062 για $k = 6$ και της γραμμής 1012-1014 για $k = 1$. Αυτό σημαίνει πως για την επίλυση του προβλήματος, απαιτείται, για την γραμμή μεταφοράς g17–4062 χαλάρωση του περιορισμού αυτού κατά 0,227 pu για $k = 6$ και για την γραμμή 1012–1014 χαλάρωση του περιορισμού κατά 0,176 pu για $k = 1$. Ο χρόνος εκτέλεσης είναι πάλι ιδιαίτερα σύντομος και ίσος με περίπου 15 δευτερόλεπτα.

Συγκρίνοντας την εφαρμογή των DC αποτελεσμάτων των Μεθόδων A και B στο πλήρες AC πρόβλημα θα μπορούσε κανείς εύκολα να προτιμήσει την Μέθοδο A καθώς παρουσιάζει χαμηλότερο συνολικό κόστος ή/και χαμηλότερη συνολική απόρριψη φορτίου. Καθώς οι διαφορές όμως παρουσιάζονται μικρές, δύναται να εξαρτώνται από το εκάστοτε δίκτυο υπό εξέταση καθώς και τις διαταραχές που λαμβάνονται υπόψη. Σε γενικές γραμμές είναι αναμενόμενο η εφαρμογή DC αποτελεσμάτων να παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι κατά την DC προσέγγιση δεν λαμβάνεται υπόψη η άεργος ισχύς και συνεπώς δεν υπάρχει εκτίμηση ως προς τη δυνατότητα αέργου παραγωγής των γεννητριών για την κάλυψη του άεργου φορτίου των ζυγών. Επιπλέον δεν λαμβάνεται υπόψη η άεργος αντιστάθμιση, η οποία υφίσταται στο παρόν δίκτυο 74 ζυγών. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, καθώς και τις υπόλοιπες παραδοχές, οι οποίες λαμβάνουν χώρα κατά την εκτέλεση DC προσεγγιστικής επίλυσης ενός προβλήματος, μπορεί να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτής στο AC πρόβλημα δίνουν μια πολύ καλή εκτίμηση για την κατάσταση του δικτύου και την αντιμετώπιση των ενδεχόμενων διαταραχών. Η κάλυψη του συνολικού φορτίου του δικτύου κατά 97,6% και 96,93% αντίστοιχα, με απαίτηση μικρής χαλάρωσης σε περιορισμό μίας και δύο γραμμών αντίστοιχα, ικανοποιεί τις απαιτήσεις εκτίμησης του AC – SCOPF προβλήματος, κυρίως εάν ληφθεί υπόψη ο χρόνος απόκτησης της εκτίμησης αυτής. Σε διάστημα δευτερολέπτων αποκτούνται τα παραπάνω προσεγγιστικά αποτελέσματα, τα οποία σε συμβατική επίλυση ενός AC – SCOPF προβλήματος θα απαιτούσαν πολλές ώρες υπολογισμών.

Ανάλογα με τον διαθέσιμο ερευνητικό χρόνο μπορεί να τεθεί επίσης ζήτημα σύγκρισης της DC προσέγγισης και εν συνεχεία εφαρμογής των αποτελεσμάτων αυτής στο AC – SCOPF, με την PG–CC SCOPF προσέγγιση, τα αποτελέσματα της οποίας αναλύθηκαν στην Ενότητα 6.6. Για το δίκτυο 74 ζυγών, λαμβάνοντας υπόψη τις ίδιες διαταραχές, η PG–CC SCOPF προσέγγιση επιλύει ένα PSCOPF με την πραγματοποίηση μόνο δύο απορρίψεων φορτίου και συνολικού κόστους 280,592 m.u. έναντι του συνολικού κόστους 3315,403 m.u. της DC Μεθόδου A και 3482,635 m.u. της DC Μεθόδου B. Κριτήριο απόφασης για την επιλογή της προσέγγισης αποτελεί ξεκάθαρα ο διαθέσιμος χρόνος καθώς η DC προσέγγιση και η εφαρμογή των αποτελεσμάτων αυτής στο AC – SCOPF αποτελεί διαδικασία δευτερολέπτων και η επίλυση του PG–CC SCOPF προβλήματος απαιτεί 53 λεπτά για όλα τα Βήματα. Τονίζεται ότι οι χρόνοι αυτοί προφανώς ισχύουν για το δίκτυο 74 ζυγών και τις διαταραχές που επιλέχθηκαν να εξεταστούν. Με την αύξηση της κλίμακας του δικτύου και του αριθμού των εξεταζόμενων διαταραχών, αναμένεται η ραγδαία αύξηση του χρόνου εκτέλεσης του PG–CC SCOPF προβλήματος ενώ ο χρόνος εκτέλεσης της DC προσέγγισης αναμένεται να επηρεαστεί σαφώς σε πολύ μικρότερο βαθμό.

6.9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ a_i

Η Μέθοδος Συνάρτησης Προσέγγισης με συντελεστή a_i αναλύθηκε στην Ενότητα 3.4 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ο συντελεστής προσέγγισης a_i , ο οποίος συμπεριλαμβάνεται στη συνάρτηση προσέγγισης (3.21), βοηθά την προσέγγιση των δυαδικών μεταβλητών και συνεπώς παρουσιάζει ενδιαφέρον η εξάρτηση των αποτελεσμάτων από την ακριβή τιμή αυτού. Στη συνέχεια δόθηκαν στον συντελεστή a_i οι τιμές 0,01, 0,001, 0,0001 και 0,00001 και εξετάστηκαν τα αποτελέσματα του προβλήματος με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου για τα τρία εξεταζόμενα δίκτυα. Τα αποτελέσματα για $a_i = 0.0001$ συμπίπτουν προφανώς με τα αποτελέσματα της προσεγγιστικής μεθόδου με συντελεστή a_i της Ενότητας 6.4. Καθώς στο 1^ο Βήμα της Μεθοδολογίας δεν γίνεται χρήση του συντελεστή a_i , σημειώνονται αποτελέσματα για το 2^ο και 3^ο Βήμα σχετικά με τον αριθμό των ενεργειών ελέγχου N , τον χρόνο εκτέλεσης και το συνολικό κόστος.

6.9.1 Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών

Στον Πίνακα 6.47 ακολουθούν τα αποτελέσματα των Βημάτων 2 και 3 για το δίκτυο 3 ζυγών και για διάφορες τιμές του συντελεστή a_i για διακοπή της γραμμής 1–2.

Πίνακας 6.47: Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών για διάφορες τιμές του συντελεστή προσέγγισης a_i για διακοπή γραμμής 1-2.

| a_i | Βήμα 2: MNC–OPF | | | Βήμα 3: EC–OPF | | |
|---------|-----------------|------------------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------------|
| | N | Χρόνος εκτέλεσης [sec] | Συνολικό Κόστος [m.u.] | N | Χρόνος εκτέλεσης [sec] | Συνολικό Κόστος [m.u.] |
| 0,00001 | 1 | 1,035 | 338,128 | 1 | 1,133 | 351,916 |
| 0,0001 | 1 | 0,362 | 338,128 | 1 | 0,364 | 338,128 |
| 0,001 | 1 | 1,009 | 338,128 | 1 | 1,052 | 338,128 |
| 0,01 | 1 | 0,847 | 338,128 | 2 | 1,048 | 347,727 |

6.9.2 Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών

Στον Πίνακα 6.48 ακολουθούν τα αποτελέσματα των Βημάτων 2 και 3 για το δίκτυο 74 ζυγών και για διάφορες τιμές του συντελεστή a_i για διακοπή της γραμμής 4022–4031.

