



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
**«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»**

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – [erminfo@power.ece.ntua.gr](mailto:erminfo@power.ece.ntua.gr)

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ  
ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟ  
ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟ ΤΗΣ ΔΙΑΣΥΝΟΡΙΑΚΗΣ  
ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (ΔΣΜ)  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.»**

## Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Ηλία Σταυρόπουλου

## Επιβλέπων

Αντώνης Παπαβασιλείου, Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή  
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών



## ***ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ***

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κύριο Αντώνη Παπαβασιλείου, για την στήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η εμπειρία και η γνώση του αποτέλεσαν ουσιαστική πηγή έμπνευσης και μάθησης.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς τον κύριο Ευθύμη Καράγγελο για την στήριξη και την καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας. Η ενθάρρυνση, η εμπειρία του και οι παρατηρήσεις του ήταν πολύτιμες και συνέβαλαν ουσιαστικά στην εκπόνηση της.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ιωάννη Καμπούρη για την πολύτιμη βοήθεια του να κατανοήσω καλύτερα τις διαδικασίες που εφαρμόζουν και θα εφαρμόσουν τα Regional Coordination Centers (RCCs), ως Πρόεδρος και Διευθύνων Σύμβουλος του SEleNe CC RCC. Η συνάντησή μαζί του αποτέλεσε μια πολύτιμη εμπειρία που με βοήθησε να κατανοήσω καλύτερα το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ομότιμο καθηγητή, κύριο Κωνσταντίνο Βουρνά, για τις πολύτιμες παρατηρήσεις του, κατά την παρουσίαση των προκαταρκτικών αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, οι οποίες συνέβαλαν στην τελική της μορφή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η αγάπη και η συνεχής ενθάρρυνσή τους ήταν ανεκτίμητη για την ολοκλήρωση της.



# Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1. Αντικείμενο της Εργασίας .....	1
1.2. Δομή της εργασίας.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΗΣ.....	4
2.1. Ιστορική Αναδρομή .....	4
2.2. Εμφάνιση συμφόρησης και επίλυση της .....	6
2.3. Μελλοντική Μέθοδος Επιμερισμού Κόστους όπως δημοσιεύθηκε από τον ACER.....	9
2.3.1. Κατανομή κόστους ανά στοιχείο με συμφόρηση.....	9
2.3.2. Κατανομή κόστους ανά TSO .....	11
2.4. Προσέγγιση της μεθόδου.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΒΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ .....	16
3.1. Επιμερισμός Κόστους Συμφόρησης ανά Στοιχείο με Συμφόρηση.....	16
3.2. Μέθοδοι Αποδόμησης της Ροής .....	20
3.2.1. Μέθοδος Power Flow Coloring (PFC)-ACER.....	20
3.2.2. Μέθοδος Full Line Decomposition (FLD).....	26
3.2.3. Μέθοδος Power Flow Coloring (PFC)-Vlaisavljevic .....	29
3.3. Επιμερισμός Κόστους ανά Ζώνη.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΓΟΡΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ..	33
4.1. Energy Dispatch.....	35
4.2. Εύρεση και Επίλυση της Συμφόρησης .....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ...	42
5.1. Εφαρμογή Energy Dispatch.....	42
5.2. Εύρεση Συμφόρησης και Εφαρμογή Ανακατανομής .....	44
5.3. Επιμερισμός Κόστους Ανακατανομής ανά Στοιχείο με Συμφόρηση.....	49
5.4. Αποδόμηση της Ροής.....	57

5.4.1.	Σύστημα Δύο Ζωνών με την μία ζώνη χωρίς παραγωγή και κατανάλωση .....	57
5.4.2.	Σύστημα Δύο Ζωνών με την μία ζώνη να έχει μόνο κατανάλωση.....	59
5.4.3.	Σύστημα Τριών Ζωνών με την μία ζώνη να έχει μόνο κατανάλωση .....	61
5.4.4.	Σύστημα Τριών Ζωνών .....	65
5.5.	Επιμερισμός Κόστους Συμφόρησης ανά Ζώνη .....	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΓΝΩΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ .....		71
6.1.	IEEE Case 30.....	71
6.2.	IEEE Case 39.....	75
6.3.	IEEE Case 57.....	79
6.4.	IEEE Case 118.....	81
6.5.	IEEE Case 300.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7° ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑ ..		89
7.1.	Αποτελέσματα .....	89
7.2.	Συμπεράσματα.....	92
7.3.	Μελλοντική Συνέχεια .....	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		94
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....		96
Πίνακας PTDF.....		96
Πίνακας PEX,NEX.....		98

# Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2.1. Χάρτης RSCs .....	4
Εικόνα 2.2. CCR Regions της Ευρώπης.....	5
Εικόνα 2.3. Bidding Zones της Ευρώπης .....	5
Εικόνα 2.4 Εμφάνιση Συμφόρησης σε καταστάσεις N-1 στο γερμανικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας .....	6
Εικόνα 2.5. Σύστημα τριών κόμβων κατά την επίλυση της αγοράς και μετά από εμφάνιση συμφόρησης στην γραμμή 1 .....	8
Εικόνα 2.6. Επιμερισμός κόστους Ανακατανομής στα στοιχεία με συμφόρηση XNEC.....	10
Εικόνα 2.7. Εσωτερική Ροή.....	11
Εικόνα 2.8. Ροή Βρόγχος.....	11
Εικόνα 2.9 Ροές Λόγω Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	11
Εικόνα 2.10 Απεικόνιση Κανόνα Προτεραιότητας ACER .....	12
Εικόνα 2.11 Βασικά Βήματα της μεθόδου που θα εφαρμοστεί από τα RCCs.....	13
Εικόνα 2.12. Μέθοδος ACER και η προσέγγιση της.....	15
Εικόνα 3.1. Απεικόνιση Εσωτερικής Ροής .....	23
Εικόνα 3.2. Απεικόνιση Ροής Βρόγχου .....	24
Εικόνα 3.3. Εμπορικές Ροές .....	24
Εικόνα 3.4. Υπέρθεση Ροών.....	25
Εικόνα 3.5. Πίνακας PEX.....	26
Εικόνα 3.6. Συνδυασμός Πίνακα PEX και PTDFnode – to – node .....	28
Εικόνα 3.7. Κανόνας Προτεραιότητας ACER .....	31
Εικόνα 3.8. Απεικόνιση Αποδόμησης της ροής και μηδενισμού θεραπευτικών (relieving) ροών .....	32
Εικόνα 4.1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά Συστήματος .....	36
Εικόνα 4.2. Εμφάνιση Συμφόρησης .....	38
Εικόνα 4.3. Διάγραμμα Ροής μεθόδου Ανακατανομής .....	40
Εικόνα 5.1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά Συστήματος μεταφοράς .....	42
Εικόνα 5.2. Ροές Συστήματος Εικόνας 5.1 στην κατάσταση N .....	44
Εικόνα 5.3. Ροές στην περίπτωση που η γραμμή 12 είναι εκτός λειτουργίας .....	46
Εικόνα 5.4 Παραγωγή Έπειτα από εφαρμογή Ανακατανομής και ροές στην κατάσταση N.....	47
Εικόνα 5.5. Απλοποιημένο Σύστημα για την εξήγηση και επαλήθευση της μεθόδου Επιμερισμού Κόστους Ανακατανομής ανά XNEC.....	54
Εικόνα 5.6. Εμφάνιση Συμφόρησης στις γραμμές 1-2 και 2-3.....	54
Εικόνα 5.7. Σύστημα Δύο Ζωνών με την μία ζώνη χωρίς παραγωγή και κατανάλωση .....	57
Εικόνα 5.8. Παραγωγή και Ροή Φορτίου έπειτα από Εφαρμογή Energy Dispatch για το σύστημα της Εικόνας 5.7 .....	57
Εικόνα 5.9. Σύστημα Δύο Ζωνών με την μία ζώνη να έχει μόνο κατανάλωση .....	59
Εικόνα 5.10. Παραγωγή και Ροή Φορτίου έπειτα από Εφαρμογή Energy Dispatch για το σύστημα της Εικόνας 5.9 .....	59
Εικόνα 5.11. Σύστημα Τριών Ζωνών με την μία ζώνη να έχει μόνο κατανάλωση .....	61
Εικόνα 5.12. Παραγωγή και Ροή Φορτίου έπειτα από Εφαρμογή Energy Dispatch για το σύστημα της Εικόνας 5.11 .....	62
Εικόνα 5.13. Σύστημα Τριών Ζωνών .....	65
Εικόνα 5.14. Παραγωγή και Ροή Φορτίου έπειτα από Εφαρμογή Energy Dispatch για το σύστημα της Εικόνας 5.13 .....	65
Εικόνα 5.15. Μηδενισμός Ανακουφιστικών ροών μετά το αποτέλεσμα της Αποδόμησης της Ροής του Πίνακα 5.30 .....	69
Εικόνα 5.16. Εφαρμογή Κανόνα Προτεραιότητας στην γραμμή 13 του Πίνακα 5.30.....	70
Εικόνα 6.1. Απεικόνιση συστήματος IEEE Case 30.....	71
Εικόνα 6.2. Απεικόνιση των Τεχνητών Ζωνών του Συστήματος IEEE Case 30.....	72
Εικόνα 6.3. Απεικόνιση συστήματος IEEE Case 39.....	75

Εικόνα 6.4. Απεικόνιση των Τεχνητών Ζωνών του Συστήματος IEEE Case 39.....	75
Εικόνα 6.5. Απεικόνιση συστήματος IEEE Case 57 και των τεχνητών ζωνών που δημιουργήθηκαν .....	79
Εικόνα 6.6 Απεικόνιση συστήματος IEEE Case 118.....	81
Εικόνα 6.7. Απεικόνιση συστήματος IEEE Case 300.....	84



## Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 3.1. Ενδεικτικός πίνακας αποτελέσματος της μεθόδου LCBM .....	18
Πίνακας 3.2.. Διαφορετικές περιπτώσεις αντιμετώπισης των $g_i, k$ συναρτήσει του συνολικού κόστους Call .....	18
Πίνακας 4.1 Αποτέλεσμα Energy Dispatch του συστήματος της Εικόνας 4.1.....	36
Πίνακας 5.1. Αποτέλεσμα Energy Dispatch Συστήματος Εικόνας 5.1 .....	43
Πίνακας 5.2. Αποτέλεσμα Energy Dispatch με σεβασμό των Διασυννοριακών γραμμών του Συστήματος της Εικόνας 5.1.....	43
Πίνακας 5.3. Συμφορήσεις που εμφανίζονται στο Σύστημα της Εικόνας 5.1.....	45
Πίνακας 5.4. Ροές στις γραμμές για τις καταστάσεις N-1 μετά από εφαρμογή Ανακατανομής.....	47
Πίνακας 5.5. Όρια Στοιχείων Συστήματος Εικόνας 5.1.....	47
Πίνακας 5.6. Εύρεση Βέλτιστων XRAs μετά την εφαρμογή Ανακατανομής στο Σύστημα της Εικόνας 5.1 .....	48
Πίνακας 5.7. Οι συμφορήσεις που επιλύθηκαν κατά την Ανακατανομή για το Σύστημα της Εικόνας 5.1 .....	49
Πίνακας 5.8. Πίνακας $a_i, k, j$ για το Σύστημα της Εικόνας 5.1 .....	50
Πίνακας 5.9. Υπολογισμένα $g_i, k$ για το Σύστημα της Εικόνας 5.1 .....	51
Πίνακας 5.10. Υπολογισμένα $g_i, k$ για το Σύστημα της Εικόνας 5.1 μετά την εφαρμογή του κανόνα του Πίνακα 3.2 .....	52
Πίνακας 5.11. Υπολογισμένα $g_i, k$ μετά την εφαρμογή του κανόνα του Πίνακα 3.2 για το Σύστημα της Εικόνας 5.1 .....	53
Πίνακας 5.12. Υπολογιστικό Αποτέλεσμα Εφαρμογής της μεθόδου Επιμερισμού Κόστους Ανακατανομής ανά XNEC .....	55
Πίνακας 5.13. Συντελεστές PTDFs του συστήματος της Εικόνας 5.5.....	55
Πίνακας 5.14. Συντελεστές $a_i, k, j$ του συστήματος της Εικόνας 5.5.....	55
Πίνακας 5.15. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.7 .....	58
Πίνακας 5.16. Αποδόμηση της Ροής με χρήση FLD για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.7 .....	58
Πίνακας 5.17. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC-Vlaisavljevic για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.7 .....	59
Πίνακας 5.18. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.9 .....	60
Πίνακας 5.19. Αποδόμηση της Ροής με χρήση FLD για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.9 .....	60
Πίνακας 5.20. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC-Vlaisavljevic για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.9 .....	61
Πίνακας 5.21. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.11.....	62
Πίνακας 5.22. Αποδόμηση της Ροής με χρήση FLD για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.11. ....	63
Πίνακας 5.23. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC-Vlaisavljevic για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.11. ....	63
Πίνακας 5.24. Αποδόμηση των Allocated Flows με χρήση FLD του συστήματος της Εικόνας 5.11 .....	64
Πίνακας 5.25. Αποδόμηση των Allocated Flows με χρήση PFC- Vlaisavljevic του συστήματος της Εικόνας 5.11 .....	64
Πίνακας 5.26. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.13. ....	66
Πίνακας 5.27. Αποδόμηση της Ροής με χρήση FLD για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.13. ....	66
Πίνακας 5.28. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC- Vlaisavljevic για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.13. ....	67
Πίνακας 5.29. Επιλογή στοιχείου με συμφόρηση XNEC της Εικόνας 5.13.....	68
Πίνακας 5.30. Αποδόμηση της ροής με χρήση PFC στο XNEC που επιλέχθηκε στον Πίνακα 5.29.....	68
Πίνακας 5.31. Υπολογιστικό αποτέλεσμα επιμερισμού του κόστους για την επίλυση της συμφόρησης στο XNEC του Πίνακα 5.29.....	68
Πίνακας 6.1. Αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας στο σύστημα IEEE Case 30.....	72
Πίνακας 6.2. Αποτέλεσμα Energy Dispatch για το τροποποιημένο σύστημα IEEE Case 30 .....	73
Πίνακας 6.3. Συμφόρηση που εμφανίζεται στο τροποποιημένο σύστημα IEEE Case 30 .....	73
Πίνακας 6.4. Αποτέλεσμα Ανακατανομής στο τροποποιημένο σύστημα IEEE Case 30 .....	74
Πίνακας 6.5. Αποτέλεσμα Επιμερισμού Κόστους Ανακατανομής στις ζώνες του τροποποιημένου συστήματος IEEE Case 30 ανά μέθοδο Αποδόμησης Ροής.....	74
Πίνακας 6.6. Αποτέλεσμα Energy Dispatch για το σύστημα IEEE Case 39 .....	76
Πίνακας 6.7. Συμφόρηση που εμφανίζεται στο σύστημα IEEE Case 39.....	77

Πίνακας 6.8. Αποτέλεσμα Ανακατανομής στο τροποποιημένο σύστημα IEEE Case 39 .....	78
Πίνακας 6.9. Αποτέλεσμα Επιμερισμού Κόστους Ανακατανομής στις ζώνες του τροποποιημένου συστήματος IEEE Case 39 ανά μέθοδο Αποδόμησης Ροής .....	78
Πίνακας 6.10. Αποτέλεσμα Energy Dispatch για το σύστημα IEEE Case 57.....	79
Πίνακας 6.11. Συμφόρηση που εμφανίζεται στο σύστημα IEEE Case 57.....	80
Πίνακας 6.12. Αποτέλεσμα Ανακατανομής στο τροποποιημένο σύστημα IEEE Case 57 .....	80
Πίνακας 6.13. Αποτέλεσμα Επιμερισμού Κόστους Ανακατανομής στις ζώνες του τροποποιημένου συστήματος IEEE Case 57 ανά μέθοδο Αποδόμησης Ροής.....	80
Πίνακας 6.14. Αποτέλεσμα Energy Dispatch για το σύστημα IEEE Case 118.....	81
Πίνακας 6.15. Συμφόρηση που εμφανίζεται στο σύστημα IEEE Case 118 στην κατάσταση N.....	82
Πίνακας 6.16. Συμφόρηση που εμφανίζεται στο σύστημα IEEE Case 118 στις καταστάσεις N-1.....	82
Πίνακας 6.17 Αποτέλεσμα Ανακατανομής στο σύστημα IEEE Case 118 .....	83
Πίνακας 6.18. Αποτέλεσμα Επιμερισμού Κόστους Ανακατανομής στις ζώνες του τροποποιημένου συστήματος IEEE Case 118 ανά μέθοδο Αποδόμησης Ροής.....	83
Πίνακας 6.19. Διαχωρισμός Κόμβων ανά Ζώνη.....	85
Πίνακας 6.20. Αποτέλεσμα Energy Dispatch για το σύστημα IEEE Case 300.....	85
Πίνακας 6.21. Συμφόρηση που εμφανίζεται στο σύστημα IEEE Case 300 στην κατάσταση N.....	86
Πίνακας 6.22. Συμφόρηση που εμφανίζεται στο σύστημα IEEE Case 300 στις καταστάσεις N-1. ....	87
Πίνακας 6.23. Αποτέλεσμα Ανακατανομής στο σύστημα IEEE Case 300 .....	88
Πίνακας 6.24. Αποτέλεσμα Επιμερισμού Κόστους Ανακατανομής στις ζώνες του τροποποιημένου συστήματος IEEE Case 300 ανά μέθοδο Αποδόμησης Ροής.....	88
Πίνακας 7.1. Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Κατανομής Κόστους για το σύνολο των συστημάτων που μελετήθηκαν συναρτήσει της μεθόδου αποδόμησης της ροής .....	89
Πίνακας 7.2. Υπολογιστικοί χρόνοι Εκτέλεσης των μεθόδων αποδόμησης της ροής ανά σύστημα δοκιμής.....	91

# Πίνακας Ακρωνυμίων

AC: Alternating Current  
ACER: Agency for the Cooperation of Energy Regulators (EU)  
CCR: Capacity Calculation Region  
CGM: Common Grid ModelE  
CROSA: Coordinated Regional Operational Security Assessment  
DAM: Day Ahead Market  
DC: Direct Current  
FBMC: Flow Based Market Coupling  
FLD: Full Line Decomposition  
IDA: Intraday Auction Market  
LCBM: Least Cost Based Mapping  
LP: Linear Programming  
MTU: Market Time Unit  
NTC: Net Transfer Capacity  
OPF: Optimal Power Flow  
PEX: Power EXchange  
PFC: Power Flow Coloring  
PST: Phase Shifter Transformer  
PTDFs: Power Transfer Distribution Factors  
RAO: Remedial action optimisation  
RCCs: Regional Coordination Centers  
RSCs: Regional Security Centers  
TSOs: Transmission System Operators  
XNECs: Cross-border relevant network elements with contingency  
XRAs: Cross-border relevant remedial actions



<b>ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:</b>	<b>«Μέθοδοι Επιμερισμού Κόστους Διορθωτικών Ενεργειών για το συντονισμό της διασυνοριακής Συνεργασίας μεταξύ Διαχειριστών Συστημάτων Μεταφοράς (ΔΣΜ) Ηλεκτρικής Ενέργειας.»</b>
<b>ΦΟΙΤΗΤΗΣ:</b>	<b>Ηλίας Σταυρόπουλος</b>
<b>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:</b>	<b>Αντώνης Παπαβασιλείου, Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών</b>
<b>ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:</b>	<b>2022-2023</b>

## **Σύνοψη**

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει σκοπό την ανάλυση και προσομοίωση της μεθόδου επιμερισμού του κόστους που προκύπτει από τις ενέργειες επίλυσης της συμφόρησης, όταν αυτή παρατηρείται σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας του διασυνδεδεμένου συστήματος της Ευρώπης. Με αφορμή την συνεργασία μεταξύ των TSOs (Transmission System Operators) ο ACER (Agency for the Cooperation of Energy Regulators) εισήγαγε νέες αρμοδιότητες στα RSCs (Regional Security Centers) τα οποία αναβαθμίζονται σε RCCs (Regional Coordination Centers). Σε αυτές τις αρμοδιότητες περιλαμβάνεται ο επιμερισμός του κόστους επίλυσης της συμφόρησης μεταξύ των TSOs που είναι υπεύθυνοι για την δημιουργία αυτής. Στην εργασία γίνεται προσέγγιση όλων των διαδικασιών που εισάγει ο ACER με εφαρμογή και επίλυση κατάλληλων προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού (Linear Programming) και Ροής Φορτίου (Power Flow). Στην συνέχεια γίνεται εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων αποδόμησης της ροής (Line Decomposition Methods) σε διαφορετικά συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την κατανομή του κόστους στους υπεύθυνους, για την εμφάνιση της συμφόρησης, TSOs. Σκοπός είναι η εφαρμογή της νέας αυτής μεθόδου σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η εξαγωγή συμπερασμάτων για τον τρόπο που κατανέμεται το κόστος στους υπεύθυνους, για την δημιουργία της συμφόρησης, TSOs και τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της μεθόδου.

## Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει σκοπό να μελετήσει και να εφαρμόσει το σύνολο της μεθοδολογίας που προτάθηκε από τον ACER (Agency for the Cooperation of Energy Regulators) με σκοπό τον επιμερισμό του κόστους διορθωτικών ενεργειών που δημιουργείται από την επίλυση της συμφόρησης[1], [2]. Στο παρελθόν μέχρι και σήμερα το κόστος επίλυσης της συμφόρησης επωμίζεται ο TSO (Transmission System Operator) που είναι υπεύθυνος για την ζώνη ελέγχου που ανήκει το στοιχείο με συμφόρηση. Με την δημοσίευση της πρόσφατης μεθοδολογίας από τον ACER, το κόστος από την επίλυση της συμφόρησης θα επωμίζονται οι TSOs που είναι υπεύθυνοι για την δημιουργία αυτής, και όχι απαραίτητα ο TSO στην ζώνη ελέγχου του οποίου εμφανίζεται η συμφόρηση. Σκοπός της νέας μεθοδολογίας είναι να περιοριστούν φαινόμενα κατά τα οποία ροές, που η δημιουργία τους οφείλεται στην παραγωγή και κατανάλωση ισχύος στους κόμβους της ζώνης ελέγχου ενός TSO, οδηγούν σε εμφάνιση συμφόρησης σε στοιχεία που ανήκουν σε ζώνη ελέγχου διαφορετικού TSO, ο οποίος δεν ευθύνεται για την ύπαρξη τους. Τέτοια φαινόμενα είναι συχνότερα σε χώρες της κεντρικής Ευρώπης λόγω της ύπαρξης πολλών ζωνών σε ένα αρκετά ανεπτυγμένο και επαρκώς διασυνδεδεμένο σύστημα γραμμών μεταφοράς. Υπεύθυνοι για την εφαρμογή της μεθοδολογίας είναι τα RCCs (Regional Coordination Centers) σε συνεργασία με τους αντίστοιχους TSOs. Αναλυτικότερα η μέθοδος έχει ως αφετηρία τα αποτελέσματα της Ευρωπαϊκής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Τα RCCs γνωρίζοντας τα αποτελέσματα της αγοράς και ένα σύνολο XRAs (Cross-Border Relevant Remedial Actions), τα οποία έχουν συμφωνηθεί με τους αντίστοιχους TSOs, εκτελεί προσομοιώσεις ροής φορτίου με χρήση του CGM (Common Grid Model) με σκοπό να ανιχνεύσει την ύπαρξη συμφόρησης. Στην περίπτωση που ανιχνευθεί συμφόρηση σε στοιχείο, το οποίο εκ των προτέρων έχει συμφωνηθεί από το σύνολο των TSO ως ικανό για εφαρμογή της παρούσας μεθοδολογίας, τα RCCs ακολουθούν κατάλληλες ενέργειες. Αρχικά τα RCCs εφαρμόζουν μία διαδικασία βελτιστοποίησης που έχει σκοπό να επιλύσει την συμφόρηση με χρήση των οικονομικότερων XRAs, τα οποία έχουν κάνει διαθέσιμα οι TSOs. Η διαδικασία αυτή καλείται CROSA (Coordinated Regional Operational Security Assessment) και αποτέλεσμα αυτής είναι το RAO (Remedial Action Optimisation), ένα σύνολο βέλτιστων XRAs που αν εφαρμοστούν θα επιλύσουν την συμφόρηση. Τα αποτελέσματα αυτά αποστέλλονται στους κατάλληλους TSOs και δεν έχουν υποχρεωτικό χαρακτήρα. Η διαδικασία αυτή ενέχει κάποιο κόστος το οποίο στην συνέχεια πρέπει να κατανεμηθεί ανά TSO υπεύθυνο για την δημιουργία της συμφόρησης. Στην παρούσα εργασία τα βήματα, που ήδη περιεγράφηκαν, προσεγγίστηκαν με την εφαρμογή Energy Dispatch για να προκύψουν τα αποτελέσματα της αγοράς και με την εφαρμογή Ανακατανομής (Redispatching) για την επίλυση της συμφόρησης και την εύρεση των βέλτιστων XRAs. Η συνέχεια της μεθοδολογίας εφαρμόστηκε όσο το δυνατόν πιο πιστά στην πραγματική, με παραδοχές όπου κρίθηκε απαραίτητο. Στην συνέχεια τα RCCs πρέπει να διαμοιράσουν το κόστος αυτό ανά στοιχείο με συμφόρηση, ικανό για εφαρμογή της μεθοδολογίας, το οποίο ονομάζεται XNEC (Cross-border relevant network element with contingency). Η διαδικασία αυτή εκτελείται με μία μέθοδο που δημιούργησε ο ACER με την σύμφωνη γνώμη των TSOs και ονομάζεται LCBM (Least Cost Based Mapping). Η μέθοδος αυτή αντιμετωπίζει κάθε συμφόρηση ξεχωριστά και αποδίδει σε κάθε στοιχείο (XNEC) το ελάχιστο δυνατό κόστος για την επίλυση της συμφόρησης που εμφανίζεται σε αυτό. Με βάση το ελάχιστο κόστος διαμοιράζει αναλογικά το συνολικό κόστος επίλυσης της συμφόρησης ανά XNEC. Με την ολοκλήρωση του επιμερισμού κόστους ανά XNEC έπεται η αποδόμηση της ροής στις γραμμές με συμφόρηση. Για την επίτευξη της αποδόμησης της ροής ο ACER προτείνει την PFC[1], [3] (Power Flow Coloring) ως την καταλληλότερη μέθοδο. Στην παρούσα εργασία εκτός της PFC μελετήθηκε η μέθοδος FLD[4] (Full Line Decomposition), καθώς και μία παραλλαγή της κλασικής PFC, την PFC που προτάθηκε από τον Vlaisavljevic[5]. Σκοπός της αποδόμησης της ροής είναι ο κατακερματισμός της ροής που προκαλεί συμφόρηση στις βασικές ροές που προτείνει ο ACER και την εύρεση του TSO που τις δημιουργεί. Μετά το πέρας της αποδόμησης της ροής ακολουθεί η κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή της, όπως περιγράφεται από την μεθοδολογία[1], [2]. Στην παρούσα εργασία γίνεται επεξήγηση και ανάλυση των μεθόδων που διέπουν το σύνολο της μεθοδολογίας, η οποία εφαρμόζεται σε τεχνητά συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας κατάλληλα για την περαιτέρω κατανόηση της λειτουργίας των μεθόδων και στην συνέχεια εφαρμόζεται σε τεχνητά συστήματα μεταφοράς, ευρέως γνωστά στην βιβλιογραφία. Τελικά εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για το σύνολο της μεθοδολογίας και τους παράγοντες που την επηρεάζουν.



## Abstract

The present master's thesis aims to study and implement the entire methodology proposed by ACER (Agency for the Cooperation of Energy Regulators), with the purpose of distributing the cost of corrective actions resulting from congestion resolution [1], [2]. In the past, up to the present day, the cost of congestion resolution has been borne by the TSO (Transmission System Operator) responsible for the control area to which the congested element belongs. With the recent methodology published by ACER, the cost of congestion resolution will be borne by the TSOs responsible for its creation. The goal of the new methodology is to eliminate situations in which flows lead to costs for a TSO that is not responsible for their existence. Such phenomena are more common in Central European countries due to the presence of multiple zones in a well-developed and interconnected transmission grid system. The RCCs (Regional Coordination Centers), in collaboration with the respective TSOs, are responsible for implementing this methodology. More specifically, the methodology is based on the results of the European Electricity Market. The RCCs, knowing the market results and a set of XRAs (Cross-Border Relevant Remedial Actions) agreed upon by the respective TSOs, perform power flow simulations using the CGM (Common Grid Model) to detect congestion. In case congestion is detected in an element that has been pre-approved by all TSOs for applying this methodology, the RCCs take appropriate actions. Initially, the RCCs apply an optimization process called CROSA (Coordinated Regional Operational Security Assessment) aimed at resolving congestion using the most cost-effective XRAs made available by the TSOs. The result of this process is the RAO (Remedial Action Optimisation), a set of optimal XRAs, when applied, will resolve congestion. These results are then shared to the relevant TSOs and their application are not mandatory. This process involves a cost that must be subsequently allocated to the TSO responsible for creating the congestion. In this thesis, the steps described above are approached through the application of Energy Dispatch to obtain market results and through the application of Redispatching for congestion resolution and optimal XRA determination. The continuation of the methodology is applied as faithfully as possible to the actual system with assumptions where are necessary. Subsequently, the RCCs must distribute this cost on a per-congested-element basis using a method developed by ACER, called LCBM (Least Cost Based Mapping). This method addresses each congestion separately and allocates the minimum possible cost for resolving congestion in each element. Based on the minimum cost, the total cost is proportionally distributed among the XNECs (Cross-border relevant network elements with contingency). After the cost allocation per XNEC, the decomposition of the flows in the congested lines follows. To achieve flow decomposition, ACER recommends the use of PFC [1], [3] (Power Flow Coloring) as the most suitable method. In this thesis, in addition to PFC, the FLD [4] (Flow Line Decomposition) method, is studied, as well as a variation of the classic PFC method proposed by Vlaisavljevic [5]. The purpose of flow decomposition is to break down the flows causing congestion into their components and identify who creates congestion. The purpose of decomposing the flow is to fragment the flow, that causes congestion, in the main flows proposed by ACER and to identify the TSO responsible for them. After completing the decomposition of the flow, appropriate processing of the results obtained from its application follows, as described in the methodology [1], [2]. This work provides an explanation and analysis of the methods governing the entire methodology, which is applied to artificial electricity transmission systems suitable for a deeper understanding of the methods' operation. It is subsequently applied to artificial transmission systems widely known in the literature. Ultimately, valuable conclusions are drawn regarding the entire methodology and the factors that influence it.







# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το αντικείμενο και τα περιεχόμενα της παρούσας εργασίας.

### 1.1. Αντικείμενο της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετήσει την μέθοδο επιμερισμού κόστους διορθωτικών ενεργειών που δημιουργείται με την επίλυση της συμφόρησης που εμφανίζεται στα διασυνδεδεμένα συστήματα μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Η μελέτη αυτή γίνεται στα πλαίσια της πρόσφατης απόφασης του Ευρωπαϊκού Οργανισμού για την συνεργασία μεταξύ των Ρυθμιστικών Αρχών Ενέργειας (ACER) η οποία δημοσιεύθηκε τον Νοέμβριο του 2020[1], [2]. Η απόφαση αυτή αφορά τα προσφάτως αναβαθμισμένα Περιφερειακά Κέντρα Συντονισμού (Regional Coordination Centers – RCCs) και τους Διαχειριστές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Transmission System Operators TSOs) που σχετίζονται με τις Περιοχές Υπολογισμού Ικανότητας Μεταφοράς (Capacity Calculation Region – CCR) CORE και SEE. Η απόφαση ορίζει την μεθοδολογία επιμερισμού του κόστους διορθωτικών ενεργειών μεταξύ των TSOs των προαναφερθέντων CCR και η οποία πρέπει να εφαρμοστεί μέχρι το τέλος του 2024[6]. Στόχος της μεθόδου είναι ο επιμερισμός του κόστους που προκύπτει λόγω συμφόρησης στους TSOs οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την δημιουργία της. Η συμφόρηση είναι η κατάσταση στην οποία ένα στοιχείο του συστήματος μεταφοράς ξεπερνά την μέγιστη ικανότητα μεταφοράς ισχύος που μπορεί να μεταφέρει με ασφάλεια[7]. Η δημιουργία της συμφόρησης οφείλεται σε συνδυασμό παραγόντων που είναι αδύνατο να προβλεφθούν εκ των προτέρων. Βασική αιτία είναι η ίδια η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας η οποία, αν και λαμβάνει υπόψιν τα όρια των στοιχείων του συστήματος μεταφοράς, με χρήση μεθόδων υπολογισμού ικανότητας μεταφοράς των στοιχείων (FBMC, NTC) σε κατάσταση συστήματος χωρίς απροσδόκητη<sup>1</sup> αστοχία (κατάσταση-N) και με απροσδόκητη αστοχία (κατάσταση N-1)[8], δεν μπορεί πάντα να αποτραπεί η εμφάνιση συμφόρησης. Αυτό συμβαίνει λόγω της φύσης των μεθόδων υπολογισμού μεταφοράς, οι οποίες αποτελούν προσεγγίσεις της πραγματικής λειτουργίας του συστήματος, καθώς και απρόβλεπτων γεγονότων που λαμβάνουν χώρα κοντά στην ώρα φυσικής παράδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως σημαντική μεταβολή στην παραγωγή και ζήτηση στους κόμβους του συστήματος. Μέχρι σήμερα η επίλυση της συμφόρησης πραγματοποιούνταν από τους TSOs μεμονωμένα. Συγκεκριμένα στην περίπτωση που ένας TSO εντοπίσει συμφόρηση στην ζώνη ελέγχου του, εκκινεί μία αλληλουχία, κοστοβόρων και μη, ενεργειών με σκοπό την επίλυση της [7], [9]. Το κόστος που προκύπτει από την εφαρμογή των ενεργειών αυτών επωμίζεται η ζώνη που ανήκει το στοιχείο. Πλέον η επίλυση της συμφόρησης θα πραγματοποιείται από τα RSCs (Regional Security Coordinators) τα οποία αναβαθμίστηκαν από τον ACER σε RCCs (Regional Coordination Centres) με πληθώρα νέων καθηκόντων όπως και την εφαρμογή της προαναφερθείσας μεθοδολογίας[1], [2]. Τα RCCs θα αναγνωρίζουν τις κατάλληλες ενέργειες για την επίλυση της

---

<sup>1</sup> Κατάσταση απροσδόκητης αστοχίας είναι η κατάσταση που ένα ή περισσότερα στοιχεία, του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, βρίσκονται εκτός λειτουργίας.

συμφόρησης σε διασυνοριακό επίπεδο. Στην συνέχεια θα ενημερώνουν τους αντίστοιχους TSOs για τις ενέργειες που προτείνεται να εκτελέσουν. Το συνολικό κόστος που προκύπτει από αυτή την διαδικασία, διαμοιράζεται στους TSOs οι οποίοι θεωρούνται υπεύθυνοι για την δημιουργία της συμφόρησης, και όχι απαραίτητα στον TSO στην ζώνη ελέγχου του οποίου ανήκει το στοιχείο με συμφόρηση, όπως γίνεται μέχρι σήμερα. Σημαντικό βήμα της μεθόδου που θέτει προς εφαρμογή ο ACER αποτελεί η αποδόμηση των ροών, στις γραμμές με συμφόρηση, ως άθροισμα πρωτογενών ροών που η δημιουργία τους αποδίδεται στις ζώνες ελέγχου των TSOs. Στην παρούσα εργασία εφαρμόζονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι αποδόμησης ροής και μελετάτε ο τρόπος που επηρεάζουν την τελική κατανομή τους κόστους στους υπεύθυνους TSOs. Για να γίνει αυτό εφαρμόστηκε το σύνολο της μεθόδου με απαραίτητες παραδοχές και δημιουργία δεδομένων εισόδου, όπου κρίθηκε απαραίτητο.

## **1.2. Δομή της εργασίας**

Η εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια τα οποία περιγράφονται εν συντομία παρακάτω:

### **1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο**

Στο 1<sup>ο</sup> και παρόν Κεφάλαιο περιέχεται μία σύντομη περιγραφή του αντικειμένου της παρούσας εργασίας καθώς και του περιεχομένου των κεφαλαίων της.

### **2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο**

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μία ιστορική αναδρομή για τον τρόπο με τον οποίο ο ACER κατέληξε στην δημοσίευση της μεθοδολογίας που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία[1], [2]. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι λόγοι για τους οποίους δημιουργείται η συμφόρηση, τους τρόπους με τους οποίους αντιμετωπίζεται η συμφόρηση σήμερα αλλά και πως θα αντιμετωπίζεται στο μέλλον. Τέλος παρουσιάζονται συνοπτικά τα βήματα της μεθοδολογίας του ACER καθώς και χρήσιμες έννοιες και ορολογίες που την διέπουν.

### **3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο**

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μία αναλυτική περιγραφή των βασικών μεθόδων για την κατανομή του κόστους επίλυσης της συμφόρησης στους υπεύθυνους TSOs.

### **4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο**

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των μεθόδων και των προσεγγίσεων που ακολουθήθηκαν με σκοπό να προσομοιωθούν τα κατάλληλα δεδομένα εισόδου για την μελέτη της μεθόδου επιμερισμού του κόστους διορθωτικών ενεργειών στους υπεύθυνους, για την δημιουργία της συμφόρησης, TSOs.

## **5° Κεφάλαιο**

Στο 5° Κεφάλαιο γίνεται περιγραφή και ανάλυση των διαφορετικών μεθόδων που μελετήθηκαν σε μικρά συστήματα μεταφοράς με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων και την επεξήγηση των μεθόδων.

## **6° Κεφάλαιο**

Στο 6° Κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή του συνόλου της μεθοδολογίας σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της βιβλιογραφίας, που προσομοιάζουν πραγματικά συστήματα μεταφοράς.

## **7° Κεφάλαιο**

Στο 7° Κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα επιμερισμού του κόστους διορθωτικών ενεργειών και ο τρόπος που επηρεάζονται αυτά από την χρήση διαφορετικών μεθόδων αποδόμησης της ροής και αποφάσεων του ACER κατά την δημιουργία της μεθοδολογίας.

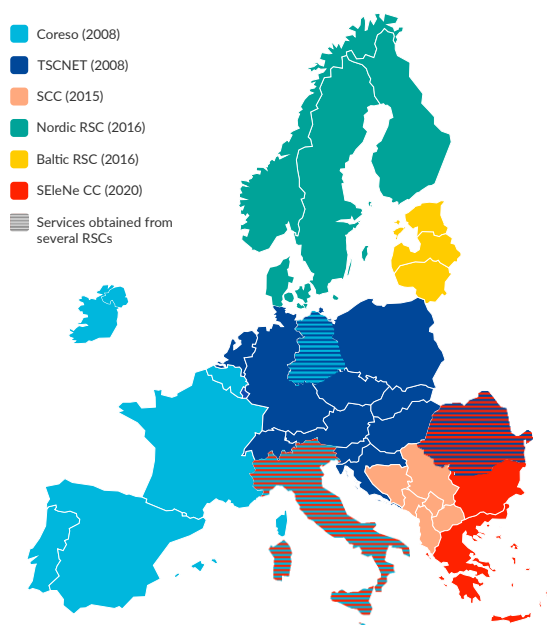
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιασθεί μία σύντομη ιστορική αναδρομή με τα σημαντικότερα γεγονότα που οδήγησαν στην μεθοδολογία που πραγματεύεται η εργασία[1], [2]. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι λόγοι για τους οποίους δημιουργείται η συμφόρηση και θα αναφερθούν οι τρόποι με τους οποίους αντιμετωπίζεται η συμφόρηση σήμερα καθώς και πως θα αντιμετωπίζεται στο μέλλον. Τέλος παρουσιάζονται συνοπτικά τα βήματα της μεθοδολογίας του ACER[1] καθώς και χρήσιμες έννοιες και ορολογίες που την διέπουν.

#### 2.1. Ιστορική Αναδρομή

Το πρώτο σημαντικό γεγονός που αξίζει να αναφερθεί είναι η απόφαση του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου να εισάγει το 3<sup>ο</sup> Ενεργειακό Πακέτο (3<sup>th</sup> Clean Energy Package) η οποία εγκρίθηκε το 2009. Σκοπός ήταν η περαιτέρω απελευθέρωση των εσωτερικών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και περιλάμβανε διάφορα μέτρα για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και την ενίσχυση της ασφάλειάς του. Με στόχο την ασφάλεια και την συνεργασία μεταξύ των TSO ιδρύονται τα Regional Security Centers (RSCs)[10]. Πρόκειται για οργανισμούς που παρέχουν υπηρεσίες στους TSOs, στους οποίους ανήκουν, με σκοπό την ασφαλή και αποδοτική λειτουργία των διασυνδεδεμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.



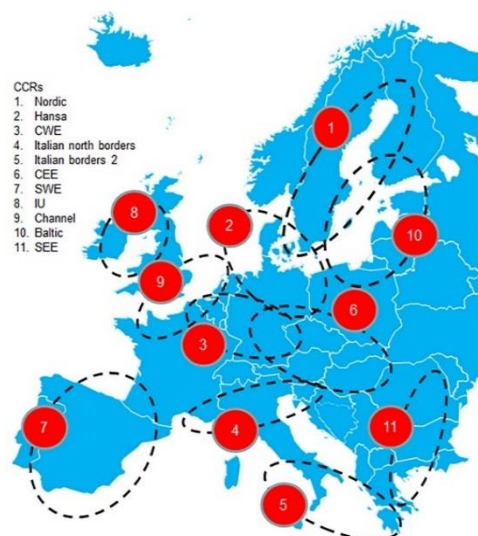
Εικόνα 2.1. Χάρτης RSCs

Αργότερα γίνεται η εισαγωγή του 4<sup>ου</sup> Ενεργειακού Πακέτου (4th Clean Energy Package) η οποία εγκρίθηκε το 2019 από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. Σύμφωνα με αυτό θα πρέπει μέχρι το 2022 να έχουν ορισθεί επακριβώς τα όρια των Ζωνών Προσφορών (Bidding Zones) , οι περιοχές

υπολογισμού δυναμικότητας (Capacity Calculation Regions) και οι περιοχές δικαιοδοσίας των TSOs[11].



Εικόνα 2.3. Bidding Zones της Ευρώπης



Εικόνα 2.2. CCR Regions της Ευρώπης

Τα RSCs αναβαθμίζονται σε Regional Coordination Centers (RCCs) με αυξημένες αρμοδιότητες[11]. Τέτοιες είναι:

- **Δημιουργία Κοινού Μοντέλου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (CGM)**

Τα RCCs, σε συνεργασία με τους υπεύθυνους TSOs, πρέπει να δημιουργήσουν ένα κοινό μοντέλο του Ηλεκτρικού Συστήματος Μεταφοράς (CGM). Το CGM είναι το αποτέλεσμα της ενοποίησης μικρότερων μοντέλων συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που έχουν δημιουργηθεί μεμονωμένα από τους TSOs, για την δημιουργία ενός μεγαλύτερου μοντέλου του συστήματος μεταφοράς. Το CGM θα χρησιμοποιηθεί από το RCC με σκοπό την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του διασυνοριακού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, με τρόπο ασφαλή και αποδοτικό.

