



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

Βέλτιστη Ροή Φορτίου υπό Περιορισμούς Ασφαλείας σε Μικτό AC-DC Δίκτυο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Ράπτης

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιανουάριος 2014



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

Βέλτιστη Ροή Φορτίου υπό Περιορισμούς Ασφαλείας σε Μικτό AC-DC Δίκτυο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος Ράπτης

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Ιανουαρίου 2014

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

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

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιανουάριος 2014

.....

Στέφανος Ράπτης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Copyright © Στέφανος Ράπτης, 2014

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.

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Power Systems Laboratory του ιδρύματος ETH στην Ζυρίχη, στα πλαίσια του προγράμματος ERASMUS. Καθηγητής και υπεύθυνος του εργαστηρίου είναι ο κύριος Goran Andersson και η επίβλεψη της εργασίας έγινε από τους διδακτορικούς φοιτητές Emil Iggland και Roger Wiget.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια γραμμές υπερευψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC) χρησιμοποιούνται ευρέως στα δίκτυα μεταφοράς ενέργειας, έχοντας τεχνικοοικονομικά προτερήματα έναντι των γραμμών εναλλασσόμενου ρεύματος του υπάρχοντος AC δικτύου. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την προοπτική σύνδεσης των μεμονωμένων HVDC γραμμών απευθείας μεταξύ τους, αποτελώντας έτσι ένα DC δίκτυο μεταφοράς. Μαζί με τις διασυνδέσεις στο ευρύτερο AC δίκτυο, η τελική διάταξη θα ήταν ένα μικτό AC-DC δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί και να τεθεί σε εφαρμογή ένα τέτοιο δίκτυο, πρέπει να προηγηθεί εκτενής μελέτη όσον αφορά, ανάμεσα σε άλλα, την αξιοπιστία και ασφάλεια του συστήματος. Μέγιστη σημασία για την ορθή λειτουργία ενός δικτύου έχει η εξασφάλιση ότι το δίκτυο πληρεί τις προϋποθέσεις του λεγόμενου N-1 κριτηρίου. Η αποδοτική επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου με περιορισμούς ασφαλείας (SC-OPF) στα AC δίκτυα, είναι ένα πρόβλημα που έχει μελετηθεί επαρκώς. Η επίλυση του προβλήματος σε μικτό δίκτυο από την άλλη, δεν έχει μελετηθεί σε βάθος. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει έναν τρόπο μοντελοποίησης και επίλυσης του SC-OPF προβλήματος. Στην συνέχεια το μοντέλο εφαρμόζεται σε δοκιμαστικά δίκτυα, και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται παρουσιάζονται και αναλύονται.

Ευχαριστιες

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Κωνσταντίνο Βουρνά για την υποστήριξη του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Περιεχομενα

Λιστα Γραφηματων	xv
Λιστα Πινακων	xvii
Λιστα Συντομογραφιων	xix
Λιστα Συμβολων	xxi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός και κίνητρο της εργασίας	1
1.2 Δομή της εργασίας	1
2 OPF και SC-OPF	3
2.1 Γενικά για την βέλτιστη ροή φορτίου	3
2.2 Αρχές και πρότυπα ασφαλείας	4
2.3 Χειρισμοί αποκατάστασης	4
2.3.1 Προληπτικά μέτρα ασφαλείας	4
2.3.2 Διορθωτικά μέτρα ασφαλείας	5
2.4 Δομηση SC-OPF	5
2.4.1 Προληπτική Μέθοδος	5
2.4.2 Προληπτική-Διορθωτική Μέθοδος	6
2.4.3 Επίπεδα ασφαλείας στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας	6
2.4.4 Σύνδεση λειτουργικών εξόδων και ασφάλειας	7
3 Μοντελοποιηση Συστηματος	9
3.1 Γραμμική Βέλτιστη Ροή Φορτίου	9
3.2 Υπολογισμός Ενεργού Ισχύος στο AC Δίκτυο	9
3.3 Γραμμική Βελτιστη Ροη Φορτιου σε Μικτο Δικτυο	10
3.3.1 Υπολογισμός Ροής Ενεργού Ισχύος σε DC Δίκτυο	10
3.3.2 Ισοζύγιο Ισχύος σε Μικτό Δίκτυο	10
3.3.3 Κατάστρωση Προβλήματος Βελτιστοποίησης με Χρήση Πινάκων	11
3.3.4 Διάνυσμα Βελτιστοποίησης ξ	11
3.3.5 Αντικειμενική Συνάρτηση	11
3.3.6 Περιορισμοί Ισότητας	13
3.3.7 Ανισοτικοί Περιορισμοί	15

4	SC-OPF στο Μικτο Δικτυο	17
4.1	Μεθοδος I: Προληπτικη	17
4.1.1	Συντελεστές Κατανομής σε απώλεια AC Γραμμής Μεταφοράς	17
4.1.2	Συντελεστές Κατανομής σε απώλεια DC Γραμμής Μεταφοράς	18
4.1.3	Συντελεστές Καταμερισμού σε Απώλεια Γεννήτριας	23
4.1.4	Περιορισμοί Γραμμών Μεταφοράς	23
4.1.5	Κατάστρωση του προβλήματος	24
4.2	Μεθοδος II: Προληπτικη-Διορθωτικη	26
4.2.1	Αντικειμενική Συνάρτηση	27
4.2.2	Διορθωτικός Έλεγχος Σταθμών Μετατροπής	29
4.2.3	Απώλεια Γραμμής Μεταφοράς στο AC Δίκτυο	30
4.2.4	Απώλεια Γραμμής Μεταφοράς στο DC Δίκτυο	32
4.2.5	Απώλεια Σταθμού Μετατροπής	33
4.2.6	Απώλεια Γεννήτριας	34
4.2.7	Σχηματισμός του Συνολικού Προβλήματος	36
5	Αποτελεσματα Προσομοιωσεων σε Δοκιμαστικα Δικτυα	39
5.1	Δοκιμαστικό Δίκτυο I: Γενική Περιγραφή	39
5.2	Μεθοδος I: Προληπτικη	40
5.2.1	Καταμερισμός Παραγόμενης Ισχύος στις Γεννήτριες	40
5.2.2	Ροές Φορτίου στο Μικτό Δίκτυο	41
5.3	Μεθοδος II: Προληπτικη-Διορθωτικη	43
5.3.1	Σύγκριση Κόστους	45
5.3.2	Αλληλεπίδραση AC και DC Δικτύου	48
5.3.3	Διορθωτικός Έλεγχος και Ανάλυση Ευαισθησίας	53
5.3.4	Συσχέτιση Χωρητικότητας DC Δικτύου και Κόστους Λειτουργίας	54
5.3.5	Χρόνοι Επίλυσης	58
5.4	Δοκιμαστικο Δικτυο II	58
6	Συμπερασματα	63
	Παραρτηματα	65
	A Αριθμητικο Παραδειγμα	65
	B Παραδειγμα με Καταστρωση Πινακων	71
	Βιβλιογραφια	75

Λίστα Γραφημάτων

2.1	Διάγραμμα Καταστάσεων και Επιπέδου Ασφαλείας	8
4.1	Γραμμή μεταφοράς πριν από την διαταραχή	20
4.2	Γραμμή μεταφοράς μετά από την διαταραχή	21
4.3	Μοντελοποίηση απώλειας γραμμής με εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς	22
5.1	Μικτό AC-DC δίκτυο [1]	40
5.2	Κατανομή της Παραγωγής για Προληπτικό SC-OPF	41
5.3	Φορτίσεις AC Γραμμών Μεταφοράς	42
5.4	Φορτίσεις DC Γραμμών Μεταφοράς	42
5.5	Ανταλλαγές Ισχύος Σταθμών Μετατροπής	43
5.6	Κατανομή παραγωγής διορθωτικού SC-OPF για 100% φορτίο Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής	44
5.7	Κατανομή παραγωγής διορθωτικού SC-OPF για 160% φορτίο Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής	45
5.8	Λειτουργικά Έξοδα για 100% φορτίο Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής	46
5.9	Λειτουργικά Έξοδα για 160% φορτίο Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής	47
5.10	Σύγκριση και συσχέτιση προληπτικού και διορθωτικού SC-OPF	48

5.11	Ροές ισχύος στο AC δίκτυο για 100% φορτίο Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής	49
5.12	Ροές ισχύος στο DC δίκτυο για 100% φορτίο Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής	50
5.13	Ανταλλαγές ισχύος σταθμών μετατροπής για 100% φορτίο Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής	51
5.14	Ροές ισχύος στο AC δίκτυο για 160% φορτίο Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής	51
5.15	Ροές ισχύος στο DC δίκτυο για 160% φορτίο Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής	52
5.16	Ανταλλαγές ισχύος σταθμών μετατροπής για 160% φορτίο Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής	52
5.17	Επιδράσεις διορθωτικού ελέγχου στο λειτουργικό κόστος: Περίπτωση 1	54
5.18	Επιδράσεις διορθωτικού ελέγχου στο λειτουργικό κόστος: Περίπτωση 2	55
5.19	Επιδράσεις διορθωτικού ελέγχου στο λειτουργικό κόστος: Περίπτωση 4	55
5.20	Επιδράσεις διορθωτικού ελέγχου στο λειτουργικό κόστος όταν $\Pi^{AC} = \Pi^{DC}$: Περίπτωση 2	56
5.21	Σύγκριση απόλυτου κόστους λειτουργίας για δύο επίπεδα συντελεστών Π^{AC} , Π^{DC} : Περίπτωση 2	57
5.22	Επίδραση διορθωτικού ελέγχου όταν $\Pi^{AC} = \Pi^{DC}$: Περίπτωση 4	57
5.23	Εξάρτηση Κόστους Λειτουργίας από Όρια Φόρτισης για το πρόβλημα OPF	58
5.24	Εξάρτηση Κόστους Λειτουργίας από Όρια Φόρτισης για το πρόβλημα SC-OPF	59
5.25	Προβολή Καμπυλών 5.23 και 5.24	60
5.26	Χρόνος επίλυσης για όλες τις περιπτώσεις SC-OPF	61
5.27	IEEE RTS-96 συνδεδεμένο με DC δίκτυο	62
5.28	Επίδραση διορθωτικού ελέγχου στο κόστος	62
A.1	Μικρό Δοκιμαστικό Μικτό Δίκτυο	66

B.1 Μικτό Δίκτυο Αριθμητικού Παραδείγματος	74
--	----

Λίστα Πινάκων

3.1	Ονοματολογία	12
4.1	Ονοματολογία Προληπτικής-Διορθωτικής Μεθόδου	28
5.1	Κόστος ασφαλείας για 100% φορτίο	47
5.2	Κόστος ασφαλείας για 160% φορτίο	48
5.3	Κόστος ασφαλείας και χρόνοι επίλυσης για το δοκιμαστικό δίκτυο του σχήματος 5.27	59
A.1	Χαρακτηριστικά Γεννητριών	65
A.2	Χαρακτηριστικά AC Γραμμών Μεταφοράς	65
A.3	Χαρακτηριστικά DC Γραμμών Μεταφοράς	67
A.4	Χαρακτηριστικά Σταθμών Μετατροπής	67
A.5	Ζήτηση Ενεργού Ισχύος	67
A.6	Διάνυσμα Βελτιστοποίησης ξ για κανονικό OPF και Περίπτωση 1 SC-OPF	68
A.7	Φορτίσεις Γραμμών για κανονικό OPF και Περίπτωση 1 SC-OPF	68
A.8	Διάνυσμα Βελτιστοποίησης ξ για Περίπτωση 3 και 4 SC-OPF	69
A.9	Φορτίσεις Γραμμών για Περίπτωση 3 και 4 SC-OPF	69
B.1	Ονοματολογία για Αριθμητικό Παράδειγμα	71

Λίστα Συντομογραφιών

OPF	Βέλτιστη ροή φορτίου.
DCOPF	Γραμμικοποιημένο μοντέλο βέλτιστης ροής φορτίου.
SC-OPF	Βέλτιστη ροή φορτίου με περιορισμούς ασφαλείας.
LODF	Συντελεστής κατανομής σε απώλεια γραμμής μεταφοράς.
GGDF	Συντελεστής κατανομής σε απώλεια μονάδας παραγωγής(γεννήτριας).
HVAC	Εναλλασσόμενη υπερυψηλή τάση.
HVDC	Συνεχής υπερυψηλή τάση.

Λίστα Συμβολων

A_{AC}	Πίνακας γειτνίασης AC δικτύου.
A_{DC}	Πίνακας γειτνίασης DC δικτύου.
A_{ACprev}	Τροποποιημένος πίνακας γειτνίασης AC δικτύου για απώλειες γραμμών μεταφοράς προληπτικής μεθόδου.
A_{DCprev}	Τροποποιημένος πίνακας γειτνίασης DC δικτύου για απώλειες γραμμών μεταφοράς προληπτικής μεθόδου.
B_{AC}	Μήτρα αγωγιμοτήτων AC δικτύου.
B_{DC}	Μήτρα αγωγιμοτήτων DC δικτύου.
C	Μέγεθος διανύσματος ξ .
D	Αριθμός DC γραμμών μεταφοράς.
\mathcal{D}	Ζεύγιοι DC ζυγών συνδεδεμένων με γραμμή μεταφοράς.
E_{AC}	Τροποποιημένος πίνακας γειτνίασης AC δικτύου για απώλειες γεννητριών προληπτικής μεθόδου.
E_I	Πίνακας ευαισθησιών σε απώλεια γεννήτριας προληπτικής μεθόδου.
F_{km}^{max}	Όριο στην ισχύ που μπορεί να φέρει η γραμμή μεταφοράς km .
G	Πίνακας τετραγωνικών όρων κόστους αντικειμενικής συνάρτησης.
H	Πίνακας κατανομής γεννητριών σε ζυγούς.
I	Αριθμός γεννητριών.
K	Αριθμός AC ζυγών.
L	Αριθμός σταθμών μετατροπής.
M	Αριθμός DC ζυγών.
N	Αριθμός AC γραμμών μεταφοράς.
\mathcal{N}	Ζεύγιοι AC ζυγών συνδεδεμένων με γραμμή μεταφοράς.
P_G	Παραγόμενη ενεργός ισχύς γεννήτριας.
P_G^{max}	Μέγιστη παραγόμενη ισχύς γεννήτριας.
P_G^{min}	Ελάχιστη παραγόμενη ισχύς γεννήτριας.
P_L	Ζήτηση ισχύος απο φορτίο.

P_T	Ανταλλαγή ισχύος σε σταθμό μετατροπής.
$P_{T,i}^{max}$	Όριο στην ισχύ που ανταλλάσσει σταθμός μετατροπής
P_{base}	Βάση ισχύος της ανα μονάδα αναπαράστασης.
P_{km}	Ισχύς που φέρει η γραμμή μεταφοράς km .
QC	Διαγώνιος πίνακας τετραγωνικών συντελεστών κόστους γεννητριών.
R_{km}	Αντίσταση DC γραμμής μεταφοράς km .
S	Πίνακας κατανομής σταθμών μετατροπής σε DC ζυγούς.
T	Πίνακας κατανομής σταθμών μετατροπής σε AC ζυγούς.
U	Μέτρο τάσης AC ζυγού.
V	Τάση DC ζυγού.
W^{AC}	Πίνακας με συντελεστές ποινής για τις διαφορές μεταξύ γωνιών τάσης AC ζυγών.
W^{DC}	Πίνακας με συντελεστές ποινής για τις διαφορές μεταξύ τάσεων DC ζυγών.
X	Μήτρα αντιδράσεων AC δικτύου.
Y	Αριθμός ανισοτικών περιορισμών.
Z	Μήτρα αντιστάσεων DC δικτύου.
c	Σετ ενδεχομένων διαταραχής που περιλαμβάνεται στο πρόβλημα SC-OPF.
f	Αντικειμενική συνάρτηση.
g	Σετ περιορισμών ισότητας
h	Σετ ανισοτικών περιορισμών.
n_{ij}	Αριθμός γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τον ζυγό i με τον j .
$r_{i,m}$	Ποσοστό της ισχύος που παρήγαγε η γεννήτρια m που αναλαμβάνει να παράξει η γεννήτρια i .
u	Διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου.
Δu_c^{max}	Ποσό διορθωτικών χειρισμών που μπορούν να εφαρμοστούν.
x_{km}	Αντίδραση AC γραμμής μεταφοράς km .
z	Διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης.
Λ_I	Μοναδιαίος πίνακας μεγέθους I.
Λ_L	Μοναδιαίος πίνακας μεγέθους L.
Π^{AC}	Σταθερά ποινής στην διαφορά γωνιών τάσης του AC δικτύου.
Π^{DC}	Σταθερά ποινής στην διαφορά τάσης DC ζυγών.
Π^{Ter}	Σταθερά ποινής στην διαφορά της ισχύος που ανταλλάσσουν οι σταθμοί μετατροπής μεταξύ κανονικής και υπό-διαταραχής κατάστασης.

- Φ_{iq} Πίνακας για σχηματισμό περιορισμών στις γεννήτριες μετά απο απώλεια άλλης γεννήτριας.
- Φ_{eq} Πίνακας με αποδιδόμενες ισχείς γεννητριών μετά απο απώλεια άλλης γεννήτριας.
- Ψ Διάλυμα κατανομής ισχύος σε απώλεια γεννήτριας.
- α Συντελεστής γραμμικού όρου του κόστους παραγωγής ισχύος.
- β Συντελεστής τετραγωνικού όρου του κόστους παραγωγής ισχύος.
- γ Συνολικός αριθμός ενδεχομένων διαταραχής που περιλαμβάνονται στο πρόβλημα SC-OPF.
- δ Γωνία τάσης AC ζυγού.
- λ Διάλυμα γραμμικών συντελεστών κόστους.
- ξ Διάλυμα βελτιστοποίησης.

Κεφαλαίο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και κίνητρο της εργασίας

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας στις μέρες μας, λειτουργούν πολλές φορές υπό οριακές συνθήκες, γεγονός που δεν είχε προβλεφθεί στο στάδιο της προμελέτης τους. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην αυξανόμενη διεσπαρμένη παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στην ανάπτυξη ελεύθερων αγορών ενέργειας. Η ζήτηση σε ενέργεια αυξάνει διαρκώς και επιβάλλει κατάλληλη αναβάθμιση στα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς.

Προς αυτή την κατεύθυνση η υλοποίηση γραμμών μεταφοράς HVDC δείχνει να είναι η πλέον κατάλληλη λύση για να αντιμετωπιστούν οι τρέχουσες και μελλοντικές απαιτήσεις των συστημάτων ενέργειας. Οι εν λόγω γραμμές είναι ιδανικές όταν πρόκειται για μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, και για την σύνδεση ανανεώσιμων πηγών στο δίκτυο. Επίσης η προχωρημένη ανάπτυξη στην τεχνολογία ηλεκτρονικών ισχύος, προσφέρει ευελιξία στον χειρισμό του δικτύου, καθώς η ενέργεια που ανταλλάσσεται μέσω των σταθμών μετατροπής μπορεί να ελεγχθεί με μεγάλη ακρίβεια.

Με τον αυξανόμενο αριθμό μεμονομένων γραμμών HVDC που βρίσκονται σε λειτουργία, το ενδεχόμενο σύνδεσής τους απευθείας μεταξύ τους παρά μέσω του ευρύτερου AC δικτύου θα μπορούσε να παίξει σημαντικό ρόλο στον μελλοντικό σχεδιασμό και την λειτουργία των δικτύων μεταφοράς. Ενώ δεν υπάρχουν τεχνολογικές ελλείψεις σε μικρά πρότζεκτ που χρησιμοποιούν HVDC, η λειτουργία ενός AC-DC δικτύου μεγάλης κλίμακας παραθέτει προβλήματα, λόγω ανεπαρκούς μελέτης σε διάφορους τομείς, όπως είναι ανάμεσα σε άλλα, ο έλεγχος ροής φορτίου και τα πρότυπα ασφαλείας ενός τέτοιου δικτύου.

Ο χειριστής ενός δικτύου είναι υπεύθυνος για την αποδοτική λειτουργία του και πρέπει να εγγυάται ότι το δίκτυο πληρεί συγκεκριμένες προϋποθέσεις ασφαλείας. Μια τεχνική επίτευξης των άνω κριτηρίων, είναι η λειτουργία του δικτύου να καθορίζεται από την επίλυση της λεγόμενης 'βέλτιστης ροής φορτίου υπό περιορισμούς ασφαλείας'. Στα AC δίκτυα το πρόβλημα αυτό έχει μελετηθεί εκτενώς, σε ένα μίχτο AC-DC δίκτυο όμως δεν υπάρχει σαφής καθορισμός του προβλήματος. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η κατασκευή και επίλυση ενός προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου υπό περιορισμούς ασφαλείας (SC-OPF) σε μίχτο AC-DC δίκτυο.

1.2 Δομή της εργασίας

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της βέλτιστης ροής φορτίου σε AC δίκτυο και η γενική κατάστρωση του προβλήματος. Ακολουθεί αναφορά σε έννοιες που αφορούν την

ασφάλεια ενός δικτύου καθώς και επεκτάσεις του παραπάνω προβλήματος που λαμβάνουν υπόψη περιορισμούς ασφαλείας για περιπτώσεις απώλειας στοιχείου του δικτύου.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των στοιχείων του AC και DC δικτύου. Εξηγείται πως προκύπτουν οι εξισώσεις που περιγράφουν την ροή φορτίου σε γραμμική μορφή για ένα μικτό δίκτυο.

Το κεφάλαιο 4 περιέχει 2 μοντελοποιήσεις για την εφαρμογή SC-OPF σε μικτό AC-DC δίκτυο.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν ακολουθούμενα από φραστική και γραφική ανάλυση τους.

Εν κατακλείδι το 6ο κεφάλαιο αφιερώνεται στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και στον σχηματισμό συμπερασμάτων. Η εργασία κλείνει με συζήτηση αναφορικά με μελλοντικές προτάσεις για έρευνα, που θα μπορούσαν να επιφέρουν πιο ολοκληρωμένες μοντελοποιήσεις του προβλήματος.

Κεφάλαιο 2

OPF και SC-OPF

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες που αφορούν την βέλτιστη ροή φορτίου και την βέλτιστη ροή φορτίου υπό περιορισμούς ασφαλείας.

2.1 Γενικά για την βέλτιστη ροή φορτίου

Οι εφαρμογές βελτιστοποίησης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν κλάδο που έχει συνεισφέρει σημαντικά στην διαμόρφωση του τρόπου παραγωγής μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Στις αρχές του 20ου αιώνα η βέλτιστη ροή φορτίου (OPF) ήταν ένα πρόβλημα που οι μηχανικοί έπρεπε να αντιμετωπίσουν χρησιμοποιώντας την εμπειρία και την κρίση τους. Με την σταδιακή ανάπτυξη στον τομέα της μαθηματικής βελτιστοποίησης και με την χρήση υπολογιστικών εργαλείων, η βέλτιστη ροή φορτίου είναι πλέον ένα πρόβλημα που επιλύεται πολλές φορές την μέρα στα κέντρα ελέγχου και χειρισμού των δικτύων. Ενώ το σύνολο των προβλημάτων αυτών έχει μελετηθεί για περισσότερο από 50 χρόνια, οι πολυπλοκότητες που προκύπτουν στην λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργούν διαρκώς αντικείμενα νέας έρευνας και ανάγκη για νέες εφαρμογές.

Τα προβλήματα OPF αναφέρονται στην κλάση προβλημάτων των οποίων η επίλυση έχει σκοπό την βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία υπόκειται σε ορισμένους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς. Γενικά, είναι προβλήματα βέλτιστης κατανομής της παραγόμενης ενέργειας στις μονάδες παραγωγής. Η γενική μορφή ενός προβλήματος (OPF) περιγράφεται από το σύνολο των παρακάτω εξισώσεων [2]:

$$\text{Minimize} \quad f(z, u) \quad (2.1)$$

$$\text{subject to} \quad g(z, u) = 0 \quad (2.2)$$

$$h(z, u) \leq 0 \quad (2.3)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση $f(z, u)$ της (2.1) έχει να κάνει με την φιλοσοφία διαχείρισης του δικτύου και συνήθως παριστά το κόστος παραγωγής ενέργειας προς ελαχιστοποίηση. Αναλόγως βέβαια με την εφαρμογή μπορούν να ορισθούν διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις.

Τα διανύσματα u , z περιέχουν τις μεταβλητές ελέγχου και κατάστασης αντίστοιχα. Μεταβλητές ελέγχου u καλούνται όλες οι ποσότητες οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν, τηρώντας πάντα το ισοζύγιο ισχύος και τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας του συστήματος. Οι μεταβλητές κατάστασης z είναι οι εξαρτώμενες από την κατάσταση του συστήματος μεταβλητές. Γνωρίζοντας τις τιμές όλων των μεταβλητών αυτών, η κατάσταση ολόκληρου του συστήματος είναι γνωστή και ορίζεται

μονοσήμαντα. Η εξίσωση (2.2) είναι η συντομογραφία που περιγράφει όλους τους περιορισμούς ισότητας, δηλαδή τις εξισώσεις ροής φορτίου, οι οποίες με την σειρά τους είναι η εφαρμογή του ισοζυγίου ισχύος στα συστήματα ενέργειας. Η περιληπτική αναπαράσταση της εξίσωσης (2.3) αναφέρεται στους περιορισμούς ανισότητας. Οι εν λόγω περιορισμοί είναι η εφαρμογή των λειτουργικών ορίων του δικτύου, όπως είναι π.χ η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφέρει μια γραμμή, καθώς και φραγμοί στις μεταβλητές ελέγχου, όπως η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδίδει μια μονάδα παραγωγής.

2.2 Αρχές και πρότυπα ασφαλείας

Μέγιστη σημασία στα ηλεκτρικά δίκτυα έχει η εξασφάλιση ότι εκτός από οικονομική, η λειτουργία του δικτύου γίνεται με ασφάλεια και αξιοπιστία. Σκοπός είναι η αποφυγή καταπόνησης και βλάβης του εξοπλισμού, και η αδιάκοπη παροχή ισχύος στα φορτία του συστήματος.

Για την επίτευξη των κριτηρίων αυτών οι χειριστές των δικτύων εκπονούν μελέτες ασφαλείας, προκειμένου να γνωρίζουν τις ανοχές του δικτύου σε περίπτωση απρόοπτης διαταραχής, όπως είναι η απώλεια ενός στοιχείου του δικτύου.

Η κλασική βέλτιστη ροή φορτίου όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.1 δεν λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του συστήματος ούτε τις λειτουργικές του συνθήκες σε ενδεχόμενο μη προγραμματισμένης απώλειας κάποιου στοιχείου, όπως είναι η απώλεια μιας γεννήτριας ή μιας γραμμής μεταφοράς. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που λαμβάνει υπόψη και περιπτώσεις απώλειας στοιχείου του δικτύου λέγεται βέλτιστη ροή φορτίου υπό περιορισμούς ασφαλείας και στην συνέχεια η αναφορά σε αυτήν θα γίνεται με την συντομογραφία SC-OPF (security constrained optimal power flow). Το SC-OPF πρόβλημα είναι ουσιαστικά μιά επέκταση του OPF που περιλαμβάνει επιπλέον περιορισμούς προς επίτευξη ασφαλούς λειτουργίας ακόμη και μετά από απρόβλεπτη απώλεια κάποιου στοιχείου.

2.3 Χειρισμοί αποκατάστασης

Χειρισμοί αποκατάστασης είναι οι ενέργειες που εκτελούνται από τον χειριστή του δικτύου μεταφοράς προκειμένου η λειτουργία του να πληρεί ένα επίπεδο ασφαλείας. Συγκεκριμένα αναφέρονται σε αλλαγές στις ρυθμίσεις των ελέγξιμων μεταβλητών του συστήματος που επιτυγχάνουν αυτό τον σκοπό. Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, τα παρακάτω είδη χειρισμών θα είναι σημασίας:

- Προληπτικοί χειρισμοί
- Διορθωτικοί χειρισμοί

2.3.1 Προληπτικά μέτρα ασφαλείας

Ο προληπτικός χειρισμός και έλεγχος είναι ένα μέτρο που εφαρμόζεται για να φροντίσει για ανάγκες που μπορεί να προκύψουν στην διάρκεια διαταραχής, λόγω αβεβαιότητας όσον αφορά την δυνατότητα αντιμετώπισης περιορισμών που παραβιάζονται [3]. Είναι επομένως μια ενέργεια που γίνεται ενώ το σύστημα βρίσκεται στην κανονική (προ διαταραχής) κατάσταση λειτουργίας. Ο στόχος είναι να τοποθετηθεί το σύστημα σε τέτοια κατάσταση, ώστε μετά από ενδεχόμενη διαταραχή, να μην υποστεί υπερβάσεις λειτουργικών ορίων στα διάφορα στοιχεία του.

Η λήψη προληπτικών μέτρων για επίτευξη ασφαλείας θεωρείται συντηρητική μέθοδος, καθώς το δίκτυο λειτουργεί με υψηλότερα έξοδα για να είναι σε θέση να υποστεί τις συνέπειες μιας

διαταραχής που ίσως δεν επέλθει ποτέ. Η προληπτική μέθοδος δεν ασχολείται με πιθανές ενέργειες που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε πραγματικό χρόνο μετά από διαταραχή για αποκατάσταση του συστήματος.

2.3.2 Διορθωτικά μέτρα ασφαλείας

Τα διορθωτικά μέτρα και οι χειρισμοί αναφέρονται σε ενέργειες που εφαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο μετά από διαταραχή για να αντιμετωπιστούν υπερβάσεις λειτουργικών ορίων. Η φιλοσοφία μιας μεθόδου που βασίζεται σε διορθωτικό έλεγχο είναι οι περιορισμοί που προκύπτουν μετά από διαταραχή να πληρούνται μέσω αλλαγών στις τιμές των μεταβλητών ελέγχου. Επειδή μετά από διαταραχή το δίκτυο μπορεί να βρίσκεται σε κατάσταση που επιβαρύνεται, ο χρόνος που απαιτείται για να εφαρμοστούν οι ρυθμίσεις έχουν μεγάλη σημασία σε μια διορθωτική μέθοδο. Η παρούσα εργασία ασχολείται με την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας επομένως οι διορθωτικές ενέργειες που θα αναφερθούν, θεωρούνται άμεσα εφαρμόσιμες ώστε το δίκτυο να μην διατρέχει κίνδυνο υπερφόρτισης.

2.4 Δομηση SC-OPF

Η γενική ιδέα για ένα SC-OPF πρόβλημα, είναι η επέκταση του βασικού OPF προβλήματος ώστε να περιλαμβάνει περιορισμούς που σχετίζονται με καταστάσεις διαταραχής ή περιορισμούς που σχετίζονται με τις επιδράσεις που θα είχε μια διαταραχή στο υπόλοιπο σύστημα. Δύο μεθοδολογίες που οδηγούν σε διαφορετικές καταστρώσεις του προβλήματος παρουσιάζονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

2.4.1 Προληπτική Μέθοδος

Ένα προληπτικό SC-OPF πρόβλημα μπορεί να αναπαρασταθεί σε περιληπτική μορφή ως εξής [4]:

$$\text{Minimize} \quad f(z_0, u_0) \quad (2.4)$$

$$\text{subject to} \quad g_c(z_c, u_0) = 0 \quad c=0,1,2,\dots,\gamma \quad (2.5)$$

$$h_c(z_c, u_0) \leq 0 \quad c=0,1,2,\dots,\gamma \quad (2.6)$$

όπου ο δείκτης “0” παριστά την προ-διαταραχής κατάσταση λειτουργίας προς βελτιστοποίηση, και ο δείκτης “c” ($c > 0$) αντιπροσωπεύει τις μετά-διαταραχής καταστάσεις του δικτύου για τις γ περιπτώσεις απώλειας στοιχείου που επιλέγονται.

Σε αυτό το πρόβλημα περιλαμβάνονται επιπλέον περιορισμοί που αφορούν ένα σύνολο “c” περιπτώσεων διαταραχής. Το γεγονός ότι τα σέτ σχέσεων (2.5) και (2.6) εξαρτώνται από τις μεταβλητές ελέγχου u_0 αντί για u_c , για κάθε υπό-διαταραχή κατάσταση, είναι που καθιστά αυτο το πρόβλημα προληπτικό SC-OPF. Οι τιμές των μεταβλητών ελέγχου είναι δεσμευμένες στα ίδια επίπεδα που είχαν και στην πρό-διαταραχής κατάσταση σε όλα τα ενδεχόμενα διαταραγμένης λειτουργίας. Το σέτ των μεταβλητών κατάστασης που σχετίζονται με λειτουργία υπό διαταραχή συμβολίζεται με z_c .