Πίνακας 6.48: Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών για διάφορες τιμές του συντελεστή προσέγγισης a_i για διακοπή γραμμής 4022–4031.

| a_i | Βήμα 2: MNC–OPF | | | Βήμα 3: EC–OPF | | |
|---------|-----------------|------------------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------------|
| | N | Χρόνος εκτέλεσης [sec] | Συνολικό Κόστος [m.u.] | N | Χρόνος εκτέλεσης [sec] | Συνολικό Κόστος [m.u.] |
| 0,00001 | 4 | 4,125 | 336,451 | 4 | 1,102 | 336,378 |
| 0,0001 | 4 | 4,021 | 336,954 | 4 | 3,702 | 336,549 |
| 0,001 | 14 | 3,008 | 337,351 | 14 | 1,12 | 337,351 |
| 0,01 | 8 | 6,539 | 337,018 | 22 | 1,048 | 349,308 |

6.9.3 Αποτελέσματα Δικτύου 118 Ζυγών

Στον Πίνακα 6.49 ακολουθούν τα αποτελέσματα των Βημάτων 2 και 3 για το δίκτυο 118 ζυγών και για διάφορες τιμές του συντελεστή a_i για διακοπή της γραμμής 9–10.

Πίνακας 6.49: Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών για διάφορες τιμές του συντελεστή προσέγγισης a_i για διακοπή γραμμής 9–10.

| a_i | Βήμα 2: MNC–OPF | | | Βήμα 3: EC–OPF | | |
|---------|-----------------|------------------------|------------------------|----------------|------------------------|------------------------|
| | N | Χρόνος εκτέλεσης [sec] | Συνολικό Κόστος [m.u.] | N | Χρόνος εκτέλεσης [sec] | Συνολικό Κόστος [m.u.] |
| 0,00001 | 3 | 37,492 | 137573,021 | 5 | 10,322 | 133850,808 |
| 0,0001 | 3 | 23,898 | 141302,411 | 3 | 19,372 | 133820,905 |
| 0,001 | 3 | 20,377 | 141677,968 | 4 | 3,287 | 133850,808 |
| 0,01 | 46 | 5,082 | 141799,254 | 45 | 13,491 | 133850,808 |

6.9.4 Συμπεράσματα

Στο δίκτυο 3 ζυγών δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές ανάλογα με την τιμή του συντελεστή a_i . Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα του 2^{ου} Βήματος είναι πανομοιότυπα για όλες τις τιμές του a_i . Στο 3^ο Βήμα παρουσιάζεται αύξηση του αριθμού των ενεργειών ελέγχου σε 2 για την μεγαλύτερη τιμή του a_i . Η διαφορά στον χρόνο εκτέλεσης είναι μηδαμινή καθώς σε όλες τις περιπτώσεις βρίσκεται κοντά στο 1 δευτερόλεπτο.

Στο δίκτυο 74 ζυγών παρατηρείται τόσο στο 2^ο όσο και στο 3^ο Βήμα τάση αύξησης του αριθμού ενεργειών ελέγχου με την αύξηση του συντελεστή a_i . Εξαιρέση αποτελεί η τιμή $a_i = 0,001$, η οποία εμφανίζει μεγαλύτερο αριθμό N σε σχέση με την τιμή $a_i = 0,01$. Ως προς τον χρόνο εκτέλεσης δεν υφίστανται μεγάλες διαφορές λόγω του γενικά σύντομου χρόνου επίλυσης των προβλημάτων. Το συνολικό κόστος αυξάνεται ελαφρώς με την αύξηση του συντελεστή a_i .

Στο δίκτυο 118 ζυγών επιβεβαιώνεται η τάση αύξησης του αριθμού ενεργειών ελέγχου με την αύξηση του συντελεστή a_i , με εξαίρεση της τιμής $a_i = 0,00001$ του 3^{ου} Βήματος, το οποίο εμφανίζει μια παραπάνω ενέργεια ελέγχου έναντι της τιμής $a_i = 0,0001$. Ως προς τον χρόνο εκτέλεσης παρατηρείται, κυρίως στο 2^ο Βήμα, τάση αύξησής του με την μείωση του συντελεστή a_i , με κάποιες εξαιρέσεις στο 3^ο Βήμα. Επιπλέον στο 2^ο Βήμα το συνολικό κόστος αυξάνεται πάλι ελαφρώς με την αύξηση του συντελεστή a_i .

Γενικά παρατηρείται πως τα αποτελέσματα του 2^{ου} και 3^{ου} Βήματος επηρεάζονται από την τιμή του συντελεστή a_i . Με την μείωση της τιμής του συντελεστή a_i υφίσταται γενική τάση μείωσης του αριθμού ενεργειών ελέγχου, καθώς και ελαφριά μείωση του συνολικού κόστους, με ταυτόχρονη αύξηση του χρόνου εκτέλεσης του προγράμματος. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς μειώνοντας την τιμή του a_i , αυξάνεται η ακρίβεια της προσέγγισης των δυαδικών μεταβλητών, σύμφωνα με την σχέση (3.21). Έτσι αυξάνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων και βελτιώνεται το αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά δυσκολεύονται οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται. Έτσι, για υπερβολική μείωση του συντελεστή a_i , με στόχο την επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας, όχι μόνο αυξάνεται γενικά

ο χρόνος εκτέλεσης, αλλά δύναται να εμφανιστούν και σφάλματα κατά την επίλυση. Αυτά οφείλονται σε αριθμητικές δυσκολίες τα οποία συναντά ο solver του GAMS, καθώς σύμφωνα με την σχέση (3.21), δύναται να εμφανιστεί στον παρονομαστή τιμή, η οποία είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Αντίθετα, η υπερβολική αύξηση του συντελεστή a_i μειώνει γενικά τον χρόνο εκτέλεσης, αλλά μειώνει την ακρίβεια προσέγγισης των δυαδικών μεταβλητών και ακολούθως και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, τα οποία παρουσιάζονται σαφώς μη ιδανικά. Η καλύτερη ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και χρόνου εκτέλεσης, στα συγκεκριμένα δίκτυα και προβλήματα που εξετάστηκαν, παρατηρήθηκε για τιμή $a_i = 0,0001$, η οποία και χρησιμοποιήθηκε και για την επίλυση όλων των προβλημάτων, εκτός αν αναγράφεται διαφορετικά.

6.10 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ε

Με ανάλογο τρόπο εξετάζεται η επιρροή της τιμής του συντελεστή απόκλισης ε , ο οποίος χρησιμοποιείται στο 3^ο Βήμα της Μεθοδολογίας τριών Βημάτων και δεν επιτρέπει την περαιτέρω από αυτόν απόκλιση του συνολικού κόστους f από το ιδανικό κόστος f^* , το οποίο υπολογίστηκε στο 1^ο Βήμα της μεθοδολογίας. Η τιμή του μεταβάλλεται σε βήματα του 1% από 1% έως 10% και επιλύεται το 3^ο Βήμα του προβλήματος με ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου για κάθε εξεταζόμενο δίκτυο καθώς και για κάθε μία από τις τρεις μεθόδους εφαρμογής. Σημειώνονται αποτελέσματα του 3ου Βήματος της Μεθοδολογίας σχετικά με την απόρριψη φορτίου, το συνολικό κόστος, τον αριθμό των ενεργειών ελέγχου N και τον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος. Τα αποτελέσματα για $\varepsilon = 5\%$ συμπίπτουν προφανώς με τα αποτελέσματα της Ενότητας 6.4.