- **Συντονισμένος Υπολογισμός Χωρητικότητας Διασυνοριακών Γραμμών**

Τα RCCs πραγματοποιούν ελέγχους με σκοπό τον υπολογισμό της δυναμικότητας των διασυνοριακών γραμμών, που ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο CCR. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται με σκοπό τον βέλτιστο υπολογισμό της ικανότητας μεταφοράς των διασυνοριακών γραμμών, τόσο σε μακροχρόνιο επίπεδο όσο και σε βραχυπρόθεσμο (Intraday).

- **Συντονισμένη Ανάλυση Ασφαλείας**

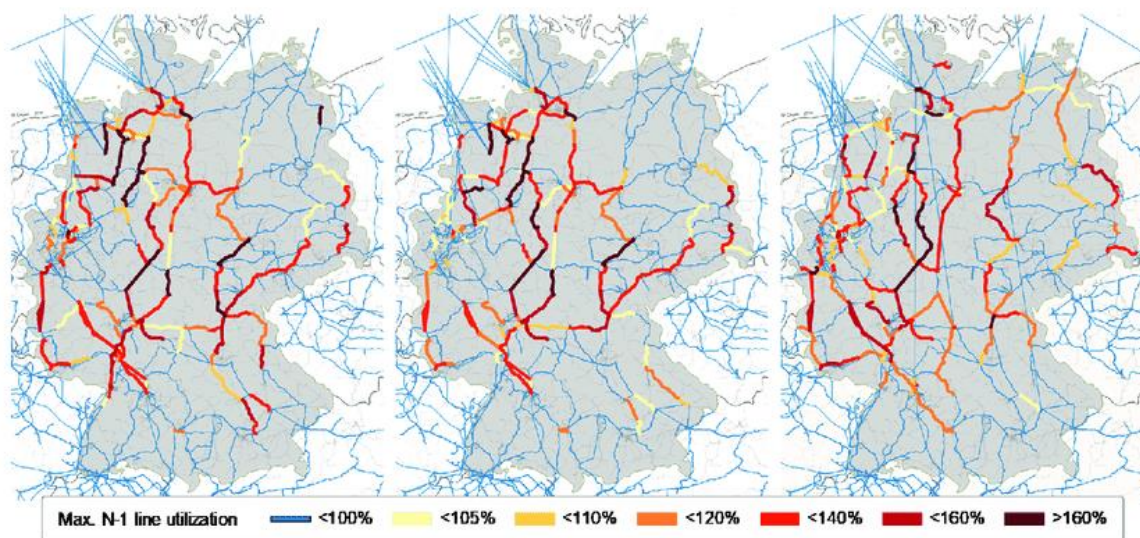
Τα RCCs πραγματοποιούν ελέγχους ασφαλείας με σκοπό να διασφαλίσουν επιτρεπτές συνθήκες λειτουργίας του διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, για το οποίο είναι υπεύθυνα. Τέτοιοι έλεγχοι γίνονται σε μακροπρόθεσμο επίπεδο για την ανάπτυξη και συντήρηση του συστήματος αλλά και σε πραγματικό χρόνο για την επίλυση καταστάσεων που οδηγούν σε υπερφόρτωση.

Στην συντονισμένη ανάλυση ασφάλειας υπόκειται και το θέμα της παρούσας εργασίας, δηλαδή την μεθοδολογία επιμερισμού κόστους επίλυσης της συμφόρησης μεταξύ των TSOs που υπόκεινται στο αντίστοιχο CCR.

Την ίδια στιγμή με σκοπό να εφαρμοστούν οι στόχοι του 4<sup>ου</sup> Ενεργειακού Πακέτου ο ACER κάλεσε τους TSOs που ανήκουν στο ίδιο CCR να συμφωνήσουν σε μία κοινώς αποδεκτή μέθοδο με σκοπό την επίλυση της συμφόρησης, όταν αυτή εμφανίζεται, και για τον επιμερισμό του κόστους που προκύπτει από την επίλυση της στους υπεύθυνους, για την δημιουργία της, TSOs. Στόχος ήταν η έναρξη των διαδικασιών με σκοπό να συμφωνηθεί μία κοινώς αποδεκτή μεθοδολογία, η εφαρμογή της οποίας θα πραγματοποιείται από τα αρμόδια RCCs. Σήμερα έχουν ήδη προκύψει οι μεθοδολογίες για όλα τα CCRs και ήδη εφαρμόζονται σε μεγάλο βαθμό από τα αρμόδια RCCs[6]. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι TSOs κατέληξαν σε συμφωνία, εκτός από τις περιπτώσεις των TSOs του CORE και του SEE. Και στα δύο CCRs οι TSOs δεν κατέληξαν σε συμφωνία με αποτέλεσμα ο ACER να επιβάλλει την ίδια μεθοδολογία τον Νοέμβριο του 2020[1], [2]. Τέλος, μέχρι το 2024 θα πρέπει να έχουν εναρμονιστεί όλοι οι TSOs και τα RCCs με την μεθοδολογία του αντίστοιχου CCR[6].

## 2.2. Εμφάνιση συμφόρησης και επίλυση της

Η συμφόρηση είναι η κατάσταση κατά την οποία ένα ή περισσότερα στοιχεία του συστήματος υπερβαίνουν την ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που ορίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, με αποτέλεσμα να κινδυνεύουν με καταστροφή. Στα σύγχρονα συστήματα μεταφοράς η εμφάνιση συμφόρησης δεν πρέπει να οδηγεί στην αδυναμία κάλυψης της ζήτησης.



Εικόνα 2.4 Εμφάνιση Συμφόρησης σε καταστάσεις N-1 στο γερμανικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Η δημιουργία της συμφόρησης οφείλεται σε πληθώρα παραγόντων. Η αρχή του μηχανισμού δημιουργίας της συμφόρησης έγκειται στον τρόπο λειτουργίας της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στην σημερινή ευρωπαϊκή αγορά ηλεκτρικής ενέργειας η κατανομή της παραγωγής στους κόμβους του συστήματος της Ευρώπης γίνεται μέσω της επίλυσης της Αγοράς Επόμενης Μέρας



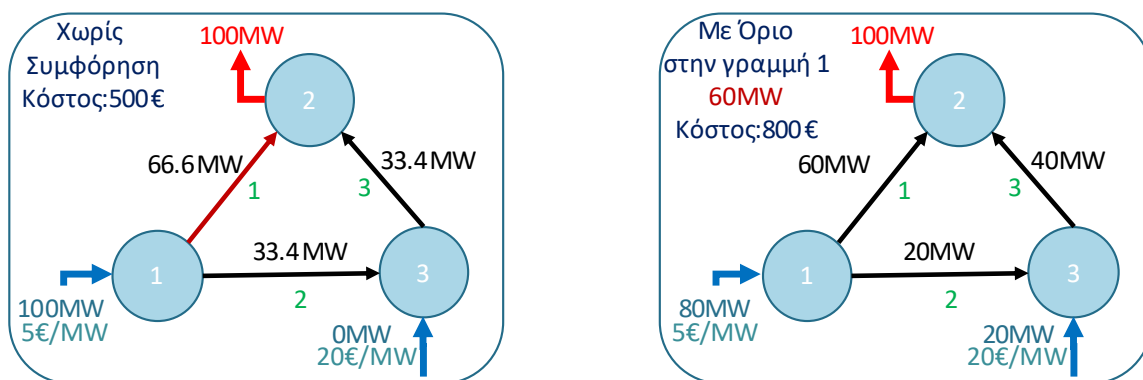
(Day-Ahead Market) και των Ενδοημερήσιων Αγορών Ηλεκτρικής Ενέργειας (IntraDay Auctions). Η επίλυση της αγοράς έχει στόχο την βέλτιστη εκμετάλλευση των διασυνοριακών γραμμών μεταξύ των κρατών της Ευρώπης. Σκοπός είναι η μεταφορά φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας από περιοχές με φθηνή παραγωγή σε περιοχές με ακριβότερη παραγωγή. Για την βελτιστοποίηση αυτή χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης[12] (EUPHEMIA) ο οποίος λαμβάνει υπόψιν του την ικανότητα μεταφοράς των διασυνοριακών στοιχείων. Ο υπολογισμός της ικανότητας μεταφοράς γίνεται από τους υπεύθυνους TSOs με χρήση διαφορετικών μεθόδων ανάλογα με το CCR που ανήκουν (FBMC , NTC)[13]. Η φύση των ίδιων των μεθόδων υπολογισμού ικανότητας μεταφοράς, που βασίζονται σε προσεγγίσεις της πραγματικής λειτουργίας του δικτύου, και η αβεβαιότητα που εισάγεται από τις προβλέψεις φορτίου και παραγωγής ΑΠΕ, μπορούν να οδηγήσουν στην εμφάνιση συμφόρησης στην κατάσταση N ή/και στην κατάσταση N-1[8].

Αρμόδιοι για την επίλυση της συμφόρησης είναι οι TSOs στη ζώνη ελέγχου των οποίων ανήκει η γραμμή στην οποία εμφανίζεται η συμφόρηση. Οι TSOs επιλύουν αρκετά συχνά προβλήματα ροής φορτίου με τα πιο επικαιροποιημένα δεδομένα παραγωγής, ζήτησης και κατάστασης γραμμών. Στην περίπτωση που εντοπίσουν συμφόρηση ακολουθούν τις εξής διαδικασίες, με στόχο την επίλυση της:

### **1. Ανακατανομή (Redispatching)**

Είναι η διαδικασία κατά την οποία ο TSO ή το RCC ανακατανομεί την ποσότητα παραγωγής ανά μονάδα παραγωγής, μετά το πέρας της αγοράς, με σκοπό να επιλύσει την συμφόρηση [9], [14]. Ένα απλό παράδειγμα της παραπάνω διαδικασίας φαίνεται στην Εικόνα 2.5.

Παρατηρείται ότι κατά την επίλυση της αγοράς το κόστος για την κάλυψη του φορτίου 100MW είναι 500€ . Αν όμως η γραμμή 1 έχει δυνατότητα μεταφοράς 60MW, ο TSO προβαίνει σε Ανακατανομή με σκοπό να λύσει την συμφόρηση των 6.6 MW της γραμμής 1. Το αποτέλεσμα είναι να δίνεται εντολή στην μονάδα του κόμβου 3 να παράξει 20MW, με το κόστος για την κάλυψη του φορτίου να ανέρχεται πλέον στα 800€. Σε αυτό το απλουστευμένο παράδειγμα το κόστος Ανακατανομής είναι 300€. Οι TSOs μπορούν να προβούν και σε μη κοστοβόρες ενέργειες, όπως χρήση PST (Phase Shift Transformer), όταν αυτοί υπάρχουν εγκατεστημένοι στο σύστημα.



Εικόνα 2.5. Σύστημα τριών κόμβων κατά την επίλυση της αγοράς και μετά από εμφάνιση συμφόρησης στην γραμμή 1

## 2. Αντίθετη Διασυννοριακή Συναλλαγή (Countertrading)

Είναι η έκτακτη ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ δύο TSOs, όταν ένας εκ των δύο αντιμετωπίζει προβλήματα συμφόρησης[14]. Σε αυτή την κατάσταση ο TSO προτιμά να μεταφέρει φθηνή ενέργεια σε γειτονικό TSO παρά να προβεί σε κοστοβόρα Ανακατανομή. Ο όρος αντίθετη έγκειται στο γεγονός ότι αντιτίθεται στα προγράμματα ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ των TSOs, που έχουν προκύψει από τα αποτελέσματα της Ευρωπαϊκής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, διότι πρέπει να επιτευχθεί έκτακτη αποσυμφόρηση.

Η διαδικασία επίλυσης της συμφόρησης δεν οδηγεί απαραίτητα σε δημιουργία κόστους. Υπάρχουν μη κοστοβόρες μέθοδοι επίλυσης της συμφόρησης που μπορούν να χρησιμοποιήσουν οι TSOs, όπως με χρήση PST[15]. Με το πέρας της συμφόρησης συνήθως δημιουργείται ένα κόστος το οποίο μέχρι σήμερα επιβαρύνει τον TSO, στην δικαιοδοσία του οποίου ανήκει το στοιχείο με συμφόρηση. Μελλοντικός στόχος είναι το κόστος αυτό να επωμίζονται οι TSOs οι οποίοι συντελούν στην δημιουργία της συμφόρησης, ανεξάρτητα από την ζώνη ελέγχου που βρίσκεται το στοιχείο με την υπερφόρτωση. Η εύρεση της συνεισφοράς κάθε TSO, στη δημιουργία της συμφόρησης, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το κεντρικό θέμα της παρούσας εργασίας που είναι να μελετήσει την μέθοδο κατανομής του κόστους ανά ζώνη και υπεύθυνο TSO.

## 2.3. Μελλοντική Μέθοδος Επιμερισμού Κόστους όπως δημοσιεύθηκε από τον ACER[1], [2]

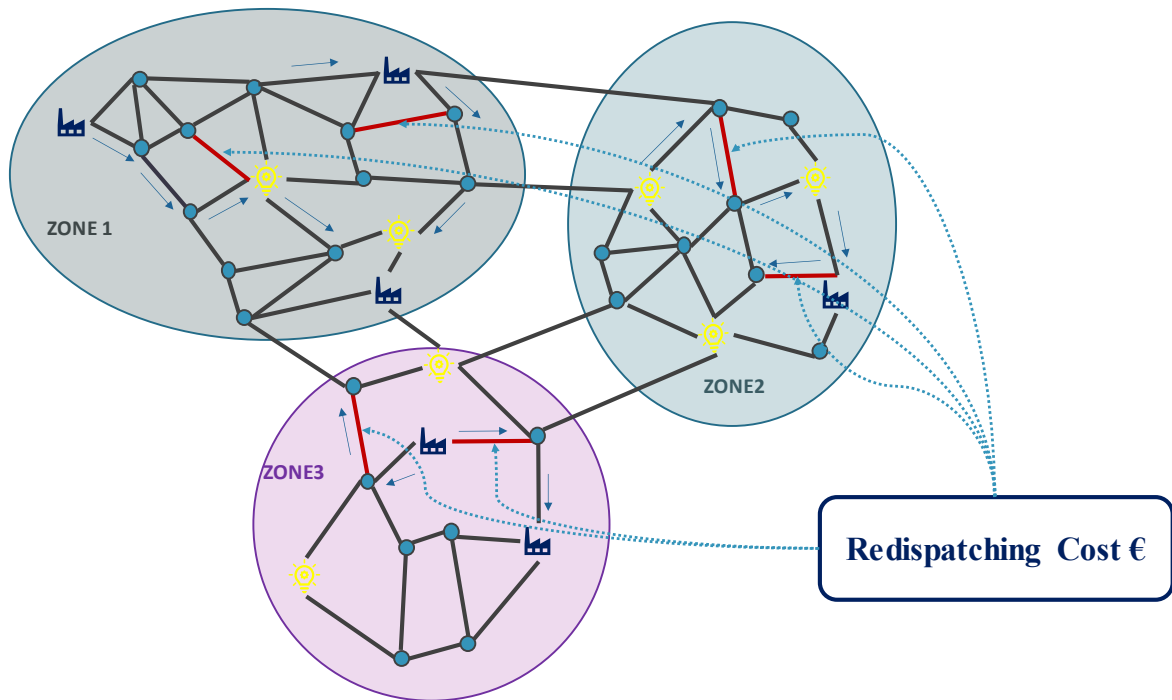
Τα προηγούμενα χρόνια μέχρι και σήμερα υπεύθυνοι για την επίλυση της συμφόρησης ήταν οι TSOs στην περιοχή των οποίων εμφανιζόταν αυτή. Πλέον μετά και την δημοσίευση της μεθοδολογίας από τον ACER, τον Νοέμβριο του 2020, η επίλυση της συμφόρησης θα γίνεται από τα RCCs[1], [2]. Η μέθοδος πρέπει να εφαρμοστεί από το σύνολο των RCCs και TSOs που σχετίζονται με τα CCRs CORE και SEE μέχρι το τέλος του 2024[6]. Η μεθοδολογία θα εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση που η συμφόρηση εμφανίζεται σε στοιχεία του διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς, που εκ των προτέρων έχουν συμφωνηθεί από το σύνολο των TSOs του CCR, ικανά για την εφαρμογή της. Τα RCCs θα εκτελούν την μεθοδολογία και θα συμβουλεύουν τους TSOs για τις ενέργειες που πρέπει να εκτελέσουν με σκοπό την επίλυση της συμφόρησης. Στην συνέχεια θα εκτελούν τις απαραίτητες διαδικασίες με σκοπό να διαμοιράσουν το κόστος που δημιουργήθηκε στους υπεύθυνους TSOs. Οι διαδικασίες που πρέπει να εφαρμόζονται από τα RCCs σύμφωνα με την μεθοδολογία είναι συνοπτικά οι εξής[2]:

Αρχικά το αρμόδιο RCC εφαρμόζει μία διαδικασία που ονομάζεται CROSA (Coordinated Regional Operational Security Assessment) με σκοπό την επίτευξη της ασφάλειας στο σύστημα και η οποία περιέχει όλες τις κατάλληλες ενέργειες με σκοπό την αποσυμφόρηση. Πιο συγκεκριμένα με χρήση του CGM, και γνωρίζοντας την παραγωγή και κατανάλωση στους κόμβους του δικτύου, μπορεί με εφαρμογή ροής φορτίου να εντοπίσει τα στοιχεία στα οποία εμφανίζεται συμφόρηση σε κατάσταση N ή σε κατάσταση απροσδόκητης αστοχίας (contingency), N-1. Τα στοιχεία αυτά που εντοπίζεται συμφόρηση και τα οποία είναι εκ των προτέρων συμφωνημένα από τους TSOs του CCR ικανά για εφαρμογή επιμερισμού κόστους, ονομάζονται XNECs. Στην συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και με συμφωνία όλων των TSOs, το RCC πρέπει να εφαρμόσει κατάλληλες ενέργειες με σκοπό να επαναφέρει το σύστημα σε ασφαλή επίπεδα λειτουργίας. Τέτοιες ενέργειες μπορεί να είναι ενέργειες Ανακατανομής (Redispatching), Αντίθετες Διασυνοριακές Συναλλαγές (Countertrading) ή και μη κοστοβόρες ενέργειες, όπως η χρήση Μετασχηματιστών Αλλαγής Φάσης (PST). Όλες αυτές οι ενέργειες ονομάζονται XRAs και ο κατάλληλος συνδυασμός τους οδηγεί στην επίλυση της συμφόρησης. Η επιλογή του συνδυασμού των XRAs που τελικά θα εφαρμοστούν γίνεται με κριτήριο το ελάχιστο κόστος για την επίλυση της συμφόρησης. Το σύνολο των βέλτιστων XRAs που τελικά θα εφαρμοστούν ονομάζεται RAO (Remedial Action Optimisation). Με αυτό τον τρόπο το RCC εντοπίζει τα στοιχεία με συμφόρηση και με κατάλληλη βελτιστοποίηση επιλύει την συμφόρηση για να επαναφέρει το σύστημα σε ομαλή λειτουργία. Με το πέρας του CROSA έχει δημιουργηθεί ένα κόστος επίλυσης το οποίο πρέπει να επωμιστούν οι TSOs που ήταν υπεύθυνοι για την υπερφόρτωση.

### 2.3.1. Κατανομή κόστους ανά στοιχείο με συμφόρηση

Το κόστος που προκύπτει, από την εκτέλεση του CROSA και την εφαρμογή των XRAs που εμπεριέχονται στο RAO, πρέπει στην συνέχεια να χωριστεί ανά XNEC. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν είναι ξεκάθαρο ποιο XRA συνέβαλε στην επίλυση της κάθε συμφόρησης αλλά ούτε και το πόσο

καθοριστικό ήταν για την επίλυση αυτής. Για να συμβεί αυτό, το RCC συλλέγει τα δεδομένα πριν την εφαρμογή του CROSA αλλά και μετά από αυτή και με μία κατάλληλη βελτιστοποίηση αποδίδει το κόστος, που προέκυψε από το σύνολο των XRAs, ανά ΧΝΕC. Η βελτιστοποίηση αυτή γίνεται ξεχωριστά για κάθε ΧΝΕC και έχει σκοπό την απόδοση του ελάχιστου δυνατού κόστους ανά ΧΝΕC με σκοπό την επίλυση της συμμόρφησης σε αυτό. Η μέθοδος περιγράφεται αναλυτικά στο 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ.



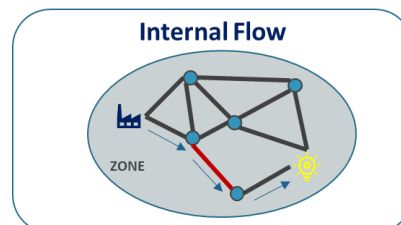
Εικόνα 2.6. Επιμερισμός κόστους Ανακατανομής στα στοιχεία με συμμόρφηση ΧΝΕC

### 2.3.2. Κατανομή κόστους ανά TSO

Το τελικό βήμα είναι η απόδοση του κόστους ανά ΧΝΕC στους TSOs οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την δημιουργία της συμφόρησης. Για να γίνει αυτό ο ACER προτείνει την αποδόμηση της ροής φορτίου των στοιχείων με συμφόρηση σε τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες[1], [2]:

- **Internal Flow**

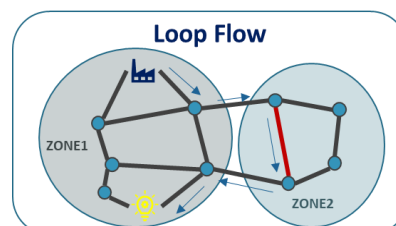
Είναι ροή που εμφανίζεται σε γραμμές εντός μίας ζώνης (μη διασυνοριακές) με την παραγωγή και την κατανάλωση να βρίσκονται στην ίδια ζώνη.



Εικόνα 2.7. Εσωτερική Ροή

- **Loop Flow**

Είναι ροή που εμφανίζεται σε γραμμές με την παραγωγή και την κατανάλωση να βρίσκονται στην ίδια ζώνη, αλλά διαφορετική αυτής του στοιχείου.

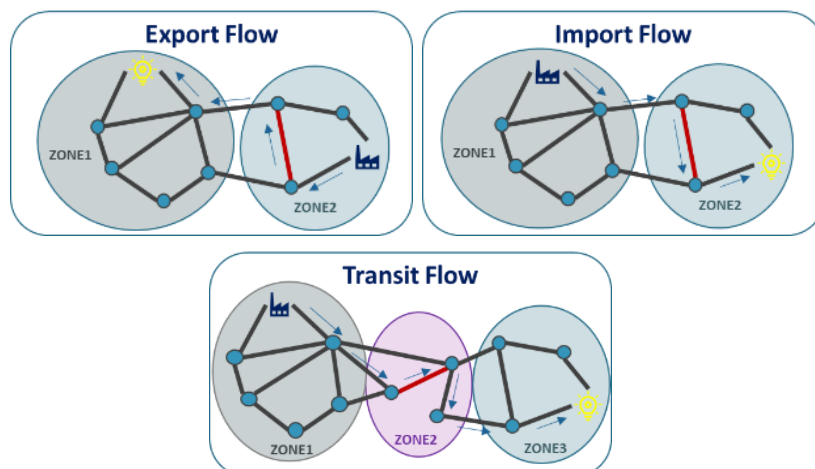


Εικόνα 2.8. Ροή Βρόγχος

- **Allocated Flow**

Είναι ροή που εμφανίζεται σε γραμμές που η ζώνη της παραγωγής είναι διαφορετική αυτής της κατανάλωσης. Τέτοιες ροές είναι:

- Import Flow
- Export Flow
- Transit Flow



Εικόνα 2.9 Ροές Λόγω Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

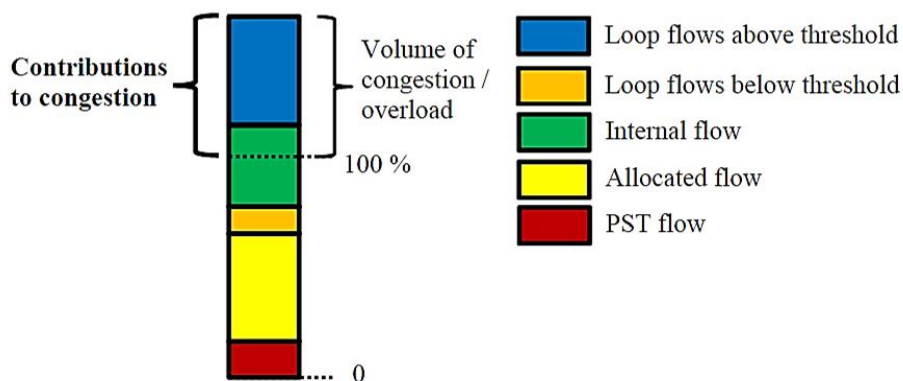
- **PST Flow**<sup>2</sup>

Είναι η ροή που εμφανίζεται στις γραμμές όταν γίνεται χρήση Μετασχηματιστών Αλλαγής Φάσεως (PSTs).

<sup>2</sup> Οι συγκεκριμένες ροές δεν μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Στόχος είναι η ροή στις γραμμές να εκφραστεί ως ένα άθροισμα ροών των παραπάνω κατηγοριών. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για να επιτευχθεί αυτό, αλλά ο ACER προτείνει την μέθοδο Power Flow Coloring (PFC), η οποία περιγράφεται λεπτομερώς στο 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ.

Αφού γίνει ανάλυση των ροών ανά βασική κατηγορία, οι ροές οι οποίες είναι αντίθετες της συμφόρησης (Relieving Flows) μηδενίζονται. Στην συνέχεια γίνεται εφαρμογή ενός φίλτρου για τα Loop Flows. Συγκεκριμένα έχει συμφωνηθεί μετά από αρκετές διαβουλεύσεις μεταξύ ACER και TSOs, ότι τα Loop Flows τα οποία είναι μικρότερα του 10% της μέγιστης ικανότητας μεταφοράς του στοιχείου με συμφόρηση, να καλούνται Loop Flows Below Threshold. Τα Loop Flows Below Threshold αντιμετωπίζονται διαφορετικά από αυτά που υπερβαίνουν το όριο του 10% της μέγιστης ικανότητας μεταφοράς, τα οποία καλούνται Loop Above Threshold. Πιο συγκεκριμένα κάθε κατηγορία ροών θεωρείται ότι συμβάλει διαφορετικά στην δημιουργία συμφόρησης. Ο ACER θεωρεί ότι η κατηγορία που συμβάλει περισσότερο από κάθε άλλη στην δημιουργία της συμφόρησης είναι τα Loop Flows Above Threshold. Αμέσως μετά ακολουθούν τα Internal Flows, στην συνέχεια τα Loop Below Threshold, μετά τα Allocated Flows και τέλος τα PST Flows[1].



Εικόνα 2.10 Απεικόνιση Κανόνα Προτεραιότητας ACER

Γνωρίζοντας το κόστος ανά στοιχείο XNEC, τις ροές που απαρτίζουν την συμφόρηση, ποιες τις δημιουργεί και τον κανόνα προτεραιότητας, το κόστος της συμφόρησης επιμοιράζεται στους υπεύθυνους TSOs. Αρκετά σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι στην περίπτωση που προκύψει Allocated Flow υπεύθυνο για δημιουργία συμφόρησης, το κόστος επωμίζεται η ζώνη που ανήκει το στοιχείο και όχι η ζώνη από την οποία προέρχεται η ροή[1]. Στην περίπτωση που το στοιχείο είναι διασυνοριακό τότε το κόστος μοιράζεται κατά το ήμισυ στις ζώνες που συνδέει η γραμμή.

Συνοπτικά τα βήματα που πρέπει να εκτελούν τα RCCs φαίνονται στην Εικόνα 2.11.



## 2.4. Προσέγγιση της μεθόδου

Με σκοπό την μελέτη της μεθόδου επιμερισμού του κόστους που προκύπτει από την επίλυση συμφόρησης, καθώς και τους παράγοντες που την επηρεάζουν, πρέπει να προσεγγιστεί η μεθοδολογία στο σύνολο της. Οι προσεγγίσεις που έχουν γίνει είναι οι εξής:

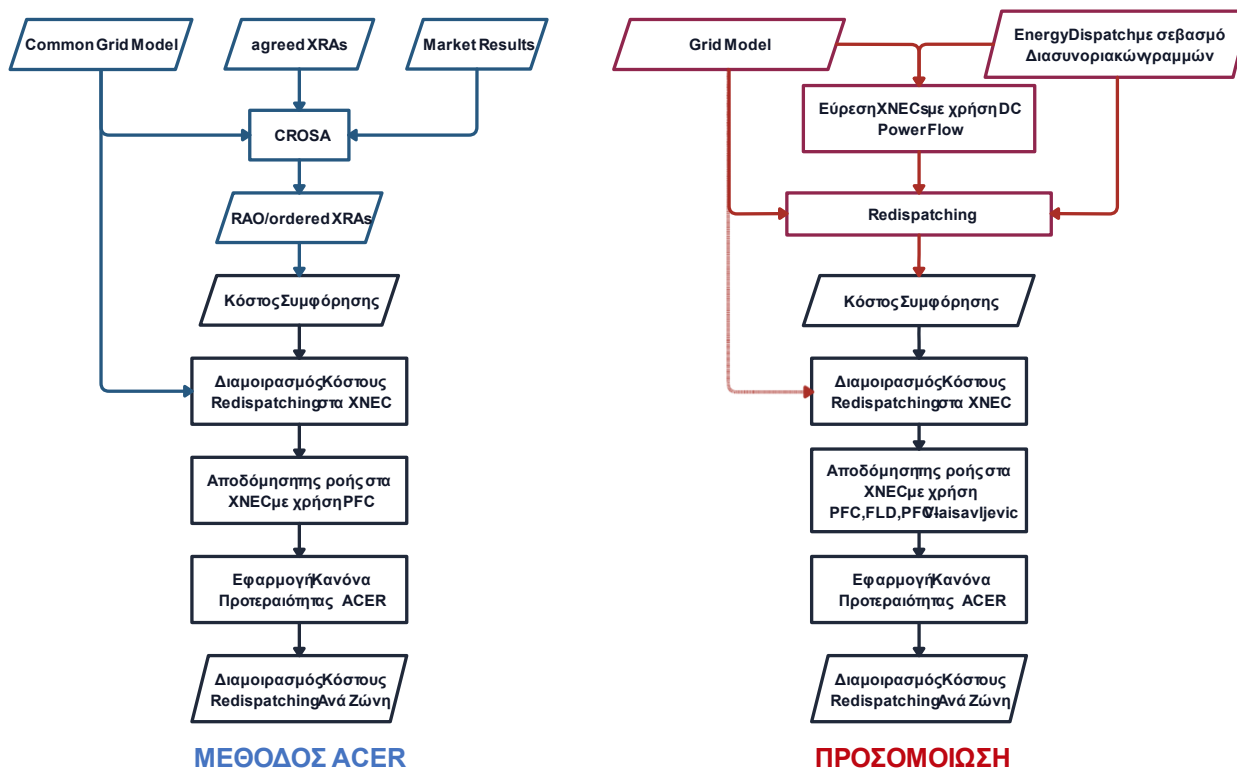
### 1) Δεδομένα Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα δεδομένα της αγοράς είναι απαραίτητα για την εφαρμογή της μεθόδου διότι ορίζουν την κατανομή της παραγωγής στους κόμβους του δικτύου. Επειδή τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται σε πραγματικά συστήματα μεταφοράς, με σκοπό να προσεγγιστεί η πραγματική μέθοδος, εφαρμόστηκε Energy Dispatch με σεβασμό μόνο των τεχνικών ορίων των διασυνοριακών στοιχείων του συστήματος και των ορίων παραγωγής των γεννητριών του συστήματος. Ο τρόπος προσέγγισης της αγοράς που ακολουθήθηκε είναι ενδεικτικός και μη δεσμευτικός. Οποιαδήποτε διαφορετική αναπαράσταση της αγοράς είναι αποδεκτή εφόσον η συνολική ζήτηση του διασυνοριακού συστήματος μεταφοράς ικανοποιείται.

### 2) Εύρεση και Επίλυση της Συμφόρησης

Η εύρεση της συμφόρησης πραγματοποιείται εφαρμόζοντας DC Ροή Φορτίου για τις καταστάσεις N και N-1, με παραγωγή στους κόμβους ίσης με αυτή που προκύπτει από το αποτέλεσμα της εφαρμογής του Energy Dispatch. Η επίλυση της συμφόρησης είναι μία περίπλοκη διαδικασία η οποία πραγματοποιείται από τα RCCs σε συνεργασία με τους TSOs. Για την προσέγγιση της διαδικασίας επίλυσης της συμφόρησης εφαρμόστηκε Ανακατανομή (Redispatching) με σκοπό την μεταβολή της παραγωγής ισχύος στους κόμβους του συστήματος, ώστε να ικανοποιείται το σύνολο των περιορισμών των στοιχείων σε κατάσταση N και N-1. Τελικά προκύπτει το κόστος για την επίλυση της συμφόρησης. Με αυτόν τον τρόπο αναγνωρίζονται τα στοιχεία που υπήρχε συμφόρηση (XNECs) και το κόστος που προέκυψε για της επίλυση της.





Εικόνα 2.12. Μέθοδος ACER και η προσέγγιση της.

Τα βήματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν όπως ακριβώς περιγράφεται στην μεθοδολογία και τα οποία είναι το βασικό κομμάτι μελέτης της παρούσας εργασίας είναι τα εξής:

- 1) Επιμερισμός Κόστους Ανακατανομής ανά Στοιχείο με Συμφόρηση
- 2) Αποδόμηση της ροής με διαφορετικές μεθόδους
- 3) Εφαρμογή Κανόνα Προτεραιότητας
- 4) Επιμερισμός Κόστους ανά Ζώνη

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΒΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ**

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας και της θεωρίας που διέπει την διαδικασία επιμερισμού του κόστους για την επίλυση της συμφόρησης στους αντίστοιχους TSOs. Αρχικά θα παρουσιασθεί η μέθοδος επιμερισμού του κόστους επίλυσης της συμφόρησης στα στοιχεία με συμφόρηση. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι μέθοδοι αποδόμησης της ροής που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Τέλος γίνεται περιγραφή του κανόνα προτεραιότητας που εισάγει ο ACER με στόχο τον επιμερισμό του κόστους στους υπεύθυνους, για την δημιουργία της συμφόρησης, TSOs.

#### **3.1. Επιμερισμός Κόστους Συμφόρησης ανά Στοιχείο με Συμφόρηση**

Με την επίλυση της συμφόρησης το σύστημα επανέρχεται στην κατάσταση βέλτιστης λειτουργίας και ασφάλειας. Το κόστος αυτής της διαδικασίας πρέπει να χωριστεί ανά στοιχείο με συμφόρηση XNEC. Η ύπαρξη συμφόρησης, ταυτόχρονα σε παραπάνω από ένα στοιχεία του συστήματος είναι σπάνια, στο πρόβλημα της κατάστασης N, δηλαδή στο σύστημα χωρίς εφαρμογή N-1 κριτηρίου ασφαλείας. Στην περίπτωση του προβλήματος με εφαρμογή κριτηρίου ασφαλείας N-1, η εμφάνιση συμφόρησης ταυτόχρονα, σε μία ή περισσότερες γραμμές υπό διαφορετική κατάσταση λειτουργίας, είναι πιο πιθανή. Αυτό συμβαίνει λόγω της φύσης του ίδιου του κριτηρίου N-1 που εισάγει την έννοια της ασφάλειας στο πρόβλημα. Ο ταυτόχρονος σεβασμός των ορίων των γραμμών για όλες τις πιθανές καταστάσεις N-1 του συστήματος μεταφοράς, οδηγεί και στην αύξηση των περιπτώσεων όπου ορισμένοι από αυτούς τους περιορισμούς παραβιάζονται με αποτέλεσμα την εμφάνιση συμφόρησης.

Για τον επιμερισμό του κόστους ανά συμφόρηση ο ACER προτείνει την μέθοδο LCBM<sup>3</sup> (Least Cost Based Mapping) η οποία εκτελείται ανεξάρτητα για κάθε στοιχείο με συμφόρηση[1], [2]. Σκοπός της μεθόδου είναι η εύρεση των κατάλληλων διορθωτικών ενεργειών που ενεργοποιήθηκαν (ordered XRAs), με στόχο την επίλυση της συμφόρησης στο συγκεκριμένο στοιχείο με το ελάχιστο δυνατόν κόστος. Έπειτα, το συνολικό κόστος όλων των διορθωτικών ενεργειών (Redispatching Cost) κατανέμεται ανάλογα με το ελάχιστο κόστος που υπολογίστηκε για κάθε στοιχείο με συμφόρηση. Η μέθοδος εφαρμόζεται επιλύοντας αρχικά ένα γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης για κάθε στοιχείο με συμφόρηση. Σκοπός είναι η εύρεση του ελάχιστου δυνατού κόστους διορθωτικών ενεργειών για την επίλυση κάθε συμφόρησης ξεχωριστά. Για την εφαρμογή της μεθόδου πρέπει οι ενέργειες Ανακατανομής και κάθε εμφάνιση συμφόρησης να χωριστούν ανά MTU (Market Time Unit), όπως προτείνει ο ACER στην μεθοδολογία[1]. Χάριν απλότητας θεωρούμε ότι η εμφάνιση συμφόρησης και η επίλυση της αναφέρονται και πραγματοποιούνται στο ίδιο MTU. Παρακάτω παρουσιάζεται το μαθηματικό

---

<sup>3</sup> Η μέθοδος LCBM εμπεριέχει την χρήση μετασηματιστών αλλαγής φάσης PSTs, κάτι που δεν μελετήθηκε στην παρούσα εργασία

πρόβλημα βελτιστοποίησης όπου για κάθε στοιχείο με συμφόρηση  $i$  υπολογίζεται το ελάχιστο δυνατό κόστος επίλυσης της  $r_i$ . Το  $r_i$  μπορεί να εκφραστεί ως:

$$r_i = \sum_j a_{i,j} * C_j \quad (3.1)$$

Με αυτό τον τρόπο εκφράζεται το κόστος για την επίλυση της συμφόρησης σε κάθε στοιχείο ως ένα άθροισμα του κόστους κάθε διορθωτικής ενέργειας  $j$  (XRA Cost) πολλαπλασιασμένο με ένα συντελεστή  $a_{i,j}$  που εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας κάθε διορθωτικής κίνησης  $j$  που χρειάστηκε για να επιλυθεί η συμφόρηση στο στοιχείο  $i$ . Γνωρίζοντας τα κόστη των διορθωτικών ενεργειών και τις ποσότητες τους από την επίλυση της συμφόρησης το πρόβλημα βελτιστοποίησης έγκειται στον υπολογισμό των συντελεστών  $a_{i,j}$ . Για τον υπολογισμό των συντελεστών  $a_{i,j}$  επιλύεται το εξής μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης για κάθε στοιχείο  $i$ :

$$\min \sum_j a_{i,j} * C_j \quad (3.2)$$

$$\sum_j a_{i,j} * V_j = 0 \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in n} a_{i,j} * V_j = \Delta P_n \quad \forall n \quad (3.4)$$

$$\sum_n \Delta P_n * PTDF_{i,n} = \pm |F_{limit,i} - F_{congestion,i}| \quad (3.5)$$

$$1 \geq a_{i,j} \geq 0 \quad (3.6)$$

$F_{limit,i}$ : Όριο Γραμμής Μεταφοράς  $i$  (MW)

$F_{congestion,i}$ : Ροή Ενέργειας που δημιουργεί συμφόρηση στην γραμμή  $i$  (MW)

$\Delta P_n$ : Μεταβολή παραγωγής του κόμβου  $n$  ως αποτέλεσμα διορθωτικών ενεργειών στις γεννητριες  $j$  που ανήκουν στον κόμβο  $n$  (MW)

$V_j$ : Μέγεθος Διορθωτικής Ενέργειας XRA  $j$  (MW)

$C_j$ : Κόστος Διορθωτικής Ενέργειας XRA  $j$  (€)

$a_{i,j}$ : Κλάσμα διορθωτικής κίνησης  $j$  που χρειάστηκε για να επιλυθεί η συμφόρηση στο στοιχείο  $i$

$PTDF_{n,j}$ : Συντελεστής PTDF του κόμβου  $n$  στην γραμμή  $i$  (MW)

Η εφαρμογή του παραπάνω προβλήματος πραγματοποιείται με χρήση N-1 κριτηρίου ασφαλείας αν το πρόβλημα προσαρμοστεί ανά γραμμή με συμφόρηση  $i$ , όταν η γραμμή  $k$  είναι εκτός λειτουργίας. Σκοπός του ανωτέρου προβλήματος είναι η εύρεση των συντελεστών  $a_{i,k,j}$ , με τις υπόλοιπες μεταβλητές του προβλήματος να αναφέρονται ανά γραμμή εκτός λειτουργίας, εκτός

των  $C_j$ ,  $V_j$  που αναφέρονται στις διορθωτικές ενέργειες που βρέθηκαν κατά την επίλυση της συμφόρησης με κριτήριο ασφαλείας N-1.

Το αποτέλεσμα είναι η εύρεση των συντελεστών  $a_{i,k,j}$  και τελικά το ελάχιστο κόστος που απαιτείται για την επίλυση της συμφόρησης  $i$ , ανεξάρτητο των άλλων συμφορήσεων που υπάρχουν στο σύστημα, όταν η γραμμή  $k$  είναι εκτός λειτουργίας.

Η επίλυση της παραπάνω βελτιστοποίησης οδηγεί στην δημιουργία του Πίνακα 3.1.

Πίνακας $a_{i,k,j}$									
Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας	Στοιχεία με Συμφόρηση	ΓΕΝΗΤΡΙΑ							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		ΚΟΣΤΟΣ XRAς €							
		-213.3	0	746.8	424.2	-100	7060	-50	0
1	3	0.772	0	0.314	1	0	0	0	0
	5	0	0	0	0.268	0	0	1	0
2	2	0.905	0	0.452	1	0	0	0	0
	5	0	0	0	0.304	0	0	1	0
	8	0.678	0	0	0	0	0.098	0	0
3	5	0.905	0	0.452	1	0	0	0	0
	8	0	0	0	0.304	0	0	1	0
	10	0.678	0	0	0	0	0.098	0	0
4	3	0.642	0	0.378	1	0	0	0	0
	8	0	0	0	0.585	0	0	1	0

Πίνακας 3.1. Ενδεικτικός πίνακας αποτελέσματος της μεθόδου LCBM<sup>4</sup>.