Κάθε σέτ ισοτικών περιορισμών υπό διαταραχή είναι σαν το αντίστοιχο σέτ υπό κανονική λειτουργία, με την διαφορά ότι αντιστοιχεί στο δίκτυο με ένα στοιχείο λιγότερο. Τα σέτ ανισοτικών περιορισμών υπο διαταραχή είναι σαν το αντίστοιχο σέτ υπο κανονική λειτουργία, με την διαφορά ότι αντιστοιχεί στο δίκτυο με ένα στοιχείο λιγότερο, καθώς και τα όρια λειτουργίας του εξοπλισμού ενδεχομένως να είναι διαφορετικά.

2.4.2 Προληπτική-Διορθωτική Μέθοδος

Το προληπτικό-διορθωτικό SC-OPF πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής [4]:

$$\text{Minimize} \quad f(z_0, u_0) \quad (2.7)$$

$$\text{subject to} \quad g_0(z_0, u_0) = 0 \quad (2.8)$$

$$h_0(z_0, u_0) \leq h_0^{max} \quad (2.9)$$

$$g_c(z_c, u_c) = 0 \quad c=1,2,\dots,\gamma \quad (2.10)$$

$$h_c(z_c, u_c) \leq h_c^{max} \quad c=1,2,\dots,\gamma \quad (2.11)$$

$$|u_0 - u_c| \leq \Delta u_c^{max} \quad c=1,2,\dots,\gamma \quad (2.12)$$

όπου ο δείκτης “0” παριστά την προ-διαταραχής κατάσταση λειτουργίας, και ο δείκτης “c” ($c > 0$) αντιπροσωπεύει τις μετά-διαταραχής καταστάσεις του δικτύου για τις γ περιπτώσεις απώλειας στοιχείου που επιλέγονται. Ο όρος διορθωτική μέθοδος προκύπτει από το γεγονός ότι οι τιμές των μεταβλητών ελέγχου μπορούν να αλλάξουν προκειμένου να εκκαθαριστούν παραβιάσεις μετά από διαταραχή. Το πρόβλημα είναι προληπτικό-διορθωτικό διότι υπάρχει όριο στην μέγιστη μεταβολή που μπορεί να έχει μια μεταβλητή ελέγχου. Η μεταβολή αυτή είναι φραγμένη από μια ποσότητα Δu_c^{max} και από τις αρχικές ρυθμίσεις των ελέγξιμων μεταβλητών u_0 όπως φαίνεται από την εξίσωση (2.12). Αν το ποσό της επιτρεπόμενης μεταβολής δεν είναι αρκετό για να ικανοποιηθούν όλοι οι περιορισμοί που προκύπτουν μετά από μια διαταραχή, τότε είναι αναγκαία η λήψη προληπτικών μέτρων μέσω αναδρομολόγησης των μεταβλητών u_0 .

Το διάνυσμα μέγιστων δυνατών τροποποιήσεων Δu_c^{max} δίνεται από την εξίσωση:

$$\Delta u_c^{max} = T_c \cdot \frac{du_c}{dt} \quad (2.13)$$

T_c είναι ο διαθέσιμος χρόνος για διορθωτικές ενέργειες και $\frac{du_c}{dt}$ είναι ο ρυθμός απόκρισης των ελέγξιμων ποσοτήτων ύστερα από διαταραχή. Είναι προφανές ότι ο διορθωτικός έλεγχος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον απαιτούμενο χρόνο κάθε ενέργειας.

Στις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο η ποσότητα Δu_c^{max} επιλέγεται αυθαίρετα με σκοπό την εκπόνηση αναλύσεων ευαισθησίας. Ο χειριστής ενός δικτύου είναι υπεύθυνος να γνωρίζει σε τι βαθμό είναι διαθέσιμοι διάφοροι διορθωτικοί χειρισμοί, και να αναπτύσσει μεθόδους που αυξάνουν τα περιθώρια για διορθωτικούς χειρισμούς.

2.4.3 Επίπεδα ασφαλείας στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν 2 μέθοδοι για εφαρμογή SC-OPF. Η πρώτη είναι προληπτική ενώ η δεύτερη προληπτική-διορθωτική. Για να υπάρχει ευκρίνεια όσον αφορά την φιλοσοφία κάθε μεθόδου και για να γίνει αντιστοίχιση των εννοιών με πραγματικές λειτουργικές καταστάσεις, παρουσιάζεται η εικόνα 2.1. Παρουσιάζονται διάφορες συνθήκες/καταστάσεις λειτουργίας, στις οποίες αποδίδονται κάποια επίπεδα ασφαλείας.

Στόχος κατά την εφαρμογή προληπτικής μεθόδου είναι η τοποθέτηση του συστήματος στην ‘Ασφαλή’ κατάσταση. Σε αυτή την κατάσταση είναι εγγυημένο ότι μια ενδεχόμενη διαταραχή δεν θα οδηγήσει το σύστημα σε κατάσταση όπου παραβιάζονται περιορισμοί, ούτε θα χρειαστεί ο χειριστής του δικτύου να αποκόψει φορτία καταναλωτών για διόρθωση του προβλήματος. Είναι το καλύτερο επίπεδο που μπορεί να επιτευχθεί από άποψη ασφαλείας. Έπο ορισμένες συνθήκες το σύστημα μπορεί να οδηγηθεί στην κατάσταση ‘Επιφυλακής’. Μια απότομη αύξηση της ζήτησης σε ισχύ π.χ μπορεί να προκαλέσει αυτή την μετάβαση. Σε αυτή την κατάσταση ενώ το σύστημα

δεν υπόκειται σε παραβιασμούς περιορισμών, διατρέχει τον κίνδυνο να βρεθεί σε δυσχερή θέση σε περίπτωση επερχόμενης διαταραχής. Για να ανακάμψει το σύστημα θα χρειαζόταν πλέον αποκοπή κάποιων φορτίων. Στην κατάσταση ‘Επιφυλακής’ χρειάζεται η εφαρμογή προληπτικών μέτρων για να επιστρέψει το σύστημα στην ‘Ασφαλή’ κατάσταση.

Μια προληπτική-διορθωτική μέθοδος έχει ως στόχο να βρίσκεται το σύστημα στην ‘Διορθωτικά Ασφαλή’ κατάσταση. Σε αυτή την κατάσταση ο χειριστής του δικτύου εγγυάται ότι οποιαδήποτε παράβαση ορίου προκληθεί από διαταραχή, μπορεί άμεσα να εκκαθαριστεί μέσω κατάλληλου διορθωτικού χειρισμού χωρίς περαιτέρω επιπτώσεις. Ο χειριστής του δικτύου εκπονεί μελέτες ασφαλείας και αναπτύσσει στρατηγικές ελέγχου οι οποίες να είναι άμεσα εφαρμόσιμες σε περίπτωση διαταραγμένης λειτουργίας. Αν το ποσό των διαθέσιμων ενεργειών δεν επαρκεί να εκκαθαριστούν όλες οι παραβιάσεις περιορισμών, το σύστημα οδηγείται στην κατάσταση ‘Επιφυλακής’. Προληπτικά μέτρα είναι πλέον αναγκαία για κατοχύρωση του επιπέδου ασφαλείας που δεν μπορεί να επιτευχθεί από διορθωτικές στρατηγικές.

Στην ‘Διορθωτικά Ασφαλή’ κατάσταση μια διαταραχή θα προκαλούσε μετάβαση στην κατάσταση ‘Διορθωτικής Επιφυλακής’. Πιθανές παραβάσεις ορίων εκκαθαρίζονται άμεσα μέσω εφαρμογής διορθωτικού ελέγχου. Για ασφάλεια έναντι επόμενης διαταραχής βέβαια, απαιτείται λήψη προληπτικών μέτρων για να μην υπάρχει το ρίσκο να βρεθεί το σύστημα σε ‘Κρίσιμη’ κατάσταση.

Περιπτώσεις όπου το δίκτυο βρίσκεται σε αποκατάσταση μετά από διακοπές φορτίου είναι πέραν των σκοπών της εργασίας και δεν θα συζητηθούν.

2.4.4 Σύνδεση λειτουργικών εξόδων και ασφάλειας

Το κόστος λειτουργίας όπως καθορίζεται από επίλυση SC-OPF είναι κατά κανόνα μεγαλύτερο ή ίσο από αυτό που καθορίζεται από βασικό OPF. Η επίτευξη της επιπλέον ασφάλειας απαιτεί μετατόπιση του σημείου λειτουργίας του συστήματος, έχοντας σαν αποτέλεσμα αυξημένο κόστος λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει επειδή η κατανομή της παραγωγής είναι περισσότερο διεσπαρμένη στις μονάδες του δικτύου. Οι φτηνές μονάδες παραγωγής αναγκάζονται να ελαττώσουν την ισχύ που αποδίδουν για να αποφευχθεί κορεσμός και υπερφόρτιση σε κοντινές τους περιοχές. Την διαφορά καλύπτουν οι υπόλοιπες, πιο ακριβές μονάδες παραγωγής, και έχει ως αποτέλεσμα μια πιο κατανεμημένη ροή ισχύος στο σύνολο του δικτύου μεταφοράς. Επομένως η αυξημένη ασφάλεια του δικτύου επιτυγχάνεται σε βάρος των λειτουργικών δαπανών. Αν χρησιμοποιηθούν οι συμβολισμοί P_0 , P_p και P_c για το πρόβλημα του κλασσικού OPF, προληπτικού και προληπτικού-διορθωτικού SC-OPF, τότε ισχύει η παρακάτω σχέση όσον αφορά τα λειτουργικά έξοδα που καθορίζονται από την επίλυση του κάθε προβλήματος:

$$\text{Κόστος}(P_0) \leq \text{Κόστος}(P_c) \leq \text{Κόστος}(P_p)$$

Η διαφορά μεταξύ λειτουργικών εξόδων OPF και SC-OPF έχει χαρακτηριστεί ως ‘Κόστος Ασφαλείας’ [5] και εκφράζει το ποσό που πρέπει να δαπανηθεί για να υπάρχει ασφαλής λειτουργία του δικτύου.

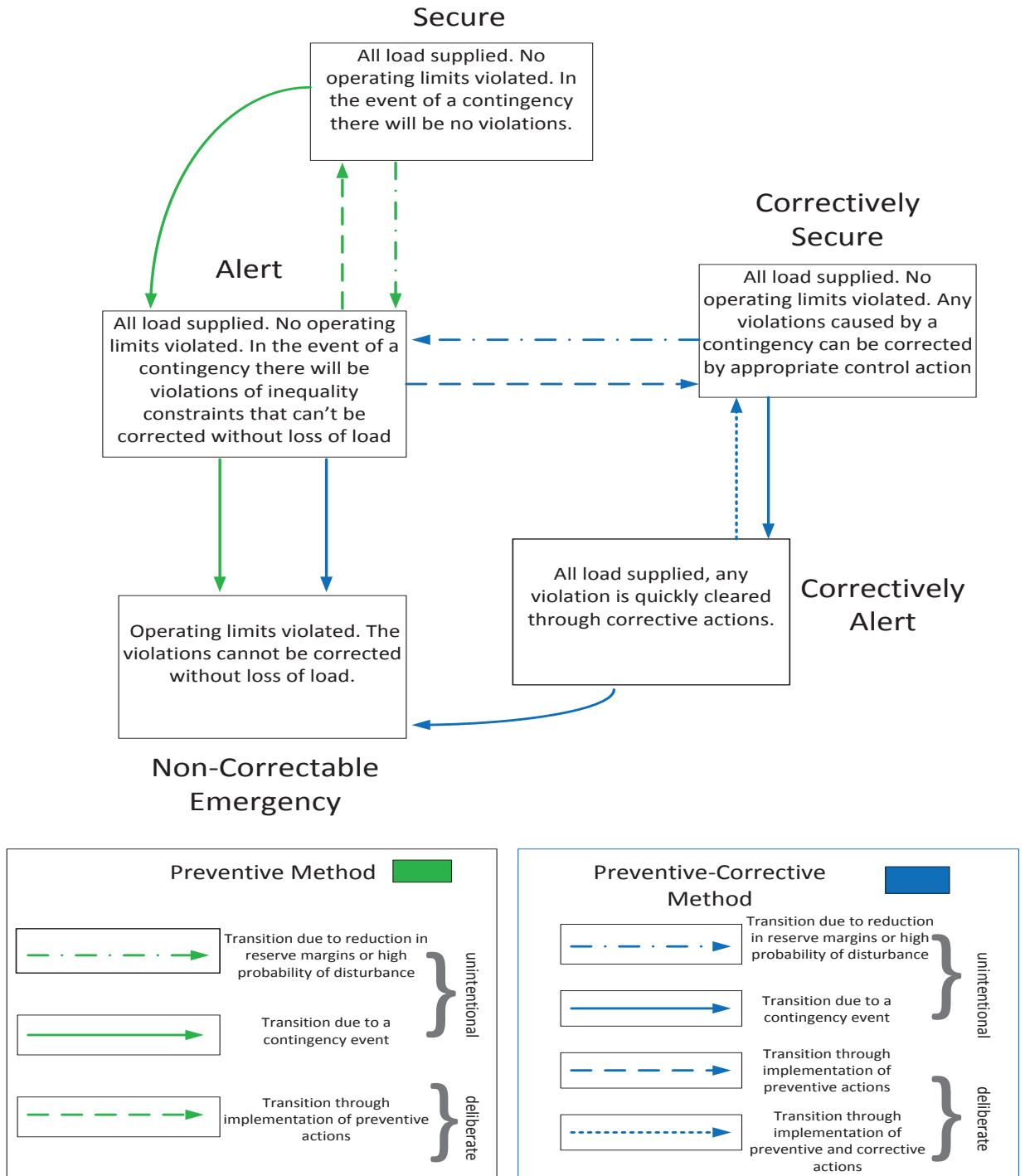


Figure 2.1: Διάγραμμα Καταστάσεων και Επιπέδου Ασφαλείας

Κεφαλαίο 3

Μοντελοποίηση Συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η γραμμικοποιημένη μορφή της βέλτιστης ροής φορτίου. Οι προσεγγίσεις που οδηγούν σε τέτοια κατάσταση του προβλήματος επισημαίνονται και στην συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος εφαρμογής σε μικτό AC-DC δίκτυο.

3.1 Γραμμική Βέλτιστη Ροή Φορτίου

Το OPF πρόβλημα που καταστρώθηκε στην παράγραφο 2.1 είναι εν γένει ένα μη γραμμικό, μη κυρτό πρόβλημα. Καθώς το μέγεθος του προβλήματος μεγαλώνει, η επίλυση του απαιτεί υπέρογκη υπολογιστική ισχύ. Το γεγονός αυτό πολλές φορές καθιστά το OPF μη ελκυστική επιλογή για συγκεκριμένες εφαρμογές. Μια καλή εναλλακτική σε τέτοιες περιπτώσεις είναι η χρήση της λεγόμενης DCOPF μοντελοποίησης. Το DCOPF μοντέλο βασίζεται σε προσεγγίσεις και παραδοχές που οδηγούν σε γραμμικοποίηση του αρχικού προβλήματος.

Το DCOPF μοντέλο έχει αρκετά πλεονεκτήματα [6]. Οι λύσεις που λαμβάνονται είναι αξιόπιστες και η πολυπλοκότητα του προβλήματος είναι πολύ μικρότερη από αυτήν του OPF. Τα υπολογιστικά εργαλεία επίλυσης είναι πολύ ισχυρά και γρήγορα, ενώ εγγυόνται σύγκλιση στο ολικό ελάχιστο ή μέγιστο. Οι ροές ενεργού ισχύος που υπολογίζονται είναι πολύ ακριβείς και το μοντέλο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε μελέτες διαταραχών.

Οι επόμενες παράγραφοι επεξηγούν τις έννοιες που θα οδηγήσουν σε γραμμικοποίηση του OPF.

3.2 Υπολογισμός Ενεργού Ισχύος στο AC Δίκτυο

Η ισχύς που ρέει σε μια AC γραμμή μεταφοράς δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις [7]:

$$P_{km} = U_k^2 G_{km} - U_k U_m G_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) - U_k U_m B_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) \quad (3.1)$$

$$Q_{km} = -U_k^2 (B_{km} + B_{km}^{sh}) + U_k U_m B_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) - U_k U_m G_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) \quad (3.2)$$

U_k , U_m είναι τα μέτρα των τάσεων στους ζυγούς k και m , δ είναι η γωνία της τάσης, ενώ G_{km} , B_{km} παριστούν την αγωγιμότητα προς γή. Με τις προσεγγίσεις που αναφέρονται στο [8] προκύπτει η γραμμική σχέση υπολογισμού της ροής ισχύος σε AC δίκτυο:

- Όλα τα μέτρα των τάσεων στους ζυγούς θεωρείται ότι είναι ίσα με την βασική τάση, δηλαδή $U_n = 1 \text{ p.u. } \forall n \in 1, 2, \dots, K$.

- Όντας μικρή σε σχέση με την αντίδραση της γραμμής, η ωμική αντίσταση αγνοείται τελείως ($R_{kmAC} = 0$). Επομένως $G_{km} = 0$.
- Δεν λαμβάνεται υπόψη η άεργος ισχύς ($Q_{km} = 0$).
- Οι γωνίες των τάσεων στους ζυγούς θεωρούνται πολύ μικρές, ώστε να ισχύει η προσέγγιση $|\sin(\alpha)| \approx \alpha$.

Με τις παραπάνω παραδοχές και προσεγγίσεις η ροή ενεργού ισχύος στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας δίνεται απο την γραμμική εξίσωση:

$$P_{km}^{AC} \approx \frac{\delta_k - \delta_m}{x_{km}} \quad (3.3)$$

Με x_{km} να παριστά την αντίδραση της γραμμής που συνδέει τους ζυγούς k , m και δ_k , δ_m οι γωνίες των τάσεων των αυτών ζυγών.

3.3 Γραμμική Βέλτιστη Ροή Φορτίου σε Μικτο Δίκτυο

Η γραμμικοποιημένη μορφή της βέλτιστης ροής φορτίου σε μικτό δίκτυο συλλήφθηκε και καταστρώθηκε στο [1]. Η παρούσα εργασία βασίζεται σε αυτή την μοντελοποίηση, την οποία και επεκτείνει για να πειλαμβάνει και αξιολογήσεις ασφαλείας. Για λόγους συνοχής η δουλειά του [1] παρουσιάζεται σε μεγάλο βαθμό στις παραγράφους 3.3.1 - 3.3.7.

3.3.1 Υπολογισμός Ροής Ενεργού Ισχύος σε DC Δίκτυο

Η ενεργός ισχύς που ρέει σε μια DC γραμμή μεταφοράς υπολογίζεται από την σχέση: (3.4):

$$P_{km}^{DC} = \frac{V_k \cdot (V_k - V_m)}{R_{km}} \quad (3.4)$$

η οποία είναι μη γραμμική. Για να συμπεριληφθούν οι εξισώσεις ροής φορτίου του DC δικτύου σε ένα ενοποιημένο πρόβλημα OPF, χρειάζεται με κάποιο τρόπο να προκύψει γραμμική μορφή της εξίσωσης (3.4). Αν γίνει η παραδοχή ότι τα μέτρα των DC τάσεων είναι πολύ κοντά στην ονομαστική τιμή τους (1 p.u), τότε η (3.4) μπορεί να προσεγγιστεί από την παρακάτω γραμμική εξίσωση:

$$P_{km}^{DC} \approx \frac{(V_k - V_m)}{R_{km}} \quad (3.5)$$

όπου V_k , V_m οι DC τάσεις στους ζυγούς k , m και R_{km} η ωμική αντίσταση της DC γραμμής μεταφοράς που τους συνδέει.

3.3.2 Ισοζύγιο Ισχύος σε Μικτό Δίκτυο

Κατ' αντιστοιχία με το AC δίκτυο οι θερμικές απώλειες στο DC δίκτυο θεωρούνται μηδενικές. Έπεται ότι οι εξισώσεις που περιγράφουν το ισοζύγιο ισχύος είναι οι:

$$P_{Lk} = \sum P_{Gk} - \sum_n^N P_{km} - \sum P_{Tk} \quad \text{για όλους τους AC ζυγούς} \quad (3.6)$$

$$P_{Lk} = \sum P_{Gk} - \sum_n^M P_{km} + \sum P_{Tk} \quad \text{για όλους τους DC ζυγούς} \quad (3.7)$$

P_{Lk} , P_{Gk} και P_{Tk} παριστά το φορτίο, την έγχυση ισχύος από μονάδα παραγωγής και την έγχυση ισχύος από σταθμό μετατροπής στον ζυγό k . τα πρόσημα των όρων P_{Tk} όσον αφορά τους AC και DC ζυγούς μπορούν να οριστούν αυθαίρετα, αρκεί να είναι αντίθετα μεταξύ τους ώστε να ικανοποιείται το ισοζύγιο ισχύος.

3.3.3 Κατάστρωση Προβλήματος Βελτιστοποίησης με Χρήση Πινάκων

Το DCOPF πρόβλημα μπορεί να καταστρωθεί με την χρήση πινάκων ως εξής:

$$\text{Minimize } f(\xi) = \frac{1}{2} \cdot \xi^T \cdot G \cdot \xi + \lambda \cdot \xi \quad (3.8)$$

subject to

$$C_{eq} \cdot \xi = b_{eq} \quad (3.9)$$

$$C_{iq} \cdot \xi \leq b_{iq} \quad (3.10)$$

Το πρόβλημα (3.8) - (3.9) αποτελεί ένα πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού, δηλαδή ένα πρόβλημα στο οποίο βελτιστοποιείται μια αντικειμενική συνάρτηση τετραγωνικής μορφής που υπόκειται σε γραμμικούς περιορισμούς.

3.3.4 Διάνυσμα Βελτιστοποίησης ξ

Το διάνυσμα ξ στο DCOPF πρόβλημα ενός μικτού δικτύου περιέχει μεταβλητές και από τα δύο δίκτυα:

$$\xi = [P_{G1} \ P_{G2} \ \dots \ P_{GI} \ \delta_2 \ \delta_3 \ \dots \ \delta_K \\ P_{T1} \ P_{T2} \ \dots \ P_{TL} \ V_{DC2} \ V_{DC3} \ \dots \ V_{DCM}]_{[C \times 1]}^T$$

οι δείκτες που εισάγονται σε αυτό το σημείο αναφέρονται στην ονοματολογία του πίνακα 3.1. Το σετ των μεταβλητών ελέγχου αποτελείται από την ενεργό ισχύ κάθε μονάδας παραγωγής, καθώς και από την ενεργό ισχύ που μεταφέρεται από κάθε σταθμό μετατροπής. Το σετ των μεταβλητών κατάστασης αποτελείται από τις γωνίες τάσεων δ των AC ζυγών και από τα μέτρα τάσεων V_{DC} των DC ζυγών. Για να επιλυθούν οι εξισώσεις ροής φορτίου χρειάζεται να είναι γνωστές μόνο οι σχετικές διαφορές στις γωνίες και σχετικές διαφορές στα μέτρα DC τάσεων. Είναι επομένως δυνατό να οριστεί από ένας ζυγός αναφοράς στο AC και DC δίκτυο. Στις καταστρώσεις που ακολουθούν ο AC ζυγός 1 και DC ζυγός 1 επιλέγονται ως ζυγοί αναφοράς, οπότε οι μεταβλητές που αντιστοιχούν σε αυτούς αφαιρούνται από το διάνυσμα βελτιστοποίησης ξ .

3.3.5 Αντικειμενική Συνάρτηση

Η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης καθορίζει τον στόχο που έχει η κατάστρωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Εδώ στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενεργού ισχύος των γεννητριών. Η συνάρτηση περιέχει ακόμη δύο τετραγωνικούς όρους που επιβάλλουν ποινές στις διαφορές μεταξύ γωνιών τάσεων στο AC δίκτυο και μέτρων τάσεων στο DC δίκτυο. Αυτή η προσθήκη ενισχύει τις ιδιότητες σύγκλισης των αριθμητικών μεθόδων επίλυσης του

Table 3.1: Ονοματολογία

K	Αριθμός AC ζυγών	
N	Αριθμός AC γραμμών	
M	Αριθμός DC ζυγών	
D	Αριθμός DC γραμμών	
I	Αριθμός γεννητριών	
L	Αριθμός σταθμών μετατροπής	
C	$I+K+L+M-2$	Μέγεθος διανύσματος ξ
Y	$2(I+N+L+D)$	Αριθμός ανισοτικών περιορισμών

προβλήματος και προσφέρει και έναν τρόπο εκτίμησης των σφαλμάτων που προκύπτουν από τις προσεγγίσεις του DCOPF.

$$\sum_{i=1}^I [\alpha \cdot P_{Gi} + \beta \cdot P_{Gi}^2] + \Pi^{AC} \cdot \sum_{km \in \mathcal{N}} [\delta_k - \delta_m]^2 + \Pi^{DC} \cdot \sum_{km \in \mathcal{D}} [V_{DCk} - V_{DCm}]^2 \quad (3.11)$$

\mathcal{N} = Ζεύγη AC ζυγών που συνδέονται με γραμμή.

\mathcal{D} = Ζεύγη DC ζυγών που συνδέονται με γραμμή.

α = Συντελεστής γραμμικού όρου του κόστους παραγωγής ισχύος.

β = Συντελεστής τετραγωνικού όρου του κόστους παραγωγής ισχύος.

Π^{AC} = Συντελεστής ποινής AC δικτύου.

Π^{DC} = Συντελεστής ποινής DC δικτύου.

Ο πίνακας G της (3.8) και τα στοιχεία του κατασκευάζονται ως εξής:

$$G = \begin{bmatrix} QC & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W^{AC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0_{[L \times L]} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W^{DC} \end{bmatrix}_{[C \times C]} \quad QC = \begin{bmatrix} 2\beta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\beta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\beta_I \end{bmatrix}_{[I \times I]}$$

$$W^{AC} = \begin{bmatrix} \sum_{k \neq 2} J_{k2} & -J_{23} & \cdots & -J_{2K} \\ -J_{32} & \sum_{k \neq 3} J_{k3} & \cdots & -J_{3K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -J_{K2} & -J_{K3} & \cdots & \sum_{k \neq K} J_{kK} \end{bmatrix}_{[K-1 \times K-1]}$$

$$W^{DC} = \begin{bmatrix} \sum_{k \neq 2} I_{k2} & -I_{23} & \cdots & -I_{2M} \\ -I_{32} & \sum_{k \neq 3} I_{k3} & \cdots & -I_{3M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -I_{M2} & -I_{M3} & \cdots & \sum_{k \neq M} I_{kM} \end{bmatrix}_{[M-1 \times M-1]}$$

Τα στοιχεία του πίνακα W^{AC} δίνονται απο:

$$J_{km} = \begin{cases} 1 & \text{αν υπάρχει γραμμή μεταξύ ζυγών } k \text{ και } m \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Με ανάλογο τρόπο προκύπτουν και τα στοιχεία του πίνακα W^{DC} . Το διαγώνιο σύνολο στοιχείων που αποτελείται απο μηδενικά στον πίνακα G έχει να κάνει με το γεγονός ότι δεν τίθενται κόστη για την λειτουργία των σταθμών μετατροπής. Το διάνυσμα λ της εξίσωσης (3.8) περιέχει τους συντελεστές των γραμμικών όρων για τα κόστη παραγωγής ισχύος:

$$\lambda = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_I \quad 0_{[1 \times (C-I)]]} \quad (3.12)$$

3.3.6 Περιορισμοί Ισότητας

Στο μικτό δίκτυο οι περιορισμοί ισότητας είναι ουσιαστικά οι εξισώσεις που εκφράζουν την διατήρηση της ενέργειας στους AC και DC ζυγούς. Ο πίνακας C_{eq} της (3.9) αποτελείται από άλλους κατάλληλα σχηματισμένους πίνακες που παρουσιάζονται παρακάτω. Ο πίνακας H καθορίζει την εγχυόμενη σε AC ζυγούς παραγόμενη ισχύ, μέσω κατανομής των γεννητριών στους αντίστοιχους ζυγούς:

$$H_{[K \times I]} \quad (3.13)$$

$$H_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{αν η γεννήτρια } j \text{ είναι συνδεδεμένη στο ζυγό } i \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.14)$$

Η ροή ενεργού ισχύος στις γραμμές μεταφοράς του AC δικτύου μπορεί να εκφραστεί χρήση πινάκων:

$$\begin{bmatrix} P_1^{AC} \\ P_2^{AC} \\ \vdots \end{bmatrix} = [B_{AC}] \cdot \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Η μήτρα αγωγιμοτήτων B_{AC} κατασκευάζεται ως εξής:

$$B_{AC} = \begin{bmatrix} -B_{12} & -B_{13} & \cdots & -B_{1K} \\ \sum_{k \neq 2} B_{k2} & -B_{23} & \cdots & -B_{2K} \\ \vdots & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -B_{K2} & -B_{K3} & \cdots & \sum_{k \neq K} B_{kK} \end{bmatrix}_{[K \times (K-1)]} \quad (3.16)$$

$$B_{km} = \begin{cases} \frac{1}{x_{km}} & \text{αν οι AC ζυγοί } k, m \text{ συνδέονται με γραμμή} \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.17)$$

Η πρώτη στήλη της μήτρας αγωγιμότητας αφαιρείται από την στιγμή που ορίζεται ζυγός αναφοράς, για λόγους ευκολίας εδώ επιλέγεται πάντα ο ζυγός υπαριθμόν 1. Οι εξισώσεις ροής φορτίου της (3.5) για το DC δίκτυο παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{bmatrix} P_1^{DC} \\ P_2^{DC} \\ \vdots \end{bmatrix} = [B_{DC}] \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Η μήτρα αγωγιμοτήτων του DC δικτύου $B_{DC[M \times (M-1)]}$ έχει ως στοιχεία:

$$B_{km} = \begin{cases} \frac{1}{R_{km}} & \text{αν οι DC ζυγοί } k, m \text{ συνδέονται μέσω γραμμής} \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.19)$$

Οι επόμενοι πίνακες αφορούν την αλληλεπίδραση του AC και DC δικτύου μέσω του ορισμού των συνδέσεων σταθμών μετατροπής σε AC και DC ζυγούς.

$$T_{[K \times L]} : \text{Ορισμός συνδέσεων σταθμών μετατροπής σε AC ζυγούς} \quad (3.20)$$

όπου

$$T_{pq} = \begin{cases} -1 & \text{αν ο σταθμός } q \text{ είναι συνδεδεμένος στον AC ζυγό } p \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

$$S_{[M \times L]} : \text{Ορισμός συνδέσεων σταθμών μετατροπής σε DC ζυγούς} \quad (3.21)$$

$$S_{pq} = \begin{cases} 1 & \text{αν ο σταθμός } q \text{ είναι συνδεδεμένος στον DC ζυγό } p \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Ο πίνακας T καθορίζει τις συνδέσεις σταθμών μετατροπής σε AC ζυγούς και ο S τις συνδέσεις με DC ζυγούς. Για να τηρείται το ισοζύγιο ισχύος τα στοιχεία των T, S έχουν αντίθετα πρόσημα. Δεδομένου ότι δεν λαμβάνονται υπόψη απώλειες, η ισχύς που ρέει στις εκατέρωθεν πλευρές ενός σταθμού μετατροπής είναι ίδια. Ο πίνακας C_{eq} με του οποίου την χρήση εκφράζονται οι περιορισμοί ισότητας των (3.6), (3.7), είναι πλέον πλήρως ορισμένος:

$$C_{eq} = \begin{bmatrix} H & -B_{AC} & T & 0 \\ 0 & 0 & S & -B_{DC} \end{bmatrix}_{[(K+M) \times C]} \quad (3.22)$$

Το διάνυσμα b_{eq} της (3.9) περιέχει τα φορτία που βρίσκονται συνδεδεμένα στους ζυγούς του μικτού δικτύου:

$$b_{eq} = [P_{L,1} P_{L,2} \dots P_{L,(K+M)}]_{[(K+M) \times 1]}^T \quad (3.23)$$

Η πρώτη γραμμή του πίνακα C_{eq} αντιπροσωπεύει το ισοζύγιο ισχύος στο AC δίκτυο:

$$\sum P_{Gi} - \sum_{km \in \mathcal{N}} B_{km}^{AC} [\delta_k - \delta_m] - \sum P_{Tk} = \sum P_{Li} \quad (3.24)$$

ενώ η δεύτερη γραμμή αντιπροσωπεύει το ισοζύγιο ισχύος στο DC δίκτυο:

$$- \sum_{km \in \mathcal{D}} B_{km}^{DC} [V_k - V_m] + \sum P_{Tk} = \sum P_{Li} \quad (3.25)$$

3.3.7 Ανισοτικοί Περιορισμοί

Οι ανισοτικοί περιορισμοί που προκύπτουν από την μοντελοποίηση του συστήματος είναι οι ακόλουθοι:

$$|P_{km}^{AC}| \leq F_{AC}^{max} \quad \forall \text{ AC γραμμή} \quad (3.26)$$

$$|P_{km}^{DC}| \leq F_{DC}^{max} \quad \forall \text{ DC γραμμή} \quad (3.27)$$

$$|P_{T,i}| \leq F_{T,i}^{max} \quad \forall \text{ σταθμό μετατροπής } i \quad (3.28)$$

$$P_{G,i}^{min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{max} \quad \forall \text{ γεννήτρια } i \quad (3.29)$$

Για να προκύψουν οι παραπάνω περιορισμοί εισάγονται οι πιο κάτω πίνακες:

$$A_{AC} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{12} & \cdots & \mathbf{J}_{1K} \\ \mathbf{J}_{22} & \cdots & \mathbf{J}_{2K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{J}_{N2} & \cdots & \mathbf{J}_{NK} \end{bmatrix}_{[N \times (K-1)]} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{J}_{ij} = \begin{cases} B_{AC} & \text{αν η γραμμή } i \text{ έχει αρχή στο ζυγό } j \\ -B_{AC} & \text{αν η γραμμή } i \text{ έχει πέρας στο ζυγό } j \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.31)$$

Με την ίδια φιλοσοφία κατασκευάζεται ο ανάλογος πίνακας $A_{DC[D \times (M-1)]}$ για το DC δίκτυο. Τώρα μπορεί να οριστεί ο πίνακας C_{iq} ως ακολουθεί:

$$C_{iq} = \begin{bmatrix} \Lambda_I & 0 & 0 & 0 \\ -\Lambda_I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{AC} & 0 & 0 \\ 0 & -A_{AC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_L & 0 \\ 0 & 0 & -\Lambda_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{DC} \\ 0 & 0 & 0 & -A_{DC} \end{bmatrix}_{[Y \times C]} \quad (3.32)$$

Οι πίνακες Λ_I και Λ_L είναι μοναδιαίοι πίνακες. Οι δύο πρώτες γραμμές του πίνακα C_{iq} αντιστοιχούν στους περιορισμούς ελάχιστης και μέγιστης ισχύος που μπορούν να αποδώσουν οι μονάδες παραγωγής (γεννήτριες). Η 3η και 4η γραμμή αντιστοιχούν στα όρια φόρτισης των AC γραμμών μεταφοράς, ενώ οι επόμενες δύο υλοποιούν τους περιορισμούς μέγιστης μεταφοράς ισχύος από τους σταθμούς μετατροπής. Οι τελευταίες δύο γραμμές του πίνακα αντιστοιχούν στα όρια φόρτισης των DC γραμμών μεταφοράς.