6.10.1 Αποτελέσματα Δικτύου 3 Ζυγών

Στον Πίνακα 6.50 ακολουθούν τα αποτελέσματα του 3^{ου} Βήματος για το δίκτυο 3 ζυγών και για διάφορες τιμές του συντελεστή ε , για διακοπή της γραμμής 1–2.

Πίνακας 6.50: Αποτελέσματα 3^{ου} Βήματος Δικτύου 3 Ζυγών για διάφορες τιμές του συντελεστή απόκλισης ε , για διακοπή γραμμής 1–2.

| $\varepsilon\%$ | Συμβατική | | | | Προσέγγιση a_i | | | | Προσέγγιση L_1 | | | |
|-----------------|---------------------|----------------------|--------------|---|---------------------|----------------------|--------------|---|---------------------|----------------------|--------------|---|
| | Απόρρ. Φορτίου [pu] | Συν/κό Κόστος [m.u.] | Χρόνος [sec] | N | Απόρρ. Φορτίου [pu] | Συν/κό Κόστος [m.u.] | Χρόνος [sec] | N | Απόρρ. Φορτίου [pu] | Συν/κό Κόστος [m.u.] | Χρόνος [sec] | N |
| 1 | 0,304 | 340,909 | 0,357 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,525 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,334 | 1 |
| 2 | 0,305 | 341,886 | 0,324 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,292 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,412 | 1 |
| 3 | 0,308 | 344,826 | 0,327 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,396 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,315 | 1 |
| 4 | 0,306 | 343,237 | 0,324 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,341 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,222 | 1 |
| 5 | 0,314 | 351,506 | 0,324 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,364 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,509 | 1 |
| 6 | 0,318 | 354,85 | 0,34 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,387 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,353 | 1 |
| 7 | 0,321 | 358,191 | 0,344 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,396 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,331 | 1 |
| 8 | 0,324 | 361,273 | 0,345 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,41 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,243 | 1 |
| 9 | 0,327 | 364,173 | 0,344 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,329 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,299 | 1 |
| 10 | 0,33 | 367,07 | 0,35 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,371 | 1 | 0,301 | 338,128 | 0,46 | 1 |

6.10.2 Αποτελέσματα Δικτύου 74 Ζυγών

Στον Πίνακα 6.51 ακολουθούν τα αποτελέσματα του 3^{ου} Βήματος για το δίκτυο 74 ζυγών και για διάφορες τιμές του συντελεστή ε , για διακοπή της γραμμής 4031–4041.

Πίνακας 6.51: Αποτελέσματα 3^{ου} Βήματος Δικτύου 74 Ζυγών για διάφορες τιμές του συντελεστή απόκλισης ε , για διακοπή γραμμής 4031–4041.

| $\varepsilon\%$ | Συμβατική | | | | Προσέγγιση a_i | | | | Προσέγγιση L_1 | | | |
|-----------------|---------------------|----------------------|--------------|---|---------------------|----------------------|--------------|---|---------------------|----------------------|--------------|----|
| | Απόρρ. Φορτίου [MW] | Συν/κό Κόστος [m.u.] | Χρόνος [sec] | N | Απόρρ. Φορτίου [MW] | Συν/κό Κόστος [m.u.] | Χρόνος [sec] | N | Απόρρ. Φορτίου [MW] | Συν/κό Κόστος [m.u.] | Χρόνος [sec] | N |
| 1 | 575,196 | 316,829 | 58,424 | 3 | 545,167 | 314,397 | 1,707 | 5 | 567,918 | 316,611 | 1,43 | 3 |
| 2 | 604,898 | 319,887 | 38,469 | 3 | 548,348 | 314,702 | 1,844 | 4 | 567,918 | 316,611 | 8,915 | 3 |
| 3 | 635,387 | 322,945 | 39,261 | 3 | 557,547 | 315,609 | 2,455 | 4 | 567,918 | 316,611 | 1,336 | 3 |
| 4 | 666,554 | 326,051 | 37,913 | 3 | 549,557 | 314,823 | 1,864 | 3 | 567,918 | 316,611 | 1,183 | 3 |
| 5 | 695,857 | 328,968 | 37,775 | 3 | 551,545 | 315,016 | 2,266 | 3 | 586,72 | 318,484 | 1,467 | 11 |
| 6 | 722,354 | 331,633 | 38,422 | 3 | 551,54 | 315,015 | 2,195 | 3 | 585,772 | 318,38 | 1,439 | 11 |
| 7 | 735,582 | 332,987 | 37,412 | 3 | 561,082 | 315,923 | 2,527 | 3 | 567,918 | 316,611 | 1,158 | 3 |
| 8 | 739,013 | 333,339 | 38,685 | 3 | 554,841 | 315,349 | 2,21 | 3 | 585,785 | 318,381 | 1,547 | 11 |
| 9 | 738,977 | 333,339 | 37,931 | 3 | 551,54 | 315,015 | 2,491 | 3 | 585,88 | 318,39 | 1,613 | 11 |
| 10 | 738,603 | 333,304 | 39,333 | 3 | 551,545 | 315,016 | 2,776 | 3 | 567,918 | 316,611 | 2,561 | 3 |

6.10.3 Αποτελέσματα Δικτύου 118 Ζυγών

Στον Πίνακα 6.52 ακολουθούν τα αποτελέσματα του 3^{ου} Βήματος για το δίκτυο 118 ζυγών και για διάφορες τιμές του συντελεστή ε , για διακοπή της γραμμής 5–8.

Πίνακας 6.52: Αποτελέσματα 3^{ου} Βήματος Δικτύου 118 Ζυγών για διάφορες τιμές του συντελεστή απόκλισης ε , για διακοπή γραμμής 5–8.

| $\varepsilon\%$ | Συμβατική | | | | Προσέγγιση a_i | | | | Προσέγγιση L_1 | | | |
|-----------------|---------------------|----------------------|--------------|---|---------------------|----------------------|--------------|---|---------------------|----------------------|--------------|---|
| | Απόρρ. Φορτίου [MW] | Συν/κό Κόστος [m.u.] | Χρόνος [sec] | N | Απόρρ. Φορτίου [MW] | Συν/κό Κόστος [m.u.] | Χρόνος [sec] | N | Απόρρ. Φορτίου [MW] | Συν/κό Κόστος [m.u.] | Χρόνος [sec] | N |
| 1 | 101,874 | 123469,954 | 63,942 | 3 | 89,014 | 123476,548 | 2,454 | 3 | 103,201 | 123476,548 | 4,332 | 3 |
| 2 | 110,524 | 124675,8 | 93,272 | 3 | 92,454 | 124699,088 | 2,555 | 4 | 100,258 | 124699,088 | 8,646 | 3 |
| 3 | 120,924 | 125866,102 | 90,442 | 3 | 115,046 | 125921,628 | 4,947 | 3 | 98,952 | 125921,628 | 8,219 | 3 |
| 4 | 127,771 | 126405,206 | 133,853 | 3 | 90,517 | 127144,168 | 4,272 | 3 | 98,591 | 127144,162 | 1,793 | 3 |
| 5 | 149,299 | 128249,782 | 176,739 | 3 | 119,771 | 128366,708 | 10,655 | 2 | 98,562 | 128290,728 | 2,764 | 3 |
| 6 | 162,663 | 129413,416 | 351,459 | 3 | 119,891 | 129589,248 | 6,907 | 2 | 102,721 | 128849,482 | 232,729 | 3 |
| 7 | 138,648 | 130783,092 | 19,072 | 2 | 107,875 | 127297,375 | 7,122 | 3 | 98,562 | 128563,679 | 231,605 | 3 |
| 8 | 181,578 | 132007,755 | 41,577 | 2 | 115,607 | 130265,668 | 15,184 | 3 | 98,562 | 128567,334 | 6,848 | 3 |
| 9 | 182,374 | 133130,836 | 41,441 | 2 | 119,894 | 130654 | 10,451 | 2 | 98,562 | 128569,415 | 66,527 | 3 |
| 10 | 182,481 | 133755,634 | 43,869 | 2 | 138,911 | 132447,08 | 11,318 | 3 | 98,562 | 128570,521 | 2,149 | 3 |

