



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

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΤΙΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ
ΧΡΗΣΤΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

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

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....
Αθανάσιος Ε. Διαμαντόπουλος

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

Copyright © Αθανάσιος Διαμαντόπουλος, 2011.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Στους γονείς μου, Δημήτρα και Λευτέρη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε μια ανταγωνιστική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, η εγκατάσταση ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς μπορεί να βελτιώσει την ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος και να βοηθήσει τους συμμετέχοντες στην αγορά να υλοποιήσουν το σχεδιασμό τους και ταυτόχρονα να διατηρήσουν την ανταγωνιστική συμπεριφορά τους. Συγκεκριμένα, τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς μπορούν να βοηθήσουν το σύστημα να λειτουργεί εντός των φυσικών του ορίων και να μειώσουν το συνολικό κόστος παραγωγής δεδομένου ότι μειώνεται η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται λόγω περιορισμένης μεταφοράς. Επιπρόσθετα, μια ανταγωνιστική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί μια αξιόπιστη μέθοδο για τον επιμερισμό των δαπανών λόγω συμφόρησης, τη χρησιμοποίηση του δικτύου και την τιμολόγηση των υπηρεσιών μεταφοράς. Για το λόγο αυτό, είναι συχνά αναγκαίο να ανιχνευτεί η συμβολή του κάθε συμμετέχοντα στη χρησιμοποίηση του δικτύου και στις δαπάνες συμφόρησης, και στη συνέχεια να υπολογιστούν οι χρεώσεις βάσει αυτής της συμβολής. Είναι συνήθης πρακτική να χρησιμοποιούνται οι συντελεστές κατανομής για τον υπολογισμό αυτής της συμβολής.

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο για την επίδραση των ευέλικτων συστημάτων στην τιμολόγηση των χρηστών του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στη ροή φορτίου συνεχούς ρεύματος.

Επίσης, στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκε και παρουσιάζεται λογισμικό σε περιβάλλον MATLAB, το οποίο εφαρμόστηκε σε σύστημα 4 ζυγών και στο σύστημα των 14 ζυγών RTS του IEEE. Το λογισμικό αυτό στηρίχθηκε στο προαναφερθέν μαθηματικό μοντέλο και μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε σύστημα με N ζυγούς και M γραμμές, ανεξαρτήτως της τοπολογίας αυτού. Επιπλέον, μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην περίπτωση εισαγωγής του ενοποιημένου ελεγκτή ροής ισχύος (UPFC) όσο και στην περίπτωση εισαγωγής του ελεγχόμενου σύγχρονου αντισταθμιστή σειράς (SSSC) στη γραμμή μεταφοράς. Αρχικά, για κάθε δίκτυο που εξετάζεται, λύνεται το πρόβλημα της βέλτιστης dc ροής φορτίου και υπολογίζεται η παραγωγή κάθε ζυγού. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι βασικές παράμετροι του συστήματος, οι ροές των γραμμών, οι συντελεστές κατανομής και τέλος υπολογίζεται η χρησιμοποίηση του δικτύου από τον κάθε χρήστη τόσο στην περίπτωση εισαγωγής του ενοποιημένου ελεγκτή ροής ισχύος (UPFC) όσο και στην περίπτωση εισαγωγής του ελεγχόμενου σύγχρονου αντισταθμιστή σειράς (SSSC) στη γραμμή μεταφοράς. Ακολούθως, γίνεται επιμερισμός του κόστους μεταφοράς χρησιμοποιώντας τις μεθόδους χρέωσης γραμματοσήμου (postage stamp) και MW-mile καθώς και τις παραλλαγές αυτής της μεθόδου. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών, σχολιάζονται και προτείνονται τρόποι επέκτασης της εργασίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Συντελεστές κατανομής, ευέλικτα συστήματα μεταφοράς, τιμολόγηση υπηρεσιών μεταφοράς, επιμερισμός κόστους, βέλτιστη ροή φορτίου, συμφόρηση, ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος (Unified Power Flow Controller – UPFC), ελεγχόμενος σύγχρονος αντισταθμιστής σειράς (Static Synchronous Series Compensator - SSSC), ροή φορτίου συνεχούς ρεύματος, περιορισμένη μεταφορά, αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

ABSTRACT

In a competitive electricity market, installing Flexible AC Transmission Systems (FACTS) can improve power transfer capability and help market participants keep their schedules to preferred ones and at the same time may retain the competitive behaviour of participants. To be more specific, FACTS may assist system to operate within its physical limits and reduce total generation cost associates with out-of-merit order caused by constrained transmission. Moreover, a competitive electricity market necessitates a reliable method to allocate congestion charges, transmission usage and transmission pricing in an unbiased, open-accessed, basis. Therefore, it is usually necessary to trace contribution of each participant to line usage and congestion charges and then to calculate charges based on these contributions. It has been a common practice to use distribution factors to calculate these contributions.

In the present diploma thesis, a mathematical model is presented that is used to quantify the impacts of FACTS on transmission pricing. This model is based on dc load flow.

Moreover, in the present diploma thesis, a software under MATLAB environment is developed for solving the above mentioned problem. This software is applied to a 4-bus test system and IEEE RTS 14-bus system. It can be used for every electrical power system with N buses and M lines regardless of its topology. Furthermore, this software can be used in case of inclusion of Unified Power Flow Controller (UPFC) or Static Synchronous Series Compensator (SSSC) in a transmission line. Firstly, the problem of dc optimal power flow is solved for each network and the generation of each bus is calculated. After that, the basic system parameters, line flows, distribution factors and transmission usage are calculated for both cases (inclusion of UPFC or SSSC). Moreover, the total grid cost allocation is evaluated using transmission pricing methods such as postage stamp and MW-mile method with its variations. Finally, the results of optimal power flow are presented, as far as the two systems and the above two cases are concerned, and the comparisons on these results, as well as some possible extensions of this diploma thesis are provided.

KEY WORDS

Distribution factors, Flexible AC Transmission Systems (FACTS), transmission pricing, cost allocation, optimal power flow, congestion, Unified Power Flow Controller (UPFC), Static Synchronous Series Compensator (SSSC), dc load flow, constrained transmission, energy market.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2010-2011 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιλάκη, λέκτορα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της διότι μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα επίσης να δώσω στη συνάδελφο Τζιάσιου Γεωργία για την καθοδήγησή της κατά την ανάπτυξη του λογισμικού. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, Κátση Ζωή, Κενούτη Ηλία και Κωνσταντάτου Άννα-Μαρία για την ηθική συμπαράστασή τους κατά την συγγραφή της παρούσας εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξη και τη βοήθεια που μου παρείχαν καθόλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	1
1.2	Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς	2
1.3	Δομή της εργασίας	3
1.4	Βιβλιογραφία	4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

2.1	Εισαγωγή	5
2.2	Ενοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος	6
2.3	Αντιστάθμιση σειράς με σύγχρονες πηγές τάσης ή ρεύματος	7
2.4	Βιβλιογραφία	8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (ORF)

3.1	Εισαγωγή	9
3.2	Μοντέλο ροής φορτίου συνεχούς ρεύματος	9
3.2.1	Πλεονεκτήματα μοντέλου ροής φορτίου συνεχούς ρεύματος	11
3.3	Εξισώσεις ροής φορτίου στην περίπτωση εισαγωγής ενός ευέλικτου συστήματος μεταφοράς χρησιμοποιώντας το μοντέλο ροής φορτίου συνεχούς ρεύματος	12
3.4	Βέλτιστη ροή φορτίου	14
3.4.1	Διατύπωση του γενικού προβλήματος	14
3.4.2	Διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου στην περίπτωση χρησιμοποίησης ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς στο ηλεκτρικό δίκτυο	14
3.5	Βιβλιογραφία	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΡΟΕΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΧΡΗΣΤΕΣ ΤΟΥ

4.1	Εισαγωγή	19
4.2	Γενικά για το UPFC	20
4.2.1	Μοντελοποίηση του UPFC	20
4.3	Γενικά για το SSSC	27
4.3.1	Μοντελοποίηση του SSSC	27

4.4	Μέθοδος Rudnick ή Μέθοδος Συντελεστών Κατανομής	34
4.4.1	Συντελεστές GSDF ή Συντελεστές A	34
4.4.2	Συντελεστές GGDF ή Συντελεστές D	35
4.4.3	Συντελεστές GLDF ή συντελεστές C	36
4.4.4	Συντελεστές Κατανομής μετά την εισαγωγή UPFC ή SSSC	37
4.5	Τιμολόγηση των υπηρεσιών μεταφοράς	43
4.6	Βιβλιογραφία	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

5.1	Εισαγωγή	45
5.2	Διατύπωση του προβλήματος	45
5.3	Περίπτωση μη χρησιμοποίησης ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς	46
5.3.1	Διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου	46
5.3.2	Αριθμητικοί υπολογισμοί του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου	47
5.3.3	Εξισώσεις του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου	47
5.3.4	Υπολογισμός των συντελεστών GSDF ή συντελεστών A	50
5.3.5	Υπολογισμός των συντελεστών GGDF ή συντελεστών D	51
5.3.6	Συνεισφορά των χρηστών του συστήματος χρησιμοποιώντας τους συντελεστές D	52
5.3.7	Υπολογισμός των συντελεστών GLDF ή συντελεστών C	52
5.3.8	Συνεισφορά των χρηστών του συστήματος χρησιμοποιώντας τους συντελεστές C	53
5.3.9	Χρέωση παραγωγών και καταναλωτών χρησιμοποιώντας τη μέθοδο MW-mile	53
5.4	Περίπτωση χρησιμοποίησης του UPFC	54
5.4.1	Διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου	54
5.4.2	Αριθμητικοί υπολογισμοί του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου	55
5.4.3	Εξισώσεις του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου	55
5.4.4	Υπολογισμός των συντελεστών GSDF ή συντελεστών A	58
5.4.5	Υπολογισμός των συντελεστών GGDF ή συντελεστών D	59
5.4.6	Συνεισφορά των χρηστών του συστήματος χρησιμοποιώντας τους συντελεστές D	60
5.4.7	Υπολογισμός των συντελεστών GLDF ή συντελεστών C	60
5.4.8	Συνεισφορά των χρηστών του συστήματος χρησιμοποιώντας τους συντελεστές C	61
5.4.9	Χρέωση παραγωγών και καταναλωτών χρησιμοποιώντας τη μέθοδο MW-mile	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

6.1	Εισαγωγή	63
6.2	Λίγα λόγια για την MATLAB	63
6.2.1	Προγραμματισμός στην MATLAB	65
6.2.2	Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (GUI) στην MATLAB	66
6.3	Χαρακτηριστικά λογισμικού για επιμερισμό του κόστους μεταφοράς στην περίπτωση χρησιμοποίησης ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς	70
6.3.1	Παρουσίαση αναπτυχθέντος λογισμικού	74
6.3.2	Παρουσίαση αναπτυχθέντος γραφικού περιβάλλοντος	76
6.4	Μελλοντικές επεκτάσεις του λογισμικού	81
6.5	Βιβλιογραφία	82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

7.1	Εισαγωγή	83
7.2	Εφαρμογή σε σύστημα 4 ζυγών	83
7.2.1	Δεδομένα του συστήματος	83
7.2.2	Αποτελέσματα	84
7.2.2.1	Βασικές παράμετροι του συστήματος	86
7.2.2.2	Ροές ισχύος στις γραμμές του συστήματος και μεταβολή τους λόγω χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC	88
7.2.2.3	A-factors	89
7.2.2.4	D-factors	90
7.2.2.5	Χρησιμοποίηση του συστήματος από τους χρήστες του λόγω των d-factors	91
7.2.2.6	C-factors	92
7.2.2.7	Χρησιμοποίηση του συστήματος από τους χρήστες του λόγω των c-factors	93
7.2.2.8	Επιμερισμός του κόστους μεταφοράς	94
7.2.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	101
7.3	Εφαρμογή στο σύστημα 14 ζυγών RTS του IEEE	103
7.3.1	Δεδομένα του συστήματος	103
7.3.2	Αποτελέσματα	105
7.3.2.1	Βασικές παράμετροι του συστήματος	107
7.3.2.2	Ροές ισχύος στις γραμμές του συστήματος και μεταβολή τους λόγω χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC	110
7.3.2.3	A-factors	111

7.3.2.4	D-factors	115
7.3.2.5	Χρησιμοποίηση του συστήματος από τους χρήστες του λόγω των d-factors	118
7.3.2.6	C-factors	121
7.3.2.7	Χρησιμοποίηση του συστήματος από τους χρήστες του λόγω των c-factors	124
7.3.2.8	Επιμερισμός του κόστους μεταφοράς	128
7.3.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων χρησιμοποίησης UPFC	140
7.3.4	Σχολιασμός αποτελεσμάτων χρησιμοποίησης SSSC	142
7.4	Βιβλιογραφία	144

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1	Σύνοψη της εργασίας	145
8.2	Συμπεράσματα της εργασίας	146
8.3	Επεκτάσεις της εργασίας	146

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	149
-------------------------------	------------

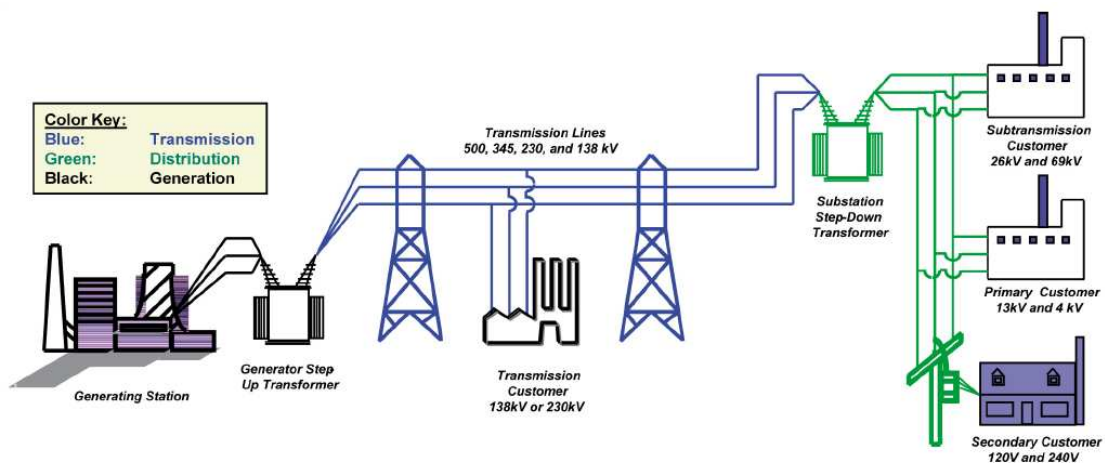
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια πολύ χρήσιμη μορφή ενέργειας και παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα. Μπορεί εύκολα και αποδοτικά να μετατραπεί σε άλλες μορφές, είναι καθαρή στη χρήση της, διαθέσιμη όποτε ζητηθεί και μεταφέρεται εύκολα. Έτσι, αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μορφή ενέργειας, η οποία σήμερα καλύπτει το 15% των συνολικών αναγκών τελικής κατανάλωσης σε παγκόσμιο επίπεδο.

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) καλείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης [1.1]. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η βασική δομή ενός ΣΗΕ. Στο σχήμα αυτό μπορούμε να διακρίνουμε τρεις ξεχωριστές λειτουργίες προκειμένου η ηλεκτρική ενέργεια να φτάσει στις περιοχές που θα καταναλωθεί:

- την παραγωγή,
- τη μεταφορά και
- τη διανομή.



Σχήμα 1.1: Σχηματικό διάγραμμα της δομής ενός ΣΗΕ

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, το σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής, και τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης, για τη μεταφορά της ισχύος υπό υψηλή τάση. Κύριοι σταθμοί παραγωγής είναι οι θερμικοί και οι υδροηλεκτρικοί. Επίσης, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλη ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κυρίως με την εκμετάλλευση του αέρα και του ήλιου.

Το σύστημα μεταφοράς αναφέρεται στη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στους καταναλωτές υψηλής τάσης και στα δίκτυα

διανομής. Περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων τάσεων του δικτύου, και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης σε μέση τάση, για την τροφοδότηση των δικτύων διανομής.

Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης, στα οποία υπάγονται και οι υποσταθμοί διανομής μέσω των οποίων γίνεται ο υποβιβασμός της μέσης τάσης σε χαμηλή.

Στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης συνδέονται κυρίως βιομηχανικοί καταναλωτές ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος των πελατών εμπορικής χρήσης.

1.2 ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Βασική προϋπόθεση καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας όπου υπάρχει ζήτηση, με το ελάχιστο κόστος σε οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο, και ταυτόχρονα η εξασφάλιση σταθερής συχνότητας και τάσης και υψηλής αξιοπιστίας τροφοδότησης. Για τον έλεγχο της ποιότητας ισχύος και την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει το δίκτυο μεταφοράς το οποίο συνοδεύεται από απώλειες μεταφοράς. Με άλλα λόγια η βελτίωση λειτουργίας ενός ΣΗΕ συνδέεται άμεσα με τη βελτίωση του δικτύου μεταφοράς.

Η κατασκευή νέων εγκαταστάσεων μεταφοράς που θα βελτιώσουν το σύστημα δεν είναι πάντα εφικτή λόγω οικονομικών και περιβαλλοντικών περιορισμών. Έτσι, οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού, στην προσπάθειά τους να βελτιώσουν το δίκτυο μεταφοράς, αποφάσισαν να στηριχθούν στον ήδη υπάρχοντα εξοπλισμό. Προς αυτήν την κατεύθυνση, καθοριστική είναι η συμβολή των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (Flexible AC Transmission Systems – FACTS). Συγκεκριμένα, τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς είναι συσκευές που ελέγχουν τη ροή ισχύος στις γραμμές του συστήματος και, με τον τρόπο αυτό μειώνουν τις απώλειες λόγω συμφόρησης, εξασφαλίζοντας μηχανισμούς χαμηλότερου κόστους.

Η υψηλή πολυπλοκότητα διασύνδεσης των σύγχρονων ΣΗΕ [1.2], στα οποία η παραγόμενη ισχύς είναι συχνά πολύ μακριά από το αναπτυσσόμενο κέντρο φορτίου καθώς και η ολοένα μεγαλύτερη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αύξησαν τις απαιτήσεις ελέγχου της ροής ισχύος κατά μήκος των γραμμών του δικτύου και καθιστούν ακόμα πιο εμφανή την αναγκαιότητα χρησιμοποίησης ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς. Παράλληλα, τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς έχουν πολύ γρήγορη απόκριση καθώς στηρίζουν τη λειτουργία τους σε ηλεκτρονικά ισχύος και επομένως ελαχιστοποιούν τις μεταβατικές ταλαντώσεις του συστήματος, βελτιώνοντας την αξιοπιστία τροφοδότησης.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν δύο συγκεκριμένα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς, ο ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος (Unified Power Flow Controller – UPFC) και ο ελεγχόμενος σύγχρονος αντισταθμιστής σειράς (Static Synchronous Series Compensator - SSSC). Και τα δύο αυτά συστήματα έχουν αρκετές εφαρμογές σε πραγματικά δίκτυα και ταυτόχρονα θεωρούνται δύο από τις πιο αποτελεσματικές ευέλικτες συσκευές.

1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των επιδράσεων του UPFC και του SSSC στις βασικές παραμέτρους του συστήματος (τάση ζυγών, φασικές γωνίες, παραγωγή ενεργού ισχύος), στις ροές των γραμμών, στη χρησιμοποίηση του συστήματος μεταφοράς από τους χρήστες του καθώς και στον επιμερισμό του κόστους μεταφοράς. Πιο αναλυτικά, η δομή της εργασίας οργανώνεται σε οκτώ κεφάλαια:

Στο **Κεφάλαιο 2** αναφέρεται ο ρόλος των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς στα σύγχρονα ΣΗΕ και στη συνέχεια περιγράφεται η λειτουργία του UPFC και του SSSC.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται το μοντέλο ροής φορτίου συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη εισαγωγής ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα χρησιμοποίησης αυτού του μοντέλου έναντι της ac ανάλυσης και τέλος ορίζεται το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Ως αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου θεωρήθηκε το συνολικό κόστος παραγωγής των γεννητριών, το οποίο είναι επιθυμητό να ελαχιστοποιηθεί, ενώ ως μεταβλητές ελέγχου θεωρήθηκαν οι παραγωγές ενεργού ισχύος των γεννητριών του συστήματος. Το πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου λύθηκε για τις περιπτώσεις χρήσης UPFC, SSSC καθώς και για την περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της επίδρασης του UPFC και του SSSC στις βασικές παραμέτρους του συστήματος, στις ροές των γραμμών και στη χρησιμοποίηση του συστήματος μεταφοράς από τους χρήστες του. Επίσης παρουσιάζονται οι μέθοδοι τιμολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν για τον επιμερισμό του κόστους μεταφοράς.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρατίθεται ένα αριθμητικό παράδειγμα που αφορά στην εφαρμογή του μοντέλου που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 σε ένα σύστημα 4 ζυγών.

Στο **Κεφάλαιο 6** περιγράφεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τη μελέτη των επιδράσεων εισαγωγής του UPFC και του SSSC σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο ενώ παράλληλα προτείνονται τρόποι επέκτασης αυτού του λογισμικού. Το λογισμικό στηρίχτηκε στο μαθηματικό μοντέλο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4 και υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB. Επιπλέον, παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται τα δεδομένα των συστημάτων στα οποία εφαρμόστηκε το αναπτυχθέν λογισμικό, τα αποτελέσματα που προέκυψαν καθώς και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων αυτών. Στα πλαίσια του σχολιασμού των αποτελεσμάτων, γίνεται σύγκριση της αποτελεσματικότητας χρησιμοποίησης του UPFC και του SSSC στα υπό μελέτη συστήματα.

Στο **Κεφάλαιο 8** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας, παρουσιάζονται συμπεράσματα και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επέκτασης της εργασίας.

Τέλος, στο **Παράρτημα Α** παρουσιάζονται τα κυριότερα ελληνικά και αγγλικά ακρωνύμια.

1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001, σελ. 5-16.
- [1.2] Γ. Κορρές, "Σημειώσεις Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς," Αθήνα, Σεπτέμβριος 2007 [Online]. Διαθέσιμο:
<https://ecourses.dbnet.ntua.gr/14683.html> (σημειώσεις 3/4), προσπελάστηκε τον Ιούλιο 2011.

ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις σύγχρονες ανταγωνιστικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας [2.1], το δίκτυο μεταφοράς διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο καθώς εξυπηρετεί τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τους παραγωγούς στους μεγάλους χρήστες και στα δίκτυα διανομής. Η συνεχής αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας καθιστά απαραίτητη την επέκταση ή βελτίωση του υπάρχοντος δικτύου ή την κατασκευή νέου. Ένας άλλος τρόπος να ικανοποιηθεί αυτή η αυξημένη ζήτηση είναι η εγκατάσταση ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς στο δίκτυο. Τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς (Flexible AC Transmission Systems – FACTS) βελτιώνουν την ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος και, συνεπώς, συμβάλουν στην ικανοποίηση της ζήτησης από μικρότερη παραγωγή αφού με τη χρήση τους μειώνονται οι απώλειες λόγω συμφόρησης [2.2]-[2.3].

Όπως καθίσταται εμφανές, η συμφόρηση στις γραμμές μεταφοράς οδηγεί σε αύξηση της παραγωγής για την κάλυψη της ζήτησης και, κατ' επέκταση, οδηγεί σε αύξηση του κόστους παραγωγής. Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα ώστε οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας να παραμείνουν ανταγωνιστικές και, για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η μείωσή του. Παράλληλα υπάρχει η ανάγκη να μειωθεί ο επιχειρηματικός κίνδυνος που σχετίζεται με τις επενδύσεις για τη βελτίωση των διαδικασιών που συντελούνται κατά τη μεταφορά, όπως είναι, για παράδειγμα, η αναβάθμιση των υπάρχοντων γραμμών ή η δημιουργία νέων. Τέλος, υπάρχει η ανάγκη αποφυγής της κοστοβόρας λύσης της επέκτασης των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την ικανοποίηση των συνεχώς αυξανόμενων φορτίων. Για όλους τους παραπάνω λόγους, έχει παρατηρηθεί αυξημένο ενδιαφέρον όσον αφορά στα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς [2.4]-[2.5], τα οποία παρέχουν ευελιξία στη λειτουργία του συστήματος μεταφοράς και εξασφαλίζουν μηχανισμούς χαμηλότερου κόστους μέσω των οποίων μετριάζονται οι περιορισμοί κατά τη μεταφορά.