Το διάνυσμα b_{iq} περιέχει όλα τα όρια λειτουργίας των στοιχείων του δικτύου και κατασκευάζεται ως εξής:

$$b_g^{max} = [P_{G1}^{max} \ P_{G2}^{max} \ \dots \ P_{GI}^{max}]_{[I \times 1]}^T \quad (3.33)$$

$$b_g^{min} = [P_{G1}^{min} \ P_{G2}^{min} \ \dots \ P_{GI}^{min}]_{[I \times 1]}^T \quad (3.34)$$

$$b_{l,AC} = [P_{l1} \ P_{l2} \ \dots \ P_{lN}]_{[N \times 1]}^T \quad (3.35)$$

$$b_{l,DC} = [P_{l1} \ P_{l2} \ \dots \ P_{lO}]_{[D \times 1]}^T \quad (3.36)$$

$$b_{term} = [P_{t1} \ P_{t2} \ \dots \ P_{tL}]_{[L \times 1]}^T \quad (3.37)$$

$$b_{iq} = [b_g^{max} \ b_g^{min} \ b_{l,AC} \ -b_{l,AC} \ b_{term} \ b_{term} \ b_{l,DC} \ -b_{l,DC}]_{[Y \times 1]}^T$$

Κεφαλαίο 4

SC-OPF στο Μικτό Δίκτυο

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν 2 μέθοδοι για εφαρμογή SC-OPF σε μικτό AC-DC δίκτυο και εξηγείται εκτενέστερα η λογική που υποστηρίζει τις μοντελοποιήσεις που χρησιμοποιούνται. Ο όρος SC-OPF θα χρησιμοποιείται για να γίνεται αναφορά στο γραμμικό μοντέλο της βέλτιστης ροής φορτίου υπό περιορισμούς ασφαλείας.

4.1 Μέθοδος I: Προληπτική

Η προληπτική προσέγγιση ενός προβλήματος SC-OPF βασίζεται στην αντίληψη ότι οι συνέπειες μιας πιθανής διαταραχής πρέπει να εκτιμώνται και να αντιμετωπίζονται προληπτικά ενόσω το σύστημα βρίσκεται ακόμα στην κανονική κατάσταση λειτουργίας. Για να επιτευχθεί αυτό ο χειριστής του δικτύου οφείλει να εκπονεί μελέτες διαταραχών ώστε να μπορεί να λαμβάνει κατάλληλα μέτρα που εγγυώνται ασφαλή λειτουργία.

Μια τεχνική είναι να επιλύεται μια βέλτιστη ροή φορτίου για κάθε σενάριο διαταραχής που λαμβάνεται υπόψη. Αν υπάρχουν παραβιάσεις ορίων, αυτές καταγράφονται και αντιμετωπίζονται με κατάλληλο τρόπο. Παρότι λειτουργικός, αυτός ο τρόπος προσέγγισης του προβλήματος μπορεί να αποβεί μη αποδοτικός σε μεγάλα δίκτυα και να απαιτεί υπέρογκη υπολογιστική δύναμη.

Η χρήση γραμμικού DCOPF μοντέλου προσφέρει πλεονέκτημα στις μελέτες διαταραχών, καθώς οι επιπτώσεις μιας διαταραχής μπορούν προσεγγιστικά να υπολογιστούν χωρίς την έλευση της. Έτσι, περιορισμοί που έχουν να κάνουν με την απώλεια γραμμής μεταφοράς ή γεννήτριας μπορούν να συμπεριληφθούν σε ένα ενιαίο πρόβλημα βελτιστοποίησης, παρέχοντας έναν ευθύ τρόπο κατάστρωσης του προβλήματος και παράλληλα ελαττώνοντας σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο επίλυσης. Η προληπτική μέθοδος που θα αναπτυχθεί λαμβάνει υπόψη τις απώλειες AC και DC γραμμών μεταφοράς καθώς και απώλειες γεννητριών σαν ενδεχόμενες διαταραχές στο δίκτυο.

4.1.1 Συντελεστές Κατανομής σε απώλεια AC Γραμμής Μεταφοράς

Σε περίπτωση απώλειας μιας γραμμής, η ισχύς που μέχρι τότε έρρεε σε αυτήν θα ανακαταμεριστεί στις υπόλοιπες γραμμές του προκειμένου να τροφοδοτηθούν απρόσκοπτα τα φορτία του δικτύου. Το ποσοστό αυτής της ισχύος που αναλαμβάνει η κάθε γραμμή μπορεί να υπολογιστεί μέσω των συντελεστών κατανομής LODF (Line Outage Distribution Factors) [9]. Ο συμβολισμός $LODF_{i,j,km}$ αντιπροσωπεύει το ποσοστό της ισχύος που έρρεε αρχικά στην γραμμή $k - m$ που

πλέον ρέει στην γραμμή $i - j$, όταν η γραμμή $k - m$ είναι εκτός. Δίνεται από την σχέση:

$$LODF_{ij,km}^{AC} = \frac{n_{km} \cdot x_{km}}{n_{ij} \cdot x_{ij}} \cdot \frac{(\mathbf{X}_{ik} - \mathbf{X}_{im} - \mathbf{X}_{jk} + \mathbf{X}_{jm})}{[n_{rs} \cdot x_{km} - (\mathbf{X}_{kk} + \mathbf{X}_{mm} - 2\mathbf{X}_{km})]} \quad (4.1)$$

- x_{ij} : αντίδραση της γραμμής μεταφοράς $i - j$
 \mathbf{X}_{ij} : στοιχείο στην i γραμμή και j στήλη της μήτρας αντιδράσεων \mathbf{X}
 n_{ij} : αριθμός γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τους ζυγούς i και j

Η μήτρα αγωγιμοτήτων B_{AC} αποτελεί ιδιάζων πίνακα ο οποίος δεν αντιστρέφεται. Αφαιρώντας την γραμμή και την στήλη που αντιστοιχεί στον ζυγό αναφοράς, ο ελαττωμένος πίνακας $B_{AC}^{red}[K - 1 \times K - 1]$ είναι δυνατό να αντιστραφεί. Ο πίνακας που προκύπτει απτην αντιστροφή επαυξάνεται κατά μια γραμμή και στήλη από μηδενικά, που καταλήγει να είναι η μήτρα αντιδράσεων \mathbf{X} .

$$B_{AC}^{red} = B_{AC}(2 : K, 2 : K) \quad (4.2)$$

$$\mathbf{X} = inv(B_{AC}^{red}) \quad (4.3)$$

Με την χρήση των συντελεστών LODF η συνολική ισχύς που μεταφέρει η γραμμή $i - j$ ύστερα από την απώλεια της γραμμής $k - m$ θα είναι:

$$P_{ij,1} = P_{ij,0} + LODF_{ij,km}^{AC} \cdot P_{km,0} \quad (4.4)$$

όπου οι δείκτες 0, 1 παριστούν την κανονική και την μετά-διαταραχής κατάσταση του δικτύου.

4.1.2 Συντελεστές Κατανομής σε απώλεια DC Γραμμής Μεταφοράς

Η εξίσωση (3.18) μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη μορφή αν γίνει πολλαπλασιασμός από τα αριστερά με $[B_{DC}]^{-1}$:

$$\mathbf{V} = [\mathbf{Z}] \cdot \mathbf{P} \quad (4.5)$$

όπου \mathbf{V} είναι διάνυσμα με στοιχεία τις τάσεις των DC ζυγών, \mathbf{P} το διάνυσμα που περιέχει τις εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς και \mathbf{Z} η μήτρα αντιστάσεων που προκύπτει από τον πίνακα B_{DC} . Ο πίνακας B_{DC} δεν είναι αντιστρέψιμος διοτι εξόρισμού αναφέρεται σε ένα σύστημα γραμμικώς εξαρτημένων εξισώσεων. Ορίζοντας τιμή αναφοράς την τάση ενός DC ζυγού, η γραμμή και στήλη του πίνακα που αντιστοιχεί σε αυτόν μπορούν να παραλειφθούν. Η αντιστροφή του ελαττωμένου πίνακα είναι πλέον εφικτή. Με την προσθήκη μιας γραμμής και στήλης μηδενικών στον αντεστραμμένο πίνακα προκύπτει ο πίνακας αντιστάσεων \mathbf{Z} της εξίσωσης (4.5). με επιλογή του ζυγού 1 ως αναφορά ο πίνακας \mathbf{Z} κατασκευάζεται ως:

$$\mathbf{Z} = \left[\begin{array}{c|ccc} 0 & \cdots & \cdots & 0_K \\ - & - & - & - \\ \vdots & & & \\ \vdots & & & B_{DC}^{-1} \\ 0_K & & & \end{array} \right] \quad (4.6)$$

Για τον υπολογισμό αλλαγών στις τιμές των τάσεων, για δεδομένη αλλαγή στις εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς, η πιο κάτω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

$$\Delta \mathbf{V} = [\mathbf{Z}] \cdot \Delta \mathbf{P} \quad (4.7)$$

Ας υποθεθεί ότι ο ζυγός i υπόκειται σε 1 α.μ αύξηση της εγχυόμενης σε αυτόν ισχύος που αντισταθμίζεται από 1 α.μ ελάττωση της ισχύος στον ζυγό αναφοράς. Τότε οι τιμές των μεταβολών ΔV θα ισούνται με την παράγωγο των τάσεων ως προς την μεταβολή ισχύος σε έναν τυχαίο ζυγό k . Ορίζονται οι παρακάτω συντελεστές ευαισθησίας:

$$\omega = \frac{df_{km}}{dP_i} = \frac{d}{dP_i} \left[\frac{V_k - V_m}{R_{km}} \right] = \frac{1}{R_{km}} \left[\frac{dV_k}{dP_i} - \frac{dV_m}{dP_i} \right] = \frac{1}{R_{km}} (\mathbf{Z}_{ki} - \mathbf{Z}_{mi}) \quad (4.8)$$

όπου:

$$\begin{aligned} df_{km} &: \text{μεταβολή στην ροή ισχύος στην γραμμή k-m} \\ dP_i &: \text{στοιχειώδης μεταβολή της εγχυόμενης ισχύος στον ζυγό i} \\ \mathbf{Z}_{ki} = \frac{dV_k}{dP_i} &: \text{στοιχείο γραμμής k και στήλης i του πίνακα Z} \\ \mathbf{Z}_{mi} = \frac{dV_m}{dP_i} &: \text{στοιχείο γραμμής m και στήλης i του πίνακα Z} \\ R_{km} &: \text{αντίσταση της γραμμής μεταφοράς k-m} \end{aligned}$$

Η εικόνα 4.1 δείχνει την γραμμή $k - m$ υπό κανονικές συνθήκες, ενώ στην εικόνα 4.2 παρουσιάζεται η ίδια γραμμή όταν είναι εκτός. Σε αυτή την περίπτωση οι διακόπτες της γραμμής είναι ανοικτοί, επομένως δεν διαρρέονται από ρεύμα και η γραμμή $k - m$ είναι απομονωμένη από το υπόλοιπο δίκτυο. Το αποτέλεσμα της απώλειας μιας γραμμής μεταφοράς μπορεί να προσεγγιστεί προσθέτοντας ένα ζεύγος εγχύσεων ισχύος στους ζυγούς που αντιστοιχούν στην εκτός λειτουργίας γραμμή και θεωρώντας την κλειστή. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3, με την μοντελοποίηση αυτή οι διακόπτες της γραμμής είναι κλειστοί αλλά προστίθεται μια έγχυση ισχύος ΔP_k και ΔP_m στους ζυγούς k, m αντίστοιχα. Αν ισχύει $\Delta P_k = P_{km}^1$ και $\Delta P_m = -P_{km}^1$ τότε δεν περνάει ρεύμα από τους διακόπτες και μέσω της γραμμής παρά το γεγονός ότι είναι κλειστή. Έτσι για το υπόλοιπο δίκτυο είναι σαν η γραμμή $k - m$ να είναι εκτός λειτουργίας. Με χρήση της εξίσωσης (4.7) ποσοτικοποιούνται τα αποτελέσματα έγχυσης ισχύος στους ζυγούς k, m .

$$\Delta V_k = \mathbf{Z}_{kk} \Delta P_k + \mathbf{Z}_{km} \Delta P_m \quad (4.9)$$

$$\Delta V_m = \mathbf{Z}_{mk} \Delta P_k + \mathbf{Z}_{mm} \Delta P_m \quad (4.10)$$

Ορίζονται τώρα οι παρακάτω συμβολισμοί:

$$\begin{aligned} V_k, V_m, P_{km} &: \text{να αντιστοιχούν στις πρό-διαταραχής τιμές} \\ \Delta V_k, \Delta V_m, \Delta P_{km} &: \text{να αντιστοιχούν στις στοιχειώδεις μεταβολές} \\ V_k^1, V_m^1, P_{km}^1 &: \text{να αντιστοιχούν στις μετά-διαταραχής τιμές} \end{aligned}$$

Άρα για την περίπτωση που η γραμμή $k - m$ είναι εκτός, έπεται ότι

$$P_{km}^1 = \Delta P_k = -\Delta P_m \quad (4.11)$$

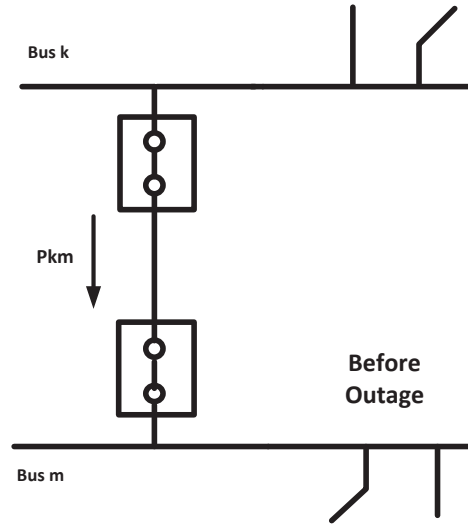


Figure 4.1: Γραμμή μεταφοράς πριν από την διαταραχή

$$P_{km}^1 = \frac{V_k^1 - V_m^1}{R_{km}} \quad (4.12)$$

Οι εξισώσεις (4.9) και (4.10) γράφονται ως εξής:

$$\Delta V_k = (Z_{kk} - Z_{km})\Delta P_k \quad (4.13)$$

$$\Delta V_m = (Z_{mm} - Z_{mk})\Delta P_k \quad (4.14)$$

και με την χρήση των:

$$V_k^1 = V_k + \Delta V_k \quad (4.15)$$

$$V_m^1 = V_m + \Delta V_m \quad (4.16)$$

προκύπτει η εξίσωση:

$$P_{km}^1 = \frac{V_k - V_m}{R_{km}} + \frac{\Delta V_k - \Delta V_m}{R_{km}} \quad (4.17)$$

η οποία μπορεί να γραφεί τώρα ως:

$$P_{km}^1 = P_{km} + (Z_{kk} + Z_{mm} - 2Z_{km})\Delta P_k \quad (4.18)$$

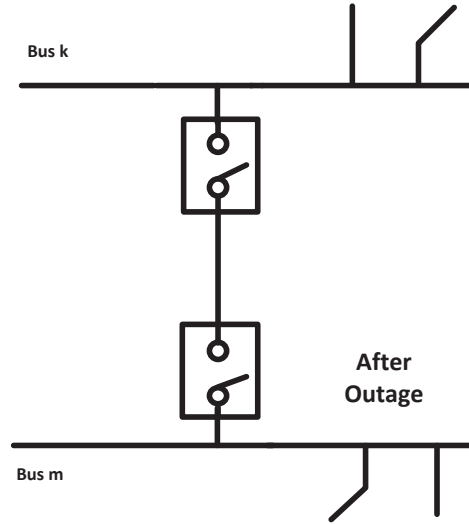


Figure 4.2: Γραμμή μεταφοράς μετά από την διαταραχή

Ο όρος P_{km}^1 μπορεί να αντικατασταθεί από τον όρο ΔP_k σύμφωνα με την εξίσωση (4.11)

$$\Delta P_k = \left[\frac{1}{1 - \frac{(Z_{kk} + Z_{mm} - 2Z_{km})}{R_{km}}} P_{km} \right] \quad (4.19)$$

Αν οριστεί συντελεστής ευαισθησίας θ ως ο λόγος της μεταβολής στην τάση προς την ισχύ P_{km} που ρέει σε μια γραμμή:

$$\theta_{i,km} = \frac{\Delta V_i}{P_{km}} \quad (4.20)$$

τότε η μεταβολή στην τάση ενός ζυγού μπορεί να γραφεί:

$$\Delta V_i = Z_{ik} \Delta P_k + Z_{im} \Delta P_m \quad (4.21)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις για τους όρους ΔP_k και ΔP_m από την εξίσωση (4.19), η έκφραση για τον συντελεστή ευαισθησίας γίνεται:

$$\theta_{i,km} = \frac{(Z_{ik} - Z_{im})R_{km}}{R_{km} - (Z_{kk} + Z_{mm} - 2Z_{km})} \quad (4.22)$$

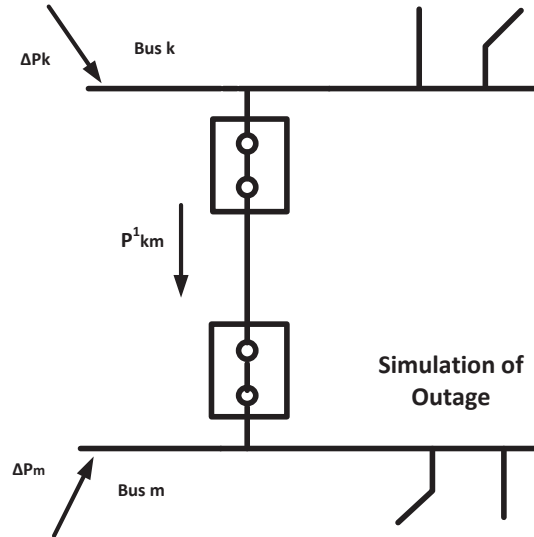


Figure 4.3: Μοντελοποίηση απώλειας γραμμής με εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς

Εξόρισμού ο συντελεστής κατανομής ισχύος σε απώλεια γραμμής μεταφοράς είναι:

$$LODF_{ij,km} = \frac{\Delta F_{ij}}{F_{km}^0} \quad (4.23)$$

$LODF_{ij,km}$: συντελεστής κατανομής της γραμμής $i - j$
μετά απο απώλεια της γραμμής $k - m$

ΔF_{ij} : μεταβολή της ισχύος που φέρει η γραμμή $i - j$

F_{km}^0 : ισχύς που έφερε η γραμμή $k - m$ πριν αποκοπεί

Αναπτύσσοντας την έκφραση προκύπτει:

$$\begin{aligned} LODF_{ij,km} &= \frac{\Delta F_{ij}}{F_{km}^0} = \frac{\frac{\Delta V_i - \Delta V_j}{R_{ij}}}{F_{km}^0} \\ &= \frac{1}{R_{ij}} \left(\frac{\Delta V_i}{P_{km}} - \frac{\Delta V_j}{P_{km}} \right) = \frac{1}{R_{ij}} (\theta_{i,km} - \theta_{j,km}) \quad (4.24) \end{aligned}$$

και αξιοποιώντας την εξίσωση (4.25) η έκφραση για τους συντελεστές κατανομής παίρνει την τελική της μορφή:

$$LODF_{ij,km}^{DC} = \frac{R_{km}}{R_{ij}} \cdot \frac{(Z_{ik} - Z_{im} - Z_{jk} + Z_{jm})}{R_{km} - (Z_{kk} + Z_{mm} - 2Z_{km})} \quad (4.25)$$

Πλέον η έκφραση για την ισχύ που φέρει η γραμμή μεταφοράς $i - j$ μετά από απώλεια της γραμμής $k - m$ είναι:

$$P_{ij,1} = P_{ij,0} + LODF_{ij,km}^{DC} \cdot P_{km,0} \quad (4.26)$$

4.1.3 Συντελεστές Καταμερισμού σε Απώλεια Γεννήτριας

Η ανακατανομή της ισχύος που φέρει μια γραμμή μεταφοράς μετά από απώλεια μονάδας παραγωγής μπορεί να υπολογιστεί με την χρήση των συντελεστών κατανομής (GGDF: Generalized Generation Distribution Factors) [10], [11]. Ο συμβολισμός $GGDF_{ij}^m$ περιγράφει το ποσοστό της αποδιδόμενης ισχύος της γεννήτριας m πριν την διαταραχή, το οποίο ρέει στην γραμμή $i - j$ ύστερα από απώλεια της γεννήτριας m :

$$GGDF_{ij}^m = \frac{1}{x_{ij}} \cdot E_{ij} \cdot [B_{AC}]^{-1} \cdot \Psi_{m,i} \quad (4.27)$$

E_{ij} είναι διάνυσμα διαστάσεων $[1 \times K]$ με τιμή 1 στην στήλη που αντιστοιχεί στο ζυγό αρχής της γραμμής $i - j$ και τιμή -1 στην στήλη που αντιστοιχεί στο ζυγό τέλους της γραμμής. Ψ_m είναι ο συμβολισμός για το διάνυσμα διαστάσεων $[K \times 1]$:

$$\Psi_{m,i} = \begin{cases} -1 & \text{αν η γεννήτρια } m \text{ που βγαίνει εκτός ήταν συνδεδεμένη στο ζυγό } i \\ \frac{P_i^{max}}{\sum_{j \neq m} P_j^{max}} & \text{αν υπάρχει γεννήτρια συνδεδεμένη στο ζυγό } i \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.28)$$

Η παραπάνω μοντελοποίηση θεωρεί ότι η ισχύς που απέδιδε μια γεννήτρια πριν βγει εκτός λειτουργίας, αντισταθμίζεται από τις υπόλοιπες γεννήτριες του δικτύου, με βαρύτητα ανάλογη με την ονομαστική μέγιστη ισχύ κάθε συμμετέχουσας γεννήτριας.

4.1.4 Περιορισμοί Γραμμών Μεταφοράς

Σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράφηκε στις παραγράφους 4.1.1 - 4.1.3 στους ανισοτικούς περιορισμούς (3.26)-(3.29):

$$\begin{aligned} \left| \frac{\delta_k - \delta_m}{x_{km}} \right| &\leq F_{AC,km}^{max} && \forall \text{ AC γραμμή } k - m \\ \left| \frac{V_{DC,k} - V_{DC,m}}{R_{km}} \right| &\leq F_{DC,km}^{max} && \forall \text{ DC γραμμή } k - m \\ |P_{T,i}| &\leq P_{T,i}^{max} && \forall \text{ σταθμό μετατροπής } i \\ P_{G,i}^{min} &\leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{max} && \forall \text{ γεννήτρια } i \in I \end{aligned}$$

προστίθενται οι παρακάτω περιορισμοί:

$$\left| \frac{\delta_k - \delta_m}{x_{km}} + LODF_{km,ij}^{AC} \cdot \frac{\delta_i - \delta_j}{x_{ij}} \right| \leq F_{AC,km}^{max}$$

\forall AC γραμμή $k - m$ και εκτός λειτουργίας AC γραμμή $i - j$ (4.29)

$$\left| \frac{V_{DC,k} - V_{DC,m}}{R_{km}} + LODF_{km,ij}^{DC} \cdot \frac{V_{DC,i} - V_{DC,j}}{R_{ij}} \right| \leq F_{DC,km}^{max}$$

\forall DC γραμμή $k - m$ και εκτός λειτουργίας DC γραμμή $i - j$ (4.30)

$$\left| \frac{\delta_k - \delta_m}{x_{km}} + GGDF_{km}^s \cdot P_{Gs} \right| \leq F_{AC,km}^{max}$$

\forall AC γραμμή $k - m$ και εκτός λειτουργίας γεννήτρια s (4.31)

Κάθε AC γραμμή επιφέρει έναν περιορισμό για την κανονική κατάσταση λειτουργίας της και $N - 1$ προληπτικούς περιορισμούς για τις υπόλοιπες γραμμές του δικτύου, για το ενδεχόμενο απώλειας της γραμμής. Με την ίδια λογική κάθε DC γραμμή επιφέρει έναν περιορισμό σχετικό με κανονική λειτουργία και $D - 1$ περιορισμούς για απώλεια της γραμμής. Κάθε ενδεχόμενο απώλειας γεννήτριας, επιφέρει N περιορισμούς που αφορούν την μέγιστη φόρτιση των N AC γραμμών μεταφοράς. Οι συμβολισμοί N, I, D έχουν οριστεί στον πίνακα 3.1.

4.1.5 Κατάστρωση του προβλήματος

Για να σχηματιστεί το πρόβλημα με την χρήση πινάκων όπως στην παράγραφο 3.3.3, θα πρέπει οι πίνακες C_{iq} και b_{iq} να τροποποιηθούν κατάλληλα. Οι πίνακες C_{eq} , b_{eq} και G παραμένουν ίδιοι διότι στην προληπτική μέθοδο δεν λαμβάνονται υπόψη οι εξισώσεις ροής φορτίου για κατάσταση του δικτύου μετά από διαταραχή. Η λειτουργία του δικτύου βελτιστοποιείται για την κανονική κατάσταση του δικτύου και εφόσον οι γεννήτριες μπορούν να ικανοποιήσουν την ζήτηση σε οποιαδήποτε απώλεια ενός στοιχείου του δικτύου, οι περιορισμοί ισότητας σε κατάσταση διαταραχής δεν χρειάζεται να υπολογιστούν. Ο σχηματισμός του σετ των εξισώσεων (4.31) σε μορφή πινάκων γίνεται με την χρήση δύο πινάκων. Ο πρώτος περιλαμβάνει τους συντελεστές κατανομής σε απώλεια γεννήτριας κατάλληλα τοποθετημένους:

$$E_I = \left[E_{I,1} \quad E_{I,2} \quad \dots \quad E_{I,N} \right]_{[(N \cdot I) \times I]}^T \quad (4.32)$$

$$E_{I,1} = \begin{bmatrix} GGDF_{br1}^{Gen1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & GGDF_{br1}^{Gen2} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & GGDF_{br1}^{GenI} \end{bmatrix}_{[I \times I]} \quad (4.33)$$

Οι πίνακες $E_{I,2}, \dots, E_{I,N}$ κατασκευάζονται αναλόγως και αφορούν τις γραμμές με δείκτη $i = 1, 2, \dots, N$. Ο δεύτερος πίνακας που χρειάζεται για να σχηματιστεί το σετ εξισώσεων (4.31) είναι

ο πίνακας γειτνίασης σε απώλεια γεννήτριας:

$$E_{AC} = \begin{bmatrix} E_{AC,1} & E_{AC,2} & \cdots & E_{AC,N} \end{bmatrix}_{[(N \cdot I) \times (K-1)]} \quad (4.34)$$

$$E_{AC,1} = \begin{bmatrix} \mathbb{J}_{12} & \cdots & \mathbb{J}_{1K} \\ \mathbb{J}_{12} & \cdots & \mathbb{J}_{1K} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbb{J}_{12} & \cdots & \mathbb{J}_{1K} \end{bmatrix}_{[I \times (K-1)]} \quad (4.35)$$

Τα στοιχεία του πίνακα $E_{AC,i}$ είναι ουσιαστικά τα στοιχεία του πίνακα γειτνίασης A_{AC} της εξίσωσης (3.30) που αντιστοιχούν στην i -οστή γραμμή του, επανειλημμένα σε κάθε γραμμή του πίνακα. Οι πίνακες $E_{I,1}$ και $E_{AC,1}$ σχηματίζουν λοιπόν όλους τους περιορισμούς φόρτισης της AC γραμμής μεταφοράς 1, μέσω της ποσοτικοποίησης των επιδράσεων κάθε διαταραχής που προκαλείται από απώλεια γεννήτριας. Για κάθε ξεχωριστή γραμμή μεταφοράς η κατάλληλη γραμμή του πίνακα A_{AC} επαναλαμβάνεται I φορές (μια για κάθε ενδεχόμενο απώλειας γεννήτριας) για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Όσον αφορά τους ανισοτικούς περιορισμούς (4.29) που επιφέρουν τα ενδεχόμενα απώλειας AC γραμμής μεταφοράς, εισάγεται ο επόμενος πίνακας:

$$A_{ACprev} = \begin{bmatrix} A_{ACprev1} & A_{ACprev2} & \cdots & A_{ACprevN} \end{bmatrix}_{[N^2 \times (K-1)]}^T \quad (4.36)$$

Κάθε στοιχείο του πίνακα A_{ACprev} ποσοτικοποιεί τις επιδράσεις που έχει η απώλεια κάθε ξεχωριστής γραμμής στην γραμμή που αντιστοιχεί στον δείκτη του στοιχείου. Ο πίνακας $A_{ACprev1}$ σχηματίζεται από δύο πίνακες και παρουσιάζεται πιο κάτω, τα υπόλοιπα στοιχεία του πίνακα A_{ACprev} σχηματίζονται αναλόγως:

$$A_{ACprev1[N \times (K-1)]} = P_{p1} + Q_{p1} \quad (4.37)$$

$$P_{p1} = \begin{bmatrix} \mathbb{P}_{12} & \cdots & \mathbb{P}_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbb{P}_{N2} & \cdots & \mathbb{P}_{NK} \end{bmatrix}_{[N \times (K-1)]} \quad (4.38)$$

$$\mathbb{P}_{ij} = \begin{cases} B_{AC,br,1} & \text{σε κάθε γραμμή } i \text{ του πίνακα, αν η γραμμή υπάριθμόν } 1 \text{ ξεκινά στο ζυγό } j \\ -B_{AC,br,1} & \text{σε κάθε γραμμή } i \text{ του πίνακα, αν η γραμμή υπάριθμόν } 1 \text{ καταλήγει στο ζυγό } j \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.39)$$

$$Q_{p1} = \begin{bmatrix} \mathbb{Q}_{12} & \cdots & \mathbb{Q}_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbb{Q}_{N2} & \cdots & \mathbb{Q}_{NK} \end{bmatrix}_{[N \times (K-1)]} \quad (4.40)$$

$$\mathbb{Q}_{ij} = \begin{cases} B_{AC,br,i} \cdot LODF_{br1,br,i} & \text{αν η εκτός λειτουργίας γραμμή } i \text{ ξεκινά στο ζυγό } j \\ -B_{AC,br,i} \cdot LODF_{br1,br,i} & \text{αν η εκτός λειτουργίας γραμμή } i \text{ καταλήγει στο ζυγό } j \\ 0 & \text{αν ο δείκτης } i \text{ έχει ίδια τιμή με τον δείκτη } 1 \text{ της γραμμής} \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.41)$$

Με αυτό τον τρόπο κάθε στοιχείο του A_{ACprev} περιέχει 1 περιορισμό για την υπό μελέτη γραμμή στην κανονική κατάσταση του δικτύου, και $N - 1$ περιορισμούς για την ίδια γραμμή, για όλα τα μεμονωμένα ενδεχόμενα απώλειας AC γραμμής μεταφοράς.