Με την εύρεση των συντελεστών  $a_{i,k,j}$  δύναται να υπολογιστεί το ελάχιστο δυνατό κόστος για κάθε στοιχείο με συμφόρηση  $r_{i,k}$  ως:

$$r_{i,k} = \sum_j \frac{a_{i,k,j}}{\sum_i a_{i,k,j}} * C_j \quad (3.7)$$

Στην συνέχεια ανάλογα με τις τιμές των  $r_{i,k}$  ακολουθείται μία επεξεργασία των τιμών όπως ορίζεται στον Πίνακα 3.2:

$Call$	$r_{i,k}$	Αντιμετώπιση των σχετικών $r_{i,k}$
>0	Λιγότερα από τα μισά είναι <0	Μηδενισμός των αρνητικών $r_{i,k}$
<0	Λιγότερα από τα μισά είναι >0	Μηδενισμός των θετικών $r_{i,k}$
>0	Περισσότερα από τα μισά είναι <0	Η αντίθετη τιμή(θετική) του μικρότερου αρνητικού $r_{i,k}$ προστίθεται στο σύνολο των $r_{i,k}$
<0	Περισσότερα από τα μισά είναι >0	Η αντίθετη τιμή(αρνητική) του μεγαλύτερου θετικού $r_{i,k}$ προστίθεται στο σύνολο των $r_{i,k}$
Οτιδήποτε	Όλα είναι =0	Τα $r_{i,k}$ γίνονται ίσα με την απόλυτη τιμή της συμφόρησης του κάθε στοιχείου

<sup>4</sup> Τα δεδομένα του πίνακα είναι ενδεικτικά

Σκοπός της επεξεργασίας αυτής είναι να βρεθούν οι συμφορήσεις οι οποίες δεν συμβάλουν στο κόστος συμφόρησης διότι είναι αρκετά μικρότερες από αυτές για τις οποίες πραγματοποιήθηκε η Ανακατανομή. Μετά την εφαρμογή της επεξεργασίας όπως ορίζεται στον Πίνακα 3.2 υπολογίζεται το κόστος ανά συμφόρηση  $i$  ως:

$$c_{i,k} = \frac{r_{i,k}}{\sum_i r_{i,k}} * C_{Total} \quad (3.8)$$

Με το πέρας της διαδικασίας, το κόστος που δημιουργήθηκε για την επίλυση των συμφορήσεων κατανέμεται ανά στοιχείο με συμφόρηση (XNEC). Το επόμενο βήμα που ακολουθεί είναι η αποδόμηση της ροής στις γραμμές με συμφόρηση με σκοπό την απόδοση της συμφόρησης, στους υπεύθυνους για την δημιουργία της, TSOs.

## 3.2. Μέθοδοι Αποδόμησης της Ροής

Στο σύνολο τους υπάρχουν αρκετοί μέθοδοι οι οποίες μπορούν να αναλύσουν την ροή των γραμμών με αρκετά κοινά στοιχεία αλλά και εντελώς διαφορετικές προσεγγίσεις. Οι μέθοδοι που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία πληρούν κατ' ελάχιστον τα παρακάτω κριτήρια[3]:

- 1) Είναι συμβατές με την εφαρμογή της DC ροής φορτίου.
- 2) Μπορούν να αναλύσουν την ροή σε όλες τις κατηγορίες ροών που ορίζει ο ACER.
- 3) Αναγνωρίζουν την ύπαρξη των διαφορετικών ζωνών, άρα τον δημιουργό της κάθε ροής

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι παρακάτω μέθοδοι αποδόμησης της ροής:

- Power Flow Coloring (PFC), όπως προτείνει ο ACER
- Full Line Decomposition (FLD)
- Power Flow Coloring (PFC), όπως προτείνει ο Vlaisavljevic[5]

Και οι τρεις μεθοδολογίες πληρούν τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω, με την PFC να προτείνεται για χρήση από τον ACER[1]. Την FLD[4], η οποία διερευνήθηκε προς χρήση στην μεθοδολογία, έναντι της PFC, από τον ACER και αρκετούς TSOs. Τέλος μελετήθηκε μία παραλλαγή της μεθόδου PFC η οποία δημοσιεύθηκε από τον Vlaisavljevic[5] και συνδυάζει χαρακτηριστικά των βασικών μεθόδων PFC και FLD.

### 3.2.1. Μέθοδος Power Flow Coloring (PFC)-ACER[1], [3]

Η μέθοδος Power Flow Coloring είναι η επίσημη μεθοδολογία που προτείνει ο ACER με σκοπό την αποδόμηση της ροής. Σκοπός της μεθόδου είναι η ανάλυση της ροής στις βασικές ροές που προτείνει ο ACER και η σύνδεση αυτών με τις ζώνες που τις δημιουργούν.

Σκοπός κάθε μεθόδου αποδόμησης της ροής είναι η διάκριση της ροής στις τρεις βασικές κατηγορίες που ορίζει ο ACER:

- Internal Flow
- Loop Flow
- Allocated Flow

Η μέθοδος PFC ξεκινά με την αναγνώριση ότι η παραγωγή και η κατανάλωση σε κάθε ζώνη είναι διαφορετική. Σε ένα μεγάλο διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό σύστημα μεταφοράς, το οποίο αποτελείται από διαφορετικές ζώνες και διασυννοριακά στοιχεία, κάποιες ζώνες θα εισάγουν ενέργεια, ενώ άλλες θα είναι εξαγωγικές. Με αυτό τον τρόπο για κάθε ζώνη υφίσταται μία παραγωγή ενέργειας, με σκοπό την κάλυψη της ζήτησης τοπικά στην ζώνη, και μία άλλη

παραγωγή που ικανοποιεί τις ανάγκες σε εισαγωγές ή εξαγωγές της ζώνης. Αυτή η σημαντική παρατήρηση είναι ο θεμέλιος λίθος της μεθόδου PFC.

Σκοπός της μεθόδου είναι να αναγνωρίσει το ποσοστό παραγωγής σε κάθε κόμβο του συστήματος που οφείλεται στην ανάγκη για κάλυψη της ζήτησης τοπικά στην ζώνη και το αντίστοιχο ποσοστό που οφείλεται στα εμπορικά προγράμματα ανταλλαγής ενέργειας με τις υπόλοιπες ζώνες. Το πρώτο βήμα για να επιτευχθεί το παραπάνω πρόβλημα είναι ο διαχωρισμός του αρχικού προβλήματος σε δύο υποπροβλήματα. Το 1<sup>ο</sup> Υποπρόβλημα έχει σκοπό την εύρεση των ροών που οφείλονται σε ανάγκες κάλυψης της κατανάλωσης εσωτερικά της κάθε ζώνης. Το 2<sup>ο</sup> Υποπρόβλημα έχει σκοπό την εύρεση των ροών που οφείλονται σε διασυνοριακά εμπορικά προγράμματα ανταλλαγής ενέργειας.

### Μεθοδολογία

Γνωρίζοντας τις παραγωγές ανά κόμβο οι οποίες προκύπτουν από το πέρας της αγοράς (στην παρούσα εργασία το αποτέλεσμα του energy dispatch) πρέπει να υπολογιστεί η παραγωγή που οφείλεται στην ανάγκη κάλυψης του φορτίου κάθε ζώνης. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιούνται οι συντελεστές Generation Shift Keys (GSKs) και Load Shift Keys (LSKs). Οι συντελεστές αυτοί εκφράζουν την επιρροή που έχει κάθε κόμβος παραγωγής και αντίστοιχα κατανάλωσης στο ηλεκτρικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και είναι χαρακτηριστικοί για κάθε κόμβο του δικτύου. Οι συντελεστές αυτοί εκφράζουν την μεταβολή της παραγωγής/κατανάλωσης στον κόμβο στην περίπτωση που μεταβληθεί η παραγωγή/κατανάλωση ολόκληρης της ζώνης:

$$GSK_{S_n} = \frac{P_n}{P_{zone}} \quad (3.9)$$

$P_n$ : Παραγωγή Ενεργού Ισχύος στον κόμβο  $n$  (MW)

$P_{zone}$ : Συνολική Παραγωγή Ενέργειας της ζώνης που ανήκει ο κόμβος  $n$  (MW)

$$LSK_{S_n} = \frac{L_n}{L_{zone}} \quad (3.10)$$

$L_n$ : Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος στον κόμβο  $n$  (MW)

$L_{zone}$ : Συνολική Κατανάλωση Ισχύος της ζώνης που ανήκει ο κόμβος  $n$  (MW)

Γνωρίζοντας την παραγωγή των γεννητριών από το Energy Dispatch και τα φορτία του συστήματος, υπολογίζεται η συνολική παραγωγή και ζήτηση κάθε ζώνης άρα και οι συντελεστές GSKs και LSKs .

Επόμενο βήμα είναι η εύρεση του ισοζυγίου κάθε ζώνης. Το ισοζύγιο υπολογίζεται αφαιρώντας την συνολική παραγωγή της ζώνης από το άθροισμα των καταναλώσεων της ζώνης.

$$Zone_{net-position} = \sum_n P_n - \sum_n L_n \quad \forall n \in zone \quad (3.11)$$

Σε αυτό το σημείο η μεθοδολογία θεωρεί ότι το πλεόνασμα/έλλειμα ισχύος της ζώνης οφείλεται αποκλειστικά σε εμπορικά προγράμματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Τελικά για κάθε κόμβο υπολογίζεται η ισχύς που οφείλεται σε εμπορικά προγράμματα ανταλλαγής ισχύος ως:

$$P_{n,Allocated} = \begin{cases} GSKS_n * Zone_{net-position} & \text{αν } Zone_{net-position} > 0 \\ LSKS_n * Zone_{net-position} & \text{αν } Zone_{net-position} < 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

Η υπόλοιπη παραγωγή/κατανάλωση ισχύος στους κόμβους οφείλεται στην κάλυψη των εσωτερικών αναγκών φορτίου της ζώνης. Άρα:

$$P_{n,Balanced} = P_n - P_{n,Allocated} \quad (3.13)$$

Με αυτά τα δεδομένα πρέπει να επιλυθούν δύο προβλήματα ροής φορτίου.

Το 1<sup>ο</sup> Υποπρόβλημα θεωρεί στους κόμβους του συστήματος παραγωγή/κατανάλωση ίση με  $P_{n,Allocated}$ . Με χρήση των συντελεστών PTDF<sup>5</sup>, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, γίνεται εύρεση των **Allocated Flows** του συστήματος.

Το 2<sup>ο</sup> Υποπρόβλημα θεωρεί στους κόμβους του συστήματος παραγωγή/κατανάλωση ίση με  $P_{n,Balanced}$  και κατανάλωση ίση με αυτές που υπάρχουν στο σύστημα. Με χρήση των συντελεστών PTDF, όπως θα εξηγηθεί στην συνέχεια, γίνεται εύρεση των Loop Flows και Internal Flows του συστήματος.

Με χρήση του πίνακα PTDF και γνωρίζοντας πλέον την παραγωγή σε κάθε κόμβο λόγω εμπορικών προγραμμάτων ανταλλαγής ισχύος, υπολογίζεται η συνολική ροή σε κάθε γραμμή που οφείλεται στα εμπορικά προγράμματα. Για την ανάλυση της ροής σε ροές που δημιουργούνται από διαφορετικές ζώνες πρέπει να γίνει κατάλληλη σύνδεση των γινόμενων των συντελεστών  $PTDF * P_{n,Allocated}$ .

Ο πίνακας PTDF είναι διαστάσεων *Αριθμός Γραμμών x Αριθμός Κόμβων* και εκφράζει πόσο αλλάζει η ροή σε μία γραμμή του συστήματος αν παραχθεί 1MW στον κόμβο N και καταναλωθεί στον ζυγό αναφοράς (slack bus).

---

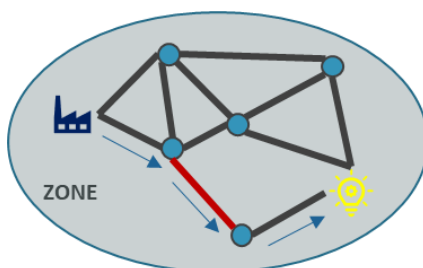
<sup>5</sup> Πίνακας  $PTDF_{node\ to\ hub}$  που ο υπολογισμός του περιγράφεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Επόμενο βήμα είναι η αναγνώριση της ζώνης στην οποία ανήκει η γραμμή, στην περίπτωση που αυτή είναι διασυνοριακή στις ζώνες που ανήκει. Επίσης πρέπει να είναι γνωστή η ζώνη στην οποία ανήκει κάθε κόμβος. Για τον υπολογισμό αρκεί να εφαρμοστεί ο ορισμός κάθε κατηγορίας ροής[1].

- **Internal Flow (Εσωτερική ροή)**

Η εσωτερική ροή είναι αυτή η οποία οφείλεται στην ανάγκη κάλυψης της ζήτησης εντός της ζώνης από την παραγωγή της ίδιας της ζώνης. Δηλαδή είναι η ροή η οποία δημιουργείται όταν η ισχύς παράγεται στην ζώνη X , η γραμμή ανήκει στην ζώνη X και η κατανάλωση βρίσκεται στην ζώνη X.



Εικόνα 3.1. Απεικόνιση Εσωτερικής Ροής

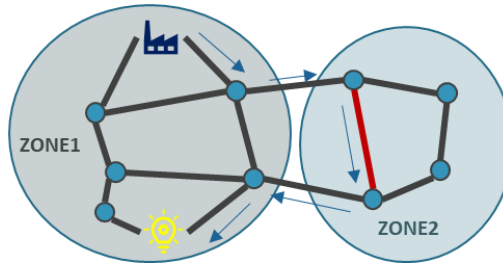
Στην μέθοδο PFC για να βρεθεί η εσωτερική ροή σε μία γραμμή πρέπει να αναγνωριστούν οι κόμβοι παραγωγής στην ζώνη που ανήκει η γραμμή. Έπειτα, με χρήση των συντελεστών PTDF, η Internal Flow στην γραμμή  $l$  υπολογίζεται ως:

$$Internal\ Flow_l = \sum_n PTDF_{l,n} * (P_{n,Balanced} - L_n) \forall n, l \in Zone \quad (3.14)$$

Παρατηρείται ότι όντως η ισχύς παράγεται στην ζώνη X και η γραμμή ανήκει στην ζώνη X, αλλά δεν είναι γνωστό που καταλήγει η ισχύς αυτή. Στην μέθοδο PFC δεν είναι γνωστή η ακριβής ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των κόμβων του συστήματος, όπως γίνεται σε άλλες μεθόδους. Αυτό που εξασφαλίζει ότι η ισχύς αυτή παραμένει στην ζώνη είναι η χρήση της ισχύος  $P_{node,Balanced}$ . Αυτός είναι και ο λόγος που επιλύονται δύο προβλήματα παράλληλα. Αν ληφθούν υπόψιν οι κόμβοι που παράγουν ισχύ αλλά δεν ανήκουν στην ζώνη, υπολογίζονται τα Loop Flows.

- **Loop Flow (Ροή Βρόγχος)**

Η ροή βρόγχος οφείλεται στην ανάγκη κάλυψης της ζήτησης εντός της ζώνης από την παραγωγή της ίδιας της ζώνης αλλά τελικά η ισχύς αυτή καταλήγει στην ζώνη διερχόμενη εξωτερικά αυτής. Δηλαδή είναι η ροή η οποία δημιουργείται όταν η ισχύς παράγεται στην ζώνη X , η γραμμή ανήκει στην ζώνη Y και η κατανάλωση βρίσκεται στην ζώνη X.



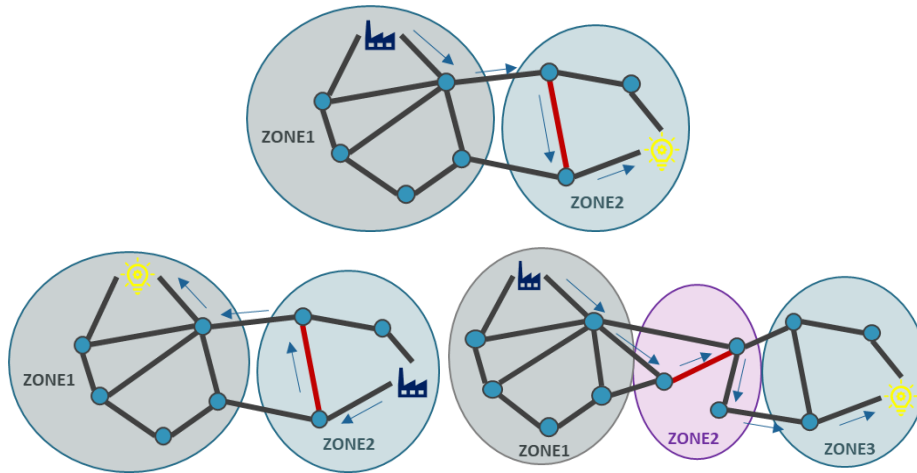
Εικόνα 3.2. Απεικόνιση Ροής Βρόγχου

Για την εύρεση των Loop Flows στην γραμμή  $l$  ακολουθείται η ίδια μέθοδος για την εύρεση της εσωτερικής ροής, μόνο που πλέον λαμβάνονται υπόψιν οι κόμβοι με παραγωγή που δεν ανήκουν στην ζώνη. Για τον υπολογισμό των Loop flows που οφείλονται σε μία ζώνη  $X$ , σε μία γραμμή  $l$  της ζώνης  $Y$ , χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$Loop\ Flow_{l,zone\ X} = \sum_n PTDF_{l,n} * (P_{n,Balanced} - L_n) \quad \forall n \in Zone\ X \quad (3.15)$$

- **Allocated Flow (Ροή λόγω αγοράς)**

Η ροή λόγω αγοράς είναι αυτή η οποία οφείλεται στην δυνατότητα ανταλλαγής ισχύος από μία ζώνη με φθηνή παραγωγή σε μία ζώνη με ακριβή παραγωγή. Δηλαδή είναι η ροή η οποία δημιουργείται όταν η ισχύς παράγεται στην ζώνη  $X$ , η γραμμή ανήκει στην ζώνη  $X$  ή στην  $Y$  (και στις δύο αν είναι διασυνοριακή) και η κατανάλωση βρίσκεται στην ζώνη  $Y$ .

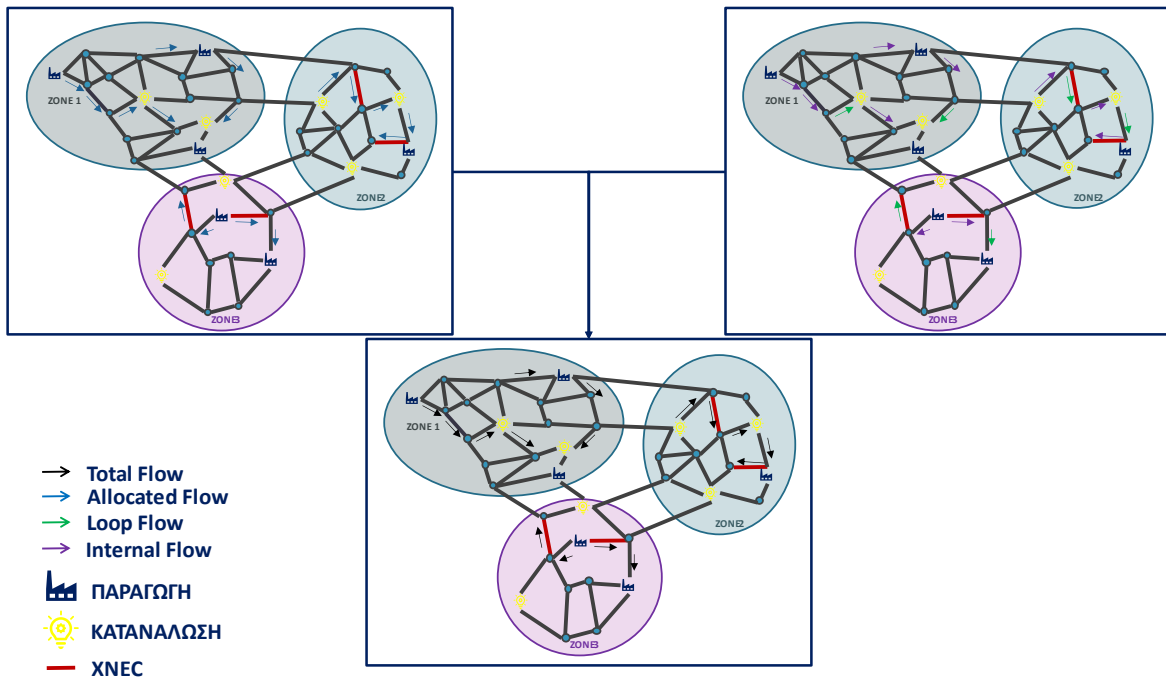


Εικόνα 3.3. Εμπορικές Ροές

Υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη Allocated Flow τα οποία διαφοροποιούνται ανάλογα με την ζώνη που βρίσκεται η παραγωγή, η κατανάλωση και η γραμμή. Στην μέθοδο PFC για την εύρεση των Allocated Flows αρκεί να γίνει χρήση της  $P_{n,Allocated}$ . Έπειτα, με χρήση των συντελεστών PTDF, η Allocated Flow στην γραμμή  $l$  υπολογίζεται ως:

$$Allocated\ Flow_{l,zone\ X} = \sum_n PTDF_{l,n} * P_{n,Allocated} \quad \forall n \in Zone\ X \quad (3.16)$$

Τελικά με υπέρθεση των αποτελεσμάτων της επίλυσης των δύο υποπροβλημάτων επιτυγχάνεται πλήρης ανάλυση της ροής ανά κατηγορία και ζώνη.



Εικόνα 3.4. Υπέρθεση Ροών

### 3.2.2. Μέθοδος Full Line Decomposition (FLD)[3], [4], [16]

Η μέθοδος Full Line Decomposition είναι η μόνη εναλλακτική μέθοδος αποδόμησης της ροής που εξέτασε ο ACER και αρκετοί TSOs προτού επιλεγεί οριστικά η μέθοδος PFC.

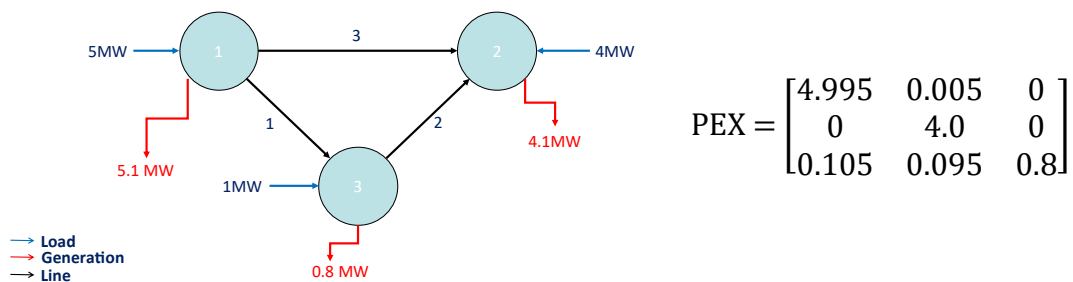
Η μέθοδος FLD είναι μία εντελώς διαφορετική μέθοδος σε σχέση με την PFC. Σκοπός της μεθόδου είναι η εύρεση της ανταλλαγής ισχύος που έχουν οι κόμβοι του συστήματος μεταξύ τους. Αυτό επιτυγχάνεται με μία μέθοδο ιχνηλάτησης της ροής[13], [17] (Flow Tracing) η οποία θεωρεί ότι οι εισροές ισχύος σε έναν κόμβο οδηγούν σε ανάλογες εξαγωγές ισχύος στους επόμενους κόμβους.

#### Μεθοδολογία

Η εφαρμογή της μεθόδου έγκειται στην εύρεση δύο πινάκων. Ο συνδυασμός τους επιτρέπει τον υπολογισμό των βασικών ροών που συνθέτουν οποιαδήποτε ροή στο σύστημα. Οι πίνακες αυτοί είναι:

- Πίνακας PEX (Power Exchanges)

Ο πίνακας PEX<sup>6</sup> δημιουργείται με εφαρμογή της μεθόδου ιχνηλάτησης της ροής και εκφράζει την εκτιμώμενη ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των κόμβων του συστήματος. Ο Πίνακας PEX είναι μεγέθους *Αριθμός Κόμβων x Αριθμός Κόμβων* και κάθε στοιχείο του  $PEX_{i,j}$  εκφράζει την ποσότητα ισχύος που παράγεται στον κόμβο  $i$  και καταναλώνεται στον κόμβο  $j$ .



Εικόνα 3.5. Πίνακας PEX

- Πίνακας  $PTDF_{node-to-node}$

Ο πίνακας  $PTDF_{node-to-node}$  είναι ένας πίνακας διαστάσεων *Αριθμός Κόμβων x Αριθμός Κόμβων* και δημιουργείται από τον πίνακα  $PTDF_{node-to-hub}$ . Ο πίνακας  $PTDF_{node-to-node}$  είναι διαφορετικός για κάθε γραμμή  $l$ . Κάθε στοιχείο του  $PTDF_{node-to-node_{i,j}}$  εκφράζει την μεταβολή ισχύος στην γραμμή  $l$  όταν 1 MW παράγεται στον κόμβο  $i$  και καταναλώνεται στον  $j$ . Για την κατασκευή του χρησιμοποιείται ο πίνακας  $PTDF_{node-to-hub}$  διαστάσεων *Αριθμός Γραμμών x Αριθμός Κόμβων* που η εύρεση του περιγράφεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.

<sup>6</sup> Αναλυτική περιγραφή για τον υπολογισμό του πίνακα PEX γίνεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.

Για την εύρεση του  $PTDF_{node-to-node_{i,j}}$  της γραμμής  $l$  εφαρμόζεται η εξίσωση 3.17.

$$PTDF_{node-to-node_{i,j}} = PTDF_{l,i} - PTDF_{l,j} \quad \forall i, j \in nodes \quad (3.17)$$

Με χρήση όλων των πιθανών συνδυασμών  $i, j$  υπολογίζεται ο πίνακας  $PTDF_{node-to-node}$  για την γραμμή  $l$ .

Με την εύρεση του πίνακα PEX και  $PTDF_{node-to-node}$  και με κατάλληλο συνδυασμό αυτών πραγματοποιείται αποδόμηση της ροής. Όπως και στην μέθοδο PFC, πρέπει να είναι γνωστή η ζώνη που γίνεται η παραγωγή, η ζώνη που ανήκει η γραμμή και η ζώνη που γίνεται η κατανάλωση. Γνωρίζοντας την ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των κόμβων του συστήματος από τον πίνακα PEX καθώς και την μεταβολή της ροής στην γραμμή λόγω της μεταφοράς ισχύος από τον ένα κόμβο στον άλλο, υπολογίζονται όλα τα βασικά είδη ροών.

- **Internal Flow (Εσωτερική ροή)**

Όπως και στην μέθοδο PFC, θεωρείται η ροή η οποία δημιουργείται όταν η ισχύς παράγεται στην ζώνη  $X$ , η γραμμή ανήκει στην ζώνη  $X$  και η κατανάλωση βρίσκεται στην ζώνη  $X$ . Η εύρεση της εσωτερικής ροής στην γραμμή  $l$  υπολογίζεται ως:

$$Internal Flow_l = \sum_i \sum_j PTDF_{node-to-node_{i,j}} * PEX_{i,j} \quad \forall i, j, l \in Zone \quad (3.18)$$

- **Loop Flow (Ροή Βρόγχος)**

Όπως και στην μέθοδο PFC, θεωρείται η ροή η οποία οφείλεται στην ανάγκη κάλυψης της ζήτησης εντός της ζώνης από την παραγωγή της ίδιας της ζώνης, αλλά τελικά η ισχύς αυτή καταλήγει στην ζώνη διερχόμενη εξωτερικά αυτής. Δηλαδή είναι η ροή η οποία δημιουργείται όταν η ισχύς παράγεται στην ζώνη  $X$ , η γραμμή ανήκει στην ζώνη  $Y$  και η κατανάλωση βρίσκεται στην ζώνη  $X$ .

$$Loop Flow_{l,zone X} = \sum_i \sum_j PTDF_{node-to-node_{i,j}} * PEX_{i,j} \quad \forall i, j \in Zone X \neq Zone l \quad (3.19)$$

- **Import Flow (Ροή λόγω εμπορικού προγράμματος εισαγωγής)**

Η ροή η οποία δημιουργείται όταν η ισχύς παράγεται στην ζώνη  $X$ , η γραμμή ανήκει στην ζώνη  $Y$  και η κατανάλωση βρίσκεται στην ζώνη  $Y$ . Η εύρεση της εισαγωγικής ροής στην γραμμή  $l$  από την ζώνη  $X$  υπολογίζεται ως:

$$Import\ Flow_{l,zone\ X} = \sum_i \sum_j PTDF_{node-to-node_{i,j}} * PEX_{i,j} \quad \forall \begin{matrix} i \in Zone\ X \\ j, l \in Zone\ Y \end{matrix} \quad (3.20)$$

- **Export Flow (Ροή λόγω εμπορικού προγράμματος εξαγωγής)**

Η ροή η οποία δημιουργείται όταν η ισχύς παράγεται στην ζώνη X, η γραμμή ανήκει στην ζώνη X και η κατανάλωση βρίσκεται στην ζώνη Y. Η εύρεση της εξαγωγικής ροής στην γραμμή l στην ζώνη Y υπολογίζεται ως:

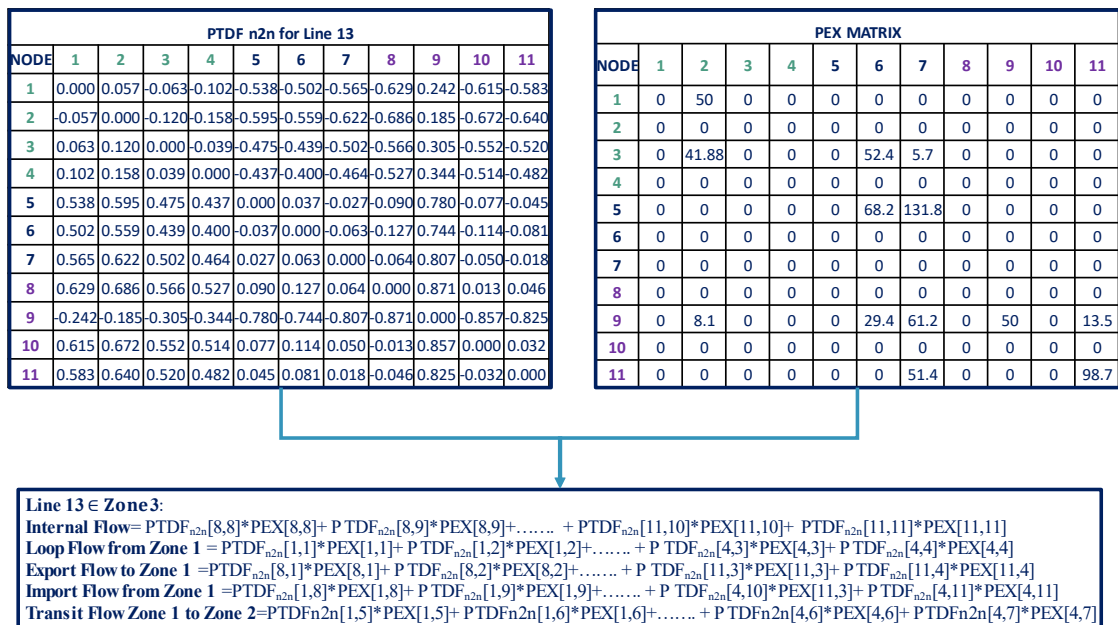
$$Export\ Flow_{l,zone\ Y} = \sum_i \sum_j PTDF_{node-to-node_{i,j}} * PEX_{i,j} \quad \forall \begin{matrix} i, l \in Zone\ X \\ j \in Zone\ Y \end{matrix} \quad (3.21)$$

- **Transit Flow (Ροή λόγω εμπορικού προγράμματος διερχόμενη της ζώνης)**

Η ροή η οποία δημιουργείται όταν η ισχύς παράγεται στην ζώνη X, η γραμμή ανήκει στην ζώνη V και η κατανάλωση βρίσκεται στην ζώνη Y. Η εύρεση της διερχόμενης ροής στην γραμμή l στην ζώνη V υπολογίζεται ως:

$$Transit\ Flow_{l,zone\ X,Y} = \sum_i \sum_j PTDF_{node-to-node_{i,j}} * PEX_{i,j} \quad \forall \begin{matrix} i \in Zone\ X \\ j \in Zone\ Y \\ l \in Zone\ V \end{matrix} \quad (3.22)$$

Με την μέθοδο FLD αναγνωρίζονται πιο εύκολα τα ήδη των ροών διότι ο πίνακας PEX μας δίνει ακριβή στοιχεία για την ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των κόμβων. Τελικά γίνεται ανάλυση της ροής στις βασικές ροές που ορίζει ο ACER υπολογίζοντας τον πίνακα PEX και τον πίνακα  $PTDF_{node-to-node}$  για την γραμμή στην οποία πραγματοποιείται η αποδόμηση της ροής.



Εικόνα 3.6. Συνδυασμός Πίνακα PEX και  $PTDF_{node-to-node}$

### 3.2.3. Μέθοδος Power Flow Coloring (PFC)-Vlaisavljevic[5]

Η μέθοδος Power Flow Coloring, η οποία προτάθηκε από τον Vlaisavljevic, είναι μία μέθοδος αποδόμησης της ροής η οποία συνδυάζει χαρακτηριστικά από την κλασική μέθοδο PFC αλλά και την FLD.

Η μέθοδος PFC-Vlaisavljevic μοιάζει αρκετά στην προσέγγιση της με την κλασική PFC. Το αρχικό πρόβλημα χωρίζεται όπως και στην PFC σε δύο υποπροβλήματα. Ένα για την εύρεση των Internal και Loop Flows (Balanced Model), και ένα για την εύρεση των Allocated Flows (Model with Exchanges). Η κύρια διαφορά που την καθιστά διαφορετική της απλής PFC είναι η χρήση του πίνακα NEX (Net Exchanges) με σκοπό την εύρεση των Allocated Flows.

#### Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία αρχικά είναι ίδια με αυτή της μεθόδου PFC. Γνωρίζοντας τις παραγωγές ανά κόμβο, οι οποίες προκύπτουν από το πέρας της αγοράς (στην παρούσα εργασία από το αποτέλεσμα του Energy Dispatch), πρέπει να υπολογιστεί η παραγωγή που οφείλεται στην ανάγκη κάλυψης του φορτίου κάθε ζώνης. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιούνται οι συντελεστές Generation Shift Keys (GSKs) και Load Shift Keys (LSKs). Οι συντελεστές αυτοί εκφράζουν την επιρροή που έχει κάθε κόμβος παραγωγής/κατανάλωσης στο ηλεκτρικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και είναι χαρακτηριστικοί για κάθε κόμβο του δικτύου. Οι συντελεστές  $GSKs_n$  εκφράζουν την μεταβολή της παραγωγής στον κόμβο στην περίπτωση που μεταβληθεί η παραγωγή ολόκληρης της ζώνης:

$$GSKs_n = \frac{P_n}{P_{zone}} \quad (3.23)$$

$P_n$ : Παραγωγή Ενεργού Ισχύος στον κόμβο  $n$  (MW)

$P_{zone}$ : Συνολική Παραγωγή Ενέργειας της ζώνης που ανήκει ο κόμβος  $n$  (MW)

Οι συντελεστές  $LSKs_n$  εκφράζουν την μεταβολή της κατανάλωσης στον κόμβο στην περίπτωση που μεταβληθεί η κατανάλωση ολόκληρης της ζώνης:

$$LSKs_n = \frac{L_n}{L_{zone}} \quad (3.24)$$

$L_n$ : Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος στον κόμβο  $n$  (MW)

$L_{zone}$ : Συνολική Κατανάλωση Ισχύος της ζώνης που ανήκει ο κόμβος  $n$  (MW)

Πρακτικά η κατανάλωση αντιμετωπίζεται ως μία ελαστική παράμετρος η οποία μπορεί να μεταβληθεί.

Εφόσον είναι γνωστή η παραγωγή των γεννητριών από το Energy Dispatch και η κατανάλωση σε κάθε κόμβο, ακολούθως είναι γνωστή η συνολική παραγωγή και κατανάλωση κάθε ζώνης, εύκολα υπολογίζονται οι συντελεστές  $GSKs$  και  $LSKs$ .

Επόμενο βήμα είναι η εύρεση του ισοζυγίου κάθε ζώνης. Το ισοζύγιο υπολογίζεται αφαιρώντας την συνολική παραγωγή της ζώνης από το άθροισμα των καταναλώσεων της ζώνης.

$$Zone_{net-position} = \sum_n P_n - \sum_n L_n \quad \forall n \in Zone \quad (3.25)$$

Με σκοπό την εφαρμογή του Balanced μοντέλου και τον υπολογισμό των Loop και Internal Flows αντιμετωπίζονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

$$Zone_{net-position} > 0 \quad (3.26)$$

Σε αυτό το ενδεχόμενο η ζώνη είναι εξαγωγική. Για να εφαρμοστεί το Balanced μοντέλο πρέπει να μειωθεί η παραγωγή στους παραγωγικούς κόμβους κατά  $GSKS_n * P_n$  με αποτέλεσμα η ζώνη να έχει μηδενική καθαρή θέση (Net Position).

$$Zone_{net-position} < 0 \quad (3.27)$$

Σε αυτό το ενδεχόμενο η ζώνη είναι εισαγωγική. Για να εφαρμοστεί το Balanced μοντέλο πρέπει να μειωθεί η κατανάλωση στους καταναλωτικούς κόμβους κατά  $LSKS_n * L_n$  με αποτέλεσμα η ζώνη να έχει μηδενική καθαρή θέση (Net Position).

Τελικά για κάθε κόμβο με παραγωγή και κατανάλωση υπολογίζεται η ισχύς που οφείλεται στην κάλυψη της εσωτερικής ανταλλαγής ισχύος ως:

$$P_{n,Balanced} = \begin{cases} P_n & \text{αν } Zone_{net-position} > 0 \\ P_n - GSKS_n * P_n & \text{αν } Zone_{net-position} < 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

$$L_{n,Balanced} = \begin{cases} L_n & \text{αν } Zone_{net-position} < 0 \\ L_n - LSKS_n * L_n & \text{αν } Zone_{net-position} > 0 \end{cases} \quad (3.29)$$

Πραγματοποιώντας ροή φορτίου με τις παραπάνω παραγωγές και καταναλώσεις, με κατάλληλη χρήση του πίνακα PTDF, υπολογίζονται τα Internal και Loop Flows ως:

$$Internal Flow_l = \sum_n PTDF_{l,n} * (P_{n,Balanced} - L_{n,Balanced}) \quad \forall n, l \in Zone \quad (3.30)$$

$$Loop Flow_{l,zone X} = \sum_n PTDF_{l,n} * (P_{n,Balanced} - L_{n,Balanced}) \quad \forall n \in Zone X \quad (3.31)$$

Η υπόλοιπη ισχύς ή κατανάλωση στους κόμβους του συστήματος οφείλεται σε εμπορικά προγράμματα ανταλλαγής ισχύος και υπολογίζεται ως:

$$P_{n,Allocated} = P_n - P_{n,Balanced} \quad (3.32)$$

$$L_{n,Allocated} = L_n - L_{n,Balanced} \quad (3.33)$$



Η διαδικασία που ακολουθείται στην συνέχεια είναι ίδια με την μέθοδο FLD και έχει σκοπό τον υπολογισμό του πίνακα NEX ο οποίος υπολογίζεται ακριβώς όπως ο PEX χρησιμοποιώντας ως παραγωγή και κατανάλωση στους κόμβους τα  $P_{n,Allocated}$  και  $L_{n,Allocated}$ , αντίστοιχα. Επίσης πάλι υπολογίζεται ο πίνακας  $PTDF_{node-to-node}$  που σε συνδυασμό με τον πίνακα NEX οδηγεί στην εύρεση των Allocated Flows ως:

$$Import\ Flow_{l,zone\ X} = \sum_i \sum_j PTDF_{node-to-node_{i,j}} * NEX_{i,j} \quad \forall \begin{matrix} i \in Zone\ X \\ j, l \in Zone\ Y \end{matrix} \quad (3.34)$$

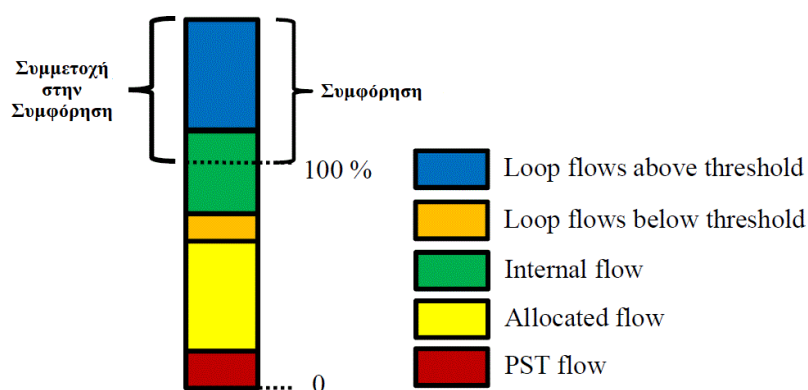
$$Export\ Flow_{l,zone\ Y} = \sum_i \sum_j PTDF_{node-to-node_{i,j}} * NEX_{i,j} \quad \forall \begin{matrix} i, l \in Zone\ X \\ j \in Zone\ Y \end{matrix} \quad (3.35)$$

$$Transit\ Flow_{l,zone\ X,Y} = \sum_i \sum_j PTDF_{node-to-node_{i,j}} * NEX_{i,j} \quad \forall \begin{matrix} i \in Zone\ X \\ j \in Zone\ Y \\ l \in Zone\ V \end{matrix} \quad (3.36)$$

Τέλος, όπως και στην κλασική PFC, με υπέρθεση των λύσεων των δύο υποπροβλημάτων η ροή αναλύεται πλήρως στις βασικές κατηγορίες που ορίζει ο ACER.

### 3.3. Επιμερισμός Κόστους ανά Ζώνη

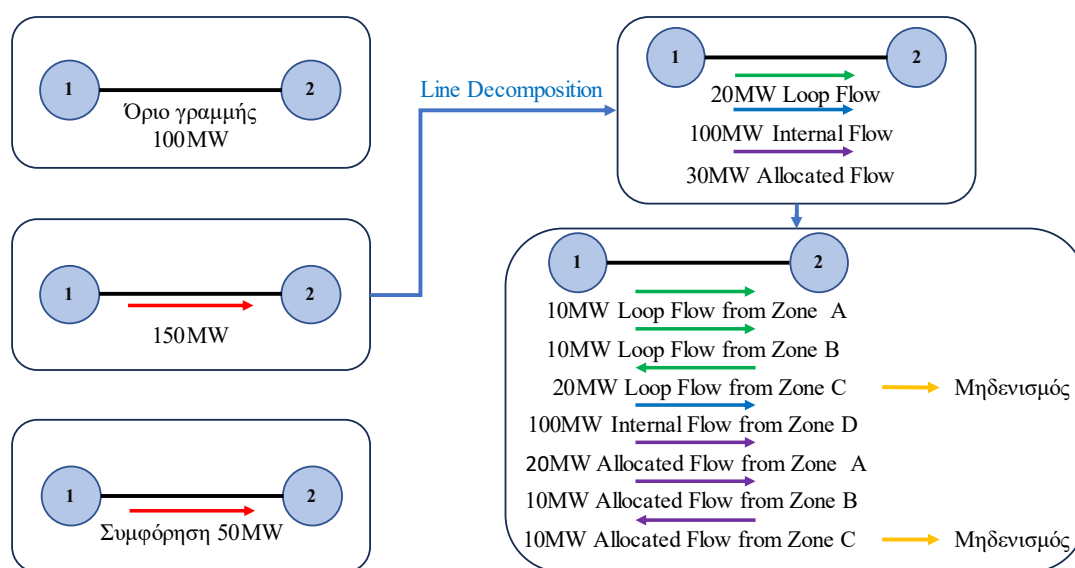
Η ανάλυση της ροής στις βασικές ροές που ορίζει ο ACER είναι απαραίτητη για τον επιμερισμό του κόστους ανά TSO. Η διαδικασία που προτείνει ο ACER, μετά την αποδόμηση της ροής, αρχικά μηδενίζει τις ροές οι οποίες είναι αντίθετες της τελικής ροής, που αθροιστικά οδηγεί σε συμφόρηση[1]. Οι ροές αυτές ονομάζονται «ανακουφιστικές» (Relieving) και συμβάλλουν στην μείωση της συμφόρησης. Υπάρχουν μέθοδοι που επιβραβεύουν την ύπαρξη αυτών των ροών στον τελικό καταμερισμό του κόστους, τις οποίες ο ACER έχει απορρίψει. Μετά τον μηδενισμό των «ανακουφιστικών» ροών ακολουθεί ο διαχωρισμός των Loop Flows σε δύο κατηγορίες. Αν τα Loop Flows είναι μικρότερα του 10% της μέγιστης δυνατότητας μεταφοράς ισχύος της γραμμής, δεν θεωρείται ότι συμβάλλουν στην συμφόρηση. Τα Loop Flows μεγαλύτερα του 10% θεωρείται ότι συμβάλλουν περισσότερο από οποιαδήποτε άλλο είδος ροής στην συμφόρηση. Ο τρόπος με τον οποίο το είδος της ροής συνδέεται με την δημιουργία συμφόρησης ακολουθεί έναν απλό κανόνα προτεραιότητας που ορίζει ο ACER[1].