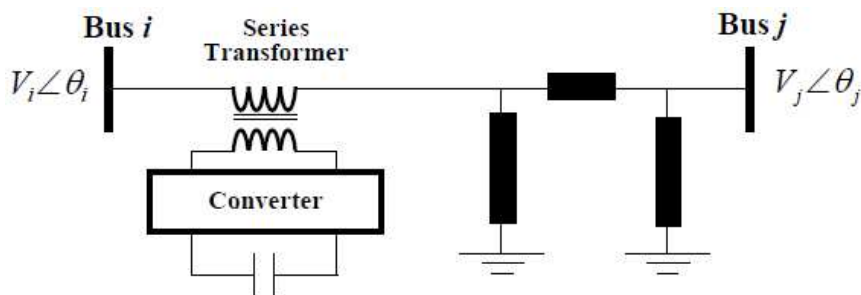
Συγκεκριμένα, ο ρόλος των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς είναι να αλλάζουν τις παραμέτρους του συστήματος προκειμένου να ελέγξουν τη ροή ισχύος και να σταθεροποιήσουν το σύστημα, ενώ παράλληλα μπορούν να βελτιώσουν την ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος αυξάνοντας τη στα επιθυμητά επίπεδα [2.6]. Η λειτουργία τους στηρίζεται σε σύγχρονα ηλεκτρονικά ισχύος και ακριβώς για αυτό το λόγο η ανάπτυξή τους έχει ξεκινήσει μόλις από τα τέλη του 1980. Έχουν εφαρμοστεί μόνο σε ορισμένες τεχνολογικά αναπτυγμένες χώρες και ουσιαστικά είναι η απάντηση στο αίτημα για αποδοτικότερη χρήση των ήδη υπάρχοντων πόρων στα παρόντα ΣΗΕ, επιτρέποντας την αξιοποίηση και επέκταση των δυνατοτήτων μεταφοράς.

Η κύρια λειτουργία του εγκάρσιου μετατροπέα είναι η παροχή ή η απορρόφηση της απαιτούμενης από τον εν σειρά μετατροπέα ενεργού ισχύος στην κοινή dc ζεύξη. Αυτή η dc ισχύς μετατρέπεται και πάλι σε εναλλασσόμενη και υπερτίθεται με αυτή της γραμμής μεταφοράς μέσω ενός εγκάρσια συνδεδεμένου πυκνωτή. Ο εγκάρσιος μετατροπέας μπορεί επίσης ελεγχόμενα να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ, εάν είναι επιθυμητό, έτσι ώστε να παρέχει ανεξάρτητα εγκάρσια άεργο αντιστάθμιση στη γραμμή μεταφοράς.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αν και υπάρχει κλειστό ευθύ μονοπάτι για την παροχή ενεργού ισχύος, με την έγχυση της εν σειρά τάσεως, διαμέσου των 2 μετατροπέων και της γραμμής, η αντίστοιχη ανταλλασσόμενη άεργος ισχύς παρέχεται ή απορροφάται τοπικά από τον εν σειρά μετατροπέα και για αυτό το λόγο δε χρειάζεται να μεταφερθεί διαμέσου της γραμμής. Συνεπώς ο εγκάρσιος μετατροπέας μπορεί, είτε να λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, είτε να ανταλλάσει άεργο ισχύ με τη γραμμή μεταφοράς ανεξάρτητα από τον εν σειρά μετατροπέα. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει ροή άεργου ισχύος μέσω του UPFC.

2.3 ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΠΗΓΕΣ ΤΑΣΗΣ Ή ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα του ελεγχόμενου σύγχρονου αντισταθμιστή σειράς (Static Synchronous Series Compensator - SSSC), από το οποίο γίνεται κατανοητή η δομή και η λειτουργία του. Το SSSC [2.7] αποτελείται βασικά από ένα μετατροπέα πηγής τάσεως με ημιαγωγικά στοιχεία, τα οποία είναι συνήθως GTO θυρίστορες, ένα πυκνωτή και ένα μετασχηματιστή. Χρησιμοποιείται για να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ προς ή από μια γραμμή και για αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί για τον έλεγχο της ροής ισχύος της γραμμής. Πιο συγκεκριμένα, παράγει στην έξοδό του μια ημιτονοειδή τάση μεταβλητού πλάτους, το διάνυσμα της οποίας προηγείται ή έπεται κατά 90° του διανύσματος του ρεύματος της γραμμής, θεωρώντας ότι οι απώλειες του SSSC είναι αμελητέες. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο θεωρείται ότι η εγχεόμενη τάση ισοδυναμεί με μια επαγωγική ή χωρητική αντίδραση σε σειρά με τη γραμμή, η οποία αυξάνει ή μειώνει τη συνολική αντίδραση της γραμμής, έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση ή τη μείωση της μεταφερόμενης ισχύος στη γραμμή.

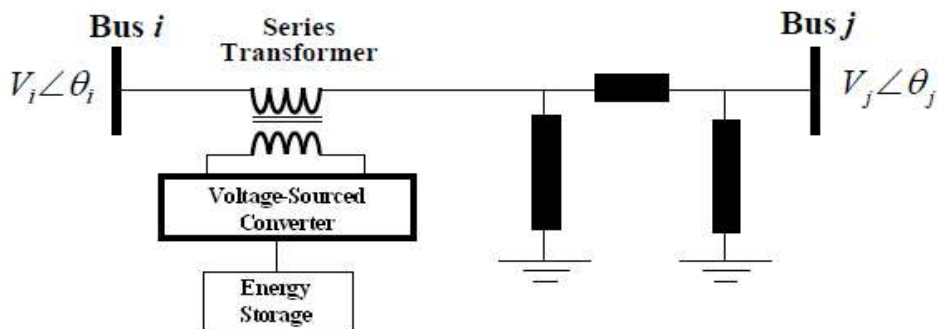


Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα του SSSC

Γενικά το SSSC μπορεί να ειπωθεί σε αναλογία με μια ιδανική σύγχρονη πηγή τάσεως, που παράγει τριφασική τάση μεταβλητού πλάτους και γωνίας στην επιθυμητή θεμελιώδη συχνότητα. Μπορεί επίσης να παρομοιαστεί με ένα σύγχρονο αντισταθμιστή, που

παρέχει ή απορροφά άεργο ισχύ προς ή από το σύστημα, και μπορεί επίσης να παράγει ενεργό ισχύ εάν ο πυκνωτής αντικατασταθεί από μια βαθμίδα αποθήκευσης ενέργειας. Το SSSC περιορίζεται στην ανταλλαγή αέργου ισχύος με το εναλλασσόμενο σύστημα μεταφοράς, αμελώντας το μικρό ποσό ενεργού ισχύος που απαιτείται για την κάλυψη των απωλειών του κυκλώματος και των διακοπών.

Όπως αναφέρθηκε, αν ο πυκνωτής αντικατασταθεί με ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (Σχήμα 2.3), τότε το SSSC θα μπορούσε να ανταλλάσει τόσο ενεργό όσο και άεργο ισχύ με το εναλλασσόμενο σύστημα μεταφοράς. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να συνδεθεί το SSSC μέσω ενός πυκνωτή με ένα STATCOM το οποίο θα παρέχει την απαιτούμενη ενεργό ισχύ.



Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα του SSSC όπου γίνεται ανταλλαγή τόσο ενεργού όσο και αέργου ισχύος με τη γραμμή μεταφοράς

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] M. Shahidehpour, M. Alomoush, *Restructured Electrical Power Systems: Operation, Trading and Volatility*. New York: Marcel Dekker Inc., 2001.
- [2.2] M. Alomoush, "Fixed transmission rights for inter-zonal and intra-zonal congestion management," in *IEE Proc. Generation Transmission. Distribution*, vol. 146, no. 5, pp. 465–477, 1999.
- [2.3] K. Purchala, L. Meeus, R. Belmans, "Congestion management in market environment," in *The European Power Supply Industry – Development of Electricity Markets series*. Editor: W. Mielczarski, Poland, Lodz, 2005, pp. 169-192 [Online]. Διαθέσιμο: http://www.esat.kuleuven.be/electa/publications/fulltexts/pub_1425.pdf, προσπελάστηκε τον Ιούλιο 2011.
- [2.4] N.G. Hingoran, L. Gyugyi, *Understanding FACTS*. IEEE press, 2000.
- [2.5] Y.H. Song, A. Johns, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*. London: IEE, 1999.
- [2.6] Α. Σταύρου, "FACTS," Κύπρος [Online]. Διαθέσιμο: http://www.ece.ucy.ac.cy/courses/ece444/notes/12_FACTS.pdf, προσπελάστηκε τον Ιούλιο 2011.
- [2.7] Γ. Κορρές, "Σημειώσεις Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς," Αθήνα, Σεπτέμβριος 2007, σελ. 58-59, 65-67 [Online]. Διαθέσιμο: <https://ecourses.dbnet.ntua.gr/14683.html> (σημειώσεις 3/4), προσπελάστηκε τον Ιούλιο 2011.

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βέλτιστη ροή φορτίου (Optimal Power Flow - OPF) [3.1]-[3.4] εισήχθη για πρώτη φορά ως έννοια από τον Carpentier το 1962. Χρειάστηκαν, ωστόσο, περίπου 20 χρόνια ώστε να αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος που θα μπορούσε να εφαρμοστεί στην πράξη. Σκοπός της είναι η εύρεση της βέλτιστης μόνιμης κατάστασης λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και έχει συμβάλει σημαντικά στο έργο των μηχανικών όσον αφορά στην ανάλυση και στο σχεδιασμό ενός ηλεκτρικού δικτύου.

Πιο συγκεκριμένα, η βέλτιστη ροή φορτίου είναι ένα πρόβλημα ροής φορτίου στο οποίο συγκεκριμένες μεταβλητές ελέγχου απαιτείται να ελαχιστοποιήσουν μια αντικειμενική συνάρτηση ενώ παράλληλα απαιτείται η ικανοποίηση διάφορων φυσικών και λειτουργικών περιορισμών του συστήματος. Ως μεταβλητές ελέγχου μπορούν, για παράδειγμα, να ληφθούν οι ροές ισχύος στις γραμμές ή η παραγωγή ενεργού ισχύος των γεννητριών ενώ ως αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να ληφθεί το συνολικό κόστος παραγωγής, οι απώλειες του συστήματος ή η απόκλιση των τάσεων των ζυγών. Οι περιορισμοί που τίθενται αναφέρονται στην ασφάλεια του συστήματος κατά την λειτουργία του και μπορεί να είναι η μέγιστη και η ελάχιστη ενεργός και άεργος ισχύς που μπορεί να αντέξει η κάθε γραμμή, η ελάχιστη και η μέγιστη ικανότητα παραγωγής των γεννητριών και το ενεργειακό ισοζύγιο σε κάθε ζυγό.

Ανάλογα με την επιλεχθείσα αντικειμενική συνάρτηση, τις μεταβλητές ελέγχου και τους περιορισμούς του προβλήματος, η βέλτιστη ροή φορτίου μπορεί να είναι ένα περισσότερο ή λιγότερο σύνθετο πρόβλημα. Διάφορες τεχνικές έχουν προταθεί για τη λύση της βέλτιστης ροής φορτίου όπως η μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού (linear programming method - LP), η μέθοδος Newton Raphson (Newton Raphson method - NR), η μέθοδος γενετικών αλγορίθμων (genetic algorithm method - GA) και η μέθοδος εσωτερικού σημείου (interior point method - IP) [3.5].

Στο κεφάλαιο αυτό, διατυπώνουμε το πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Το πρόβλημα αυτό στηρίχθηκε στο μοντέλο ροής φορτίου συνεχούς ρεύματος (dc load flow) που προκύπτει από το μοντέλο ροής φορτίου εναλλασσόμενου ρεύματος (ac load flow model) μέσω κάποιων παραδοχών. Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα γίνει παρουσίαση του μοντέλου ροής φορτίου συνεχούς ρεύματος καθώς και των παραδοχών στις οποίες αυτό στηρίζεται. Επίσης θα γίνει αναφορά στα πλεονεκτήματα που έχει αυτό το μοντέλο στην ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας έναντι του ac μοντέλου.

3.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Οι ροές ισχύος σε κάθε γραμμή ενός συστήματος μπορούν να προσδιοριστούν μέσω των νόμων του Kirchhoff, η εφαρμογή των οποίων οδηγεί σε μη γραμμικές αλγεβρικές

εξισώσεις. Οι μη γραμμικές αυτές εξισώσεις αναφέρονται ως εξισώσεις ροής φορτίου εναλλασσόμενου ρεύματος και λύνονται μέσω διάφορων επαναληπτικών αλγορίθμων.

Πιο συγκεκριμένα, οι εξισώσεις ροής φορτίου εναλλασσόμενου ρεύματος για μια γραμμή ij δίνονται ως εξής [3.6]:

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j [g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (3.1)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 b_{ij} - V_i V_j [g_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - b_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (3.2)$$

Το μοντέλο ροής φορτίου συνεχούς ρεύματος προκύπτει από τις παραπάνω εξισώσεις μέσω κάποιων παραδοχών, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

1. Η ωμική αντίσταση των γραμμών r_{ij} είναι πολύ μικρή σε σχέση με την επαγωγική τους αντίδραση x_1 και επομένως μπορεί να αγνοηθεί ($r_{ij}=0$).
2. Υποθέτουμε σταθερό προφίλ τάσεων δηλαδή θεωρείται ότι τα μέτρα των μιγαδικών τάσεων των ζυγών είναι 1 α.μ.
3. Η διαφορά των φασικών γωνιών θ_i και θ_j των τάσεων στους ζυγούς i και j θεωρείται πολύ μικρή και επομένως θα ισχύει:

$$\cos \theta_{ij} \approx 1 \text{ και } \sin \theta_{ij} \approx \theta_{ij}, \text{ όπου } \theta_{ij} = \theta_i - \theta_j.$$

Από τις παραπάνω παραδοχές για την αγωγιμότητα της γραμμής $y_l = g_{ij} + jb_{ij}$ εξάγεται ότι:

$$g_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_1^2} = 0 \quad \text{και} \quad b_{ij} = -\frac{x_1}{r_{ij}^2 + x_1^2} = -\frac{1}{x_1} \quad (3.3)$$

Επομένως, οι εξισώσεις (3.1) και (3.2) τροποποιούνται, μέσω των παραπάνω παραδοχών, ως ακολούθως:

$$P_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_1} \quad (3.4)$$

$$Q_{ij} = 0 \quad (3.5)$$

όπου x_1 η επαγωγική αντίδραση της γραμμής ij .

Θεωρώντας ότι το σύστημα δεν έχει απώλειες, η καθαρή ισχύ στους ζυγούς δίνεται από τη σχέση [3.7]:

$$\mathbf{P} = \mathbf{B}\boldsymbol{\theta} \quad (3.6)$$

όπου:

\mathbf{P} : Διάνυσμα $N \times 1$ με την καθαρή ισχύ στους ζυγούς, ίσο με τη διαφορά του φορτίου P_{Li} από την παραγωγή P_{Gi} στο ζυγό i .

θ : Διάνυσμα $N \times 1$ με τις φασικές γωνίες των ζυγών, με $\theta_r = \theta$, όπου r ο ζυγός αναφοράς.

\mathbf{B} : Πίνακας $N \times N$ με μη διαγώνια στοιχεία που δίνονται από τον τύπο $b_{ij}^o = b_{ji}^o = \text{imag}\{-y_1\} = 1/x_1$ ($i \neq j$) και διαγώνια στοιχεία που δίνονται από τον τύπο $b_{ii}^o = \sum_{j=1, j \neq i}^N b_{ij}^o$, όπου N το σύνολο των ζυγών του δικτύου.

3.2.1 Πλεονεκτήματα μοντέλου ροής φορτίου συνεχούς ρεύματος

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα χρησιμοποίησης του μοντέλου ροής φορτίου συνεχούς ρεύματος στην ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα ακόλουθα [3.8]:

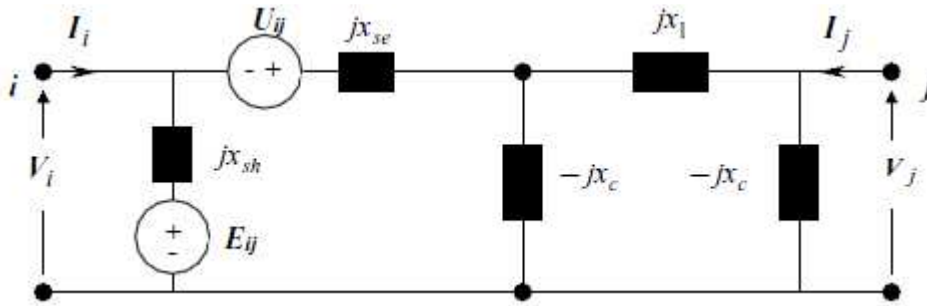
1. Στην περίπτωση συστημάτων με μεγάλες διαστάσεις, όπως είναι και τα πραγματικά ηλεκτρικά δίκτυα, δίνει αποτελέσματα τα οποία εμφανίζουν αμελητέες διαφορές συγκριτικά με αυτά που προκύπτουν από το ac μοντέλο ροής φορτίου.
2. Επίσης, το μοντέλο ροής φορτίου συνεχούς ρεύματος δίνει πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο, το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει μικρότερο αριθμό μη γραμμικών εξισώσεων, γίνεται λιγότερο ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες ενώ, συχνά, χρειάζεται μικρότερος αριθμός επαναλήψεων για να βρεθεί η λύση του συγκριτικά με το ac μοντέλο ροής φορτίου. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται ο χρόνος κάθε επανάληψης καθώς και ο συνολικός χρόνος για την εύρεση λύσης ενώ, παράλληλα, μειώνονται και οι απαιτήσεις σε αποθηκευτικό χώρο.
3. Ειδικά στην περίπτωση του προσδιορισμού των τοπικών οριακών τιμών (locational marginal price - LMP), που είναι ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη στην ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, το μοντέλο dc ροής φορτίου δίνει ταχύτερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.
4. Επιπλέον, αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται πολύ συχνά για τον υπολογισμό των συντελεστών κατανομής (distribution factors), οι οποίοι βοηθούν στον επιμερισμό του κόστους μεταφοράς στους χρήστες του συστήματος και μελετώνται και στην παρούσα εργασία.
5. Τέλος, μπορεί να εφαρμοστεί πολύ εύκολα στην περίπτωση χρησιμοποίησης ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς μέσω ενός απλού μετασχηματισμού του πίνακα αγωγιμοτήτων του συστήματος.

Συνοψίζοντας, για όλους τους προαναφερθέντες λόγους, οι μεγαλύτερες αγορές ηλεκτρισμού στο κόσμο χρησιμοποιούν αυτό το μοντέλο για την ανάλυση και τον σχεδιασμό των ηλεκτρικών δικτύων.

3.3 ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΕΝΟΣ ΕΥΕΛΙΚΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Έστω ότι εισάγεται ένα ευέλικτο σύστημα μεταφοράς στη γραμμή ij του συστήματος. Στη γενική περίπτωση υποτίθεται ότι εισάγεται ένα UPFC, το οποίο προσφέρει εν σειρά και εγκάρσια αντιστάθμιση, και επομένως αν χρησιμοποιηθεί SSSC απλά μηδενίζεται η ισχύς που εγχέεται παράλληλα.

Το Σχήμα 3.1 αναπαριστά μια γραμμή μεταφοράς ij στην οποία έχει εισαχθεί το UPFC μεταξύ των ζυγών i και j , κοντά στον ζυγό i [3.9]. Αυτή η αναπαράσταση προκύπτει από τον συνδυασμό του UPFC και του π -μοντέλου της γραμμής μεταφοράς. Καθένας από τους δύο μετατροπείς του UPFC παρουσιάζεται από μια πηγή τάσης σε σειρά με μια άεργη αντίσταση. Οι μιγαδικές τάσεις $U_{ij}=U_{ij} \angle \delta_{ij}$ και $E_{ij}=E_{ij} \angle \beta_{ij}$ είναι, αντίστοιχα, οι εγχεόμενες τάσεις από τον εν σειρά και τον εγκάρσιο κλάδο του UPFC στη γραμμή που συνδέει του ζυγούς i και j , ενώ οι τάσεις $V_i=V_i \angle \theta_i$ και $V_j=V_j \angle \theta_j$ είναι οι μιγαδικές τάσεις στους ζυγούς i και j , αντίστοιχα. Οι αντιδράσεις x_{se} και x_{sh} αναφέρονται, αντίστοιχα, στην εν σειρά και εγκάρσια αντιστάθμιση του UPFC, ενώ οι αντιδράσεις x_1 και x_c αναφέρονται, αντίστοιχα, στην εν σειρά και εγκάρσια αντίσταση της γραμμής.



Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση γραμμής μεταφοράς στην οποία έχει εισαχθεί UPFC

Έστω ότι $P_{i,j}^{sh}$ και $P_{i,j}^{se}$ αναφέρονται αντίστοιχα στην πραγματική ισχύ που εγχέεται στον ζυγό i εξαιτίας της εγκάρσιας και της εν σειρά αντιστάθμισης του UPFC στην γραμμή ij . Σύμφωνα με το μοντέλο ροής συνεχούς ρεύματος, θα ισχύει:

$$P_{i,j}^{se} = \left\{ \frac{x_1 - x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} \right\} U_{ij} \sin(\theta_i - \delta_{ij}) \quad (3.7)$$

$$P_{j,j}^{se} = \left\{ \frac{x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} \right\} U_{ij} \sin(\theta_j - \delta_{ij}) \quad (3.8)$$

$$P_{i,j}^{sh} = \frac{1}{x_{sh}} E_{ij} \sin(\theta_i - \beta_{ij}) \quad (3.9)$$

$$P_{ij} = -P_{ji} = -b_{ij}(\theta_i - \theta_j) \quad (3.10)$$

Αν τα \mathcal{R}_i και \mathcal{R}_j αναφέρονται στο σύνολο των ζυγών που είναι συνδεδεμένοι με τους ζυγούς i και j , αντίστοιχα, οι εξισώσεις διατήρησης της ροής φορτίου στους ζυγούς i και j μπορούν να εκφραστούν ως ακολούθως:

$$P_i^G - P_i^D = P_i^{se} + P_i^{sh} - \sum_{j \in \mathcal{R}_i} b_{ij}(\theta_i - \theta_j) \quad \text{όπου } i=1,2,\dots,N \quad (3.11)$$

$$P_j^G - P_j^D = P_j^{se} - \sum_{i \in \mathcal{R}_j} b_{ji}(\theta_j - \theta_i) \quad \text{όπου } j=1,2,\dots,N \quad (3.12)$$

όπου N είναι ο αριθμός των ζυγών του συστήματος και:

$$P_j^{se} = \sum_i P_{j,ij}^{se}, \quad P_i^{se} = \sum_j P_{i,ij}^{se} \quad \text{και} \quad P_i^{sh} = \sum_j P_{i,ij}^{sh} \quad (3.13)$$

Η ενεργός ισχύς που απαιτείται από τον εν σειρά μετατροπέα παρέχεται από το ευέλικτο σύστημα μεταφοράς μέσω του εγκάρσιου μετατροπέα (ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των μετατροπέων). Η ενεργός ισχύς που παρέχεται από τον εγκάρσιο μετατροπέα ($P_{ij}^{ex,sh}$) πρέπει να είναι ίση με την ενεργό ισχύ που απαιτείται από τον εν σειρά μετατροπέα ($P_{ij}^{ex,se}$) και, επομένως, αυτός ο περιορισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς της ροής ισχύος:

$$P_{ij}^{ex,sh} - P_{ij}^{ex,se} = 0 \quad (3.14)$$

Η πραγματική ισχύς που παράγεται από την εγκάρσια και την εν σειρά πηγή τάσης ($P_{ij}^{ex,sh}$ και $P_{ij}^{ex,se}$) μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$P_{ij}^{ex,sh} = \frac{E_{ij}}{x_{sh}} \sin(\theta_i - \beta_{ij}) \quad (3.15)$$

$$P_{ij}^{ex,se} = \frac{x_1 - x_c}{-x_1 x_c - x_{se} x_c + x_1 x_{se}} U_{ij} \sin(\delta_{ij} - \theta_i) + \frac{x_c}{-x_1 x_c - x_{se} x_c + x_1 x_{se}} U_{ij} \sin(\delta_{ij} - \theta_j) \quad (3.16)$$

3.4 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

3.4.1 Διατύπωση του γενικού προβλήματος

Η βέλτιστη ροή φορτίου είναι ένα πρόβλημα ροής φορτίου στο οποίο συγκεκριμένες μεταβλητές ελέγχου απαιτείται να ελαχιστοποιήσουν μια αντικειμενική συνάρτηση ενώ παράλληλα απαιτείται η ικανοποίηση διάφορων φυσικών και λειτουργικών περιορισμών του συστήματος [3.1]-[3.4]. Το γενικό πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου μπορεί να διατυπωθεί ως ακολούθως:

$$\text{Minimization of } F(x,u) \quad (3.17)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$g(x,u) = 0 \quad : \lambda \quad (3.18)$$

$$h(x,u) \leq 0 \quad : \mu \quad (3.19)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (3.20)$$

$$u_{min} \leq u \leq u_{max} \quad (3.21)$$

όπου:

$F(x,u)$: Η αντικειμενική συνάρτηση.

x : Διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου.

x_{min} : Διάνυσμα κατώτερων τιμών των μεταβλητών ελέγχου.

x_{max} : Διάνυσμα ανώτερων τιμών των μεταβλητών ελέγχου.

u : Διάνυσμα εξαρτημένων μεταβλητών.

u_{min} : Διάνυσμα κατώτερων τιμών των εξαρτημένων μεταβλητών.

u_{max} : Διάνυσμα ανώτερων τιμών των εξαρτημένων μεταβλητών.