Κατά αντιστοιχία σχηματίζεται και ο πίνακας A_{DCprev} και δεν έχει ιδιαίτερο νόημα η παρουσίασή του εδώ. Ο γενικός πίνακας ανισοτικών περιορισμών σχηματίζεται ως εξής:

$$C_{iq,prev} = \begin{bmatrix} \Lambda_I & 0 & 0 & 0 \\ -\Lambda_I & 0 & 0 & 0 \\ E_I & E_{AC} & 0 & 0 \\ -E_I & -E_{AC} & 0 & 0 \\ 0 & A_{ACprev} & 0 & 0 \\ 0 & -A_{ACprev} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_L & 0 \\ 0 & 0 & -\Lambda_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{DCprev} \\ 0 & 0 & 0 & -A_{DCprev} \end{bmatrix}_{[Y_{prev} \times C]} \quad (4.42)$$

όπου $Y_{prev} = 2 \cdot [I + (N \cdot I) + N^2 + L + D^2]$.

Το διάνυσμα σταθερών $b_{iq,prev}$ είναι το:

$$b_{iq,prev} = [b_g^{max} \ b_g^{min} \ b_{l,AC,G} \ -b_{l,AC,G} \ b_{l,AC,P} \ -b_{l,AC,P} \ b_{term} \ -b_{term} \ b_{l,DC,P} \ -b_{l,DC,P}]_{[Y_{prev} \times 1]}^T$$

Τα διανύσματα $b_{l,AC,G}$ και $b_{l,AC,P}$ περιέχουν τα βραχυπρόθεσμα όρια για τις AC γραμμές και το διάνυσμα $b_{l,DC,P}$ τα όρια για τις DC γραμμές. Με τους πίνακες $C_{iq,prev}$ και $b_{iq,prev}$ πλήρως ορισμένους, το προληπτικό SC-OPF πρόβλημα καταστρώνεται όπως στην ενότητα 3.3.3.

4.2 Μεθοδος II: Προληπτική-Διορθωτική

Μεθοδολογία και Εφαρμογές

Σε αντίθεση με την προληπτική μέθοδο της ενότητας 4.1 η διορθωτική μέθοδος περιλαμβάνει ρητά ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς για τις καταστάσεις του δικτύου ύστερα απο διαταραχή. Επομένως ένα ξεχωριστό διάνυσμα ξ^c αντιστοιχεί σε κάθε διαταραγμένη κατάσταση του συστήματος και περικλείεται στο πρόβλημα. Έτσι κάθε κατάσταση του συστήματος μετά από διαταραχή

βελτιστοποιείται ανεξάρτητα, πάντα σύμφωνα με τους περιορισμούς λειτουργίας του δικτύου.

$$\xi^{corr} = \begin{bmatrix} \xi^0 \\ - \\ \xi^1 \\ - \\ \vdots \\ - \\ \xi^\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_G^0 \\ \delta^0 \\ P_T^0 \\ V_{DC}^0 \\ \delta^1 \\ P_T^1 \\ V_{DC}^1 \\ \vdots \\ \delta^\gamma \\ P_T^\gamma \\ V_{DC}^\gamma \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

Οι μεταβλητές ελέγχου που αντιστοιχούν στην κανονική κατάσταση λειτουργίας είναι η ενεργός ισχύς κάθε γεννήτριας και η ανταλλαγή ισχύος κάθε σταθμού μετατροπής. Στις καταστάσεις διαταραχής όμως μόνο η ανταλλαγή ισχύος των σταθμών μετατροπής περιλαμβάνεται στις μεταβλητές ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι ο διορθωτικός έλεγχος εκτελείται μόνο από τους σταθμούς μετατροπής, μέσω μεταβολών στην ισχύ που ανταλλάσσουν μεταξύ του AC και του DC δικτύου. Οι μεταβλητές κατάστασης για την περίπτωση κανονικής λειτουργίας αλλά και για όλες τις περιπτώσεις διαταραγμένης λειτουργίας περιέχουν τις γωνίες τάσεων των AC ζυγών και τα μέτρα τάσεων των DC ζυγών.

Οι ενότητες που ακολουθούν εξηγούν αναλυτικά τον σχηματισμό του SC-OPF προβλήματος που καθορίζει ασφαλή λειτουργία για τις εξής περιπτώσεις διαταραχών:

- απώλειες AC γραμμής μεταφοράς
- απώλειες DC γραμμής μεταφοράς
- απώλειες σταθμού μετατροπής
- απώλειες γεννήτριας

Η επιλογή της συγκεκριμένης λίστας διαταραχών στηρίζεται στο γεγονός ότι είναι οι πιο σημαντικές για την μοντελοποίηση που χρησιμοποιείται. Από την στιγμή που κάθε μεμονωμένη απώλεια στοιχείου της παραπάνω λίστας συνυπολογίζεται, το μέγεθος του διανύσματος βελτιστοποίησης καθώς και ο συνολικός αριθμός ανισοτικών περιορισμών είναι δυνατόν να υπολογιστούν. Οι εν λόγω ποσότητες μπορούν να βρεθούν στον πίνακα 4.1 και ανάγονται στις ποσότητες C,Y,D,I,N,L του πίνακα 3.1.

4.2.1 Αντικειμενική Συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση της προληπτικής-διορθωτικής μεθόδου επαυξάνεται κατά ένα τετραγωνικό όρο σε σχέση με την συνάρτηση της ενότητας 3.3.5. Ο όρος αυτός είναι το τετράγωνο της διαφοράς ισχύος κάθε σταθμού μετατροπής μεταξύ κανονικής και διαταραγμένης λειτουργίας.

Table 4.1: Ονοματολογία Προληπτικής-Διορθωτικής Μεθόδου

C_{corr}	$C+(C-I)(I+N+D+L)$	μέγεθος διανύσματος ξ^{corr}
Y_{AC}	$N(Y-2I)$	ανισοτικοί περιορισμοί για απώλειες AC γραμμής μεταφοράς
Y_{DC}	$D(Y-2I)$	ανισοτικοί περιορισμοί για απώλειες DC γραμμής μεταφοράς
Y_{Ter}	$L(Y-2I)$	ανισοτικοί περιορισμοί για απώλειες σταθμού μετατροπής
Y_{Gen}	$I \cdot Y$	ανισοτικοί περιορισμοί για απώλειες γεννήτριας
$Y_{Control}$	$2L(I+N+D+L)$	ανισοτικοί περιορισμοί για εφαρμογή ελέγχου των σταθμών μετατροπής
Y_{corr}	$Y+Y_{AC} + Y_{DC} + Y_{Ter} + Y_{Gen} + Y_{Control}$	συνολικός αριθμός ανισοτικών περιορισμών

Οι όροι από όλα τα ενδεχόμενα διαταραχών συναθροίζονται για να αποτελέσουν ένα είδος ποινής ή αλλιώς μια ανάθεση κόστους για τις διορθωτικές ενέργειες που γίνονται στην περίπτωση διαταραχών. Η εισαγωγή αυτής της συνάρτησης ποινής δίνει την δυνατότητα συλλογής πληροφοριών όσον αφορά την αλληλεπίδραση των δύο δικτύων, με την εκπόνηση προσομοιώσεων. Επίσης μπορεί να επιφέρει ευστάθεια στο σύστημα στην περίπτωση που ανατεθούν υψηλά κόστη στις μεταβολές ισχύος, διότι θα καταστούσε ασύμφορες τις δραματικές αλλαγές της ανταλλασόμενης ισχύος μεταξύ των δύο δικτύων. Ενώ δεν υπάρχει άμεση ανάθεση κόστους για την λειτουργία των σταθμών μετατροπής, μια τέτοια μοντελοποίηση θα μπορούσε να αναπτυχθεί. Σύμφωνα με τα παραπάνω η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\sum_{s=1}^I [\alpha \cdot P_{Gs} + \beta \cdot P_{Gs}^2] + \Pi^{AC} \cdot \sum_{km \in \mathcal{N}} [\delta_k - \delta_m]^2 + \Pi^{DC} \cdot \sum_{km \in \mathcal{D}} [V_{DCk} - V_{DCm}]^2 + \Pi^{Ter} \cdot \sum_{c=1}^{\gamma} [P_T^0 - P_T^c]^2 \quad (4.44)$$

\mathcal{N} = ζεύγη AC ζυγών συνδεδεμένα με γραμμή

\mathcal{D} = ζεύγη DC ζυγών συνδεδεμένα με γραμμή

Π^{Ter} = συντελεστής ποινής για μεταβολές ισχύος σταθμών μετατροπής

Για να σχηματιστεί η παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση ο πίνακας G γίνεται:

$$G = \begin{bmatrix} QC & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & W^{AC} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & c \cdot \Lambda_L & 0 & 0 & -\Lambda_L & 0 & 0 & -\Lambda_L & 0 \\ 0 & \dots & \dots & W^{DC} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & -\Lambda_L & 0 & 0 & \Lambda_L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & -\Lambda_L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda_L & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

Για λόγους κατανόησης παρουσιάζεται μία περίπτωση όπου θεωρούνται 2 ενδεχόμενα διαταραχής, έτσι ώστε να φαίνεται απλά πως σχηματίζεται ο όρος που προστέθηκε. Το στοιχείο Λ_L της (4.45) είναι μοναδιαίος πίνακας μεγέθους L . Με τον παραπάνω τρόπο οι όροι $[P_T^0 - P_T^1]^2 + [P_T^0 - P_T^2]^2$ προκύπτουν από την εξίσωση (3.8). Η τιμή ισχύος των σταθμών μετατροπής σε διαταραγμένη κατάσταση αφαιρείται κάθε φορά από την τιμή τους στην κανονική κατάσταση λειτουργίας P_T^0 . Επομένως οι όροι P_T^0 υψώνονται στο τετράγωνο τόσες φορές, όσες και ο αριθμός των διαταραχών που περιλαμβάνονται στο πρόβλημα SC-OPF. Αυτός είναι και ο λόγος που ο μοναδιαίος πίνακας που πολλαπλασιάζει τους όρους P_T^0 στην εξίσωση (4.45), έχει συντελεστή c μπροστά του (για το παράδειγμα $c = 2$), όπου c ο αριθμός διαταραχών που περιλαμβάνονται.

Το διάνυσμα λ σε αυτή την περίπτωση επανξάνεται από κατάλληλο αριθμό μηδενικών. Οι μόνοι γραμμικοί όροι που περιέχονται στην αντικειμενική συνάρτηση είναι αυτοί που αντιστοιχούν στα κόστη παραγωγής ισχύος:

$$\lambda = \left[\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_I \quad 0_{[1 \times (C_{corr} - I)]} \right] \quad (4.46)$$

4.2.2 Διορθωτικός Έλεγχος Σταθμών Μετατροπής

Οι διατάξεις HVDC είναι πολλά υποσχόμενες να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια και ελεγχιμότητα της λειτουργίας των δικτύων μεταφοράς. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη την κατάστρωση ενός προβλήματος SC-OPF στο οποίο εφαρμόζεται διορθωτικός έλεγχος μέσω των σταθμών μετατροπής. Στην παρούσα κατάστρωση του προβλήματος ο έλεγχος παίρνει την μορφή:

$$|P_T^0 - P_T^c| = \Delta P_T^c \leq \Delta P_T^{cmax} \quad (4.47)$$

δηλαδή υπάρχει άνω όριο στην επιτρεπτή μεταβολή της ισχύος που ανταλλάσσουν οι σταθμοί σε κατάσταση διαταραχής.

Για τις καταστάσεις διαταραχής, ο αλγόριθμος επίλυσης πρώτα διερευνά αν πιθανές παραβιάσεις περιορισμών μπορούν να εκκαθαριστούν με αλλαγή στις ρυθμίσεις των ελέγξιμων μεταβλητών, ήτοι των ανταλλαγών ισχύος των σταθμών μετατροπής. Αν αυτές οι ΔP_T^c ενέργειες δεν αρκούν για εκκαθάριση όλων των παραβιάσεων, τότε οι μεταβλητές ελέγχου της κανονικής κατάστασης λειτουργίας P_G^0, P_T^0 πρέπει να αλλάξουν για να ικανοποιηθούν όλοι οι περιορισμοί ασφαλείας.

Παρότι υπάρχει εφαρμογή κόστους για τους χειρισμούς ΔP_T^c , τα κόστη που επισύρονται από αυτούς τους χειρισμούς είναι αμελητέα σε σχέση με τα κόστη που προκύπτουν από την λήψη προληπτικών μέτρων. Τα κόστη παραγωγής ισχύος των γεννητήριων μονάδων κυριαρχούν στην διαμόρφωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, και ως εκ τούτου αλλαγή στον καταμερισμό της ισχύος που αναλαμβάνουν να παράξουν οι γεννήτριες, οδηγεί σε πιο ασύμφορη λειτουργία του δικτύου. Για αυτό τον λόγο λέγεται ότι η επίτευξη επιπλέον ασφαλείας γίνεται σε βάρος των εξόδων λειτουργίας του δικτύου.

Για την εφαρμογή ελέγχου επί της απόλυτης τιμής της διαφοράς ισχύος των σταθμών, χρειάζονται δύο περιορισμοί για κάθε μεταβλητή που αντιστοιχεί σε σταθμό. Ο συνδυασμός των παρακάτω ανισώσεων:

$$\begin{cases} P_T^0 - P_T^c \leq \Delta P_T^{max} \\ P_T^k - P_T^0 \leq \Delta P_T^{max} \end{cases} \quad (4.48)$$

επιτυγχάνει αυτό ακριβώς το αποτέλεσμα. Υπό την μορφή πινάκων αυτές οι ανισότητες σχηματίζονται ως εξής:

$$Ter^{Con} \cdot \xi \leq \Delta P_T^{max} \quad (4.49)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & 0 & \Lambda_L & 0 & 0 & -\Lambda_L & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & -\Lambda_L & 0 & 0 & \Lambda_L & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_G^0 \\ \delta^0 \\ P_T^0 \\ \frac{V_{DC}^0}{\delta^1} \\ P_T^1 \\ V_{DC}^1 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta P_T^{max} \\ 0 \\ 0 \\ \Delta P_T^{max} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

Εδώ πάλι Λ_L είναι μοναδιαίος πίνακας και ΔP_T^{max} το διάνυσμα με στοιχεία τις μέγιστες επιτρεπόμενες μεταβολές ισχύος στους σταθμούς μετατροπής για την διαταραχή c .

4.2.3 Απώλεια Γραμμής Μεταφοράς στο AC Δίκτυο

Σημείωση: για λόγους εξοικονόμησης χώρου, τα κάτω όρια για τις ισχύεις γεννητριών καθώς και τα κάτω όρια για τις ροές ισχύος στους σταθμούς μετατροπής, τις AC και DC γραμμές, δεν εμφανίζονται στις αναπαραστάσεις που ακολουθούν. Στην πράξη βεβαίως είναι απολύτως απαραίτητη η συμπερίληψη τους στους πίνακες ανισοτικών περιορισμών για να υπάρχει σωστή κατάστρωση όπως στην σχέση (3.32).

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, οι περιορισμοί για τις φορτίσεις των γραμμών ύστερα απο διαταραχή περιλαμβάνονται ρητά από ένα νέο σετ ισοτικών και ανισοτικών περιορισμών. Ο γενικός πίνακας ανισοτικών περιορισμών C_{iqAC} περιέχει όλα τα στοιχεία με τα οποία σχηματίζονται οι περιορισμοί που σχετίζονται με τις απώλειες AC γραμμής μεταφοράς.

$$C_{iqAC}[Y_{AC} \times N(C-I)]$$

Ειδικότερα ακολουθεί αναπαράσταση των περιορισμών για καλύτερη κατανόηση:

$$C_{iqAC}[Y_{AC} \times N(C-I)] \cdot \xi_{AC}[N(C-I) \times 1] \leq biq_{AC}[Y_{AC} \times 1]$$

$$\begin{bmatrix} C_{iqAC}^1 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & C_{iqAC}^2 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & C_{iqAC}^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{AC}^1 \\ \xi_{AC}^2 \\ \vdots \\ \xi_{AC}^N \end{bmatrix} \leq b_{iqAC} \quad (4.51)$$

όπου σύμφωνα με μια αρίθμηση των γραμμών μεταφοράς, οι δείκτες $1, \dots, N$ αναφέρονται στην απώλεια της AC γραμμής μεταφοράς υπαριθμόν $1, \dots, N$. Με ξ_{AC}^c συμβολίζεται το μέρος του συνολικού διανύσματος βελτιστοποίησης που αντιστοιχεί στην διαταραγμένη κατάσταση όπου η γραμμή νούμερο c είναι εκτός. Το διάνυσμα b_{iqAC} έχει μέγεθος $N(C - I)$ και περιέχει τα όρια φόρτισης των γραμμών σε καταστάσεις διαταραχής.

Ο τρόπος κατασκευής του πίνακα C_{iqAC} παρουσιάζεται στην σχέση (4.52). Η περίπτωση όπου μόνο μια απώλεια AC γραμμής λαμβάνεται υπόψη παρουσιάζεται, με την ίδια φιλοσοφία σχηματίζεται ο πίνακας που περιέχει οσαδήποτε ενδεχόμενα διαταραχής. Στο σχήμα φαίνεται πως πρέπει να γίνει η τοποθέτηση κάθε πίνακα, καθώς φαίνονται ποια στοιχεία διαφοροποιούνται στην διαταραγμένη κατάσταση, σε σχέση με την κανονική.

$$C_{iqAC}^{0,1} = \begin{bmatrix} \Lambda_I & 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & A_{AC}^0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \Lambda_L & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & A_{DC}^0 & 0 & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & A_{AC}^1 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & \Lambda_L & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 0 & A_{DC}^0 \end{bmatrix}_{[2(Y-I) \times (2C-I)]} \quad (4.52)$$

Στην κατάσταση διαταραχής υπάρχει μεταβλημένος πίνακας γεινίασης γραμμών A_{AC}^1 ο οποίος έχει μηδενικά σε ολόκληρη την σειρά που αντιστοιχεί στην γραμμή που βγήκε εκτός. Ο πίνακας γεινίασης του DC δικτύου παραμένει ίδιος διότι όπως είναι προφανές η απώλεια γραμμής στο AC δίκτυο δεν επηρεάζει την τοπολογία του DC δικτύου. Το ίδιο ισχύει και για τους σταθμούς μετατροπής, όπου το στοιχείο I_L μένει αμετάβλητο.

Όσον αφορά τους ισοτικούς περιορισμούς, αυτοί σχηματίζονται ως εξής:

$$C_{eqAC}[N(K+M) \times N(C-I)] \quad (4.53)$$

με την χρήση του παραπάνω πίνακα καταστρώνονται οι παρακάτω περιορισμοί:

$$C_{eqAC}[N(K+M) \times N(C-I)] \cdot \xi_{AC}[N(C-I) \times 1] = b_{eqAC}[N(C-I) \times 1] \quad (4.54)$$

$$\begin{bmatrix} C_{eqAC}^1 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & C_{eqAC}^2 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & C_{eqAC}^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{AC}^1 \\ \xi_{AC}^2 \\ \vdots \\ \xi_{AC}^N \end{bmatrix} = b_{eqAC} \quad (4.55)$$

$$C_{eqAC}^{0,1} = \begin{bmatrix} H^0 & -B_{AC}^0 & T & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & S & -B_{DC}^0 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline H^0 & 0 & \cdots & 0 & -B_{AC}^1 & T & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & S & -B_{DC}^0 \end{bmatrix}_{[2(K+M) \times (2C-I)]} \quad (4.56)$$

Σε αυτή την περίπτωση το στοιχείο που αλλάζει μεταξύ κανονικής και διαταραγμένης κατάστασης είναι η μήτρα αγωγιμοτήτων B_{AC} καθώς με την απώλεια μιας γραμμής η τοπολογία του AC δικτύου μεταβάλλεται. Παρατηρήστε ότι ακόμη και στην διαταραγμένη κατάσταση το προφίλ παραγωγής ισχύος από τις γεννήτριες παραμένει το ίδιο. Αυτό είναι επειδή οι αποδιδόμενες ισχύεις των γεννητριών δεν είναι μέρος των μεταβλητών ελέγχου σε κατάσταση διαταραχής. Άμεση συνέπεια είναι ότι για όλες τις διαταραχές πλην των απωλειών άλλης γεννήτριας, η αποδιδόμενη ισχύς κάθε μονάδας παραμένει ίδια με την κανονική κατάσταση λειτουργίας.

4.2.4 Απώλεια Γραμμής Μεταφοράς στο DC Δίκτυο

Η κατάστρωση των περιορισμών για τα ενδεχόμενα απώλειας DC γραμμής μεταφοράς μοιάζει πολύ με αυτή της ενότητας 4.2.3:

$$C_{iqDC}[Y_{DC} \times D(C-I)] \quad (4.57)$$

$$C_{iqDC}[Y_{DC} \times D(C-I)] \cdot \xi_{DC}[D(C-I) \times 1] \leq b_{iqDC}[Y_{DC} \times 1]$$

και αυτοί οι περιορισμοί υλοποιούνται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} C_{iqDC}^1 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & C_{iqDC}^2 & \vdots & 0 \\ \hline 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & C_{iqDC}^D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{DC}^1 \\ \xi_{DC}^2 \\ \vdots \\ \xi_{DC}^D \end{bmatrix} \leq b_{iqDC} \quad (4.58)$$

όπου πάλι για μια αύξουσα αρίθμηση DC γραμμών, οι δείκτες $1, \dots, D$ αναφέρονται στην απώλεια της αντίστοιχης γραμμής μεταφοράς.

$$C_{iqDC}^{0,1} = \begin{bmatrix} \Lambda_I & 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & A_{AC}^0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \Lambda_L & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ \hline 0 & 0 & 0 & A_{DC}^0 & 0 & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & A_{AC}^0 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & \Lambda_L & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 0 & A_{DC}^1 \end{bmatrix}_{[2(Y-I) \times (2C-I)]} \quad (4.59)$$

Ο πίνακας γειτνίασης γραμμών του DC δικτύου A_{DC}^1 περιέχει μηδενικά στην σειρά που αντιστοιχεί στην γραμμή που βγαίνει εκτός. Ο πίνακας γειτνίασης γραμμών του AC δικτύου μένει ίδιος. Για τους περιορισμούς ισότητας που αντιστοιχούν σε έξοδο DC γραμμής ισχύουν τα ακόλουθα:

$$C_{eqDC}[D(K+M) \times D(C-I)] \quad (4.60)$$

$$C_{eqDC}[D(K+M) \times D(C-I)] \cdot \xi_{DC}[D(C-I) \times 1] = b_{eqDC}[D(K+M) \times 1] \quad (4.61)$$

$$\begin{bmatrix} C_{eqDC}^1 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & C_{eqDC}^2 & \vdots & \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & C_{eqDC}^D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{DC}^1 \\ \xi_{DC}^2 \\ \vdots \\ \xi_{DC}^D \end{bmatrix} = b_{eqDC} \quad (4.62)$$

$$C_{eqDC}^{0,1} = \begin{bmatrix} H^0 & -B_{AC}^0 & T & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & S & -B_{DC}^0 & 0 & \cdots & 0 \\ H^0 & 0 & \cdots & 0 & -B_{AC}^0 & T & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & S & -B_{DC}^1 \end{bmatrix}_{[2(K+M) \times (2C-I)]} \quad (4.63)$$

Εδώ το DC δίκτυο είναι που αλλάζει τοπολογία, οδηγώντας σε διαφορετική μήτρα B_{DC}^1 .

4.2.5 Απώλεια Σταθμού Μετατροπής

Οι σταθμοί μετατροπής ενός μικτού AC-DC δικτύου αποτελούν την πιο σημαντική τους συνιστώσα, διότι καθορίζουν την αλληλεπίδραση των δύο δικτύων. Επομένως κρίνεται θεμελιώδους σημασίας η συμπερίληψη τους σε μελέτες διαταραχών. Σε κατάσταση απρόβλεπτης απώλειας ενός σταθμού μετατροπής από την λειτουργία του δικτύου, η ισχύς που μεταφέρεται από αυτόν, προς ή από το AC/DC δίκτυο είναι μηδενική $P_T = 0$. Η προσομοίωση απώλειας σταθμού μετατροπής γίνεται με την αλλαγή κατάλληλων στοιχείων του διανύσματος b_{iq} που αντιστοιχούν στα όρια των σταθμών. Έτσι αν για τον σχετικό σταθμό ανατεθεί το ίδιο άνω και κάτω όριο, επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα:

$$\begin{aligned} P_T^c &\leq 0 \\ -P_T^c &\leq 0 \end{aligned}$$

Η δεύτερη ανισοτική σχέση ισοδυναμεί με: $P_T^c \geq 0$. Έτσι για να πληρούνται και οι δύο περιορισμοί πρέπει η ροή ισχύος από τον σταθμό μετατροπής να είναι μηδενική, $P_T^c = 0$. Με αυτό τον τρόπο επομένως επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ακόμα ένας τρόπος υλοποίησης που φαίνεται λογικός είναι να μεταβληθούν τα κατάλληλα στοιχεία των πινάκων S, T που παρουσιάστηκαν στις σχέσεις (3.20) και (3.21). Παρόλα αυτά μια τέτοια υλοποίηση δεν συνίσταται καθώς αφήνει μια μεταβλητή ελέγχου ελεύθερη να κινηθεί και να επηρεάσει την διαδικασία βελτιστοποίησης.

$$C_{iqTer}[Y_{Ter} \times L(C-I)] \quad (4.64)$$

$$C_{iqTer}[Y_{Ter} \times L(C-I)] \cdot \xi_{Ter}[L(C-I) \times 1] \leq b_{iqTer}[L(C-I) \times 1]$$

$$\begin{bmatrix} C_{iqTer}^1 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & C_{iqTer}^2 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & C_{iqTer}^L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{Ter}^1 \\ \xi_{Ter}^2 \\ \vdots \\ \xi_{Ter}^L \end{bmatrix} \leq b_{iqTer} \quad (4.65)$$

$$C_{iqTer}^{0,1} = \begin{bmatrix} \Lambda_I & 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & A_{AC}^0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \Lambda_L & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & A_{DC}^0 & 0 & \cdots & \cdots \\ \hline 0 & \cdots & \cdots & 0 & A_{AC}^0 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & \Lambda_L & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 0 & A_{DC}^0 \end{bmatrix}_{[2(Y-I) \times (2C-I)]} \quad (4.66)$$

Είναι εμφανές από τον πίνακα C_{iqTer} ότι δεν χρειάζεται να γίνει καμία αλλαγή στον γενικό πίνακα ανισοτικών περιορισμών που σχετίζεται με απώλεια σταθμού μετατροπής. Μια τέτοια διαταραχή δεν επηρεάζει την τοπολογία του AC ή του DC δικτύου, ούτε χρειάζονται τροποποιήσεις στους πίνακες S, T , που σημαίνει ότι απaráλλαχτα μένουν και τα στοιχεία του γενικού πίνακα ισoτικών περιορισμών όπως φαίνεται στην σχέση (4.68).

$$\begin{bmatrix} C_{eqTer}^1 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & C_{eqTer}^2 & \vdots & \\ \hline 0 & 0 & \ddots & 0 \\ \hline 0 & 0 & \cdots & C_{eqTer}^L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{Ter}^1 \\ \xi_{Ter}^2 \\ \vdots \\ \xi_{Ter}^L \end{bmatrix} = b_{eqTer} \quad (4.67)$$

$$C_{eqTer}^{0,1} = \begin{bmatrix} H^0 & -B_{AC}^0 & T & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & S & -B_{DC}^0 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline H^0 & 0 & \cdots & 0 & -B_{AC}^0 & T & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & S & -B_{DC}^0 \end{bmatrix}_{[2(K+M) \times (2C-I)]} \quad (4.68)$$

4.2.6 Απώλεια Γεννήτριας

Σε κατάσταση διαταραχής που προκαλείται από απώλεια γεννήτριας του δικτύου, οι υπόλοιπες γεννήτριες που συμμετέχουν στην τροφοδότηση των φορτίων πρέπει να αντισταθμίσουν την ισχύ που παρήγαγε η μονάδα που βγήκε εκτός. Από την στιγμή όμως που στις καταστάσεις διαταραχής οι ισχύς των γεννητριών δεν περιλαμβάνονται σαν μεταβλητές ελέγχου, η απόκριση τους πρέπει να είναι προκαθορισμένη. Μια μοντελοποίηση που μπορεί να προσεγγίσει μια τέτοια λειτουργία είναι η εξής: Σε ενδεχόμενο απώλειας γεννήτριας του δικτύου αυτόματες ρυθμίσεις επιδρούν στις υπολοίπόμενες γεννήτριες ώστε να αυξήσουν την ισχύ που αποδίδουν. Το μέρος της χαμένης ισχύς που καλείται να καλύψει η κάθε μονάδα είναι ανάλογο της μέγιστης ονομαστικής της ισχύος [10]. Σε μορφή εξίσωσης η παραπάνω διαδικασία μεταφράζεται ως:

$$P_{Gi,1} = P_{Gi,0} + P_{Gm} \cdot r_{i,m} \quad (4.69)$$

όπου

$$r_{i,m} = \frac{P_{Gi}^{max}}{\sum_{j \neq m} P_{Gj}^{max}} \quad (4.70)$$

ενώ $P_{Gi,0}$, $P_{Gi,1}$ είναι η ισχύς της γεννήτριας i πριν και μετά από διαταραχή, και P_{Gm} η ισχύς της γεννήτριας m που βγαίνει εκτός.

$$C_{iqGen}[Y_{Gen} \times I(C-I)] \quad (4.71)$$

$$C_{iqGen}[Y_{Gen} \times I(C-I)] \cdot \xi_{Gen}[I(C-I) \times 1] \leq b_{iqGen}[Y_{Gen} \times 1]$$

$$\begin{bmatrix} C_{iqGen}^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & C_{iqGen}^2 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & C_{iqGen}^I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{Gen}^1 \\ \xi_{Gen}^2 \\ \vdots \\ \xi_{Gen}^I \end{bmatrix} \leq b_{iqGen} \quad (4.72)$$

$$C_{iqGen}^{0,1} = \begin{bmatrix} \Lambda_I^0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & A_{AC}^0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \Lambda_L & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & A_{DC}^0 & 0 & \cdots & 0 \\ \Phi_{iq}^1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & A_{AC}^0 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & I_L & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 0 & A_{DC}^0 \end{bmatrix}_{[2(Y-I) \times (2C-I)]} \quad (4.73)$$

Ο σχηματισμός του γενικού πίνακα ανισοτικών περιορισμών φαίνεται στο σχήμα (4.73). Η διαφορά μεταξύ κανονικής και διατραγμένης κατάστασης έγκειται στα στοιχεία Λ_I και Φ_{iq} , όπου ο δεύτερος πίνακας εισάγεται για να σχηματιστούν σωστά οι προκαθορισμένες αποκρίσεις των συνδεδεμένων στο δίκτυο γεννητριών. Σε κατάσταση διαταραχής αυτές οι γεννήτριες παράγουν αυξημένες ποσότητες ισχύος, με την προϋπόθεση βέβαια ότι αυτές οι ποσότητες είναι ακόμη μέσα στα όρια των δυνατοτήτων τους. Αυτό εξασφαλίζεται μέσω του πίνακα Φ_{iq} που παρουσιάζεται ακολούθως.

$$\Phi_{iq}^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ r_{2,1} & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ r_{3,1} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{I,1} & 0 & \cdots & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{[I \times I]} \quad (4.74)$$

$$\Phi_{iq}^2 = \begin{bmatrix} 1 & r_{1,2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & r_{3,2} & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & r_{I,2} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{[I \times I]} \quad (4.75)$$

Οι παραπάνω σχέσεις δείχνουν πως καταστρώνονται οι πίνακες Φ_{iq} για τις διάφορες περιπτώσεις απώλειας γεννήτριας. Παρατηρείστε ότι κάθε από αυτούς τους πίνακες τοποθετείται στην πρώτη στήλη για να πολλαπλασιάζει τις μεταβλητές P_G^0 που αντιστοιχούν στην κανονική κατάσταση λειτουργίας. Το αποτέλεσμα είναι οι παρακάτω ανισώσεις:

$$\Phi_{iq} \cdot P_G^0 \leq P_G^{0max} \quad (4.76)$$

οι οποίες επιβάλλουν τους αναγκαίους περιορισμούς ανάλογα με τα όρια λειτουργίας κάθε γεννήτριας.