Εικόνα 3.7. Κανόνας Προτεραιότητας ACER

Το είδος ροής που πρώτο ευθύνεται για την ύπαρξη συμφόρησης είναι τα Loop flows μεγαλύτερα του 10% της μέγιστης δυνατότητας μεταφοράς ισχύος της γραμμής. Στην συνέχεια υπεύθυνα θεωρείται η εσωτερική της ζώνης ροή (Internal Flow). Αμέσως μετά, αν η συμφόρηση είναι αρκετά μεγάλη, υπεύθυνες για την συμφόρηση ροές είναι τα Loop Flows μικρότερα του 10% της μέγιστης δυνατότητας μεταφοράς ισχύος της γραμμής και τέλος οι ροές που οφείλονται στην αγορά ηλεκτρικής ισχύος (Allocated Flows). Επειδή στην παρούσα εργασία δεν μελετήθηκε η χρήση μετασχηματιστών αλλαγής φάσης (PST) δεν υπάρχουν ροές λόγω χρήσης τέτοιων μετασχηματιστών. Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι σε περίπτωση που Allocated Flow βρεθεί να συμβάλει στη συμφόρηση, το κόστος επωμίζεται η ζώνη στην οποία ανήκει το στοιχείο με συμφόρηση και όχι η ζώνη που δημιουργεί την ροή.

Για την εύρεση του κόστους ανά ζώνη και γνωρίζοντας το ποσοστό που συμβάλει κάθε είδος ροής στην συμφόρηση πρέπει να υπολογιστεί το ποσοστό που συμβάλει κάθε ροή ανά ζώνη στο κάθε είδος της ροής. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που το συνολικό Loop Flow οφείλεται σε περισσότερες από μία ροές, οπότε και ζώνες, αρχικά αναγνωρίζεται το συνολικό ποσοστό που δημιουργεί συμφόρηση στην γραμμή. Επίσης υπολογίζεται το ποσοστό που συμβάλει κάθε ροή στο συνολικό Loop Flow. Το γινόμενο των ποσοστών και του κόστους που έχει αποδοθεί στο συγκεκριμένο στοιχείο με συμφόρηση έχει ως αποτέλεσμα την εύρεση του κόστους που πρέπει να αποδοθεί σε κάθε ζώνη για την δημιουργία συμφόρησης στο συγκεκριμένο στοιχείο. Με τον ίδιο τρόπο για όλα τα είδη ροών και για όλα τα στοιχεία με συμφόρηση επιτυγχάνεται ο επιμερισμός του κόστους επίλυσης της συμφόρησης στις κατάλληλες ζώνες.



Εικόνα 3.8. Απεικόνιση Αποδόμησης της ροής και μηδενισμού θεραπευτικών (relieving) ροών

Οι διαδικασίες και προσεγγίσεις που περιεγράφηκαν στο παρόν κεφάλαιο θα εφαρμοστούν αρχικά σε μικρά συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την καλύτερη κατανόηση και εγκυρότητα των αποτελεσμάτων στο 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ. Στο 6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ γίνεται εφαρμογή των μεθόδων σε μεγαλύτερα συστήματα μεταφοράς, γνωστά στην βιβλιογραφία.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>**

### **ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΓΟΡΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ**

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε με σκοπό την προσομοίωση των εισαγωγικών δεδομένων του προβλήματος επιμερισμού κόστους. Αρχικά θα παρουσιασθεί η μέθοδος του Energy Dispatch με την χρήση της οποίας προσομοιώθηκε η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, όπως αναφέρθηκε στο 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ. Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί ο τρόπος εύρεσης της συμφόρησης και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση της, που όπως επεξηγήθηκε στο 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ, επιτυγχάνεται με εφαρμογή Ροής Φορτίου και Ανακατανομής.

Όπως περιεγράφηκε και στο 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ, το RCC ακολουθεί τρία βασικά βήματα με σκοπό να εφαρμόσει τον επιμερισμό τους κόστους. Κάθε βήμα είναι απαραίτητο να ολοκληρωθεί πριν από το προηγούμενο για να ολοκληρωθεί η διαδικασία επιμερισμού. Αρχικά το 1<sup>ο</sup> Βήμα είναι ο εντοπισμός της συμφόρησης και η επίλυση της. Για να γίνει αυτό το RCC χρησιμοποιεί το CGM (Common Grid Model). Τα δεδομένα που αντλεί από το CGM είναι τα εξής:

- 1) Τα στοιχεία του συστήματος που έχουν συμφόρηση καθώς και πόση είναι αυτή.
- 2) Τους συντελεστές PTDFs και PSDFs<sup>7</sup> των γραμμών.

Επίσης γνωρίζει τα αποτελέσματα αγοράς επόμενης μέρας και ενδοημερήσιας αγοράς σε συνδυασμό με τα GSKs (Generation Shift Keys) και τα LSKs (Load Shift Keys). Γνωρίζει λοιπόν την παραγωγή και κατανάλωση σε όλους τους κόμβους του διασυνδεδεμένου ηλεκτρικού συστήματος. Με χρήση των PTDFs μπορεί να εφαρμόσει ροή φορτίου και να υπολογίσει τις ροές στις γραμμές. Ξέροντας τα όρια γραμμών μπορεί να υπολογίσει πόση είναι η συμφόρηση και πού εμφανίζεται.

Με χρήση του CGM, το RCC μπορεί να εφαρμόσει μέτρα Ανακατανομής και Αντίθετης Διασυνοριακής Συναλλαγής με σκοπό να επίλυση την συμφόρηση. Η επιλογή αυτών των ενεργειών γίνεται με κριτήριο το κόστος και εφόσον έχει συμφωνηθεί εκ των προτέρων η δυνατότητα εφαρμογής τους από τους εμπλεκόμενους TSOs.

Με αυτόν τον τρόπο το RCCs αναγνωρίζει:

- Τα στοιχεία με συμφόρηση που μπορεί να εφαρμοστεί ο επιμερισμός κόστους (XNECs).
- Τα XRAs που εφαρμόστηκαν (ordered XRAs) με σκοπό την επίλυση της συμφόρησης.
- Την ροή πριν και μετά την εφαρμογή των XRAs.

---

<sup>7</sup> Phase Shifter Distribution Factors δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία

- Το κόστος ή το κέρδος που προέκυψε από την επίλυση της συμφόρησης.

Με σκοπό να γίνει εφαρμογή και μελέτη των μεθόδων Αποδόμησης των Ροών και να εφαρμοστεί η μεθοδολογία επιμερισμού του κόστους διορθωτικών ενεργειών για την επίλυση της συμφόρησης έγιναν οι εξής παραδοχές:

- 1) Όλα τα στοιχεία του συστήματος θεωρούνται αποδεκτά για εφαρμογή επιμερισμού κόστους στην περίπτωση που εμφανιστεί συμφόρηση (XNECs).
- 2) Δεν μελετήθηκε η χρήση PST στην παρούσα εργασία.
- 3) Τα δεδομένα της αγοράς υπολογίζονται με χρήση Energy Dispatch με γνωστή κατανάλωση στους κόμβους του συστήματος και γνωστά οικονομοτεχνικά στοιχεία των μονάδων παραγωγής για το σύστημα που θα επιλεγεί.
- 4) Οι ενέργειες για την επίλυση της συμφόρησης υπολογίζονται με χρήση DC Optimal Power Flow. Συγκεκριμένα επιλύεται ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού με σκοπό την μεταβολή της παραγωγής των μονάδων, την κάλυψη του φορτίου αλλά και την επίλυση της συμφόρησης.

## 4.1. Energy Dispatch

Με στόχο την προσέγγιση της μεθοδολογίας όπως την προτείνει ο ACER είναι απαραίτητη η γνώση της παραγωγής και της κατανάλωσης σε κάθε κόμβο του διασυνδεδεμένου ηλεκτρικού συστήματος. Σε πραγματικές συνθήκες χρησιμοποιούνται τα δεδομένα των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, όπως προκύπτουν από το σύνολο των αποτελεσμάτων της αγοράς επόμενης μέρας και της ενδοημερήσιας αγοράς (DAM,IDA). Λόγω έλλειψης τέτοιων δεδομένων και με σκοπό την εφαρμογή του συνόλου της μεθοδολογίας[1], για την εύρεση των αποτελεσμάτων της αγοράς χρησιμοποιήθηκε Energy Dispatch. Η εφαρμογή του Energy Dispatch υλοποιείται με την επίλυση ενός απλού προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού (LP) με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής των γεννητριών. Περιορισμοί του προβλήματος αποτελούν το τεχνικό ελάχιστο και μέγιστο των μονάδων παραγωγής, το ισοζύγιο παραγωγής και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και τέλος ο σεβασμός των ορίων των διασυνοριακών γραμμών μεταφοράς.

$$\min \sum_{g \in G} C_g * p_g \quad (4.1)$$

$$\sum_{g \in G} p_g = L \quad (4.2)$$

$$-P_{max,l} \leq \sum_{n \in N} PTDF_{l,n} * (P_n - L_n) \leq P_{max,l} \quad \forall l \in CrossBorder Lines \quad (4.3)$$

$$p_g \leq P_{g,up}, g \in G \quad (4.4)$$

$$p_g, C_g, L \geq 0 \quad g \in G \quad (4.5)$$

$p_g$ : Παραγωγή Ενεργού Ισχύος Γεννήτριας  $g$  (MW)

$C_g$ : Κόστος Παραγωγής Ενεργού Ισχύος ανά Γεννήτρια ανά MW (€/MW)

$L$ : Συνολική ζήτηση Συστήματος (MW)

$P_{g,up}$ : Τεχνικό Μέγιστο Γεννήτριας (MW)

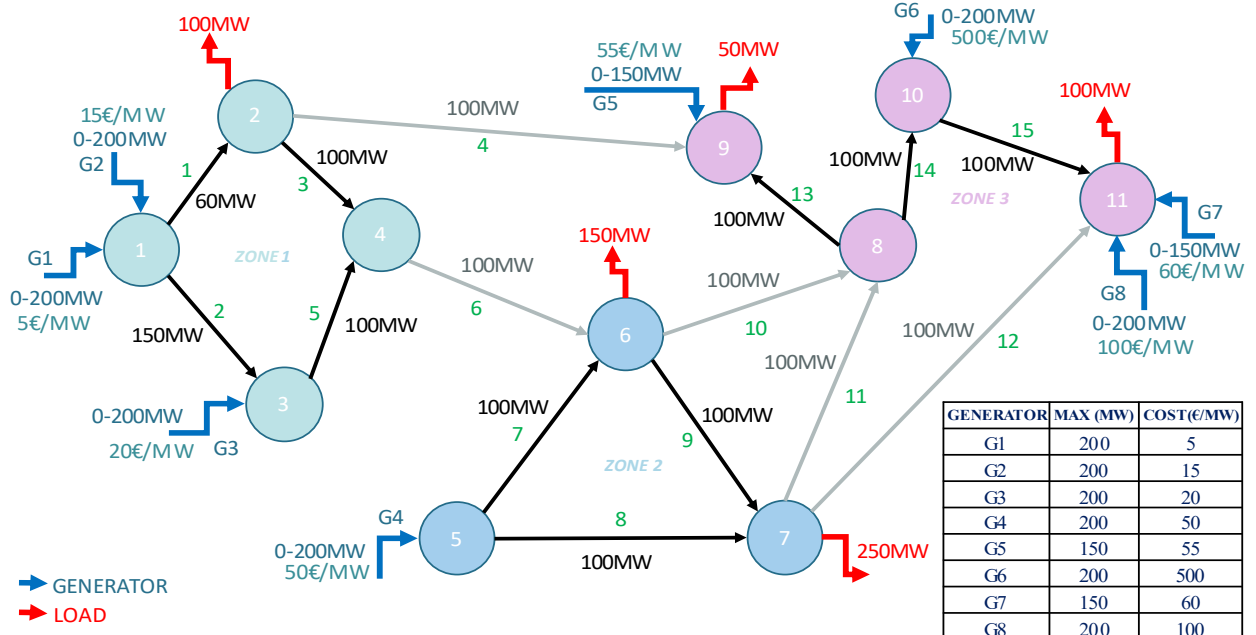
$P_n$ : Παραγωγή Ενεργού Ισχύος στον κόμβο  $n$  (MW)

$L_n$ : Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος στον κόμβο  $n$  (MW)

$PTDF_{l,n}$ : Συντελεστής PTDF γραμμής  $l$  κόμβου  $n$

$P_{max,l}$ : Όριο γραμμής μεταφοράς  $l$  (MW)

Εφαρμόζοντας την συγκεκριμένη βελτιστοποίηση προκύπτει η συνολική παραγωγή ανά γεννήτρια. Το κριτήριο παραγωγής ή μη της γεννήτριας είναι καθαρά οικονομοτεχνικό και δεν υπόκειται σε περιορισμούς του συστήματος μεταφοράς εκτός των ορίων των διασυνοριακών γραμμών μεταφοράς.



Εικόνα 4.1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά Συστήματος

Με εφαρμογή Ανακατανομής προκύπτει το αποτέλεσμα του Πίνακα 4.1

ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	P <sub>g</sub> (MW)	ΚΟΣΤΟΣ(€/MW)
G1	200	5
G2	200	15
G3	200	20
G4	50	50
G5	0	55
G6	0	500
G7	0	60
G8	0	100
<b>SUM</b>	<b>650</b>	

Πίνακας 4.1 Αποτέλεσμα Energy Dispatch του συστήματος της Εικόνας 4.1

## 4.2. Εύρεση και Επίλυση της Συμφόρησης

Με την εύρεση της παραγωγής των γεννητριών σε όλους τους κόμβους του δικτύου, από την εφαρμογή του Energy Dispatch, τις καταναλώσεις ανά κόμβο και τα όρια των γραμμών από το CGM μπορεί να υπολογιστεί η ροή στις γραμμές και η συμφόρηση σε αυτές. Για να γίνει αυτό αρκεί η εύρεση των συντελεστών PTDF (Power Transfer Distribution Factor). Η εύρεση των συντελεστών PTDF έγκειται στον υπολογισμό του Πίνακα PTDF, όπως περιγράφεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ. Το μέγεθος του πίνακα είναι *Αριθμός Γραμμών x Αριθμός Κόμβων* και κάθε στοιχείο  $PTDF_{l,n}$  εκφράζει την μεταβολή στην γραμμή  $l$  αν στον κόμβο  $n$  εισαχθεί ένα πρόσθετο MW (και απορροφηθεί από τον ζυγό αναφοράς-slack bus). Με χρήση DC Ροής φορτίου, ώστε να αποφευχθεί η μη γραμμικότητα της AC ροής, η ροή σε κάθε γραμμή μπορεί να υπολογιστεί ως το άθροισμα του γινομένου των συντελεστών PTDF της γραμμής με την διαφορά παραγωγής-κατανάλωσης στον αντίστοιχο κόμβο.

$$Power\ Flow\ Line\ l = \sum_{n \in N} PTDF_{l,n} * (P_n - L_n) \quad (4.6)$$

$P_n$ : Παραγωγή Ενεργού Ισχύος στον κόμβο  $n$  (MW)

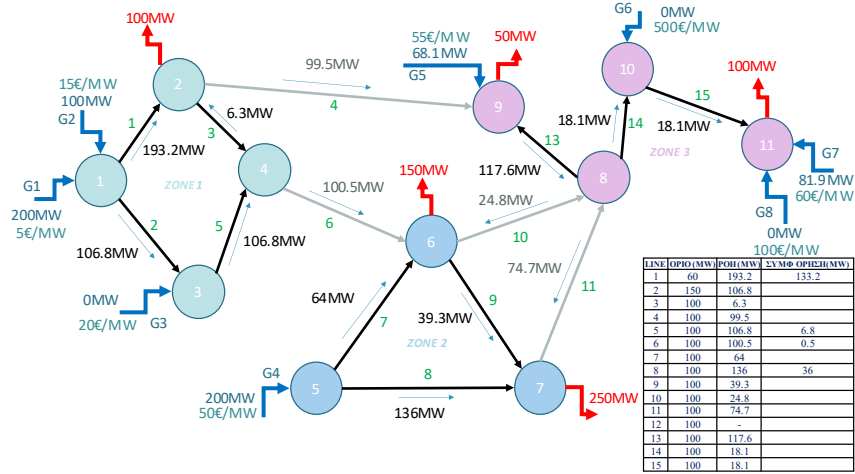
$L_n$ : Κατανάλωση Ενεργού Ισχύος στον κόμβο  $n$  (MW)

$PTDF_{l,n}$ : Συντελεστής PTDF γραμμής  $l$  κόμβου  $n$

Με εφαρμογή της εξίσωσης 4.6 υπολογίζεται η ροή στις γραμμές και συγκρινόμενη με τα όρια των γραμμών, βρίσκονται οι γραμμές με συμφόρηση και πόση είναι αυτή. Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να βρεθεί η ροή στις γραμμές και για την N-1 κατάσταση. Η διαφορά στον υπολογισμό έγκειται στην χρήση διαφορετικού πίνακα PTDF εφόσον μία γραμμή βρίσκεται εκτός συστήματος. Αν στο αρχικό σύστημα έχουμε  $l$  γραμμές τότε πρέπει να γίνει υπολογισμός  $l + 1$  πινάκων PTDF. Τελικά για να υπολογιστεί η ροή σε κάθε γραμμή  $l$  ανά πρόβλημα, στο οποίο η γραμμή  $k$  είναι εκτός λειτουργίας, χρησιμοποιείται η εξίσωση 4.7.

$$Power\ Flow\ Line\ l_{Line\ k\ outage} = \sum_{n \in N} PTDF_{k,l,n} * (P_n - L_n) \quad (4.7)$$

$PTDF_{l,n,k}$ : Συντελεστής PTDF γραμμής  $l$  κόμβου  $n$  όταν η γραμμή  $k$  είναι εκτός λειτουργίας



Εικόνα 4.2. Εμφάνιση Συμφόρησης

Η επίλυση της συμφόρησης επιτυγχάνεται με την χρήση Ανακατανομής και Αντίθετης Διασυννοριακής Συναλλαγής. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε μόνο η χρήση ενεργειών Ανακατανομής. Η κατάλληλη επιλογή ενεργειών Ανακατανομής επιτυγχάνεται επιλύοντας ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου με περιορισμούς ασφαλείας. Πιο συγκεκριμένα γνωρίζοντας την παραγωγή στους κόμβους του συστήματος που βρέθηκαν στο προηγούμενο βήμα, επιλύεται ένα γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με σκοπό την ανακατανομή της παραγωγής με το ελάχιστο κόστος, με σεβασμό των ορίων των γραμμών μεταφοράς και την κάλυψη της ζήτησης.

$$\min \sum_{g \in G} C_g * (p_g + p_{RD}) \quad (4.8)$$

$$\sum_{g \in G} (p_g + p_{g,RD}) = L \quad (4.9)$$

$$\sum_{\substack{g \in G \\ g \in n}} (p_g + p_{g,RD}) = P_n \quad (4.10)$$

$$-P_{max,l} \leq \sum_{n \in N} PTDF_{l,n} * (P_n - L_n) \leq P_{max,l} \quad \forall l \in Lines \quad (4.11)$$

$$-P_{max,l} \leq \sum_{n \in N} PTDF_{k,l,n} * (P_n - L_n) \leq P_{max,l} \quad \forall l, k \in Lines \quad (4.12)$$

$$-p_g \leq p_{g,RD} \leq P_{g,up} - p_g \quad \forall g \in G \quad (4.13)$$

$$C_g, L, P_{max,l} \geq 0 \quad (4.14)$$

$p_{g,RD}$ : Μεταβολή Παραγωγής Ενεργού Ισχύος Γεννήτριας  $g$  (MW)

$P_n$ : Παραγωγή Ενέργειας στον κόμβο  $n$  (MW)

$L_n$ : Κατανάλωση Ενέργειας στον κόμβο  $n$  (MW)

$P_{max,l}$ : Όριο γραμμής μεταφοράς  $l$  (MW)



Ο περιορισμός της εξίσωσης 4.11 εισάγει τους περιορισμούς των στοιχείων στην κατάσταση N. Ο περιορισμός της εξίσωσης 4.12 εισάγει του περιορισμούς του N-1 κριτηρίου ασφαλείας. Για κάθε στοιχείο του προβλήματος k που μπορεί να βρεθεί εκτός λειτουργίας, εισάγεται ένα σύνολο επιπλέον  $l - 1$  περιορισμών, όσα δηλαδή και τα εναπομείναντα στοιχεία που βρίσκονται σε λειτουργία.

Τελικά υπολογίζονται οι νέες παραγωγές ανά γεννήτρια ως άθροισμα της παραγωγής που υπολογίστηκε κατά το Energy Dispatch  $p_g$  και της μεταβολής της παραγωγής που υπολογίστηκε κατά την Ανακατανομή  $p_{g,RD}$  :

$$P_{g,After Redispatching} = p_g + p_{g,RD} \quad g \in G \quad (4.15)$$

Κατά την επίλυση του προβλήματος Ανακατανομής υπάρχει πιθανότητα μη εύρεσης εφικτής λύσης. Αρχικά πρέπει να ελεγχθούν μεμονωμένα αν οι καταστάσεις N-1 οδηγούν σε εφικτή λύση Ανακατανομής. Στην συνέχεια αφαιρώντας τις καταστάσεις αυτές εφαρμόζεται Ανακατανομή για το σύνολο των εναπομεινάντων καταστάσεων N-1. Η ύπαρξη μη εφικτής λύσης παραμένει πιθανή. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω αντικρουόμενων περιορισμών των καταστάσεων N-1. Σε αυτή την περίπτωση επιλύεται μία παραλλαγή του προβλήματος Ανακατανομής με σκοπό την εύρεση των αντικρουόμενων περιορισμών και την αφαίρεση των N-1 καταστάσεων, στις οποίες παρατηρούνται αυτοί, από την διαδικασία της Ανακατανομής. Το τροποποιημένο πρόβλημα είναι το εξής:

$$\min \sum_{g \in G} C_g * (p_g + p_{RD}) + \sum_{V \in Line-Const} C_V * (T_V - 1) \quad (4.16)$$

$$\sum_{g \in G} (p_g + p_{g,RD}) = L \quad (4.17)$$

$$\sum_{\substack{g \in G \\ g \in n}} (p_g + p_{g,RD}) = P_n \quad (4.18)$$

$$-P_{max,l} \leq \sum_{n \in N} PTDF_{l,n} * (P_n - L_n) \leq P_{max,l} \quad \forall l \in Lines \quad (4.19)$$

$$-P_{max,l} * T_V \leq \sum_{n \in N} PTDF_{k,l,n} * (P_n - L_n) \leq P_{max,l} * T_V \quad \forall l, k \in Lines \quad (4.20)$$

$$-p_g \leq p_{g,RD} \leq P_{g,up} - p_g, g \in G \quad (4.21)$$

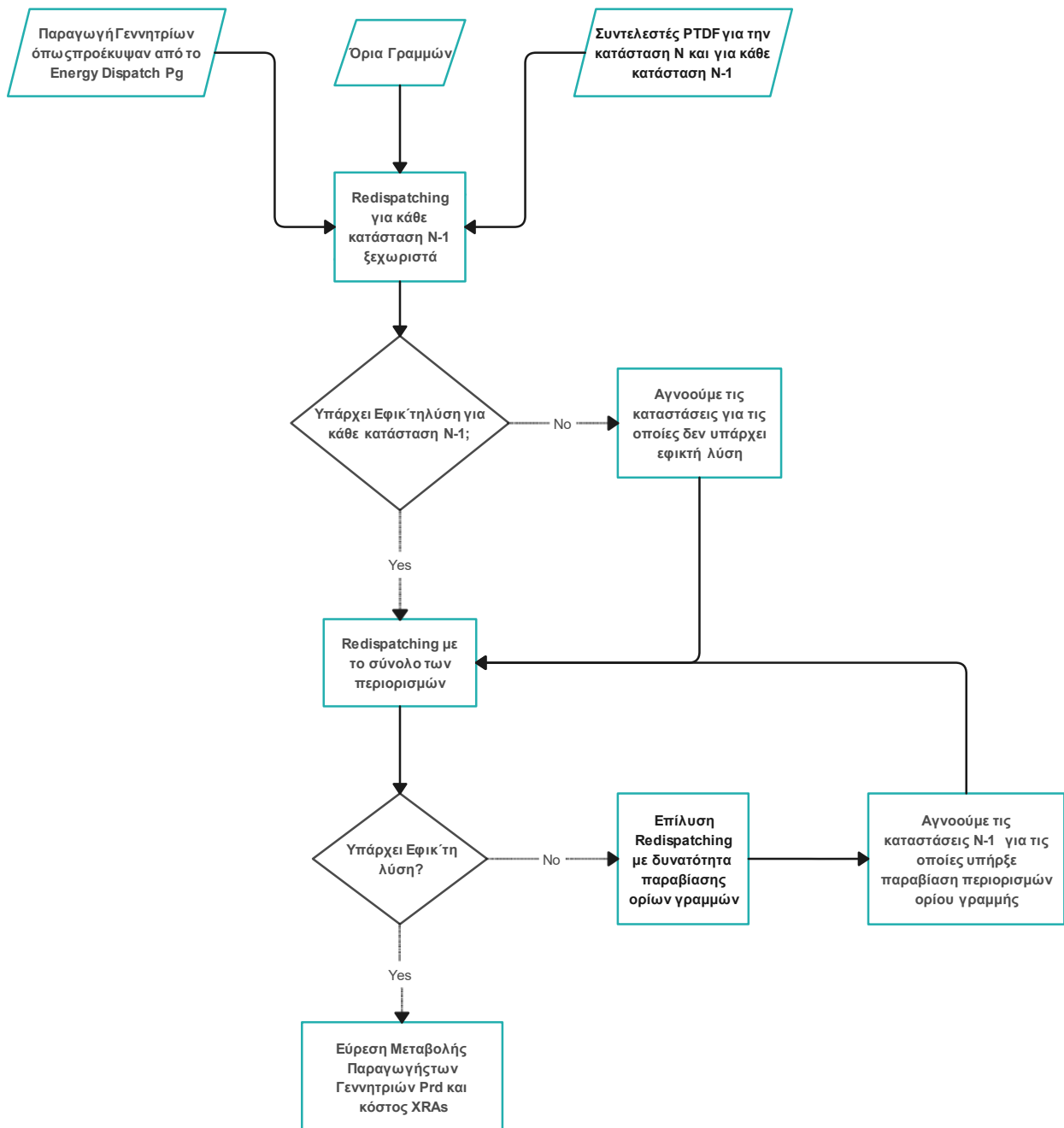
$$C_g, C_V, L, P_{max,l} \geq 0 \quad (4.22)$$

$$T_V \geq 1 \quad \forall V \in Line Constraint \quad (4.23)$$

$C_V$ : Κόστος Παραβίασης Περιορισμού Γραμμής V (€)

$T_V$ : Συντελεστής Αύξησης Ορίου Περιορισμού Γραμμής V

Στο τροποποιημένο πρόβλημα δίνεται η δυνατότητα παραβίασης των περιορισμών των γραμμών στις N-1 καταστάσεις. Η παραβίαση των περιορισμών οδηγεί σε τεράστια αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης αφού το κόστος  $C_V$  επιλέγεται ηθελημένα να έχει πολύ μεγαλύτερη τιμή από τα κόστη παραγωγής των γεννητριών. Σκοπός είναι να δοθεί η δυνατότητα στο πρόβλημα να παραβιάσει έναν περιορισμό γραμμής όταν δεν μπορεί να βρεθεί εφικτή λύση. Βρίσκοντας τις περιπτώσεις που  $T_V > 1$  αναγνωρίζονται οι περιορισμοί που κάνουν μη εφικτή την λύση του προβλήματος Ανακατανομής. Αφαιρώντας τις καταστάσεις N-1 που περιέχουν αυτούς τους περιορισμούς από το αρχικό πρόβλημα Ανακατανομής καθίσταται δυνατή η εύρεση εφικτής λύσης.



Εικόνα 4.3. Διάγραμμα Ροής μεθόδου Ανακατανομής

Γνωρίζοντας τις μεταβολές παραγωγής ανά γεννήτρια και το κόστος παραγωγής κάθε γεννήτριας ανά MW υπολογίζεται το κόστος ανά XRA ως:

$$XRA Cost_g = p_{g,RD} * C_g \quad g \in G \quad (4.24)$$

Το κόστος κάθε XRA μπορεί να είναι θετικό αν οδηγεί σε αύξηση παραγωγής της γεννήτριας ή αρνητικό αν οδηγεί σε μείωση της παραγωγής.

Το άθροισμα όλων των XRAs είναι ίσο με το συνολικό κόστος Ανακατανομής που προκύπτει ως διαφορά της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος Energy Dispatch με την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος Ανακατανομής.

Με αυτή την διαδικασία υπολογίζονται τα απαραίτητα δεδομένα με σκοπό τον επιμερισμό του κόστους Ανακατανομής ανά στοιχείο με συμφόρηση που είναι το επόμενο βήμα στην μεθοδολογία που προτείνει ο ACER.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

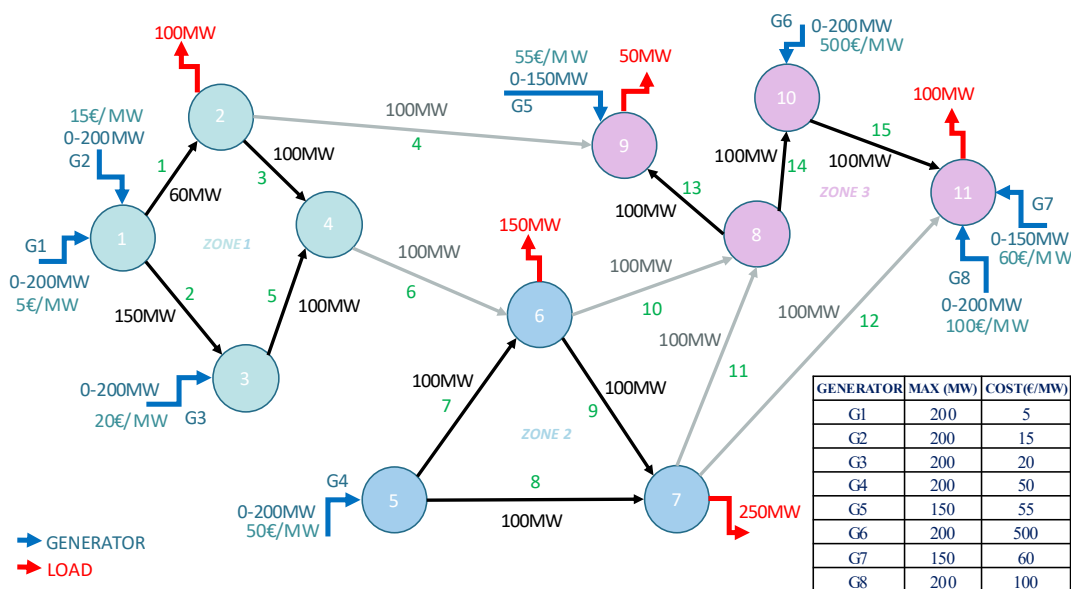
## ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ

### ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει εφαρμογή των μεθόδων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα θα εφαρμοστεί κάθε κομμάτι της μεθοδολογίας ξεχωριστά με σκοπό την πραγματική εφαρμογή και κατανόηση του. Σκοπός είναι να γίνει εφαρμογή του συνόλου των μεθόδων σε μικρά συστήματα μεταφοράς σχεδιασμένα κατάλληλα για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων κάθε βήματος προτού η μεθοδολογία εφαρμοστεί σε μεγαλύτερα συστήματα.

#### 5.1. Εφαρμογή Energy Dispatch

Όπως αναφέρθηκε και στο 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ η εφαρμογή του Energy Dispatch έχει σκοπό την προσομοίωση των αποτελεσμάτων της αγοράς, τα οποία χρησιμοποιούνται στην μεθοδολογία. Γνωρίζοντας τα οικονομοτεχνικά στοιχεία των γεννητριών του συστήματος μεταφοράς μπορεί να βρεθεί η βέλτιστη παραγωγή ενεργού ισχύος των μονάδων με σκοπό την κάλυψη της ζήτησης και το ελάχιστο κόστος παραγωγής. Για αυτό τον σκοπό επιλύεται ένα γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης όπως παρουσιάστηκε στο 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ. Η εφαρμογή του γίνεται αρχικά για το σύστημα μεταφοράς της Εικόνας 5.1:



Εικόνα 5.1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά Συστήματος μεταφοράς

Το σύστημα αποτελείται από τρεις διαφορετικές ζώνες (χρώμα κόμβων) και 5 διασυνοριακά στοιχεία (γραμμές 4,6,10,11,12). Τέλος το συνολικό σύστημα περιέχει 8 γεννήτριες και η συνολική ζήτηση είναι 650MW.

Εφαρμόζοντας Energy Dispatch προκύπτει το αποτέλεσμα του Πίνακα 5.1:

ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	Pg(MW)	ΚΟΣΤΟΣ(€/MW)
G1	200	5
G2	200	15
G3	200	20
G4	50	50
G5	0	55
G6	0	500
G7	0	60
G8	0	100
<b>SUM</b>	<b>650</b>	

Πίνακας 5.1. Αποτέλεσμα Energy Dispatch Συστήματος Εικόνα 5.1

Παρατηρείται ότι όντως η παραγωγή έχει κατανεμηθεί στις φθηνότερες μονάδες. Αρχικά επιλέγεται η γεννήτρια G1 όπου αποδίδει το τεχνικό της μέγιστο. Ακολουθούν οι G2, G3 και τέλος αποδίδονται 50MW στην G4. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται προσομοίωση της αγοράς επόμενης μέρας με οριακή τιμή συνολικού συστήματος ίση με την τιμή της γεννήτριας G4 (50€/MW). Με αυτό τον τρόπο βέβαια μπορεί να προκύψουν περιπτώσεις στις οποίες μία ζώνη μπορεί να μην έχει καθόλου παραγωγή αλλά μόνο κατανάλωση. Τέτοια ζώνη είναι και η ζώνη 3, η οποία έχει συνολικό φορτίο 150MW και μηδενική τοπική παραγωγή. Αυτή η κατάσταση είναι μη ρεαλιστική στα πραγματικά συστήματα μεταφοράς. Με στόχο μία πιο ρεαλιστική λύση εισάγεται το πρόβλημα του Energy Dispatch με τον σεβασμό των ορίων των διασυνοριακών περιορισμών. Με αυτό τον τρόπο περιορίζεται η εμφάνιση καταστάσεων όπως στην περίπτωση της ζώνης 3. Τελικά, με σεβασμό των διασυνοριακών περιορισμών, προκύπτει το αποτέλεσμα του Πίνακα 5.2.

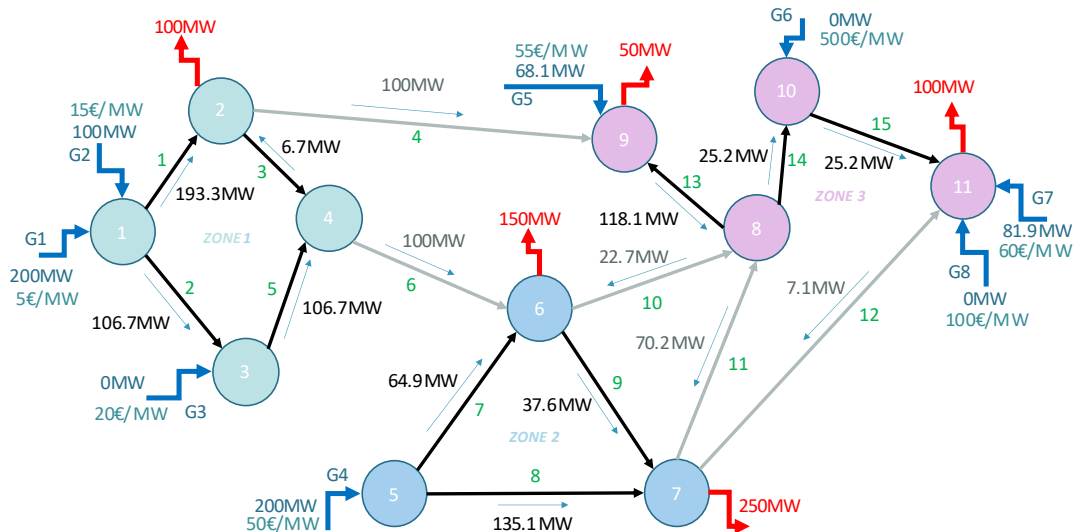
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	Pg(MW)	ΚΟΣΤΟΣ(€/MW)
G1	200	5
G2	100	15
G3	0	20
G4	200	50
G5	68.1	55
G6	0	500
G7	81.9	60
G8	0	100
<b>SUM</b>	<b>650</b>	

Πίνακας 5.2. Αποτέλεσμα Energy Dispatch με σεβασμό των Διασυνοριακών γραμμών του Συστήματος της Εικόνας 5.1

Πλέον η κατανομή της ισχύος στις μονάδες είναι διαφορετική με σκοπό να ικανοποιούνται και τα όρια των διασυνοριακών γραμμών. Με την εφαρμογή τους η ζώνη 3 έχει πλέον δύο μονάδες με συνολική παραγωγή 150MW κάνοντας το πρόβλημα πιο ρεαλιστικό. Βέβαια η τήρηση των ορίων των διασυνοριακών γραμμών οδηγεί σε μία αύξηση του κόστους παραγωγής. Η αύξηση αυτή είναι απολύτως λογική και συμφωνεί με τον εμπειρικό κανόνα ότι η προσθήκη περιορισμών σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης οδηγεί σε πιθανή αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης όταν αυτό είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης.

## 5.2. Εύρεση Συμφόρησης και Εφαρμογή Ανακατανομής

Με την ολοκλήρωση του Energy Dispatch υπολογίζονται οι ροές στις γραμμές μεταφοράς του συστήματος. Όπως περιεγράφηκε και στο 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ για τον υπολογισμό των ροών απαιτείται η εύρεση των συντελεστών PTDF. Εφαρμόζοντας την εξίσωση 4.6 για όλες τις γραμμές του συστήματος προκύπτουν οι ροές όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2. Ροές Συστήματος Εικόνα 5.1 στην κατάσταση N

Σε κάθε κόμβο του συστήματος ισχύει το ισοζύγιο ισχύος. Παρατηρείται επίσης μία κατεύθυνση της ισχύος από τις μονάδες φθηνής παραγωγής προς τις καταναλώσεις των άλλων ζωνών.

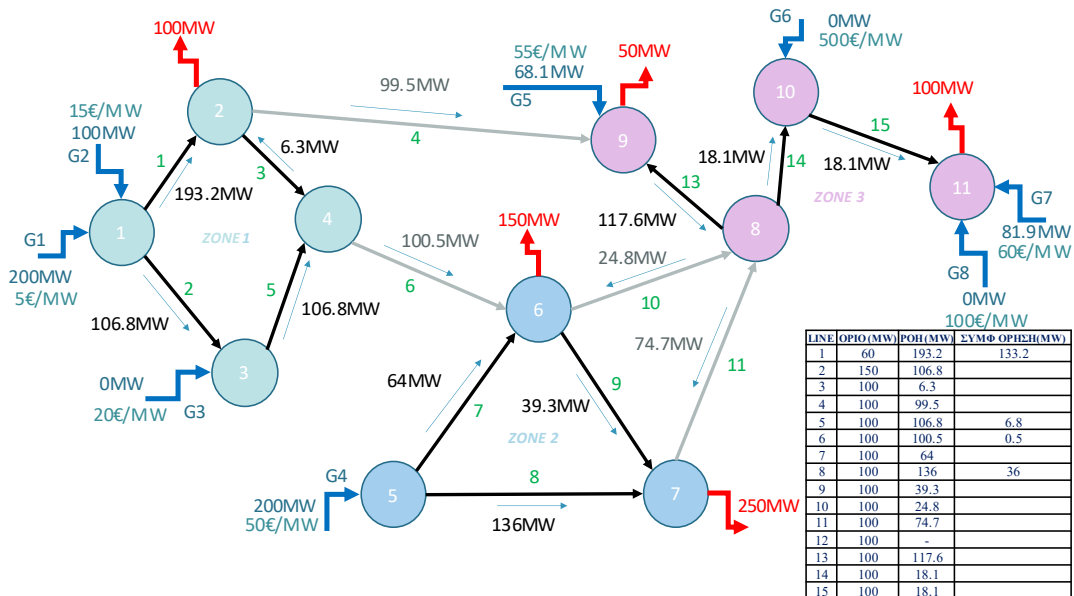
Με στόχο την εφαρμογή του κριτηρίου ασφαλείας πρέπει να γίνει υπολογισμός των ροών για κάθε περίπτωση για την οποία μία γραμμή του συστήματος είναι εκτός λειτουργίας. Για να επιτευχθεί αυτό υπολογίζονται οι συντελεστές PTDF για κάθε περίπτωση που μία γραμμή βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Στο παράδειγμα εφόσον έχουμε 15 γραμμές μεταφοράς έχουμε 15 διαφορετικές καταστάσεις απώλειας στοιχείου που μπορεί να οδηγηθεί το σύστημα, άρα και 15 διαφορετικούς πίνακες PTDF. Με την εύρεση των ροών για την κατάσταση N και κάθε κατάσταση N-1 υπολογίζονται τα στοιχεία με συμφόρηση και πόση είναι αυτή. Οι ροές στις καταστάσεις N-1 υπολογίζονται, όπως ακριβώς και στην κατάσταση N, με χρήση του κατάλληλου πίνακα PTDF της κατάστασης N-1. Οι συμφορήσεις βρίσκονται συγκρίνοντας τις ροές με το τεχνικό όριο των γραμμών.