6.10.4 Συμπεράσματα

Στο δίκτυο 3 ζυγών παρατηρείται στην Συμβατική Μέθοδος, ότι η αύξηση του συντελεστή ε οδηγεί στην αύξηση του συνολικού κόστους καθώς και της απόρριψης φορτίου που πραγματοποιείται, με σταθερή τιμή αριθμού ενεργειών ελέγχου. Αντίθετα, στις Μεθόδους Προσέγγισης a_i και L_1 η αύξηση του συντελεστή ε δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα, τα οποία είναι πανομοιότυπα. Ως προς τον χρόνο εκτέλεσης δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές, με αυτόν να βρίσκεται πάντα κάτω από ένα δευτερόλεπτο.

Στο δίκτυο 74 ζυγών παρατηρείται και στις τρεις Μεθόδους, ότι η αύξηση του συντελεστή ε οδηγεί στην αύξηση του συνολικού κόστους καθώς και της απόρριψης φορτίου που πραγματοποιείται. Συγκριτικά, η αύξηση αυτή είναι μικρότερη στην Μέθοδο Προσέγγισης a_i , ελαφρώς μεγαλύτερη στην Μέθοδο Προσέγγισης L_1 και αρκετά μεγαλύτερη στη Συμβατική Μέθοδο. Η τελευταία παρουσιάζει σταθερό αριθμό ενεργειών ελέγχου για όλες τις τιμές του συντελεστή ε , ενώ η Μέθοδος Προσέγγισης a_i εμφανίζει τάση μείωσης του αριθμού ενεργειών ελέγχου με την αύξηση του συντελεστή ε ώσπου αυτός λάβει τιμή 4%, όπου η περαιτέρω αύξηση αυτού δεν αυξάνει τον αριθμό ενεργειών ελέγχου. Αντίθετα η Μέθοδος Προσέγγισης L_1 παρουσιάζει μεγαλύτερη ασυνέπεια ως προς τον αριθμό ενεργειών ελέγχου, παρόλο που για χαμηλότερες τιμές του συντελεστή ε (1% έως 3%) παρουσιάζει χαμηλότερο αριθμό ενεργειών ελέγχου έναντι της Προσέγγισης a_i . Έτσι για $\varepsilon = 5\%$, 6% , 8% και 9% παρατηρείται απότομη αύξηση των ενεργειών ελέγχου στην τιμή 11. Ως προς τον χρόνο εκτέλεσης, οι 2 προσεγγιστικές μέθοδοι είναι ιδιαίτερα ταχείες με ασήμαντες διαφορές για διάφορες τιμές του συντελεστή ε . Η Συμβατική Μέθοδος, όντας η σαφώς αργότερη, διατηρεί χρόνο επίλυσης σχετικά σταθερό και κοντά στα 40 δευτερόλεπτα, με μόνη διαφορά να παρουσιάζεται για τιμή $\varepsilon=1\%$ όπου ο χρόνος επίλυσης ανέρχεται στο 1 λεπτό.

Στο δίκτυο 118 ζυγών παρατηρείται εκ νέου η τάση αύξησης του συνολικού κόστους και της απόρριψης φορτίου με την αύξηση του συντελεστή ε για όλα τα δίκτυα. Η αύξηση αυτή παρουσιάζεται μεγαλύτερη πάλι στη Συμβατική Μέθοδο και μικρότερη στις προσεγγιστικές μεθόδους. Η αύξηση του συνολικού κόστους στις προσεγγιστικές μεθόδους γίνεται με αντίστοιχο ρυθμό ώσπου ο συντελεστής ε λαμβάνει τιμή 7%, όπου η περαιτέρω αύξησή του αυξάνει το κόστος της Προσέγγισης a_i αλλά όχι ιδιαίτερα της Προσέγγισης L_1 . Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι διαφορές που παρουσιάζονται στη σύνθεση της λύσης μεταξύ των δύο προσεγγιστικών μεθόδων. Παρατηρείται ότι, παρόλο που το συνολικό κόστος βρίσκεται σε παρόμοια επίπεδα, η απόρριψη φορτίου στη Μέθοδο Προσέγγισης L_1 είναι σαφώς μικρότερη. Αυτό οφείλεται στον τρόπο βελτιστοποίησης της Προσέγγισης L_1 , η αντικειμενική συνάρτηση της οποίας αποσκοπεί στον περιορισμό της απόρριψης φορτίου, έναντι της Προσέγγισης a_i , η οποία αποσκοπεί στον περιορισμό του αριθμού ενεργειών απόρριψης φορτίου. Ως προς τον αριθμό ενεργειών ελέγχου, η Συμβατική Μέθοδος εμφανίζει τάση μείωσης αυτού με την αύξηση του συντελεστή ε , ενώ η Προσέγγιση L_1 παρουσιάζει τον ίδιο αριθμό ενεργειών ελέγχου για κάθε τιμή του συντελεστή ε . Αυτό σημαίνει, ότι έναντι της ακριβέστερης Συμβατικής Μεθόδου, για αδυνατεί να καταστείλει μία ενέργεια ελέγχου για $\varepsilon = 7\%$, 8% , 9% και 10% . Η Μέθοδος Προσέγγισης a_i αδυνατεί να καταστείλει μία ενέργεια ελέγχου για $\varepsilon = 2\%$, 7% , 8% και 10% . Επιπλέον, για $\varepsilon = 5\%$ και 6% , παρουσιάζει παραδόξως μια λιγότερη ενέργεια ελέγχου έναντι της Συμβατικής Μεθόδου, πράγμα το οποίο αναλύθηκε στην Ενότητα και οφείλεται σε απορρίψεις φορτίου, οι οποίες δεν προσμετρούνται στις συνολικές, λόγω του μικρού μεγέθους τους. Σχετικά με τον χρόνο επίλυσης, η Συμβατική

Μέθοδος, όντας σαφώς η αργότερη, παρουσιάζει χρόνο εκτέλεσης, ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 19 δευτερολέπτων έως σχεδόν 6 λεπτών, χωρίς να διαφαίνεται σχέση αναλογίας με τον συντελεστή ε . Η Μέθοδος Προσέγγισης παρουσιάζει πάλι σχετικά σταθερό χρόνο εκτέλεσης, ο οποίος δεν ξεπερνά τα 15 δευτερόλεπτα και συνήθως είναι μικρότερος των 10 δευτερολέπτων. Μεγάλη ασυνέπεια ως προς τον χρόνο επίλυσης παρουσιάζει η Μέθοδος Προσέγγισης L_1 , η οποία συνήθως εκτελείται σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 10 δευτερολέπτων, αλλά για $\varepsilon = 9\%$ ξεπερνά το 1 λεπτό και για $\varepsilon = 6\%$ και 7% αγγίζει τα 4 λεπτά.