Ο τρόπος κατάστρωσης των περιορισμών ισότητας φαίνεται από το παρακάτω σχήμα όπου θεωρείται ένα ενδεχόμενο διαταραχής:

$$C_{eqGen}^{0,1} = \begin{bmatrix} H & -B_{AC}^0 & T & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & S & -B_{DC}^0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline \Phi_{eq}^1 & 0 & \dots & 0 & -B_{AC}^0 & T & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & S & -B_{DC}^0 \end{bmatrix}_{[2(K+M) \times (2C-I)]} \quad (4.77)$$

Διαφορά έγκειται μεταξύ των στοιχείων H και $\Phi_{eq[K \times I]}$. Ο πίνακας H ορίστηκε στην (3.13), ενώ ο Φ_{eq} μπορεί να οριστεί με την βοήθεια του Φ_{iq} :

$$\Phi_{eq,ij}^1 = \begin{cases} \Phi_{iq,ij}^1 & \text{αν υπάρχει γεννήτρια συνδεδεμένη στο ζυγό } i \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.78)$$

Ο πίνακας Φ_{eq} ουσιαστικά καθορίζει τις κατάλληλες εγχύσεις ισχύος των υπολοιπόμενων γεννητριών στους ζυγούς που είναι συνδεδεμένοι.

4.2.7 Σχηματισμός του Συνολικού Προβλήματος

Οι μεμονωμένοι σχηματισμοί πινάκων που παρουσιάστηκαν για όλες τις κατηγορίες διαταραχών, μπορούν να συνδυαστούν με κατάλληλη αλληλουχία για να συγκροτήσουν το συνολικό SC-OPF πρόβλημα. Ανάλογα με τον αριθμό και το είδος των διαταραχών που συμπεριλαμβάνονται, οι κατάλληλοι πίνακες G , C_{eq} , C_{iq} και τα διανύσματα b_{eq} , b_{iq} , λ των σχέσεων (3.8) - (3.9) μπορούν να σχηματιστούν.

Αν θεωρηθεί ότι όλες οι κατηγορίες διαταραχής συμπεριλαμβάνονται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, τότε αυτό καταστρώνεται ως εξής:

$$C_{iq,total} \cdot \xi_{corr} \leq b_{iq,total}$$

$$\begin{bmatrix} C_{iqBase} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & C_{iqAC} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & C_{iqDC} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & C_{iqTer} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & C_{iqGen} \\ 0 & Ter^{Con,AC} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & Ter^{Con,DC} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & Ter^{Con,Ter} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & Ter^{Con,Gen} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \xi_0 \\ \xi_{AC} \\ \xi_{DC} \\ \xi_{Ter} \\ \xi_{Gen} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} b_{iq0} \\ b_{iqAC} \\ b_{iqDC} \\ b_{iqTer} \\ b_{iqGen} \end{bmatrix} \quad (4.79)$$

Οι μεταβλητές ξ_{AC} , ξ_{DC} , ξ_{Ter} , ξ_{Gen} χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το μέρος του διάνυσματος βελτιστοποίησης που αντιστοιχεί στις καταστάσεις απώλειας AC γραμμών μεταφοράς, DC γραμμών μεταφοράς, σταθμών μετατροπής και γεννητριών αντίστοιχα. Επομένως το συνολικό διάνυσμα βελτιστοποίησης ξ^{corr} μπορεί να γραφεί ως:

$$\xi^{corr} = [\xi^0 \xi_{AC} \xi_{DC} \xi_{Ter} \xi_{Gen}]^T$$

Μέσω των πινάκων Ter^{Con} της σχέσης (4.79) υλοποιείται η ανάθεση περιορισμών όσον αφορά τα περιθώρια για διορθωτικό έλεγχο Δu_c^{max} . Οι περιορισμοί αυτοί καθορίζουν την μέγιστη μεταβολή που μπορούν να έχουν οι μεταβλητές ελέγχου, δηλαδή οι ισχύεις των σταθμών μετατροπής, μεταξύ κανονικής και διαταραγμένης κατάστασης λειτουργίας.

Οι περιορισμοί ισότητας σχηματίζονται ως εξής:

$$C_{eq,total} \cdot \xi_{corr} = b_{eq,total}$$

$$\begin{bmatrix} C_{eqBase} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & C_{eqAC} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & C_{eqDC} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & C_{eqTer} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & C_{eqGen} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \xi_0 \\ \xi_{AC} \\ \xi_{DC} \\ \xi_{Ter} \\ \xi_{Gen} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{eq0} \\ b_{eqAC} \\ b_{eqDC} \\ b_{eqTer} \\ b_{eqGen} \end{bmatrix} \quad (4.80)$$

Το διάνυσμα b_{iq} έχει διαφορετικές τιμές μεταξύ κανονικής και διαταραγμένης λειτουργίας αν θεωρούνται διαφορετικά όρια φορτίσεων για τα έκτακτα ενδεχόμενα. Το διάνυσμα b_{eq} αλλάζει τιμές μόνο σε περίπτωση που θεωρούνται απώλειες φορτίων ως ενδεχόμενα διαταραχής. Σε αντίθετη περίπτωση τα στοιχεία του διάνυσματος που αντιστοιχούν σε όλες τις υπόλοιπες διαταραχές παραμένουν τα ίδια.

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα Προσομοιώσεων σε Δοκιμαστικά Δίκτυα

Στο κεφάλαιο αυτό οι μεθοδολογίες που περιγράφησαν στο κεφάλαιο 4 εφαρμόζονται σε δοκιμαστικά δίκτυα για γενική εκτίμηση και αξιολόγηση τους, καθώς και για να μελετηθεί η ευαισθησία του συστήματος ως προς διάφορες παραμέτρους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται φραστικά αλλά και γραφικά σε διαδόρων ειδών γραφήματα.

Στις ενότητες που ακολουθούν θα γίνεται αναφορά στις ποσότητες ισχύος στο ανά μονάδα σύστημα. Η βασική ισχύς είναι $S_{base} = 100MVA$, και από την στιγμή που υπολογίζεται μόνο η ενεργός ισχύς, 1 α.μ ισχύς αναφέρεται σε ποσότητα 100 MW. Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τον επιλυτή quadprog στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB.

5.1 Δοκιμαστικό Δίκτυο I: Γενική Περιγραφή

Το δοκιμαστικό δίκτυο που θα μελετηθεί αρχικά είναι ένα μικτό δίκτυο που εξελίχθηκε για μελέτες και προσομοιώσεις στο [1], και φαίνεται στο σχήμα 5.1. Είναι το πρότυπο δίκτυο IEEE 14 διασυνδεδεμένο με ένα DC δίκτυο 5 ζυγών. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του AC δικτύου μπορούν να βρεθούν στο [12], ενώ όσον αφορά το DC δίκτυο όλες οι γραμμές μεταφοράς έχουν αντίσταση $R_{km} = 2.78\Omega$ και η μέγιστη μεταφορά ισχύος από τους σταθμούς μετατροπής είναι 1 α.μ. Τα δύο δίκτυα είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε 4 σημεία, στα οποία είναι τοποθετημένοι οι σταθμοί μετατροπής. Ο ζυγός 25 του DC δικτύου δεν έχει σύνδεση με σταθμό μετατροπής.

Γενικά Χαρακτηριστικά του Δικτύου

Στο μικτό δίκτυο του σχήματος 5.1, πέντε γεννήτριες συνδεδεμένες σε AC ζυγούς τροφοδοτούν τα φορτία του δικτύου. Η γεννήτρια No1 (συνδεδεμένη στον ζυγό 1) είναι η πιο φθηνή και με την μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ μονάδα του δικτύου. Στην κλίμακα ζήτησης ισχύος του δικτύου, η γεννήτρια No2 ακολουθεί ως η επόμενη φθηνότερη μονάδα, ενώ οι γεννήτριες 3, 4 και 5 έχουν μεγαλύτερα έξοδα λειτουργίας. Τα πιο μεγάλα φορτία του δικτύου είναι συνδεδεμένα στους ζυγούς 3 και 4, οπότε αναμένεται ότι η γενικότερη ροή ισχύος θα έχει φορά από το κάτω αριστερά κομμάτι του σχήματος 5.1 προς το κάτω δεξιά.

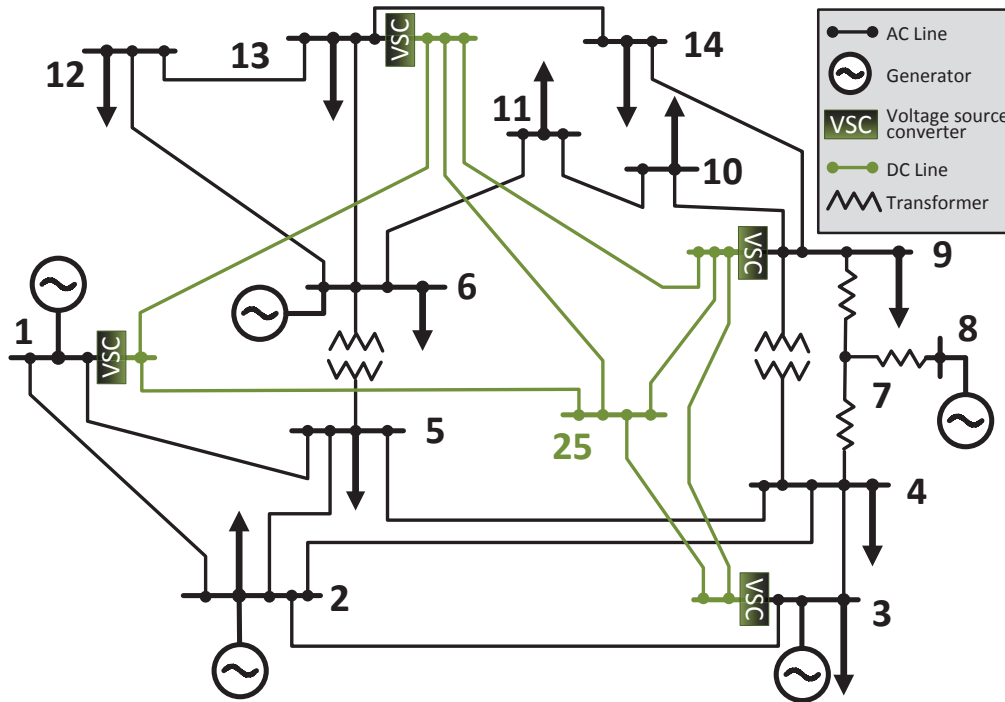


Figure 5.1: Μικτό AC-DC δίκτυο [1]

5.2 Μεθοδος I: Προληπτική

Η πρώτη μέθοδος που θα εξεταστεί είναι αυτή του προληπτικού SC-OPF προβλήματος. Η λίστα διαταραχών για την οποία η μέθοδος καθορίζει ασφαλή λειτουργία περιλαμβάνει όλες τις απώλειες AC και DC γραμμής μεταφοράς καθώς και όλες τις απώλειες γεννήτριας. Οι επιδράσεις κάθε μιας από τις παραπάνω διαταραχές υπολογίζονται, ανεξαρτήτως αν αυτές προκαλούν παραβιάσεις ορίων ή όχι. Προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν στο δίκτυο για το κανονικό OPF και το SC-OPF έδωσαν αποτέλεσμα 7643.63 \$/h και 7944.54 \$/h αντίστοιχα για τα συνολικά έξοδα λειτουργίας.

5.2.1 Καταμερισμός Παραγόμενης Ισχύος στις Γεννήτριες

Στόχος της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση των συνολικών εξόδων λειτουργίας του δικτύου. Η επίλυση του προβλήματος καθορίζει την ισχύ που ανατίθεται σε κάθε μονάδα παραγωγής, η οποία εξαρτάται από τους συντελεστές κόστους κάθε μονάδας σε συνδυασμό με τα φυσικά και τεχνικά όρια του εξοπλισμού του δικτύου.

Στο σχήμα 5.2 φαίνεται η κατανομή ισχύος για το κανονικό OPF και το SC-OPF πρόβλημα. Στο κανονικό OPF η γεννήτρια 1 αναλαμβάνει εξαιρετικά μεγάλο ποσοστό της παραγωγής, ως η πιο φθηνή και με μεγάλη μέγιστη ισχύ μονάδα. Η γεννήτρια 2 αναλαμβάνει την παραγωγή

της υπολοιπούμενης ισχύος, ενώ οι γεννήτριες 3, 4 και 5 δεν παράγουν ισχύ. Στο SC-OPF όμως όπως είναι αναμενόμενο, αυτή η κατανομή της παραγωγής αλλάζει, διότι οι περιορισμοί ασφαλείας επιβάλλουν μια πιο συντηρητική λειτουργία του δικτύου. Έτσι η παραγωγή είναι πιο διαμοιρασμένη στις γεννήτριες του δικτύου. Η γεννήτρια 1 ελαττώνει την αποδιδόμενη ισχύ της κατά 70 MW σε σχέση με το κανονικό OPF ενώ οι γεννήτριες 3, 4 και 5 συμμετέχουν πλέον και αυτές στην παραγωγή ενέργειας.

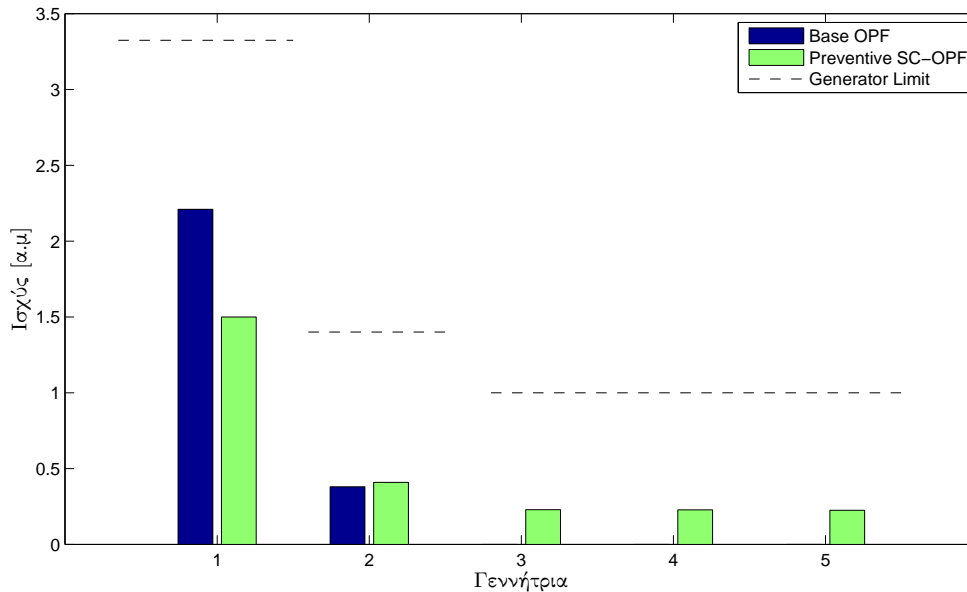


Figure 5.2: Κατανομή της Παραγωγής για Προληπτικό SC-OPF

5.2.2 Ροές Φορτίου στο Μικτό Δίκτυο

Στο σχήμα 5.3 φαίνονται οι φορτίσεις των AC γραμμών για το OPF και το SC-OPF. Στην δεύτερη περίπτωση οι φορτίσεις είναι περισσότερο κατανομημένες στο σύνολο των γραμμών. Γραμμές που είναι κοντά σε φθηνές μονάδες παραγωγής έχουν χαμηλότερη φόρτιση προκειμένου να μην υποστούν υπερφορτίσεις σε ενδεχόμενο διαταραχής. Παράδειγμα αυτής της τάσης είναι η διαφορά στις φορτίσεις των γραμμών 1-2 και 1-5, οι οποίες συνδέονται στον ζυγό με την φθηνότερη γεννήτρια. Η ισχύς που φέρουν οι εν λόγω γραμμές μειώνεται από 0.82 και 0.39 α.μ στο κανονικό OPF, σε 0.672 και 0.328 α.μ για το SC-OPF. Με αυτό τον τρόπο και οι δύο γραμμές θα λειτουργήσουν εντός των προκαθορισμένων ορίων τους στην περίπτωση απώλειας μιας από τις δύο. Δεδομένης της τοπολογίας του δικτύου, απώλεια οποιασδήποτε εκ των δύο αυτών γραμμών σημαίνει ότι η εν λειτουργία γραμμή μετά την διαταραχή φέρει την συνολική ισχύ που είχαν οι δύο γραμμές στην κανονική κατάσταση λειτουργίας. Για αυτό τον λόγο οι φορτίσεις των δύο γραμμών που καθορίζονται από το SC-OPF έχουν άθροισμα ίσο με 1 α.μ, που είναι και η μέγιστη επιτρεπτή φόρτιση των AC γραμμών μεταφοράς. Το κανονικό OPF ορίζει μια λειτουργία του δικτύου, όπου οι γραμμές μεταφοράς που συνιστούν δρόμους φθηνής μεταφοράς ενέργειας, είναι συμφορημένες. Το SC-OPF καθορίζει ότι αυτή η συμφόρηση των γραμμών λόγω υψηλής φόρτισης επέρχεται στο δίκτυο μετά την άρροδο διαταραχής, ώστε να μην διατρέχει το δίκτυο κίνδυνο αλεπάλληλων διαταραχών. Οι φορτίσεις των DC γραμμών φαίνονται στο σχήμα 5.4. Λόγω της τοπολογίας

42 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

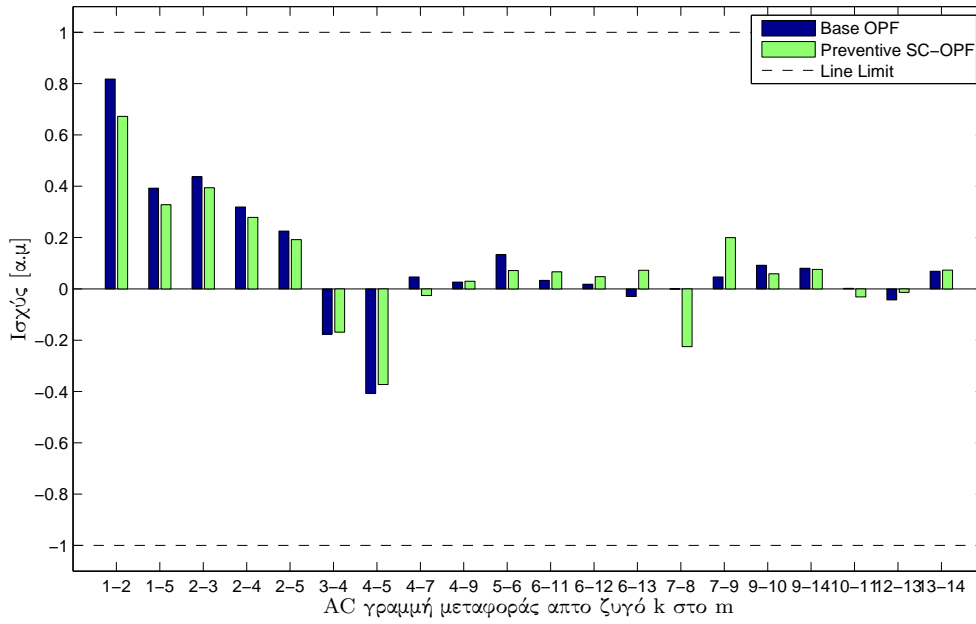


Figure 5.3: Φορτίσεις AC Γραμμών Μεταφοράς

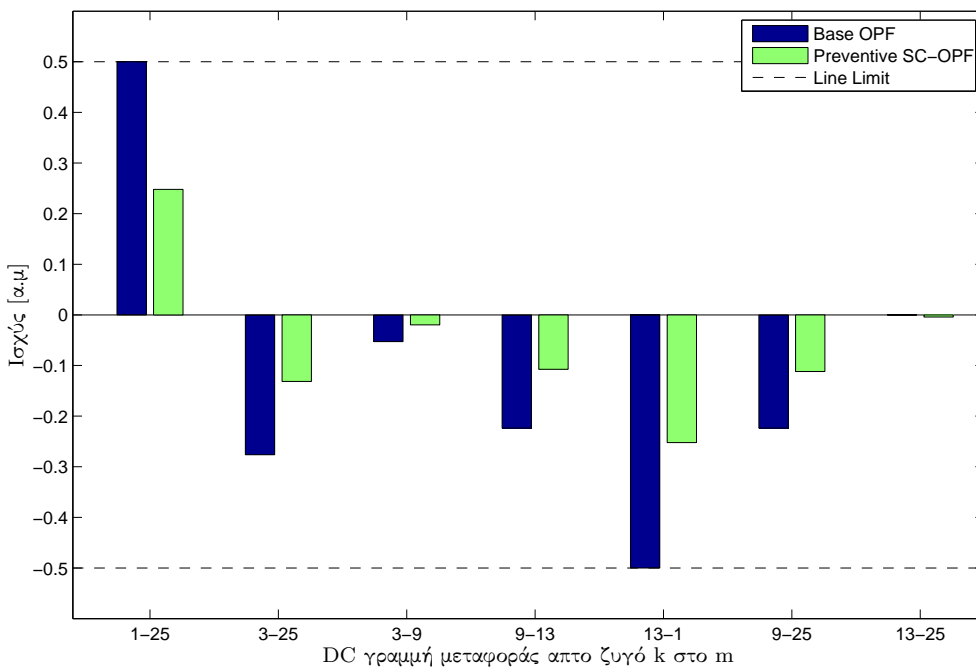


Figure 5.4: Φορτίσεις DC Γραμμών Μεταφοράς

του DC δικτύου και του γεγονότος ότι δεν υπάρχει διορθωτικός έλεγχος από τους σταθμούς μετατροπής, οι φορτίσεις των γραμμών μειώνονται δραστικά στο SC-OPF. Η συνολική έγχυση ισχύος από τους σταθμούς μετατροπής ελαττώνεται κατά 50% από 1 α.μ σε 0.5 α.μ, για να μην υπάρξει κίνδυνος στο ενδεχόμενο απρόβλεπτης απώλειας DC γραμμής μεταφοράς. Ειδικότερα ο σταθμός μετατροπής 1 αναγκάζεται να ελαττώσει την εγχυόμενη στο DC δίκτυο ισχύ, για να μην υπάρξει παραβίαση ορίου φόρτισης στο ενδεχόμενο απώλειας όποιας από τις DC γραμμές 1-25 και 1-31. Οι φορτίσεις των σταθμών μετατροπής είναι σύμφωνα με το σχήμα 5.5.

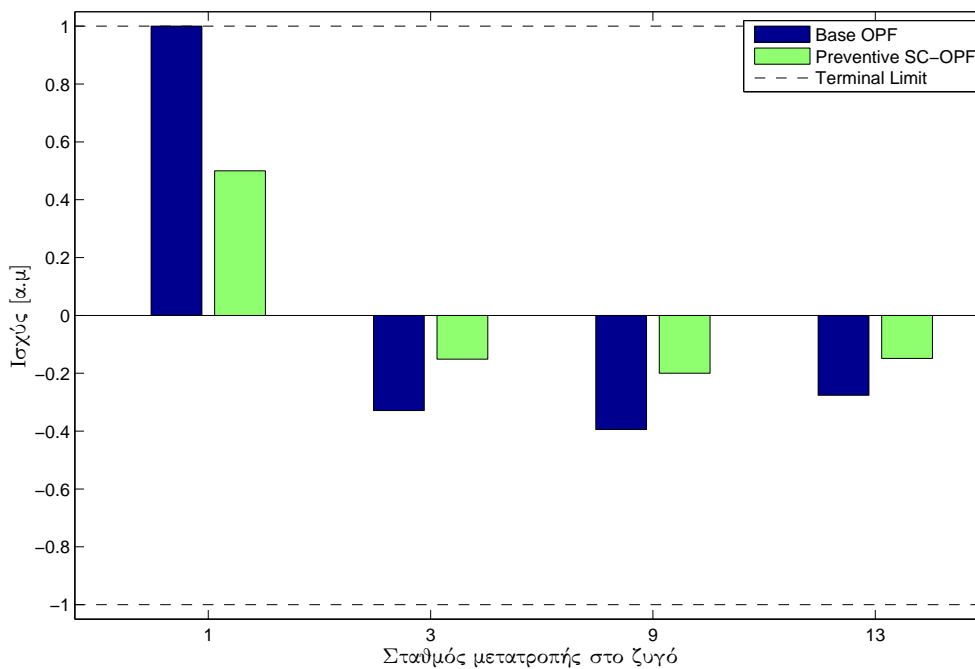


Figure 5.5: Ανταλλαγές Ισχύος Σταθμών Μετατροπής

5.3 Μεθοδος ΙΙ: Προληπτική-Διορθωτική

Στις ενότητες που ακολουθούν μελετώνται διάφορες περιπτώσεις προβλημάτων SC-OPF, ανάλογα με το είδος διαταραχών που συμπεριλαμβάνονται. Οι περιπτώσεις είναι οι παρακάτω:

- **Περίπτωση 1:** SC-OPF που λαμβάνει υπόψη όλα τα ενδεχόμενα απώλειας AC και DC γραμμής μεταφοράς.
- **Περίπτωση 2:** SC-OPF που λαμβάνει υπόψη όλα τα ενδεχόμενα απώλειας AC, DC γραμμής μεταφοράς, και απώλεια γεννήτριας.
- **Περίπτωση 3:** SC-OPF που λαμβάνει υπόψη όλα τα ενδεχόμενα απώλειας AC, DC γραμμής μεταφοράς, και απώλεια σταθμού μετατροπής.
- **Περίπτωση 4:** SC-OPF που λαμβάνει υπόψη όλα τα ενδεχόμενα απώλειας AC, DC γραμμής μεταφοράς, απώλεια γεννήτριας καθώς και σταθμού μετατροπής.

Καταμερισμός Παραγόμενης Ισχύος στις Γεννήτριες

Η κατανομή της παραγωγής στις γεννήτριες που συμμετέχουν, για τις διάφορες περιπτώσεις που σχηματίστηκαν φαίνεται στο σχήμα 5.6. Σε όλες τις περιπτώσεις SC-OPF η γεννήτρια 1 μειώνει την ισχύ που αποδίδει σε σχέση με το κανονικό OPF. Η γεννήτρια 2 αποδίδει ελαφρώς αυξημένη ισχύ σε σχέση με το κανονικό OPF ενώ οι γεννήτριες 3, 4 και 5 συμμετέχουν σε μικρό βαθμό στην παραγωγή για το SC-OPF. Σε σύγκριση με το προληπτικό SC-OPF και την αντίστοιχη κατανομή παραγωγής του σχήματος 5.2, δεν υπάρχει τόσο μεγάλη μετατόπιση της παραγωγής από την γεννήτρια 1 στις υπόλοιπες γεννήτριες του συστήματος. Στην προληπτική μέθοδο η επίτευξη ασφαλείας γίνεται αναγκαστικά και μόνο μέσω αλλαγής στην παραγόμενη ισχύ κάθε γεννήτριας. Η διορθωτική μέθοδος προσφέρει περισσότερη ευελιξία διότι πολλές υπερφορτίσεις που θα προέκυπταν σε μια διαταραχή, μπορούν να εκκαθαριστούν γρήγορα μέσω διορθωτικών χειρισμών στους σταθμούς μετατροπής μετά από την έλευση της διαταραχής. Έτσι η λήψη προληπτικών μέτρων είναι αναγκαία σε πολύ μικρότερο βαθμό. Ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι για την περίπτωση 4 του διορθωτικού SC-OPF, όπου περιλαμβάνονται τα περισσότερα ενδεχόμενα απώλειας στοιχείου, η γεννήτρια 1 αποδίδει ισχύ 169.5 MW στην κανονική κατάσταση λειτουργίας. Στο προληπτικό SC-OPF η γεννήτρια απέδιδε 150 MW, και στον συγκεκριμένο σχηματισμό του προβλήματος τα ενδεχόμενα απώλειας σταθμού μετατροπής δεν υπολογίζονται. Επομένως το διορθωτικό SC-OPF που έχει μεγαλύτερο πλήθος περιορισμών ασφαλείας από το προληπτικό πρόβλημα της ενότητας έχει πιο φθηνά έξοδα λειτουργίας ίσα με 7828.5 \$/h, σε σχέση με τα 7944.5 \$/h του προληπτικού SC-OPF.

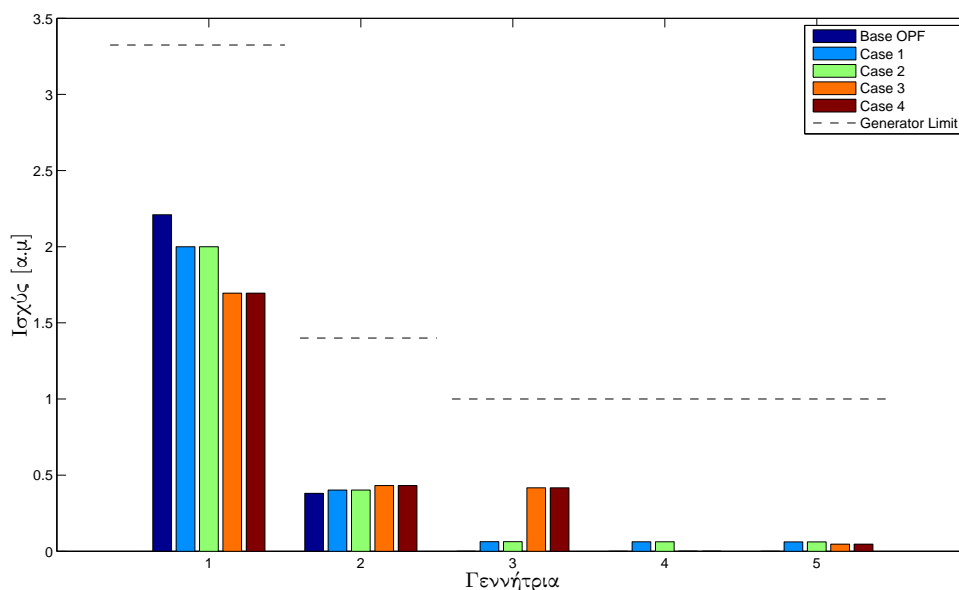


Figure 5.6: Κατανομή παραγωγής διορθωτικού SC-OPF για 100% φορτίο

Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς

Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών

Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής

Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής

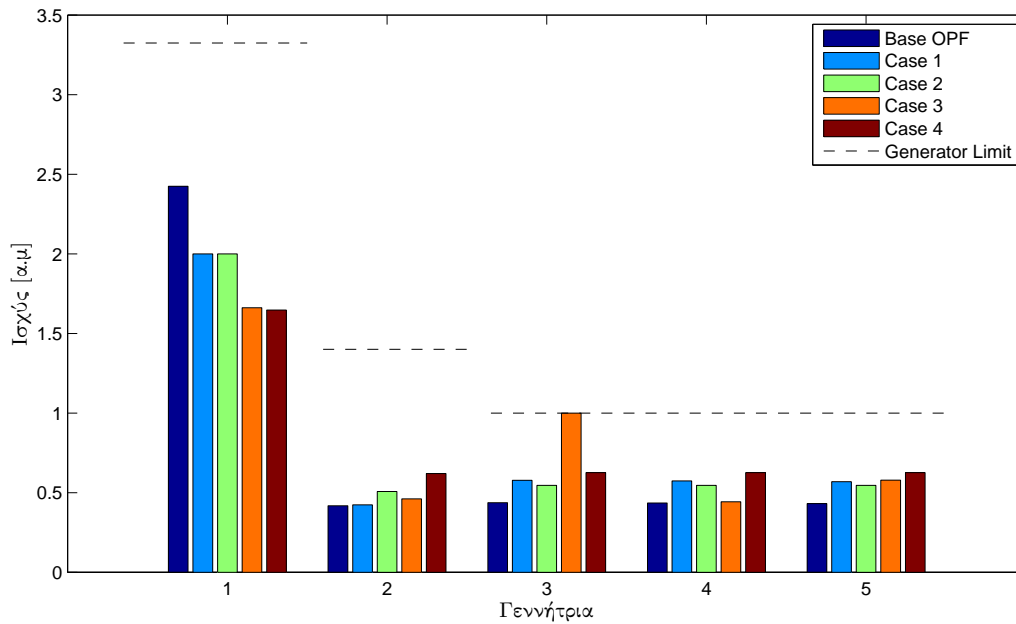


Figure 5.7: Κατανομή παραγωγής διορθωτικού SC-OPF για 160% φορτίο

Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς

Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών

Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής

Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής

5.3.1 Σύγκριση Κόστους

Η επόμενη ενδεικτική ποσότητα που θα συζητηθεί είναι το κόστος λειτουργίας του δικτύου για τις διάφορες περιπτώσεις που περιγράφηκαν. Από το σχήμα 5.8 φαίνεται η αύξηση του κόστους λειτουργίας με την συμπερίληψη περιορισμών ασφαλείας για απώλειες γραμμών μεταφοράς. Η περαιτέρω περίληψη απωλειών σταθμών μετατροπής οδηγεί σε ακόμη πιο ακριβή λειτουργία του δικτύου. Στην προκειμένη περίπτωση επιπλέον περιορισμοί ασφαλείας για απώλειες γεννητριών δεν επιβαρύνουν το κόστος, καθώς το συνολικό φορτίο του συστήματος είναι σχετικά μικρό σε σχέση με τις δυνατότητες των γεννητριών. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και η απώλεια της γεννήτριας 1, που είναι η πιο δραματική περίπτωση, δεν προκαλεί παραβιάσεις ορίων που να επιβάλλουν την λήψη προληπτικών μέτρων.