$g(x,u)$: Οι περιορισμοί ισότητας των διανυσμάτων x και u .

$h(x,u)$: Οι ανισωτικοί περιορισμοί των διανυσμάτων x και u .

λ : Διάνυσμα πολλαπλασιαστών Lagrange για τους περιορισμούς ισότητας.

μ : Διάνυσμα πολλαπλασιαστών Lagrange για τους περιορισμούς ανισότητας.

3.4.2 Διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου στην περίπτωση χρησιμοποίησης ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς στο ηλεκτρικό δίκτυο

Αν ληφθεί υπόψη η επίδραση του ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, τότε η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βέλτιστης ροής που καλείται να ελαχιστοποιηθεί εκφράζεται ως προς τις μεταβλητές ελέγχου ως ακολούθως [3.9]:

$$F(x)=F(P^G, Q^G, V, \theta, E, U, \delta, \beta) \quad (3.22)$$

Θεωρώντας ότι το σύστημα δεν έχει απώλειες και λαμβάνοντας το μοντέλο ροής φορτίου συνεχούς ρεύματος, η αντικειμενική συνάρτηση $F(x)$ της σχέσης (3.17) μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$F(x)=F(P^G, \theta, E, U, \delta, \beta) \quad (3.23)$$

Έστω ότι το κόστος παραγωγής μιας γεννήτριας G_i ακολουθεί το μοντέλο κόστους καυσίμου τετραγωνικής μορφής. Σε αυτή την περίπτωση, θα περιγραφεί από τη σχέση:

$$C_{G_i}(P_{G_i}) = c_i P_{G_i}^2 + b_i P_{G_i} + a_i \quad (\text{€/h}) \quad (3.24)$$

όπου c_i (€/MW²h), b_i (€/MWh) και a_i (€/h) είναι οι συντελεστές κόστους παραγωγής και το P_{G_i} η παραγόμενη ισχύς της γεννήτριας G_i .

Επομένως, αν θεωρηθεί ως αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου το συνολικό κόστος παραγωγής των γεννητριών, τότε η συνάρτηση $F(x)$ των σχέσεων (3.22) και (3.23) παίρνει τη μορφή:

$$F(x) = F(P^G) = \sum_{i=1}^{NG} C_{G_i}(P_{G_i}) = \sum_{i=1}^{NG} a_i + b_i P_{G_i} + c_i (P_{G_i})^2 \quad (3.25)$$

όπου NG είναι ο αριθμός των γεννητριών του συστήματος.

Έστω NB ο αριθμός των ζυγών του συστήματος, \mathfrak{R}_c το σύνολο των ευέλικτων συστημάτων που χρησιμοποιούνται, \mathfrak{R}_L το σύνολο των γραμμών, $P_{G_i}^{\min}$ και $P_{G_i}^{\max}$, αντίστοιχα, η ελάχιστη και η μέγιστη ικανότητα παραγωγής της γεννήτριας του ζυγού i , P_i^D το φορτίο στο ζυγό i , P_{ij}^{\min} και P_{ij}^{\max} , αντίστοιχα, η ελάχιστη και η μέγιστη ικανότητα μεταφοράς ισχύος στη γραμμή i - j , P_i^{se} και P_i^{sh} , αντίστοιχα, η εν σειρά και εγκάρσια έγχυση ισχύος από όλα τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς στο ζυγό i και $P_{ij}^{ex,se}$ και $P_{ij}^{ex,sh}$, αντίστοιχα, η εν σειρά και εγκάρσια ανταλλασσόμενη ισχύς εξαιτίας ενός ευέλικτου συστήματος στη γραμμή i - j .

Βασισμένοι στο μοντέλο ροής φορτίου συνεχούς ρεύματος και στις εξισώσεις που περιγράφηκαν στην ενότητα 3.3 του παρόντος κεφαλαίου, μπορούμε να δώσουμε μια γενική διατύπωση του τροποποιημένου προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου στην περίπτωση χρησιμοποίησης ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς:

$$\text{Minimization of } F(x) \quad (3.26)$$

υπό τους περιορισμούς ισότητας:

$$P_i^G - P_i^D - P_i^{se} - P_i^{sh} + \sum_{j \in \mathfrak{R}_i} P_{ij} = 0 \quad \text{όπου } i=1,2,\dots,NB \quad (3.27)$$

$$P_{ij}^{ex,sh} - P_{ij}^{ex,se} = 0 \quad \text{όπου } ij \in \mathfrak{R}_c \quad (3.28)$$

και τους περιορισμούς ανισότητας:

$$P_{ij}^{\min} \leq |P_{ij}| \leq P_{ij}^{\max} \quad \text{όπου } ji \in \mathfrak{R}_L \quad (3.29)$$

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} \quad \text{όπου } i=1,2,\dots,NG \quad (3.30)$$

$$U_{ij}^{\min} \leq U_{ij} \leq U_{ij}^{\max} \quad \text{όπου } ij \in \mathfrak{R}_c \quad (3.31)$$

$$E_{ij}^{\min} \leq E_{ij} \leq E_{ij}^{\max} \quad \text{όπου } ij \in \mathfrak{R}_c \quad (3.32)$$

$$0 \leq \delta_{ij} \leq 2\pi \quad \text{όπου } ij \in \mathfrak{R}_c \quad (3.33)$$

$$0 \leq \beta_{ij} \leq 2\pi \quad \text{όπου } ij \in \mathfrak{R}_c \quad (3.34)$$

όπου το P_{ij} της σχέσης (3.27) δίνεται από την σχέση (3.10) και τα $P_i^{se} = \sum_j P_{i,j}^{se}$ και

$$P_i^{sh} = \sum_j P_{i,j}^{sh} \quad \text{υπολογίζονται από τις σχέσεις (3.7) και (3.9).}$$

3.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] X. Wang, Y. Song, M. Irving, *Modern Power Systems Analysis*. Springer, pp. 196-217, 2008.
- [3.2] D. P. Kothari, J. S. Dhillon, *Power System Optimization*. New Delhi: Prentice-hall of India Private Limited, pp. 214-215, June 2006.
- [3.3] J. Zhupp, *Optimization of Power System Operation*. New Jersey: Wiley, pp. 297-364, 2009.
- [3.4] A. Chakrabarti, S. Halder, *Power System Analysis: Operation And Control*. PHI, pp. 386-388, October 2008.
- [3.5] K. S. Pandya, S.K. Joshi, "A survey of optimal power flow methods," *JATIT*, vol 4, no. 5, 2008.
- [3.6] Β. Παπαδιά, *Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας – Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (Τόμος Ι)*. Αθήνα: εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985, σελ. 132-135.
- [3.7] J. D. McCalley, "Linearized optimal power flow," [Online]. Διαθέσιμο: <http://home.eng.iastate.edu/~jdm/ee458/>, προσπελάστηκε τον Ιούλιο 2011.
- [3.8] M. Alomoush, "Modeling of Static Synchronous Series Compensator for Energy Markets Approximate Calculations," in *Basic Sciences & Engineering – Refereed research Journal*, Editor: Abhath Al-Yarmouk, July 2009.
- [3.9] M. Alomoush, "Derivation of UPFC DC load flow model with examples of its use in restructured power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 3, pp. 1173-1180, 2003.

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΡΟΕΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΧΡΗΣΤΕΣ ΤΟΥ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις σύγχρονες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, οι απαιτήσεις παροχής ηλεκτρικής ισχύος συνεχώς αυξάνονται. Οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να αντιμετωπίσουν αυτές τις νέες απαιτήσεις, στοχεύουν στην ολοένα και μεγαλύτερη εκμετάλλευση των υπαρχόντων πόρων των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Προς αυτή την κατεύθυνση συμβάλουν τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς, των οποίων η εφαρμογή έχει ως κύριους στόχους:

- την αύξηση των ορίων μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος μεταφοράς
- και την κατεύθυνση της μεταφερόμενης ισχύος σε προδιαγεγραμμένες διαδρομές.

Τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς, για να επιτύχουν τον έλεγχο της ροής ισχύος, αλλάζουν κάποιες παραμέτρους τους συστήματος, όπως είναι οι τάσεις και οι γωνίες των ζυγών. Με αυτό τον τρόπο, οι ροές στις γραμμές μεταβάλλονται ώστε να επιλέγονται οι οικονομικά πιο συμφέρουσες διαδρομές και κατά συνέπεια μεταβάλλεται και η χρησιμοποίηση των γραμμών από τους χρήστες του συστήματος. Επομένως, στην περίπτωση χρήσης ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αυτή η μεταβολή κατά τη διαδικασία τιμολόγησης των συμμετεχόντων στο σύστημα, ώστε αυτή να είναι δικαιότερη.

Κατά τον επιμερισμό του κόστους μεταφοράς στους χρήστες του συστήματος χρησιμοποιούνται πολύ συχνά οι συντελεστές κατανομής (distribution factors). Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο το οποίο υπολογίζει αυτούς τους συντελεστές λαμβάνοντας υπόψη την εισαγωγή κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα. Εκτός από τον υπολογισμό των συντελεστών κατανομής, το μαθηματικό μοντέλο που παρατίθεται περιλαμβάνει τον υπολογισμό των παραμέτρων του συστήματος και της ροής των γραμμών του συστήματος πριν και μετά την εισαγωγή κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς και, συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς του, δηλαδή για το αν και κατά πόσο το ευέλικτο σύστημα μεταφοράς βελτιώνει τη λειτουργία ενός ΣΗΕ.

Επιπλέον, το μαθηματικό μοντέλο που αναλύεται στο παρόν κεφάλαιο στηρίζεται στη ροή φορτίου συνεχούς ρεύματος που αναλύθηκε στο τρίτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Αναφέρεται στις περιπτώσεις εισαγωγής UPFC ή SSSC στο σύστημα, όμως με μικρές

τροποποιήσεις θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για άλλα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς. Επίσης, είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι σε αυτό το μαθηματικό μοντέλο στηρίχθηκε το λογισμικό που αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια.

Τέλος, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά οι μέθοδοι χρέωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τον επιμερισμό του κόστους μεταφοράς στην περίπτωση εισαγωγής κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα.

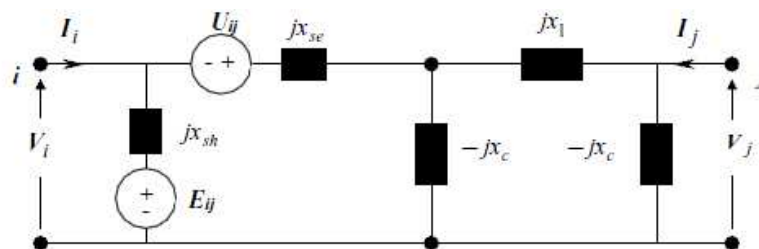
4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ UPFC

Το UPFC έχει αναγνωριστεί ως ένα από τα καλύτερα σχεδιασμένα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς. Περιλαμβάνει στοιχεία ελέγχου εν σειρά και εν παραλλήλω και προσφέρει έναν μοναδικό συνδυασμό εγκάρσιας και εν σειρά αντιστάθμισης. Πιο συγκεκριμένα, το UPFC εγγχεί στη γραμμή μεταφοράς μια εν σειρά τάση μέσω του μετασχηματιστή σειράς. Η ενεργός ισχύς, που περιλαμβάνεται στην εν σειρά έγχυση, λαμβάνεται από τη γραμμή μεταφοράς μέσω ενός εγκάρσιου μετασχηματιστή και το UPFC παράγει ή απορροφά την απαιτούμενη άεργο ισχύ τοπικά, εναλλάσσοντας τη λειτουργία αυτών των δύο μετατροπέων.

Το UPFC προσφέρει ευελιξία στον έλεγχο του συστήματος μεταφοράς και έχει το σημαντικότερο πλεονέκτημα ότι παρέχει, ταυτόχρονα και ανεξάρτητα, έλεγχο πραγματικού χρόνου της τάσης, της σύνθετης αντίστασης και της γωνίας φάσης, που είναι οι τρεις βασικές παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η απόδοση ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό, το UPFC μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποδοτικά ώστε να βελτιστοποιήσει τη χρήση των γραμμών, να αυξήσει τη χωρητικότητα του συστήματος καθώς και να ενισχύσει τη σταθερότητα του συστήματος μειώνοντας τις ταλαντώσεις του κατά τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.

4.2.1 Μοντελοποίηση του UPFC

Το Σχήμα 4.1 αναπαριστά μια γραμμή μεταφοράς ij στην οποία έχει εισαχθεί το UPFC μεταξύ των ζυγών i και j , κοντά στον ζυγό i . Οι μιγαδικές τάσεις $U_{ij}=U_{ij} \angle \delta_{ij}$ και $E_{ij}=E_{ij} \angle \beta_{ij}$ είναι, αντίστοιχα, οι εγγεόμενες τάσεις από τον εν σειρά και τον εγκάρσιο κλάδο του UPFC στη γραμμή που συνδέει του ζυγούς i και j , ενώ οι τάσεις $V_i=V_i \angle \theta_i$ και $V_j=V_j \angle \theta_j$ είναι οι μιγαδικές τάσεις στους ζυγούς i και j , αντίστοιχα. Οι αντιδράσεις x_{se} και x_{sh} αναφέρονται, αντίστοιχα, στην εν σειρά και εγκάρσια αντιστάθμιση του UPFC, ενώ οι αντιδράσεις x_1 και x_c αναφέρονται, αντίστοιχα, στην εν σειρά και εγκάρσια αντίσταση της γραμμής.



Σχήμα 4.1: Αναπαράσταση γραμμής μεταφοράς στην οποία έχει εισαχθεί UPFC

Έστω ότι οι αγωγιμότητες y_1 και y αναφέρονται, αντίστοιχα, στην εν σειρά και εγκάρσια αγωγιμότητα του π-ισοδύναμου μοντέλου της γραμμής μεταφοράς πριν την εισαγωγή του UPFC και ότι οι αγωγιμότητες y_{se} και y_{sh} αναφέρονται στην εν σειρά και εγκάρσια αγωγιμότητα που σχετίζονται με την εν σειρά και εγκάρσια πηγή τάσης του UPFC. Αυτές οι αγωγιμότητες μπορούν να εκφραστούν ως ακολούθως [4.1]:

$$y_1 = 1/(jx_1) = -j(1/x_1) = jb_1 \quad (4.1)$$

$$y = 1/(-jx_c) = j(1/x_c) = jb_c \quad (4.2)$$

$$y_{se} = 1/(jx_{se}) = -j(1/x_{se}) = jb_{se} \quad (4.3)$$

$$y_{sh} = 1/(jx_{sh}) = -j(1/x_{sh}) = jb_{sh} \quad (4.4)$$

Πριν από την εισαγωγή του UPFC στην γραμμή ij , ο πίνακας αγωγιμοτήτων της γραμμής είναι:

$$Y^o = \begin{pmatrix} y_{ii}^o & y_{ij}^o \\ y_{ji}^o & y_{jj}^o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 + y & -y_1 \\ -y_1 & y_1 + y \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Μετά την εισαγωγή του UPFC στη γραμμή ij , ο πίνακας αγωγιμοτήτων της γραμμής γίνεται:

$$Y = \begin{pmatrix} y_{ii} & y_{ij} \\ y_{ji} & y_{jj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 + y + \Delta y_{ii} & -y_1 + \Delta y_{ij} \\ -y_1 + \Delta y_{ji} & y_1 + y + \Delta y_{jj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{ii}^o + \Delta y_{ii} & y_{ij}^o + \Delta y_{ij} \\ y_{ji}^o + \Delta y_{ji} & y_{jj}^o + \Delta y_{jj} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Η τελευταία ισότητα μπορεί να εκφραστεί και ως εξής:

$$Y = Y^o + \Delta Y \quad (4.7)$$

όπου:

$$\Delta Y = \begin{pmatrix} \Delta y_{ii} & \Delta y_{ij} \\ \Delta y_{ji} & \Delta y_{jj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta y_{ii} & \Delta y_{ij} \\ \Delta y_{ji} & \Delta y_{jj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta y_{io} - \Delta y_{ij} & \Delta y_{ij} \\ \Delta y_{ji} & \Delta y_{jo} - \Delta y_{ji} \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Χρησιμοποιώντας τον νόμο Kirchhoff και έπειτα από πράξεις, μπορούμε να εκφράσουμε τα ρεύματα που εισέρχονται στους ζυγούς i και j , I_i και I_j , ως ακολούθως:

$$\begin{pmatrix} I_i \\ I_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{ii} & y_{ij} \\ y_{ji} & y_{jj} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_i \\ V_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 + y & -y_1 \\ -y_1 & y_1 + y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_i \\ V_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta y_{ii} & \Delta y_{ij} \\ \Delta y_{ji} & \Delta y_{jj} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_i \\ V_j \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

ή

$$\begin{pmatrix} I_i \\ I_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 + y + \Delta y_{ii} & -y_1 + \Delta y_{ij} \\ -y_1 + \Delta y_{ji} & y_1 + y + \Delta y_{jj} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_i \\ V_j \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Στην συνέχεια δίνονται τα στοιχεία των πινάκων αγωγιμοτήτων των δύο προηγούμενων σχέσεων συναρτήσει των αντιδράσεων και των χωρητικών αγωγιμοτήτων:

$$\begin{aligned} y_{ii} &= j \left[\frac{x_1 - x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} - \frac{1}{x_{sh}} \right] \\ &= j \left[\frac{b_{se} b_1 + b_{se} b_c}{b_c + b_{se} + b_1} + b_{sh} \right] \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$y_{ij} = y_{ji} = j \frac{x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} = -j \frac{b_{se} b_1}{b_c + b_{se} + b_1} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} y_{jj} &= j \frac{-x_c^2 + x_1 x_c + 2x_{se} x_c - x_1 x_{se}}{x_c (x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se})} \\ &= j \frac{b_{se} b_1 + b_{se} b_c + 2b_c b_1 + b_c^2}{b_c + b_{se} + b_1} \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \Delta y_{ij} = \Delta y_{ji} &= j \left[\frac{x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} - \frac{1}{x_1} \right] \\ &= j \frac{b_{se} b_1 + b_1^2}{b_c + b_{se} + b_1} \end{aligned} \quad (4.14)$$

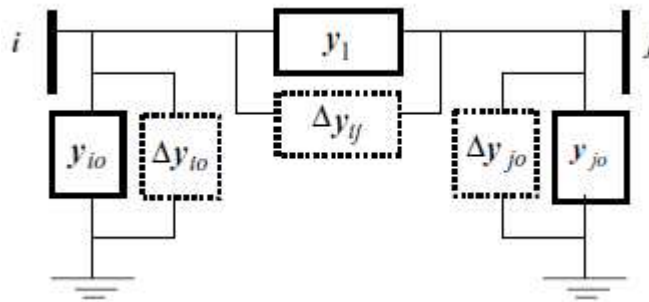
$$\begin{aligned} \Delta y_{ii} = \Delta y_{io} - \Delta y_{ij} &= j \left[\frac{x_{se} (x_1 - x_c)^2}{x_c (x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se})} - \frac{1}{x_{sh}} \right] \\ &= j \frac{b_{sh} (b_c + b_{se} + b_1) - b_c (b_c + b_1) - b_c b_1 - b_c^2}{b_c + b_{se} + b_1} \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned}\Delta y_{jj} &= \Delta y_{jo} - \Delta y_{ij} = j \frac{x_{se}x_c}{x_1(x_1x_c + x_{se}x_c - x_1x_{se})} \\ &= -j \frac{b_1^2}{b_c + b_{se} + b_1}\end{aligned}\quad (4.16)$$

$$\begin{aligned}\Delta y_{io} &= -j \left[\frac{x_{se}(x_c - x_1)}{x_c(x_1x_c + x_{se}x_c - x_1x_{se})} + \frac{1}{x_{sh}} \right] \\ &= j \left[b_{sh} - \frac{b_c(b_c + b_1)}{b_c + b_{se} + b_1} \right]\end{aligned}\quad (4.17)$$

$$\begin{aligned}\Delta y_{jo} &= j \frac{x_{se}}{x_1x_c + x_{se}x_c - x_1x_{se}} \\ &= j \frac{b_c b_1}{b_c + b_{se} + b_1}\end{aligned}\quad (4.18)$$

Η επίδραση της εισαγωγής του UPFC στην γραμμή ij , κοντά στον ζυγό i , φαίνεται στις σχέσεις (4.7),(4.8) και (4.9), στις οποίες φαίνονται οι πρόσθετες αγωγιμότητες που εμφανίζονται παράλληλα στις αρχικές αγωγιμότητες του π -ισοδύναμου μοντέλου της γραμμής μεταφοράς. Η επίδραση της εισαγωγής του UPFC στις αρχικές αγωγιμότητες μπορεί να παρουσιαστεί μέσω του Σχήματος 4.2.



Σχήμα 4.2: Επίδραση της εισαγωγής του UPFC στις αρχικές αγωγιμότητες

Έστω ένα σύστημα με N ζυγούς και M γραμμές. Όπως φάνηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις για dc ροή φορτίου θα ισχύει:

$$P^0 = B^0 \theta^0 \quad (4.19)$$

όπου:

\mathbf{P}^o : Διάνυσμα $N \times 1$ με την καθαρή ισχύ στους ζυγούς πριν την εισαγωγή του UPFC, ίσο με τη διαφορά του φορτίου $P_{L_i}^o$ από την παραγωγή $P_{G_i}^o$ στο ζυγό i .

$\mathbf{\theta}^o$: Διάνυσμα $N \times 1$ με τις φασικές γωνίες των ζυγών πριν την εισαγωγή του UPFC, με $\theta_r^o = 0$, όπου r ο ζυγός αναφοράς.

\mathbf{B}^o : Πίνακας $N \times N$ πριν την εισαγωγή του UPFC, με μη διαγώνια στοιχεία που δίνονται από τον τύπο $b_{ij}^o = b_{ji}^o = \text{imag}\{-y_1\} = 1/x_1$ ($i \neq j$) και διαγώνια στοιχεία που δίνονται από τη σχέση $b_{ii}^o = \sum_{j=1, j \neq i}^N b_{ij}^o$.

Μετά την εισαγωγή του UPFC, οι εξισώσεις ενεργού ροής ισχύος δίνονται από την ακόλουθη τροποποιημένη εξίσωση ροής φορτίου:

$$P = B\theta \quad (4.20)$$

όπου τα μεγέθη P , B και θ ορίζονται όπως και πριν, αλλά τώρα αναφέρονται στην περίπτωση που έχουμε εισάγει το UPFC στην γραμμή ij .