Σε γενικές γραμμές μπορεί να παρατηρηθεί ότι η μεταβολή του συντελεστή ε επηρεάζει ελαφρώς τον αριθμό των ενεργειών ελέγχου. Αυτό συμβαίνει, καθώς αυξάνοντας την τιμή του ε , δίνεται μεγαλύτερο περιθώριο απόκλισης από το ιδανικό κόστος, άρα δύναται και η δυνατότητα επίλυσης του προβλήματος με λιγότερες, αλλά μεγαλύτερες σε μέγεθος, απορρίψεις φορτίου, οι οποίες αυξάνουν το συνολικό κόστος. Στην ελαφριά αυτή τάση μείωσης των ενεργειών ελέγχου με την αύξηση του συντελεστή ε , υπάρχουν και εξαιρέσεις, οι οποίες αναφέρθηκαν προηγουμένως και αποδεικνύουν ότι το αποτέλεσμα εξαρτάται και από την συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζεται. Ως προς το συνολικό κόστος παρατηρείται η αύξηση του συντελεστή ε να αυξάνει το συνολικό κόστος, καθώς δίνεται μεγαλύτερο περιθώριο απόκλισης από το ιδανικό. Η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη στη Συμβατική Μέθοδο, η οποία φαίνεται να κινείται πάντα ακριβώς στο όριο του $(1 + \varepsilon) \cdot f^*$ ενώ οι προσεγγιστικές μέθοδοι βρίσκονται πιο κάτω από αυτό. Ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος, για όλες τις μεθόδους, εξαρτάται σαφώς από τον συντελεστή ε , χωρίς όμως να υπάρχει κάποια αναλογία με αυτόν, άρα διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεν υφίσταται κάποια ιδανική τιμή του συντελεστή ε . Όλες οι τιμές του συντελεστή ε που εξετάστηκαν οδήγησαν σε αποτελεσματική εκτέλεση της Μεθοδολογίας τριών Βημάτων και η επιλογή της τιμής αυτού εξαρτάται καθαρά από τις ερευνητικές ανάγκες, δηλαδή την επιθυμητή ανοχή απόκλισης από το ιδανικό κόστος επίλυσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

7.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου σε προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος καθώς και σε προβλήματα βέλτιστης ροής ισχύος υπό περιορισμούς ασφαλείας. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού εφαρμόστηκε Μεθοδολογία 3 Βημάτων, η οποία αναπτύχθηκε στο λογισμικό GAMS και είναι ικανή να περατωθεί μετά από οποιοδήποτε βήμα, όταν τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Η μεθοδολογία αυτή παρακάμπτει την ανάγκη υπολογισμού της ακριβούς σχέσης (trade off) μεταξύ συνολικού κόστους και αριθμού ενεργειών ελέγχου, πράγμα το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλο υπολογιστικό βάρος. Αντίθετα, στηρίζεται στη λογική της εύρεσης του ιδανικού συνολικού κόστους στο 1^ο Βήμα και την εύρεση του ελάχιστου απαραίτητου αριθμού ενεργειών ελέγχου, για την επίλυση του προβλήματος, στο 2^ο Βήμα. Τέλος, στο 3^ο Βήμα πραγματοποιείται η εξισορρόπηση μεταξύ του ιδανικού κόστους και του ελάχιστου αριθμού ενεργειών ελέγχου, καθώς δίνεται επιπλέον η δυνατότητα, μέσω ανάλογου συντελεστή απόκλισης ε , του καθορισμού της επιθυμητής μέγιστης απόκλισης από το ιδανικό κόστος.

Η μεθοδολογία αρχικά εφαρμόζεται σε πρόβλημα OPF, όπου ως ενέργειες ελέγχου λαμβάνονται οι απορρίψεις φορτίου που πραγματοποιούνται σε κάθε ζυγό του εξεταζόμενου δικτύου. Στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή σε πρόβλημα OPF, στο οποίο ως ενέργειες ελέγχου λαμβάνονται όχι μόνο οι απορρίψεις φορτίου, αλλά προσμετρούνται και τυχόν απαραίτητες μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητριών. Τα δύο αυτά προβλήματα επιλύονται για λόγους σύγκρισης με τρεις τρόπους. Η Συμβατική Μέθοδος κάνει χρήση δυαδικών μεταβλητών και αποτελεί το μέτρο σύγκρισης (benchmark) για τις δύο προσεγγιστικές μεθόδους, οι οποίες ονομάστηκαν Μέθοδος Προσέγγισης με συντελεστή a_i και Μέθοδος Προσέγγισης L_1 . Ο ρόλος και η επίδραση των συντελεστών a_i και ε στην επίλυση των προβλημάτων εξετάστηκε στην διπλωματική εργασία.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε επέκταση της Μεθοδολογίας τριών Βημάτων προκειμένου να λαμβάνονται υπόψη περιορισμοί ασφαλείας και συνεπώς να εφαρμοστεί σε προβλήματα SCOPF. Έτσι, αρχικά εφαρμόζεται για την καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου, σε παραλλαγή προβλήματος Preventive SCOPF, το οποίο στην παρούσα διπλωματική εργασία ονομάστηκε PG-CC SCOPF και λαμβάνει ως ενέργειες ελέγχου τυχόν προληπτικές μεταβολές ενεργού παραγωγής γεννητριών, καθώς και μεταγενέστερες απορρίψεις φορτίου. Η εφαρμογή αυτή πραγματοποιεί τα τρία βήματα μέσω της Μεθόδου Προσέγγισης με συντελεστή a_i .

Τέλος, η Μεθοδολογία τριών Βημάτων εφαρμόστηκε σε πρόβλημα Preventive – Corrective AC – SCOPF, το οποίο, λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητάς του, αντιμετωπίστηκε αρχικά μέσω προσέγγισης DC ροής ισχύος, και κάνοντας επιπλέον χρήση δύο διαφορετικών

τρόπων απαρίθμησης των ενεργειών ελέγχου. Η Μέθοδος A προσμετρά στις ενέργειες ελέγχου τις απορρίψεις φορτίου καθώς και τις προληπτικές και διορθωτικές ενέργειες ελέγχου, ενώ η Μέθοδος B προσμετρά μόνο τα δύο πρώτα μεγέθη. Τα αποτελέσματα των DC προσεγγίσεων στη συνέχεια εφαρμόστηκαν στο πλήρες πρόβλημα AC-SCOPF για την εξαγωγή των συμπερασμάτων και την αξιολόγηση της πραγματοποιούμενης προσέγγισης.

Για την εξέταση των αναφερόμενων προβλημάτων πραγματοποιήθηκε προσομοίωση στο λογισμικό GAMS όπου μελετήθηκαν 3 διαφορετικά δίκτυα, ένα δίκτυο 3 ζυγών, το δίκτυο 74 ζυγών Nordic32 και το δίκτυο 118 ζυγών IEEE118. Ως διαταραχές στα OPF προβλήματα πραγματοποιήθηκαν διακοπές γραμμών μεταφοράς και ως περιορισμοί ασφαλείας στα SCOPF προβλήματα λήφθηκαν υπόψη 10 διακοπές γραμμών μεταφοράς.

7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κυριότερα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Η Μεθοδολογία 3 Βημάτων λειτουργεί αποτελεσματικά για την καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου. Στο 1^ο Βήμα υπολογίζεται το ελάχιστο δυνατό κόστος, με οποιονδήποτε αριθμό ενεργειών ελέγχου N προκύψει, συνήθως με υψηλό N . Στο 2^ο Βήμα υπολογίζεται ο ελάχιστος αριθμός ενεργειών ελέγχου με οποιονδήποτε (συνήθως υψηλό) κόστος προκύψει. Τέλος, στο 3^ο Βήμα επιτυγχάνεται η ισορροπία μεταξύ κόστους και ενεργειών ελέγχου σύμφωνα με τον συντελεστή απόκλισης ϵ . Η ισορροπία αυτή επιτυγχάνεται με την καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου.