Αύξηση του συνολικού φορτίου του συστήματος κατά 60% οδηγεί στα λειτουργικά κόστη του σχήματος 5.9. Ο συμβολισμός 100% φορτίο, αναφέρεται στο αρχικό φορτίο του συστήματος όπως είναι στα δεδομένα της IEEE, και είναι ίσο με 259 MW. Το σχήμα απεικονίζει την επιρροή που έχει η αύξηση του συνολικού φορτίου του συστήματος στα λειτουργικά κόστη. Στην προκειμένη περίπτωση η συμπερίληψη περιορισμών σχετικών με απώλειες γεννητριών έχει αισθητή επίδραση στα λειτουργικά κόστη. Σε κατάσταση αυξημένης ζήτησης ισχύος όλες οι γεννήτριες παράγουν περισσότερη ισχύ, γεγονός που καθιστά την απώλεια μιας από αυτές ένα πιο δραματικό φαινόμενο. Εξού και τα επιπλέον προληπτικά μέτρα που χρειάζονται και οδηγούν σε αυξημένο κόστος λειτουργίας.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι υπάρχει μεγάλη εξάρτηση της αποδοτικότητας του δικτύου

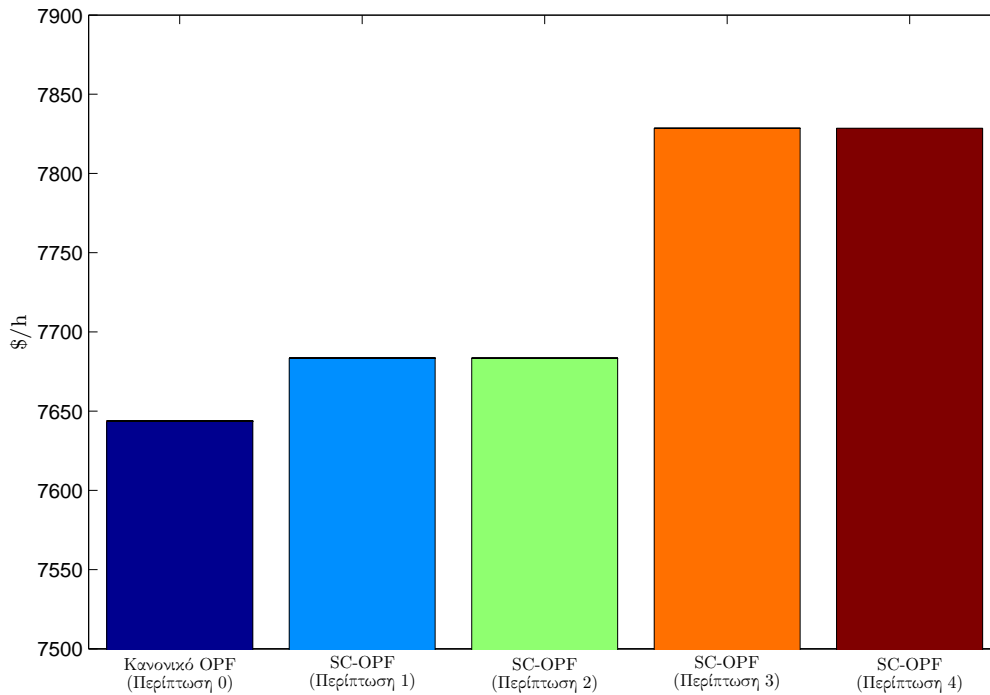


Figure 5.8: Λειτουργικά Έξοδα για 100% φορτίο

Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς

Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών

Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής

Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής

από την λειτουργία των σταθμών μετατροπής. Ενώ η διαφορά κόστους μεταξύ περίπτωσης 1 και 2 είναι σχετικά μικρή, η διαφορά μεταξύ περίπτωσης 3 και 4 είναι αρκετά μεγαλύτερη. Η αιτία είναι η συμπερίληψη των απωλειών σταθμών μετατροπής στις πιθανές διαταραχές. Σε μια τέτοια διαταραχή μειώνονται δραστικά οι διορθωτικοί χειρισμοί που μπορούν να εφαρμοστούν καθώς και το σύνολο της ισχύος που μπορεί να αναλάβει να μεταφέρει το DC δίκτυο. Στους πίνακες 5.1 και 5.2 καταγράφεται το λειτουργικό κόστος που καθορίζεται από την επίλυση κάθε περίπτωσης SC-OPF για δύο επιλεγμένα επίπεδα φόρτισης του δικτύου. Τέτοιες ενδεικτικές τιμές μπορούν να φανούν χρήσιμες σε μελέτες επέκτασης ενός δικτύου ή οικονομικές έρευνες. Ενδιαφέρον έχει η σύγκριση της περίπτωσης 2 του διορθωτικού SC-OPF με το προληπτικό SC-OPF διότι περιλαμβάνουν ουσιαστικά τα ίδια ενδεχόμενα διαταραχών. Το σχήμα 5.10 απεικονίζει τη μεταβολή του κόστους λειτουργίας σε συνάρτηση με το μέγιστο επιτρεπτό ποσό διορθωτικών χειρισμών, για την εν λόγω περίπτωση διορθωτικού SC-OPF. Στον άξονα x το επιτρεπτό ποσό αλλαγής στην ισχύ των σταθμών μετατροπής εκφράζεται ποσοστιαία, θεωρώντας ως μέγιστη δυνατή μεταβολή μια τιμή P_T^{max} . Εδώ αυτή η τιμή θεωρείται 1 α.μ ισχύς, ή αλλιώς 100MW. Το κόστος που αντιστοιχεί στο προληπτικό SC-OPF απεικονίζεται στο ίδιο γράφημα ως ευθεία γραμμή από την στιγμή που δεν επιτρέπονται διορθωτικοί χειρισμοί σε αυτή την κατάσταση.

Όσο ελαττώνεται το περιθώριο διορθωτικών χειρισμών, το κόστος που ορίζεται από την επίλυση του SC-OPF αυξάνεται. Καθώς μικραίνει το περιθώριο και προσεγγίζει την τιμή 0,

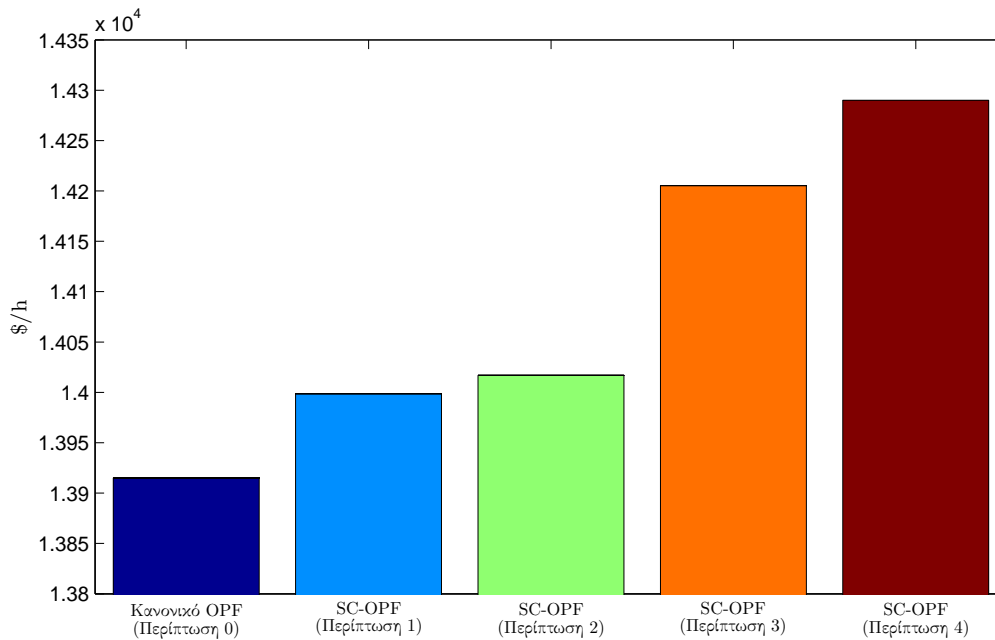


Figure 5.9: Λειτουργικά Έξοδα για 160% φορτίο

Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς

Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών

Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής

Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής

Table 5.1: Κόστος ασφαλείας για 100% φορτίο

Σενάριο	Είδος διαταραχών που περιλαμβάνονται	Λειτουργικό κόστος [\$/h]	Κόστος ασφαλείας [\$/h]
Περίπτωση 0	Καμία	7643.63	-
Περίπτωση 1	Γραμμές μεταφοράς	7683.48	39.85
Περίπτωση 2	Γραμμές μεταφοράς, γεννήτριες	7683.48	39.85
Περίπτωση 3	Γραμμές μεταφοράς, σταθμοί μετατροπής	7828.51	184.88
Περίπτωση 4	Γραμμές μεταφοράς, γεννήτριες, σταθμοί μετατροπής	7828.51	184.88

το κόστος που καθορίζεται από το διορθωτικό SC-OPF ταυτίζεται με το κόστος του προληπτικού. Αυτό είναι αναμενόμενο από την στιγμή που το προληπτικό-διορθωτικό πρόβλημα στο οποίο δεν επιτρέπεται διορθωτικός έλεγχος σε κατάσταση διαταραχής, ορίζει ουσιαστικά το ίδιο πρόβλημα με το καθαρά προληπτικό SC-OPF. Η διαφορά σε αυτή την περίπτωση έγκειται μόνο

Table 5.2: Κόστος ασφαλείας για 160% φορτίο

Σενάριο	Είδος διαταραχών που περιλαμβάνονται	Λειτουργικό κόστος [\$/h]	Κόστος ασφαλείας [\$/h]
Περίπτωση 0	Καμία	13915.11	-
Περίπτωση 1	Γραμμές μεταφοράς	13998.8	83.69
Περίπτωση 2	Γραμμές μεταφοράς, γεννήτριες	14016.95	101.84
Περίπτωση 3	Γραμμές μεταφοράς, σταθμοί μετατροπής	14205.34	290.23
Περίπτωση 4	Γραμμές μεταφοράς, γεννήτριες, σταθμοί μετατροπής	14289.94	374.83

στην μεθοδολογία που χρησιμοποιείται και στην κατάστρωση του προβλήματος.

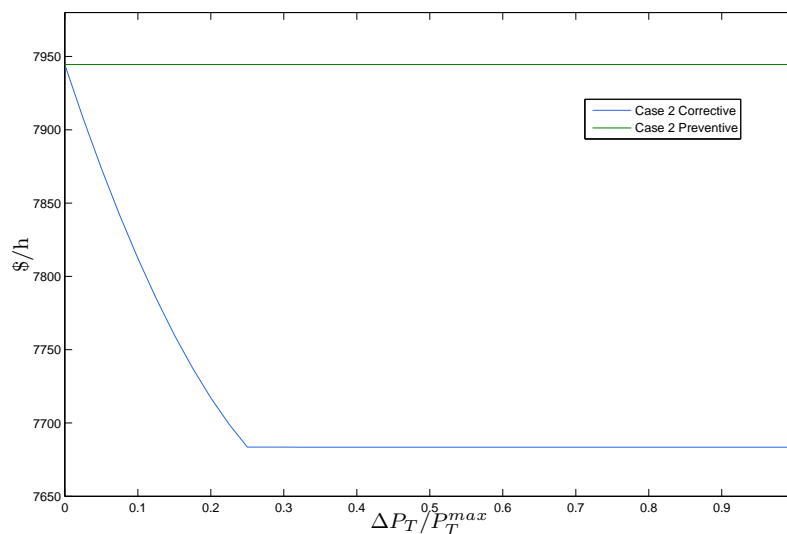


Figure 5.10: Σύγκριση και συσχέτιση προληπτικού και διορθωτικού SC-OPF

5.3.2 Αλληλεπίδραση AC και DC Δικτύου

Στο σχήμα 5.11 φαίνονται οι φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του AC δικτύου. Στις περιπτώσεις SC-OPF οι ροές φορτίου είναι περισσότερο διαμοιρασμένες στις γραμμές του δικτύου, σε βαθμό που εξαρτάται από τα είδη διαταραχών που περιλαμβάνονται σε κάθε περίπτωση. Με την ίδια λογική όπως και με την προληπτική μέθοδο, γραμμές που είναι φορτισμένες κοντά στα όρια τους στο κανονικό OPF φέρουν μικρότερη ισχύ στο SC-OPF, και έπεται ότι χαμηλά φορτισμένες

γραμμές αναλαμβάνουν να μεταφέρουν περισσότερη ισχύ.

Παρόλα αυτά η δυνατότητα εφαρμογής διορθωτικών χειρισμών σε καταστάσεις διαταραχής επιτρέπει την φόρτιση ορισμένων γραμμών αρκετά κοντά στις τιμές που είχαν και στο κανονικό OPF. Σε περίπτωση ισχυρής διαταραχής οι σταθμοί μετατροπής μπορούν να εξομαλύνουν υπερφορτίσεις ρυθμίζοντας την ισχύ που ανταλλάσσεται μεταξύ των δύο δικτύων. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό και με τα όρια των AC γραμμών στο 1 α.μ, αναμενόταν ότι οι γραμμές 1-2 και 1-5 θα φέραν μεγαλύτερη ισχύ. Το γεγονός όμως ότι το DC δίκτυο είναι φορτισμένο στα όρια του δικαιολογεί αυτό το αποτέλεσμα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.12 οι DC γραμμές 1-25 και 13-1 φέρουν ισχύ 0.5 α.μ, ίση με το όριο φόρτισης τους. Ακόμα και με το DC δίκτυο κορεσμένο όμως, στις περιπτώσεις 1 και 2 οι AC γραμμές 1-2 και 1-5 είναι φορτισμένες στα 0.75 και 0.37 α.μ αντίστοιχα. Αν δεν υπήρχε περιθώριο διορθωτικών χειρισμών, απώλεια οποιασδήποτε εκ των δύο γραμμών θα είχε ως αποτέλεσμα να υπερφορτιστεί η άλλη γραμμή στο 1.12 α.μ, που δεν είναι επιτρεπτό. Με εφαρμογή διορθωτικών χειρισμών ο σταθμός μετατροπής 1 θα μεταβάλλει την έγχυση ισχύος προς το DC δίκτυο στο ενδεχόμενο απώλειας της γραμμής 1-2 ή 1-5, αυξάνοντας την κατά 12 MW. Αναλόγως και στο DC δίκτυο, με παράδειγμα τις γραμμές 1-25 και 13-1, οι οποίες φέρουν ισχύ 0.44 α.μ. Απώλεια μιας από τις δύο θα οδηγήσει στην άλλη DC γραμμή να φορτίζεται στο 0.5 α.μ. Το υπολοιποίσιμο ποσό ισχύος (0.38 α.μ) θα αναλάβει να το μεταφέρει το AC δίκτυο για να μην προκύψει παραβίαση ορίου στις DC γραμμές. Επομένως η εφαρμογή διορθωτικών χειρισμών καταστούν δυνατή την παραγωγή επιπλέον ισχύος από την φθηνότερη μονάδα παραγωγής, που έχει ως αποτέλεσμα μια πιο οικονομική λειτουργία του δικτύου σε σχέση με την προληπτική μέθοδο. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι περιπτώσεις 2 και 4 που περι-

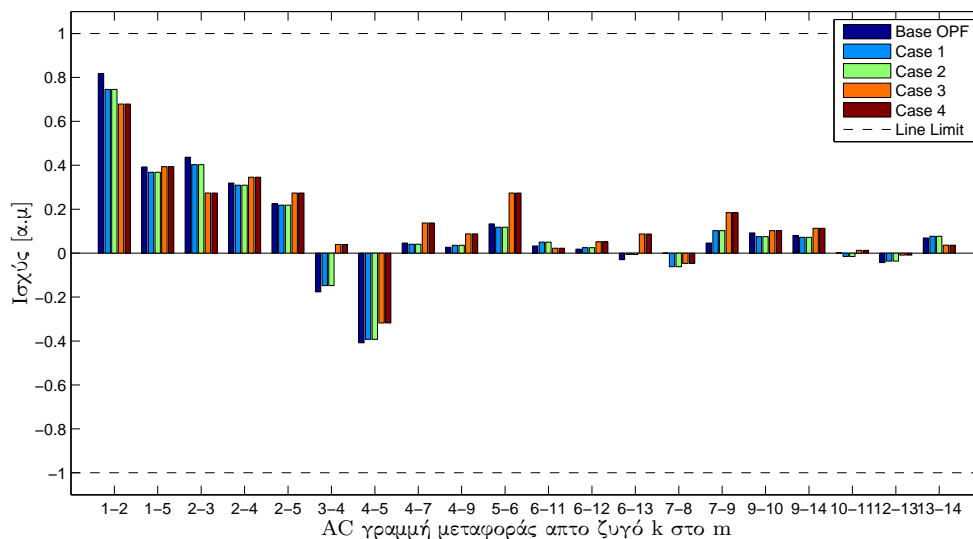


Figure 5.11: Ροές ισχύος στο AC δίκτυο για 100% φορτίο

Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς

Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών

Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής

Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής

αμβάνουν απώλειες γεννητριών, δεν διαφέρουν αισθητά από τις περιπτώσεις 1 και 3 αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το συνολικό φορτίο του συστήματος σε αυτή την περίπτωση είναι

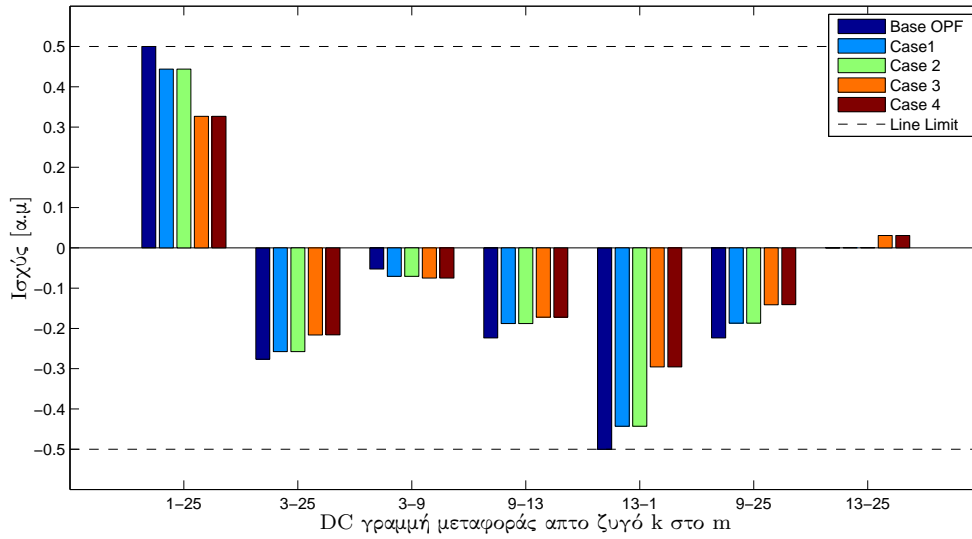


Figure 5.12: Ροές ισχύος στο DC δίκτυο για 100% φορτίο
 Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς
 Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών
 Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής
 Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής

μικρό σε σύγκριση με τις δυνατότητες παραγωγής των γεννητριών του δικτύου. Έτσι οι επιπλέον περιορισμοί για διαταραχές από γεννήτριες δεν οδηγούν σε ακριβότερη λειτουργία του δικτύου.

Οι φορτίσεις των γραμμών στο DC δίκτυο παρουσιάζουν λίγο διαφορετική εικόνα από αυτή του δικτύου AC, και φαίνεται στο σχήμα 5.12. Οι φορτίσεις των γραμμών που καθορίζονται από τις περιπτώσεις SC-OPF είναι χαμηλότερες σε όλο το DC δίκτυο. Με την συμπερίληψη περιορισμών ασφαλείας η συνολική ισχύς που τροφοδοτείται στο DC δίκτυο είναι μειωμένη, έτσι όλες οι γραμμές καταλήγουν να φέρουν μειωμένη ισχύ. Αυτό άλλωστε είναι φανερό και στο σχήμα 5.13 όπου οι συνολικές εγχύσεις ισχύος των σταθμών μετατροπής στο DC δίκτυο είναι ελαττωμένες στις περιπτώσεις SC-OPF. Ακόμη και έτσι βέβαια σε σχέση με την προληπτική μέθοδο και τα αποτελέσματα του σχήματος 5.4 το DC δίκτυο αναλαμβάνει να μεταφέρει αρκετά περισσότερη ισχύ.

Σε όλες τις προσομοιώσεις ο σταθμός μετατροπής 1 λειτουργεί ως ανορθωτική διάταξη, μεταφέροντας ισχύ από το AC προς το DC δίκτυο. Οι υπόλοιποι τρεις σταθμοί λειτουργούν σαν αντιστροφείς, εγχύοντας ισχύ πίσω στο AC δίκτυο για να τροφοδοτηθούν τα φορτία. Αύξηση του συνολικού φορτίου του συστήματος κατά 60% έχει ως αποτέλεσμα τις φορτίσεις που απεικονίζονται στα σχήματα 5.14, 5.15 και 5.16. Οι γραμμές μεταφοράς του AC δικτύου φέρουν περισσότερη ισχύ όταν το συνολικό φορτίο του δικτύου είναι αυξημένο. Στο DC δίκτυο από την άλλη παρατηρείται παρόμοια κατανομή της ισχύος καθώς και παρόμοια επίπεδα φόρτισης με αυτά του σχήματος 5.12. Το DC δίκτυο ήταν ήδη φορτισμένο κοντά στα όρια του ακόμη και για τις αρχικές συνθήκες φόρτισης. Επόμενως το AC δίκτυο πρέπει να αναλάβει να μεταφέρει την επιπρόσθετη ισχύ.

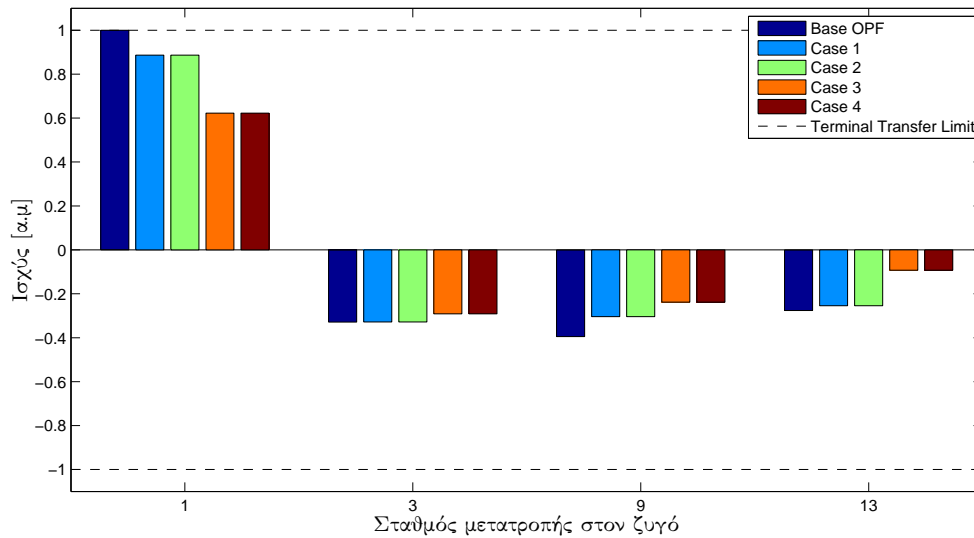


Figure 5.13: Ανταλλαγές ισχύος σταθμών μετατροπής για 100% φορτίο

Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς

Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών

Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής

Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής

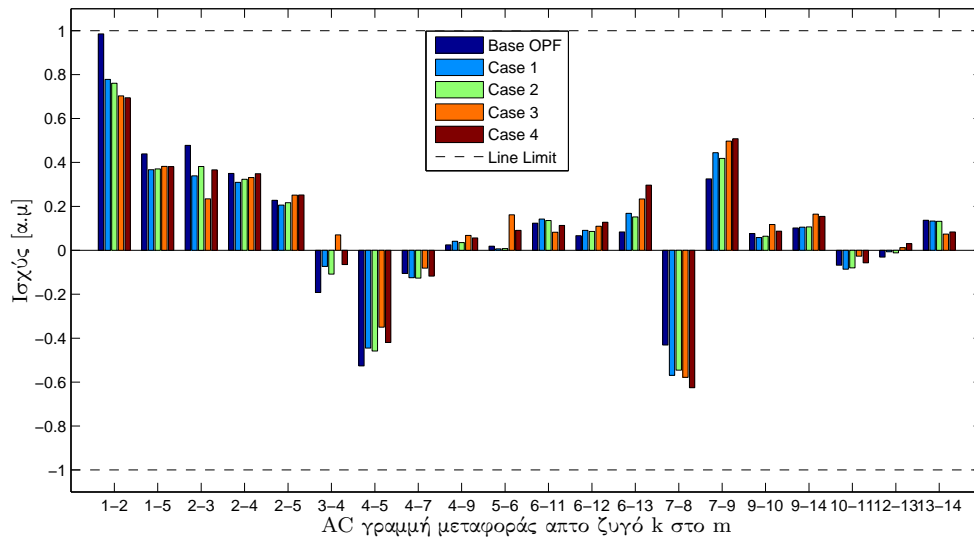


Figure 5.14: Ροές ισχύος στο AC δίκτυο για 160% φορτίο

Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς

Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών

Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής

Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής

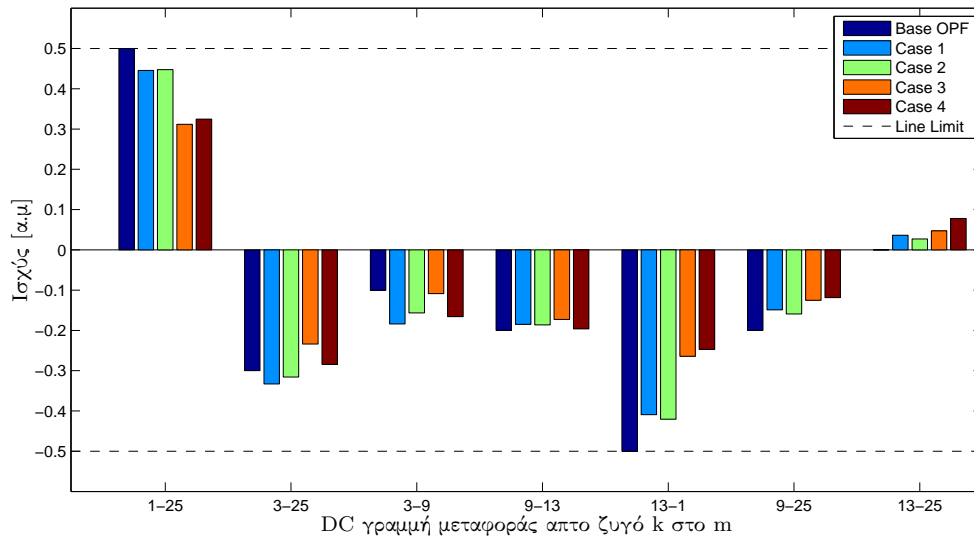


Figure 5.15: Ροές ισχύος στο DC δίκτυο για 160% φορτίο

Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς

Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών

Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής

Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής

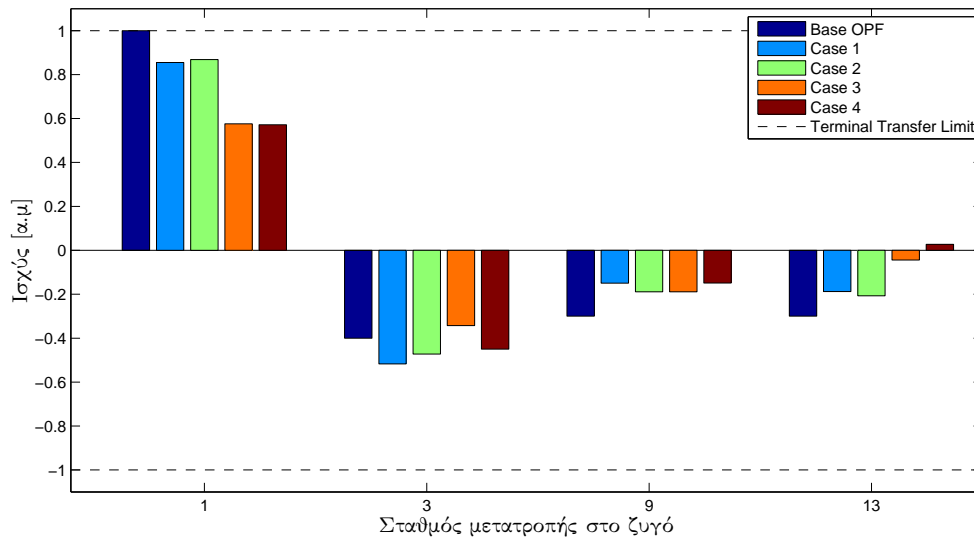


Figure 5.16: Ανταλλαγές ισχύος σταθμών μετατροπής για 160% φορτίο

Περίπτωση 1: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς

Περίπτωση 2: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και γεννητριών

Περίπτωση 3: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής

Περίπτωση 4: Απώλειες AC-DC γραμμών μεταφοράς, γεννητριών και σταθμών μετατροπής

5.3.3 Διορθωτικός Έλεγχος και Ανάλυση Ευαισθησίας

Για λόγους εκτίμησης της επίδρασης που έχει ο διορθωτικός έλεγχος στα λειτουργικά έξοδα, εκτελούνται προσομοιώσεις για διάφορα επίπεδα φόρτισης και περιπτώσεις SC-OPF. Για κάποιο δεδομένο επίπεδο φόρτισης και για συγκεκριμένη περίπτωση, το μέγιστο ποσό επιτρεπτής αλλαγής ισχύος στους σταθμούς μετατροπής επηρεάζει την λειτουργία του δικτύου. Το σχήμα 5.17 απεικονίζει την επίδραση του διορθωτικού ελέγχου στα λειτουργικά έξοδα για την περίπτωση 1 SC-OPF. Το μέγιστο ποσό επιτρεπτής αλλαγής στην ισχύ των σταθμών P_T^{max} εδώ θεωρείται ότι είναι ίσο με 1 α.μ, ίσο δηλαδή με την μέγιστη φόρτιση τους. Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν για ένα σύνολο τιμών που ανατίθενται στην μεταβλητή ΔP_T , ή ισοδύναμα Δu_c αν χρησιμοποιηθεί ο συμβολισμός της παραγράφου 2.4.2.

Όταν το μέγιστο επιτρεπτό ποσό διορθωτικών χειρισμών ελαττώνεται, το κόστος λειτουργίας του δικτύου αυξάνεται. Αυτό είναι φανερό στο πρώτο κομμάτι του γραφήματος, όπου στενότερα περιθώρια στις μεταβολές της ανταλλασσόμενης από τους σταθμούς μετατροπής ισχύος οδηγούν σε υψηλότερα κόστη. Τα κόστη του άξονα y κανονικοποιούνται ως προς τα κόστη των εκάστοτε περιπτώσεων όταν ανατίθεται 100% ευελιξία στους σταθμούς, δηλαδή όταν $\Delta P_T = P_T^{max}$. Επομένως το κανονικοποιημένο κόστος δίνεται από την παρακάτω έκφραση:

$$\text{Κανονικοποιημένο Κόστος} = \frac{\text{Cost}(\Delta P_T = x)}{\text{Κόστος}(P_T^{max} = x)} \quad (5.1)$$

Η κλίση της καμπύλης εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισης του δικτύου. Με αύξηση του φορτίου η κλίση της καμπύλης μικραίνει. Όσο πλησιάζει στην οριακή του φόρτιση το δίκτυο, μικραίνει το περιθώριο επίδρασης που έχουν οι διορθωτικοί χειρισμοί από τους σταθμούς μετατροπής, καθώς όλα τα στοιχεία είναι ήδη οριακά φορτισμένα. Έτσι μειώνεται η ευελιξία των σταθμών μετατροπής να μεταβάλλουν την ισχύ που ανταλλάσσουν μεταξύ των δύο δικτύων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι μετά από ένα ορισμένο σημείο του οριζόντιου άξονα, περίπου όταν $\Delta P_T/P_T^{max} = 0.25$, περαιτέρω αύξηση του μέγιστου επιτρεπτού ποσού διορθωτικών χειρισμών δεν επιφέρει μείωση του λειτουργικού κόστους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για τις προσομοιώσεις αυτές ανατέθηκαν πολύ μεγαλύτερες ποινές στο AC δίκτυο από ότι στο DC δίκτυο. Με αυτό τον τρόπο η επίλυση του προβλήματος καθορίζει ότι το DC δίκτυο θα φορτιστεί στα όρια ασφαλούς λειτουργίας του ως η πιο φθηνή επιλογή. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την κλίμακα ισχύος του δικτύου οδηγούν σε αυτό το όριο, πέρα από το οποίο αύξηση του μέγιστου επιτρεπτού ποσού διορθωτικών χειρισμών δεν επηρεάζει περαιτέρω το κόστος που καθορίζεται από την επίλυση του προβλήματος SC-OPF.