<b>ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ</b>					
<b>Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας</b>	<b>Στοιχεία με Συμφόρηση</b>	<b>Συμφόρηση<sup>8</sup>(%)</b>	<b>Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας</b>	<b>Στοιχεία με Συμφόρηση</b>	<b>Συμφόρηση(%)</b>
-	1	222.2	8	1	224.8
	5	6.7		4	11.1
	8	35.1		5	5.1
	13	18.1		7	100.0
1	2	100.0		9	17.8
	3	65.1		11	12.8
	5	200.0		13	29.2
	6	34.9		9	1
8	40.2	4	4.3		
2	1	400.0	5		6.1
	4	19.2	8		51.2
	8	32.3	13	22.4	
	13	37.3	10	1	220.7
3	1	227.0		5	7.6
	5	3.8		6	5.7
	6	3.8		8	29.4
	8	35.7	13	12.3	
4	13	14.3	11	1	219.8
	1	198.2		5	8.1
	5	21.1		6	9.6
	6	100.0		8	51.1
5	8	49.6	12	13	8.5
	1	400.0		1	222.0
	4	19.2		5	6.8
	8	32.3		6	0.6
6	13	37.3	13	8	36.0
	1	246.0		13	17.5
	4	100.0		1	193.8
	8	20.6		5	23.7
7	11	3.6	14	6	118.1
	13	118.1		8	52.2
	1	220.8		1	221.7
	5	7.5		5	7.0
	6	5.4		6	1.9
8	8	100.0	15	8	38.3
	13	12.7		13	16.2
	1	221.7		1	221.7
	5	7.0		5	7.0
	6	1.9		6	1.9
9	8	38.3	15	8	38.3
	13	16.2		13	16.2
	1	221.7		1	221.7
	5	7.0		5	7.0
10	6	1.9	15	6	1.9
	8	38.3		8	38.3
	13	16.2		13	16.2
	1	221.7		1	221.7
11	5	7.0	15	5	7.0
	6	1.9		6	1.9
	8	38.3		8	38.3
	13	16.2		13	16.2
12	1	221.7	15	1	221.7
	5	7.0		5	7.0
	6	1.9		6	1.9
	8	38.3		8	38.3
13	13	16.2	15	13	16.2
	1	221.7		1	221.7
	5	7.0		5	7.0
	6	1.9		6	1.9
14	8	38.3	15	8	38.3
	13	16.2		13	16.2
	1	221.7		1	221.7
	5	7.0		5	7.0
15	6	1.9	15	6	1.9
	8	38.3		8	38.3
	13	16.2		13	16.2
	1	221.7		1	221.7

Πίνακας 5.3. Συμφορήσεις που εμφανίζονται στο Συστήμα της Εικόνας 5.1

<sup>8</sup> Το ποσοστό ισχύος που ξεπερνά τη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς του στοιχείου

Πλέον μένει η εφαρμογή Ανακατανομής με σκοπό την επίλυση της συμφόρησης. Η εφαρμογή της Ανακατανομής γίνεται όπως αναφέρθηκε στο 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ. Για το σύστημα της Εικόνας 5.1 εφαρμόζεται Ανακατανομή για το σύνολο των καταστάσεων ξεχωριστά με σκοπό να ελεγχθεί αν είναι μεμονωμένα εφικτή η εφαρμογή της. Προκύπτει ότι στην περίπτωση που η γραμμή 12 τεθεί εκτός λειτουργίας η εφαρμογή Ανακατανομής είναι μη εφικτή. Στο πρόβλημα N-1 που η γραμμή 12 είναι εκτός λειτουργίας, οι ροές φαίνονται στην Εικόνα 5.3.



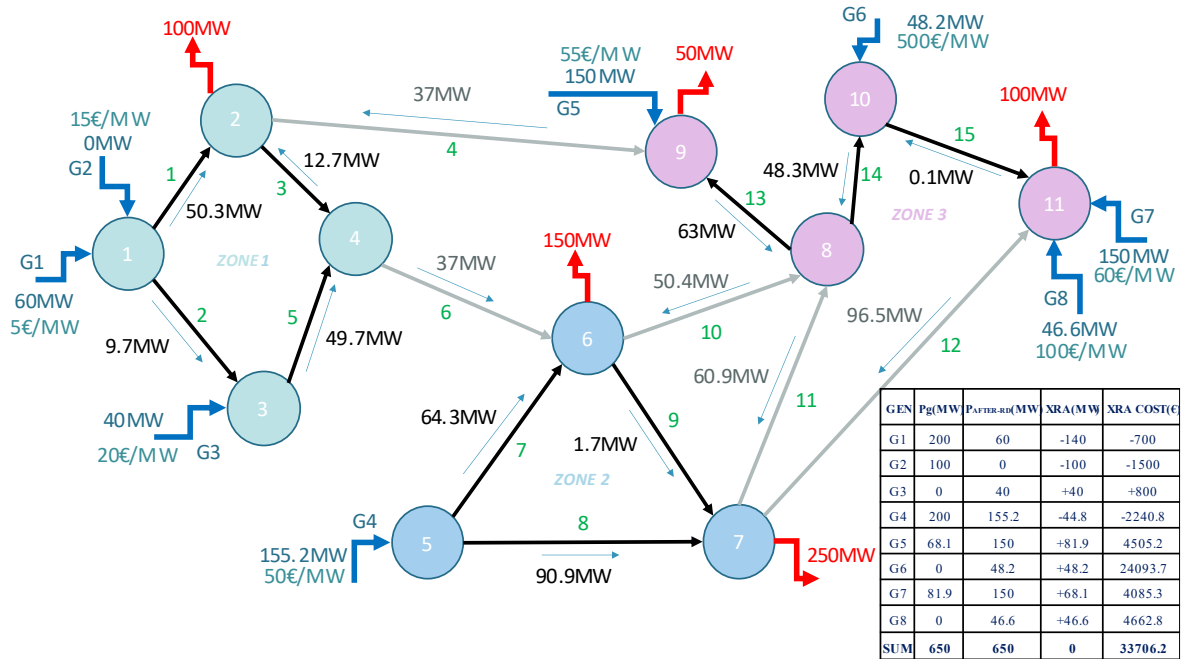
Εικόνα 5.3. Ροές στην περίπτωση που η γραμμή 12 είναι εκτός λειτουργίας

Η αδυναμία εύρεσης λύσης έγκειται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει δυνατότητα κάλυψης των 250MW φορτίου στον κόμβο 7 χωρίς να παραβιάζεται κανένα όριο γραμμής.

Στην συνέχεια εισάγεται το σύνολο των περιορισμών των N-1 καταστάσεων εκτός των περιορισμών της κατάστασης όπου η γραμμή 12 δεν λειτουργεί. Η εύρεση εφικτής λύσης δεν είναι δυνατή, με αποτέλεσμα να εξάγεται το συμπέρασμα της ύπαρξης αντικρουόμενων περιορισμών. Τελικά εφαρμόζεται η επίλυση της παραλλαγής του προβλήματος Ανακατανομής με την δυνατότητα παραβίασης των περιορισμών των γραμμών για τις καταστάσεις N-1. Τελικά από το σύνολο των περιορισμών των γραμμών από τα προβλήματα N-1, εκτός του προβλήματος που η γραμμή 12 είναι εκτός λειτουργίας, το οποίο είναι  $14 \times 14 = 196$  περιορισμοί, προκύπτει ότι παραβιάζονται 6 περιορισμοί οι οποίοι βρίσκονται στα προβλήματα N-1 όπου οι γραμμές 5,7,8,10,11,14 είναι εκτός λειτουργίας.

Τελικά αφαιρώντας τους περιορισμούς των καταστάσεων N-1, όταν οι γραμμές 5,7,8,10,11,12,14 είναι εκτός λειτουργίας, γίνεται δυνατή η εύρεση εφικτής λύσης έπειτα από εφαρμογή Ανακατανομής με το αποτέλεσμα της Εικόνας 5.4.





Εικόνα 5.4 Παραγωγή Έπιπτα από εφαρμογή Ανακατανομής και ροές στην κατάσταση N

Παρατηρείται ότι δεν εμφανίζεται συμφόρηση στην κατάσταση N. Επίσης δεν πρέπει να εμφανίζεται συμφόρηση για τις καταστάσεις N-1 που οι γραμμές 1,2,3,4,6,7,9,13,15 είναι εκτός λειτουργίας. Οι ροές στις γραμμές για τις καταστάσεις αυτές μετά την Ανακατανομή φαίνονται στον Πίνακα 5.4.

	ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (MW)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-	60.0	-53.9	-46.1	100.0	46.1	63.0	92.2	4.4	-45.3	-57.8	-95.6	-53.9	-49.2	-1.0
2	60.0	-	-4.7	-35.3	40.0	35.3	64.6	90.6	1.3	-51.4	-61.5	-96.6	-64.7	-48.2	0.0
3	55.8	103.8	-	-44.3	44.3	44.3	63.3	91.9	3.9	-46.3	-58.5	-95.8	-55.8	-49.0	0.9
4	55.6	4.4	-44.4	-	44.4	0.0	69.7	85.5	-8.7	-71.6	-73.2	-100.0	-100.0	-44.8	3.4
6	55.6	4.4	-44.4	0.0	44.4	-	69.7	85.5	-8.7	-71.6	-73.2	-100.0	-100.0	-44.8	3.4
9	50.3	9.7	-12.9	-36.9	49.7	36.9	63.6	91.6	-	-49.6	-61.7	-96.7	-63.2	-48.1	0.1
13	41.2	18.8	41.2	-100.0	58.8	100.0	55.2	100.0	19.7	-14.5	-39.9	-90.5	-	-54.4	6.2
15	50.3	9.7	-12.7	-37.1	49.7	37.1	64.3	90.8	1.8	-50.4	-60.8	-96.6	-63.0	-48.2	-

Πίνακας 5.4. Ροές στις γραμμές για τις καταστάσεις N-1 μετά από εφαρμογή Ανακατανομής

ΟΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (MW)														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
60	150	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Πίνακας 5.5. Όρια Στοιχείων Συστήματος Εικόνα 5.1

Παρατηρείται ότι στην κατάσταση N και στις καταστάσεις N-1 (που η λύση είναι εφικτή) τηρούνται τα όρια των γραμμών έπειτα από την Ανακατανομή. Με την εφαρμογή Ανακατανομής προκύπτει ο Πίνακας 5.6.

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ</b>	<b><math>P_g</math>(MW)</b>	<b><math>P_{AFTER-RD}</math>(MW)</b>	<b>XRA(MW)</b>	<b>ΚΟΣΤΟΣ XRA(€)</b>
G1	200	60	-140	-700
G2	100	0	-100	-1500
G3	0	40	+40	+800
G4	200	155.2	-44.8	-2240.8
G5	68.1	150	+81.9	4505.2
G6	0	48.2	+48.2	24093.7
G7	81.9	150	+68.1	4085.3
G8	0	46.6	+46.6	4662.8
<b>SUM</b>	<b>650</b>	<b>650</b>	<b>0</b>	<b>33706.2</b>

*Πίνακας 5.6. Εύρεση Βέλτιστων XRAs μετά την εφαρμογή Ανακατανομής στο Σύστημα της Εικόνας 5.1*

Παρατηρείται ότι το ισοζύγιο τηρείται και ότι πλέον με την ανακατανομή της ισχύος παραγωγής στις μονάδες έχει δημιουργηθεί το κόστος επίλυσης της συμφόρησης. Όπως αναφέρθηκε στο 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ, το κόστος αυτό πρέπει να κατανεμηθεί ανά στοιχείο με συμφόρηση XNEC.

### 5.3. Επιμερισμός Κόστους Ανακατανομής ανά Στοιχείο με Συμφόρηση

Για την ολοκλήρωση αυτού του βήματος εφαρμόζεται βελτιστοποίηση για τον επιμερισμό κόστους για κάθε στοιχείο με συμφόρηση ξεχωριστά.

Οι συμφορήσεις οι οποίες εμφανίστηκαν και επιλύθηκαν είναι αυτές του Πίνακα 5.7.

<b>ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ</b>					
<b>Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας</b>	<b>Στοιχεία με Συμφόρηση</b>	<b>Συμφόρηση (%)</b>	<b>Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας</b>	<b>Στοιχεία με Συμφόρηση</b>	<b>Συμφόρηση(%)</b>
-	1	<b>222.2</b>	6	1	<b>246.0</b>
	5	<b>6.7</b>		4	<b>100.0</b>
	8	<b>35.1</b>		8	<b>20.6</b>
	13	<b>18.1</b>		11	<b>3.6</b>
1	2	<b>100.0</b>	9	13	<b>118.1</b>
	3	<b>65.1</b>		1	<b>223.2</b>
	5	<b>200.0</b>		4	<b>4.3</b>
	6	<b>34.9</b>		5	<b>6.1</b>
	8	<b>40.2</b>		8	<b>51.2</b>
2	1	<b>400.0</b>	13	13	<b>22.4</b>
	4	<b>19.2</b>		1	<b>193.8</b>
	8	<b>32.3</b>		5	<b>23.7</b>
	13	<b>37.3</b>		6	<b>118.1</b>
3	1	<b>227.0</b>	15	8	<b>52.2</b>
	5	<b>3.8</b>		1	<b>221.7</b>
	6	<b>3.8</b>		5	<b>7.0</b>
	8	<b>35.7</b>		6	<b>1.9</b>
	13	<b>14.3</b>		8	<b>38.3</b>
4	1	<b>198.2</b>		13	<b>16.2</b>
	5	<b>21.1</b>			
	6	<b>100.0</b>			
	8	<b>49.6</b>			

Πίνακας 5.7. Οι συμφορήσεις που επιλύθηκαν κατά την Ανακατανομή για το Σύστημα της Εικόνας 5.1

Το πρώτο βήμα για την εύρεση του κόστους ανά συμφόρηση είναι η εύρεση των συντελεστών  $a_{i,k,j}$ . Για την εύρεση τους χρησιμοποιήθηκε η βελτιστοποίηση που περιγράφεται στο 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ. Κάθε συμφόρηση εισήχθη στην βελτιστοποίηση ξεχωριστά με σκοπό να αποδοθεί σε αυτή το ελάχιστο δυνατό κόστος. Για το σύστημα της Εικόνας 5.1 προκύπτει ο Πίνακας 5.8.

Πίνακας $a_{i,k,j}$									
Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας	Στοιχεία με Συμφόρηση	ΓΕΝΗΤΡΙΑ							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		Κόστος ΧΡΑς €							
		-700	-1500	+800	-2240.8	4505.2	24093.7	4085.3	4662.8
-	1	0.896	1	1	0	1	0	1	0.76
	5	0	0.197	0	0	0.24	0	0	0
	8	0	0.47	0	1	0	0	1	0.51
	13	0	0.31	0	0	0	0	0.455	0
1	2	0.357	1	1	0	1	0	0.413	0
	3	0.065	1	0	0	1	0	0.400	0
	5	0.714	1	0	0	1	0.07	1	1
	6	0	0.657	0	0	0	0	0.965	0
	8	0	0.877	0	1	0.218	0	1	1
2	1	1	1	1	0	1	0.07	1	1
	4	0	0.43	1	1	0.583	0	0	0
	8	0	0.275	0	1	0	0	1	0.091
	13	0	0.863	1	0	0	0	0.68	0
3	1	0.972	1	1	0	1	0	1	0.987
	5	0	0.098	0	0	0	0	0.145	0
	6	0	0.098	0	0	0	0	0.145	0
	8	0	0.519	0	1	0	0	1	0.613
	13	0	0.486	1	0	0	0	0.126	0
4	1	0.943	1	1	0	1	0	1	0.9
	5	0	0.467	0	0	0.57	0	0	0
	6	0	1	0	0	1	0	0.266	0
	8	0.152	1	0	1	1	0	1	0.345
6	1	0.954	1	1	0	1	0	1	0.936
	4	0	1	0	0	1	0	0.266	0
	8	0	0	0.881	0.786	0	0	0	0
	11	0	0.09	0	0	0	0	0.132	0
	13	0.129	1	0	0	0	0.07	1	1
9	1	0.897	1	1	0	1	0	1	0.763
	4	0	0	0.185	1	0.457	0	0	0
	5	0	0.179	0	0	0.218	0	0	0
	8	0.115	1	0	1	0.565	0	1	1
	13	0	0.366	0	0	0	0	0.538	0
13	1	0.756	1	1	0	1	0	1	0.339
	5	0	0.524	0	0	0	0	0.77	0
	6	0.129	1	0	0	0	0.07	1	1
	8	0.129	1	0	1	0	1	1	1
15	1	0.897	1	1	0	1	0	1	0.763
	5	0	0.205	0	0	0.25	0	0	0
	6	0	0.043	0	0	0	0	0.063	0
	8	0	0.443	0	1	0	0	1	0.451
	13	0	0.646	1	0	0	0	0.361	0

Πίνακας 5.8. Πίνακας  $a_{i,k,j}$  για το Σύστημα της Εικόνας 5.1

Στην συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός του ελάχιστου δυνατού κόστους για κάθε στοιχείο με συμφόρηση  $r_{i,k}$  που στο παράδειγμα φαίνονται στον Πίνακα 5.9.

Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας	Στοιχεία με Συμφόρηση	$r_{i,k}$
-	1	<b>91.75</b>
	5	<b>6.68</b>
	8	<b>29.84</b>
	13	<b>11.85</b>
1	2	<b>44.50</b>
	3	<b>38.99</b>
	5	<b>109.88</b>
	6	<b>25.09</b>
	8	<b>52.41</b>
2	1	<b>114.97</b>
	4	<b>4.61</b>
	8	<b>15.76</b>
	13	<b>19.41</b>
3	1	<b>100.32</b>
	5	<b>3.76</b>
	6	<b>3.76</b>
	8	<b>33.33</b>
	13	<b>4.97</b>
4	1	<b>97.03</b>
	5	<b>15.86</b>
	6	<b>34.73</b>
	8	<b>53.94</b>
6	1	<b>98.37</b>
	4	<b>34.73</b>
	8	<b>-8.97</b>
	11	<b>3.44</b>
	13	<b>75.1</b>
9	1	<b>91.89</b>
	4	<b>-0.3</b>
	5	<b>6.07</b>
	8	<b>63.44</b>
	13	<b>13.99</b>
13	1	<b>75.93</b>
	5	<b>20.04</b>
	6	<b>75.01</b>
	8	<b>246.35</b>
15	1	<b>91.90</b>
	5	<b>6.95</b>
	6	<b>1.65</b>
	8	<b>27.89</b>
	13	<b>11.09</b>

Πίνακας 5.9. Υπολογισμένα  $r_{i,k}$  για το Σύστημα της Εικόνας 5.1

Στην συνέχεια πρέπει να γίνει επεξεργασία των  $r_{i,k}$  που βρέθηκαν όπως περιγράφεται στο 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ. Τελικά προκύπτουν τα εξής  $r_{i,k}$ :

Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας	Στοιχείο με Συμφόρηση	$r_{i,k}$
-	1	91.75
	5	6.68
	8	29.84
	13	11.85
1	2	44.50
	3	38.99
	5	109.88
	6	25.09
	8	52.41
2	1	114.97
	4	4.61
	8	15.76
	13	19.41
3	1	100.32
	5	3.76
	6	3.76
	8	33.33
	13	4.97
4	1	97.03
	5	15.86
	6	34.73
	8	53.94
6	1	98.37
	4	34.73
	8	0
	11	3.44
	13	75.1
9	1	91.89
	4	0
	5	6.07
	8	63.44
	13	13.99
13	1	75.93
	5	20.04
	6	75.01
	8	246.35
15	1	91.90
	5	6.95
	6	1.65
	8	27.89
	13	11.09

Πίνακας 5.10. Υπολογισμένα  $r_{i,k}$  για το Σύστημα της Εικόνας 5.1 μετά την εφαρμογή του κανόνα του Πίνακα 3.2

Παρατηρείται ο μηδενισμός των  $r_{8,6}$  και  $r_{4,9}$ . Αυτό είναι λογικό να συμβαίνει διότι το σύστημα βρίσκεται στην πρώτη περίπτωση του Πίνακα 3.2, εφόσον το  $C^{all}$  είναι μεγαλύτερο του μηδενός και λιγότερα από τα μισά  $r_{i,k}$  είναι μικρότερα του μηδενός.

Τελικά υπολογίζεται το κόστος ανά στοιχείο με συμφόρηση όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.11.

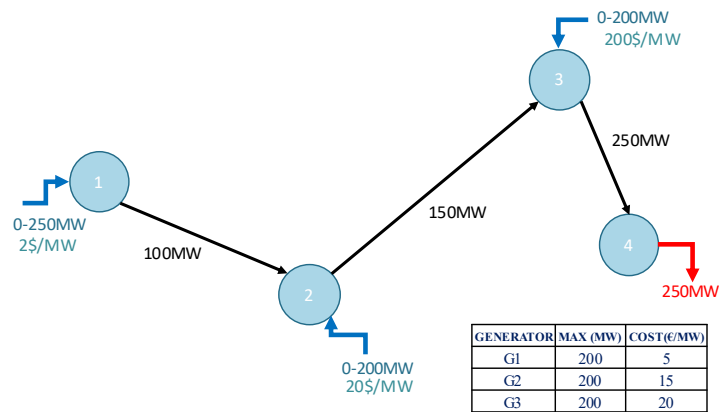
Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας	Στοιχείο με Συμφόρηση	$c_{i,k}$ (€)	Ποσοστό Επί του Συνολικού Κόστους(%)
-	1	1665.1	4.94
	5	121.3	0.36
	8	541.5	1.61
	13	215.0	0.64
1	2	807.6	2.40
	3	707.6	2.10
	5	1993.9	5.92
	6	455.4	1.35
	8	951.1	2.82
2	1	2086.4	6.19
	4	83.6	0.25
	8	286.0	0.85
	13	352.2	1.04
3	1	1820.5	5.40
	5	68.3	0.20
	6	68.3	0.20
	8	604.9	1.79
	13	90.2	0.27
4	1	1760.8	5.22
	5	287.8	0.85
	6	630.3	1.87
	8	978.8	2.90
6	1	1785.2	5.30
	4	630.3	1.87
	11	62.4	0.19
	13	1362.8	4.04
9	1	1667.5	4.95
	5	110.2	0.33
	8	1151.3	3.42
	13	253.9	0.75
13	1	1378.0	4.09
	5	363.7	1.08
	6	1362.8	4.04
	8	4470.6	13.26
15	1	1667.7	4.95
	5	126.1	0.37
	6	29.9	0.09
	8	506.0	1.50
	13	201.3	0.60
<b>SUM</b>		<b>33706.2</b>	<b>100</b>

Πίνακας 5.11. Υπολογισμένα  $r_{i,k}$  μετά την εφαρμογή του κανόνα του Πίνακα 3.2 για το Σύστημα της Εικόνας 5.1

Παρατηρείται ότι το άθροισμα των τιμών των  $r_{i,k}$  του Πίνακα 5.10 δεν είναι ίσο με το συνολικό κόστος Ανακατανομής. Αυτό είναι λογικό διότι το κόστος  $r_{i,k}$  είναι το ελάχιστο κόστος επίλυσης

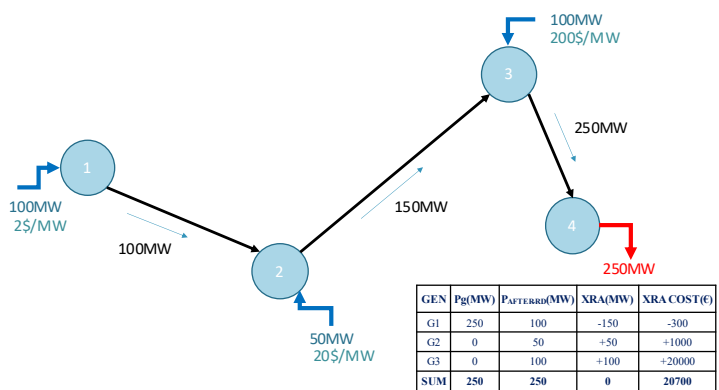
της συμφόρησης ανά στοιχείο με συμφόρηση μεμονωμένα. Δηλαδή κατά την εφαρμογή της βελτιστοποίησης, που περιγράφεται στην 3.1, αποδίδονται τα λιγότερο κοστοβόρα XRAs για την επίλυση της κάθε συμφόρησης ξεχωριστά. Τελικά από τα  $r_{i,k}$  που προκύπτουν, το συνολικό κόστος μοιράζεται αναλογικά, με το στοιχείο για το οποίο έχει υπολογιστεί το μεγαλύτερο  $r_{i,k}$  να επωμίζεται το μεγαλύτερο κόστος. Από τον Πίνακα 5.11 παρατηρείται ότι το μέγιστο κόστος επίλυσης της συμφόρησης επωμίζεται το στοιχείο 8, όταν το στοιχείο 13 είναι εκτός λειτουργίας, και για το οποίο έχει υπολογιστεί το μέγιστο  $r_{i,k}$ . Τελικά το άθροισμα των  $c_{i,k}$  του Πίνακα 5.11 είναι ίσο με το συνολικό κόστος Ανακατανομής.

Επειδή δεν είναι ξεκάθαρο πλήρως αν η βελτιστοποίηση για την ελαχιστοποίηση του κόστους σε κάθε στοιχείο με συμφόρηση λειτουργεί ορθά θα εφαρμοστεί η ίδια μέθοδος σε ένα πολύ πιο απλό σύστημα με σκοπό να επιβεβαιωθεί η σωστή της λειτουργία. Το σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται φαίνεται στην Εικόνα 5.5.



Εικόνα 5.5. Απλοποιημένο Σύστημα για την επεξήγηση και επαλήθευση της μεθόδου Επιμερισμού Κόστους Ανακατομής ανά XNEC

Στο σύστημα υπάρχουν τρεις γεννήτριες, τρεις γραμμές και 4 κόμβοι. Αρχικά ακολουθώντας την μεθοδολογία με την εφαρμογή του Energy Dispatch το σύνολο της παραγωγής καταλήγει στην γεννήτρια του κόμβου 1, ως φθηνότερη των τριών. Άμεσα γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη συμφόρησης στις γραμμές 1-2 και 2-3. Συγκεκριμένα υπάρχει συμφόρηση 150MW στην γραμμή 1-2 και 100MW στην γραμμή 2-3. Με εφαρμογή Ανακατανομής προκύπτει η κατάσταση της Εικόνας 5.6.



Εικόνα 5.6. Εμφάνιση Συμφόρησης στις γραμμές 1-2 και 2-3



Πλέον πρέπει να χωριστεί το κόστος στις γραμμές με συμφόρηση. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο του 3<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ προκύπτει το αποτέλεσμα του Πίνακα 5.12.

Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας	Στοιχεία με Συμφόρηση	$c_{i,k}$ (€)
-	1-2	10580
	2-3	10120
<b>SUM</b>		<b>20700</b>

Πίνακας 5.12. Υπολογιστικό Αποτέλεσμα Εφαρμογής της μεθόδου Επιμερισμού Κόστους Ανακατομής ανά ΧΝΕC

Για την επαλήθευση του αποτελέσματος το πρόβλημα θα λυθεί αλγεβρικά. Αρχικά υπολογίζεται ο πίνακας PTDF όπως περιγράφεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ως:

Πίνακας PTDFs				
	Κόμβος			
Στοιχείο	1	2	3	4
1-2	0	-1	-1	-1
2-3	0	0	-1	-1
3-4	0	0	0	-1

Πίνακας 5.13. Συντελεστές PTDFs του συστήματος της Εικόνας 5.5

Στην συνέχεια οι συντελεστές  $a_{i,k,j}$  υπολογίζονται ως:

Πίνακας $a_{i,k,j}$				
Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας	Στοιχεία με Συμφόρηση	ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ		
		1	2	3
		Κόστος ΧΡAs €		
		-300	+1000	+20000
-	1-2	1	1	1
	2-3	0.667	0	1
	3-4	0	0	0

Πίνακας 5.14. Συντελεστές  $a_{i,k,j}$  του συστήματος της Εικόνας 5.5

Για την επαλήθευση των συντελεστών  $a_{i,k,j}$  αρκεί να ελεγχθεί αν ικανοποιούνται οι περιορισμοί οι οποίοι εφαρμόζονται κατά την βελτιστοποίηση.

Αρχικά για τις γραμμές 1-2 και 2-3 ελέγχεται αν ικανοποιείται ο περιορισμός της εξίσωσης 3.3

$$\text{Line 1} - 2 : -150 * 1 + 50 * 1 + 100 * 1 = 0$$

$$\text{Line 2} - 3 : -150 * 0.667 + 50 * 0 + 100 * 1 = 0$$

Ο περιορισμός ικανοποιείται.

Ελέγχεται αν ικανοποιείται ο περιορισμός της εξίσωσης 3.5

$$\text{Line 1} - 2 : -150 * 1 * 0 + 50 * 1 * (-1) + 100 * 1 * (-1) = -150$$

$$\text{Line 2} - 3 : -150 * 0.667 * 0 + 50 * 0 * (-1) + 100 * 1 * (-1) = -100$$

Ο περιορισμός ικανοποιείται.

Προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι τιμές  $a_{i,k,j}$  είναι βέλτιστες.

Στην συνέχεια υπολογίζονται οι συντελεστές  $r_{i,k}$  σύμφωνα με την εξίσωση 3.7

Επιλύοντας αλγεβρικά για την εύρεση των τιμών ως:

$$r_{1-2} = \frac{-300 * 1 + 1000 * 1 + 20000 * 1}{1 + 1 + 1 + 0.667 + 0 + 1} = 4435.4$$
$$r_{2-3} = \frac{-300 * 0.667 + 1000 * 0 + 20000 * 1}{1 + 1 + 1 + 0.667 + 0 + 1} = 4242.5$$

Τελικά υπολογίζονται τα κόστη ανά στοιχείο με συμφόρηση  $c_{i,k}$  σύμφωνα με την εξίσωση 3.8.

Επιλύοντας αλγεβρικά για την εύρεση των τιμών ως:

$$c_{1-2} = \frac{4435.4}{4435.4 + 4242.5} * 20700 = 10580$$
$$c_{2-3} = \frac{4242.5}{4435.4 + 4242.5} * 20700 = 10120$$

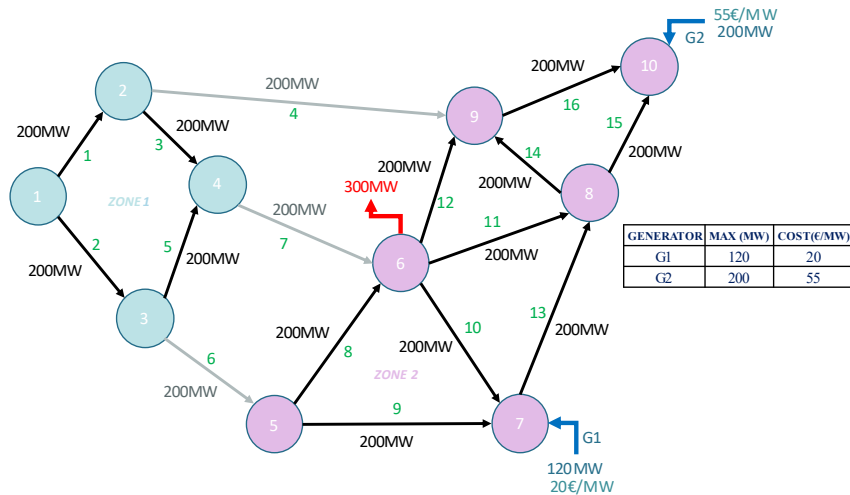
Το αλγεβρικό αποτέλεσμα είναι ίδιο με το υπολογιστικό αποτέλεσμα του Πίνακα 5.12.

## 5.4. Αποδόμηση της Ροής

Με σκοπό να εφαρμοστούν οι μέθοδοι αποδόμησης της ροής, οι οποίες περιεγράφηκαν αναλυτικά στο 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ, σε μεγάλα συστήματα πρέπει αρχικά να γίνει εφαρμογή και μελέτη της συμπεριφοράς τους σε απλοϊκά συστήματα ώστε να διασφαλιστεί η άρτια εφαρμογή τους στο σύνολο των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

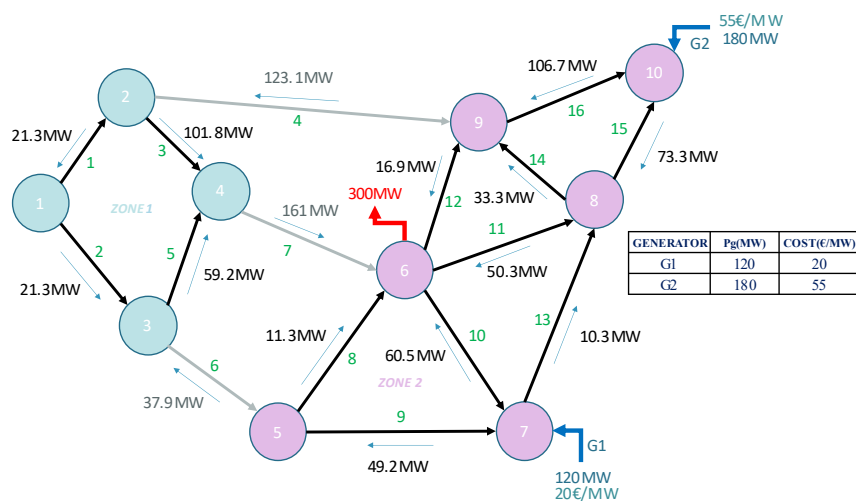
### 5.4.1. Σύστημα Δύο Ζωνών με την μία ζώνη χωρίς παραγωγή και κατανάλωση

Αρχικά θα μελετηθεί το σύστημα της Εικόνας 5.7.



Εικόνα 5.7. Σύστημα Δύο Ζωνών με την μία ζώνη χωρίς παραγωγή και κατανάλωση

Το σύστημα αποτελείται από δύο ζώνες. Το ενδιαφέρον που εμφανίζει το συγκεκριμένο σύστημα είναι η μη ρεαλιστική κατάσταση κατά την οποία η ζώνη 1 δεν εμπεριέχει κανένα φορτίο και καμία γεννήτρια. Σκοπός του συγκεκριμένου συστήματος είναι η επαλήθευση ότι το είδος των ροών που θα αναγνωριστεί από τις μεθόδους αποδόμησης της ροής θα είναι μόνο Internal και Loop Flows εφόσον η παραγωγή και η κατανάλωση βρίσκεται πάντα στην ίδια ζώνη. Αρχικά με εφαρμογή Energy Dispatch και ροής φορτίου προκύπτει η κατάσταση της Εικόνας 5.8:



Εικόνα 5.8. Παραγωγή και Ροή Φορτίου έπειτα από Εφαρμογή Energy Dispatch για το σύστημα της Εικόνας 5.7

Στην συνέχεια γίνεται εφαρμογή Αποδόμησης Ροής και με τις τρεις μεθόδους που περιεγράφηκαν στο 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ.

<b>Power Flow Coloring (PFC)-ACER</b>						
Στοιχείο	Internal Flow (MW)		Loop Flow (MW)		Allocated Flow (MW)	
	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH1	ZΩNH2
1	0	0	0	-21.3	0	0
2	0	0	0	21.3	0	0
3	0	0	0	101.8	0	0
4	0	0	0	-123.1	0	0
5	0	0	0	59.2	0	0
6	0	0	0	-37.9	0	0
7	0	0	0	161	0	0
8	0	11.3	0	0	0	0
9	0	-49.2	0	0	0	0
10	0	-60.5	0	0	0	0
11	0	-50.3	0	0	0	0
12	0	-16.9	0	0	0	0
13	0	10.3	0	0	0	0
14	0	33.3	0	0	0	0
15	0	-73.3	0	0	0	0
16	0	-106.7	0	0	0	0

Πίνακας 5.15. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.7

<b>Full Line Decomposition (FLD)</b>						
Στοιχείο	Internal Flow (MW)		Loop Flow (MW)		Allocated Flow (MW)	
	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH1	ZΩNH2
1	0	0	0	-21.3	0	0
2	0	0	0	21.3	0	0
3	0	0	0	101.8	0	0
4	0	0	0	-123.1	0	0
5	0	0	0	59.2	0	0
6	0	0	0	-37.9	0	0
7	0	0	0	161	0	0
8	0	11.3	0	0	0	0
9	0	-49.2	0	0	0	0
10	0	-60.5	0	0	0	0
11	0	-50.3	0	0	0	0
12	0	-16.9	0	0	0	0
13	0	10.3	0	0	0	0
14	0	33.3	0	0	0	0
15	0	-73.3	0	0	0	0
16	0	-106.7	0	0	0	0

Πίνακας 5.16. Αποδόμηση της Ροής με χρήση FLD για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.7

<b>Power Flow Coloring (PFC)-Vlaisavljevic</b>						
Στοιχείο	Internal Flow (MW)		Loop Flow (MW)		Allocated Flow (MW)	
	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH1	ZΩNH2
1	0	0	0	-21.3	0	0
2	0	0	0	21.3	0	0
3	0	0	0	101.8	0	0
4	0	0	0	-123.1	0	0
5	0	0	0	59.2	0	0
6	0	0	0	-37.9	0	0
7	0	0	0	161	0	0

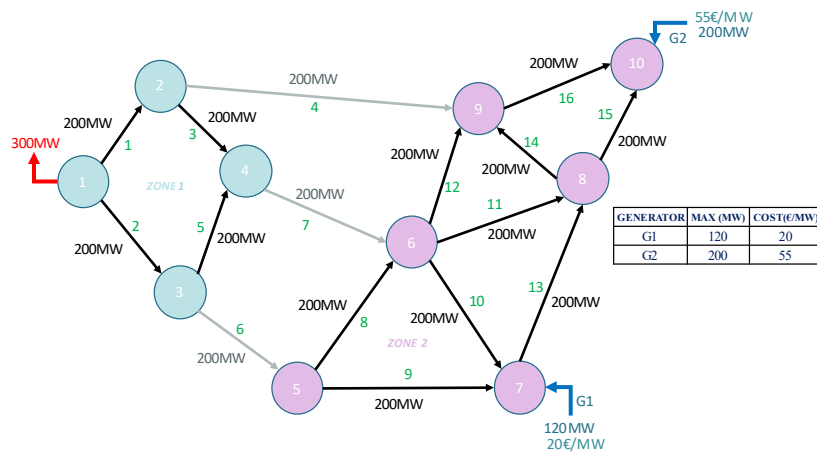
8	0	11.3	0	0	0	0
9	0	-49.2	0	0	0	0
10	0	-60.5	0	0	0	0
11	0	-50.3	0	0	0	0
12	0	-16.9	0	0	0	0
13	0	10.3	0	0	0	0
14	0	33.3	0	0	0	0
15	0	-73.3	0	0	0	0
16	0	-106.7	0	0	0	0

Πίνακας 5.17. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC-Vlaisavljevic για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.7

Τα αποτελέσματα των μεθόδων είναι ίδια και αναγνωρίζουν την ύπαρξη Loop Flow στα στοιχεία που δεν ανήκουν στην ζώνη 2 και Internal Flow στα στοιχεία που ανήκουν στην ζώνη 1.

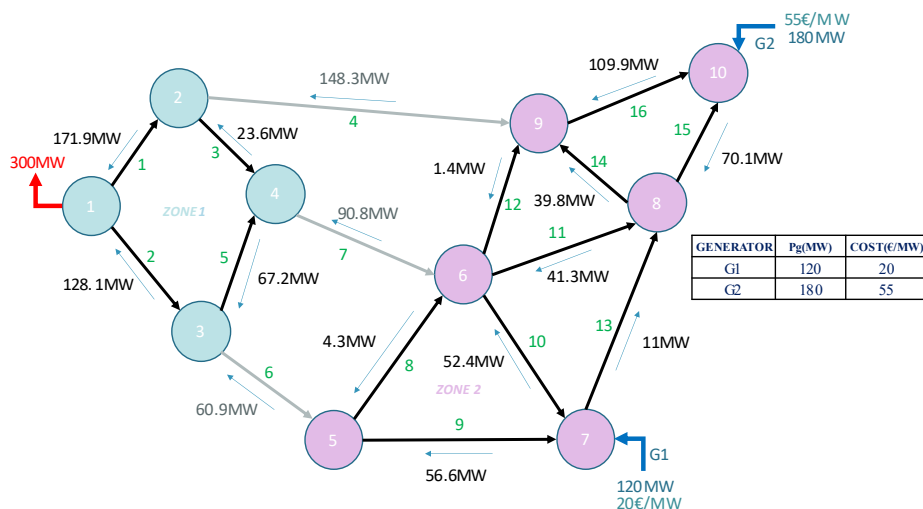
#### 5.4.2. Σύστημα Δύο Ζωνών με την μία ζώνη να έχει μόνο κατανάλωση

Στο ίδιο σύστημα αν το φορτίο μεταφερθεί στην ζώνη ένα θα πρέπει οι ροές να αποτελούνται μόνο από Allocated Flows. Το φορτίο μεταφέρεται στον κόμβο 1 και το σύστημα μετατρέπεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.9.



Εικόνα 5.9. Σύστημα Δύο Ζωνών με την μία ζώνη να έχει μόνο κατανάλωση

Με εφαρμογή Energy Dispatch και ροής φορτίου προκύπτει η κατάσταση της Εικόνας 5.10.



Εικόνα 5.10. Παραγωγή και Ροή Φορτίου έπειτα από Εφαρμογή Energy Dispatch για το σύστημα της Εικόνας 5.9

Εφαρμόζοντας Αποδόμηση της ροής καταλήγουμε στο εξής αποτέλεσμα:

<b>Power Flow Coloring (PFC)-ACER</b>						
Στοιχείο	Internal Flow (MW)		Loop Flow (MW)		Allocated Flow (MW)	
	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH1	ZΩNH2
1	0	0	0	0	0	-171.9
2	0	0	0	0	0	-128.1
3	0	0	0	0	0	-23.6
4	0	0	0	0	0	-148.3
5	0	0	0	0	0	-67.3
6	0	0	0	0	0	-60.9
7	0	0	0	0	0	-90.8
8	0	0	0	0	-4.3	0
9	0	0	0	0	-56.6	0
10	0	0	0	0	-52.4	0
11	0	0	0	0	-41.3	0
12	0	0	0	0	-1.4	0
13	0	0	0	0	11	0
14	0	0	0	0	39.8	0
15	0	0	0	0	-70.1	0
16	0	0	0	0	-109.9	0

Πίνακας 5.18. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.9

<b>Full Line Decomposition (FLD)</b>						
Στοιχείο	Internal Flow (MW)		Loop Flow (MW)		Allocated Flow (MW)	
	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH1	ZΩNH2
1	0	0	0	0	0	-171.9
2	0	0	0	0	0	-128.1
3	0	0	0	0	0	-23.6
4	0	0	0	0	0	-148.3
5	0	0	0	0	0	-67.3
6	0	0	0	0	0	-60.9
7	0	0	0	0	0	-90.8
8	0	0	0	0	-4.3	0
9	0	0	0	0	-56.6	0
10	0	0	0	0	-52.4	0
11	0	0	0	0	-41.3	0
12	0	0	0	0	-1.4	0
13	0	0	0	0	11	0
14	0	0	0	0	39.8	0
15	0	0	0	0	-70.1	0
16	0	0	0	0	-109.9	0

Πίνακας 5.19. Αποδόμηση της Ροής με χρήση FLD για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.9

<b>Power Flow Coloring (PFC)-Vlaisavljevic</b>						
Στοιχείο	Internal Flow (MW)		Loop Flow (MW)		Allocated Flow (MW)	
	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH1	ZΩNH2
1	0	0	0	0	0	-171.9
2	0	0	0	0	0	-128.1
3	0	0	0	0	0	-23.6
4	0	0	0	0	0	-148.3
5	0	0	0	0	0	-67.3
6	0	0	0	0	0	-60.9
7	0	0	0	0	0	-90.8
8	0	0	0	0	-4.3	0
9	0	0	0	0	-56.6	0

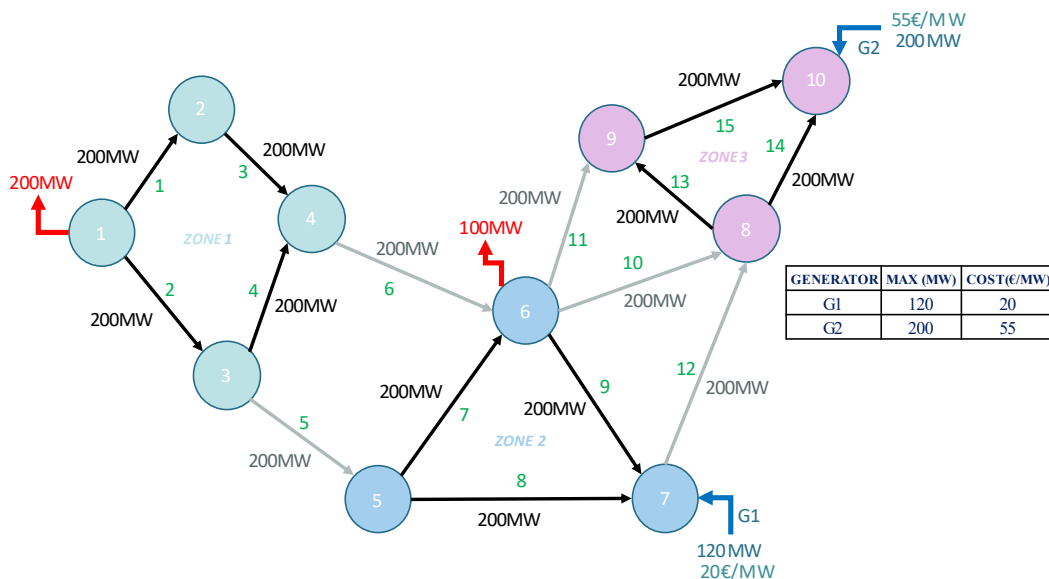
10	0	0	0	0	-52.4	0
11	0	0	0	0	-41.3	0
12	0	0	0	0	-1.4	0
13	0	0	0	0	11	0
14	0	0	0	0	39.8	0
15	0	0	0	0	-70.1	0
16	0	0	0	0	-109.9	0

Πίνακας 5.20. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC-Vlaisavljenic για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.9

Οι μέθοδοι έχουν το ίδιο αποτέλεσμα και όπως είναι λογικό αναγνωρίζουν μόνο Allocated Flows στις γραμμές εφόσον η παραγωγή καλύπτει φορτία εξωτερικά της ζώνης. Επίσης παρατηρείται ότι ανάλογα με την ζώνη που ανήκει η γραμμή, τα Allocated Flows οφείλονται σε διαφορετική ζώνη. Αυτό συμβαίνει διότι στα στοιχεία της Ζώνης 1 αναγνωρίζονται εισαγωγικές ροές από την Ζώνη 2, ενώ στα στοιχεία της Ζώνης 2 αναγνωρίζονται εξαγωγικές ροές στην Ζώνη 1. Στα διασυννοριακά στοιχεία, εφόσον ανήκουν και στις δύο ζώνες, μπορεί να αναγνωριστούν είτε ως εισαγωγικές είτε ως εξαγωγικές ροές, ανάλογα την ζώνη αναφοράς.