Ο πίνακας B μπορεί να γραφτεί ως συνάρτηση του πίνακα B^o ως ακολούθως:

$$B = B^o + \Delta B \quad (4.21)$$

όπου τα ij και ii στοιχεία των πινάκων B και ΔB δίνονται από τις σχέσεις:

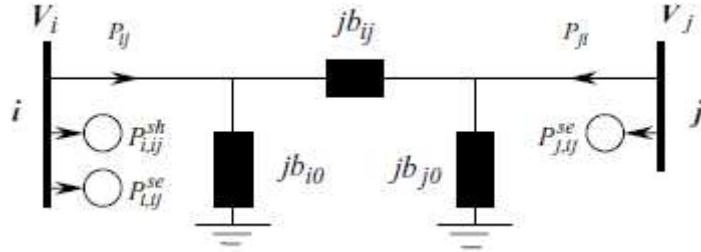
$$\begin{aligned} \Delta b_{ij} = \Delta b_{ji} = \text{imag}\{-\Delta y_{ij}\} &= \frac{x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} - \frac{1}{x_1} \\ &= \frac{b_{se} b_1 + b_1^2}{b_c + b_{se} + b_1} \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\Delta b_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \Delta b_{ij} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} b_{ij} = b_{ji} = \text{imag}\{y_{ij}\} &= \frac{x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} \\ &= -\frac{b_{se} b_1}{b_c + b_{se} + b_1} \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$b_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^N b_{ij} \quad (4.25)$$

Έστω ότι $P_{i,ij}^{sh}$ και $P_{i,ij}^{se}$ αναφέρονται αντίστοιχα στην πραγματική ισχύ που εγχέεται στο ζυγό i εξαιτίας της εγκάρσιας και της εν σειρά αντιστάθμισης του UPFC στη γραμμή ij . Το π -ισοδύναμο μοντέλο της γραμμής μεταφοράς που δείχνει την έγχυση πραγματικής ισχύος στους ζυγούς i και j εξαιτίας της εισαγωγής του UPFC φαίνεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: π -ισοδύναμο μοντέλο της γραμμής μεταφοράς στην οποία έχει εισαχθεί UPFC

Για το παραπάνω μοντέλο, υποθέτοντας ότι τα μέτρα των μιγαδικών τάσεων των ζυγών θεωρούνται 1 α.μ. (dc ροή φορτίου), οι αγωγιμότητες b_{io} και b_{jo} , η εγχεόμενη πραγματική ισχύς $P_{i,ij}^{sh}$ και $P_{i,ij}^{se}$ στον ζυγό i και $P_{j,ij}^{se}$ στον ζυγό j και η ροή ενεργού ισχύος στην γραμμή ij δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις [4.2]:

$$b_{io} = \text{imag}\{y_{io}^o + \Delta y_{io}^o\} = \frac{x_1}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} - \frac{1}{x_{sh}} \quad (4.26)$$

$$b_{jo} = \text{imag}\{y_{jo}^o + \Delta y_{jo}^o\} = \frac{x_{se}}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} + \frac{1}{x_c} \quad (4.27)$$

$$P_{i,ij}^{se} = \left\{ \frac{x_1 - x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} \right\} U_{ij} \sin(\theta_i - \delta_{ij}) \quad (4.28)$$

$$P_{j,ij}^{se} = \left\{ \frac{x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} \right\} U_{ij} \sin(\theta_j - \delta_{ij}) \quad (4.29)$$

$$P_{i,ij}^{sh} = \frac{1}{x_{sh}} E_{ij} \sin(\theta_i - \beta_{ij}) \quad (4.30)$$

$$P_{ij} = -P_{ji} = -b_{ij}(\theta_i - \theta_j) \quad (4.31)$$

Αν τα \mathfrak{R}_i και \mathfrak{R}_j αναφέρονται στο σύνολο των ζυγών που είναι συνδεδεμένοι με τους ζυγούς i και j , αντίστοιχα, οι εξισώσεις διατήρησης της ροής φορτίου στους ζυγούς i και j μπορούν να εκφραστούν ως ακολούθως:

$$P_i^G - P_i^D = P_i^{se} + P_i^{sh} - \sum_{j \in \mathfrak{R}_i} b_{ij}(\theta_i - \theta_j) \quad \text{όπου } i=1,2,\dots,N \quad (4.32)$$

$$P_j^G - P_j^D = P_j^{se} - \sum_{i \in \mathfrak{R}_j} b_{ji}(\theta_j - \theta_i) \quad \text{όπου } j=1,2,\dots,N \quad (4.33)$$

όπου

$$P_j^{se} = \sum_i P_{j,ij}^{se}, \quad P_i^{se} = \sum_j P_{i,ij}^{se} \quad \text{και} \quad P_i^{sh} = \sum_j P_{i,ij}^{sh} \quad (4.34)$$

Η ενεργός ισχύς που απαιτείται από τον εν σειρά μετατροπέα παρέχεται από το ευέλικτο σύστημα μεταφοράς μέσω του εγκάρσιου μετατροπέα (ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των μετατροπέων). Η ενεργός ισχύς που παρέχεται από τον εγκάρσιο μετατροπέα ($P_{ij}^{ex,sh}$) πρέπει να είναι ίση με την ενεργό ισχύ που απαιτείται από τον εν σειρά μετατροπέα ($P_{ij}^{ex,se}$) και, επομένως, αυτός ο περιορισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς της ροής ισχύος:

$$P_{ij}^{ex,sh} - P_{ij}^{ex,se} = 0 \quad (4.35)$$

Η πραγματική ισχύς που παράγεται από την εγκάρσια και την εν σειρά πηγή τάσης ($P_{ij}^{ex,sh}$ και $P_{ij}^{ex,se}$) μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$P_{ij}^{ex,sh} = \frac{E_{ij}}{x_{sh}} \sin(\theta_i - \beta_{ij}) \quad (4.36)$$

$$P_{ij}^{ex,se} = \frac{x_1 - x_c}{-x_1 x_c - x_{se} x_c + x_1 x_{se}} U_{ij} \sin(\delta_{ij} - \theta_i) + \frac{x_c}{-x_1 x_c - x_{se} x_c + x_1 x_{se}} U_{ij} \sin(\delta_{ij} - \theta_j) \quad (4.37)$$

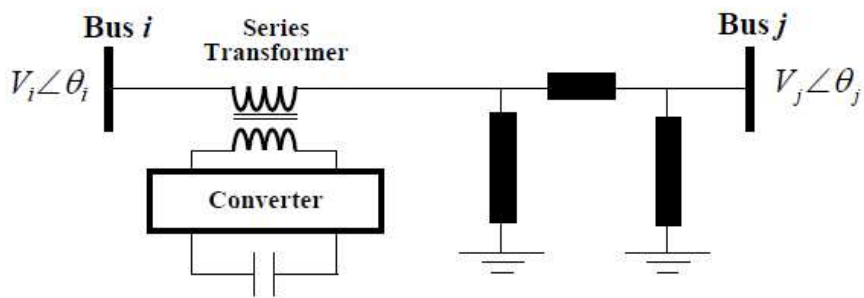
4.3 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ SSSC

Το SSSC, ως ένα από τα πιο αποτελεσματικά ευέλικτα συστήματα μεταφοράς, προσφέρει αντιστάθμιση σειράς και παρέχει ευελιξία στον έλεγχο του συστήματος

μεταφοράς. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της ενεργού και άεργου ισχύος της γραμμής, να βελτιώσει την ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος του συστήματος και να αυξήσει την αξιοπιστία του.

Καθώς το SSSC είναι ικανό να ελέγχει τις παραμέτρους του συστήματος, μπορεί να προσφέρει ένα μηχανισμό, ο οποίος θα αντικαταστήσει ή θα βοηθήσει τις παραδοσιακές μεθόδους μετριασμού της συμφόρησης. Μέσω αυτού του μηχανισμού, το SSSC κατευθύνει τη ροή ισχύος διαμέσου συγκεκριμένων γραμμών, βοηθά το σύστημα ώστε να λειτουργεί με πιο ασφαλή τρόπο αυξάνοντας το επίπεδο της μεταφερόμενης ισχύος μεταξύ συγκεκριμένων περιοχών, και, σε μερικές περιπτώσεις, προλαμβάνει την επιπλέον παραγωγή ή αποκόπτει επιβαλλόμενα φορτία, όταν αυτό είναι απαραίτητο ώστε να διατηρηθεί η ασφάλεια του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα του SSSC.

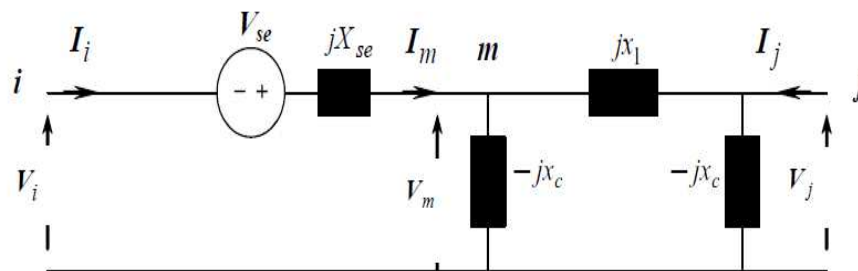


Σχήμα 4.4: Σχηματικό διάγραμμα του SSSC

4.3.1 Μοντελοποίηση του SSSC

Στο Σχήμα 4.5 γίνεται η μοντελοποίηση του SSSC [4.3]. Συγκεκριμένα, το Σχήμα 4.5 αναπαριστά μια γραμμή μεταφοράς ij στην οποία έχει εισαχθεί το SSSC μεταξύ των ζυγών i και j , κοντά στον ζυγό i . Αυτή η αναπαράσταση προκύπτει από τον συνδυασμό του SSSC και του π -μοντέλου της γραμμής μεταφοράς. Ο μετατροπέας του SSSC αναπαρίσταται από μια ανεξάρτητη πηγή τάσης σε σειρά με μια σύνθετη αντίσταση, όπου $Z_{se} = j \cdot x_{se}$ είναι η σύνθετη αντίσταση που σχετίζεται με αυτόν τον μετατροπέα. Η μιγαδική τάση V_{se} είναι η εγχεόμενη τάση από τον μετατροπέα, ενώ οι τάσεις V_i και V_j είναι οι μιγαδικές τάσεις στους ζυγούς i και j , αντίστοιχα, όπου $V_j = V_j \angle \theta_j$, $V_i = V_i \angle \theta_i$ και $V_{se} = V_{se} \angle \delta$.

Η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται στην ανάλυση που παρουσιάστηκε προηγουμένως για το UPFC με την διαφορά ότι στην περίπτωση του SSSC δεν έχουμε εγκάρσια αντιστάθμιση αλλά μόνο αντιστάθμιση σειράς.



Σχήμα 4.5: Αναπαράσταση γραμμής μεταφοράς στην οποία έχει εισαχθεί SSSC

Έστω ότι οι αγωγιμότητες y_1 και y αναφέρονται, αντίστοιχα, στην εν σειρά και εγκάρσια αγωγιμότητα του π-ισοδύναμου μοντέλου της γραμμής μεταφοράς πριν την εισαγωγή του SSSC και ότι η αγωγιμότητα y_{se} αναφέρεται στην εν σειρά αγωγιμότητα που σχετίζονται με την εν σειρά πηγή τάσης του SSSC. Αυτές οι αγωγιμότητες υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.1), (4.2) και (4.3):

$$y_1 = 1/(jx_1) = -j(1/x_1) = jb_1 \quad (4.38)$$

$$y = 1/(-jx_c) = j(1/x_c) = jb_c \quad (4.39)$$

$$y_{se} = 1/(jx_{se}) = -j(1/x_{se}) = jb_{se} \quad (4.40)$$

Πριν από την εισαγωγή του SSSC στην γραμμή ij , ο πίνακας αγωγιμοτήτων της γραμμής δίνεται από την σχέση (4.5):

$$Y^o = \begin{pmatrix} y_{ii}^o & y_{ij}^o \\ y_{ji}^o & y_{jj}^o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 + y & -y_1 \\ -y_1 & y_1 + y \end{pmatrix} \quad (4.41)$$

Μετά την εισαγωγή του SSSC στη γραμμή ij , ο πίνακας αγωγιμοτήτων της γραμμής δίνεται από την σχέση (4.6):

$$Y = \begin{pmatrix} y_{ii} & y_{ij} \\ y_{ji} & y_{jj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 + y + \Delta y_{ii} & -y_1 + \Delta y_{ij} \\ -y_1 + \Delta y_{ji} & y_1 + y + \Delta y_{jj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{ii}^o + \Delta y_{ii} & y_{ij}^o + \Delta y_{ij} \\ y_{ji}^o + \Delta y_{ji} & y_{jj}^o + \Delta y_{jj} \end{pmatrix} \quad (4.42)$$

Όμοια με την περίπτωση του UPFC, ισχύουν και τώρα οι εξισώσεις (4.7), (4.8), (4.9) και (4.10):

$$Y = Y^o + \Delta Y \quad (4.43)$$

$$\Delta Y = \begin{pmatrix} \Delta y_{ii} & \Delta y_{ij} \\ \Delta y_{ji} & \Delta y_{jj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta y_{ii} & \Delta y_{ij} \\ \Delta y_{ji} & \Delta y_{jj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta y_{io} - \Delta y_{ij} & \Delta y_{ij} \\ \Delta y_{ji} & \Delta y_{jo} - \Delta y_{ji} \end{pmatrix} \quad (4.44)$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} I_i \\ I_j \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} y_{ii} & y_{ij} \\ y_{ji} & y_{jj} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_i \\ V_j \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} y_1 + y & -y_1 \\ -y_1 & y_1 + y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_i \\ V_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta y_{ii} & \Delta y_{ij} \\ \Delta y_{ji} & \Delta y_{jj} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_i \\ V_j \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.45)$$

ή

$$\begin{pmatrix} I_i \\ I_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 + y + \Delta y_{ii} & -y_1 + \Delta y_{ij} \\ -y_1 + \Delta y_{ji} & y_1 + y + \Delta y_{jj} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_i \\ V_j \end{pmatrix} \quad (4.46)$$

Στην περίπτωση του SSSC, τα στοιχεία των πινάκων αγωγιμοτήτων των σχέσεων (4.9) και (4.10) δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} y_{ii} &= j \left[\frac{x_1 - x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} \right] \\ &= j \left[\frac{b_{se} b_1 + b_{se} b_c}{b_c + b_{se} + b_1} \right] \end{aligned} \quad (4.47)$$

$$y_{ij} = y_{ji} = j \frac{x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} = -j \frac{b_{se} b_1}{b_c + b_{se} + b_1} \quad (4.48)$$

$$\begin{aligned} y_{jj} &= j \frac{-x_c^2 + x_1 x_c + 2x_{se} x_c - x_1 x_{se}}{x_c (x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se})} \\ &= j \frac{b_{se} b_1 + b_{se} b_c + 2b_c b_1 + b_c^2}{b_c + b_{se} + b_1} \end{aligned} \quad (4.49)$$

$$\begin{aligned} \Delta y_{ij} = \Delta y_{ji} &= j \left[\frac{x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} - \frac{1}{x_1} \right] \\ &= j \frac{b_{se} b_1 + b_1^2}{b_c + b_{se} + b_1} \end{aligned} \quad (4.50)$$

$$\begin{aligned} \Delta y_{ii} = \Delta y_{io} - \Delta y_{ij} &= j \left[\frac{x_{se} (x_1 - x_c)^2}{x_c (x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se})} \right] \\ &= j \frac{-b_c (b_c + b_1) - b_c b_1 - b_c^2}{b_c + b_{se} + b_1} \end{aligned} \quad (4.51)$$

$$\begin{aligned} \Delta y_{jj} = \Delta y_{jo} - \Delta y_{ij} &= j \frac{x_{se} x_c}{x_1 (x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se})} \\ &= -j \frac{b_1^2}{b_c + b_{se} + b_1} \end{aligned} \quad (4.52)$$

$$\begin{aligned}\Delta y_{io} &= -j \left[\frac{x_{se}(x_c - x_1)}{x_c(x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se})} \right] \\ &= j \left[\frac{b_c(b_c + b_1)}{b_c + b_{se} + b_1} \right]\end{aligned}\quad (4.53)$$

$$\begin{aligned}\Delta y_{jo} &= j \frac{x_{se}}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} \\ &= j \frac{b_c b_1}{b_c + b_{se} + b_1}\end{aligned}\quad (4.54)$$

Όμοια με την περίπτωση του UPFC, ισχύουν και τώρα οι εξισώσεις της dc ροής φορτίου πριν και μετά την εισαγωγή του SSSC στο σύστημα:

$$P^o = B^o \theta^o \quad (4.55)$$

όπου:

P^o : Διάνυσμα $N \times 1$ με την καθαρή ισχύ στους ζυγούς πριν την εισαγωγή του SSSC, ίσο με τη διαφορά του φορτίου $P_{L_i}^o$ από την παραγωγή $P_{G_i}^o$ στο ζυγό i .

θ^o : Διάνυσμα $N \times 1$ με τις φασικές γωνίες των ζυγών πριν την εισαγωγή του SSSC, με $\theta_r^o = 0$, όπου r ο ζυγός αναφοράς.

B^o : Πίνακας $N \times N$ πριν την εισαγωγή του SSSC, με μη διαγώνια στοιχεία που δίνονται από τον τύπο $b_{ij}^o = b_{ji}^o = \text{imag}\{-y_1\} = 1/x_1$ ($i \neq j$) και διαγώνια στοιχεία που δίνονται

από τη σχέση $b_{ii}^o = \sum_{j=1, j \neq i}^N b_{ij}^o$.

Μετά την εισαγωγή του SSSC, οι εξισώσεις ενεργού ροής ισχύος δίνονται από την ακόλουθη τροποποιημένη εξίσωση ροής φορτίου:

$$P = B\theta \quad (4.56)$$

όπου τα μεγέθη P , B και θ ορίζονται όπως και πριν, αλλά τώρα αναφέρονται στην περίπτωση που έχουμε εισάγει το SSSC στην γραμμή ij .

Όμοια με την περίπτωση του UPFC, ισχύουν και τώρα οι εξισώσεις (4.21), (4.22), (4.23), (4.24) και (4.25):

$$B = B^o + \Delta B \quad (4.57)$$

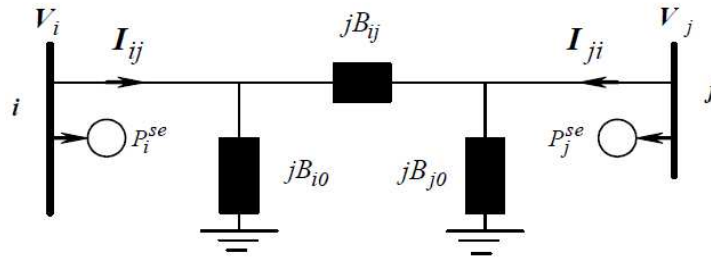
$$\begin{aligned}\Delta b_{ij} &= \Delta b_{ji} = \text{imag}\{-\Delta y_{ij}\} = \frac{x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} - \frac{1}{x_1} \\ &= \frac{b_{se} b_1 + b_1^2}{b_c + b_{se} + b_1}\end{aligned}\quad (4.58)$$

$$\Delta b_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \Delta b_{ij} \quad (4.59)$$

$$\begin{aligned} b_{ij} = b_{ji} = \text{imag}\{y_{ij}\} &= \frac{x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} \\ &= -\frac{b_{se} b_1}{b_c + b_{se} + b_1} \end{aligned} \quad (4.60)$$

$$b_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^N b_{ij} \quad (4.61)$$

Έστω ότι το διάνυσμα $P_{i,j}^{se}$ αναφέρεται στην πραγματική ισχύ που εγχέεται στον ζυγό i εξαιτίας της εν σειρά αντιστάθμισης του SSSC στην γραμμή ij . Το π-ισοδύναμο μοντέλο της γραμμής μεταφοράς που δείχνει την έγχυση πραγματικής ισχύος στους ζυγούς i και j εξαιτίας της εισαγωγής του SSSC φαίνεται στο Σχήμα 4.6 [4.4].



Σχήμα 4.6: π-ισοδύναμο μοντέλο της γραμμής μεταφοράς στην οποία έχει εισαχθεί SSSC

Για το παραπάνω μοντέλο, υποθέτοντας ότι τα μέτρα των μιγαδικών τάσεων των ζυγών θεωρούνται 1 α.μ. (dc ροή φορτιού), οι αγωγιμότητες b_{io} και b_{jo} , η εγχεόμενη πραγματική ισχύς $P_{i,j}^{se}$ στο ζυγό i και $P_{j,i}^{se}$ στο ζυγό j και η ροή ενεργού ισχύος στη γραμμή ij δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$b_{io} = \text{imag}\{y_{io}^o + \Delta y_{io}^o\} = \frac{x_1}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} \quad (4.62)$$

$$b_{jo} = \text{imag}\{y_{jo}^o + \Delta y_{jo}^o\} = \frac{x_{se}}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} + \frac{1}{x_c} \quad (4.63)$$

$$P_{i,j}^{se} = \left\{ \frac{x_1 - x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} \right\} U_{ij} \sin(\theta_i - \delta_{ij}) \quad (4.64)$$

$$P_{j,ij}^{se} = \left\{ \frac{x_c}{x_1 x_c + x_{se} x_c - x_1 x_{se}} \right\} U_{ij} \sin(\theta_j - \delta_{ij}) \quad (4.65)$$

$$P_{ij} = -P_{ji} = -b_{ij}(\theta_i - \theta_j) \quad (4.66)$$

Αν τα \mathfrak{R}_i και \mathfrak{R}_j αναφέρονται στο σύνολο των ζυγών που είναι συνδεδεμένοι με τους ζυγούς i και j , αντίστοιχα, οι εξισώσεις διατήρησης της ροής φορτίου στους ζυγούς i και j μπορούν να εκφραστούν ως ακολούθως:

$$P_i^G - P_i^D = P_i^{se} - \sum_{j \in \mathfrak{R}_i} b_{ij}(\theta_i - \theta_j), \text{ όπου } i=1,2,\dots,N \quad (4.67)$$

$$P_j^G - P_j^D = P_j^{se} - \sum_{i \in \mathfrak{R}_j} b_{ji}(\theta_j - \theta_i), \text{ όπου } j=1,2,\dots,N \quad (4.68)$$

όπου

$$P_j^{se} = \sum_i P_{j,ij}^{se} \text{ και } P_i^{se} = \sum_j P_{i,ij}^{se} \quad (4.69)$$

Η ενεργός ισχύς που ανταλλάσσεται από τον εγκάρσιο μετατροπέα ($P_{ij}^{ex,sh}$) και τη γραμμή μεταφοράς πρέπει να είναι ίση με μηδέν:

$$P_{ij}^{ex,se} = 0 \quad (4.70)$$

Η πραγματική ισχύς που παράγεται από την εν σειρά πηγή τάσης ($P_{ij}^{ex,se}$) μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\begin{aligned} P_{ij}^{ex,se} = & \frac{x_1 - x_c}{-x_1 x_c - x_{se} x_c + x_1 x_{se}} U_{ij} \sin(\delta_{ij} - \theta_i) \\ & + \frac{x_c}{-x_1 x_c - x_{se} x_c + x_1 x_{se}} U_{ij} \sin(\delta_{ij} - \theta_j) \end{aligned} \quad (4.71)$$

4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ Rudnick Ή ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ

Οι συντελεστές κατανομής είναι παράγοντες που υπολογίζονται βάση του μοντέλου της dc ροής φορτίου που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι παράγοντες αυτοί, πολύ συχνά, χρησιμοποιούνται στην πιθανοτική ανάλυση και στην ανάλυση αξιοπιστίας ενεργειακών συστημάτων, όπου συμβάλουν στον προσεγγιστικό υπολογισμό της επίδρασης

των τιμών της παραγωγής και του φορτίου στη ροή των γραμμών μεταφοράς. Τα τελευταία χρόνια, η μέθοδος των συντελεστών κατανομής (distribution factors method) έχει χρησιμοποιηθεί ως ένας μηχανισμός για τον προσδιορισμό της κατανομής του κόστους μεταφοράς καθώς μπορεί να εκτιμήσει αποτελεσματικά τη χρησιμοποίηση του συστήματος μεταφοράς. Για την ανάκτηση του συνολικού σταθερού κόστους μεταφοράς, η μέθοδος των συντελεστών κατανομής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατανομή των πληρωμών σε διαφορετικούς χρήστες. Με βάση τη μέθοδο αυτή, η κατανομή του κόστους μπορεί να αποδοθεί στις εγχύσεις ισχύος στο δίκτυο, στους παραγωγούς ή στα φορτία. Η μέθοδος των συντελεστών κατανομής περιγράφεται στη συνέχεια. Να αναφερθεί ότι όπου χρησιμοποιείται ο δείκτης o γίνεται αναφορά σε μεγέθη πριν από την εισαγωγή του ευέλικτου συστήματος μεταφοράς (UPFC ή SSSC), ενώ στις περιπτώσεις που δεν χρησιμοποιείται γίνεται αναφορά σε μεγέθη αφού έχει εισαχθεί το ευέλικτο σύστημα στην γραμμή μεταφοράς.

4.4.1 Συντελεστές GSDF ή Συντελεστές A

Οι συντελεστές GSDF (generation shift distribution factors) ή συντελεστές A δείχνουν τις αλλαγές της ροής στις γραμμές μεταφοράς λόγω μιας αλλαγής στην παραγωγή των γεννητριών. Οι συντελεστές A υπολογίζονται με βάση τη dc ροή φορτίου και μετρούν την αυξητική (incremental) χρήση του δικτύου μεταφοράς από τους παραγωγούς και τους καταναλωτές (φορτία). Εξαρτώνται από την επιλογή του ζυγού αναφοράς, την κατεύθυνση των ροών φορτίου και από τη διαμόρφωση του δικτύου ενώ είναι ανεξάρτητοι από τη λειτουργική κατάσταση του συστήματος (κατανομή του φορτίου και της παραγωγής).

Αν ο πίνακας X^o είναι ο αντίστροφος του πίνακα B^o , τότε η εξίσωση (4.19) μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$\theta^o = B^{o-1} P^o = X^o P^o \quad (4.72)$$

όπου τα στοιχεία ik και ii του πίνακα B^o υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$B_{ik}^o = -\frac{1}{x_{ik}}, \text{ όπου } i, k=1,2,\dots,N \text{ και } i \neq k \quad (4.73)$$

$$B_{ii}^o = \sum_{k=1, k \neq i}^N \frac{1}{x_{ik}}, \text{ όπου } i=1,2,\dots,N \quad (4.74)$$

Ο συντελεστής $A_{m-n,i}^o$ εκφράζει την ευαισθησία της ροής στη γραμμή $m-n$ ως προς την έγχυση στο ζυγό i . Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται από τον ορισμό του πίνακα επαγωγικών αντιδράσεων X^o (reactance matrix), ο οποίος προκύπτει από την αντιστροφή του πίνακα αγωγιμοτήτων αγνοώντας τη γραμμή και τη στήλη που αντιστοιχεί στο ζυγό αναφοράς, με βάση τη dc ροή φορτίου [4.5]:

$$A_{m-n,i}^o = \frac{X_{mi}^o - X_{ni}^o}{x_{mn}} \quad (4.75)$$

όπου X_{mi}^o και X_{ni}^o είναι στοιχεία του πίνακα επαγωγικών αντιδράσεων X^o και x_{mn} η επαγωγική αντίδραση της γραμμής $m-n$.