Στο σχήμα 5.18 οι ίδιες προσομοιώσεις με αυτές που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 5.17 εκτελέστηκαν για την περίπτωση 2, όπου τα ενδεχόμενα διαταραχών που περιλαμβάνονται είναι οι απώλειες γραμμών μεταφοράς και σταθμών μετατροπής. Σε αυτή την περίπτωση το επιτρεπτό ποσό διορθωτικών χειρισμών έχει μεγαλύτερη επίδραση στο λειτουργικό κόστος του δικτύου. Αυτό είναι φανερό από τα αυξημένα κανονικοποιημένα κόστη που προκύπτουν καθώς και από το γεγονός ότι η περιοχή του άξονα x στην οποία το επιτρεπτό ποσό διορθωτικών χειρισμών επηρεάζει το κόστος λειτουργίας είναι τώρα μεγαλύτερο. Η απώλεια σταθμού μετατροπής είναι σημαντική διαταραχή και επομένως το σύστημα μπορεί να επωφεληθεί περισσότερο από διορθωτικούς χειρισμούς. Προκειμένου να τονιστεί η επίδραση που έχει η φόρτιση του DC δικτύου στις δυνατότητες διορθωτικού ελέγχου, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις με ανάθεση ίσων συντελεστών ποινής $\Pi^{AC} = \Pi^{DC}$. Τα αποτελέσματα της ανάθεσης για την περίπτωση 2 SC-OPF φαίνονται στο σχήμα 5.20. Μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι σε σύγκριση με την περίπτωση του σχήματος 5.18 τα κανονικοποιημένα κόστη είναι χαμηλότερα, ειδικά για τις προσομοιώσεις με

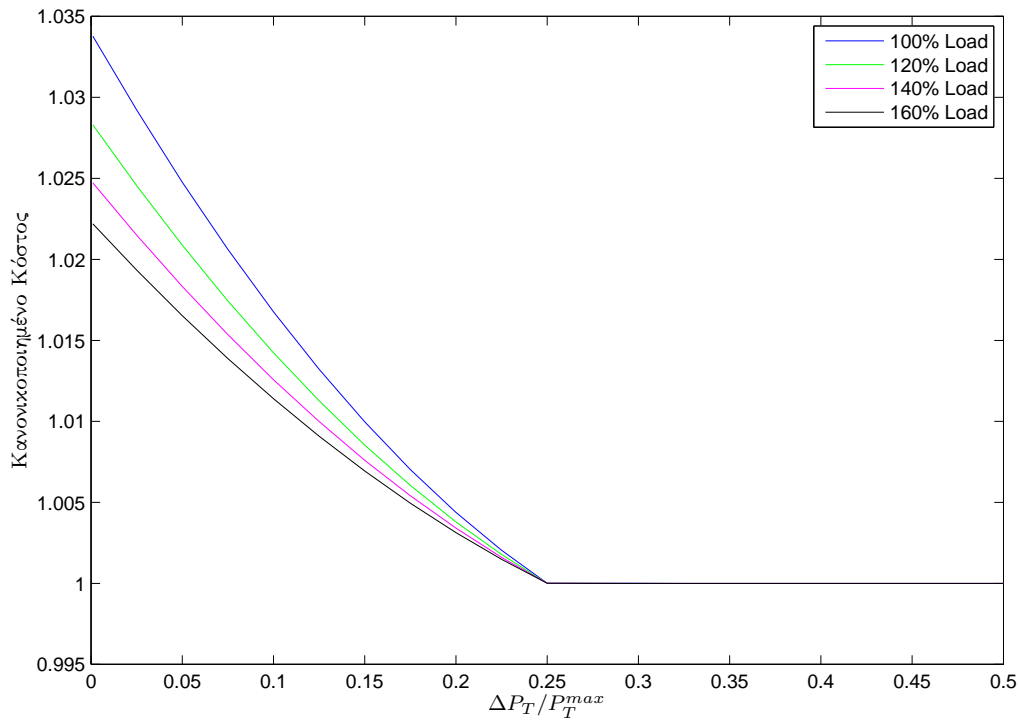


Figure 5.17: Επιδράσεις διορθωτικού ελέγχου στο λειτουργικό κόστος: Περίπτωση 1

περιορισμένα ποσά επιτρεπτού διορθωτικού ελέγχου. Αυτό είναι αναμενόμενο από την άποψη ότι η ροή ισχύος είναι διαμοιρασμένη στα δύο δίκτυα. Έτσι η χαμηλότερη φόρτιση του DC δικτύου δεν επηρεάζει τόσο δραστικά το συνολικό κόστος λειτουργίας. Από την άλλη σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του σχήματος 5.18, το λειτουργικό κόστος μειώνεται με την αύξηση του επιτρεπτού ποσού διορθωτικών χειρισμών, μέχρι σχεδόν το ποσό αυτό να φτάσει την μέγιστη δυνατή τιμή του. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται διότι οι σταθμοί μετατροπής διαθέτουν σε αυτή την περίπτωση περισσότερη ευελιξία στην ρύθμιση της ισχύος που ανταλλάσσεται μεταξύ των δύο δικτύων καθώς κανένα από τα δύο δεν είναι φορτισμένο κοντά στο όριο φόρτισης του. Έτσι το σύστημα μπορεί να επωφεληθεί από την δυνατότητα εφαρμογής μεγάλης κλίμακας διορθωτικών χειρισμών που αντικαθιστούν σε ένα βαθμό την ανάγκη λήψης προληπτικών μέτρων για ασφάλεια του δικτύου. Τα λειτουργικά έξοδα που προκύπτουν από ανάθεση δύο διαφορετικών σετ συντελεστών ποινής φαίνονται στο σχήμα 5.21. Παρά το γεγονός ότι στην περίπτωση ίδιων συντελεστών ποινής ο διορθωτικός έλεγχος μετά από διαταραχή έχει μεγαλύτερη επίδραση στο κόστος λειτουργίας, το απόλυτο κόστος λειτουργίας είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από αυτό που καθορίζεται όταν το DC δίκτυο φορτίζεται στο μέγιστο των δυνατοτήτων του. Τα σχήματα 5.19 και 5.22 απεικονίζουν τα αποτελέσματα προσομοιώσεων για τις παραπάνω δύο περιπτώσεις ποινών και για το πρόβλημα που λαμβάνει υπόψη όλα τα ενδεχόμενα διαταραχών.

5.3.4 Συσχέτιση Χωρητικότητας DC Δικτύου και Κόστους Λειτουργίας

Το μέγιστο ποσό ισχύος που μπορούν να μεταφέρουν οι DC γραμμές μεταφοράς και οι σταθμοί μετατροπής επηρεάζει την συνολική συμπεριφορά του δικτύου. Από την στιγμή που τα DC δί-

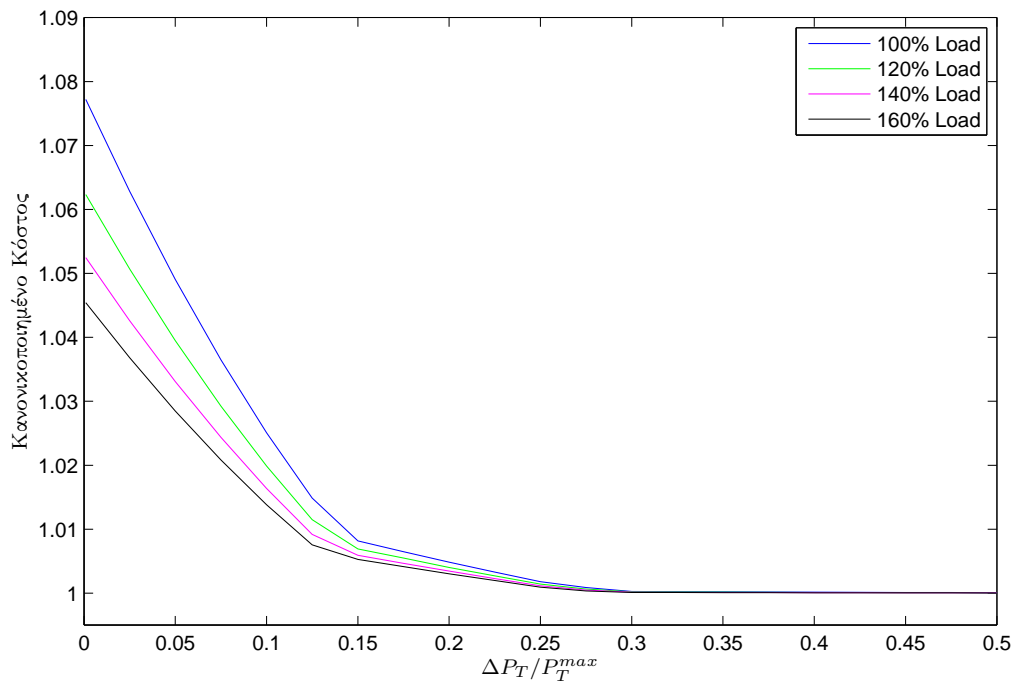


Figure 5.18: Επιδράσεις διορθωτικού ελέγχου στο λειτουργικό κόστος: Περίπτωση 2

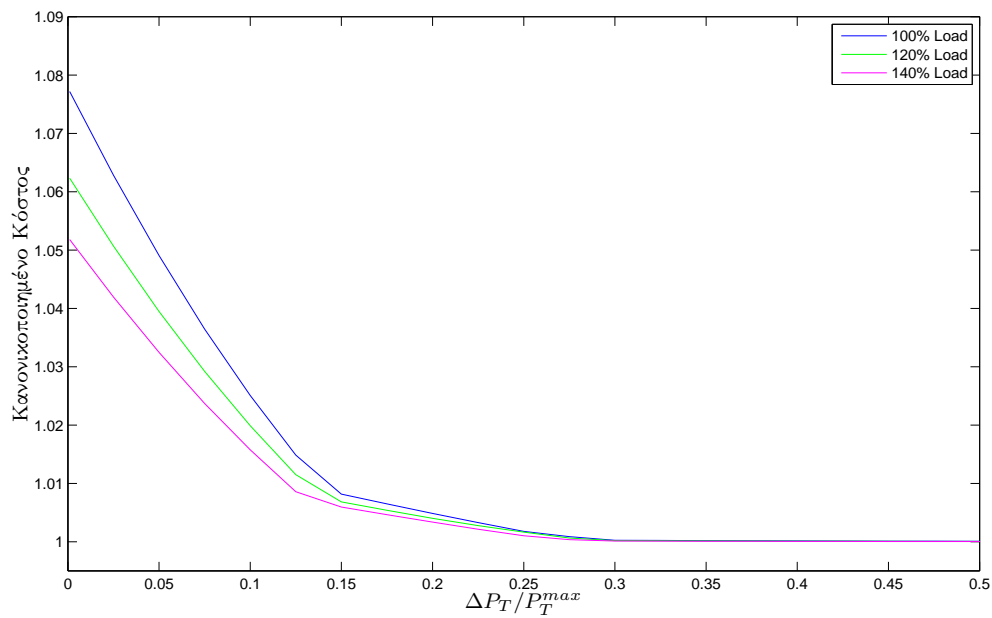


Figure 5.19: Επιδράσεις διορθωτικού ελέγχου στο λειτουργικό κόστος: Περίπτωση 4

τα είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο, πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο που τα τεχνικά όρια των

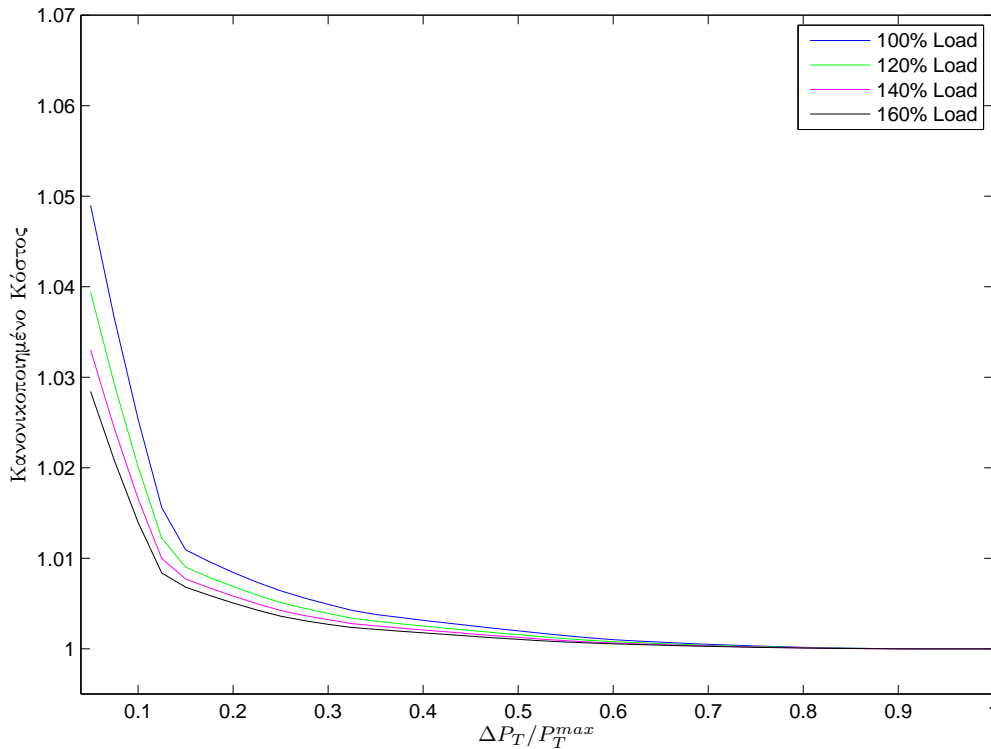


Figure 5.20: Επιδράσεις διορθωτικού ελέγχου στο λειτουργικό κόστος όταν $\Pi^{AC} = \Pi^{DC}$: Περίπτωση 2

στοιχείων επηρεάζουν την λειτουργία του δικτύου, μπορούν να βοηθήσουν στον σχεδιασμό και την μελέτη ενός μελλοντικού μικτού AC-DC δικτύου.

Σε αυτό το πλαίσιο εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για μεγάλο αριθμό συνδυασμών στις τιμές των ορίων P_T^{max} και F_{DC}^{max} . Στο τριών διαστάσεων σχήμα 5.23 η χωρητικότητα των σταθμών μετατροπής παριστάνεται στον άξονα x, η χωρητικότητα των DC γραμμών μεταφοράς στον άξονα y, ενώ στον άξονα z παριστάνεται το λειτουργικό κόστος του μικτού δικτύου που προκύπτει από την επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου για κάθε συνδυασμό τιμών. Για μικρές τιμές στα όρια φόρτισης των γραμμών και των σταθμών μετατροπής το κόστος λειτουργίας αυξάνει δραματικά, που είναι αναμενόμενο. Για δεδομένη τιμή του ορίου φόρτισης των σταθμών μετατροπής, η κλίση των καμπυλών στην διεύθυνση του άξονα y δείχνει την ευαισθησία του λειτουργικού κόστους ως προς το όριο φόρτισης των γραμμών μεταφοράς. Κατάντιστοιχία η κλίση που έχουν οι καμπύλες στην διεύθυνση του άξονα x απεικονίζουν την ευαισθησία του λειτουργικού κόστους ως προς το όριο φόρτισης των σταθμών μετατροπής. Το κόστος λειτουργίας του δικτύου εξαρτάται περισσότερο από το όριο φόρτισης των σταθμών μετατροπής, που είναι απολύτως λογικό καθώς η ισχύς που ρέει στις DC γραμμές τροφοδοτείται από τους σταθμούς μετατροπής. Στο σχήμα 5.24 εκτελούνται ανάλογες προσομοιώσεις με αυτές του σχήματος 5.23, αλλά για το πρόβλημα SC-OPF. Τα αποτελέσματα των δύο γραφημάτων μοιάζουν αρκετά, με την διαφορά ότι στην περίπτωση του προβλήματος SC-OPF τα όρια φόρτισης των γραμμών και σταθμών μετατροπής παίζουν μεγαλύτερο ρόλο στην οικονομικότερη λειτουργία του δικτύου. Αυτό είναι φανερό και από

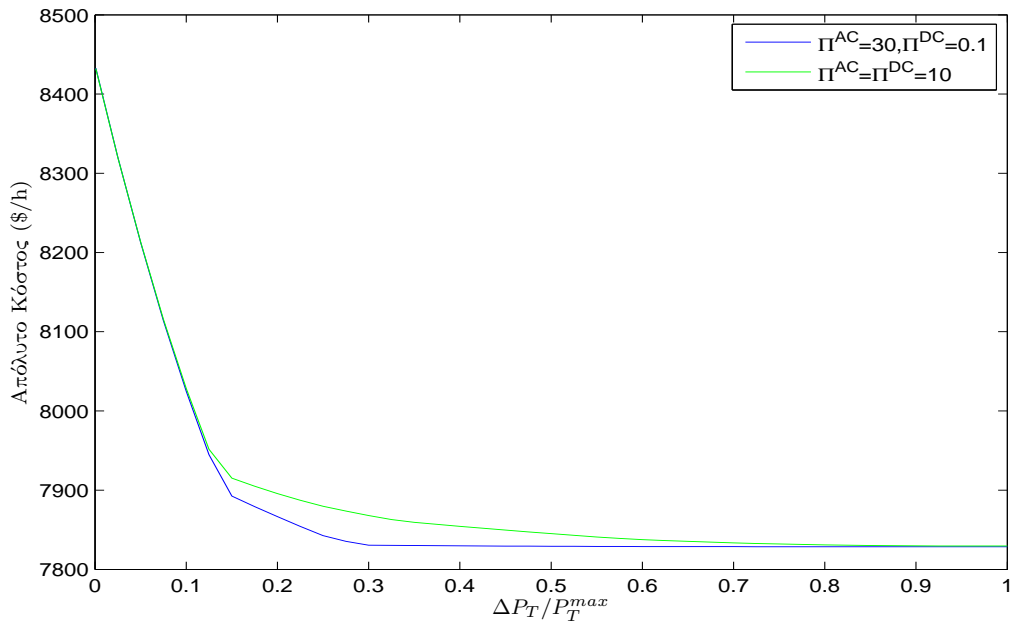


Figure 5.21: Σύγκριση απόλυτου κόστους λειτουργίας για δύο επίπεδα συντελεστών Π^{AC} , Π^{DC} : Περίπτωση 2

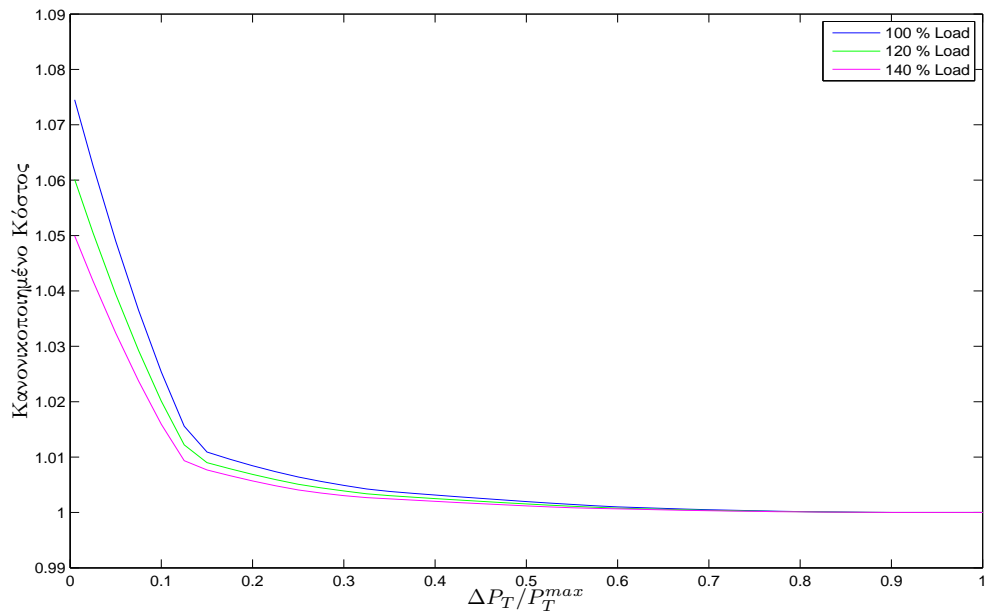


Figure 5.22: Επίδραση διορθωτικού ελέγχου όταν $\Pi^{AC} = \Pi^{DC}$: Περίπτωση 4

το γεγονός ότι η διαφορά μεταξύ μέγιστου και ελάχιστου κόστους είναι διπλάσια στην περίπτωση SC-OPF από ότι στην περίπτωση της βέλτιστης ροής φορτίου.

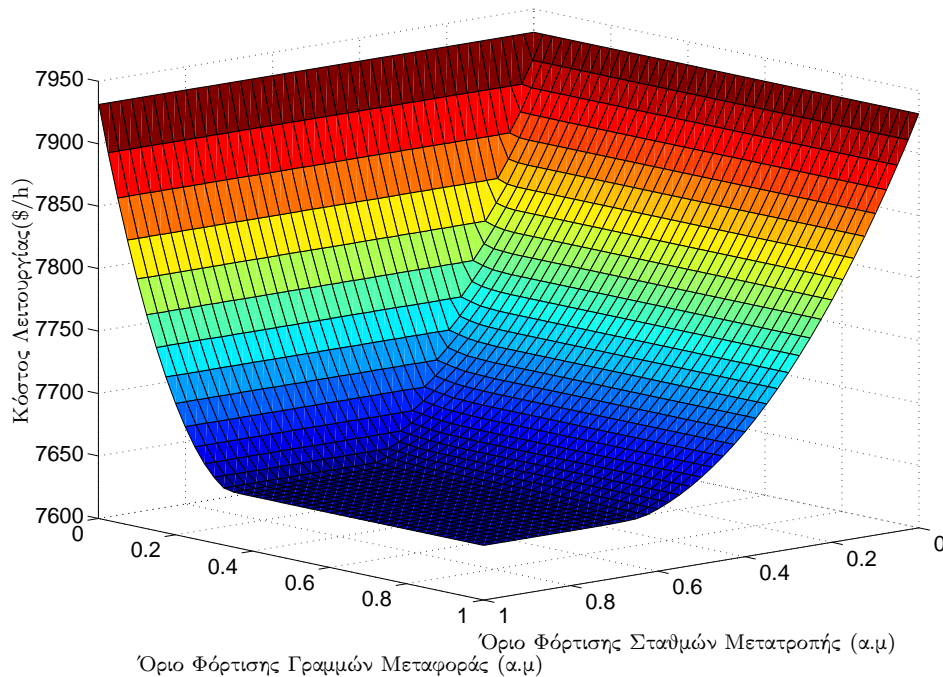


Figure 5.23: Εξάρτηση Κόστους Λειτουργίας από Όρια Φόρτισης για το πρόβλημα OPF

5.3.5 Χρόνοι Επίλυσης

Σημαντικό προτέρημα χρήσης γραμμικού μοντέλου είναι ότι οι διαθέσιμοι αλγόριθμοι επίλυσης φτάνουν στην λύση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου ταχύτατα. Μόνο 7-10 χιλιοστά του δευτερολέπτου απαιτούνται για την επίλυση του γραμμικού OPF σε σχέση με τα 2.5 δευτερόλεπτα του πλήρους μη γραμμικού OPF [1]. Το πλήρες μη γραμμικό πρόβλημα SC-OPF που περιλαμβάνει όλα τα ενδεχόμενα διαταραχών που έχουν αναφερθεί θα οδηγούσε σε χρόνους επίλυσης υπερβολικά μεγάλους. Το γεγονός αυτό καθιστά το πλήρες πρόβλημα μη πρακτικό σε περιπτώσεις που ο χειριστής του δικτύου πρέπει να λάβει άμεσα μέτρα για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Το γραμμικό πρόβλημα SC-OPF που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία απαιτεί πολύ μικρούς χρόνους επίλυσης που το κάνει μια αρκετά ελκυστική επιλογή για εφαρμογή στα κέντρα διαχείρισης του δικτύου. Οι χρόνοι αυτοί για τις περιπτώσεις SC-OPF που περιγράφηκαν καταγράφονται στον πίνακα 5.26.

5.4 Δοκιμαστικό Δίκτυο II

Το επόμενο δοκιμαστικό δίκτυο στο οποίο θα εφαρμοστεί η μέθοδος SC-OPF που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία είναι μεγαλύτερο από αυτό που μελετήθηκε στις ενότητες 5.1-5.3.5. Είναι το RTS-96 [13] αλληλοσυνδεδεμένο με ένα DC δίκτυο. Το DC δίκτυο έχει οκτώ ζυγούς, έξι από τους οποίους είναι συνδεδεμένοι με AC ζυγό μέσω σταθμού μετατροπής, και δεκαέξι DC γραμμές. Το δίκτυο φαίνεται αναλυτικά στο σχήμα 5.27. Τα λειτουργικά κόστη που καθορίζονται σε κάθε περίπτωση διορθωτικού SC-OPF φαίνονται στον πίνακα 5.3, μαζί με τους χρόνους επίλυσης που τους αντιστοιχούν. Στο σχήμα 5.28 φαίνεται η επίδραση που έχει η εφαρμογή

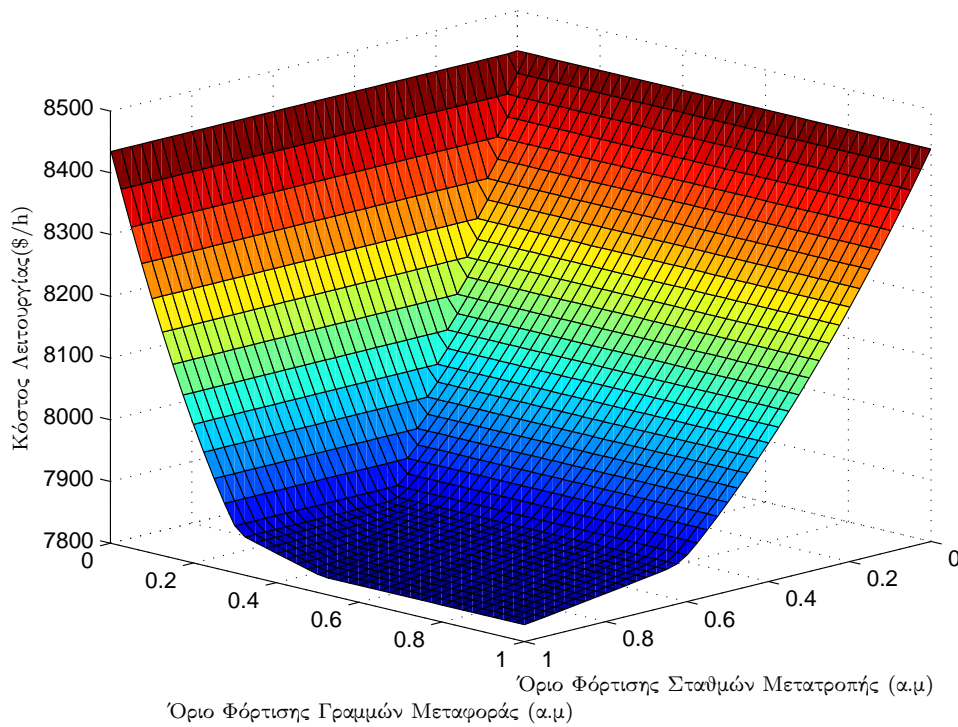
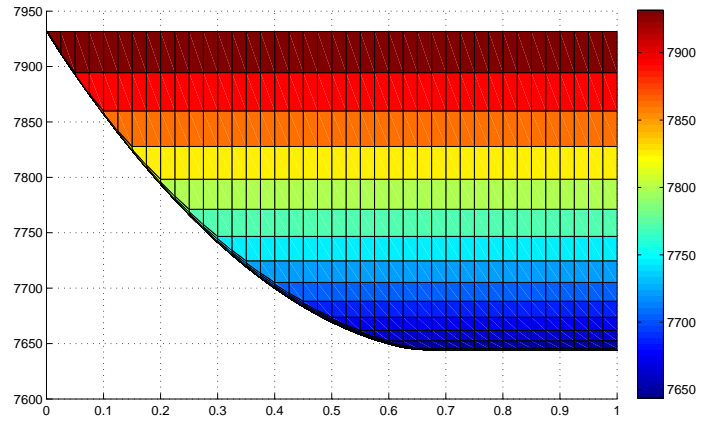


Figure 5.24: Εξάρτηση Κόστους Λειτουργίας από Όρια Φόρτισης για το πρόβλημα SC-OPF

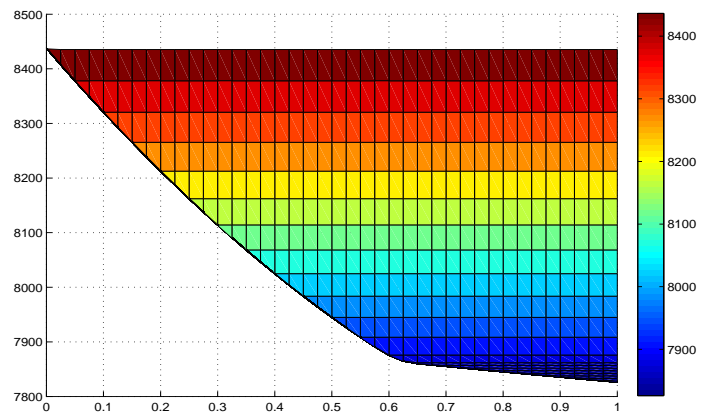
Table 5.3: Κόστος ασφαλείας και χρόνοι επίλυσης για το δοκιμαστικό δίκτυο του σχήματος 5.27

Σενάριο	Είδος διαταραχών που περιλαμβάνονται	Λειτουργικό κόστος[\$/h]	Κόστος ασφαλείας [\$ /h]	Χρόνος επίλυσης [sec]
Περίπτωση 0	Κανένα	123394	-	0.078
Περίπτωση 1	Γραμμές	126198	2804	9.6
Περίπτωση 2	Γραμμές, γεννήτριες	128140	4746	30.8
Περίπτωση 3	Γραμμές, σταθμοί μετατροπής	126224	2830	9.8
Περίπτωση 4	Όλες οι διαταραχές	128164	4770	31.1

διορθωτικού ελέγχου από τους σταθμούς μετατροπής στο λειτουργικό κόστος του δικτύου. Σε αντίθεση με την περίπτωση του πρώτου δικτύου που μελετήθηκε, στο παρών δίκτυο η εφαρμογή διορθωτικών χειρισμών ύστερα από διαταραχή δεν έχει αισθητή επίδραση στο λειτουργικό κόστος που καθορίζεται από την επίλυση του προβλήματος SC-OPF. Αρκετές φθηνές γεννήτριες