Ως προς τις μεθόδους εφαρμογής, η Συμβατική Μέθοδος είναι η πλέον ακριβής, αλλά ταυτόχρονα και με διαφορά η πλέον χρονοβόρα από πλευράς χρόνου επίλυσης, λόγω της ύπαρξης των δυαδικών μεταβλητών. Η Μέθοδος Προσέγγισης L_1 συνήθως απαιτεί τον μικρότερο χρόνο επίλυσης, αλλά παρουσιάζει και την μεγαλύτερη ασυνέπεια στην αναγνώριση του ελάχιστου αριθμού ενεργειών ελέγχου (Βήμα 2) και στην καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου (Βήμα 3). Η Μέθοδος Προσέγγισης a_i εμφανίζεται ως η καλύτερη ισορροπία μεταξύ ακρίβειας αποτελεσμάτων και χρόνου εκτέλεσης του προγράμματος. Εκτελείται σε χρόνο πρακτικό και τα αποτελέσματα έχουν μικρή απόκλιση από τα αποτελέσματα της Συμβατικής Μεθόδου, συνεπώς η Μέθοδος Προσέγγισης a_i αποτελεί την προτεινόμενη μέθοδο εφαρμογής, κυρίως για προβλήματα με μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, όπου η Συμβατική Μέθοδος λαμβάνει πρακτικά απαγορευτικές διαστάσεις.

Η χρήση της Μεθόδου Προσέγγισης a_i για την αντιμετώπιση του PG-CC SCOPF προβλήματος κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματική καθώς πραγματοποιείται επιτυχώς η καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου, χωρίς η απόκλιση του συνολικού κόστους να υπερβαίνει το ιδανικό κόστος πέραν του καθοριζόμενου ορίου. Σχετικά με τον χρόνο εκτέλεσης, συγκρίνοντας με την προσπάθεια επίλυσης μέσω Συμβατικής Μεθόδου, η οποία δεν επέφερε λύση μετά από 6 ώρες εκτέλεσης του προγράμματος, γίνεται εμφανές το τεράστιο χρονικό πλεονέκτημα το οποίο παρουσιάζει η προτεινόμενη Μέθοδος Προσέγγισης a_i . Το πλεονέκτημα αυτό προβλέπεται να αυξηθεί μαζί με την κλίμακα του δικτύου ή/και τον αριθμό των περιορισμών ασφαλείας.

Η Μεθοδολογία 3 Βημάτων μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά και για την επίλυση προβλημάτων DC SCOPF τόσο με την Μέθοδο A όσο και την Μέθοδο B, οι οποίες απαριθμούν διαφορετικά μεγέθη στις συνολικές ενέργειες ελέγχου. Τονίζεται ότι τα μεγέθη, τα

οποία συνυπολογίζονται στις συνολικές ενέργειες ελέγχου, δεν επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας, η οποία επιτυγχάνει την καταστολή των εκάστοτε αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου. Έτσι, ανάλογα με τις ερευνητικές ανάγκες, μπορεί να επιλεγθεί διαφορετικός τρόπος απαρίθμησης των ενεργειών ελέγχου N , και στη συνέχεια να εφαρμοστούν τα 3 Βήματα της μεθοδολογίας.

Οι αναμενόμενες δυσκολίες, οι οποίες παρουσιάζονται κατά την εφαρμογή αποτελεσμάτων DC προσέγγισης σε πλήρες AC SCOPF πρόβλημα, δεν μειώνουν την αξία της μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Αντίθετα, παρά τις παραδοχές που υφίστανται κατά την DC προσέγγιση ενός προβλήματος, τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτής της προσέγγισης στο AC πρόβλημα δίνουν μια πολύ καλή εκτίμηση για την κατάσταση του δικτύου και την αντιμετώπιση των ενδεχόμενων διαταραχών. Πραγματοποιείται κάλυψη του συνολικού φορτίου του δικτύου κατά 97,6% (Μέθοδος Α) και 96,93% (Μέθοδος Β) αντίστοιχα, με απαίτηση μικρής χαλάρωσης σε περιορισμό μίας και 2 γραμμών μεταφοράς αντίστοιχα, χωρίς την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών. Ικανοποιούνται οι απαιτήσεις εκτίμησης του προβλήματος AC-SCOPF, κυρίως εάν ληφθεί υπόψη ο χρόνος απόκτησης της εκτίμησης αυτής. Σε διάστημα δευτερολέπτων αποκτούνται τα παραπάνω αποτελέσματα, τα οποία σε συμβατική επίλυση ενός AC SCOPF προβλήματος θα απαιτούσαν πολλές ώρες υπολογισμών.

Οι συμβατικές προσεγγίσεις προβλημάτων OPF και SCOPF, τα οποία δεν εξετάζουν με κάποιο τρόπο τον αριθμό των ενεργειών ελέγχου καταλήγουν σε μια βέλτιστη λύση, η οποία συνήθως προκύπτει από μεταβολή των περισσότερων ή ακόμη και όλων των μεταβλητών ελέγχου. Συνεπώς, προκύπτει μια βέλτιστη λύση ακαδημαϊκού χαρακτήρα με ιδιαίτερα μεγάλο αριθμό ενεργειών ελέγχου. Αυτός ο μεγάλος αριθμός ενεργειών ελέγχου είναι δύσκολος τόσο να ερμηνευτεί όσο και να υλοποιηθεί από τον TSO, ο οποίος επιθυμεί έναν μικρότερο αριθμό ενεργειών ελέγχου, που μπορούν να εφαρμοστούν πρακτικά σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα τόσο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, όπου επιθυμεί να αντιμετωπίσει κάποια διαταραχή και να εξασφαλίσει την ακεραιότητα του συστήματος, όσο και υπό φυσιολογικές συνθήκες, όπου σκοπεύει να βελτιστοποιήσει την λειτουργία του συστήματος. Η αποτελεσματικότητα εφαρμογής της προτεινόμενης, από την παρούσα διπλωματική εργασία, μεθοδολογίας οδηγεί σε μεγαλύτερη διαφάνεια ως προς την παρεχόμενη λύση του προβλήματος OPF ή SCOPF. Αρχικά, μέσω του 2^{ου} Βήματος υπολογίζεται ο ελάχιστος αριθμός απαραίτητων ενεργειών ελέγχου, πράγμα το οποίο δίνει στον TSO ένα πρακτικά εύκολα κατανοητό φυσικό όριο, βάση του οποίου προχωρά στην εκτίμησή του.

Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι όσο λεπτομερές και να είναι η προσομοίωση κάποιου συστήματος, πάντοτε δεν αντιπροσωπεύει στο 100% τα πραγματικά δεδομένα, καθώς υπάρχουν μεγέθη, τα οποία δεν είναι απολύτως γνωστά ή δεν παραμένουν απολύτως σταθερά στον χρονικό ορίζοντα ενός προβλήματος OPF και SCOPF. Έτσι, η παροχή από το 3^ο Βήμα του αριθμού των αποκλειστικά αποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου, έναντι του τεράστιου αριθμού ενεργειών ελέγχου των συμβατικών μεθόδων, εξασφαλίζει με μεγάλη πιθανότητα, ότι αυτές θα παραμείνουν και οι αποτελεσματικές ενέργειες ελέγχου υπό πραγματικές συνθήκες. Επιπλέον, οι αποτελεσματικές ενέργειες ελέγχου, όντας σαφώς λιγότερες, διευκολύνουν τον TSO στη σύνδεσή τους με την λειτουργία του συστήματος, δηλαδή τον βοηθούν να κατανοήσει ευκολότερα γιατί εφαρμόζονται, πως αυτές συνδέονται με το συνολικό κόστος λειτουργίας και να εκτιμήσει εάν αυτό συμβαδίζει με τις εμπειρίες του ίδιου για να πράξει ανάλογα.