### 5.4.3. Σύστημα Τριών Ζωνών με την μία ζώνη να έχει μόνο κατανάλωση

Στην συνέχεια θα γίνει εφαρμογή των μεθόδων αποδόμησης της ροής σε ένα απλοϊκό σύστημα τριών ζωνών πριν αυτές εφαρμοστούν σε μεγαλύτερα συστήματα. Το σύστημα στο οποίο θα γίνει εφαρμογή των μεθόδων αποδόμησης της ροής είναι αυτό της Εικόνας 5.11.



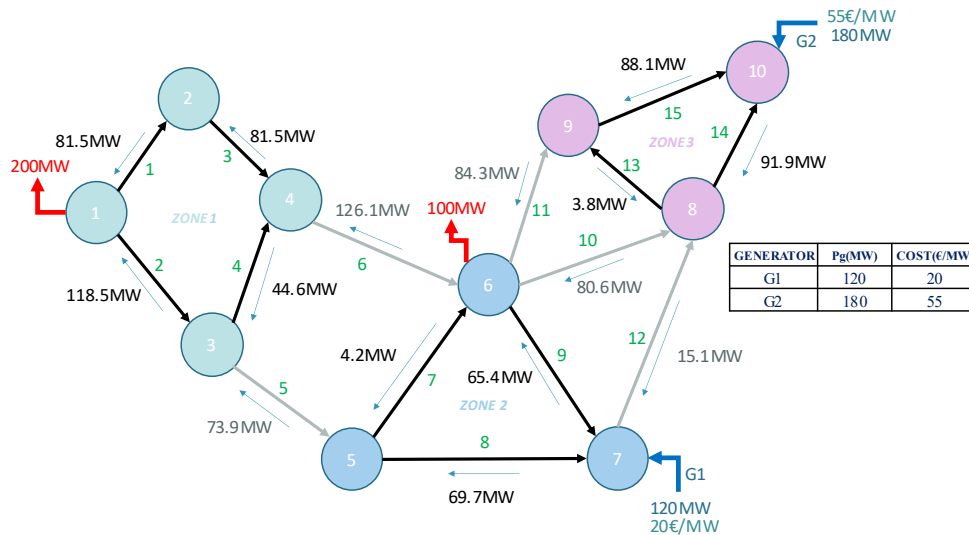
Εικόνα 5.11. Σύστημα Τριών Ζωνών με την μία ζώνη να έχει μόνο κατανάλωση

Το σύστημα της Εικόνας 5.11 αποτελείται από τρεις ζώνες. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η ζώνη 1 και 3 έχουν αντίστοιχα μόνο φορτίο και παραγωγή. Η ζώνη 2 εμπεριέχει και φορτίο και παραγωγή. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι δεν υπάρχει σύνδεση της ζώνης 3 με την ζώνη 1. Το αναμενόμενο αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι το εξής:

- 1) Η πλειοψηφία των ροών που εντοπίζονται στην ζώνη 1 και στην ζώνη 3 είναι αντίστοιχα εισαγωγικές και εξαγωγικές.

- 2) Υπάρχει πιθανότητα ύπαρξης Loop Flow στην ζώνη 1 και στην ζώνη 3 από την ζώνη 2.
- 3) Βέβαιη ύπαρξη Internal Flow στην ζώνη 2 και μόνο στην ζώνη 2.
- 4) Βέβαιη ύπαρξη Transit Flow στην ζώνη 2 λόγω μεταφοράς ισχύος από την γεννήτρια G2 (ζώνη 3) στο φορτίο του κόμβου 1 (ζώνη 1).

Με εφαρμογή Energy Dispatch και ροής φορτίου προκύπτει η κατάσταση της Εικόνας 5.12.



Εικόνα 5.12. Παραγωγή και Ροή Φορτίου έπειτα από Εφαρμογή Energy Dispatch για το σύστημα της Εικόνας 5.11

Εφαρμόζοντας Αποδόμηση της Ροής προκύπτει το κάτωθι αποτέλεσμα:

Power Flow Coloring (PFC)-ACER									
Στοιχείο	Internal Flow (MW)			Loop Flow (MW)			Allocated Flow (MW)		
	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3
1	0	0	0	0	8	0	-79.6	0	-9.9
2	0	0	0	0	-8	0	-120.4	0	9.9
3	0	0	0	0	8	0	-79.6	0	-9.9
4	0	0	0	0	24	0	-38.7	0	-29.9
5	0	0	0	0	-32	0	-81.8	0	39.9
6	0	0	0	0	32	0	-118.2	0	-39.9
7	0	3.9	0	0	0	0	-3.3	0	-4.8
8	0	-35.8	0	0	0	0	-78.6	0	44.7
9	0	-39.7	0	0	0	0	-75.2	0	49.5
10	0	0	0	0	-15.3	0	-28.9	0	-36.4
11	0	0	0	0	-9.2	0	-17.3	0	-57.8
12	0	0	0	0	24.5	0	46.2	0	-85.8
13	0	0	0	0	6	0	11.6	0	-21.4
14	0	0	0	0	3	0	5.8	0	-100.7
15	0	0	0	0	-3	0	-5.8	0	-79.3

Πίνακας 5.21. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.11



<b>Full Line Decomposition (FLD)</b>									
Στοιχείο	Internal Flow (MW)			Loop Flow (MW)			Allocated Flow (MW)		
	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3
1	0	0	0	0	2	0	0	-37.6	-45.9
2	0	0	0	0	-2	0	0	-57.1	-59.4
3	0	0	0	0	2	0	0	-37.6	-45.9
4	0	0	0	0	6	0	0	-18.3	-32.3
5	0	0	0	0	-8	0	-19.4	-19.4	-27.1
6	0	0	0	0	8	0	-28	-28	-78.1
7	0	1	0	0	0	0	-1.6	0	-3.6
8	0	-9	0	0	0	0	-37.2	0	-23.4
9	0	-10	0	0	0	0	-35.6	0	-19.8
10	0	0	0	0	-3.9	0	0	-13.7	-63
11	0	0	0	0	-2.3	0	0	-8.2	-73.8
12	0	0	0	0	6.2	0	0	21.9	-43.2
13	0	0	0	0	1.6	0	-6.5	1.1	0
14	0	0	0	0	0.7	0	-55.8	-36.8	0
15	0	0	0	0	-0.7	0	-49.4	-38	0

Πίνακας 5.22. Αποδόμηση της Ροής με χρήση FLD για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.11.

<b>Power Flow Coloring (PFC)-Vlaisavljevic</b>									
Στοιχείο	Internal Flow (MW)			Loop Flow (MW)			Allocated Flow (MW)		
	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3
1	0	0	0	0	8	0	0	-8	-81.5
2	0	0	0	0	-8	0	0	-12	-98.5
3	0	0	0	0	8	0	0	-8	-81.5
4	0	0	0	0	24	0	0	-3.9	-64.7
5	0	0	0	0	-32	0	-4.05	-4.05	-33.8
6	0	0	0	0	32	0	-5.9	-5.9	-146.3
7	0	3.9	0	0	0	0	-0.3	0	-7.8
8	0	-35.9	0	0	0	0	-7.8	0	-26
9	0	-39.7	0	0	0	0	-7.5	0	-18.2
10	0	0	0	0	-15.3	0	0	-2.9	-62.4
11	0	0	0	0	-9.2	0	0	-1.7	-73.4
12	0	0	0	0	24.5	0	0	4.6	-44.2
13	0	0	0	0	6	0	-11	1.2	0
14	0	0	0	0	3	0	-95.5	0.6	0
15	0	0	0	0	-3	0	-84.5	-0.6	0

Πίνακας 5.23. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC-Vlaisavljevic για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.11.

Όλες οι μέθοδοι αποδόμησης αναγνωρίζουν σωστά:

- Την ύπαρξη μόνο Allocated Flow στις γραμμές της ζώνης 1 και της ζώνης 3.
- Την ύπαρξη Internal Flow στις γραμμές της ζώνης 2.
- Την ύπαρξη Loop Flow στις ζώνες 1 και 3 που οφείλονται στην ζώνη 2.

Επίσης παρατηρείται η ύπαρξη Loop Flow στις ζώνες 1 και 3 που οφείλονται στην ζώνη 2. Τα Allocated Flows στην μέθοδο PFC δεν μπορούν να αναλυθούν περαιτέρω σε Export, Import, Transit Flows διότι δεν είναι γνωστή η ακριβής ανταλλαγή μεταξύ των κόμβων του δικτύου.

Αντίθετα οι μέθοδοι FLD και PFC- Vlaisavljevic επιτρέπουν την περαιτέρω ανάλυση των Allocated Flows.

Αναλύοντας περαιτέρω τα Allocated Flows για τις μεθόδους FLD και PFC-Vlaisavljevic προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

<b>Full Line Decomposition (FLD)</b>									
Στοιχείο	Export Flow (MW)			Import Flow (MW)			Transit Flow (MW)		
	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3
1	0	0	0	0	-37.6	-47.7	0	0	1.8
2	0	0	0	0	-57.1	-57.6	0	0	-1.8
3	0	0	0	0	-37.6	-47.7	0	0	1.8
4	0	0	0	0	-18.3	-37.8	0	0	5.5
5	-19.4	0	0	0	-19.4	0	0	0	-27.1
6	-28	0	0	0	-28	0	0	0	-78.1
7	-1.6	0	0	0	0	0.9	0	0	-4.5
8	-37.2	0	0	0	0	-8.2	0	0	-15.2
9	-35.6	0	0	0	0	-9.2	0	0	-10.6
10	0	-13.3	0	0	0	-13.3	0	-13.7	-36.4
11	0	-15.4	0	0	0	-15.4	0	-8.2	-43
12	0	-8.7	0	0	0	-8.7	0	21.9	-25.8
13	0	-6.5	-4.4	0	0	0	0	5.5	0
14	-55.8	-39.5	0	0	0	0	0	2.7	0
15	-49.4	-35.3	0	0	0	0	0	-2.7	0

Πίνακας 5.24. Αποδόμηση των Allocated Flows με χρήση FLD του συστήματος της Εικόνας 5.11

<b>Power Flow Coloring (PFC)-Vlaisavljevic</b>									
Στοιχείο	Export Flow (MW)			Import Flow (MW)			Transit Flow (MW)		
	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3	ΖΩΝΗ1	ΖΩΝΗ2	ΖΩΝΗ3
1	0	0	0	0	-8	-81.5	0	0	0
2	0	0	0	0	-12.1	-98.4	0	0	0
3	0	0	0	0	-8	-81.5	0	0	0
4	0	0	0	0	-3.9	-64.7	0	0	0
5	-4.1	0	0	0	-4.1	0	0	0	-33.7
6	-5.9	0	0	0	-5.9	0	0	0	-146.3
7	-0.3	0	0	0	0	0	0	0	-7.8
8	-7.8	0	0	0	0	0	0	0	-26
9	-7.5	0	0	0	0	0	0	0	-18.2
10	0	0	0	0	0	0	0	-2.9	-62.4
11	0	0	0	0	0	0	0	-1.7	-73.4
12	0	0	0	0	0	0	0	4.6	-44.2
13	-11	0	0	0	0	0	0	1.2	0
14	-95.5	0	0	0	0	0	0	0.6	0
15	-84.5	0	0	0	0	0	0	-0.6	0

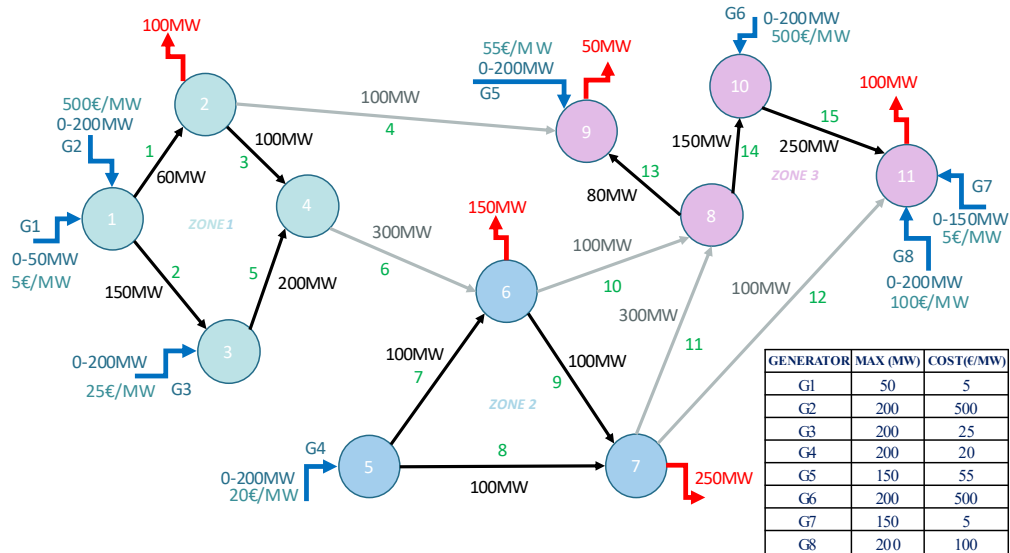
Πίνακας 5.25. Αποδόμηση των Allocated Flows με χρήση PFC- Vlaisavljevic του συστήματος της Εικόνας 5.11

Και οι δύο μέθοδοι καταλήγουν στα ίδια είδη ροών με διαφορές στα μεγέθη τους. Παρατηρείται ότι στα διασυνοριακά στοιχεία υπάρχει πάντα ύπαρξη ίσων ροών Import-Export διότι η ροή αποδίδεται κατά το ήμισυ σε Import και Export μεταξύ των ζωνών. Πρακτικά μία ροή 100MW από την ζώνη Α στην Β σε ένα διασυνοριακό στοιχείο χωρίζεται ως 50MW Import Flow της ζώνης

B και 50MW Export Flow της ζώνης A. Σημαντική διαφορά στο αποτέλεσμα μεταξύ FLD και PFC είναι η εύρεση από την FLD της Transit Flow στην ζώνη 1 που παράγεται στην ζώνη 3 και καταλήγει στην ζώνη 2.

#### 5.4.4. Σύστημα Τριών Ζωνών

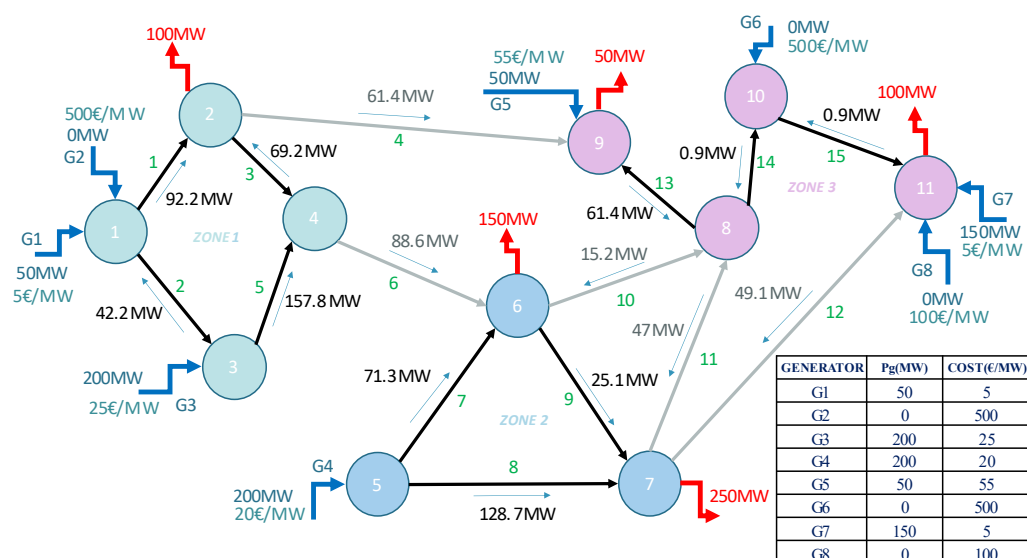
Το τελευταίο σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί πριν την μετάβαση σε μεγαλύτερα συστήματα της βιβλιογραφίας είναι το σύστημα της Εικόνας 5.13:



Εικόνα 5.13. Σύστημα Τριών Ζωνών

Στο σύστημα αυτό αναμένεται η εμφάνιση του συνόλου των ροών εφόσον όλες οι ζώνες εμπεριέχουν γεννήτριες και φορτία.

Με εφαρμογή Energy Dispatch και ροής φορτίου προκύπτει η εξής κατάσταση:



Εικόνα 5.14. Παραγωγή και Ροή Φορτίου έπειτα από Εφαρμογή Energy Dispatch για το σύστημα της Εικόνας 5.13

Εφαρμόζοντας Αποδόμηση της Ροής προκύπτει το κάτωθι αποτέλεσμα:

<b>Power Flow Coloring (PFC)-ACER</b>									
Στοιχείο	Internal Flow (MW)			Loop Flow (MW)			Allocated Flow (MW)		
	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH3	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH3	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH3
1	40.4	0	0	0	0.1	0.3	56.7	-6.2	0.9
2	-20.4	0	0	0	-0.1	-0.3	-26.7	6.2	-0.9
3	-48.8	0	0	0	-0.5	-1.9	-49.5	37.1	-5.6
4	0	0	0	-10.7	0.6	2.2	106.1	-43.3	6.6
5	59.6	0	0	0.0	-0.1	-0.3	93.3	6.2	-0.9
6	0	0	0	10.7	-0.6	-2.2	43.9	43.3	-6.6
7	0	82.0	0	-1.6	0	1.2	-6.4	-7.5	3.5
8	0	118.0	0	1.6	0	-1.2	6.4	7.5	-3.5
9	0	4.1	0	3.1	0	-2.3	12.5	14.7	-6.9
10	0	0	0	6.1	2.3	1.3	25.0	-53.9	3.9
11	0	0	0	3.6	-2.2	4.2	14.6	-79.9	12.7
12	0	0	0	1.0	-0.6	-7.7	4.2	-22.9	-23.2
13	0	0	10.3	10.7	-0.6	0	43.9	-156.7	30.9
14	0	0	-4.8	-1.0	0.6	0	-4.2	22.9	-14.3
15	0	0	-4.8	-1.0	0.6	0	-4.2	22.9	-14.3

Πίνακας 5.26. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.13.

<b>Full Line Decomposition (FLD)</b>									
Στοιχείο	Internal Flow (MW)			Loop Flow (MW)			Allocated Flow (MW)		
	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH3	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH3	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH3
1	44.3	0	0	0	0.2	0	0	37.2	10.5
2	-13.3	0	0	0	-0.2	0	0	-26.7	-2.0
3	-45.7	0	0	0	-1.2	0	0	-19.7	-2.6
4	0	0	0	-10.0	1.5	0	66.7	0	3.2
5	55.7	0	0	0	-0.2	0	0	85.2	17.0
6	0	0	0	10.0	-1.5	0	40.6	32.8	6.6
7	0	78.7	0	-1.5	0	0	-2.4	0	-3.6
8	0	121.3	0	1.5	0	0	2.4	0	3.6
9	0	10.5	0	2.9	0	0	4.8	0	7.0
10	0	0	0	5.7	5.7	0	-16.8	-5.0	-5.0
11	0	0	0	3.4	-5.6	0	-25.1	-9.9	-9.9
12	0	0	0	1.0	-1.6	0	-7.2	-20.7	-20.7
13	0	0	0	10.0	-1.5	0	-49.0	-21.0	0
14	0	0	0	-1.0	1.6	0	7.2	-8.7	0
15	0	0	0	-1.0	1.6	0	7.2	-8.7	0

Πίνακας 5.27. Αποδόμηση της Ροής με χρήση FLD για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.13.

<b>Power Flow Coloring (PFC)-Vlaisavljevic</b>									
Στοιχείο	Internal Flow (MW)			Loop Flow (MW)			Allocated Flow (MW)		
	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH3	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH3	ZΩNH1	ZΩNH2	ZΩNH3
1	40.4	0	0	0	0.1	0.3	0	51.9	-0.5
2	-20.4	0	0	0	-0.1	-0.3	0	-21.9	0.5
3	-48.8	0	0	0	-0.5	-1.9	0	-20.8	2.8
4	0.0	0	0	-10.7	0.6	2.2	72.6	0	-3.3
5	59.6	0	0	0.0	-0.1	-0.3	0	98.1	0.5
6	0	0	0	10.7	-0.6	-2.2	38.7	38.7	3.3
7	0	82.0	0	-1.6	0	1.2	-8.3	0	-2.1
8	0	118.0	0	1.6	0	-1.2	8.3	0	2.1

<b>9</b>	0	4.1	0	3.1	0	-2.3	16.2	0	4.1
<b>10</b>	0	0	0	6.1	2.3	1.3	-19.4	-2.8	-2.8
<b>11</b>	0	0	0	3.6	-2.2	4.2	-41.4	-5.6	-5.6
<b>12</b>	0	0	0	1.0	-0.6	-7.7	-11.8	-15.0	-15.0
<b>13</b>	0	0	10.3	10.7	-0.6	0	-72.6	-9.2	0
<b>14</b>	0	0	-4.8	-1.0	0.6	0	11.8	-7.5	0
<b>15</b>	0	0	-4.8	-1.0	0.6	0	11.8	-7.5	0

Πίνακας 5.28. Αποδόμηση της Ροής με χρήση PFC- Vlaisavljevic για την κατάσταση N του συστήματος της Εικόνας 5.13.

Τα αποτελέσματα είναι λογικά. Συγκεκριμένα:

- 1) Εντοπίζονται Internal Flows στα στοιχεία των ζωνών που ανήκουν εσωτερικά της ζώνης σε όλες τις μεθόδους.
- 2) Εντοπίζονται Loop Flows στα περισσότερα στοιχεία του συστήματος και τα οποία σε όλους τις μεθόδους έχουν παρόμοιες τιμές.
- 3) Τα Allocated Flows φαίνονται λογικά σε όλες τις μεθόδους

Σημαντική διαφορά μεταξύ των μεθόδων αποτελεί το γεγονός ότι η μέθοδος FLD δεν εντοπίζει Internal Flows στην ζώνη 3. Η αιτία βρίσκεται στην ίδια την μέθοδο η οποία αναγνωρίζει ότι η παραγωγή των γεννητριών στους κόμβους 9 και 11 καλύπτει τα αντίστοιχα φορτία των κόμβων. Αποτέλεσμα είναι να μην δημιουργείται ροή εντός της ζώνης για την κάλυψη των φορτίων, άρα δημιουργία Internal Flow.

Ολοκληρώνοντας την αποδόμηση της ροής απομένει η εφαρμογή του επιμερισμού του κόστους ανά ζώνη όπως περιγράφεται στο 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ.

## 5.5. Επιμερισμός Κόστους Συμφόρησης ανά Ζώνη

Με την ολοκλήρωση της αποδόμησης της ροής και την απόδοση του κόστους ανά στοιχείο με συμφόρηση απομένει ο επιμερισμός του κόστους ανά ζώνη. Τα δεδομένα που χρειάζονται για την εφαρμογή του επιμερισμού είναι το αποτέλεσμα της Αποδόμησης της Ροής ανεξάρτητα της μεθόδου που προέκυψε καθώς και του κόστους ανά στοιχείο με συμφόρηση. Η μέθοδος θα εφαρμοστεί για μία γραμμή με συμφόρηση σε ένα σύστημα-παραλλαγή του συστήματος της Εικόνας 5.13, όπου για την αποδόμηση της ροής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος PFC-ACER. Εφαρμόζοντας τις μεθόδους προκύπτουν οι πίνακες 5.29 και 5.30.

Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας	Στοιχεία με Συμφόρηση	$c_{i,k}$ (€)	Ποσοστό Επί του Συνολικού Κόστους(%)
-	1	867.2	2.4
	13	385.6	1.1
1	3	3840.2	10.8
	5	632	1.8
·	·	·	
·	·	·	
·	·	·	
15	1	873.9	2.5
	13	408.7	1.2
SUM		35423.6	100

Πίνακας 5.29. Επιλογή στοιχείου με συμφόρηση XNEC της Εικόνας 5.13

Power Flow Coloring (PFC)-ACER									
Στοιχείο	Internal Flow (MW)			Loop Flow (MW)			Allocated Flow (MW)		
	ZΩNH 1	ZΩNH 2	ZΩNH 3	ZΩNH 1	ZΩNH 2	ZΩNH 3	ZΩNH 1	ZΩNH 2	ZΩNH 3
13	0	0	10	10.7	-1.1	0	43.9	-156.1	31

Πίνακας 5.30. Αποδόμηση της ροής με χρήση PFC στο XNEC που επιλέχθηκε στον Πίνακα 5.29

Οι μέθοδοι οδηγούν στην ανάλυση της ροής στην γραμμή 13 της κατάστασης N, καθώς και στο κόστος επίλυσης της συμφόρησης που αποδίδεται σε αυτή και είναι ίσο με **385.6 €**. Με εφαρμογή της μεθόδου, όπως περιγράφεται στο 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ προκύπτει το αποτέλεσμα του Πίνακα 5.31.

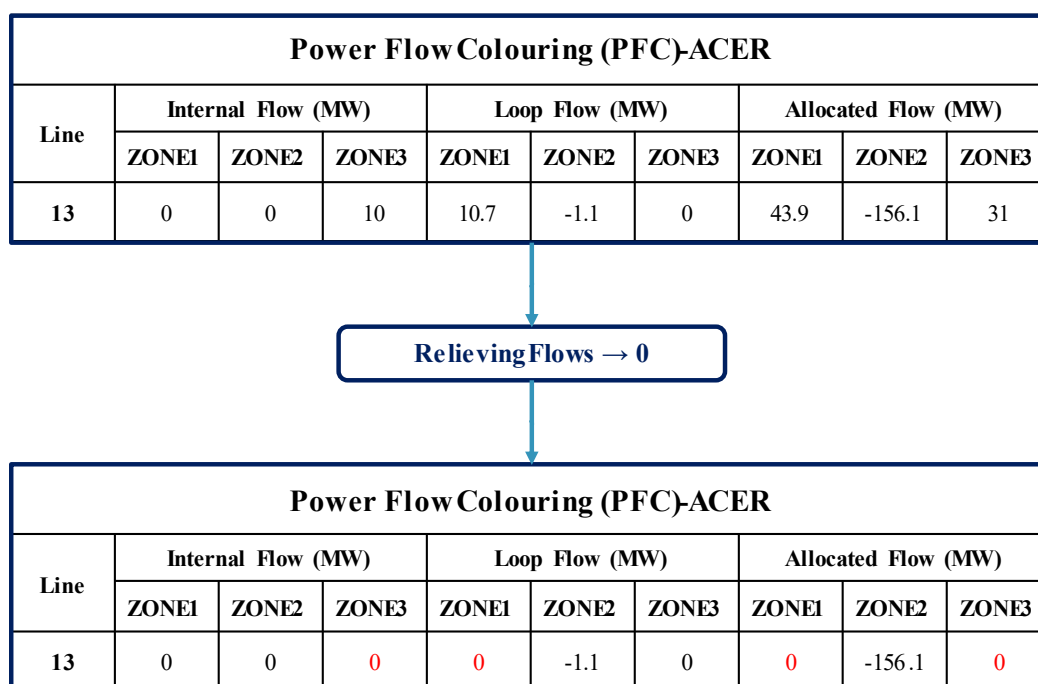
ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑ ΖΩΝΗ							
Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας	Στοιχεία με Συμφόρηση	ΖΩΝΗ 1		ΖΩΝΗ 2		ΖΩΝΗ 3	
		Κόστος	% <sup>9</sup>	Κόστος	%	Κόστος	%
-	1	867.2	2.4	0	0	0	0
	13	4.1	0.0	0	0	381.5	1.1
1	3	3697.8	10.4	49.1	0.14	93.4	0.3
	5	632	1.8	0	0	0	0
·	·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·	·
15	1	873.9		0	0	0	0
	13	0		4.1	0.01	404.6	1.1
SUM		25000.3	70.6	134.9	0.4	10288.4	29

Πίνακας 5.31. Υπολογιστικό αποτέλεσμα επιμερισμού του κόστους για την επίλυση της συμφόρησης στο XNEC του Πίνακα 5.29

<sup>9</sup> Το ποσοστό αναφέρεται επί του συνολικού κόστους διορθωτικών ενεργειών

Για την εγκυρότητα του αποτελέσματος το πρόβλημα θα επιλυθεί αλγεβρικά σύμφωνα με την μεθοδολογία στο 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ.

- **Βήμα 1<sup>ο</sup>-Μηδενισμός Ανακουφιστικών ροών (Relieving Flows)**



Εικόνα 5.15. Μηδενισμός Ανακουφιστικών ροών μετά το αποτέλεσμα της Αποδόμησης της Ροής του Πίνακα 5.30

- **Βήμα 2<sup>ο</sup>-Διαχωρισμός των Loop Flows**

Όπως περιγράφεται και στο 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ τα Loop Flows χωρίζονται με κριτήριο το μέγεθος τους. Συγκεκριμένα τα Loop Flows τα οποία είναι μεγαλύτερα του 10% του τεχνικού ορίου της γραμμής θεωρούνται πρώτα ως υπεύθυνα για την συμφόρηση της γραμμής και ονομάζονται Loop Above Threshold. Τα Loop Flows μικρότερα του ορίου αυτού ονομάζονται Loop Flows Below Threshold και αντιμετωπίζονται πολύ διαφορετικά στην μεθοδολογία.

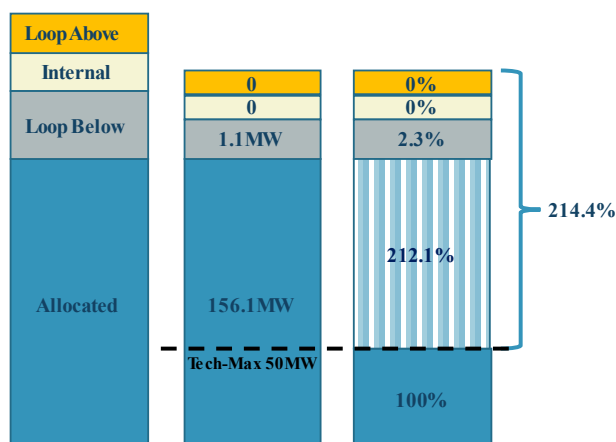
Η γραμμή 13 έχει τεχνικό όριο 50MW. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το όριο (threshold) να είναι 5MW . Από το 1<sup>ο</sup> Βήμα γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη ενός Loop Flow που δημιουργείται από την ζώνη 2 και είναι  $1.1\text{MW} < 5\text{MW}$ . Τελικά το Loop Flow της ζώνης 2 θεωρείται Loop Flow Below Threshold.

- **Βήμα 3<sup>ο</sup>-Εφαρμογή Κανόνα Προτεραιότητας**

Όπως περιγράφεται και στο 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ για την τελική απόδοση κόστους ανά ζώνη εφαρμόζεται ένας κανόνας προτεραιότητας όπου κάθε βασικό είδος ροής έχει διαφορετική ευθύνη στην δημιουργία της συμφόρησης. Για την γραμμή 13 του Πίνακα 5.30 προκύπτουν τα εξής:

Power Flow Colouring (PFC)-ACER									
Line	Internal Flow (MW)			Loop Flow (MW)			Allocated Flow (MW)		
	ZONE1	ZONE2	ZONE3	ZONE1	ZONE2	ZONE3	ZONE1	ZONE2	ZONE3
13	0	0	0	0	-1.1	0	0	-156.1	0

Line Outage	Line with Congestion	$c_{l,k}$ (€)
-	1	867.2
-	13	385.6



Το κόστος μοιράζεται ως :

Loop Above Cost=0€  
Internal Cost=0€  
Loop Below Cost=(2.3/214.4)\*385.6€=4.1€  
Allocated Cost=(212.1/214.4)\*385.6€=381.5€

Εικόνα 5.16. Εφαρμογή Κανόνα Προτεραιότητας στην γραμμή 13 του Πίνακα 5.30

Εφόσον η μόνη ζώνη που δημιουργεί Loop Flow Below Threshold είναι η ζώνη 2 είναι και αυτή που αναλαμβάνει το κόστος. Η ζώνη που δημιουργεί το Allocated Flow είναι ξανά η ζώνη 2 αλλά, όπως αναφέρθηκε στην μεθοδολογία, σε περίπτωση που υπεύθυνη για συμφόρηση είναι Allocated Flow η ζώνη που επωμίζεται το κόστος είναι αυτή στην οποία ανήκει το στοιχείο. Στην υπό μελέτη περίπτωση η ζώνη αυτή είναι η ζώνη 3 η οποία και επωμίζεται το κόστος.

Τελικά η αλγεβρική λύση έχει ίδιο αποτέλεσμα με την υπολογιστική. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε περίπτωση που το στοιχείο είναι διασυννοριακό και βρεθεί Allocated Flow υπεύθυνο για συμφόρηση, οι ζώνες που συνδέει επωμίζονται κατά το ήμισυ το κόστος. Η εφαρμογή της διαδικασίας αυτής ανά στοιχείο με συμφόρηση οδηγεί τελικά στον επιμερισμού του κόστους Ανακατανομής στις ζώνες του συστήματος που είναι και το ζητούμενο της μεθοδολογίας.

Πλέον έχοντας εφαρμόσει την μεθοδολογία στο σύνολο της σε μικρά συστήματα μεταφοράς, με σκοπό την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, και εφόσον τα αποτελέσματα στα επιμέρους τμήματα της μεθοδολογίας είναι λογικά, απομένει η πλήρης εφαρμογή της μεθοδολογίας που προτείνει ο ACER σε μεγαλύτερα και πιο ρεαλιστικά συστήματα μεταφοράς, γνωστά στην βιβλιογραφία.

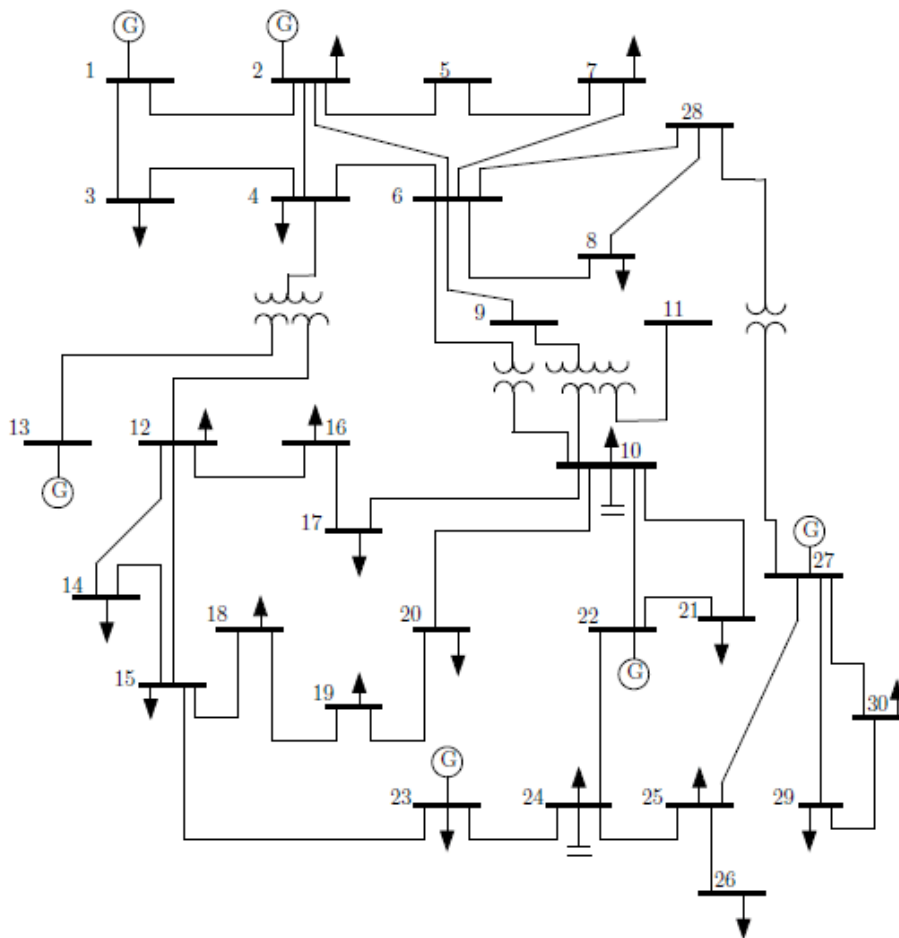


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΓΝΩΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει εφαρμογή του συνόλου της μεθοδολογίας σε μεγαλύτερα συστήματα τα οποία προσομοιάζουν αρκετά σε πραγματικά συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα που θα χρησιμοποιηθούν είναι μεγαλύτερα των 30 κόμβων και τα περισσότερα αποτελούνται από περισσότερες από τρεις ζώνες. Στόχος είναι από τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου κεφαλαίου σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του 5<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ να εξαχθούν έγκυρα και χρήσιμα συμπεράσματα για τους παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα του επιμερισμού του κόστους συμφόρησης ανά ζώνη. Τα αποτελέσματα αυτά θα παρουσιαστούν στο 7<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ.

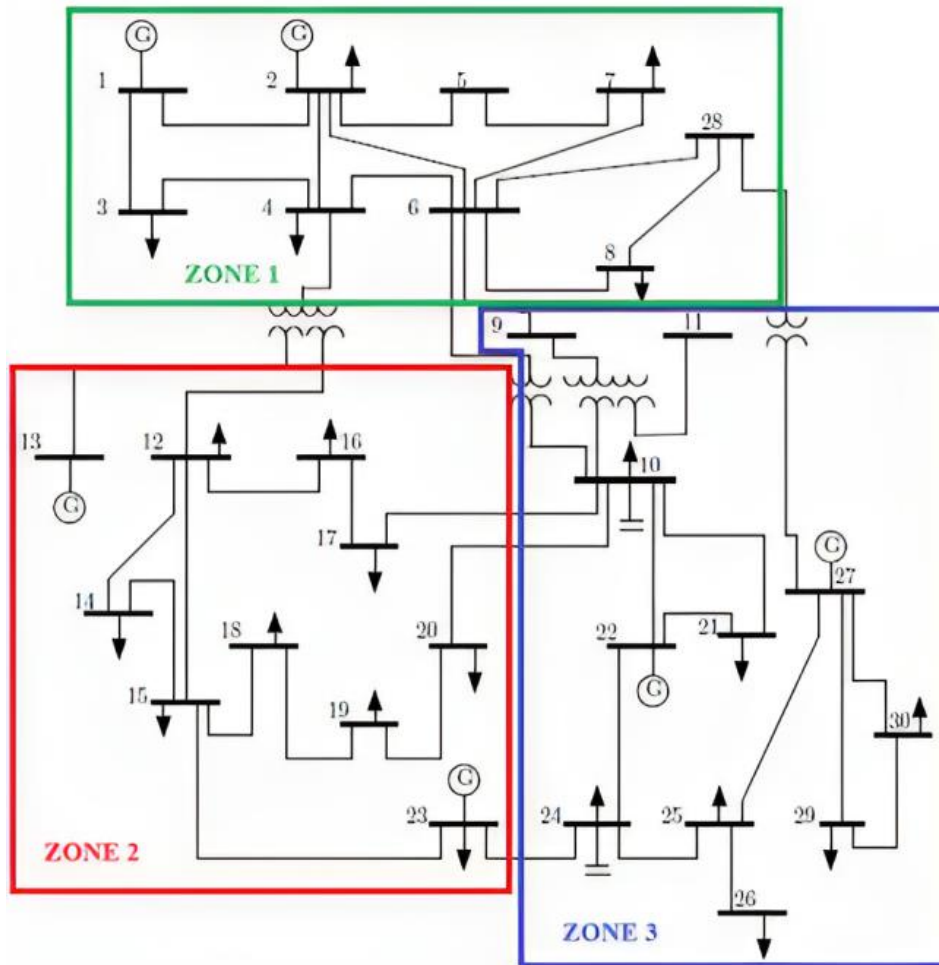
### 6.1. IEEE Case 30

Στην Εικόνα 6.1 παρουσιάζεται το σύστημα IEEE Case 30[18].



Εικόνα 6.1. Απεικόνιση συστήματος IEEE Case 30

Το σύστημα IEEE Case 30 αποτελείται από μία ζώνη. Με σκοπό την εφαρμογή της μεθοδολογίας του επιμερισμού κόστους το σύστημα θα χωριστεί σε τρεις διαφορετικές ζώνες. Κάθε ζώνη πρέπει να έχει τουλάχιστον μία γεννήτρια και ένα φορτίο. Τελικά προκύπτει το σύστημα των τριών ζωνών της Εικόνας 6.2.



Εικόνα 6.2. Απεικόνιση των Τεχνητών Ζωνών του Συστήματος IEEE Case 30

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι ίδια με αυτά της βιβλιογραφίας [18] για το συγκεκριμένο σύστημα, με μόνες διαφορές την αλλαγή του τεχνικού μέγιστου παραγωγής και του κόστους παραγωγής των γεννητριών στους κόμβους 5,8,11,13, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.1.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ			
ΚΟΜΒΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	$P_{max}(MW)$	$P_{min}(MW)$	ΚΟΣΤΟΣ(€/MW)
5	50	0	60
8	50	0	65
11	50	0	70
13	50	0	75

Πίνακας 6.1. Αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν σε σχέση με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας στο σύστημα IEEE Case 30

Το συνολικό φορτίο που καλούνται να καλύψουν οι γεννήτριες του διασυννοριακού συστήματος είναι **283.5MW**. Με εφαρμογή του Energy Dispatch προκύπτει η παραγωγή των γεννητριών είναι όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2.

ΚΟΜΒΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	P <sub>gen</sub> (MW)
1	271
2	12.5

Πίνακας 6.2. Αποτέλεσμα Energy Dispatch για το τροποποιημένο σύστημα IEEE Case 30

Με Ροή Φορτίου υπολογίζονται οι ροές στις γραμμές και η εμφάνιση συμφόρησης σε αυτές όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.3.

ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ N&N-1									
Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας		Στοιχείο με Συμφόρηση		Συμφόρηση (%) <sup>10</sup>	Στοιχείο Εκτός Λειτουργίας		Στοιχείο με Συμφόρηση		Συμφόρηση(%)
Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους	Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους		Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους	Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους	
-		1	2	32.65	10	21	1	2	32.64
1	2	1	3	78.29	10	22	1	2	32.65
		3	4	98.96	12	14	1	2	32.69
		4	6	11.43	12	15	1	2	32.88
1	3	1	2	96.38	12	16	1	2	32.80
2	4	1	2	21.74	14	15	1	2	32.66
3	4	1	2	94.64	15	18	1	2	32.74
2	5	1	2	19.87	15	23	1	2	32.73
2	6	1	2	20.62	16	17	1	2	32.72
4	6	1	2	48.83	18	19	1	2	32.69
4	12	1	2	34.51	19	20	1	2	32.53
5	7	1	2	35.17	21	22	1	2	32.65
6	7	1	2	38.87	22	24	1	2	32.62
6	8	1	2	32.63	23	24	1	2	32.67
6	9	1	2	32.14	24	25	1	2	32.61
6	10	1	2	32.43	25	27	1	2	32.55
6	28	1	2	32.60	27	28	1	2	32.35
8	28	1	2	32.65	27	29	1	2	32.65
9	10	1	2	32.14	27	30	1	2	32.65
10	17	1	2	32.51	29	30	1	2	32.65
10	20	1	2	32.50					

Πίνακας 6.3. Συμφόρηση που εμφανίζεται στο τροποποιημένο σύστημα IEEE Case 30

Η περίπτωση που η γραμμή 17 είναι εκτός λειτουργίας δεν έχει μελετηθεί, διότι σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος 11 αποσυνδέεται εντελώς από το υπόλοιπο σύστημα.

<sup>10</sup> Το ποσοστό ισχύος που ξεπερνά τη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς του στοιχείου

Με εφαρμογή Ανακατανομής προκύπτει ο Πίνακας 6.4.

ΚΟΜΒΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	$P_g$ (MW)	$P_{AFTER-RD}$ (MW)	$XRA$ (MW)	ΚΟΣΤΟΣ XRA (€)
1	271	137.4	-133.6	-2460.912
2	12.5	92.0	79.5	4148.31
5	0	50.0	50.0	3000
8	0	4.1	4.1	266.5
<b>SUM</b>			<b>0</b>	<b>4953.90</b>

Πίνακας 6.4. Αποτέλεσμα Ανακατανομής στο τροποποιημένο σύστημα IEEE Case 30

Στον Πίνακα 6.5. παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του επιμερισμού του κόστους ανά στοιχείο με συμφόρηση που μοιράζεται ανά ζώνη με χρήση διαφορετικών μεθόδων αποδόμησης της ροής. Επίσης τα αποτελέσματα συγκρίνονται με την κατανομή του κόστους που πραγματοποιείται σήμερα, δηλαδή χωρίς εφαρμογή της μεθόδου επιμερισμού [1], [2].

ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑ ΖΩΝΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ						
Μέθοδοι Αποδόμησης Ροής	ΖΩΝΗ1		ΖΩΝΗ2		ΖΩΝΗ3	
	Κόστος <sup>11</sup>	% <sup>12</sup>	Κόστος	%	Κόστος	%
<b>PFC</b>	4953.87	100	0	0	0	0
<b>FLD</b>	4953.87	100	0	0	0	0
<b>PFC-Vlaisavljevic</b>	4953.87	100	0	0	0	0
<b>Χωρίς Επιμερισμό<sup>13</sup></b>	4953.87	100	0	0	0	0

Πίνακας 6.5. Αποτέλεσμα Επιμερισμού Κόστους Ανακατανομής στις ζώνες του τροποποιημένου συστήματος IEEE Case 30 ανά μέθοδο Αποδόμησης Ροής

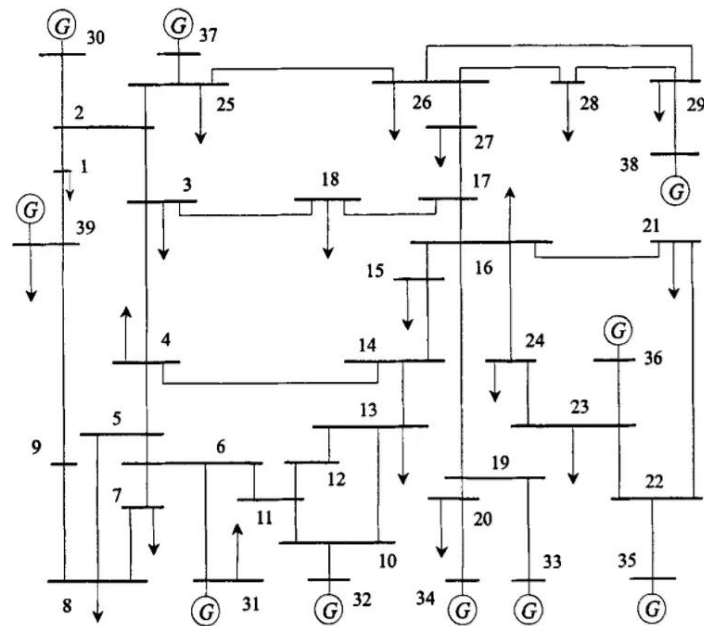
<sup>11</sup> Το κόστος διορθωτικών ενεργειών ανά ζώνη και μέθοδο αποδόμησης ροής (€)

<sup>12</sup> Το ποσοστό αναφέρεται επί του συνολικού κόστους διορθωτικών ενεργειών

<sup>13</sup> Το κόστος διορθωτικών ενεργειών ανά στοιχείο με συμφόρηση επωμίζεται η ζώνη στην οποία ανήκει το στοιχείο

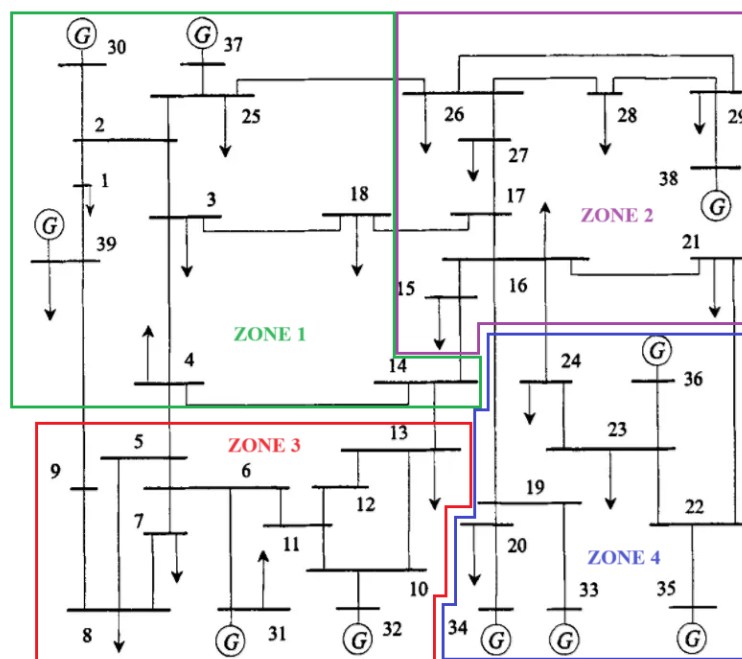
## 6.2. IEEE Case 39

Στην Εικόνα 6.3 παρουσιάζεται το σύστημα IEEE Case 39[19].



Εικόνα 6.3. Απεικόνιση συστήματος IEEE Case 39

Το σύστημα IEEE Case 39 αποτελείται από μία ζώνη. Όπως και στο σύστημα της περίπτωσης IEEE Case 30 το σύστημα θα χωριστεί σε τέσσερις διαφορετικές ζώνες. Κάθε ζώνη πρέπει να έχει τουλάχιστον μία γεννήτρια και ένα φορτίο. Τελικά προκύπτει το σύστημα των τεσσάρων ζωνών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.4.



Εικόνα 6.4. Απεικόνιση των Τεχνητών Ζωνών του Συστήματος IEEE Case 39

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι ίδια με αυτά της βιβλιογραφίας[19]. Το συνολικό φορτίο που καλούνται να καλύψουν οι γεννήτριες του διασυννοριακού συστήματος είναι **6254.2 MW**. Με εφαρμογή του Energy Dispatch προκύπτει η παραγωγή των γεννητριών όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.6.

<b>ΚΟΜΒΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ</b>	<b>P<sub>gen</sub>(MW)</b>
30	<b>1040.0</b>
31	<b>646.0</b>
32	<b>725.0</b>
34	<b>508.0</b>
35	<b>226.2</b>
36	<b>580.0</b>
37	<b>564.0</b>
38	<b>865.0</b>
39	<b>1100.0</b>

*Πίνακας 6.6. Αποτέλεσμα Energy Dispatch για το σύστημα IEEE Case 39*

Με Ροή Φορτίου υπολογίζονται οι ροές στις γραμμές και η εμφάνιση συμφόρησης σε αυτές όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.7.

## ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ N&N-1

Στοιχείο εκτός Λειτουργίας		Στοιχείο με Συμμόρφωση		Συμμόρφωση(%)	Στοιχείο εκτός Λειτουργίας		Στοιχείο με Συμμόρφωση		Συμμόρφωση(%)	Στοιχείο εκτός Λειτουργίας		Στοιχείο με Συμμόρφωση		Συμμόρφωση(%)	Στοιχείο εκτός Λειτουργίας		Στοιχείο με Συμμόρφωση		Συμμόρφωση(%)			
																				Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους	Κόμβος Αρχής
-	-	2	3	<b>77.6</b>	5	8	2	3	<b>73.7</b>	12	13	2	3	<b>82.6</b>	16	17	2	3	<b>82.6</b>			
		2	30	<b>15.6</b>			2	30	<b>15.6</b>			2	30	<b>15.6</b>			2	30	<b>15.6</b>			
1	2	1	39	<b>55.4</b>	6	7	2	3	<b>73.3</b>	12	13	4	5	<b>8.2</b>	16	17	3	4	<b>15.6</b>			
		2	25	<b>28.0</b>			2	30	<b>15.6</b>			6	11	<b>49.3</b>			14	15	<b>40.8</b>			
1	39	2	3	<b>95.0</b>	6	11	2	3	<b>74.8</b>	14	15	10	11	<b>14.7</b>	16	21	2	3	<b>77.6</b>			
		2	30	<b>15.6</b>			2	30	<b>15.6</b>			2	3	<b>73.7</b>			2	30	<b>15.6</b>			
2	3	2	25	<b>1.2</b>	7	8	10	13	<b>14.7</b>	14	15	2	30	<b>15.6</b>	16	24	2	3	<b>77.6</b>			
		2	30	<b>15.6</b>			13	14	<b>19.4</b>			3	18	<b>36.6</b>			2	30	<b>15.6</b>			
		17	27	<b>33.6</b>			2	3	<b>75.9</b>			16	17	<b>40.8</b>			2	3	<b>56.2</b>			
		25	26	<b>41.0</b>			2	30	<b>15.6</b>			26	27	<b>0.1</b>			2	30	<b>15.6</b>			
2	25	26	27	<b>80.5</b>	9	39	2	3	<b>93.3</b>	15	16	2	3	<b>77.0</b>	17	18	26	27	<b>3.4</b>			
		2	3	<b>68.3</b>			2	30	<b>15.6</b>			2	30	<b>15.6</b>			2	3	<b>120.3</b>			
3	4	2	3	<b>63.9</b>	8	9	2	3	<b>94.3</b>	26	27	2	3	<b>169.7</b>	17	27	2	30	<b>15.6</b>			
		2	30	<b>15.6</b>			2	30	<b>15.6</b>			2	25	<b>15.3</b>			3	18	<b>13.3</b>			
3	18	2	3	<b>15.6</b>	10	11	2	3	<b>75.6</b>	26	27	2	30	<b>15.6</b>	21	22	2	3	<b>77.6</b>			
		2	30	<b>15.6</b>			2	30	<b>15.6</b>			3	18	<b>54.7</b>			2	30	<b>15.6</b>			
4	5	2	30	<b>15.6</b>	10	13	10	13	<b>20.8</b>	26	28	17	18	<b>2.6</b>	22	23	2	3	<b>77.6</b>			
		26	27	<b>14.5</b>			13	14	<b>6.6</b>			2	3	<b>77.6</b>			2	30	<b>15.6</b>			
		2	3	<b>85.7</b>			2	3	<b>80.9</b>			2	30	<b>15.6</b>			2	3	<b>77.6</b>	2	3	<b>77.6</b>
		2	30	<b>15.6</b>			2	30	<b>15.6</b>			2	30	<b>15.6</b>			2	3	<b>77.6</b>	2	30	<b>15.6</b>
4	14	10	13	<b>4.8</b>	10	13	6	11	<b>17.1</b>	26	29	2	30	<b>15.6</b>	23	24	2	3	<b>128.1</b>			
		13	14	<b>8.5</b>			10	11	<b>20.8</b>			2	3	<b>77.6</b>			2	30	<b>15.6</b>			
4	14	2	3	<b>78.7</b>	12	11	2	3	<b>77.6</b>	28	29	2	30	<b>15.6</b>	25	26	3	18	<b>19.9</b>			
		2	30	<b>15.6</b>			2	30	<b>15.6</b>			2	30	<b>15.6</b>								
5	6	2	3	<b>79.5</b>	13	14	2	3	<b>77.6</b>													
		2	30	<b>15.6</b>			2	30	<b>15.6</b>													
		10	13	<b>0.5</b>																		
		13	14	<b>3.8</b>																		

Πίνακας 6.7. Συμμόρφωση που εμφανίζεται στο σύστημα IEEE Case 39

Οι περιπτώσεις που τα στοιχεία 2-30,6-31,10-32,16-19,19-20,19-33,20-34,22-35,23-36,25-37,29-38 είναι εκτός λειτουργίας δεν έχουν μελετηθεί διότι σε αυτές τις περιπτώσεις το σύστημα χωρίζεται σε μικρότερα ασύνδετα συστήματα. Με εφαρμογή Ανακατανομής προκύπτει ο Πίνακας 6.8.

<b>ΚΟΜΒΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ</b>	<b>P<sub>g</sub>(MW)</b>	<b>P<sub>AFTER-RD</sub>(MW)</b>	<b>XRA(MW)</b>	<b>ΚΟΣΤΟΣ XRA (€)</b>
30	1040.0	519.0	-521	-3503.5
32	725.0	582.4	-142.6	-3536.5
33	0.0	652.0	652	22718.7
35	226.2	541.5	315.3	10185.3
37	564.0	260.3	-303.7	-9582.0
<b>SUM</b>			<b>0</b>	<b>16281.9</b>

Πίνακας 6.8. Αποτέλεσμα Ανακατανομής στο τροποποιημένο σύστημα IEEE Case 39

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την διαδικασία της Ανακατανομής, όπως αναφέρεται στο 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ, δεν βρέθηκε εφικτή λύση λόγω ύπαρξης αντικρουόμενων περιορισμών. Το σύνολο των περιορισμών των καταστάσεων N-1 είναι 1575. Από αυτούς παραβιάστηκαν 3 που εμφανίζονται στα στοιχεία 6-11,23-24,2-3 στις περιπτώσεις που είναι εκτός λειτουργίας τα στοιχεία 13-14,21-22,26-27 αντίστοιχα. Αγνοώντας τους περιορισμούς των περιπτώσεων που είναι εκτός λειτουργίας τα στοιχεία 13-14, 21-22,2 6-27 προκύπτει το αποτέλεσμα του Πίνακα 6.8.

Με επιμερισμό του κόστους ανά στοιχείο με συμφόρηση το κόστος μοιράζεται ανά ζώνη με χρήση διαφορετικών μεθόδων αποδόμησης της ροής όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.9.

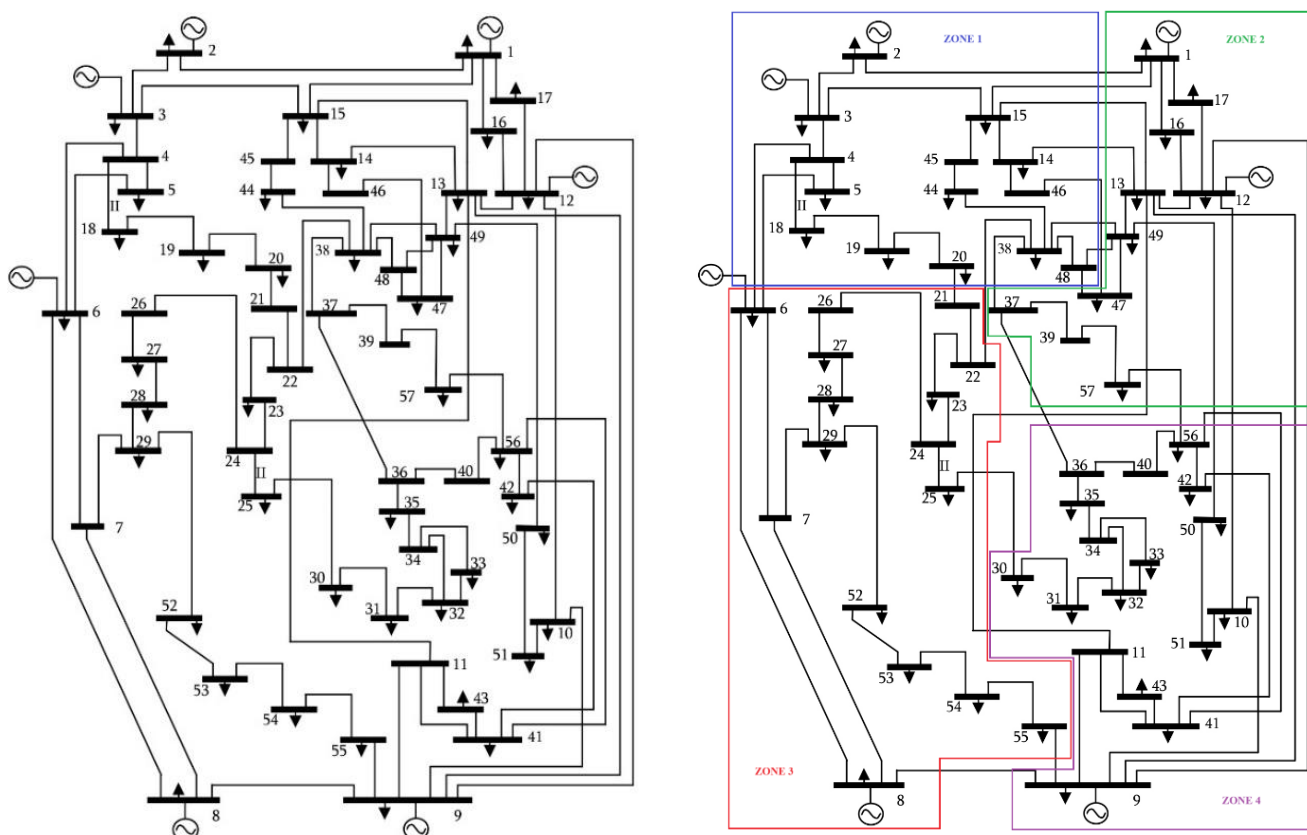
<b>ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑ ΖΩΝΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ</b>								
<b>Μέθοδοι Αποδόμησης Ροής</b>	<b>ΖΩΝΗ1</b>		<b>ΖΩΝΗ2</b>		<b>ΖΩΝΗ3</b>		<b>ΖΩΝΗ4</b>	
	<b>Κόστος</b>	<b>%</b>	<b>Κόστος</b>	<b>%</b>	<b>Κόστος</b>	<b>%</b>	<b>Κόστος</b>	<b>%</b>
<b>PFC</b>	5390.59	33.1	10706.14	65.8	185.21	1.1	0	0
<b>FLD</b>	16058.17	98.6	54.09	0.3	169.69	1.0	0	0
<b>PFC-Vlaisavljevic</b>	5389.62	33.1	10705.17	65.7	187.15	1.1	0	0
<b>Χωρίς Επιμερισμό</b>	16025.48	98.4	13.39	0.1	192.61	1.2	50.46	0.3

Πίνακας 6.9. Αποτέλεσμα Επιμερισμού Κόστους Ανακατανομής στις ζώνες του τροποποιημένου συστήματος IEEE Case 39 ανά μέθοδο Αποδόμησης Ροής



### 6.3. IEEE Case 57

Στην Εικόνα 6.5 παρουσιάζεται το σύστημα IEEE Case 57[20].



Εικόνα 6.5. Απεικόνιση συστήματος IEEE Case 57 και των τεχνητών ζωνών που δημιουργήθηκαν

Το σύστημα IEEE Case 57 αποτελείται από μία ζώνη. Με σκοπό την εφαρμογή της μεθοδολογίας επιμερισμού του κόστους επίλυσης της συμφόρησης το σύστημα IEEE Case 57 χωρίζεται σε τέσσερις διαφορετικές ζώνες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.5. Κάθε ζώνη πρέπει να έχει τουλάχιστον μία γεννήτρια και ένα φορτίο. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος IEEE Case 57 είναι ίδια με αυτά της βιβλιογραφίας[20].

Το συνολικό φορτίο που καλούνται να καλύψουν οι γεννήτριες του διασυννοριακού συστήματος είναι **1250.8 MW**. Με εφαρμογή του Energy Dispatch η παραγωγή των γεννητριών παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.10.

ΚΟΜΒΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	$P_{gen}(MW)$
1	245.0
8	1005.8

Πίνακας 6.10. Αποτέλεσμα Energy Dispatch για το σύστημα IEEE Case 57

Με Ροή Φορτίου υπολογίζονται οι ροές στις γραμμές και η συμφόρηση που δημιουργείται παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.11.

<b>ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ N-1</b>				
<b>Στοιχείο εκτός Λειτουργίας</b>		<b>Στοιχείο με Συμφόρηση</b>		<b>Συμφόρηση(%)</b>
<b>Κόμβος Αρχής</b>	<b>Κόμβος Τέλους</b>	<b>Κόμβος Αρχής</b>	<b>Κόμβος Τέλους</b>	
3	4	8	9	<b>9.0</b>
		9	12	<b>6.1</b>
4	6	7	29	<b>0.8</b>
6	7	6	8	<b>11.3</b>
6	8	8	9	<b>3.8</b>
7	8	6	8	<b>36.7</b>
		8	9	<b>10.1</b>
		9	12	<b>2.2</b>
7	29	8	9	<b>6.2</b>
8	9	4	5	<b>2.1</b>
		4	6	<b>63.9</b>
		6	8	<b>112.3</b>
		7	8	<b>23.8</b>
		26	27	<b>11.2</b>
9	10	9	12	<b>17.5</b>
9	11	9	12	<b>11.5</b>
9	13	9	12	<b>9.3</b>
10	12	9	12	<b>7.9</b>
11	13	9	12	<b>5.8</b>
12	13	9	12	<b>32.5</b>

Πίνακας 6.11. Συμφόρηση που εμφανίζεται στο σύστημα IEEE Case 57

Με εφαρμογή Ανακατανομής προκύπτει ο Πίνακας 6.12.

<b>ΚΟΜΒΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ</b>	<b><math>P_g</math>(MW)</b>	<b><math>P_{AFTER-RD}</math>(MW)</b>	<b><math>XRA</math>(MW)</b>	<b>ΚΟΣΤΟΣ <math>XRA</math>(€)</b>
<b>3</b>	0.0	60.0	60.0	2044.53
<b>8</b>	1005.8	564.6	-441.2	-13430.88
<b>12</b>	0.0	381.2	381.2	14176.79
<b>SUM</b>			<b>0</b>	<b>2790.45</b>

Πίνακας 6.12. Αποτέλεσμα Ανακατανομής στο τροποποιημένο σύστημα IEEE Case 57

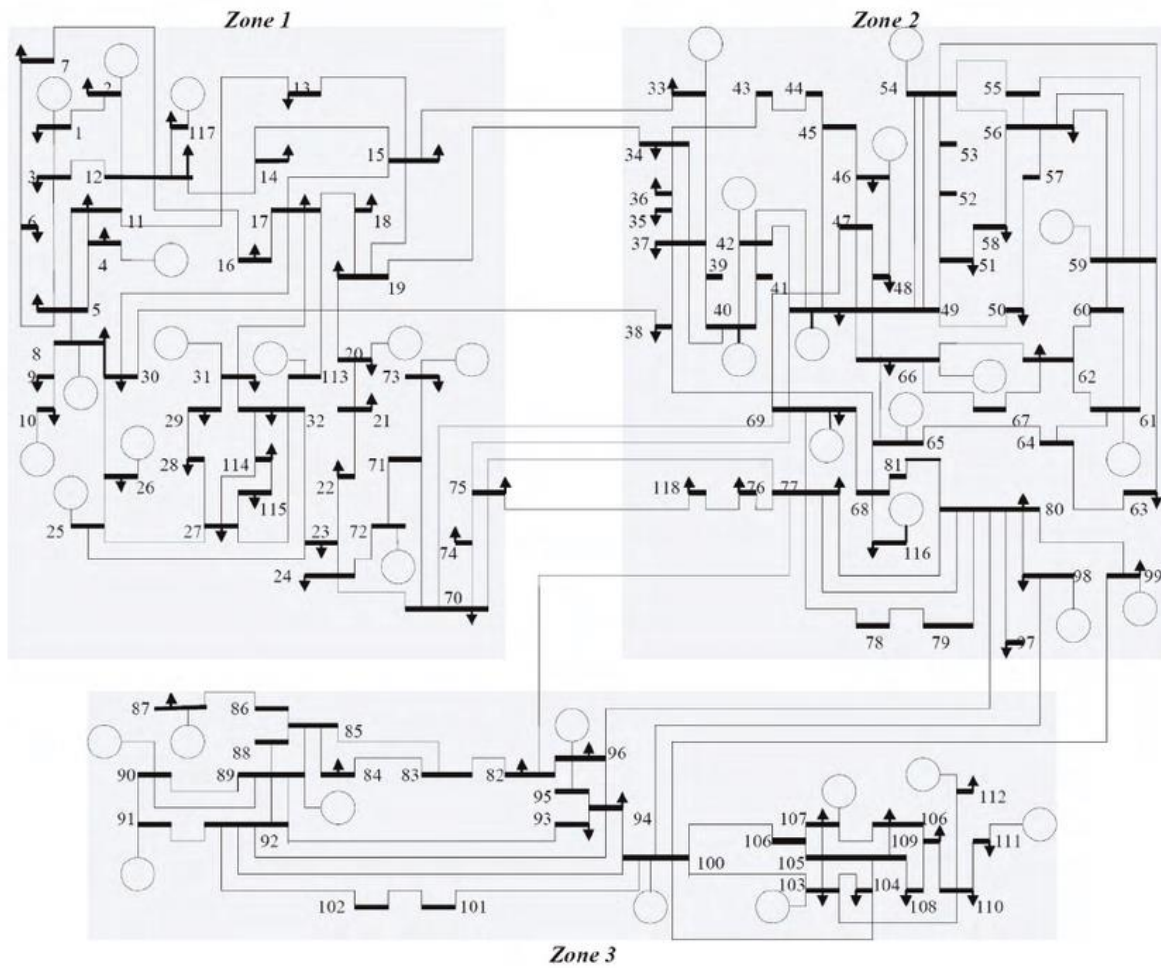
Με επιμερισμό του κόστους ανά στοιχείο με συμφόρηση το κόστος μοιράζεται ανά ζώνη με χρήση διαφορετικών μεθόδων αποδόμησης της ροής όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.13.

<b>ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑ ΖΩΝΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ</b>								
<b>Μέθοδοι Αποδόμησης Ροής</b>	<b>ΖΩΝΗ1</b>		<b>ΖΩΝΗ2</b>		<b>ΖΩΝΗ3</b>		<b>ΖΩΝΗ4</b>	
	<b>Κόστος</b>	<b>%</b>	<b>Κόστος</b>	<b>%</b>	<b>Κόστος</b>	<b>%</b>	<b>Κόστος</b>	<b>%</b>
<b>PFC</b>	198.82	7.1	607.42	21.8	1969.39	70.6	14.82	0.5
<b>FLD</b>	188.56	6.8	527.12	18.9	2066.26	74.0	8.51	0.3
<b>PFC-Vlaisavljevic</b>	188.67	6.8	608.23	21.8	1987.27	71.2	6.28	0.2
<b>Χωρίς Επιμερισμό</b>	221.53	7.9	178.08	6.4	1888.96	67.7	501.89	18.0

Πίνακας 6.13. Αποτέλεσμα Επιμερισμού Κόστους Ανακατανομής στις ζώνες του τροποποιημένου συστήματος IEEE Case 57 ανά μέθοδο Αποδόμησης Ροής

## 6.4. IEEE Case 118

Στην Εικόνα 6.6 παρουσιάζεται το σύστημα IEEE Case 118 [21].



Εικόνα 6.6 Απεικόνιση συστήματος IEEE Case 118

Το σύστημα IEEE Case 118 αποτελείται από τρεις ζώνες. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι ίδια με αυτά της βιβλιογραφίας[21]. Το συνολικό φορτίο που καλούνται να καλύψουν οι γεννήτριες του διασυννοριακού συστήματος είναι **4242 MW**. Με εφαρμογή του Energy Dispatch προκύπτει ότι η παραγωγή των γεννητριών στον Πίνακα 6.14.

<b>ΚΟΜΒΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ</b>	<b><math>P_{gen}(MW)</math></b>
10	<b>505.0</b>
26	<b>485.0</b>
46	<b>20.0</b>
49	<b>223.0</b>
59	<b>308.0</b>
61	<b>195.0</b>
69	<b>707.0</b>
80	<b>509.0</b>
89	<b>637.0</b>
100	<b>653.0</b>

Πίνακας 6.14. Αποτέλεσμα Energy Dispatch για το σύστημα IEEE Case 118

Με Ροή Φορτίου υπολογίζονται οι ροές στις γραμμές και εμφανίζεται συμφόρηση σε αρκετές γραμμές του συστήματος σε κατάσταση N και N-1. Υπάρχουν τρεις γραμμές με συμφόρηση στην κατάσταση N με αποτέλεσμα να υπάρχει συμφόρηση στις ίδιες γραμμές στην πλειοψηφία των καταστάσεων N-1. Οι γραμμές με συμφόρηση στην κατάσταση N παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.15.

<b>ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ N</b>			
Στοιχείο εκτός Λειτουργίας	Στοιχείο με Συμφόρηση		Συμφόρηση(%)
	Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους	
-	49	69	<b>3.1</b>
	89	92	<b>1.5</b>
	100	103	<b>10.3</b>

Πίνακας 6.15. Συμφόρηση που εμφανίζεται στο σύστημα IEEE Case 118 στην κατάσταση N

Παρόμοια συμφόρηση εμφανίζεται και στις περιπτώσεις N-1 στις ίδιες γραμμές. Οι συμφορήσεις που εμφανίζονται στις καταστάσεις N-1 και είναι διαφορετικές από αυτές των γραμμών 49-69,89-92,100-103 φαίνονται στον Πίνακα 6.16.

<b>ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ N-1</b>									
Στοιχείο εκτός Λειτουργίας		Στοιχείο με Συμφόρηση		Συμφόρηση(%)	Στοιχείο εκτός Λειτουργίας		Στοιχείο με Συμφόρηση		Συμφόρηση(%)
Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους	Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους		Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους	Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους	
5	8	13	15	<b>2.4</b>	65	68	47	69	<b>17.8</b>
		15	17	<b>58.5</b>			23	24	<b>16.1</b>
		16	17	<b>14.5</b>			24	70	<b>45.3</b>
17	18	15	17	<b>6.5</b>	65	68	47	49	<b>7.7</b>
23	24	47	69	<b>1.5</b>			47	69	<b>163.1</b>
23	25	25	27	<b>1.0</b>			69	70	<b>6.4</b>
25	26	26	30	<b>42.6</b>	68	69	77	80	<b>10.1</b>
26	30	23	25	<b>43.7</b>			47	69	<b>50.3</b>
		25	27	<b>23.1</b>			47	69	<b>15.4</b>
		47	69	<b>2.5</b>	69	77	<b>53.9</b>		
25	27	23	25	<b>1.6</b>	68	81	77	80	<b>84.5</b>
		23	32	<b>5.3</b>			77	82	<b>0.2</b>
37	38	15	17	<b>19.1</b>	69	70	47	69	<b>1.2</b>
		42	49	<b>6.6</b>	77	82	77	80	<b>7.4</b>
		42	49	<b>6.6</b>	79	80	77	80	<b>1.3</b>
		47	69	<b>8.0</b>	80	99	94	100	<b>2.8</b>
38	65	42	49	<b>11.1</b>	81	80	47	69	<b>15.4</b>
		42	49	<b>11.1</b>			69	77	<b>53.9</b>
		47	69	<b>4.8</b>			77	80	<b>84.5</b>
42	49	42	49	<b>5.2</b>	85	89	77	82	<b>0.2</b>
42	49	42	49	<b>5.2</b>			86	87	<b>2.3</b>
49	66	47	69	<b>1.4</b>			88	89	85
49	66	47	69	<b>1.4</b>	94	95	94	96	<b>16.6</b>
49	69	47	69	<b>14.5</b>	94	96	94	95	<b>16.0</b>
59	63	47	69	<b>0.5</b>	98	100	94	100	<b>10.9</b>
63	64	47	69	<b>0.5</b>	99	100	94	100	<b>16.7</b>
64	65	47	69	<b>6.6</b>	100	103	100	106	<b>12.8</b>

Πίνακας 6.16. Συμφόρηση που εμφανίζεται στο σύστημα IEEE Case 118 στις καταστάσεις N-1.

Με εφαρμογή Ανακατανομής προκύπτει ο Πίνακας 6.17:

ΚΟΜΒΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	$P_g$ (MW)	$P_{\text{AFTER-RD}}$ (MW)	XRA(MW)	ΚΟΣΤΟΣ XRA(€)
12	0	70.7	70.7	8806.64
25	0	70	70	2025.88
26	485	340	-145	-3222.04
31	0	14.5	14.5	376.51
49	223	108	-115	-1917.00
65	0	441	441	15338.76
66	0	164.4	164.4	5371.38
69	707	517.9	-189.1	-4870.24
80	509	349.2	-159.8	-3932.19
89	637	530.6	-106.4	-2617.86
100	653	533.8	-119.2	-1503.20
103	0	73.9	73.9	2116.86
<b>SUM</b>			<b>0</b>	<b>15973.51</b>

Πίνακας 6.17 Αποτέλεσμα Ανακατανομής στο σύστημα IEEE Case 118

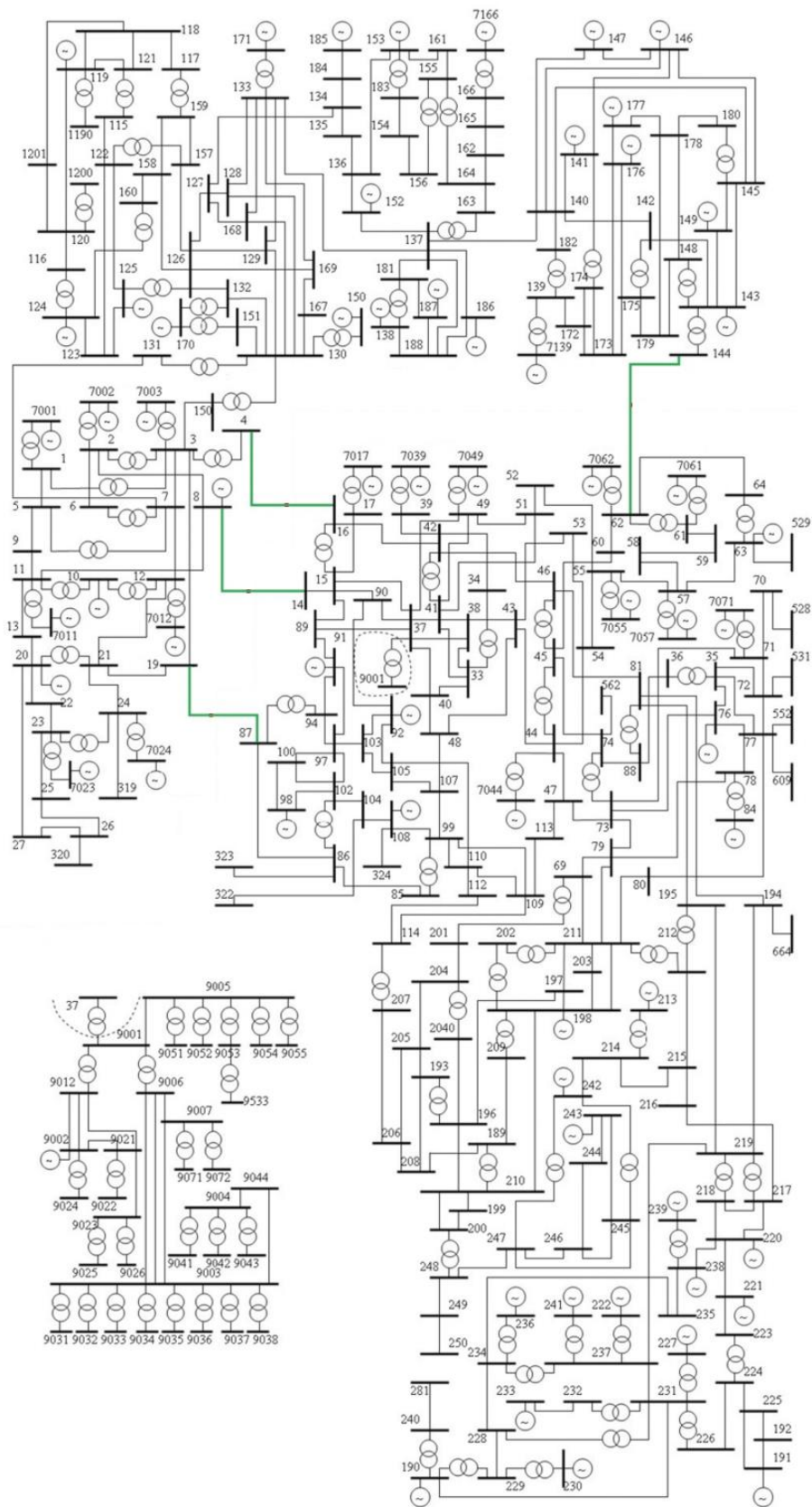
Με επιμερισμό του κόστους ανά στοιχείο με συμφόρηση το κόστος μοιράζεται ανά ζώνη με χρήση διαφορετικών μεθόδων αποδόμησης της ροής, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.18.

<b>ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑ ΖΩΝΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ</b>						
Μέθοδοι Αποδόμησης Ροής	ΖΩΝΗ1		ΖΩΝΗ2		ΖΩΝΗ3	
	Κόστος	%	Κόστος	%	Κόστος	%
<b>PFC</b>	312.40	2.0	11557.40	72.4	4103.64	25.7
<b>FLD</b>	244.69	1.5	11658.71	73.0	4070.05	25.5
<b>PFC-Vlaisavljevic</b>	312.40	2.0	11557.40	72.4	4103.64	25.7
<b>Χωρίς Επιμερισμό</b>	848.47	5.3	11054.78	69.2	4070.19	25.5

Πίνακας 6.18. Αποτέλεσμα Επιμερισμού Κόστους Ανακατανομής στις ζώνες του τροποποιημένου συστήματος IEEE Case 118 ανά μέθοδο Αποδόμησης Ροής

## 6.5. IEEE Case 300

Στην Εικόνα 6.7 παρουσιάζεται το σύστημα IEEE Case 300.



Εικόνα 6.7. Απεικόνιση συστήματος IEEE Case 300

Το σύστημα IEEE Case 300 αποτελείται από τρεις ζώνες. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι ίδια με αυτά της βιβλιογραφίας[22]. Οι κόμβοι του συστήματος χωρίζονται ανά ζώνη σύμφωνα με τον Πίνακα 6.19.

ΖΩΝΗ1								ΖΩΝΗ2				ΖΩΝΗ3			
1	22	47	73	99	526	7057	9033	115	135	155	175	189	211	231	281
2	23	48	74	100	528	7061	9034	116	136	156	176	190	212	232	664
3	24	49	76	102	531	7062	9035	117	137	157	177	191	213	233	2040
4	25	51	77	103	552	7071	9036	118	138	158	178	192	214	234	
5	26	52	78	104	562	9001	9037	119	139	159	179	193	215	235	
6	27	53	79	105	609	9002	9038	120	140	160	180	194	216	236	
7	33	54	80	107	1190	9003	9041	121	141	161	181	195	217	237	
8	34	55	81	108	1200	9004	9042	122	142	162	182	196	218	238	
9	35	57	84	109	7001	9005	9043	123	143	163	183	197	219	239	
10	36	58	85	110	7002	9006	9044	124	144	164	184	198	220	240	
11	37	59	86	112	7003	9007	9051	125	145	165	185	199	221	241	
12	38	60	87	113	7011	9012	9052	126	146	166	186	200	222	242	
13	39	61	88	114	7012	9021	9053	127	147	167	187	202	223	243	
14	40	62	89	201	7017	9022	9054	128	148	168	188	203	224	244	
15	41	63	90	207	7023	9023	9055	129	149	169	1201	204	225	245	
16	42	64	91	319	7024	9024	9071	130	150	170	7130	205	226	246	
17	43	69	92	320	7039	9025	9072	131	151	171	7139	206	227	247	
19	44	70	94	322	7044	9026	9121	132	152	172	7166	208	228	248	
20	45	71	97	323	7049	9031	9533	133	153	173		209	229	249	
21	46	72	98	324	7055	9032		134	154	174		210	230	250	

Πίνακας 6.19. Διαχωρισμός Κόμβων ανά Ζώνη

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι ίδια με αυτά της βιβλιογραφίας[22]. Το συνολικό φορτίο που καλούνται να καλύψουν οι γεννήτριες του διασυννοριακού συστήματος είναι **23847.7MW**. Με εφαρμογή του Energy Dispatch προκύπτει η παραγωγή των γεννητριών σύμφωνα με τον Πίνακα 6.20.

ΚΟΜΒΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	$P_{gen}(MW)$	ΚΟΜΒΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	$P_{gen}(MW)$
84	<b>1054.9</b>	227	<b>436.0</b>
98	<b>93.0</b>	233	<b>341.0</b>
119	<b>2041.0</b>	236	<b>881.0</b>
124	<b>321.0</b>	241	<b>24.8</b>
141	<b>297.0</b>	243	<b>342.0</b>
143	<b>800.0</b>	7002	<b>670.0</b>
146	<b>91.0</b>	7003	<b>1401.0</b>
153	<b>242.0</b>	7011	<b>668.0</b>
177	<b>125.0</b>	7012	<b>626.0</b>
185	<b>250.0</b>	7024	<b>543.0</b>
186	<b>2465.0</b>	7049	<b>718.0</b>
187	<b>1624.0</b>	7055	<b>158.0</b>
191	<b>2140.0</b>	7061	<b>1757.0</b>
198	<b>430.0</b>	7062	<b>568.0</b>
220	<b>460.0</b>	7130	<b>1726.0</b>
221	<b>554.0</b>	7023	<b>0.0</b>

Πίνακας 6.20. Αποτέλεσμα Energy Dispatch για το σύστημα IEEE Case 300

Με Ροή Φορτίου υπολογίζονται οι ροές στις γραμμές και εμφανίζεται συμφόρηση σε αρκετές γραμμές του συστήματος σε κατάσταση N και N-1. Υπάρχουν 17 γραμμές με συμφόρηση στην κατάσταση N με αποτέλεσμα να υπάρχει συμφόρηση στις ίδιες γραμμές στην πλειοψηφία των καταστάσεων N-1. Οι γραμμές με συμφόρηση στην κατάσταση N παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.21.

<b>ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ N</b>			
<b>Στοιχείο εκτός Λειτουργίας</b>	<b>Στοιχείο με Συμφόρηση</b>		<b>Συμφόρηση(%)</b>
	<b>Κόμβος Αρχής</b>	<b>Κόμβος Τέλους</b>	
-	19	87	<b>14.4</b>
	37	49	<b>5.7</b>
	45	60	<b>41</b>
	45	74	<b>3.3</b>
	46	81	<b>40.3</b>
	54	55	<b>6.6</b>
	55	57	<b>72.5</b>
	55	7055	<b>5.3</b>
	57	58	<b>27.4</b>
	60	62	<b>122.8</b>
	61	62	<b>79.3</b>
	61	7061	<b>42.5</b>
	78	84	<b>24.9</b>
	119	121	<b>7.8</b>
	130	7130	<b>13.6</b>
	191	192	<b>49.6</b>
	191	225	<b>53.5</b>

Πίνακας 6.21. Συμφόρηση που εμφανίζεται στο σύστημα IEEE Case 300 στην κατάσταση N.

Παρόμοια συμφόρηση εμφανίζεται και στις περιπτώσεις N-1 στις ίδιες γραμμές. Οι συμφορήσεις που εμφανίζονται στις καταστάσεις N-1 και είναι διαφορετικές από αυτές των γραμμών με συμφόρηση στην κατάσταση N παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.22.



## ΣΥΜΦΟΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ N-1

Στοιχείο εκτός Λειτουργίας		Στοιχείο με Συμφόρηση		Συμφόρηση(%)	Στοιχείο εκτός Λειτουργίας		Στοιχείο με Συμφόρηση		Συμφόρηση(%)	Στοιχείο εκτός Λειτουργίας		Στοιχείο με Συμφόρηση		Συμφόρηση(%)		
Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους	Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους		Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους	Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους		Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους	Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους		Κόμβος Αρχής	Κόμβος Τέλους
3	4	8	14	<b>81.0</b>	58	59	57	63	<b>121.7</b>	119	121	118	121	<b>156.0</b>		
		14	15	<b>58.2</b>			143	144	<b>2.9</b>			133	137	135	136	<b>78.2</b>
		41	49	<b>3.2</b>	59	61	57	63	<b>264.0</b>	137	140	136	137	<b>262.4</b>		
		86	87	<b>143.2</b>			143	144	<b>15.5</b>			4	16	<b>33.5</b>		
		91	94	<b>41.6</b>			4	16	<b>17.0</b>			16	42	<b>21.2</b>		
		94	97	<b>4.4</b>			16	42	<b>2.9</b>			57	63	<b>38.5</b>		
8	14	<b>81.0</b>	41	49			<b>5.5</b>	86	87			<b>33.1</b>				
14	15	<b>58.2</b>	44	54			<b>4.4</b>	140	142			<b>298.0</b>				
4	16	41	49	<b>3.2</b>	60	62	57	63	<b>1.7</b>	137	140	140	145	<b>101.5</b>		
		86	87	<b>143.2</b>			86	87	<b>3.1</b>			140	146	<b>62.0</b>		
		91	94	<b>41.6</b>			140	142	<b>117.7</b>			140	147	<b>5.8</b>		
		94	97	<b>4.4</b>			140	145	<b>43.1</b>			142	143	<b>54.8</b>		
		4	16	<b>13.4</b>			140	146	<b>13.1</b>			143	144	<b>256.5</b>		
		15	16	<b>10.2</b>			142	143	<b>26.6</b>			143	145	<b>50.1</b>		
12	21	3	19	<b>8.1</b>	61	62	143	144	<b>156.5</b>	139	182	148	178	<b>28.0</b>		
14	15	4	16	<b>4.7</b>			143	145	<b>21.6</b>			148	179	<b>28.9</b>		
15	16	8	14	<b>11.4</b>			148	178	<b>9.8</b>			173	175	<b>19.0</b>		
16	42	15	16	<b>12.7</b>			148	179	<b>12.1</b>			173	176	<b>19.5</b>		
		15	37	<b>116.1</b>			41	49	<b>11.4</b>			137	163	136	137	<b>19.8</b>
		15	89	<b>37.9</b>			41	51	<b>2.1</b>			139	182	139	172	<b>134.5</b>
		15	90	<b>99.5</b>	44	54	<b>15.6</b>	141	174	<b>5.9</b>						
		41	49	<b>11.6</b>	51	52	<b>13.9</b>	172	173	<b>181.8</b>						
		86	87	<b>78.6</b>	52	55	<b>1.0</b>	172	174	<b>250.7</b>						
4	16	<b>4.8</b>	57	63	<b>535.7</b>	173	175	<b>87.3</b>								
15	90	<b>1.9</b>	58	59	<b>23.0</b>	173	176	<b>67.1</b>								
19	87	15	90	<b>1.9</b>	62	64	57	63	<b>306.2</b>	140	182	139	172	<b>203.6</b>		
		41	49	<b>112.7</b>	63	64	57	63	<b>306.2</b>			140	141	<b>24.2</b>		
		41	51	<b>6.9</b>	77	78	69	79	<b>21.7</b>			141	174	<b>38.7</b>		
49	51	<b>6.2</b>	73	79			<b>6.7</b>	172	173	<b>308.7</b>						
37	90	15	90	<b>8.7</b>			81	195	<b>102.5</b>	172	174	<b>378.3</b>				
41	51	41	49	<b>23.1</b>	81	194	195	219	<b>24.8</b>	142	143	173	175	<b>139.1</b>		
42	46	38	43	<b>6.0</b>			73	79	<b>26.4</b>			173	176	<b>110.7</b>		
45	60	4	16	<b>17.0</b>			86	87	173			176	<b>9.6</b>	142	143	143
		16	42	<b>2.9</b>	91	94			<b>28.6</b>	148	178	<b>8.3</b>				
		41	49	<b>5.5</b>	94	97			<b>8.9</b>	148	179	<b>35.5</b>				
		44	54	<b>4.4</b>	87	94	86	87	<b>36.9</b>	142	175	148	179	<b>35.1</b>		
		86	87	<b>3.1</b>			118	121	<b>76.3</b>			173	174	<b>17.6</b>		
		140	142	<b>117.7</b>			117	118	118			1201	<b>3.7</b>	143	145	148
		140	145	<b>43.1</b>	119	1190			<b>29.3</b>	148	179	<b>2.7</b>				
		140	146	<b>13.1</b>	120	1201			<b>3.2</b>	143	148	143	145			<b>3.3</b>
		142	143	<b>26.6</b>	117	159	118	121	<b>76.3</b>	145	180	148	178	<b>67.5</b>		
		143	144	<b>156.5</b>			118	1201	<b>3.7</b>			148	179	<b>25.1</b>		
		143	145	<b>21.6</b>			119	1190	<b>29.3</b>			148	178	148	179	<b>11.1</b>
		148	178	<b>9.8</b>			120	1201	<b>3.2</b>			153	183	154	156	<b>34.1</b>
		148	179	<b>12.1</b>			118	1201	<b>5.0</b>			155	156	154	183	<b>55.9</b>
		46	81	44			47	<b>5.9</b>	118			119	119	1190	<b>238.3</b>	157
49	51	41	49	<b>19.9</b>	120	1201	<b>6.8</b>	163		164	136		137	<b>19.8</b>		
54	55	41	49	<b>7.3</b>	119	120	116	120		<b>9.8</b>	194		219	81	195	<b>102.5</b>
55	57	143	144	<b>3.3</b>			118	119	<b>129.0</b>	195		212		<b>31.5</b>		
57	58	143	144	<b>2.1</b>			118	1201	<b>26.9</b>							
				<b>2.1</b>			120	1201	<b>66.7</b>							

Πίνακας 6.22. Συμφόρηση που εμφανίζεται στο σύστημα IEEE Case 300 στις καταστάσεις N-1.

Με εφαρμογή Ανακατανομής προκύπτει ο Πίνακας 6.23.

ΚΟΜΒΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	$P_g$ (MW)	$P_{AFTER-RD}$ (MW)	$X_{RA}$ (MW)	ΚΟΣΤΟΣ $X_{RA}$ (€)
84	1054.9	777.0	-277.9	-6226.75
108	0.0	197.0	197.0	7570.85
119	2041.0	1844.6	-196.4	-1512.08
124	321.0	307.4	-13.6	-363.71
143	800.0	785.5	-14.5	-445.66
152	0.0	62.6	62.6	2187.25
176	0.0	117.7	117.7	3985.26
186	2465.0	2000.8	-464.2	-464.29
191	2140.0	1551.3	-588.7	-14164.81
213	0.0	13.1	13.1	653.11
230	0	458.0	458.0	18241.49
238	0	267.0	267.0	10588.60
239	0	621.0	621.0	25599.68
241	24.8	1127.0	1102.2	43058.92
243	342.0	169.0	-173.0	-5940.23
7017	0.0	411.2	411.2	14442.36
7024	543.0	363.3	-179.7	-5390.41
7044	0.0	132.0	132.0	5124.99
7049	718.0	393.1	-324.9	-2223.42
7055	158.0	150.0	-8.0	-238.18
7057	0.0	173.2	173.2	10812.98
7061	1757.0	530.5	-1226.5	-25524.52
7062	568.0	393.6	-174.4	-4622.16
7071	0.0	203.0	203.0	6412.27
7130	1726.0	709.2	-1016.8	-30259.71
7139	0.0	802.1	802.1	29019.96
7166	0.0	14.4	14.4	530.48
9054	0.0	84.0	84.0	2768.76
<b>SUM</b>			<b>0</b>	<b>83621.0</b>

Πίνακας 6.23. Αποτέλεσμα Ανακατανομής στο σύστημα IEEE Case 300

Με επιμερισμό του κόστους ανά στοιχείο με συμφόρηση το κόστος μοιράζεται ανά ζώνη με χρήση διαφορετικών μεθόδων αποδόμησης της ροής, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.24.

ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑ ΖΩΝΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗΣ						
Μέθοδοι Αποδόμησης Ροής	ΖΩΝΗ1		ΖΩΝΗ2		ΖΩΝΗ3	
	Κόστος	%	Κόστος	%	Κόστος	%
<b>PFC</b>	65373.13	78.2	5218.25	6.2	13029.51	15.6
<b>FLD</b>	63688.56	76.2	6768.49	8.1	13163.84	15.7
<b>PFC-Vlaisavljevic</b>	65353.86	78.2	5237.40	6.3	13029.63	15.6
<b>Χωρίς Επιμερισμό</b>	65264.41	78.0	5264.53	6.3	13091.95	15.7

Πίνακας 6.24. Αποτέλεσμα Επιμερισμού Κόστους Ανακατανομής στις ζώνες του τροποποιημένου συστήματος IEEE Case 300 ανά μέθοδο Αποδόμησης Ροής

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα και εξάγονται βασικά συμπεράσματα για την μεθοδολογία επιμερισμού του κόστους διορθωτικών ενεργειών. Τέλος αναφέρονται κάποια πιθανά μελλοντικά βήματα της συνέχειας της παρούσας εργασίας

#### 7.1. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου επιμερισμού κόστους στα συστήματα του 6<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ καθώς και στο σύστημα τριών ζωνών του 5<sup>ου</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1.

Συνολικό Κόστος Ανακατανομής Ανά Ζώνη και Μέθοδο									
Σύστημα	Μέθοδος Αποδόμησης Ροής	ΖΩΝΗ1		ΖΩΝΗ2		ΖΩΝΗ3		ΖΩΝΗ4	
		Κόστος	%	Κόστος	%	Κόστος	%	Κόστος	%
Σύστημα Τριών Ζωνών	PFC	10895.87	26.9	26338.06	64.9	3330.08	8.2	-	-
	FLD	11036.51	27.2	26310.74	64.9	3216.75	7.9	-	-
	PFC-Vlaisavljevic	10890.27	26.8	26341.19	64.9	3332.54	8.2	-	-
	Χωρίς Επιμερισμό	10898.97	26.9	27850.35	68.7	1814.69	4.5	-	-
IEEE Case 30	PFC	4953.87	100	0	0	0	0	-	-
	FLD	4953.87	100	0	0	0	0	-	-
	PFC-Vlaisavljevic	4953.87	100	0	0	0	0	-	-
	Χωρίς Επιμερισμό	4953.87	100	0	0	0	0	-	-
IEEE Case 39	PFC	5390.59	33.1	10706.14	65.8	185.21	1.1	0	0
	FLD	16058.17	98.6	54.09	0.3	169.69	1.0	0	0
	PFC-Vlaisavljevic	5389.62	33.1	10705.17	65.7	187.15	1.1	0	0
	Χωρίς Επιμερισμό	16025.48	98.4	13.39	0.1	192.61	1.2	50.46	0.3
IEEE Case 57	PFC	198.82	7.1	607.42	21.8	1969.39	70.6	14.82	0.5
	FLD	188.56	6.8	527.12	18.9	2066.26	74.0	8.51	0.3
	PFC-Vlaisavljevic	188.67	6.8	608.23	21.8	1987.27	71.2	6.28	0.2
	Χωρίς Επιμερισμό	221.53	7.9	178.08	6.4	1888.96	67.7	501.89	18.0
IEEE Case 118	PFC	312.40	2.0	11557.40	72.4	4103.64	25.7	-	-
	FLD	244.69	1.5	11658.71	73.0	4070.05	25.5	-	-
	PFC-Vlaisavljevic	312.40	2.0	11557.40	72.4	4103.64	25.7	-	-
	Χωρίς Επιμερισμό	848.47	5.3	11054.78	69.2	4070.19	25.5	-	-
IEEE Case 300	PFC	65373.13	78.2	5218.25	6.2	13029.51	15.6	-	-
	FLD	63688.56	76.2	6768.49	8.1	13163.84	15.7	-	-
	PFC-Vlaisavljevic	65353.86	78.2	5237.40	6.3	13029.63	15.6	-	-
	Χωρίς Επιμερισμό	65264.41	78.0	5264.53	6.3	13091.95	15.7	-	-

Πίνακας 7.1. Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Κατανομής Κόστους για το σύνολο των συστημάτων που μελετήθηκαν συναρτήσει της μεθόδου αποδόμησης της ροής

Στον Πίνακα 7.1 παρατηρείται μία κοινή κατανομή του κόστους ανά σύστημα ανεξάρτητη από την μέθοδο αποδόμησης της ροής. Ειδικότερα οι μέθοδοι PFC και PFC-Vlaisavljevic έχουν σε μεγάλο βαθμό παρόμοια αποτελέσματα. Οι μικρές διαφορές τους οφείλονται στον τρόπο λειτουργίας των μεθόδων οι οποίες είναι όμοιες στον υπολογισμό των Internal και Loop Flows,

αλλά διαφοροποιούνται στον υπολογισμό των Allocated Flows με τον υπολογισμό του πίνακα NEX. Η μέθοδος FLD έχει μεγαλύτερες διαφορές σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους αλλά όχι σημαντικές. Η μοναδική περίπτωση κατά την οποία υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην κατανομή του κόστους ανά μέθοδο είναι στο σύστημα IEEE Case 39. Η διαφορά έγκειται στον διαφορετικό υπολογισμό των Loop Flows μεταξύ των μεθόδων. Συγκεκριμένα η διαφορά έγκειται στην γραμμή 2-3 που από τον Πίνακα 6.7 παρατηρείται συμφόρηση στην κατάσταση N και στην πλειοψηφία καταστάσεων N-1. Στην γραμμή 2-3, η οποία είναι εσωτερική της ζώνης 1, η FLD εντοπίζει 39.4MW Loop Flow από την Ζώνη 2, ενώ οι PFC και PFC-Vlaisavljevic εντοπίζουν 133.2MW Loop Flow από την Ζώνη 2. Επειδή το τεχνικό μέγιστο της γραμμής είναι 500MW, το όριο για το αν το Loop Flow θεωρείται Above Threshold είναι 50MW. Τελικά οι PFC και PFC-Vlaisavljevic υπολογίζουν ότι η ροή είναι Above Threshold και πρώτη επωμίζεται το κόστος επίλυσης της συμφόρησης η Ζώνη 2. Αντίθετα η FLD αναγνωρίζει την ροή ως Below Threshold και πρώτη επωμίζεται το κόστος η Ζώνη 1, που δημιουργεί Internal Flow, όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο Επιμερισμός Κόστους ανά Ζώνη.

Στον Πίνακα 7.1 παρατηρείται επίσης, σημαντική διαφορά στην κατανομή του κόστους διορθωτικών ενεργειών για την επίλυση της συμφόρησης μεταξύ, της νέας μεθοδολογίας που εισάγει ο ACER και της κατανομής του κόστους που ισχύει σήμερα (Χωρίς Επιμερισμό), η οποία αποδίδει το κόστος εμφάνισης συμφόρησης στην ζώνη που ανήκει το στοιχείο. Συγκεκριμένα υπάρχει αξιοσημείωτη διαφορά σε ορισμένα συστήματα μεταφοράς που μελετήθηκαν. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην ύπαρξη Loop Flows στα στοιχεία με συμφόρηση. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση που υπεύθυνο για δημιουργία συμφόρησης βρεθεί Internal Flow ή/και Allocated Flow το κόστος επωμίζεται η ζώνη που ανήκει το υπερφορτωμένο στοιχείο. Τελικά η μόνη περίπτωση που το κόστος επωμίζεται ζώνη διαφορετική από αυτή που ανήκει το υπερφορτωμένο στοιχείο είναι στην περίπτωση που υπεύθυνα για την δημιουργία τους συμφόρησης βρεθούν Loop Flows. Συμπερασματικά, η νέα μέθοδος που εισάγει ο ACER, έχει σημαντική επιρροή σε διασυνδεδεμένα συστήματα μεταφοράς με τοπολογία που ενισχύει την ύπαρξη Loop Flows.

Κρίσιμο χαρακτηριστικό των μεθόδων είναι ο υπολογιστικός χρόνος εκτέλεσης τους. Στην παρούσα εργασία έχουν μελετηθεί μικρά συστήματα. Ακόμα η μέθοδος εφαρμόζεται ανά MTU και όχι για ολόκληρη μέρα παράδοσης (Delivery Day). Είναι προφανές ότι οι χρόνοι έχουν ουσιαστικό νόημα συγκριτικά μεταξύ των μεθόδων, ενώ μεμονωμένα δεν χαρακτηρίζουν την αποδοτικότητα τους. Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται οι υπολογιστικοί χρόνοι εκτέλεσης των μεθόδων ανά σύστημα δοκιμής.

<b>Υπολογιστικός Χρόνος ανά Μέθοδο και Σύστημα</b>		
<b>Σύστημα Μεταφοράς</b>	<b>Μέθοδος Αποδόμησης Ροής</b>	<b>Υπολογιστικός Χρόνος(s)</b>
Σύστημα Τριών Ζωνών	PFC	<b>0.0017</b>
	FLD	<b>0.9460</b>
	PFC-Vlaisavljevic	<b>1.0125</b>
IEEE Case 30	PFC	<b>0.0048</b>
	FLD	<b>1.1050</b>
	PFC-Vlaisavljevic	<b>1.2346</b>
IEEE Case 39	PFC	<b>0.0179</b>
	FLD	<b>1.4503</b>
	PFC-Vlaisavljevic	<b>1.7112</b>
IEEE Case 57	PFC	<b>0.0072</b>
	FLD	<b>1.6046</b>
	PFC-Vlaisavljevic	<b>2.1590</b>
IEEE Case 118	PFC	<b>0.3561</b>
	FLD	<b>30.6047</b>
	PFC-Vlaisavljevic	<b>33.0687</b>
IEEE Case 300	PFC	<b>10.1839</b>
	FLD	<b>1973.5400</b>
	PFC-Vlaisavljevic	<b>2336.4575</b>

Πίνακας 7.2. Υπολογιστικοί χρόνοι Εκτέλεσης των μεθόδων αποδόμησης της ροής ανά σύστημα δοκιμής

Τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα και σε συμφωνία με τον τρόπο λειτουργίας των μεθόδων, όπως παρουσιάζεται στο υποκεφάλαιο Μέθοδοι Αποδόμησης της Ροής. Συγκεκριμένα η PFC είναι μία μέθοδος που απαιτεί τον υπολογισμό του πίνακα PTDF για κάθε κατάσταση N-1 και τα διανύσματα παραγωγής και κατανάλωσης των κόμβων του συστήματος. Πρακτικά για κάθε κατάσταση του συστήματος N και N-1 χρειάζεται ο υπολογισμός ενός πίνακα. Στην συνέχεια με κατάλληλο συνδυασμό του πίνακα PTDF της παραγωγής και κατανάλωσης σε κάθε κόμβο υπολογίζονται τα είδη ροών στις καταστάσεις N και N-1. Οι μέθοδοι PFC-Vlaisavljevic και FLD απαιτούν την εύρεση περισσότερων πινάκων ανά κατάσταση συστήματος N και N-1, συγκεκριμένα απαιτούν τον υπολογισμό του πίνακα PTDF, όπως η απλή PFC, αλλά και τους πίνακες NEX και PEX, αντίστοιχα. Στην συνέχεια, για κάθε γραμμή με συμφόρηση ανά κατάσταση του συστήματος απαιτείται ο υπολογισμός του πίνακα  $PTDF_{node-to-node}$  από τον πίνακα PTDF. Τέλος, επειδή γνωρίζουμε την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, τα Allocated Flows αποδομούνται περαιτέρω σε Export, Import, Transit Flows.

Συνοπτικά παρατηρήθηκε μία όμοια κατανομή του κόστους διορθωτικών ενεργειών στις αντίστοιχες ζώνες ελέγχου για την πλειοψηφία των συστημάτων που μελετήθηκαν. Επίσης το αποτέλεσμα της μεθόδου επιμερισμού του κόστους διορθωτικών ενεργειών, σε σχέση με την ήδη υπάρχουσα, είναι αρκετά διαφορετική σε διασυνδεδεμένα συστήματα μεταφοράς που παρατηρούνται συχνά Loop Flows. Σημαντική διαφορά έχουμε στον υπολογιστικό χρόνο εκτέλεσης των μεθόδων, με την PFC να είναι με διαφορά πιο απλή και ως εκ τούτου πιο γρήγορη.

## 7.2. Συμπεράσματα

Η μέθοδος επιμερισμού του κόστους που δημιουργείται από την επίλυση της συμφόρησης στους υπεύθυνους για την δημιουργία της TSOs, όπως προτάθηκε από τον ACER, είναι μία μέθοδος πολλών και διαφορετικών βημάτων τα οποία μπορούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο αποτέλεσμα της μεθόδου. Η απόδοση του κόστους ανά στοιχείο με συμφόρηση είναι το πρώτο σημαντικό βήμα για την εφαρμογή της μεθόδου. Αν και ο ACER μελέτησε διαφορετικούς τρόπους κατανομής, η LCBM ήταν κοινώς αποδεκτή μέθοδος από την πλειοψηφία των TSOs για τον σκοπό αυτό. Σημαντικό βήμα στην ακολουθία της μεθόδου είναι οι μέθοδοι αποδόμησης της ροής. Όπως περιγράφηκε και στο υποκεφάλαιο Αποδόμηση της Ροής, τα αποτελέσματα των μεθόδων έχουν διαφορές αλλά σπάνια μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική διαφορά στο αποτέλεσμα του επιμερισμού του κόστους, όπως περιγράφηκε στα Αποτελέσματα. Επιπρόσθετα η μέθοδος PFC είναι αρκετά πιο γρήγορη. Τελικά θα μπορούσε βεβαιωμένα να υποθεί ότι η μέθοδος PFC είναι η καλύτερη μέθοδος για την εφαρμογή της μεθοδολογίας επιμερισμού κόστους. Το συμπέρασμα της παρούσας εργασίας είναι ότι η PFC είναι η καλύτερη μέθοδος, για την εφαρμογή της στην μεθοδολογία, επειδή κρίσιμες αποφάσεις του ACER κατά την δημιουργία της μεθοδολογίας οδήγησαν σε αυτό το συμπέρασμα. Πιο συγκεκριμένα μία αρκετά σημαντική απόφαση του ACER είναι να θεωρήσει ότι στην περίπτωση που Allocated Flow βρεθεί να συντελεί σε συμφόρηση, το κόστος επωμίζεται η ζώνη στην οποία ανήκει η γραμμή και όχι η ζώνη η οποία προκαλεί την ροή. Αυτή η απόφαση ουσιαστικά κάνει μη σημαντική την εύρεση της Ζώνης από την οποία προέρχεται η ροή. Άρα κάνει μη υποχρεωτική την περαιτέρω αποδόμηση των Allocated Flows σε Export, Import, Transit Flows, κάτι που δεν μπορεί να κάνει η απλή PFC, ενώ μπορούν οι PFC-Vlaisavljevic και FLD. Ακόμα ο τρόπος αντιμετώπισης των ανακουφιστικών ροών είναι ένα σημαντικό θέμα που εκκίνησε αρκετή συζήτηση μεταξύ των TSOs και έχει σημαντική επιρροή στο αποτέλεσμα της συνολικής μεθόδου. Ο ACER κατέληξε στην απόφαση να μηδενίσει τις όποιες ανακουφιστικές ροές, πριν την εφαρμογή του Loop-Threshold, με αποτέλεσμα να μην θεωρεί ότι θα πρέπει να ανταμείβεται η ύπαρξή τους. Η απόφαση αυτή είναι λογική δεδομένου ότι πάντα η συμφόρηση λόγω Allocated Flows θα αποδίδεται στην ζώνη που ανήκει η γραμμή. Η μόνη περίπτωση που θα μπορούσε να ανταμείβονται τα Relieving Flows είναι στις περιπτώσεις των Loop Flows, κάτι που ο ACER δεν υιοθέτησε. Τέλος η νέα μεθοδολογία έχει σημαντική διαφορά στην κατανομή του κόστους από την ήδη υπάρχουσα σε διασυνδεδεμένα συστήματα μεταφοράς που ευνοείται η ύπαρξη Loop Flows, κάτι που δεν ισχύει σε περιπτώσεις συστημάτων που η δημιουργία Loop Flows είναι σπάνια.

### 7.3. Μελλοντική Συνέχεια

Η μελλοντική συνέχεια της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να είναι η πλήρης ανάπτυξη της μεθόδου επιμερισμού του κόστους διορθωτικών ενεργειών όπως ακριβώς περιγράφεται από τον ACER[1], [2] σε πραγματικά συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα απαραίτητα δεδομένα και οι αλλαγές που χρειάζονται είναι συνοπτικά οι εξής:

1. Χρήση πραγματικού CGM που χρησιμοποιεί ή θα χρησιμοποιήσει το RCC.
2. Χρήση πραγματικών αποτελεσμάτων της Αγοράς Επόμενης Μέρας (DAM) και της Ενδοημερήσιας Αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (IDA).
3. Ακριβής διαχωρισμός της εμφάνισης συμφόρησης και των ενεργειών επίλυσης της ανά MTU όπως περιγράφεται στην μεθοδολογία[1], [2].
4. Μελέτη της χρήσης PSTs όπως αναφέρεται στην μεθοδολογία[1], [2].

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators (ACER), “DECISION No 31/2020 OF THE EUROPEAN UNION AGENCY FOR THE COOPERATION OF ENERGY REGULATORS ON THE SEE CCR TSO’s PROPOSAL FOR THE METHODOLOGY FOR COST SHARING OF REDISPATCHING AND COUNTERTRADING,” 2020. [Online]. Available: <https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/nc-tasks/SEE%20-%2074%20-%20ACERs%20decision.pdf>
- [2] European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators (ACER), “ACER Decision on the Common methodology for redispatching and countertrading cost sharing for the SEE CCR: Annex I,” 2020. [Online]. Available: <https://www.acer.europa.eu/en/Electricity/MARKET-CODES/CAPACITY-ALLOCATION-AND-CONGESTION-MANAGEMENT/19%20RDCT%20Cost%20Sharing/Action%2010%20-%20RDCT%20Cost%20Sharing%20SEE%20ACER%20Decision%20-%20Annex%20I.pdf>
- [3] M. Klos and K. Wawrzyniak, “Comparing Load Flow Decomposition Methods for Cost Sharing of Coordinated European Redispatch,” in *2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, IEEE, Sep. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEM.2019.8916555.
- [4] Pavesi M, Casteren J, and Graaff S, “The full line decomposition method – a further development for causation-based cost sharing,” *Cigre Science & Engineering*, vol. 9, pp. 27–43, Oct. 2017.
- [5] D. Vlaisavljevic, I. M. Vlaisavljevic, M. Vukasovic, and Z. Vujasinovic, “Power Flow Colouring: A Novel Power Flow Tracing Methodology Tailored for the European Zonal Electricity Market Design,” in *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, IEEE, Sep. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905708.
- [6] European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators (ACER), “Redispatching and countertrading.” [Online]. Available: <https://www.acer.europa.eu/electricity/market-rules/capacity-allocation-and-congestion-management/redispatching-and-countertrading>
- [7] A. Pillay, S. Prabhakar Karthikeyan, and D. P. Kothari, “Congestion management in power systems – A review,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 70, pp. 83–90, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.01.022.
- [8] R. Weinhold and R. Mieth, “Uncertainty-Aware Capacity Allocation in Flow-Based Market Coupling,” *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1–13, 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2023.3265320.
- [9] K. Van Den Bergh, D. Couckuyt, E. Delarue, and W. D’Haeseleer, “Redispatching in an interconnected electricity system with high renewables penetration,” *Electric Power Systems Research*, vol. 127, pp. 64–72, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2015.05.022.

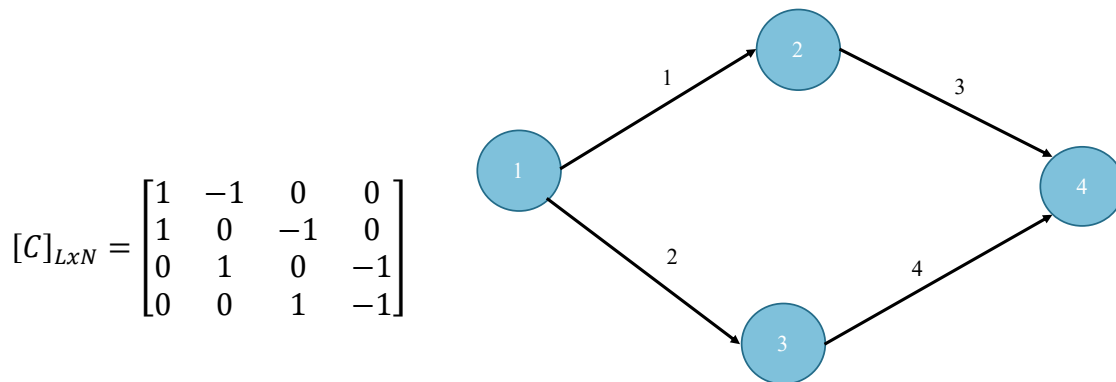


- [10] ENTSO-E, “REGIONAL SECURITY COORDINATORS.” [Online]. Available: <https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/RSC%20Factsheet.pdf>
- [11] ENTSO-E, “Enhanced TSO Regional Coordination for Europe.” [Online]. Available: [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/entsoe\\_regional%20coordination\\_Europe\\_191031.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/entsoe_regional%20coordination_Europe_191031.pdf)
- [12] NEMO COMMITTEE, “EUPHEMIA Public Description Single Price Coupling Algorithm,” Oct. 2020. [Online]. Available: <https://www.nemo-committee.eu/assets/files/Euphemia-Public-Description.pdf>
- [13] D. Schönheit, M. Kenis, L. Lorenz, D. Möst, E. Delarue, and K. Bruninx, “Toward a fundamental understanding of flow-based market coupling for cross-border electricity trading,” *Advances in Applied Energy*, vol. 2, May 2021, doi: 10.1016/j.adapen.2021.100027.
- [14] Joint Task Force ACER – ENTSO-E, “Regulatory framework for crossborder redispatching and countertrading,” 2012. [Online]. Available: <https://www.ceer.eu/documents/104400/-/-/f0c4f85b-ca22-f700-3042-381f5636fb9b>
- [15] R. Dakhare and V. K. Chandrakar, “Congestion Management by Phase Shifting Transformer Using Fuzzy Logic Control,” in *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, IEEE, Apr. 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/I2CT51068.2021.9418190.
- [16] C. Achayuthakan, C. J. Dent, J. W. Bialek, and W. Ongsakul, “Electricity tracing in systems with and without circulating flows: Physical insights and mathematical proofs,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 1078–1087, May 2010, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2037506.
- [17] J. Bialek, “Tracing the flow of electricity,” *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 143, no. 4, p. 313, 1996, doi: 10.1049/ip-gtd:19960461.
- [18] Illinois Center for a Smarter Electric Grid (ICSEG), *IEEE 30-Bus System*. 1961. [Online]. Available: <https://uofi.box.com/s/frjqsg9vpe6dvv7ufodd>
- [19] Illinois Center for a Smarter Electric Grid (ICSEG), *IEEE 39-Bus System*. 1989. [Online]. Available: <https://uofi.box.com/s/953x4qwlsgl7bg3zkhpo>
- [20] Illinois Center for a Smarter Electric Grid (ICSEG), *IEEE 57-Bus System*. 1993. [Online]. Available: <https://uofi.box.com/s/0ay9ci4jxzugw1g2dszl>
- [21] Illinois Center for a Smarter Electric Grid (ICSEG), *IEEE 118-Bus System*. 1962. [Online]. Available: <https://uofi.box.com/s/hocqikjl2ukpizvb54bd>
- [22] Illinois Center for a Smarter Electric Grid (ICSEG), *IEEE 300-Bus System*. 1993. [Online]. Available: <https://uofi.box.com/s/c9ojr00vv738u2dowk0c>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Πίνακας PTDF

Για τον υπολογισμό του πίνακα PTDF αρχικά υπολογίζεται ο πίνακας  $C$  διαστάσεων  $Line * Nodes$ . Ο πίνακας  $C$  χαρακτηρίζει την τοπολογία του δικτύου και περιγράφει τους κόμβους αρχής και τέλους των γραμμών. Στην περίπτωση που η γραμμή  $j$  έχει αφετηρία τον κόμβο  $i$ , το στοιχείο του πίνακα  $i, j$  λαμβάνει την τιμή 1. Αντίστοιχα στην περίπτωση που ο κόμβος  $z$  είναι το τέλος της γραμμής  $j$ , τότε το στοιχείο του πίνακα  $z, j$ , λαμβάνει την τιμή -1.



Στην συνέχεια ακολουθεί ο υπολογισμός του πίνακα Αγωγιμοτήτων  $[Y]_{N \times N}$  που περιγράφει την αντίσταση κάθε γραμμής. Οι αγωγιμότητες είναι μιγαδικές ποσότητες, αλλά επειδή χρησιμοποιείται η DC Μέθοδος, οι πραγματικές αντιστάσεις είναι μηδενικές, οπότε θεωρούμε μηδενικές απώλειες και μικρές διαφορές γωνιών στους κόμβους όπου:

$$\cos(\theta_1 - \theta_2) = 1 \text{ και } \sin(\theta_1 - \theta_2) = \theta_1 - \theta_2 = 0.$$

Τελικά ορίζεται ο πίνακας  $[Y]_{N \times N}$  ως:

$$[Y]_{N \times N} = [C^T]_{N \times L} * [\bar{Y}_d]_{L \times L} * [C]_{L \times N} * [B]_{N \times N}$$

Όπου:

$$[\bar{Y}_d]_{L \times L} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ & & & \\ & & & \\ & & & \end{bmatrix} \text{ και } Y_{11} = y_{12} + y_{13} + \dots$$

Πλέον μπορούμε να συνδέσουμε την ισχύ που ρέει στις γραμμές, καθώς και τις εισαγωγές ισχύος στους κόμβους με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$[P_L]_{L \times 1} = [B_d]_{L \times L}^{14} * [C]_{L \times N} * [\theta_N]_{N \times 1} \quad (1)$$

$$[P_N]_{N \times 1} = [C^T]_{N \times L} * [B_d]_{L \times L} * [C]_{L \times N} * [\theta_N]_{N \times 1} = [B]_{N \times N} * [\theta_N] \quad (2)$$

Οι εξισώσεις έχουν κοινό τον πίνακα  $[\theta_N]$ . Αν λύσουμε την (2) ως προς  $[\theta_N]$  και αντικαταστήσουμε στην (1) προκύπτει σχέση που συνδέει την ισχύ στους κόμβους με αυτή στις γραμμές. Για να λύσουμε ως προς  $\theta_N$  πρέπει ο  $[B]$  να είναι αντιστρέψιμος κάτι που δεν ισχύει γιατί η ορίζουσα του είναι μηδενική. Για να είναι αντιστρέψιμος ο  $[B]$  αφαιρούμε τις στήλες και τις γραμμές που σχετίζονται με τον ζυγό αναφοράς (slack bus) και καταλήγουμε στην παρακάτω λύση:

$$[P_L] = [B_d] * [C] * [B]'^{-1} * P_N'$$

Τελικά το γινόμενο των πινάκων  $[B_d] * [C] * [B]'^{-1} = [PTDF]$

$$[P_L] = [PTDF] * P_N'$$

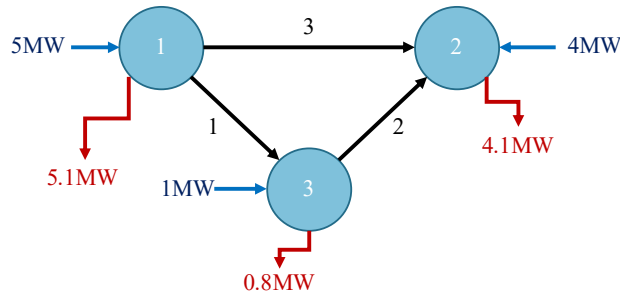
Ένα στοιχείο του πίνακα  $[PTDF]$ ,  $PTDF_{l,k}$  εκφράζει την μεταβολή στην γραμμή  $l$ , αν στον κόμβο  $k$  εισαχθεί ένα πρόσθετο MW (και απορροφηθεί από τον slack-bus). Σε περίπτωση που εισαχθεί 1 MW στον slack-bus δεν παρατηρείται μεταβολή στις γραμμές, διότι απορροφάτε εσωτερικά στον κόμβο.

---

<sup>14</sup> Το  $[B_d]$  προκύπτει ως  $[\bar{Y}_d]_{L \times L} = j * [B_d]$

## Πίνακας PEX,NEX

Η μεθοδολογία υπολογισμού του πίνακα PEX και NEX είναι ίδια με μικρές διαφορές, που θα αναφερθούν στο τέλος. Οι πίνακες αυτοί εκφράζουν την ισχύ ανταλλαγής μεταξύ των κόμβων του συστήματος, είτε συνολικά για τον πίνακα PEX, είτε για λόγους αγοράς για τον πίνακα NEX. Με σκοπό την καλύτερη κατανόηση θα εφαρμοστεί η μεθοδολογία με την βοήθεια του παραδείγματος:



Αρχικά δημιουργούνται τα διανύσματα παραγωγής  $P_g$  και κατανάλωσης του συστήματος  $P_d$  ως:

$$P_g = \begin{bmatrix} 5.0 \\ 4.0 \\ 1.0 \end{bmatrix} \quad P_d = \begin{bmatrix} 5.1 \\ 4.1 \\ 0.8 \end{bmatrix}$$

Για τον υπολογισμό της ροής σε κάθε γραμμή γίνεται χρήση του πίνακα PTDF, όπου προκύπτει ότι:

$$\text{Branch Power Flow} = \begin{bmatrix} -0.1054 \\ 0.0946 \\ 0.0054 \end{bmatrix}$$

Στην συνέχεια, όπως και για τον υπολογισμό του πίνακα PTDF, δημιουργείται ο πίνακας  $[C]$  ως:

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Παρατηρείται ότι στον πίνακα Branch Power Flow έχουμε αρνητική ροή. Για αυτόν τον λόγο αλλάζει η κατεύθυνση αναφοράς μεταβάλλοντας κατάλληλα τον πίνακα  $[C]$ , με αποτέλεσμα:

$$[C] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \text{Branch Power Flow} = \begin{bmatrix} 0.1054 \\ 0.0946 \\ 0.0054 \end{bmatrix}$$

Επόμενο βήμα είναι ο χωρισμός του πίνακα  $[C]$  σε έναν πίνακα αφετηρίας  $[C_d]$  και σε έναν πίνακα τέλους  $[C_u]$  ως:

$$[C_d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [C_u] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Έπειτα κατασκευάζεται ο πίνακας  $F_{matrix}$  ως τον  $diag(\text{Branch Power Flow})$ , δηλαδή:

$$F_{matrix} = \begin{bmatrix} 0.1054 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0946 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0054 \end{bmatrix}$$

Σκοπός είναι ο υπολογισμός του πίνακα  $F_d$  ως:

$$F_d = [C_d'] * F_{matrix} * [C_u] = \begin{bmatrix} 0 & 0.0054 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.1054 & 0.0946 & 0 \end{bmatrix}$$

Στην συνέχεια κατασκευάζεται ο πίνακας  $P_{matrix}$  ως:

$$P_{matrix} = P_d + F_d * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.1 \\ 4.1 \\ 1.0 \end{bmatrix}$$

Τέλος υπολογίζεται ο πίνακας  $A_{d_{N*N}}$  ως:

$$A_d(i,j) = \text{abs} \left( \frac{F_d(i,j)}{P_{matrix}(j)} \right)$$

Προκύπτει ότι:

$$A_d = \begin{bmatrix} 1.0 & -0.0013 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 \\ -0.0207 & -0.0231 & 1.0 \end{bmatrix}$$

Και στην περίπτωση που είναι αντιστρέψιμος ( $P_{matrix} > 0$ ) υπολογίζεται ο αντίστροφος του ως:

$$\text{inv}A_d = \text{inv}(A_d) = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0013 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 \\ 0.0207 & 0.0231 & 1.0 \end{bmatrix}$$

Τελικά υπολογίζεται ο πίνακας  $PEX$  ως:

$$PEX(i,j) = P_d(j) * P_g(i) * \frac{\text{inv}A_d(i,j)}{P_{matrix}(i)}$$

Στο παράδειγμα προκύπτει ότι:

$$PEX = \begin{bmatrix} 4.995 & 0.005 & 0 \\ 0 & 4.0 & 0 \\ 0.105 & 0.095 & 0.8 \end{bmatrix}$$

Για τον υπολογισμό του πίνακα NEX ισχύει η ίδια μεθοδολογία με μόνη διαφορά ότι αντί για  $P_g$  και  $P_d$  χρησιμοποιείται  $P_{g,Allocated}$  και  $P_{d,Allocated}$ , αντίστοιχα.