(a) OPF



(b) SC-OPF

Figure 5.25: Προβολή Καμπυλών 5.23 και 5.24

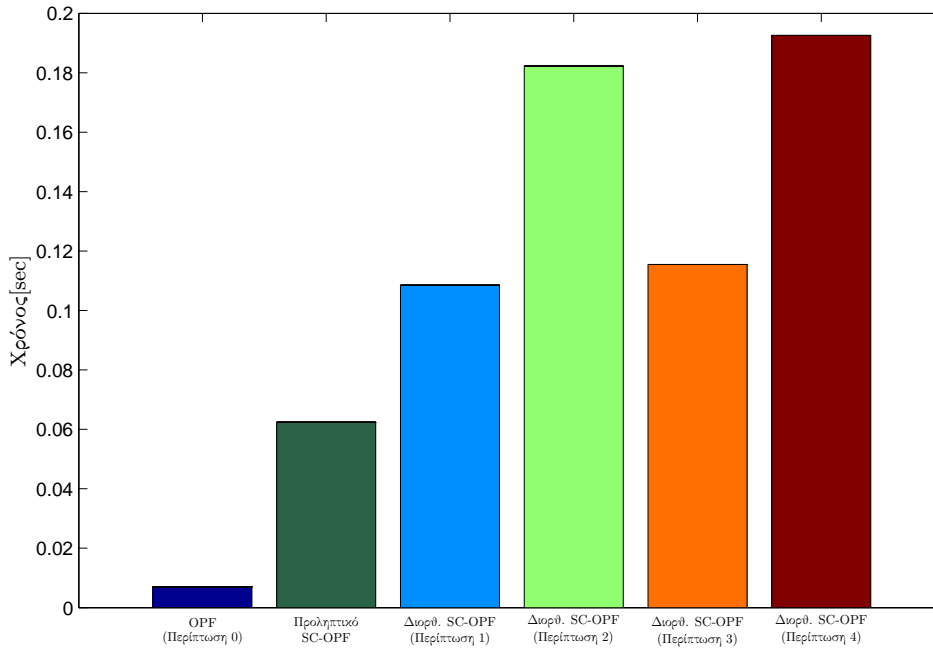


Figure 5.26: Χρόνος επίλυσης για όλες τις περιπτώσεις SC-OPF

μεγάλης χωρητικότητας είναι διαμοιρασμένες στους ζυγούς του δικτύου, οι οποίοι συνδέονται με τους γειτονικούς ζυγούς τους μέσω πολλαπλών γραμμών. Έτσι το γεγονός ότι το δίκτυο είναι αρκετά συμπαγές μπορεί να παίζει ρόλο στην συμπεριφορά αυτή. Άλλος λόγος στον οποίο μπορεί να οφείλεται η ανεξαρτησία λειτουργικού κόστους από την χρήση διορθωτικού ελέγχου είναι η γενική τοπολογία του συγκεκριμένου δικτύου. Διαφορετική τοποθέτηση των σταθμών μετατροπής στο δίκτυο θα μπορούσε να καταστήσει κερδοφόρα την χρήση διορθωτικού ελέγχου για την επίτευξη ασφάλειας σε κατάσταση διαταραχής. Η ελαττωμένη ευελιξία του δικτύου επισημαίνεται με έναν ακόμη τρόπο, συγκρίνοντας τους πίνακες 5.1 και 5.3. Αν ληφθεί η ποσότητα που εκφράζεται ως η διαφορά μεταξύ του λειτουργικού κόστους του κανονικού OPF και της περίπτωσης 4 διορθωτικού SC-OPF (όπου περιλαμβάνονται όλα τα ενδεχόμενα διαταραχής), προς το κόστος του κανονικού OPF, τότε για το IEEE-14 δοκιμαστικό δίκτυο ισχύει:

$$\Delta\text{Cost}_{14}(\%) = \frac{\text{Cost}_{\text{case4}} - \text{Cost}_{\text{base}}}{\text{Cost}_{\text{base}}} = \frac{7828.51 - 7643.63}{7643.63} = 2.4\% \quad (5.2)$$

Αντίστοιχα για την περίπτωση του δοκιμαστικού δικτύου RTS-96:

$$\Delta\text{Cost}_{\text{RTS-96}}(\%) = \frac{\text{Cost}_{\text{case4}} - \text{Cost}_{\text{base}}}{\text{Cost}_{\text{base}}} = \frac{128164 - 123394}{123394} = 3.86\% \quad (5.3)$$

Επομένως αναλογικά με το κόστος που καθορίζεται από το κανονικό OPF είναι πιο ακριβή η παροχή ασφαλείας για το μεγαλύτερο δοκιμαστικό δίκτυο RTS-96. Στην περίπτωση του δικτύου αυτού οι χρόνοι επίλυσης αυξάνουν σημαντικά. Αν αναλογιστεί κανείς όμως ότι ο χρόνος επίλυσης στην περίπτωση 4 SC-OPF στην οποία περιλαμβάνονται πάνω από 200 ενδεχόμενα διαταραχών, είναι περίπου 30 δευτερόλεπτα, είναι ξεκάθαρο ότι η λύση λαμβάνεται πολύ γρήγορα αναλογικά

62 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

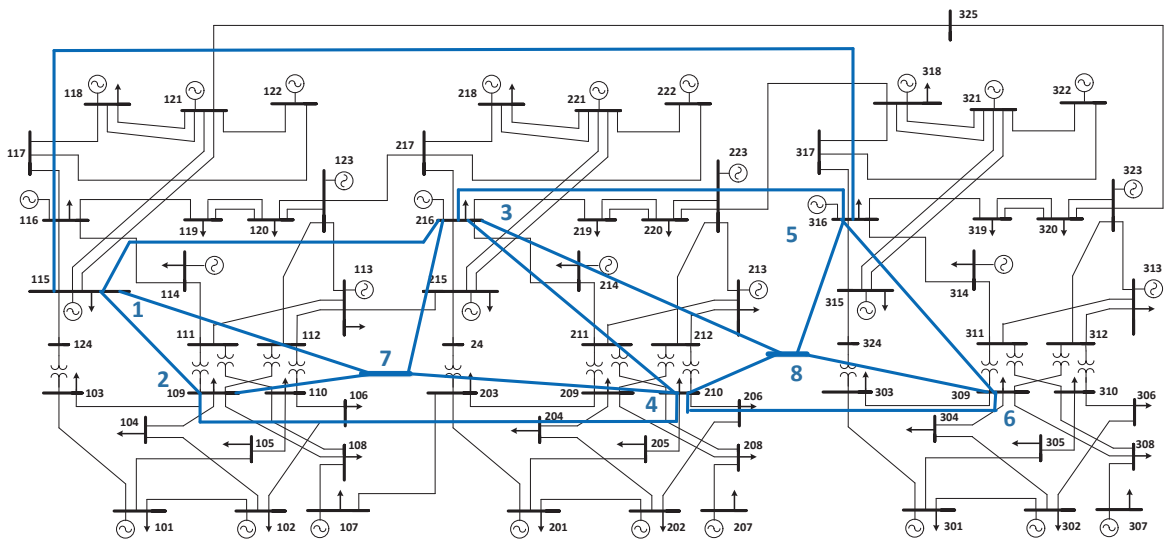


Figure 5.27: IEEE RTS-96 συνδεδεμένο με DC δίκτυο

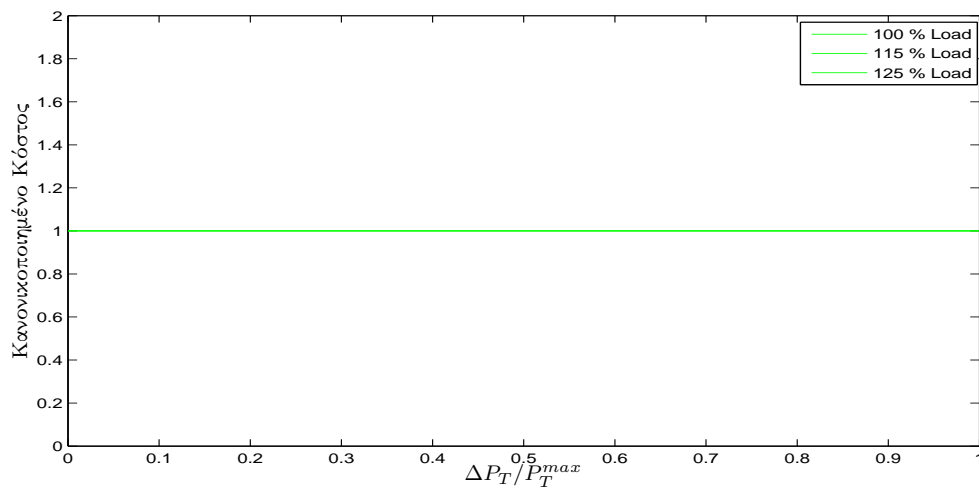


Figure 5.28: Επίδραση διορθωτικού ελέγχου στο κόστος

με το μέγεθος του προβλήματος. Με κατάλληλη επιλογή μόνο των ενδεχομένων διαταραχής που οδηγούν σε παραβιάσεις, ο απαιτούμενος χρόνος για την επίλυση μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

Κεφαλαίο 6

Συμπερασματα

Το κεφάλαιο αυτό συνοψίζει τα πιο σημαντικά σημεία της εργασίας και πλαισιώνει προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στην παρούσα εργασία δύο μέθοδοι εφαρμογής SC-OPF αναπτύχθηκαν, παρουσιάστηκαν και εφαρμόστηκαν σε δοκιμαστικά AC-DC δίκτυα.

Η προληπτική μέθοδος SC-OPF είναι μια υπολογιστική μέθοδος που θα μπορούσε να διαδραματίσει σπουδαίο ρόλο στην μελλοντική λειτουργία των συστημάτων ενέργειας. Η ανάπτυξη μιας συμπαγούς και αποδοτικής μεθόδου είναι σύγχρονο αντικείμενο μελέτης και έρευνας, καθώς θα ενίσχυε σημαντικά την ευστάθεια και την αξιοπιστία των συστημάτων ενέργειας. Τα επιπρόσθετα λειτουργικά έξοδα που προκύπτουν θα ήταν αμελητέα μπροστά στην προοπτική εγγυημένης και απρόσκοπτης παροχής των φορτίων του συστήματος. Εξαιρετικά δυσχερή συμβάντα όπως μαζικές διακοπές θα μπορούσαν να αποφεύγονται, μαζί με τις οικονομικές επιπτώσεις που αυτά επιφέρουν.

Η προληπτική-διορθωτική μέθοδος SC-OPF είναι εν γένει μια οικονομικότερη εναλλακτική της πλήρους προληπτικής μεθόδου. Διορθωτικές ενέργειες-χειρισμοί μετά από διαταραχή συνήθως θεωρείται ότι έχουν μηδενικό κόστος καθώς η συχνότητα εφαρμογής τους είναι πολύ μικρή. Η σημασία του διορθωτικού ελέγχου στην μείωση του λειτουργικού κόστους επισημάνθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ευέλικτες μεταβολές στην ισχύ που ανταλλάσσεται μεταξύ AC και DC δικτύου μέσω των σταθμών μετατροπής, είναι ικανές να εκκαθαρίσουν αξιοσημείωτο αριθμό παραβιάσεων που θα συνέβαιναν μετά από διαταραχές. Έτσι παρέχεται τρόπος για πιο συμφέρουσα επίτευξη ασφαλείας του δικτύου, σε αντίθεση με την πιο ακριβή προληπτική μέθοδο, όπου η επίτευξη ασφαλείας γίνεται μέσω επαναδρομολόγησης της παραγωγής ισχύος στις μονάδες του δικτύου.

Αυτές οι διορθωτικές ενέργειες όμως θα πρέπει να εκτελούνται σύμφωνα με καθορισμένες και εξακριβωμένες στρατηγικές ελέγχου που αναπτύσσονται απο τους χειριστές ενός δικτύου. Αν αυτές οι στρατηγικές αποδειχθούν ότι είναι ανεπαρκείς, οι οικονομικές συνέπειες ενός σφάλματος μπορούν να οδηγήσουν σε οικονομικές συνέπειες δυσχερότερες από τα μεγάλα λειτουργικά κόστη που καθορίζονται από την προληπτική μέθοδο SC-OPF. Επομένως μεγάλη σημασία έχει η ανάπτυξη έγκυρων τεχνικών ελέγχου όσον αφορά την λειτουργία των σταθμών μετατροπής σε πραγματικό χρόνο.

Ένα βασίμο και επίκαιρο επιχείρημα είναι ότι η ανάπτυξη ελεύθερων αγορών ενέργειας έχει εξασθενήσει την ασφάλεια των δικτύων [14]. Υπάρχει πίεση προς τους χειριστές των δικτύων να μην παρεμβαίνουν στην λειτουργία των αγορών. Άμεση συνέπεια αυτής της τάσης είναι η

προτίμηση διορθωτικών μέτρων για επίτευξη ασφαλείας έναντι προληπτικών, διότι τα προληπτικά μέτρα λαμβάνονται με παράλληλη παρέμβαση στην λειτουργία των αγορών ενέργειας.

Πιθανή επέκταση των μεθόδων που παρουσιάστηκαν σε αυτή την εργασία θα ήταν ένας σχηματισμός του προβλήματος SC-OPF με το πλήρες μη γραμμικό μοντέλο εξισώσεων ροής φορτίου. Μια τέτοια μεθοδολογία θα παρείχε μια πιο ρεαλιστική εικόνα καθώς και περισσότερη ακρίβεια στους υπολογισμούς. Επίσης η μελέτη δυναμικών φαινομένων είναι κρίσιμη, ειδικά όσον αφορά την λειτουργία των σταθμών μετατροπής σε κατάσταση διαταραχής. Ένα πλήρες μοντέλο για την κατάστροψη του προβλήματος OPF σε μικτό AC-DC δίκτυο έχει αναπτυχθεί στο [15]. Εξέλιξη αυτής της τεχνοτροπίας ώστε να περιλαμβάνει επιπλέον περιορισμούς ασφαλείας και να καταστά πρόβλημα SC-OPF φαίνεται να είναι πολλά υποσχόμενη.

Παράρτημα Α

Αριθμητικό Παραδειγμα

Στο πρώτο μέρος του παραρτήματος παρατίθεται ένα αριθμητικό παράδειγμα εφαρμογής της προληπτικής-διορθωτικής μεθόδου σε ένα μικρό δοκιμαστικό δίκτυο που φαίνεται στο σχήμα Α.1. Τα χαρακτηριστικά του δικτύου δίνονται στους πίνακες που ακολουθούν: Α.1. Στον πίνακα

Table A.1: Χαρακτηριστικά Γεννητριών

Γεν No	Στον AC ζυγό	Pmax [α.μ]	Pmin [α.μ]	Συντ κόστους γραμμικού όρου	Συντ κόστους τετραγωνικού όρου
1	1	1.6	0	18	0.0585295
2	3	1.2	0.25	20	0.25
3	4	1.7	0.15	40	0.12

Table A.2: Χαρακτηριστικά AC Γραμμών Μεταφοράς

Γραμμή No	Αρχή στον AC ζυγό	Πέρασ στον AC ζυγό	Αντίδραση [α.μ]	Όριο [α.μ]
1	1	2	0.08947	0.5
2	1	3	0.21502	0.45
3	1	4	0.17291	0.4
4	2	3	0.15879	0.45
5	3	4	0.22388	0.45

Α.6 περιέχεται το διάνυσμα ξ όπως καθορίζεται απο το κανονικό OPF, καθώς και το διάνυσμα ξ^0 για την περίπτωση 1 SC-OPF, δηλαδή η τιμή του διανύσματος βελτιστοποίησης που αντιστοιχεί στην κανονική (πρό-διαταραχής) κατάσταση λειτουργίας του δικτύου. Οι ροές φορτίου στις γραμμές μεταφοράς του δικτύου καταγράφονται στον πίνακα Α.7. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις 3 και 4 SC-OPF παρουσιάζονται στους πίνακες Α.8 και Α.9.

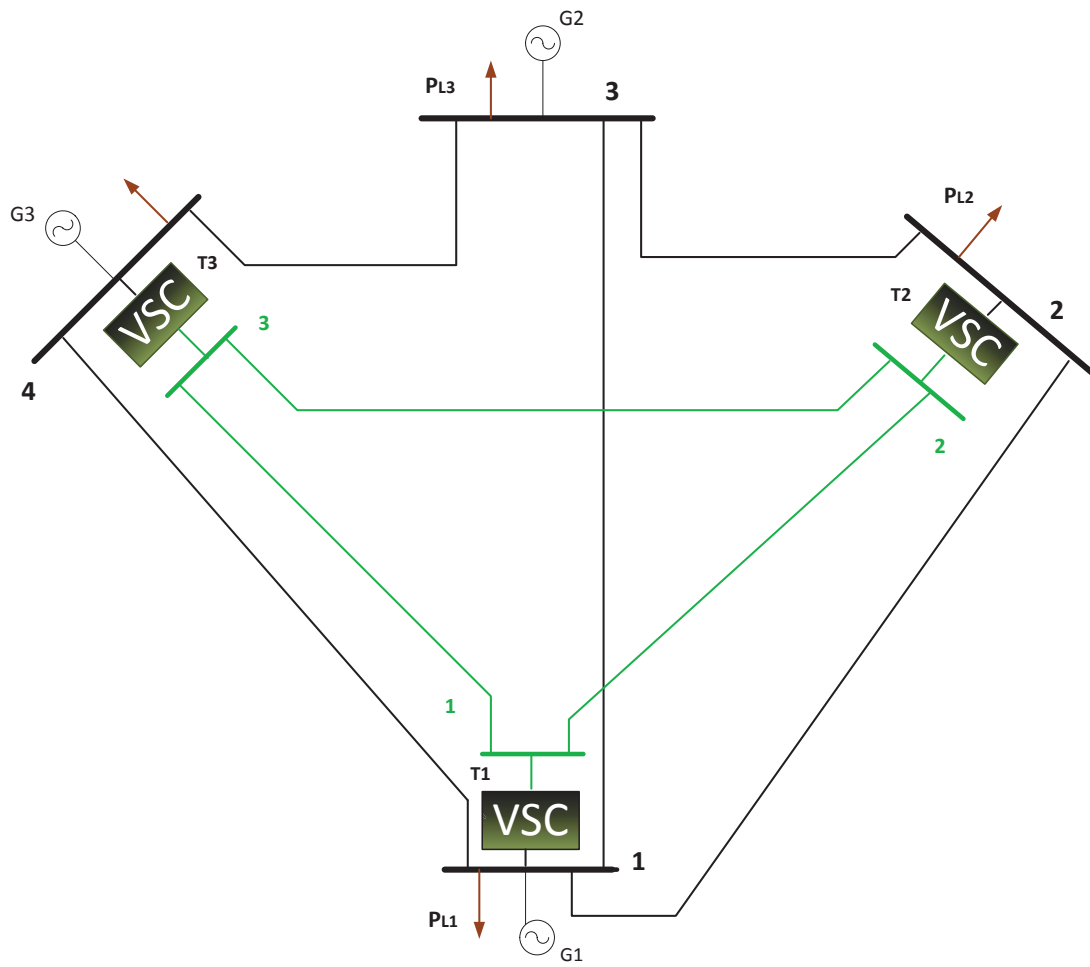


Figure A.1: Μικρό Δοκιμαστικό Μιχτό Δίκτυο

Table A.3: Χαρακτηριστικά DC Γραμμών Μεταφοράς

Γραμμή No	Αρχή στον DC ζυγό	Πέρασ στον DC ζυγό	Αντίσταση [Ω]	Όριο [α.μ]
1	1	2	1.3908	0.35
2	1	3	3.2208	0.4
3	1	4	2.3424	0.4
4	4	5	4.3920	0.4
5	3	4	3.27936	0.35
6	2	5	1.37616	0.5

Table A.4: Χαρακτηριστικά Σταθμών Μετατροπής

Σταθμός No	Στον AC ζυγό	Στον DC ζυγό	Όριο [α.μ]
1	1	1	0.9
2	4	2	0.7
3	2	5	0.9

Table A.5: Ζήτηση Ενεργού Ισχύος

$P_{L1}[a.m]$	$P_{L2}[a.m]$	$P_{L3}[a.m]$	$P_{L4}[a.m]$
0.2	0.8	0.65	0.5

Table A.6: Διάνυσμα Βελτιστοποίησης ξ για κανονικό OPF και Περίπτωση 1 SC-OPF

Κανονικό OPF			Περίπτωση 1 SC-OPF		
Κόστος Λειτουργίας		6205.55 \$/h	Κόστος Λειτουργίας		6225.3 \$/h
Προφίλ Παραγωγής	G_1	1.6	Προφίλ Παραγωγής	G_1	1.5438
	G_2	0.4		G_2	0.4477
	G_3	0.15		G_3	0.1585
Γωνία Τάσης AC ζυγού	δ_1	0	Γωνία Τάσης AC ζυγού	δ_1	0
	δ_2	-0.0382		δ_2	-0.03803
	δ_3	-0.04178		δ_3	-0.04130
	δ_4	-0.0343		δ_4	-0.0425
Ισχύς Στ Μετατροπής	P_{T1}	0.5797	Ισχύς Στ Μετατροπής	P_{T1}	0.4934
	P_{T2}	-0.3948		P_{T2}	-0.3955
	P_{T3}	-0.1849		P_{T3}	-0.0979
Τάση DC ζυγού	V_1	0	Τάση DC ζυγού	V_1	0
	V_2	-0.5563		V_2	-0.5138
	V_3	-0.5789		V_3	-0.3994

Table A.7: Φορτίσεις Γραμμών για κανονικό OPF και Περίπτωση 1 SC-OPF

Κανονικό OPF			Περίπτωση 1 SC-OPF		
		Ισχύς			Ισχύς
AC Γραμμή	1-2	0.4274	AC Γραμμή	1-2	0.425
	1-3	0.1943		1-3	0.192
	1-4	0.1984		1-4	0.2462
	2-3	0.0223		2-3	0.0206
	3-4	-0.0333		3-4	0.0057
		Ισχύς			Ισχύς
DC Γραμμή	1-2	0.4	DC Γραμμή	1-2	0.3694
	1-3	0.1797		1-3	0.124
	2-3	0.005		2-3	-0.026

Table A.8: Διάγραμμα Βελτιστοποίησης ξ για Περίπτωση 3 και 4 SC-OPF

Περίπτωση 3 SC-OPF			Περίπτωση 4 SC-OPF		
Κόστος Λειτουργίας		6981 \$/h	Κόστος Λειτουργίας		7023.8 \$/h
Προφίλ Παραγωγής	G_1	1.126	Προφίλ Παραγωγής	G_1	1.0409
	G_2	0.8353		G_2	0.7692
	G_3	0.1881		G_3	0.3397
Γωνία Τάσης AC ζυγού	δ_1	0	Γωνία Τάσης AC ζυγού	δ_1	0
	δ_2	-0.0357		δ_2	-0.0337
	δ_3	-0.0091		δ_3	-0.0093
	δ_4	-0.0227		δ_4	-0.0115
Ισχύς Στ Μετατροπής	P_{T1}	0.353	Ισχύς Στ Μετατροπής	P_{T1}	0.3534
	P_{T2}	-0.2336		P_{T2}	-0.2698
	P_{T3}	-0.1193		P_{T3}	-0.0836
Τάση DC ζυγού	V_1	0	Τάση DC ζυγού	V_1	0
	V_2	-0.334		V_2	-0.3588
	V_3	-0.363		V_3	-0.3072

Table A.9: Φορτίσεις Γραμμών για Περίπτωση 3 και 4 SC-OPF

Περίπτωση 3 SC-OPF			Περίπτωση 4 SC-OPF		
		Ισχύς			Ισχύς
AC Γραμμή	1-2	0.3991	AC Γραμμή	1-2	0.3769
	1-3	0.0426		1-3	0.0436
	1-4	0.1317		1-4	0.0669
	2-3	-0.1671		2-3	-0.1532
	3-4	0.0607		3-4	0.0097
		Ισχύς			Ισχύς
DC Γραμμή	1-2	0.2402	DC Γραμμή	1-2	0.258
	1-3	0.1127		1-3	0.095
	2-3	0.0065		2-3	-0.0117

Παράρτημα Β

Παραδειγμα με Καταστρωση Πινακων

Για καλύτερη κατανόηση του τρόπου κατάστρωσης των διαφόρων πινάκων με τους οποίους σχηματίζεται το πρόβλημα SC-OPF μελετάται ένα απλοποιημένο δίκτυο που απεικονίζεται στο σχήμα Β.1. Οι 3 AC ζυγοί συνδέονται μέσω σταθμών μετατροπής σε 3 DC ζυγούς αντίστοιχα. Στο παράδειγμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η αναλυτική κατάστρωση των απαραίτητων πινάκων για τον σχηματισμό του πλήρους προληπτικού SC-OPF. Οι διαστάσεις των πινάκων είναι σύμφωνα με την ονοματολογία του 3.1.

Table B.1: Ονοματολογία για Αριθμητικό Παράδειγμα

K=3	Αριθμός AC ζυγών
N=3	Αριθμός AC γραμμών
M=3	Αριθμός DC ζυγών
D=3	Αριθμός DC γραμμών
I=2	Αριθμός γεννητριών
L=3	Αριθμός σταθμών μετατροπής
C=9	Μέγεθος διανύσματος ξ
$Y_{prev}=58$	Αριθμός ανισοτικών περιορισμών

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_{AC} = \begin{bmatrix} -11.1769 & -4.6507 \\ 17.4746 & -6.2976 \\ -6.2976 & 10.9484 \end{bmatrix}, \quad B_{DC} = \begin{bmatrix} -0.719 & -0.3104 \\ 0.9467 & -0.2276 \\ -0.2276 & 0.5381 \end{bmatrix}$$

$$b_{eq} = [0.2 \ 0.8 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (\text{B.1})$$

$$\Lambda_I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Lambda_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$E_I = \begin{bmatrix} -0.4641 & 0 \\ 0 & 0.4641 \\ -0.5359 & 0 \\ 0 & 0.5359 \\ -0.4641 & 0 \\ 0 & 0.4641 \end{bmatrix}, \quad E_{AC} = \begin{bmatrix} -11.1769 & 0 \\ -11.1769 & 0 \\ 0 & -4.6507 \\ 0 & -4.6507 \\ 6.2976 & -6.2976 \\ 6.2976 & -6.2976 \end{bmatrix}$$

$$A_{ACprev} = \begin{bmatrix} -11.177 & 0 \\ -11.177 & -4.65 \\ -17.474 & 6.297 \\ -11.177 & -4.65 \\ 0 & -4.65 \\ 6.297 & -10.948 \\ 17.474 & -6.297 \\ 6.297 & -10.948 \\ 6.297 & -6.297 \end{bmatrix}, \quad A_{DCprev} = \begin{bmatrix} -0.719 & 0 \\ -0.719 & -0.31 \\ -0.946 & 0.227 \\ -0.719 & -0.31 \\ 0 & -0.31 \\ 0.227 & -0.538 \\ 0.946 & -0.227 \\ 0.227 & -0.538 \\ 0.227 & -0.227 \end{bmatrix}$$

$$b_{iq,prev} = [b_g^{max} \ b_g^{min} \ b_{l,AC,G} - b_{l,AC,G} \ b_{l,AC,P} - b_{l,AC,P} \ b_{term} - b_{term} \ b_{l,DC,P} - b_{l,DC,P}]^T_{[Y_{prev} \times 1]}$$

$$b_g^{max} = \begin{bmatrix} 1.2 \\ 1.1 \end{bmatrix}, \quad b_g^{min} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.3 \end{bmatrix}, \quad b_{l,AC,G} = \begin{bmatrix} b_{l,AC} \\ b_{l,AC} \\ \vdots \\ b_{l,AC} \end{bmatrix}_{[(N \times I) \times 1]}, \quad b_{l,AC,P} = \begin{bmatrix} b_{l,AC} \\ b_{l,AC} \\ \vdots \\ b_{l,AC} \end{bmatrix}_{[N^2 \times 1]}$$

$$b_{l,DC,P} = \begin{bmatrix} b_{l,DC} \\ b_{l,DC} \\ \vdots \\ b_{l,DC} \end{bmatrix}_{[D^2 \times 1]}, \quad b_{l,AC} = \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.3 \\ 0.4 \end{bmatrix}, \quad b_{l,DC} = \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.3 \\ 0.35 \end{bmatrix}$$

$$QC = \begin{bmatrix} 0.117059 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, W^{AC} = \begin{bmatrix} 120 - 60 \\ -60120 \end{bmatrix}, W^{DC} = \begin{bmatrix} 0.2 - 0.1 \\ -0.10.2 \end{bmatrix}$$

Με τους πίνακες που σχηματίστηκαν παραπάνω το πλήρες πρόβλημα SC-OPF καταστρώνεται όπως στην παράγραφο 4.1.5.

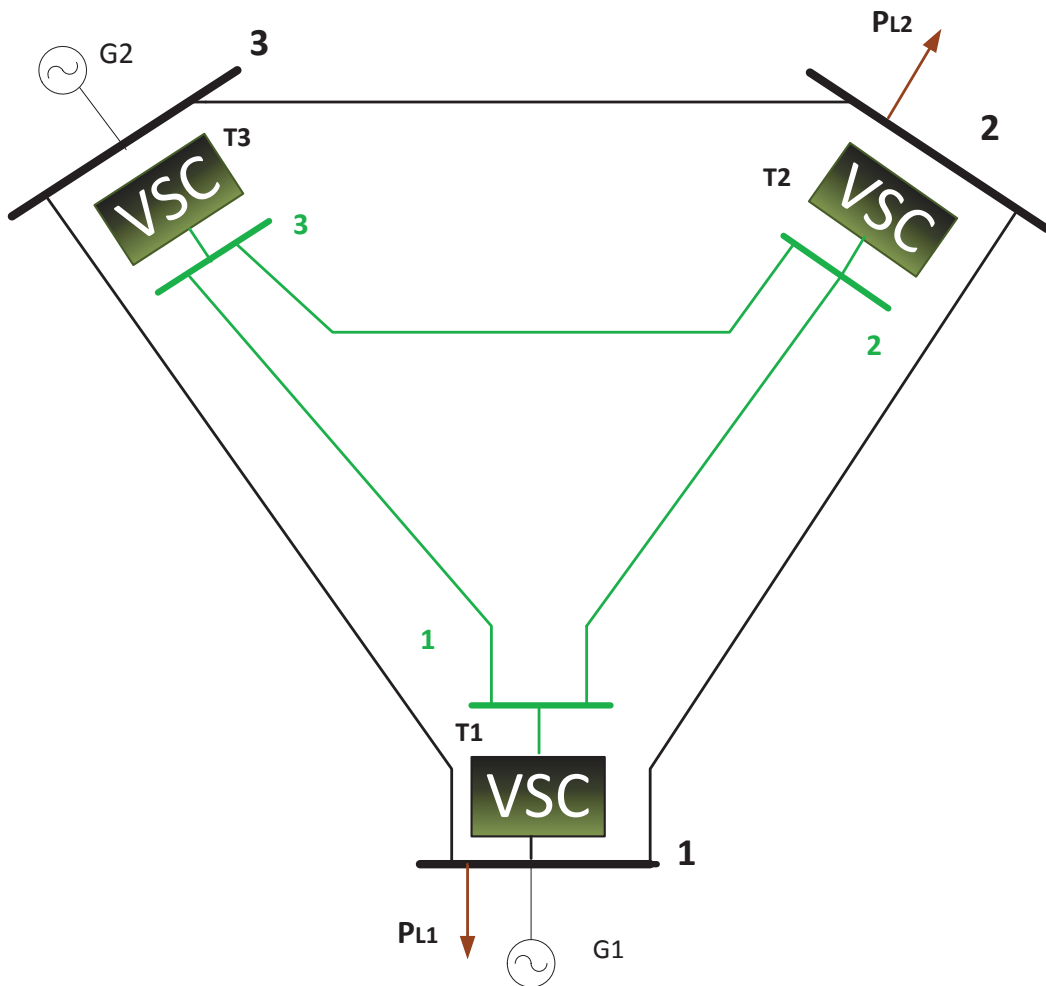


Figure B.1: Μικτό Δίκτυο Αριθμητικού Παραδείγματος

Βιβλιογραφία

- [1] R. Wiget and G. Andersson. DC optimal power flow including HVDC grids. *Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Halifax, Canada*, Aug 2013.
- [2] H.W. Dommel and W.F. Tinney. Optimal power flow solutions. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-87(10):1866–1876, 1968.
- [3] ENTSO-E, "Operation Handbook", european network of transmission system operators for electricity, 2009.
- [4] J.D. McCalley. Steady state analysis-power system operation and control, lecture notes, 2012.
- [5] S. Chatzivasileiadis, T. Krause, and G. Andersson. Flexible ac transmission systems (facts) and power system security ; a valuation framework. In *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, pages 1–8, 2011.
- [6] B. Stott, J. Jardim, and O. Alsac. Dc power flow revisited. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 24(3):1290–1300, 2009.
- [7] G. Andersson. Modelling and analysis of electric power systems, lecture 227-0526-00, itet eth zurich, September 2008.
- [8] J. Sun and L Tesfatsion. Dc optimal power flow formulation and solution using quadprogj. In *Proceedings, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Tampa, Florida*, 2007.
- [9] R.D. Christie, B.F. Wollenberg, and I. Wangensteen. Transmission management in the deregulated environment. *Proceedings of the IEEE*, 88(2):170–195, 2000.
- [10] P.N. Biskas and A.G. Bakirtzis. A decentralized solution to the security constrained dc-opf problem of multi-area power systems. In *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, pages 1–7, 2005.
- [11] Y.Ng. Wai. Generalized generation distribution factors for power system security evaluations. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-100(3):1001–1005, 1981.
- [12] R.D. Zimmerman, C.E. Murillo-Sanchez, and R.J. Thomas. Matpower: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 26(1):12–19, 2011.

- [13] C. Grigg, P. Wong, P. Albrecht, R. Allan, M. Bhavaraju, R. Billinton, Q. Chen, C. Fong, S. Haddad, S. Kuruganty, W. Li, R. Mukerji, D. Patton, N. Rau, D. Reppen, A. Schneider, M. Shahidehpour, and C. Singh. The ieee reliability test system-1996. a report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 14(3):1010–1020, 1999.
- [14] F. Capitanescu, J.L. Martinez Ramos, P. Panciatici, D. Kirschen, A. Marano Marcolini, L. Platbrood, and L. Wehenkel. State-of-the-art, challenges, and future trends in security constrained optimal power flow. *Electric Power Systems Research*, 81(8):1731 – 1741, 2011.
- [15] R. Wiget and G. Andersson. Optimal power flow for combined ac and multi-terminal hvdc grids based on vsc converters. In *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, pages 1–8, 2012.