Συνοψίζοντας, η μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία οδήγησε στην αποτελεσματική ανάπτυξη και επέκταση μεθοδολογίας με σκοπό την καταστολή των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου στα προβλήματα, τα οποία αναφέρονται στον Πίνακα 7.1.

Αναφέρονται σε κάθε περίπτωση ποιες είναι οι ενέργειες ελέγχου του συστήματος, ποιος είναι ο μέγιστος χρόνος επίλυσης και των τριών βημάτων που συναντήθηκε με την Συμβατική Μέθοδο, ποιος ο χρόνος επίλυσης με την Μέθοδο Προσέγγισης a_i καθώς και τα θετικά και αρνητικά ευρήματα που σημειώθηκαν.

Πίνακας 7.1 : Σύνοψη εφαρμογής μεθοδολογίας τριών βημάτων στα OPF και SCOPF προβλήματα που εξετάστηκαν.

| Πρόβλημα | Ενέργειες ελέγχου | Συμβατικός Χρόνος | Χρόνος Προσέγγισης a_i | Παρατηρήσεις (+ / -) |
|--------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|--|
| OPF | - Απορρίψεις Φορτίου | έως 7,5 λεπτά | έως 43 δευτερόλεπτα | + Ικανοποιητική ακρίβεια + Χρονικό πλεονέκτημα ανάλογο με την κλίμακα του συστήματος - ευαισθησία μέτρησης ενεργειών ελέγχου |
| OPF | - Απορρίψεις Φορτίου - Μεταβολές ενεργού παραγωγής | έως 10 λεπτά και 20 δευτερόλεπτα | έως 20 δευτερόλεπτα | + Ικανοποιητική ακρίβεια + Χρονικό πλεονέκτημα ανάλογο με την κλίμακα του συστήματος |
| PG-CC SCOPF | - Προληπτικές - Απορρίψεις Φορτίου | > 6 ώρες | 53 λεπτά | + Τεράστιο χρονικό πλεονέκτημα |
| DC SCOPF A | - Προληπτικές - Διορθωτικές - Απορρίψεις Φορτίου | έως 1,5 δευτερόλεπτα | δεν υφίστανται δυαδικές μεταβλητές | + Επιτυχής καταστολή αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου για καθαρά DC προσέγγιση |

Πίνακας 7.1 : Σύνοψη εφαρμογής μεθοδολογίας τριών βημάτων στα OPF και SCOPF προβλήματα που εξετάστηκαν (συνέχεια).

| Πρόβλημα | Ενέργειες ελέγχου | Συμβατικός Χρόνος | Χρόνος Προσέγγισης a_i | Παρατηρήσεις (+ / -) |
|--|--|----------------------|------------------------------------|---|
| DC SCOPF B | - Προληπτικές Απορρίψεις Φορτίου | έως 1,3 δευτερόλεπτα | δεν υφίστανται δυαδικές μεταβλητές | + Πολύ χαμηλός αριθμός προληπτικών ενεργειών ελέγχου - επιτρέπει εξορισμού (πολλές) διορθωτικές ενέργειες ελέγχου |
| Εφαρμογή DC αποτελεσμάτων σε AC SCOPF | - Προληπτικές - Διορθωτικές - Απορρίψεις Φορτίου | έως 18 δευτερόλεπτα | δεν απαιτείται | + Τεράστιο χρονικό πλεονέκτημα - Παραβίαση δύο περιορισμών - Απαίτηση να επιτραπούν απορρίψεις φορτίου έως 4,4% του συνολικού φορτίου |

7.3 ΠΙΘΑΝΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελλοντικά δύναται να επεκταθεί ως εξής:

- Επέκταση κώδικα για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την συμπεριφορά επίλυσης μεγαλύτερων και πολυπλοκότερων συστημάτων και επέκταση της μεθοδολογίας ώστε να πραγματοποιείται αυτόματη επιλογή ή/και ιεράρχηση των σημαντικότερων διαταραχών που δύναται να εμφανιστούν.
- Επέκταση της μοντελοποίησης των πιθανών ενεργειών ελέγχου του δικτύου, π.χ. συνυπολογισμός χρόνου απόκρισης γεννητριών και γενικότερα χρόνου υλοποίησης ενεργειών ελέγχου, είδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και κόστος ενεργειών ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό δύναται, πέραν του περιορισμού των αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου, η δυνατότητα να προστεθεί βαρύτητα σε αυτές, άρα και προτίμηση ορισμένων ενεργειών ελέγχου έναντι άλλων.

- Εισαγωγή στην μοντελοποίηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) σε συνδυασμό με σταθμούς συσσωρευτών, με σκοπό την εξέταση της περαιτέρω μείωσης αναποτελεσματικών ενεργειών ελέγχου του υπόλοιπου δικτύου.
- Εμβάθυνση στη μοντελοποίηση των περιορισμών ασφαλείας με περισσότερη ακρίβεια, π.χ. ο συνυπολογισμός της πιθανότητας εμφάνισης κάποιας διαταραχής, της σοβαρότητας εμφάνισής της, του χρόνου επίλυσης αυτής, κ.α. Έτσι, π.χ. δίνεται η δυνατότητα «ζυγίσματος» μεταξύ της πιθανότητας εμφάνισης κάποιας διαταραχής, και του κόστους των προληπτικών ενεργειών ελέγχου που απαιτούνται για να καθιστούν το δίκτυο πιο έτοιμο να την αντιμετωπίσει.
- Επέκταση μεθοδολογίας, και της αντίστοιχης βιβλιογραφίας [30], [45], με σκοπό τον υπολογισμό μιας εφικτής διαδοχικής σειράς υλοποίησης των υπολογιζόμενων ενεργειών ελέγχου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.
- [2] Οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την τροποποίηση της οδηγίας (ΕΕ) 2018/2001 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, του κανονισμού (ΕΕ) 2018/1999 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και της οδηγίας 98/70/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου όσον αφορά την προώθηση της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την κατάργηση της οδηγίας (ΕΕ) 2015/652 του Συμβουλίου.
Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα : https://ec.europa.eu/energy/topics/renewable-energy/directive-targets-and-rules_en.
Προσπελάστηκε στις 14 Σεπτεμβρίου 2021.
- [3] Π. Σ. Γεωργιάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα : <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013>
Προσπελάστηκε στις 27 Ιουλίου 2021.
- [4] J. Carpentier, Contribution `a l' étude du dispatching économique, *Bulletin de la Société Française d'Electricité*. (3) 1962 431-447.
- [5] J. Cai, Q. Li, L. Li, H. Peng, and Y. Yang, "A hybrid FCASO-SQP method for solving the economic dispatch problems with valve-point effects," *Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 346–353, 2012.
- [6] M. Huneault and F. D. Galiana, "A Survey Of The Optimal Power Flow Literature," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 762–770, 1991.
- [7] S. Granville, "Optimal reactive dispatch through interior point methods", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 136-146, Feb. 1994.
- [8] F. Capitanescu, M. Glavic, D. Ernst, and L. Wehenkel, "Interior-point based algorithms for the solution of optimal power flow problems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 5–6, pp. 508–517, 2007.