Έστω ΔP_i η αλλαγή της εγχεόμενης ισχύος σε ένα τυχαίο ζυγό i , εκτός του ζυγού αναφοράς, και ΔP_r η αλλαγή της εγχεόμενης ισχύος στο ζυγό αναφοράς r , τότε, αν ληφθούν υπόψη οι αλλαγές της εγχεόμενης ισχύος σε όλους τους ζυγούς, η αλλαγή στη ροή ισχύος της γραμμής $m-n$ δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta F_{m-n}^o = \sum_{i \neq r} A_{m-n,i}^o \Delta P_i^o \quad (4.76)$$

$$\sum_{i \neq r} \Delta P_i^o + \Delta P_r^o = 0 \quad (4.77)$$

όπου:

ΔF_{m-n}^o : Η αλλαγή στη ροή ενεργού ισχύος μεταξύ των ζυγών m και n .

$A_{m-n,i}^o$: A factor της γραμμής που συνδέει τους ζυγούς m, n και αντιστοιχεί στην αλλαγή της παραγωγής στο ζυγό i .

ΔP_i^o : Αλλαγή στην παραγωγή του ζυγού i , όπου i δεν αντιστοιχεί στο ζυγό αναφοράς.

ΔP_r^o : Αλλαγή στην παραγωγή του ζυγού αναφοράς r .

4.4.2 Συντελεστές GGDF ή Συντελεστές D

Οι συντελεστές GGDF (generalized generation distribution factors) ή συντελεστές D καθορίζουν τη συνεισφορά κάθε παραγωγικής μονάδας στις ροές ενεργού ισχύος των γραμμών και για αυτό το λόγο μπορούν να έχουν και αρνητική τιμή. Δεδομένου ότι βασίζονται στις dc ροές φορτίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για ροές ενεργού ισχύος. Οι GGDFs ή d factors ορίζονται ως ακολούθως [4.5]:

$$F_{m-n}^o = \sum_{i=1}^N D_{m-n,i}^o G_i^o \quad (4.78)$$

όπου:

$$D_{m-n,i}^o = D_{m-n,r}^o + A_{m-n,i}^o \quad (4.79)$$

$$D_{m-n,r}^o = \frac{F_{m-n}^o - \sum_{i=1, i \neq r}^N A_{m-n,i}^o G_i^o}{\sum_{i=1}^N G_i^o} \quad (4.80)$$

όπου:

F_{m-n}^O : Η συνολική ροή ενεργού ισχύος της γραμμής μεταξύ των ζυγών m, n .

$D_{m-n,i}^O$: Συντελεστής GGDF της γραμμής μεταξύ των ζυγών m, n που αντιστοιχεί στην παραγωγή στο ζυγό i .

$D_{m-n,r}^O$: Συντελεστής GGDF της γραμμής μεταξύ των ζυγών m, n που αντιστοιχεί στην παραγωγή στο ζυγό αναφοράς r .

G_i^O : Η συνολική παραγωγή στο ζυγό i .

Οι GGDF μετρούν τη συνολική χρήση του συστήματος μεταφοράς από τις γεννήτριες, μπορεί να βγουν αρνητικοί για κάποιες γραμμές και είναι μοναδικοί, ανεξάρτητα από την επιλογή του ζυγού αναφοράς. Εξαρτώνται από τις παραμέτρους των γραμμών, τις λειτουργικές συνθήκες του συστήματος και όχι από την επιλογή του ζυγού αναφοράς.

4.4.3 Συντελεστές GLDF ή συντελεστές C

Οι συντελεστές GLDF (generalized load distribution factors) ή συντελεστές C παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τους συντελεστές D. Οι συντελεστές C καθορίζουν τη συνεισφορά κάθε φορτίου στις ροές των γραμμών. Ορίζονται με τον ακόλουθο τρόπο [4.5]:

$$F_{m-n}^O = \sum_{j=1}^N C_{m-n,j}^O L_j^O \quad (4.81)$$

όπου:

$$C_{m-n,j}^O = C_{m-n,r}^O - A_{m-n,j}^O \quad (4.82)$$

$$C_{m-n,r}^O = \frac{F_{m-n}^O + \sum_{j=1, j \neq r}^N A_{m-n,j}^O L_j^O}{\sum_{j=1}^N L_j^O} \quad (4.83)$$

όπου:

F_{m-n}^O : η συνολική ροή ενεργού ισχύος της γραμμής μεταξύ των ζυγών m, n .

$C_{m-n,j}^O$: Συντελεστής GLDF της γραμμής μεταξύ των ζυγών m, n που αντιστοιχεί στο φορτίο του ζυγού j .

C^O : Συντελεστής GLDF της γραμμής μεταξύ των ζυγών m, n που αντιστοιχεί στο $m-n, r$ φορτίο του ζυγού αναφοράς r .

L_j^O : Η συνολική ζήτηση στο ζυγό j .

Οι συντελεστές GLDF βασίζονται στις dc ροές φορτίου. Μετρούν τη συνολική χρήση του δικτύου μεταφοράς από τα φορτία τα οποία θεωρούνται αρνητικές εγχύσεις. Όπως και οι GGDF, εξαρτώνται από τις παραμέτρους των γραμμών, τις λειτουργικές συνθήκες του συστήματος και όχι από την επιλογή του ζυγού αναφοράς [4.5]-[4.6].

4.4.4 Συντελεστές Κατανομής μετά την εισαγωγή UPFC ή SSSC

Όπως, έχει ήδη αναφερθεί, στην περίπτωση dc ροής φορτίου και πριν την εισαγωγή του ευέλικτου συστήματος στην γραμμή μεταφοράς ισχύει η σχέση (4.19). Παρόλα αυτά, όταν χρησιμοποιηθεί το UPFC ή το SSSC, η εξίσωση που περιγράφει το σύστημα παίρνει την μορφή:

$$B\theta = P = P^O + \Delta P \quad (4.84)$$

όπου

$$\Delta P = \Delta P^G + \Delta P^C \quad (4.85)$$

όπου τα Nx1 διανύσματα P^O , ΔP , ΔP^G και ΔP^C αναπαριστούν, αντίστοιχα, την καθαρή ισχύ στους ζυγούς πριν την εισαγωγή του UPFC ή του SSSC, την αλλαγή στην παραγωγή των ζυγών, την αλλαγή στην παραγωγή των ζυγών εξαιτίας της αλλαγής στην παραγωγή, και την αλλαγή στην παραγωγή των ζυγών εξαιτίας της έγχυσης ισχύος από το ευέλικτο σύστημα μεταφοράς. Το στοιχείο i για κάθε ένα από τα παραπάνω διανύσματα δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\Delta P_i^C = -(P_i^{se} + P_i^{sh}) = - \sum_{j \in \mathcal{R}_i} (P_{i,j}^{se} + P_{i,j}^{sh}) \quad \text{όπου } i=1,2,\dots,N \quad (4.86)$$

$$\Delta P_i^G = P_{G_i} - P_{G_i}^O, \quad \text{όπου } i=1,2,\dots,N \quad (4.87)$$

$$P_i^O = P_{G_i}^O - P_{D_i}^O, \quad \text{όπου } i=1,2,\dots,N \quad (4.88)$$

Προφανώς, στην περίπτωση του SSSC, το P_i^{sh} στη σχέση (4.86) είναι μηδέν.

Μετά την εισαγωγή UPFC ή SSSC στο σύστημα, η αλλαγή στον Ιακωβιανό πίνακα της αρχικής κατάστασης (πριν την εισαγωγή ευέλικτου συστήματος μεταφοράς) δίνεται από τη σχέση:

$$B = B^O + \Delta B \quad (4.89)$$

όπου ΔB είναι ο πίνακας αγωγιμοτήτων που δείχνει την επίδραση της εισαγωγής του UPFC ή του SSSC. Όταν το UPFC ή το SSSC εισάγεται σε μια γραμμή k που συνδέει δύο ζυγούς r και s , ο πίνακας ΔB μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\Delta B = U_k R_k^T \quad (4.90)$$

Το διάνυσμα U_k έχει όλα τα στοιχεία του μηδενικά εκτός από δύο μη μηδενικά στοιχεία. Συγκεκριμένα το r στοιχείο του έχει την τιμή 1 και το s στοιχείο του έχει την τιμή -1, όπου r και s αναπαριστούν τους τερματισμούς της γραμμής στην οποία έχει εισαχθεί το ευέλικτο σύστημα μεταφοράς. Αντίστοιχα, το διάνυσμα R_k^T έχει όλα τα στοιχεία του μηδενικά εκτός από δύο στοιχεία του που βρίσκονται στις θέσεις r και s . Συνοπτικά, οι τιμές των μη μηδενικών στοιχείων των διανυσμάτων R_k^T και U_k δίνονται ως ακολούθως:

$$U_k(r) = 1 \quad (4.91)$$

$$U_k(s) = -1 \quad (4.92)$$

$$\begin{aligned} R_k(r) &= -R_k(s) = \text{imag}\{\Delta y_{ij}\} \\ &= \frac{X_c}{X_1 X_c - X_1 X_{se} + X_{se} X_c} - \frac{1}{X_1} \end{aligned} \quad (4.93)$$

Επομένως, ο πίνακας B της σχέσης (4.89) μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$B = B^o + U_k R_k^T \quad (4.94)$$

Για τη γενική περίπτωση, όπου στο σύστημα έχουν εισαχθεί q UPFC ή SSSC, μπορούμε να εκφράσουμε τους πίνακες B και ΔB ως:

$$\Delta B = UR^T \quad (4.95)$$

$$B = B^o + UR^T \quad (4.96)$$

Το γινόμενο UR^T στις σχέσεις (4.95) και (4.96) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$UR^T = [U_1 U_2 \dots U_q] [R_1 R_2 \dots R_q]^T \quad (4.97)$$

Αν I είναι μοναδιαίος πίνακας κατάλληλου μεγέθους, τότε ο αντίστροφος πίνακας του τροποποιημένου Ιακωβιανού πίνακα B της σχέσης (4.96) μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$B^{-1} = [B^o + UR^T]^{-1} = B^{o^{-1}} + M = X^o + M \quad (4.98)$$

όπου

$$M = -[X^o U (I + R^T X^o U)^{-1} R^T X^o] \quad (4.99)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.98) και (4.99), μπορούμε να εκφράσουμε τη γωνία θ της σχέσης (4.84) ως εξής:

$$\begin{aligned} \theta &= B^{-1} P = B^{-1} (P^o + \Delta P^G + \Delta P^C) \\ &= (X^o + M)(P^o + \Delta P^G + \Delta P^C) \\ &= X^o P^o + X^o (\Delta P^G + \Delta P^C) + M(P^o + \Delta P^G + \Delta P^C) \\ &= \theta^o + \Delta \theta \end{aligned} \quad (4.100)$$

όπου

$$\theta^o = X^o P^o \quad (4.101)$$

$$\Delta \theta = X^o (\Delta P^G + \Delta P^C) + M(P^o + \Delta P^G + \Delta P^C) \quad (4.102)$$

Η εξίσωση (4.100) μπορεί επίσης να εκφραστεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \theta &= X^o P^o + (X^o + M)\Delta P^G + M P^o + (X^o + M)\Delta P^C \\ &= X^o P^o + B^{-1}\Delta P^G + M P^o + B^{-1}\Delta P^C \\ &= \theta^o + \Delta \theta^G + \Delta \theta^M + \Delta \theta^C \end{aligned} \quad (4.103)$$

όπου

$$\Delta \theta^G = (X^o + M)\Delta P^G \quad (4.104)$$

$$\Delta \theta^C = (X^o + M)\Delta P^C \quad (4.105)$$

$$\Delta \theta^M = M P^o \quad (4.106)$$

Να σημειωθεί ότι το διάνυσμα $\Delta \theta$ (το διάνυσμα με τις αλλαγές στις φασικές γωνίες των ζυγών) χωρίζεται σε τρία επιμέρους διανύσματα: $\Delta \theta^G$, $\Delta \theta^C$ και $\Delta \theta^M$. Το διάνυσμα $\Delta \theta^G$ αναπαριστά τις αλλαγές στις γωνίες των τάσεων των ζυγών λόγω της αλλαγής στη παραγωγή των ζυγών, το διάνυσμα $\Delta \theta^C$ αναπαριστά τις αλλαγές στις γωνίες των τάσεων των ζυγών λόγω της έγχυσης ισχύος του UPFC ή του SSSC, και το διάνυσμα $\Delta \theta^M$ αναπαριστά τις αλλαγές στις γωνίες των τάσεων των ζυγών λόγω της αλλαγής στον πίνακα αγωγιμοτήτων που προκαλείται από το UPFC ή το SSSC. Έστω ότι τα διανύσματα F_{ij}^o και ΔF_{ij} αναφέρονται αντίστοιχα στην αρχική ροή ενεργού ισχύος και στην αλλαγή της ροής ενεργού ισχύος στη γραμμή ij . Οι ροές των γραμμών, μετά την εισαγωγή UPFC ή SSSC, μπορούν να εκφραστούν ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} F_{ij} &= H\theta = (H^o + \Delta H)(\theta^o + \Delta \theta) \\ &= (H^o \theta^o + H \Delta \theta + \theta^o \Delta H) \end{aligned} \quad (4.107)$$

Η τελευταία εξίσωση παίρνει την μορφή:

$$F_{ij} = F_{ij}^O + \Delta F_{ij} \quad (4.108)$$

όπου

$$\Delta F_{ij} = H \Delta \theta + \Delta H \theta^O \quad (4.109)$$

όπου ο H είναι $M \times N$ πίνακας, του οποίου η k σειρά έχει δύο μη μηδενικά στοιχεία στην i και j θέση και μηδενικά στοιχεία οπουδήποτε αλλού, όπου τα i και j αναπαριστούν τους ζυγούς στους τερματισμούς της k γραμμής. Τα στοιχεία του συγκεκριμένου πίνακα δίνονται από τη σχέση:

$$H_{ki} = -H_{ik} = B_{ij} = B_{ij}^O + \Delta B_{ij} \quad (4.110)$$

Οι αλλαγές στις ροές των γραμμών που υπολογίζονται από την σχέση (4.109), βάση των σχέσεων (4.103)-(4.106), μπορούν να εκφραστούν ως ακολούθως:

$$\Delta F_{ij} = \Delta H \theta^O + H \Delta \theta = \Delta H \theta^O + H(\Delta \theta^G + \Delta \theta^M + \Delta \theta^C) \quad (4.111)$$

ή

$$\begin{aligned} \Delta F_{ij} &= \Delta H B^O{}^{-1} P^O + H B^{-1} \Delta P^G + H M P^O + H B^{-1} \Delta P^C \\ &= (\Delta H B^O{}^{-1} + H M) P^O + H B^{-1} \Delta P^G + H B^{-1} \Delta P^C \end{aligned} \quad (4.112)$$

Για να απλοποιηθούν οι προηγούμενες εκφράσεις, τίθεται $X^O = B^O{}^{-1}$ και $X = B^{-1}$ και η τελευταία εξίσωση γίνεται:

$$\begin{aligned} \Delta F_{ij} &= (\Delta H X^O + H M) P^O + H X \Delta P^G + H X \Delta P^C \\ &= \Delta F_{ij}^B + \Delta F_{ij}^G + \Delta F_{ij}^C \end{aligned} \quad (4.113)$$

Τα διανύσματα ΔF_{ij}^G , ΔF_{ij}^C και ΔF_{ij}^B αναπαριστούν, αντίστοιχα, το διάνυσμα των αλλαγών στις ροές των γραμμών εξαιτίας των αλλαγών στην παραγωγή, το διάνυσμα των αλλαγών στις ροές των γραμμών εξαιτίας της έγχυσης ισχύος στο δίκτυο από το UPFC ή το SSSC και το διάνυσμα των αλλαγών στις ροές των γραμμών εξαιτίας της αλλαγής στο πίνακα αγωγιμοτήτων που προκαλείται από το UPFC ή το SSSC. Αυτά τα διανύσματα μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\Delta F_{ij}^B = (\Delta H X^O + H M) P^O \quad (4.114)$$

$$\Delta F_{ij}^G = H X \Delta P^G \quad (4.115)$$

$$\Delta F_{ij}^C = H X \Delta P^C \quad (4.116)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εισάγοντας το ευέλικτο σύστημα μεταφοράς στο σύστημα, προκαλούνται αλλαγές στις τιμές των αγωγιμοτήτων. Επομένως, μεταβάλλονται και οι συντελεστές κατανομής A, C και D. Αν το x_{mn} εκφράζει την επαγωγική αντίδραση της γραμμής $m-n$, τότε οι συντελεστές A, μετά την εισαγωγή UPFC ή SSSC, μπορούν να εκφραστούν ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} A_{m-n,i} &= \frac{X_{mi} - X_{ni}}{x_{mn}} = (X_{mi} - X_{ni})B_{mn} \\ &= ([X_{mi}^O + \Delta X_{mi}] - [X_{ni}^O + \Delta X_{ni}])[B_{mn}^O + \Delta B_{mn}] \\ &= (X_{mi}^O - X_{ni}^O)B_{mn}^O + (X_{mi}^O - X_{ni}^O)\Delta B_{mn} \\ &\quad + (\Delta X_{mi} - \Delta X_{ni})B_{mn} = A_{m-n,i}^O + \Delta A_{m-n,i} \end{aligned} \quad (4.117)$$

όπου ο πίνακας $A_{m-n,i}^O$ δίνεται από την σχέση (4.75) και ο πίνακας $\Delta A_{m-n,i}$ δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta A_{m-n,i} = (X_{mi}^O - X_{ni}^O)\Delta B_{mn} + (\Delta X_{mi} - \Delta X_{ni})B_{mn} \quad (4.118)$$

Για αλλαγές στις εγχύσεις όλων των ζυγών του συστήματος, η αλλαγή στην ροή ισχύος της γραμμής $m-n$ δίνεται από την σχέση:

$$\Delta F_{m-n} = \sum_{i \neq r} A_{m-n,i} \Delta P_i \quad (4.119)$$

όπου

$$\sum_{i \neq r} \Delta P_i + \Delta P_r = 0 \quad (4.120)$$

Οι συντελεστές D, μετά την εισαγωγή UPFC ή SSSC, ορίζονται ως ακολούθως:

$$F_{m-n} = \sum_{i=1}^N D_{m-n,i} G_i \quad (4.121)$$

όπου

$$D_{m-n,i} = D_{m-n,r} + A_{m-n,i} \quad (4.122)$$

$$D_{m-n,r} = \frac{F_{m-n} - \sum_{i=1, i \neq r}^N A_{m-n,i} G_i}{\sum_{i=1}^N G_i} \quad (4.123)$$

Η θετική εγγεόμενη ισχύς από το UPFC ή το SSSC αντιμετωπίζεται ως παραγωγή ενώ η αρνητική εγγεόμενη ισχύς αντιμετωπίζεται ως φορτίο. Επομένως, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι στις σχέσεις (4.121) και (4.123) το διάνυσμα G_i αναφέρεται στη συνολική παραγωγή στο ζυγό i συν τη θετική εγγεόμενη ισχύ στο ζυγό i από το UPFC ή το SSSC, αν υπάρχει.

Οι συντελεστές C , μετά την εισαγωγή UPFC ή SSSC, ορίζονται ως ακολούθως:

$$F_{m-n} = \sum_{j=1}^N C_{m-n,j} L_j \quad (4.124)$$

όπου

$$C_{m-n,j} = C_{m-n,r} - A_{m-n,j} \quad (4.125)$$

$$C_{m-n,r} = \frac{F_{m-n} + \sum_{j=1, j \neq r}^N A_{m-n,j} L_j}{\sum_{j=1}^N L_j} \quad (4.126)$$

Και πάλι να σημειωθεί ότι το διάνυσμα L_j στις σχέσεις (4.124) και (4.126) αναφέρεται στο συνολικό φορτίο στο ζυγό j συν τη αρνητική εγγεόμενη ισχύ στο ζυγό j από το UPFC ή το SSSC, αν υπάρχει.

4.5 ΤΙΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Αφού έχουν προσδιοριστεί οι συντελεστές κατανομής και έχει ανιχνευτεί η συνεισφορά των χρηστών στις ροές των γραμμών, ο επιμερισμός του κόστους μεταφοράς στους χρήστες του συστήματος μπορεί να υλοποιηθεί με μια πιο δίκαιη διαδικασία χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα. Στην παρούσα εργασία η τιμολόγηση των υπηρεσιών μεταφοράς έγινε με τη χρήση οκτώ μεθόδων χρέωσης, οι οποίοι αναφέρονται στη συνέχεια:

1. **Μέθοδος γραμματοσήμου:** χρεώνει τους παραγωγούς με βάση την εγκατεστημένη τους ισχύ και τους καταναλωτές με βάση τη ζήτησή τους, ανεξάρτητα από τη θέση τους στο δίκτυο και από το ποσοστό που χρησιμοποιούν τις γραμμές. Έτσι, αγνοείται η πραγματική κατάσταση του συστήματος.
2. **Μέθοδος MW-mile αρχική:** λαμβάνει υπόψη την απόσταση, τη ροή φορτίου, αλλά όχι την κατεύθυνσή της. Έτσι όμως αγνοεί τους χρήστες που προκαλούν αρνητικές ροές (ροές αντίθετες στην κύρια ροή των γραμμών).
3. **Μέθοδος unused absolute MW-mile:** λαμβάνει υπόψη τις απόλυτες τιμές των συνεισφορών των χρηστών σε όλες τις γραμμές του δικτύου αγνοώντας την κατεύθυνσή τους και τους χρεώνει και για την αχρησιμοποίητη ικανότητα των γραμμών.
4. **Μέθοδος unused reverse MW-mile:** λαμβάνει υπόψη ροές φορτίου και προς τις δύο κατευθύνσεις και χρεώνει τους χρήστες με βάση τη συνολική ροή της κάθε γραμμής.
5. **Μέθοδος unused zero counter flow MW-mile:** δεν υπάρχει χρέωση για τους χρήστες που προκαλούν ροή αντίθετη από την κύρια ροή των γραμμών.
6. **Μέθοδος used absolute MW-mile:** επιμερίζει τα κόστη ανάλογα με το μέγεθος της ροής που προκαλεί ο κάθε χρήστης σε κάθε γραμμή και την μέγιστη ικανότητα της γραμμής.
7. **Μέθοδος used reverse MW-mile:** χρεώνει τους χρήστες ανάλογα με τη ροή φορτίου που προκαλεί ο καθένας τους σε κάθε γραμμή και με την μέγιστη ικανότητα της γραμμής.

8. **Μέθοδος used zero counter flow MW-mile:** Οι χρήστες του δικτύου χρεώνονται μόνο για τη θετική ροή που προκαλούν σε κάθε γραμμή, αλλά όχι για την αχρησιμοποίητη ικανότητα των γραμμών.

Και οι οκτώ αυτές μέθοδοι βασίστηκαν στη ροή φορτίου των γραμμών που ανιχνεύτηκε μέσω της μεθόδου των συντελεστών κατανομής ή μεθόδου Rudnick. Επιπλέον, οι αναφερθείσες μέθοδοι χρέωσης εφαρμόστηκαν τόσο στην περίπτωση εισαγωγής του UPFC όσο και στην περίπτωση εισαγωγής του SSSC στη γραμμή μεταφοράς. Τέλος, στη βιβλιογραφία που παρατίθεται στο τέλος του κεφαλαίου υπάρχουν πηγές που παρουσιάζουν εκτενώς τη μαθηματική μοντελοποίηση των συγκεκριμένων μεθόδων χρέωσης στην οποία στηρίχτηκε το αναπτυχθέν λογισμικό [4.7]-[4.9].

4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] M. Alomoush, "Impacts of UPFC on line flows and transmission usage," *Electric Power Systems Research*, vol. 71, no 3, pp. 223-234, 2004.
- [4.2] M. Alomoush, "Derivation of UPFC DC load flow model with examples of its use in restructured power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 3, pp. 1173-1180, 2003.
- [4.3] M. Alomoush, "Static Synchronous Series Compensator to Help Energy Markets Resolve Congestion-Caused Problems," in Proc. *Large Engineering systems Conference on Power Engineering (LESCOPE)*, 2004.
- [4.4] M. Alomoush, "Modeling of Static Synchronous Series Compensator for Energy Markets Approximate Calculations," in *Basic Sciences & Engineering – Refereed research Journal*, Editor: Abhath Al-Yarmouk, July 2009.
- [4.5] M. Shahidehpour, H. Yamin, Z. Li, *Market operations in electric power systems: Forecasting, Scheduling and Risk Management*. New York: Wiley, 2002.
- [4.6] H. Rudnick, M. Soto, and R. Palma, "Use of system approaches for transmission open access pricing," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 125–135, February 1999.
- [4.7] D. Shirmohammadi, X. V. Filho, B. Gorenstin, and M. V. P. Pereira, "Some fundamental technical concepts about cost based transmission pricing," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 1002-1008, May 1996.
- [4.8] Ι. Καμπούρης, Σ. Ευσταθίου, Α. Κορωνίδης και Α. Μαΐσης. (2000, Ιαν. - Δεκ.). Συγκριτική ανάλυση μεθόδων χρέωσης υπηρεσιών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για το Ελληνικό σύστημα και ενδεικτικά αποτελέσματα. *Τεχνικά Χρονικά: Επιστημονική Έκδοση TEE: III*. [Online]. 20(1-2), σελ. 37-49. Διαθέσιμο: http://library.tee.gr/digital/techr/2000/techr_2000_iii_1_2_37.pdf, προσπελάστηκε τον Ιούλιο 2011.
- [4.9] J. W. L. Marangon, "Allocation of transmission fixed charges: an overview," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 1409–1418, August 1996.