- [9] A. Wächter and L. T. Biegler, On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming, *Mathematical Programming* vol. 106, no. 1, 2006.
- [10] A. Khamees, N. Badra, and A. Abdelaziz, "Optimal Power Flow Methods: A Comprehensive Survey," *Ieejournal.Com*, vol. 7, no. 4, pp. 2228–2239, 2016
- [11] N. V. Sahinidis, "Mixed-integer nonlinear programming 2018," *Optim. Eng.*, vol. 20, no. 2, pp. 301–306, 2019.
- [12] F. Capitanescu, "Critical review of recent advances and further developments needed in AC optimal power flow," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 136, no. July 2016, pp. 57–68, 2016.
- [13] E. Mohagheghi, M. Alramlawi, A. Gabash, and P. Li, "A survey of real-time optimal power flow," *Energies*, vol. 11, no. 11, 2018.
- [14] E. Mohagheghi, A. Gabash, and P. Li, "Real-time optimal power flow under wind energy penetration-Part II: Implementation," *EEEIC 2016 - Int. Conf. Environ. Electr. Eng.*, 2016.
- [15] B. M. Mithun, S. Muthyala, and S. Maheswarapu, "Security Constraint Optimal Power Flow (SCOPF) A Comprehensive Survey," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 11, no. 6, pp. 42–52, 2010.
- [16] O. Alsac and B. Stott, "Optimal load flow with steady-state security," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-93, no. 3, pp. 745–751, 1974.
- [17] A. Monticelli, M. V. F. Pereira and S. Granville, "Security-Constrained Optimal Power Flow with Post-Contingency Corrective Rescheduling," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 175-180, Feb. 1987.
- [18] M. Rodrigues, O. R. Saavedra, and A. Monticelli, "Asynchronous programming model for the concurrent solution of the security constrained optimal power flow problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 2021–2027, 1994.
- [19] V. C. Ramesh and X. Li, "A fuzzy multiobjective approach to contingency constrained OPF," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 3, pp. 1348-1354, Aug. 1997.
- [20] F. Capitanescu et al., "State-of-the-art, challenges, and future trends in security constrained optimal power flow," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 8, pp. 1731–1741, 2011.
- [21] Kyoung-Shin Kim; Leen-Hark Jung; Seung-Chul Lee; UnChul Moon, "Security Constrained Economic Dispatch Using Interior Point Method," International Conference on Power System Technology, PowerCon 2006.pp.1-6, 22-26 Oct. 2006

-
- [22] F. Capitanescu and L. Wehenkel, "A new iterative approach to the corrective security-constrained optimal power flow problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 4, pp. 1533–1541, 2008.
- [23] D. Phan and J. Kalagnanam, "Some efficient optimization methods for solving the security-constrained optimal power flow problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 863–872, 2014.
- [24] L. Platbrood, F. Capitanescu, C. Merckx, H. Crisciu, and L. Wehenkel, "A generic approach for solving nonlinear-discrete security-constrained optimal power flow problems in large-scale systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 3, pp. 1194–1203, 2014.
- [25] K. Karoui, H. Crisciu, A. Szekut, and M. Stubbe, "Large scale security constrained optimal power flow," 16th Power Syst. Comput. Conf. PSCC 2008, no. 1, pp. 1–7, 2008.
- [26] Q. Jiang and K. Xu, "A Novel Iterative Contingency Filtering Approach to Corrective Security-Constrained Optimal Power Flow," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 3, pp. 1099–1109, May 2014.
- [27] J. Kardoš, D. Kourounis and O. Schenk, "Two-Level Parallel Augmented Schur Complement Interior-Point Algorithms for the Solution of Security Constrained Optimal Power Flow Problems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 2, pp. 1340–1350, March 2020.
- [28] F. Capitanescu, M. Glavic, D. Ernst, and L. Wehenkel, "Applications of security-constrained optimal power flows," Mod. Electr. Power Syst. Symp. MEPS06, June 2014, p. 7, 2006.
- [29] I. I. Avramidis, F. Capitanescu, S. Karagiannopoulos, and E. Vrettos, "A Novel Approximation of Security-Constrained Optimal Power Flow with Incorporation of Generator Frequency and Voltage Control Response," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 3, pp. 2438–2447, 2021.
- [30] F. Capitanescu and L. Wehenkel, "Redispatching active and reactive powers using a limited number of control actions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1221–1230, 2011.
- [31] F. Capitanescu, W. Rosehart, and L. Wehenkel, "Optimal power flow computations with constraints limiting the number of control actions," 2009 IEEE Bucharest PowerTech Innov. Ideas Towar. Electr. Grid Futur. May 2014, 2009.
- [32] S. A. Soman, K. Parthasarathy, and D. Thukaram, "Curtailed number and reduced controller movement optimization algorithms for real time voltage/reactive power control," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 2035–2041, 1994.

- [33] A. P. Mazzini, E. N. Asada, and G. G. Lage, "Minimisation of active power losses and number of control adjustments in the optimal reactive dispatch problem," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 12, pp. 2897–2904, 2018.
- [34] Y. J. Zhang and Z. Ren, "Optimal reactive power dispatch considering costs of adjusting the control devices," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1349–1356, 2005.
- [35] D. T. Phan and X. A. Sun, "Minimal Impact Corrective Actions in Security-Constrained Optimal Power Flow Via Sparsity Regularization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 4, pp. 1947–1956, 2015.
- [36] W. Murray, T. T. De Rubira and A. Wigington, "Optimal power flow with limited and discrete controls," 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2015, pp. 1-5.
- [37] A. Marano-Marcolini, F. Capitanescu, J. L. Martinez-Ramos, and L. Wehenkel, "Exploiting the use of DC SCOPF approximation to improve iterative AC SCOPF algorithms," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1459–1466, 2012.
- [38] F. Capitanescu, "Suppressing ineffective control actions in optimal power flow problems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 14, no. 13, pp. 2520–2527, 2020.
- [39] P. Bonami et al., "An algorithmic framework for convex mixed integer nonlinear programs," *Discret. Optim.*, vol. 5, no. 2, pp. 186–204, 2008.
- [40] Π. Ι. Ψαρράκος, *Θέματα Ανάλυσης Πινάκων*. Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Αθήνα, 2020. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://www.math.ntua.gr/~ppsarr/Topics_in_Matrix_Analysis.pdf
Προσπελάστηκε στις 3 Αυγούστου 2021.
- [41] IBM, "IBM ILOG CPLEX 12.9 User Manual", IBM Corp., 2019.
- [42] GAMS platform version 28.2,2019. Available online: <https://www.gams.com>
- [43] T. Van Cutsem and L. Papangelis, "Description, Modeling and Simulation Results of a Test System for Voltage Stability Analysis", University of Liege, no.6 November, p. 49, 2013. Available online: <http://hdl.handle.net/2268/141234>
Προσπελάστηκε στις 24 Μαρτίου 2021.
- [44] A. R. Al-Roomi, "Power Flow Test Systems Repository", Dalhousie University, Electrical and Computer Engineering, Nova Scotia. Available online: <https://al-roomi.org/power-flow>
Προσπελάστηκε στις 24 Μαρτίου 2021.
- [45] D. Lee, K. Turitsyn, D. K. Molzahn, and L. A. Roald, "Feasible Path Identification in Optimal Power Flow with Sequential Convex Restriction," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 5, pp. 3648–3659, 2020.