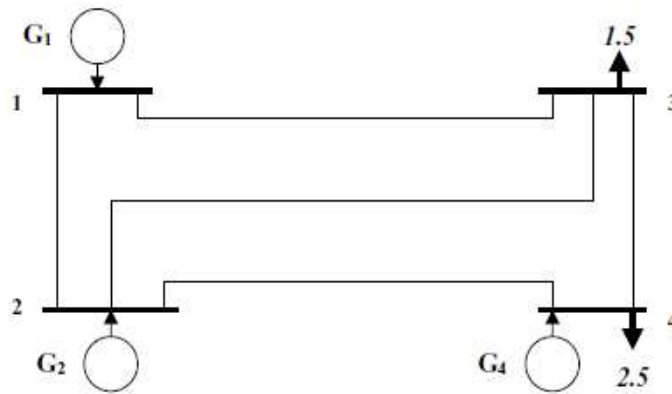
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί ένα αριθμητικό παράδειγμα που αφορά στην εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο σε ένα σύστημα 4 ζυγών. Μέσω του παραδείγματος αυτού, θα γίνει περισσότερο κατανοητή η μοντελοποίηση του επιμερισμού του κόστους μεταφοράς στην περίπτωση χρησιμοποίησης ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς.

5.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το σύστημα 4 ζυγών το οποίο θα μελετηθεί. Επιπλέον, στους Πίνακες 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται τα δεδομένα των γραμμών και των ζυγών, αντίστοιχα, του συγκεκριμένου συστήματος. Ως ζυγός αναφοράς έχει ληφθεί ο ζυγός 1 ενώ ως βάση ισχύος έχουν θεωρηθεί τα 100MVA.



Σχήμα 5.1: Σύστημα 4 ζυγών

Πίνακας 5.1: Δεδομένα γραμμών του συστήματος 4 ζυγών

number of line	from bus	to bus	x (pu)	fmax (MW)
1	1	2	0,2	70
2	1	3	0,2	100
3	2	3	0,1	100
4	2	4	0,2	150
5	3	4	0,3	70

Πίνακας 5.2: Δεδομένα ζυγών του συστήματος 4 ζυγών

number of bus	Pg min (pu)	Pg max (pu)	Pload (pu)	a(\$)	b(\$/MW)	c(\$/MW ²)
1	0,5	4	0	230	11	0,007
2	0,5	3,5	0	200	10	0,005
3	0	0	1,5	0	0	0
4	0,5	3,5	2,5	240	12	0,009

Τέλος, στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα δεδομένα του UPFC για το σύστημα των 4 ζυγών που μελετάται.

Πίνακας 5.3: Δεδομένα UPFC

ζυγός αναχώρησης	ζυγός άφιξης	Xse (pu)	Xsh (pu)	ζυγός έγχυσης ισχύος από το UPFC	Pg_upfc (pu)
2	3	0,1	10	3	0,5134

Σκοπός του προβλήματος είναι να λυθεί το πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου χρησιμοποιώντας επαναληπτικές μεθόδους και να προσδιοριστούν οι παραγωγές ενεργού ισχύος των γεννητριών έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος παραγωγής. Στην συνέχεια, θα προσδιοριστούν οι συντελεστές κατανομής και η συνεισφορά του κάθε χρήστη στις ροές των γραμμών βάσει του μοντέλου που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τέλος, θα επιμεριστεί το κόστος μεταφοράς στους παραγωγούς και στους καταναλωτές χρησιμοποιώντας την MW-mile και υποθέτοντας ότι το 30% του συνολικού κόστους επιμερίζεται στους παραγωγούς και το 70 % επιμερίζεται στα φορτία. Η ίδια διαδικασία θα επαναληφθεί για την περίπτωση χρησιμοποίησης του UPFC λαμβάνοντας υπόψη της αλλαγές που συνεπάγεται η εισαγωγή αυτού του ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα.

5.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

5.3.1 Διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου

Το πρόβλημα βέλτιστης ροής χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς διατυπώνεται ως ακολούθως:

$$\min F(P_G) = \sum_{i=1}^{NG} a_i + b_i P_{G_i} + c_i (P_{G_i})^2 \quad (5.1)$$

υπό τους περιορισμούς

$$P_B = D \cdot A \cdot \Theta \quad (5.2)$$

$$B \cdot \Theta - P_G = -P_L \quad (5.3)$$

$$P_{G,\min} \leq P_G \leq P_{G,\max} \quad (5.4)$$

$$-P_{B,\max} \leq P_B \leq P_{B,\max} \quad (5.5)$$

$$-\pi \leq \Theta \leq \pi \quad (5.6)$$

όπου NG είναι ο αριθμός των ζυγών, M είναι ο αριθμός των γραμμών του συστήματος, P_{G_i} η παραγωγή στον ζυγό i, c_i (€/MW²h), b_i (€/MWh) και a_i (€/h) είναι οι συντελεστές κόστους παραγωγής, P_B είναι το διάνυσμα των ροών ενεργού ισχύος στις γραμμές του συστήματος, $P_{B_{\max}}$ είναι το διάνυσμα των μέγιστων ορίων ενεργού ισχύος που μπορεί να αντέξει η κάθε γραμμή και P_L το διάνυσμα των φορτίων στους ζυγούς του συστήματος. Επίσης, με B παριστάνεται ο πίνακας αγωγιμοτήτων του συστήματος, με A ο πίνακας που δείχνει τους ζυγούς αναχώρησης και τερματισμού των γραμμών του συστήματος, Θ είναι το διάνυσμα των γωνιών των τάσεων του ζυγούς και D είναι ο πίνακας που έχει μηδενικά όλα τα μη διαγώνια στοιχεία του ενώ τα διαγώνια στοιχεία του υπολογίζονται από τη σχέση $1/x_{ij}$, όπου x_{ij} είναι η επαγωγική αντίδραση της γραμμής ij.

5.3.2 Αριθμητικοί υπολογισμοί του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου

Οι πίνακες A, D και B για το σύστημα 4 ζυγών που μελετήθηκε προκύπτουν ως ακολούθως:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,3333 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 10 & -5 & -5 & 0 \\ -5 & 20 & -10 & -5 \\ -5 & -10 & 18,3333 & -3,3333 \\ 0 & -5 & -3,3333 & 8,3333 \end{pmatrix}$$

5.3.3 Εξισώσεις του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου

Το διάνυσμα των μεταβλητών ελέγχου του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου δίνεται ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} X &= [P_G \ P_B \ \Theta]^T = \\ &= [P_{G_1} \ P_{G_2} \ P_{G_3} \ P_{G_4} \ P_{B_1} \ P_{B_2} \ P_{B_3} \ P_{B_4} \ P_{B_5} \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T \end{aligned} \quad (5.7)$$

Οι εξισώσεις του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου για το υπό μελέτη σύστημα των 4 ζυγών δίνονται ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \min F(P_G) &= \min[230 + 11P_{G_1} + 0,007P_{G_1}^2 + 200 + 10P_{G_2} + \\ &\quad + 0,005P_{G_2}^2 + 240 + 12P_{G_3} + 0,009P_{G_3}^2] \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$P_{B_1} = 5\theta_1 - 5\theta_2, \quad P_{B_2} = 5\theta_1 - 5\theta_3, \quad P_{B_3} = 10\theta_2 - 10\theta_3 \quad (5.9)$$

$$P_{B_4} = 5\theta_2 - 5\theta_4, \quad P_{B_5} = 3,3333\theta_3 - 3,3333\theta_4 \quad (5.10)$$

$$(10 \cdot \theta_1 - 5 \cdot \theta_2 - 5 \cdot \theta_3) - P_{G_1} = 0 \quad (5.11)$$

$$(-5 \cdot \theta_1 + 20 \cdot \theta_2 - 10 \cdot \theta_3 - 5 \cdot \theta_4) - P_{G_2} = 0 \quad (5.12)$$

$$(-5 \cdot \theta_1 - 10 \cdot \theta_2 + 18,3333 \cdot \theta_3 - 3,3333 \cdot \theta_4) - P_{G_3} = -1.5 \quad (5.13)$$

$$(-5 \cdot \theta_2 - 3,3333 \cdot \theta_3 + 8,3333 \cdot \theta_4) - P_{G_4} = -2.5 \quad (5.14)$$

$$0,5 \leq P_{G_1} \leq 4, \quad 0,5 \leq P_{G_2} \leq 3,5, \quad 0 \leq P_{G_3} \leq 0, \quad 0,5 \leq P_{G_4} \leq 3,5 \quad (5.15)$$

$$-0,7 \leq P_{B_1} \leq 0,7, \quad -1 \leq P_{B_2} \leq 1, \quad -1 \leq P_{B_3} \leq 1 \quad (5.16)$$

$$-1,5 \leq P_{B_4} \leq 1,5, \quad -0,7 \leq P_{B_5} \leq 0,7 \quad (5.17)$$

$$-\pi \leq \theta_1 \leq \pi, \quad -\pi \leq \theta_2 \leq \pi, \quad -\pi \leq \theta_3 \leq \pi \quad (5.18)$$

$$-\pi \leq \theta_4 \leq \pi, \quad -\pi \leq \theta_5 \leq \pi \quad (5.19)$$

Το πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου που περιγράφεται από τις παραπάνω εξισώσεις λύθηκε με τη βοήθεια της συνάρτησης `quadprog` της MATLAB. Ο κώδικας της MATLAB που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στη συνέχεια.

$$r = [70 \ 50 \ 0 \ 90 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T ;$$

$$w = 2 * \text{diag}(r) ;$$

$$A_{eq} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 10 & -10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 5 & 0 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 3,3333 & -3,3333 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & -5 & -5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 20 & -10 & -5 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & -10 & 18,3333 & -3,3333 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & -3,3333 & 8,3333 \end{pmatrix} ;$$

$$b_{eq} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1,5 \ -2,5]^T ;$$

$$A = [] ; \ b = [] ;$$

$$\text{options} = \text{optimset}('LargeScale', 'off') ;$$

$$LB = [0,5 \ 0,5 \ 0 \ 0,5 \ -0,7 \ -1 \ -1 \ -1,5 \ -0,7 \ -\pi \ -\pi \ -\pi \ -\pi]^T ;$$

$$UB = [4 \ 3,5 \ 0 \ 3,5 \ 0,7 \ 1 \ 1 \ 1,5 \ 0,7 \ \pi \ \pi \ \pi \ \pi]^T ;$$

$$c = [1100 \ 1000 \ 0 \ 1200 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T ;$$

$$[X, FVAL, EXITFLAG, OUTPUT, LAMBDA] = \text{quadprog}(W, c, A, b, Aeq, beq, LB, UB, [], \text{options}) ;$$

Μετά την εκτέλεση του παραπάνω κώδικα, λύνεται το πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου και προκύπτει το διάνυσμα X των μεταβλητών εξόδου:

$$X = [P_G \ P_B \ \Theta]^T$$

όπου

$$P_G = [1,5 \ 1,75 \ 0 \ 0,75]^T$$

$$P_B = [0,5 \ 1 \ 1 \ 1,25 \ 0,5]^T$$

$$\theta = [0 \ -0,1 \ -0,2 \ -0,35]^T .$$

5.3.4 Υπολογισμός των συντελεστών GSDF ή συντελεστών A

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 4.4.1 της παρούσας εργασίας, οι συντελεστές GSDF (generation shift distribution factors) ή συντελεστές A δείχνουν τις αλλαγές της ροής στις γραμμές μεταφοράς λόγω μιας αλλαγής στην παραγωγή των γεννητριών. Επομένως, ο συντελεστής GSDF που αναπαριστά την αλλαγή της ροής στη γραμμή l-k λόγω της αλλαγής στην παραγωγή του ζυγού i υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$GSDF_{l-k,i} = \frac{S_{li} - S_{ki}}{x_{lk}} \quad (5.20)$$

όπου x_{lk} είναι η επαγωγική αντίδραση της γραμμής l-k, ενώ ο πίνακας S υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & B_{rd}^{-1} \end{pmatrix} \quad (5.21)$$

όπου ο πίνακας B_{rd}^{-1} είναι προκύπτει από τον πίνακα B αν διαγραφεί η γραμμή και η στήλη που αναφέρονται στο ζυγό αναφοράς. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο για το σύστημα των 4 ζυγών, ως ζυγός αναφοράς έχει θεωρηθεί ο ζυγός 1, επομένως:

$$B_{rd}^{-1} = \begin{pmatrix} 20 & -10 & -5 \\ -10 & 18,3333 & -3,3333 \\ -5 & -3,3333 & 8,3333 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} 0,1172 & 0,0828 & 0,1034 \\ 0,0828 & 0,1172 & 0,0966 \\ 0,1034 & 0,0966 & 0,2207 \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & B_{rd}^{-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1172 & 0,0828 & 0,1034 \\ 0 & 0,0828 & 0,1172 & 0,0966 \\ 0 & 0,1034 & 0,0966 & 0,2207 \end{pmatrix}$$

Για παράδειγμα, ο συντελεστής $GSDF_{1-2,4}$ του αριθμητικού παραδείγματος που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$GSDF_{1-2,4} = \frac{S_{14} - S_{24}}{x_{12}} = \frac{0 - 0,1034}{0,2} = -0,517.$$

Οι τιμές όλων των συντελεστών A για το σύστημα 4 ζυγών στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς φαίνονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: A-factors στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
1-2	0	-0,5862	-0,4138	-0,5172
1-3	0	-0,4138	-0,5862	-0,4828
2-3	0	0,3448	-0,3448	0,069
2-4	0	0,069	-0,069	-0,5862
3-4	0	-0,069	0,069	-0,4138

5.3.5 Υπολογισμός των συντελεστών GGDF ή συντελεστών D

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 4.4.2 της παρούσας εργασίας, οι συντελεστές GGDF (generalized generation distribution factors) ή συντελεστές D καθορίζουν τη συνεισφορά κάθε παραγωγικής μονάδας στις ροές ενεργού ισχύος των γραμμών και για αυτό το λόγο μπορούν να έχουν και αρνητική τιμή. Δεδομένου ότι βασίζονται στις dc ροές φορτίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για ροές ενεργού ισχύος. Οι GGDFs ή d factors ορίζονται ως ακολούθως:

$$D_{m-n,i}^o = D_{m-n,r}^o + A_{m-n,i}^o \quad (5.22)$$

$$D_{m-n,r}^o = \frac{F_{m-n}^o - \sum_{i=1, i \neq r}^N A_{m-n,i}^o G_i^o}{\sum_{i=1}^N G_i^o} \quad (5.23)$$

όπου:

F_{m-n}^o : Η συνολική ροή ενεργού ισχύος της γραμμής μεταξύ των ζυγών m, n .

Υπολογίζεται από τη βέλτιστη ροή φορτίου (διάνυσμα P_B).

$D_{m-n,i}^o$: Συντελεστής GGDF της γραμμής μεταξύ των ζυγών m, n που αντιστοιχεί στην παραγωγή στο ζυγό i .

$D_{m-n,r}^o$: Συντελεστής GGDF της γραμμής μεταξύ των ζυγών m, n που αντιστοιχεί στην παραγωγή στο ζυγό αναφοράς r .

G_i^o : Η συνολική παραγωγή στο ζυγό i .

Για παράδειγμα, ο συντελεστής $GGDF_{1-2,3}$ του αριθμητικού παραδείγματος που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$GGDF_{1-2,1}^O = \frac{F_{1-2}^O - \sum_{i=2}^N GSDF_{1-2,i}^O G_i^O}{\sum_{i=1}^N G_i^O} = \frac{0,5 - (-0,5862 \times 1,75 - 0,5172 \times 0,75)}{1,5 + 0,75 + 1,75} = 0,4784$$

$$\text{Και επομένως: } GGDF_{1-2,3}^O = GGDF_{1-2,1}^O + GSDF_{1-2,3}^O = 0,4784 - 0,4138 = 0,0647$$

Οι τιμές όλων των συντελεστών D για το σύστημα 4 ζυγών στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς φαίνονται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: D-factors στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
1-2	0,4784	-0,1078	0,0647	-0,0388
1-3	0,5215	0,1078	-0,0647	0,0388
2-3	0,0862	0,431	-0,2586	0,1552
2-4	0,3922	0,4612	0,3233	-0,194
3-4	0,2328	0,1638	0,3017	-0,181

5.3.6 Συνεισφορά των χρηστών του συστήματος χρησιμοποιώντας του συντελεστές D

Η συνεισφορά της γεννήτριας i στην ροή της γραμμής $m-n$ υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$FG_{m-n,i} = GGDF_{m-n,i} \times G_i \quad (5.24)$$

Για το αριθμητικό παράδειγμα που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο προκύπτει:

$$FG_{1-2,4} = GGDF_{1-2,4} \times G_4 = -0,0388 \times (0,75 pu) \times (100 MVA) = -2,9095 MW$$

Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζεται η συνεισφορά των χρηστών στις ροές των γραμμών βάσει των συντελεστών D.

Πίνακας 5.6: Transmission usage στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	Total
1-2	71,7672	-18,8578	0	-2,9095	50
1-3	78,2328	18,8578	0	2,9095	100
2-3	12,931	75,431	0	11,6379	100
2-4	58,8362	80,7112	0	-14,5474	125
3-4	34,9138	28,6638	0	-13,5776	50

5.3.7 Υπολογισμός των συντελεστών GLDF ή συντελεστών C

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 4.4.3 της παρούσας εργασίας, οι συντελεστές GLDF (generalized load distribution factors) ή συντελεστές C καθορίζουν τη συνεισφορά κάθε φορτίου στις ροές των γραμμών. Ορίζονται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$C_{m-n,j}^O = C_{m-n,r}^O - A_{m-n,j}^O \quad (5.25)$$

$$C_{m-n,r}^O = \frac{F_{m-n}^O + \sum_{j=1, j \neq r}^N A_{m-n,j}^O L_j^O}{\sum_{j=1}^N L_j^O} \quad (5.26)$$

όπου:

F_{m-n}^O : η συνολική ροή ενεργού ισχύος της γραμμής μεταξύ των ζυγών m, n .

$C_{m-n,j}^O$: Συντελεστής GLDF της γραμμής μεταξύ των ζυγών m, n που αντιστοιχεί στο φορτίο του ζυγού j .

$C_{m-n,r}^O$: Συντελεστής GLDF της γραμμής μεταξύ των ζυγών m, n που αντιστοιχεί στο φορτίο του ζυγού αναφοράς r .

L_j^O : Η συνολική ζήτηση στο ζυγό j .

Για παράδειγμα, ο συντελεστής $GLDF_{1-2,3}^O$ του αριθμητικού παραδείγματος που παρουσιάζεται στο παρών κεφάλαιο υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$GLDF_{1-2,1}^O = \frac{F_{1-2}^O + \sum_{i=2}^N GSDF_{1-2,i}^O L_i^O}{\sum_{i=1}^N L_i^O} =$$

$$= \frac{0,5 + (-0,4138 \times 1,5 - 0,5172 \times 2,5)}{1,5 + 2,5} = -0,353425.$$

$$\begin{aligned} \text{Και επομένως: } GLDF_{1-2,3}^O &= GLDF_{1-2,1}^O - GSDF_{1-2,3}^O = \\ &= -0,353425 - (-0,4138) = 0,0603. \end{aligned}$$

Οι τιμές όλων των συντελεστών C για το σύστημα 4 ζυγών στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς φαίνονται στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7: C-factors στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
1-2	-0,3534	0,2328	0,0603	0,1638
1-3	-0,2716	0,1422	0,3147	0,2112
2-3	0,1638	-0,181	0,5086	0,0948
2-4	-0,0797	-0,1487	-0,0108	0,5065
3-4	-0,1078	-0,0388	-0,1767	0,306

5.3.8 Συνεισφορά των χρηστών του συστήματος χρησιμοποιώντας του συντελεστές C

Η συνεισφορά της φορτίου i στην ροή της γραμμής m-n υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$FL_{m-n,i} = GLDF_{m-n,i} \times L_i \quad (5.27)$$

Για το αριθμητικό παράδειγμα που παρουσιάζεται στο παρών κεφάλαιο προκύπτει:

$$FL_{1-2,3} = GLDF_{1-2,3} \times L_3 = 0,0603 \times (1,5 pu) \times (100 MVA) = 9,0517 MW.$$

Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζεται η συνεισφορά των χρηστών στις ροές των γραμμών βάσει των συντελεστών C.

Πίνακας 5.8: Transmission usage στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	Total
1-2	0	0	9,0517	40,9483	50
1-3	0	0	47,1983	52,8017	100
2-3	0	0	76,2931	23,7069	100
2-4	0	0	-1,6164	126,6164	125
3-4	0	0	-26,5086	76,5086	50

5.3.9 Χρέωση παραγωγών και καταναλωτών χρησιμοποιώντας την μέθοδο MW-mile

Το συνολικό ετήσιο κόστος μεταφοράς που πρέπει να επιμεριστεί είναι 180k€. Από αυτό το ποσό, το 30% (54k€) επιβαρύνει τους παραγωγούς και το 70% (126k€) επιβαρύνει τους καταναλωτές. Η χρέωση $TIC_{1-2} \left| FG_{1-2,1} \right|$ της γεννήτριας G_1 εξαιτίας της γραμμής 1-2 υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$TIC_{1-2} \left| FG_{1-2,1} \right| = 20 \times |71,7672| = 1435,344k€$$

όπου το TIC_{1-2} είναι το ετήσιο κόστος επένδυσης για τη γραμμή 1-2.

Όμοια υπολογίζονται οι χρεώσεις $TIC_{m-n} \left| FG_{m-n,i} \right|$ για κάθε γεννήτρια G_i εξαιτίας κάθε γραμμής m-n.

Στο παράδειγμα του παρόντος Κεφαλαίου, οι συνολική χρέωση της γεννήτριας G_1 υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$TCG_{G_1} = TC_G \frac{\sum_{mn \in K} TIC_{m-n} \left| FG_{m-n,1} \right|}{\sum_{G_i \in T} \sum_{mn \in K} TIC_{m-n} \left| FG_{m-n,i} \right|} = 54 \times \frac{8392,241}{19577,59} = 23,14795k€,$$

όπου με K συμβολίζεται το σύνολο των 5 γραμμών του συστήματος των 4 ζυγών που μελετάται και με T συμβολίζεται το σύνολο των 3 γεννητριών του συστήματος.

Με όμοιο τρόπο υπολογίζονται οι χρεώσεις για τα φορτία.

Στους Πίνακες 5.9 και 5.10 φαίνονται αντίστοιχα οι χρεώσεις των παραγωγών και των καταναλωτών σε k€ για την περίπτωση χρέωσης 30% στους παραγωγούς και 70% στους καταναλωτές χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς.

Πίνακας 5.9: Χρέωση παραγωγών (σε k€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 30% στους παραγωγούς χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

number of bus	GGDF(30%-70%)				total
	1	2	3	4	
mw-mile	23,148	26,0905	0	4,7616	54
unused abs	23,6161	25,5646	0	4,8193	54
unused zcf	26,0699	25,4861	0	2,444	54
unused reverse	30,1655	24,7655	0	-0,931	54
used abs	25,5665	26,3707	0	5,0209	56,95813
used zcf	25,5665	24,7543	0	2,444	52,76478
used reverse	25,5665	23,1379	0	-0,133	48,57143
postage stamp	20,25	23,625	0	10,125	54

Πίνακας 5.10: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 70% στους καταναλωτές χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

	GLDF(30%-70%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	0	0	50,1611	75,8389	126
unused abs	0	0	51,7486	74,2514	126
unused zcf	0	0	47,7931	78,2069	126
unused reverse	0	0	40,0086	85,9914	126
used abs	0	0	52,6724	71,8678	124,5402
used zcf	0	0	47,069	71,8678	118,9368
used reverse	0	0	41,4655	71,8678	113,3333
postage stamp	0	0	47,25	78,75	126

5.4 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ UPFC

5.4.1 Διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου

Το πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου για την περίπτωση χρησιμοποίησης του UPFC στο σύστημα έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 3.4.2 της παρούσας εργασίας και διατυπώνεται ως ακολούθως:

$$\text{Minimization of } F(x) \quad (5.28)$$

υπό τους περιορισμούς ισότητας:

$$P_i^G - P_i^D - P_i^{se} - P_i^{sh} + \sum_{j \in \mathcal{R}_i} P_{ij} = 0 \quad \text{όπου } i=1,2,\dots,NB \quad (5.29)$$

$$P_{ij} = D \cdot A \cdot \Theta \quad (5.30)$$

$$P_{ij}^{ex,sh} - P_{ij}^{ex,se} = 0 \quad \text{όπου } ij \in \mathcal{R}_c \quad (5.31)$$

και τους περιορισμούς ανισότητας:

$$-P_{ij,max} \leq P_{ij} \leq P_{ij,max} \quad (5.32)$$

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} \quad \text{όπου } i=1,2,\dots,NG \quad (5.33)$$

$$U_{ij}^{\min} \leq U_{ij} \leq U_{ij}^{\max} \quad \text{όπου } ij \in \mathcal{R}_c \quad (5.34)$$

$$E_{ij}^{\min} \leq E_{ij} \leq E_{ij}^{\max} \text{ όπου } ij \in \mathfrak{R}_c \quad (5.35)$$

$$0 \leq \delta_{ij} \leq 2\pi \text{ όπου } ij \in \mathfrak{R}_c \quad (5.36)$$

$$0 \leq \beta_{ij} \leq 2\pi \text{ όπου } ij \in \mathfrak{R}_c \quad (5.37)$$

$$-\pi \leq \theta \leq \pi \quad (5.38)$$

όπου το P_{ij} δίνεται από τη σχέση: $P_{ij} = -P_{ji} = -b_{ij}(\theta_i - \theta_j)$.

5.4.2 Αριθμητικοί υπολογισμοί του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου

Οι πίνακες A, D και B για το σύστημα 4 ζυγών που μελετήθηκε στην περίπτωση χρησιμοποίησης του UPFC στο σύστημα προκύπτουν ως ακολούθως:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,3333 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 10 & -5 & -5 & 0 \\ -5 & 15,1 & -5 & -5 \\ -5 & -5 & 13,3333 & -3,3333 \\ 0 & -5 & -3,3333 & 8,3333 \end{pmatrix}$$

5.4.3 Εξισώσεις του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου

Το διάνυσμα των μεταβλητών ελέγχου του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου για το σύστημα 4 ζυγών στην περίπτωση χρησιμοποίησης του UPFC δίνεται ως ακολούθως:

$$\begin{aligned}
Y &= [P_G \ P_{ij} \ \Theta]^T = \\
&= [P_{G_1} \ P_{G_2} \ P_{G_3} \ P_{G_4} \ P_{12} \ P_{13} \ P_{23} \ P_{24} \ P_{35} \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T \quad (5.39)
\end{aligned}$$

Οι εξισώσεις του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου για το υπό μελέτη σύστημα των 4 ζυγών δίνονται ως ακολούθως:

$$\begin{aligned}
\min F(P_G) = \min[230 + 11P_{G_1} + 0,007P_{G_1}^2 + 200 + 10P_{G_2} + \\
+ 0,005P_{G_2}^2 + 240 + 12P_{G_3} + 0,009P_{G_3}^2] \quad (5.40)
\end{aligned}$$

$$P_{12} = 5\theta_1 - 5\theta_2, \quad P_{13} = 5\theta_1 - 5\theta_3, \quad P_{23} = 5\theta_2 - 5\theta_3 \quad (5.41)$$

$$P_{24} = 5\theta_2 - 5\theta_4, \quad P_{34} = 3,3333\theta_3 - 3,3333\theta_4 \quad (5.42)$$

$$P_{G_1} - (10 \cdot \theta_1 - 5 \cdot \theta_2 - 5 \cdot \theta_3) = 0 \quad (5.43)$$

$$P_{G_2} - (-5 \cdot \theta_1 + 15,1 \cdot \theta_2 - 5 \cdot \theta_3 - 5 \cdot \theta_4) - 0,5134 = 0 \quad (5.44)$$

$$P_{G_3} + 0,5134 - 1,5 - (-5 \cdot \theta_1 - 5 \cdot \theta_2 + 13,3333 \cdot \theta_3 - 3,3333 \cdot \theta_4) = 0 \quad (5.45)$$

$$P_{G_4} - 2,5 - (-5 \cdot \theta_2 - 3,3333 \cdot \theta_3 + 8,3333 \cdot \theta_4) = 0 \quad (5.46)$$

$$0,5 \leq P_{G_1} \leq 4, \quad 0,5 \leq P_{G_2} \leq 3,5, \quad 0 \leq P_{G_3} \leq 0, \quad 0,5 \leq P_{G_4} \leq 3,5 \quad (5.47)$$

$$-0,7 \leq P_{12} \leq 0,7, \quad -1 \leq P_{13} \leq 1, \quad -1 \leq P_{23} \leq 1 \quad (5.48)$$

$$-1,5 \leq P_{24} \leq 1,5, \quad -0,7 \leq P_{34} \leq 0,7 \quad (5.49)$$

$$-\pi \leq \theta_1 \leq \pi, \quad -\pi \leq \theta_2 \leq \pi, \quad -\pi \leq \theta_3 \leq \pi \quad (5.50)$$

$$-\pi \leq \theta_4 \leq \pi, \quad -\pi \leq \theta_5 \leq \pi \quad (5.51)$$

$$0 \leq U_{23} \leq 1, \quad 0 \leq E_{23} \leq 1,1 \quad (5.52)$$

$$0 \leq \delta_{23} \leq 2\pi, \quad 0 \leq \beta_{23} \leq 2\pi \quad (5.53)$$

όπου στις σχέσεις (5.44) και (5.45) ο παράγοντας 0,5134 είναι η ανά μονάδα τιμή της εγγεόμενης ισχύος στους ζυγούς 2 και 3 από το UPFC.

Το πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου που περιγράφεται από τις παραπάνω εξισώσεις λύθηκε με τη βοήθεια της συνάρτησης quadprog της MATLAB. Ο κώδικας της MATLAB που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στη συνέχεια.

$$r = [70 \ 50 \ 0 \ 90 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T ;$$

$$W=2*\text{diag}(r) ;$$

$$A_{eq} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 5 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 5 & 0 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 3,3333 & -3,3333 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & -5 & -5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 15,1 & -5 & -5 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & -5 & 13,3333 & -3,3333 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & -3,3333 & 8,3333 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} ;$$

$$b_{eq} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0,5134 \ -0,9866 \ -2,5 \ 4]^T ;$$

$$x0=x;$$

$$A=[]; \ b=[];$$

$$\text{options} = \text{optimset}('LargeScale', 'off');$$

$$LB=[0,5 \ 0,5 \ 0 \ 0,5 \ -0,7 \ -1 \ -1 \ -1,5 \ -0,7 \ -\pi \ -\pi \ -\pi \ -\pi]^T ;$$

$$UB=[4 \ 3,5 \ 0 \ 3,5 \ 0,7 \ 1 \ 1 \ 1,5 \ 0,7 \ \pi \ \pi \ \pi \ \pi]^T ;$$

$$c = [1100 \ 1000 \ 0 \ 1200 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T ;$$

$$[Y, FVAL, EXITFLAG, OUTPUT, LAMBDA]=\text{quadprog}(W, c, A, b, Aeq, beq, LB, UB, x0, \text{options});$$

Μετά την εκτέλεση του παραπάνω κώδικα, λύνεται το πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου και προκύπτει το διάνυσμα X των μεταβλητών εξόδου:

$$Y = [P_G \ P_{ij} \ \Theta]^T$$

όπου

$$P_G = [1,0417 \ 2,4583 \ 0 \ 0,5]^T$$

$$P_{ij} = [0,1878 \ 0,8538 \ 0,6663 \ 1,4664 \ 0,5336]^T$$

$$\theta = [0 \ -0,0375 \ -0,1708 \ -0,3308]^T.$$

5.4.4 Υπολογισμός των συντελεστών GSDF ή συντελεστών A

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 4.4.4 της παρούσας εργασίας, οι συντελεστές GSDF (generation shift distribution factors) ή συντελεστές A, μετά την εισαγωγή UPFC στο σύστημα, υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$GSDF_{-me_{l-k,i}} = \frac{S_{-me_{li}} - S_{-me_{ki}}}{x_{-me_{lk}}} \quad (5.54)$$

όπου $x_{-me_{lk}}$ είναι η επαγωγική αντίδραση της γραμμής l-k μετά την εισαγωγή του UPFC, ενώ ο πίνακας S_{-me} υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$S_{-me} = S + M \quad (5.55)$$

όπου ο πίνακας S υπολογίστηκε στην παράγραφο 5.3.4 του παρόντος κεφαλαίου και είναι:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & B_{rd}^{-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1172 & 0,0828 & 0,1034 \\ 0 & 0,0828 & 0,1172 & 0,0966 \\ 0 & 0,1034 & 0,0966 & 0,2207 \end{pmatrix}$$

ενώ ο πίνακας M υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M = -[SU(I + R^T SU)^{-1} R^T S] \quad (5.56)$$

όπου I είναι μοναδιαίος πίνακας κατάλληλων διαστάσεων, ενώ οι πίνακες U και R για το σύστημα των 4 ζυγών και για εισαγωγή UPFC στη γραμμή 2-3 του συστήματος αυτού, δίνονται ως ακολούθως:

$$U = [0 \ 1 \ -1 \ 0]^T$$

$$R = [0 \ -5 \ 5 \ 0]^T.$$

Προκύπτει ότι:

$$S_{-me} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1263 & 0,0737 & 0,1053 \\ 0 & 0,0737 & 0,1263 & 0,0947 \\ 0 & 0,1053 & 0,0947 & 0,2211 \end{pmatrix}.$$

Για παράδειγμα, ο συντελεστής $GSDF_{-me_{1-2,4}}$ του αριθμητικού παραδείγματος που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$GSDF_{-me_{1-2,4}} = \frac{S_{-me_{14}} - S_{-me_{24}}}{x_{-me_{12}}} = \frac{0 - 0,1053}{0,2} = -0,5263.$$

Οι τιμές όλων των συντελεστών A στην περίπτωση εισαγωγής του UPFC στο σύστημα των 4 ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 5.11.

Πίνακας 5.11: A-factors στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
1-2	0	-0,6316	-0,3684	-0,5263
1-3	0	-0,3684	-0,6316	-0,4737
2-3	0	0,2632	-0,2632	0,0526
2-4	0	0,1053	-0,1053	-0,5789
3-4	0	-0,1053	0,1053	-0,4211

5.4.5 Υπολογισμός των συντελεστών GGDF ή συντελεστών D

Οι συντελεστές D, μετά την εισαγωγή UPFC ή SSSC, ορίζονται ως ακολούθως:

$$D_{m-n,i} = D_{m-n,r} + A_{m-n,i} \quad (5.57)$$

$$D_{m-n,r} = \frac{P_{m-n} - \sum_{i=1, i \neq r}^N A_{m-n,i} G_i}{\sum_{i=1}^N G_i} \quad (5.58)$$

όπου το P_{m-n} υπολογίστηκε από τη βέλτιστη ροή φορτίου, οι συντελεστές GSDF ή A υπολογίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο και το διάνυσμα με τις παραγωγές των γεννητριών G_i προκύπτει από τη σχέση:

$G_i = P_G + P_C$ όπου το P_G προέκυψε από τη βέλτιστη ροή φορτίου και το P_C δείχνει την ισχύ που εγχέεται σαν παραγωγή στο ζυγό 3.

Ισχύει:

$$P_C = [0 \quad 0 \quad 0,5134 \quad 0],$$

$$G_i = [1,0417 \quad 2,4583 \quad 0,5134 \quad 0,5].$$

Για παράδειγμα, ο συντελεστής $GGDF_{-me_{1-2,3}}$ του αριθμητικού παραδείγματος που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} GGDF_{-me_{1-2,1}} &= \frac{P_{1-2} - \sum_{i=2}^N GSDF_{-me_{1-2,i}} G_i}{\sum_{i=1}^N G_i} = \\ &= \frac{0,1878 - (-0,6316 \times 2,4583 - 0,3684 \times 0,5134 - 0,5263 \times 0,5)}{1,0417 + 2,4583 + 0,5134 + 0,5} = 0,4858 \end{aligned}$$

Και επομένως:

$$\begin{aligned} GGDF_{-me_{1-2,3}} &= GGDF_{-me_{1-2,1}} + GSDF_{-me_{1-2,3}} = \\ &= 0,4858 - 0,3684 = 0,1174 \end{aligned}$$

Οι τιμές όλων των συντελεστών D στην περίπτωση εισαγωγής του UPFC στο σύστημα των 4 ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 5.12.

Πίνακας 5.12: D-factors στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
1-2	0,4858	-0,1458	0,1174	-0,0405
1-3	0,5142	0,1458	-0,1174	0,0405
2-3	0,0284	0,2915	-0,2348	0,081
2-4	0,3437	0,4489	0,2384	-0,2353
3-4	0,2102	0,1049	0,3155	-0,2108

5.4.6 Συνεισφορά των χρηστών του συστήματος χρησιμοποιώντας του συντελεστές D

Η συνεισφορά της γεννήτριας i στην ροή της γραμμής $m-n$ υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$FG_{-me_{m-n,i}} = GGDF_{-me_{m-n,i}} \times G_i \quad (5.59)$$

Για το αριθμητικό παράδειγμα που παρουσιάζεται στο παρών κεφάλαιο προκύπτει:

$$FG_{me_{1-2,3}} = GGDF_{me_{1-2,3}} \times G_3 = 0,1174 \times (0,5134 pu) \times (100 MVA) = 6,0269 MW$$

Στον Πίνακα 5.13 παρουσιάζεται η συνεισφορά των χρηστών στις ροές των γραμμών βάσει των συντελεστών D στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα.

Πίνακας 5.13: Transmission usage στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	Total
1-2	50,6056	-35,8338	6,0269	-2,0251	18,7737
1-3	53,561	35,8338	-6,0269	2,0251	85,393
2-3	2,9554	71,6677	-12,0539	4,0502	66,6193
2-4	35,8013	110,3682	12,2409	-11,7628	146,6477
3-4	21,8973	25,8004	16,1966	-10,5419	53,3523

5.4.7 Υπολογισμός των συντελεστών GLDF ή συντελεστών C

Οι συντελεστές C, μετά την εισαγωγή UPFC ή SSSC, ορίζονται ως ακολούθως:

$$C_{m-n,j} = C_{m-n,r} - A_{m-n,j} \quad (5.60)$$

$$C_{m-n,r} = \frac{P_{m-n} + \sum_{j=1, j \neq r}^N A_{m-n,j} L_j}{\sum_{j=1}^N L_j} \quad (5.61)$$

όπου το P_{m-n} υπολογίστηκε από τη βέλτιστη ροή φορτίου, οι συντελεστές GSDF ή A υπολογίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο και το διάνυσμα L_j προκύπτει από τη σχέση:

$$L_j = P_{load} + P_1$$

όπου το P_{load} είναι το φορτίο κάθε ζυγού που παρουσιάζεται στον πίνακα 5.2 και το P_1 δείχνει την αρνητικά εγχεόμενη ισχύ στο ζυγό 2. Ισχύει:

$$P_1 = [0 \quad -0,5134 \quad 0 \quad 0],$$

$$L_j = [0 \quad -0,5134 \quad 1,5 \quad 2,5].$$

Για παράδειγμα, ο συντελεστής $GLDF_{me_{1-2,3}}$ του αριθμητικού παραδείγματος που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$GLDF_{me_{1-2,1}} = \frac{P_{1-2} + \sum_{i=2}^N GSDF_{me_{1-2,i}} L_i}{\sum_{i=1}^N L_i} =$$

$$= \frac{0,1878 + (-0,6316 \times (-0,5134) - 0,3684 \times 1,5 - 0,5263 \times 2,5)}{-0,5134 + 1,5 + 2,5} = -0,388999.$$

Και επομένως:

$$GLDF_{me_{1-2,3}} = GLDF_{me_{1-2,1}} - GSDF_{me_{1-2,3}} =$$

$$= -0,388999 - (-0,3684) = -0,0206$$

Οι τιμές όλων των συντελεστών C στην περίπτωση εισαγωγής του UPFC στο σύστημα των 4 ζυγών φαίνονται στον Πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14: C-factors στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
1-2	-0,389	0,2425	-0,0206	0,1373
1-3	-0,3122	0,0562	0,3194	0,1615
2-3	0,0768	-0,1863	0,34	0,0242
2-4	-0,0553	-0,1606	0,0499	0,5236
3-4	-0,0881	0,0172	-0,1934	0,3329

5.4.8 Συνεισφορά των χρηστών του συστήματος χρησιμοποιώντας του συντελεστές C

Η συνεισφορά της φορτίου i στην ροή της γραμμής m-n υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$FL_{me_{m-n,i}} = GLDF_{me_{m-n,i}} \times L_i \quad (5.62)$$

Για το αριθμητικό παράδειγμα που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο προκύπτει:

$$FL_{me_{1-2,3}} = GLDF_{me_{1-2,3}} \times L_3 = -0,0206 \times (1,5 pu) \times (100 MVA) = -3,093 MW.$$

Στον Πίνακα 5.15 παρουσιάζεται η συνεισφορά των χρηστών στις ροές των γραμμών βάσει των συντελεστών C στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα.

Πίνακας 5.15: Transmission usage στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	Total
1-2	0	-12,4519	-3,093	34,3186	18,7737
1-3	0	-2,8866	47,907	40,3721	85,393
2-3	0	9,5653	51,001	6,0535	66,6193
2-4	0	8,2434	7,4937	130,91	146,648
3-4	0	-0,8811	-29,005	83,238	53,3523

5.4.9 Χρέωση παραγωγών και καταναλωτών χρησιμοποιώντας την μέθοδο MW-mile

Το συνολικό ετήσιο κόστος μεταφοράς που πρέπει να επιμεριστεί είναι 180k€. Από αυτό το ποσό, το 30% (54k€) επιβαρύνει τους παραγωγούς και το 70% (126k€) επιβαρύνει τους καταναλωτές. Η χρέωση $TIC_{1-2} \left| FG_{me_{1-2,1}} \right|$ της γεννήτριας G₁ εξαιτίας της γραμμής 1-2 υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$TIC_{1-2} \left| FG_{me_{1-2,1}} \right| = 20 \times |-18,87| = 377,4k€.$$

όπου το TIC_{1-2} είναι το ετήσιο κόστος επένδυσης για τη γραμμή 1-2.

Όμοια υπολογίζονται οι χρεώσεις $TIC_{m-n} \left| FG_{me_{m-n,i}} \right|$ για κάθε γεννήτρια G_i εξαιτίας κάθε γραμμής m-n.

Στο παράδειγμα του παρόντος Κεφαλαίου, οι συνολική χρέωση της γεννήτριας G₁ υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$TCG_{me_{G_1}} = TC_G \frac{\sum_{mn \in K} TIC_{m-n} \left| FG_{me_{m-n,1}} \right|}{\sum_{G_i \in T} \sum_{mn \in K} TIC_{m-n} \left| FG_{me_{m-n,i}} \right|} = 54 \times \frac{5201,874}{19526,99} = 14,38528k€$$

όπου με K συμβολίζεται το σύνολο των 5 γραμμών του συστήματος 4 ζυγών που μελετάται και με T συμβολίζεται το σύνολο των 3 γεννητριών του συστήματος.

Με όμοιο τρόπο, υπολογίζονται οι χρεώσεις για τα φορτία.

Στους Πίνακες 5.16 και 5.17 φαίνονται αντίστοιχα οι χρεώσεις των παραγωγών και των καταναλωτών σε k€ για την περίπτωση χρέωσης 30% στους παραγωγούς και 70% στους καταναλωτές στην περίπτωση εισαγωγής του UPFC στο σύστημα των 4 ζυγών.

Πίνακας 5.16: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 30% στους παραγωγούς μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

number of bus	GGDF(30%-70%)				total
	1	2	3	4	
mw-mile	14,38528	31,4726	5,2499	2,8922	54
unused abs	14,68503	30,7692	5,6851	2,8607	54
unused zcf	17,8365	31,8843	3,0868	1,1925	54
unused reverse	29,8908	24,8801	0,6455	-1,416	54
used abs	16,03793	31,3126	5,7771	2,9902	56,11789
used zcf	16,03793	28,2412	2,8842	0,972	48,13528
used reverse	16,03793	25,1697	-0,0088	-1,046	40,15267
postage stamp	14,0625	33,1875	0	6,75	54

Πίνακας 5.17: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 70% στους καταναλωτές μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

number of bus	GLDF(30%-70%)				total
	1	2	3	4	
mw-mile	0	9,661	44,4661	71,873	126
unused abs	0	12,0961	52,7558	61,1481	126
unused zcf	0	7,6044	48,779	69,6166	126
unused reverse	0	-2,859	39,3751	89,4839	126
used abs	0	9,0311	42,6527	61,7946	113,4783
used zcf	0	5,5562	36,2331	61,7946	103,5839
used reverse	0	2,0814	29,8136	61,7946	93,6896
postage stamp	0	18,5534	54,2075	90,3459	163,1069

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, η ανάγκη για αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος, ικανοποιώντας παράλληλα τους φυσικούς περιορισμούς του συστήματος, έχει συντελέσει στην χρησιμοποίηση ευέλικτων συστημάτων στις γραμμές μεταφοράς. Η εισαγωγή των ευέλικτων συστημάτων στο δίκτυο έχει ως αποτέλεσμα να αλλάζουν οι παράμετροι του συστήματος και η παραγωγή να κατανέμεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος παραγωγής. Με τον τρόπο αυτό, αλλάζουν οι ροές των γραμμών ώστε να μετριαστεί η συμφόρηση και επομένως, μεταβάλλεται η χρησιμοποίηση των γραμμών από τους χρήστες του συστήματος. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να προσδιοριστούν από το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας.

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται περιγραφή του λογισμικού που αναπτύχθηκε για τον επιμερισμό του κόστους μεταφοράς στη περίπτωση χρησιμοποίησης ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς. Το λογισμικό αυτό στηρίχθηκε στο μαθηματικό μοντέλο του προηγούμενου κεφαλαίου και υλοποιήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Επίσης παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον (GUIDE - Graphical User Interface Design Environment) που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής. Τέλος, αναφέρονται πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις του λογισμικού.

6.2 ΛΙΓΑ ΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗ MATLAB

Η επιλογή της γλώσσας MATLAB για την ανάπτυξη του λογισμικού έγινε κυρίως για δύο λόγους:

- Η γλώσσα αυτή είναι ιδιαίτερα εύχρηστη όσον αφορά στη δημιουργία πινάκων και διανυσμάτων και ταυτόχρονα εξασφαλίζει μεγάλη ταχύτητα στις πράξεις μεταξύ πινάκων και διανυσμάτων. Με τον τρόπο αυτό, εξυπηρετεί τις ανάγκες του μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την ανάπτυξη του λογισμικού, δεδομένου ότι αυτό περιλαμβάνει πολλές πράξεις μεταξύ πινάκων και διανυσμάτων.
- Επίσης, πέραν των πολλών άλλων εφαρμογών της, η γλώσσα προγραμματισμού MATLAB παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας γραφικού περιβάλλοντος το οποίο

μπορεί πολύ εύκολα να διαμορφωθεί ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 2010a της MATLAB σε περιβάλλον Windows XP. Οι απαιτήσεις για τη χρησιμοποίηση της συγκεκριμένης έκδοσης ανάλογα με το λειτουργικό σύστημα φαίνονται στους πίνακες 6.1, 6.2 και 6.3 [6.1].

Πίνακας 6.1: Απαιτήσεις συστήματος για εγκατάσταση MATLAB για λειτουργικό σύστημα Windows

Windows

Operating Systems	Processors	Disk Space	RAM
32-Bit MathWorks Products			
Windows XP Service Pack 3	Any Intel or AMD x86 processor supporting SSE2 instruction set*	1 GB for MATLAB only, 3–4 GB for a typical installation	1024 MB (At least 2048 MB recommended)
Windows Server 2003 R2 with Service Pack 2			
Windows Vista Service Pack 1 or 2			
Windows Server 2008 Service Pack 2 or R2			
Windows 7			

Πίνακας 6.2: Απαιτήσεις συστήματος για εγκατάσταση MATLAB για λειτουργικό σύστημα Linux

Linux

Operating Systems	Processors	Disk Space	RAM
32-Bit MathWorks Products			
Qualified distributions*: Ubuntu 8.04, 8.10, 9.04, and 9.10	Any Intel or AMD x86 processor supporting SSE2 instruction set**	1 GB for MATLAB only, 3–4 GB for a typical installation	1024 MB (At least 2048 MB recommended)
Red Hat Enterprise Linux 5.x			
SUSE Linux Enterprise Desktop 11.x			
Debian 5.x			

Πίνακας 6.3: Απαιτήσεις συστήματος για εγκατάσταση MATLAB για λειτουργικό σύστημα Macintosh

Macintosh

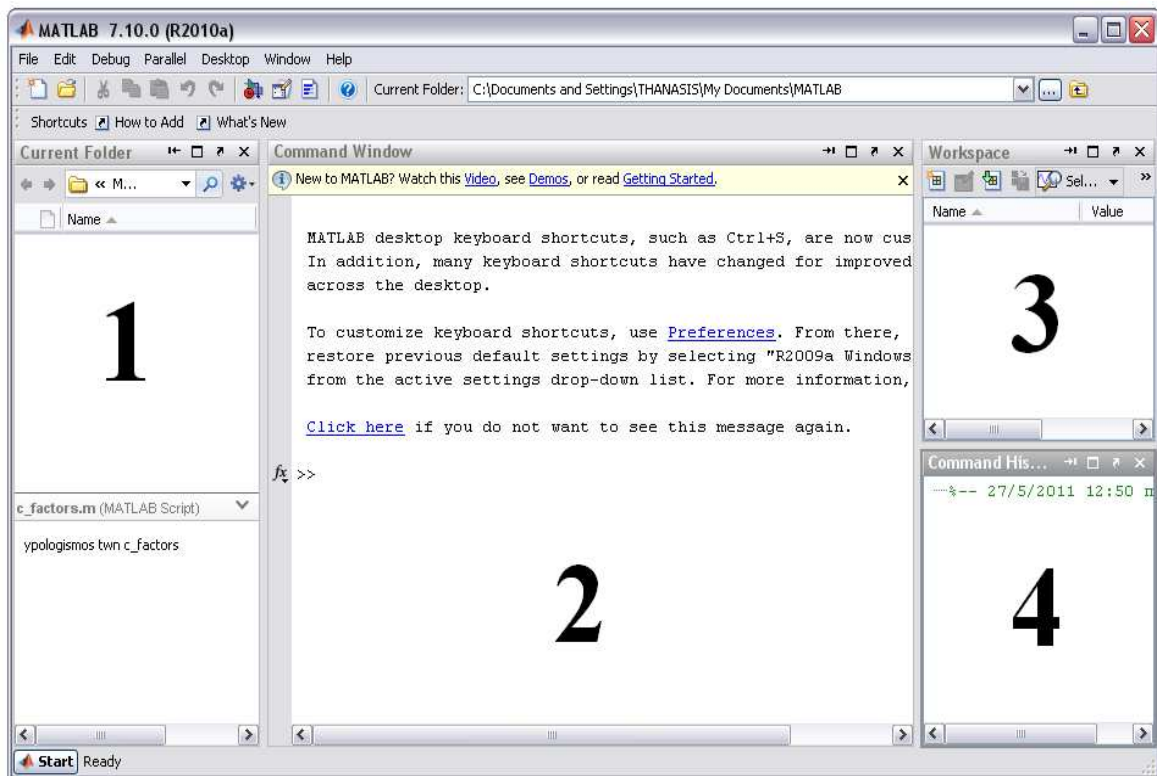
Operating Systems	Processors	Disk Space	RAM
32-Bit MathWorks Products			
Mac OS X 10.5.5 (Leopard) and above	All Intel-based Macs	1 GB for MATLAB only, 3-4 GB for a typical installation	1024 MB (At least 2048 MB recommended)
Mac OS X 10.6.x (Snow Leopard)			

6.2.1 Προγραμματισμός στην MATLAB

Όταν εκκινεί το πρόγραμμα της MATLAB, εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος

6.1. Το παράθυρο αυτό περιλαμβάνει τέσσερις διακριτές μεταξύ τους περιοχές:


1. To Current Folder
2. To Command Window
3. To Workspace
4. To Command History




Σχήμα 6.1: Περιβάλλον της MATLAB

- Το *Current Folder* δείχνει τον τρέχοντα κατάλογο (φάκελο) στον οποίο βρισκόμαστε και αποθηκεύουμε τα αρχεία μας.
- Στο *Command Window* εκτελούνται οι εντολές του χρήστη.
- Στο *Workspace* αποθηκεύονται οι τιμές των μεταβλητών που ορίζει ο χρήστης.
- Το *Command History* περιέχει τις ενέργειες τις ενέργειες που εκτελέστηκαν στο *Command Window*.

Κατά την διάρκεια εργασίας στη MATLAB μπορούν να εμφανιστούν και άλλα παράθυρα, όταν αυτό απαιτείται, όπως παράθυρα κειμένου (document windows), παράθυρα γραφικών (graphics windows) και παράθυρα σύνταξης αρχείων (editing windows).

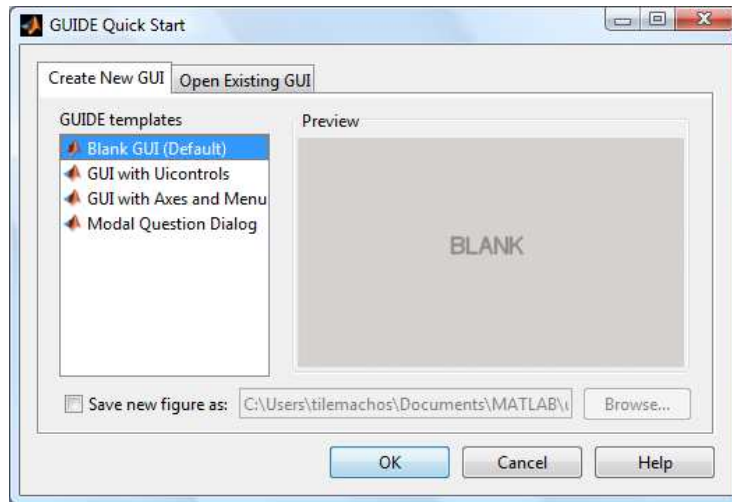
Για να συνταχθεί ένα νέο αρχείο, μπορεί, είτε να πατηθεί το κουμπί  που υπάρχει πάνω αριστερά στο παράθυρο της MATLAB, είτε να επιλεγεί διαδοχικά File→New→Script.

Η εκμάθηση της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB μπορεί να γίνει μέσω της επίσημης ιστοσελίδας της MATLAB (<http://www.mathworks.com>), καθώς και μέσω διάφορων βοηθητικών βιβλίων και οδηγών, μερικά από τα οποία προτείνονται στην βιβλιογραφία του παρόντος κεφαλαίου [6.2]-[6.4]. Επίσης, πολύ σημαντικό εργαλείο είναι το help της MATLAB στο οποίο μπορεί ο χρήστης να αναζητήσει τη σύνταξη οποιασδήποτε εντολής, πληκτρολογώντας στην αναζήτηση μια λέξη-κλειδί. Στο help της MATLAB μπορεί κάποιος να μπει πατώντας απλά το κουμπί  που βρίσκεται πάνω από το παράθυρο εντολών (Command Window).

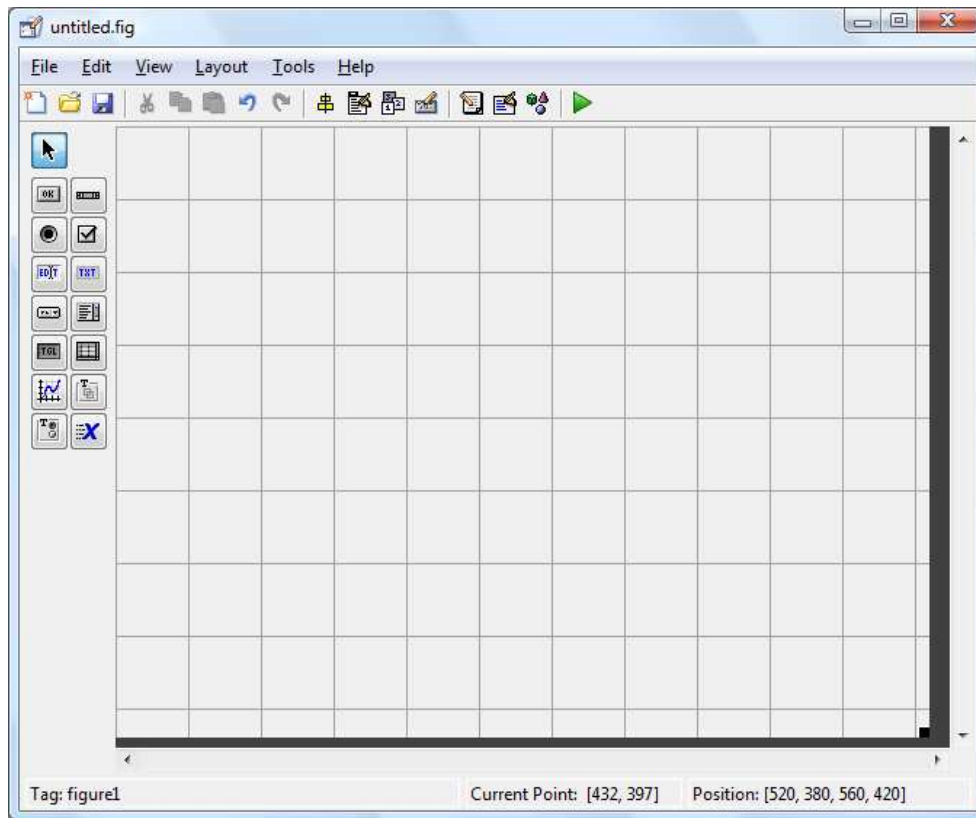
6.2.2 Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (GUI) στην MATLAB

Η MATLAB προσφέρει [6.5]-[6.7] στο χρήστη τη δυνατότητα να κατασκευάσει δικές του γραφικές διεπιφάνειες (GUI). Ο τρόπος δημιουργίας ενός GUI είναι εξαιρετικά απλός, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα εύχρηστη αυτή την εφαρμογή σε πολλές διαφορετικές περιπτώσεις. Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουν τα εργαλεία που προσφέρονται από τη MATLAB για τη δημιουργία των γραφικών διεπιφανειών.

Η εκκίνηση του GUIDE γίνεται εύκολα με δύο τρόπους. Πρώτον, με την κλήση της συνάρτησης `guide` στο παράθυρο εντολών (Command Window) της MATLAB. Δεύτερον, επιλέγοντας από τη γραμμή μενού File→New→GUI. Στη συνέχεια, εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 6.2) που ρωτάει το χρήστη αν θέλει να δημιουργήσει ένα κενό παράθυρο (Blank GUI), ένα παράθυρο βασισμένο σε κάποια πρότυπα ή να ανοίξει ένα έτοιμο παράθυρο. Στη συνέχεια, αν ο χρήστης αφήσει την προεπιλεγμένη επιλογή “Blank GUI”, θα ανοίξει ένα άδειο παράθυρο, στο οποίο μπορεί να δημιουργήσει το δικό του GUI (Σχήμα 6.3).

















Σχήμα 6.2: Αρχικός οδηγός του GUIDE







Σχήμα 6.3: Ένα νέο άδειο παράθυρο για δημιουργία GUI

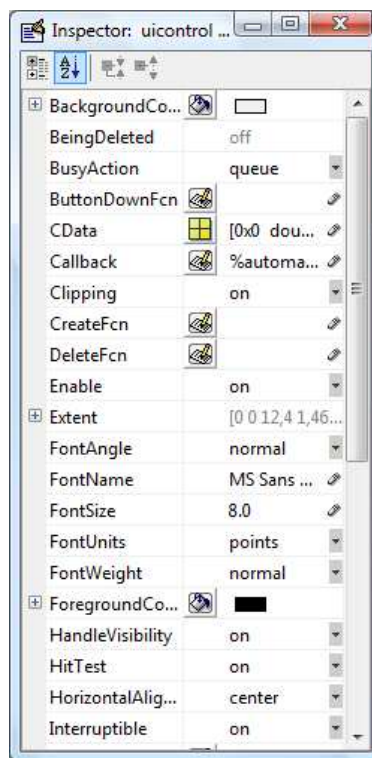
Ύστερα, ο χρήστης μπορεί να δει ότι το περιβάλλον δημιουργίας του παραθύρου αποτελείται από μία κεντρική γραμμή επιλογών, μια γραμμή εργαλείων και μία κάθετη εργαλειοθήκη στα αριστερά. Η γκριζα περιοχή με το πλέγμα, το οποίο καλύπτει το παράθυρο, είναι το φόντο, η ταπετσαρία του παραθύρου.

Η κάθετη εργαλειοθήκη περιέχει 14 αντικείμενα, τα οποία είναι διαθέσιμα στο χρήστη για να διαμορφώσει το γραφικό του περιβάλλον. Αυτά τα αντικείμενα παρουσιάζονται αναλυτικά στην συνέχεια:

1. *Push button*  : ορθογώνιο κουμπί το οποίο εκτελεί μια επιθυμητή λειτουργία εφόσον πατηθεί/ επιλεγεί.
2. *Slider*  : δίνει τη δυνατότητα να μεταβάλει ο χρήστης κάποια μεταβλητή με τη βοήθεια μιας μπάρας μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής. Συνοδεύει κάποιο κείμενο ή γράφημα. Η μπάρα μπορεί να είναι είτε οριζόντια είτε κάθετη.
3. *Radio Button*  : στρογγυλό κουμπί το οποίο δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να πραγματοποιήσει/διαλέξει μόνο μια επιλογή από ένα πλήθος επιλογών. Διαλέγοντας μια, αναιρείται κάποια άλλη.
4. *Check Box*  : δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να διαλέξει μια ή περισσότερες επιλογές.
5. *Edit Text*  : είναι ένα πεδίο στο οποίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει ή να μορφοποιήσει αλφαριθμητικά δεδομένα. Μπορεί να γίνει εισαγωγή κειμένου μονής ή πολλαπλής γραμμής.
6. *Static Text*  : προβάλλει στην οθόνη μια γραμμή κειμένου. Το κείμενο αυτό δε μπορεί να το επεξεργαστεί ο χρήστης του λογισμικού.
7. *Pop-up Menu*  : παρέχει στο χρήστη μια λίστα επιλογών που ανοίγει όταν πατηθεί με το ποντίκι.
8. *List Box*  : παρέχει στο χρήστη μια λίστα ενός ή περισσότερων επιλογών που παραμένει ανοιχτή. Όταν υπάρχουν πολλές επιλογές εμφανίζεται αυτόματα μια μπάρα.
9. *Toggle Button*  : δίνει τη δυνατότητα επιλογής ή όχι μιας λειτουργίας.
10. *Table*  : παρέχει στο χρήστη επιλογές σε μορφή πίνακα.
11. *Axes*  : δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει μια γραφική παράσταση στο παράθυρο.
12. *Panel*  : χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση πολλών στοιχείων ελέγχου.
13. *Button Group*  : είναι σαν το panel αλλά επιδρά αυτόματα στην ομαδοποίηση των radio buttons και toggle buttons.
14. *ActiveX control*  : αντικείμενο ελέγχου ActiveX

Η εισαγωγή των παραπάνω αντικειμένων στο παράθυρο γίνεται με απλό σύρσιμο (drag and drop). Ειδικά τα αντικείμενα push button, radio button, slider, edit text, static text, list box, pop-up menu, check box και toggle button ανήκουν στην κατηγορία των στοιχείων ελέγχου (uicontrols). Ο χρήστης μπορεί να εισάγει όσες φορές θέλει το κάθε αντικείμενο στο

παράθυρο. Μέσω του object browser  βλέπει πόσα και ποια αντικείμενα υπάρχουν στο συγκεκριμένο παράθυρο της εφαρμογής του και επιλέγοντάς τα βλέπει τη θέση τους. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να στοιχίσει κάθετα ή οριζόντια όποια στοιχεία ελέγχου επιθυμεί μέσω του εικονιδίου align objects . Χρησιμοποιώντας τον property inspector (Σχήμα 6.4) μέσω του εικονιδίου  ή με διπλό κλικ ή δεξί κλικ πάνω στο αντικείμενο, μπορεί να καθορίσει ιδιότητες των κουμπιών, όπως το χρώμα του φόντου, τη γραμματοσειρά, το είδος των γραμμάτων, αν είναι ορατό, ενεργό ή όχι ένα στοιχείο, τη θέση του, την ετικέτα του (tag) ή το κείμενο (string) που θα είναι πάνω του κ.α. Αυτές είναι κάποιες από τις κοινές ιδιότητες σε όλα τα στοιχεία ελέγχου που χρησιμοποιούνται περισσότερο. Επιπλέον, με το εικονίδιο  μπορεί να δημιουργήσει γραμμή μενού, το οποίο είναι δυνατόν να περιέχει και υπομενού.



Σχήμα 6.4: Property inspector.

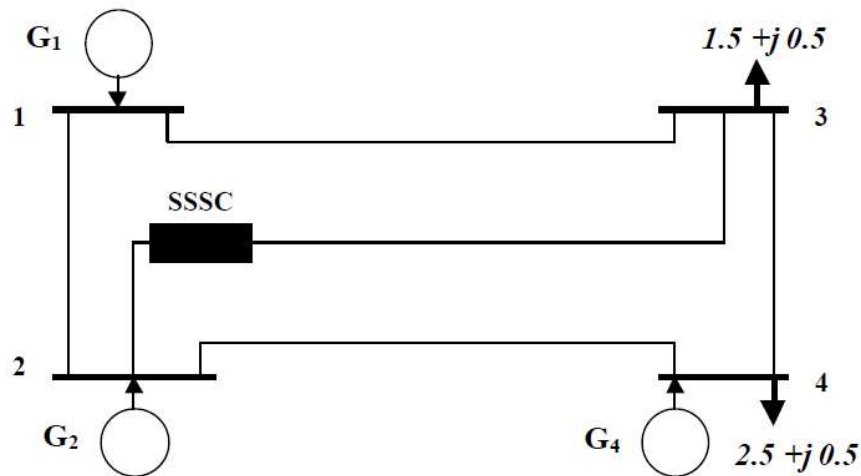
Αφού σχεδιαστεί η μορφή του γραφικού περιβάλλοντος, αποθηκεύεται το αρχείο με μορφή *.fig ενώ ταυτόχρονα δημιουργείται ένα *.m αρχείο, στο οποίο γίνεται ο προγραμματισμός όλων των αντικειμένων που εισήγαγε ο χρήστης στο GUI. Συγκεκριμένα, επιλέγοντας view→M-file Editor ανοίγει ο editor που περιέχει τον κώδικα προγραμματισμού στη MATLAB. Εξαρχής υπάρχει μια έτοιμη μορφή κώδικα με συναρτήσεις (functions) και σχόλια που είναι αποθηκευμένα και εξυπηρετούν το χρήστη. Για κάθε στοιχείο του GUI έχει δημιουργηθεί επίσης μια συνάρτηση την οποία «καλεί» το πρόγραμμα με την επιλογή του αντίστοιχου κουμπιού (callback). Κάτω από κάθε συνάρτηση τοποθετείται ο κώδικας

που προγραμματίζει τη λειτουργία που θα ακολουθεί το GUI με την επιλογή του αντίστοιχου κουμπιού. Τέλος, σημειώνεται ότι οποιαδήποτε στιγμή επιθυμεί ο χρήστης να προσθέσει ή να αφαιρέσει κουμπιά και να επαναπρογραμματίσει το γραφικό περιβάλλον, έχει τη δυνατότητα να το κάνει.

6.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΕΠΙΜΕΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε μπορεί να δεχθεί ως είσοδο τα δεδομένα ενός οποιουδήποτε συστήματος μεταφοράς με N ζυγούς και M γραμμές ανεξαρτήτως της τοπολογίας αυτού. Επιπλέον, το λογισμικό μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην περίπτωση UPFC όσο και σε αυτή του SSSC. Τα δεδομένα του προς μελέτη συστήματος θα πρέπει να έχουν αποθηκευτεί σε ένα αρχείο Excel (*.xls), το οποίο με την σειρά του θα πρέπει να έχει ένα συγκεκριμένο format. Συγκεκριμένα, το Excel αυτό θα πρέπει να περιλαμβάνει τρία φύλλα εργασίας. Στα Σχήματα 6.6-6.8 παρουσιάζεται η δομή την οποία θα πρέπει να έχει το Excel εισόδου στην περίπτωση συστήματος τεσσάρων ζυγών (Σχήμα 6.5).

Επίσης, το λογισμικό που αναπτύχθηκε αποτελείται από 25 αρχεία: 1 fig-αρχείο, 4 αρχεία Excel και 20 m-αρχεία. Ο συνολικός κώδικας που αναπτύχθηκε για τα 20 m-αρχεία είναι 1574 γραμμές. Τα m-αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται στον Πίνακα 6.4. Επιπλέον, τα αρχεία Excel με τα δεδομένα των συστημάτων που μελετήθηκαν φαίνονται στο Πίνακα 6.5.



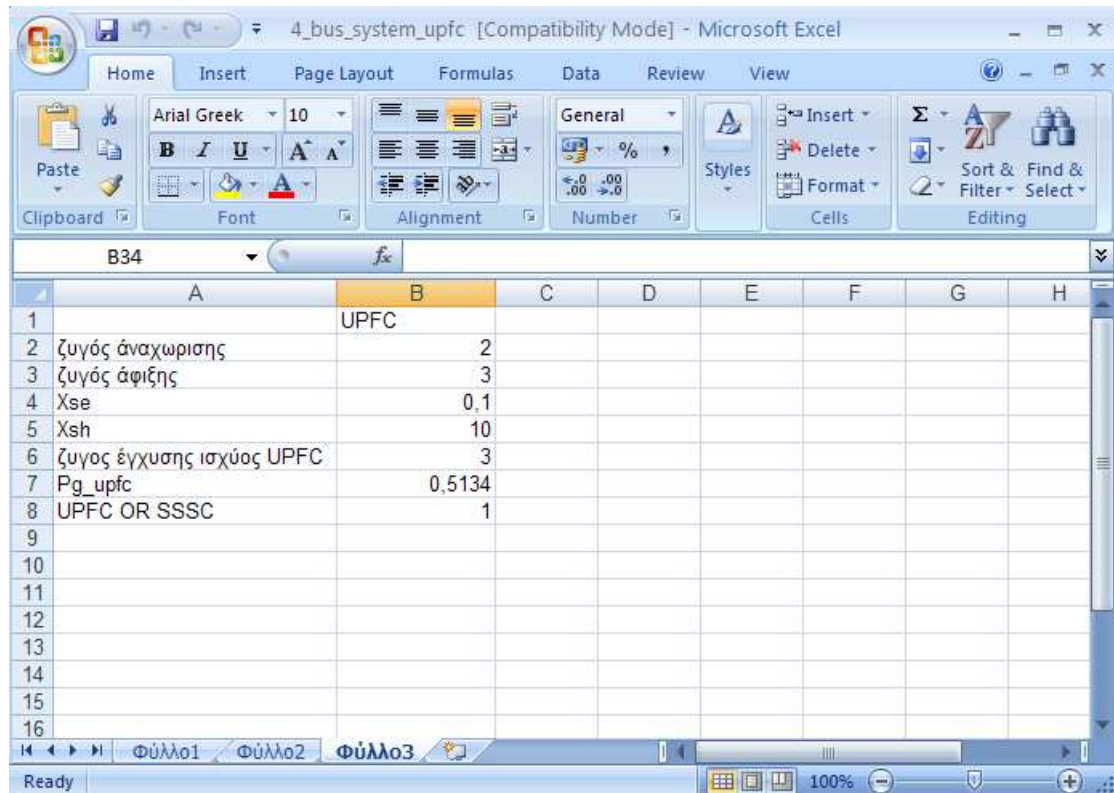
Σχήμα 6.5: Σύστημα τεσσάρων ζυγών στο οποίο έχει εισαχθεί SSSC στην γραμμή 2-3

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	from bus	to bus	x(pu)	fmax(MW)	cost(k€)					
2	1	2	0,2	70	20					
3	1	3	0,2	100	40					
4	2	3	0,1	100	60					
5	2	4	0,2	150	40					
6	3	4	0,3	70	20					

Σχήμα 6.6: Μορφή αρχείου εισόδου Microsoft Excel (φύλλο 1)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	number of bus	Pg min(pu)	Pg max(pu)	Pload(pu)	a(\$)	b(\$/MW)	c(\$/MW^2)	
2	1	0,5	4	0	230	11	0,007	
3	2	0,5	3,5	0	200	10	0,005	
4	3	0	0	1,5	0	0	0	
5	4	0,5	3,5	2,5	240	12	0,009	

Σχήμα 6.7: Μορφή αρχείου εισόδου Microsoft Excel (φύλλο 2)



Σχήμα 6.8: Μορφή αρχείου εισόδου Microsoft Excel (φύλλο 3)

Πίνακας 6.4: Περιγραφή αρχείων m files που αναπτύχθηκαν. Τα αρχεία αυτά συνολικά έχουν 1574 γραμμές κώδικα

A/A	Όνομα αρχείου	Γραμμές κώδικα	Περιγραφή λειτουργίας
1	FACTS_impacts.m	768	Συνολικός κώδικας για να είναι λειτουργικό το γραφικό περιβάλλον.
2	quadprog_case_0.m	35	Βέλτιστη ροή φορτίου στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC.
3	quadprog_case_1_upfc.m	77	Βέλτιστη ροή φορτίου στην περίπτωση χρησιμοποίησης UPFC.
4	quadprog_case_1_sssc.m	69	Βέλτιστη ροή φορτίου στην περίπτωση χρησιμοποίησης SSSC.
5	pinakas_agwgimotitwn_xwris_upfc.m	21	Υπολογισμός πίνακα αγωγιμοτήτων για dc ροή φορτίου στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC.
6	a_factors_xwris_upfc.m	22	Υπολογισμός των συντελεστών GSDF (ή A factors) στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC.

Πίνακας 6.4: Περιγραφή αρχείων m files που αναπτύχθηκαν. Τα αρχεία αυτά συνολικά έχουν 1574 γραμμές κώδικα (συνέχεια)

A/A	Όνομα αρχείου	Γραμμές κώδικα	Περιγραφή λειτουργίας
7	afactors_me_kai_xwris_upfc.m	124	Υπολογισμός των συντελεστών GSDF (ή A factors) στην περίπτωση χρησιμοποίησης UPFC.
8	afactors_me_kai_xwris_sssc.m	116	Υπολογισμός των συντελεστών GSDF (ή A factors) στην περίπτωση χρησιμοποίησης SSSC.
9	d_factors_and_trans_usage_case_0.m	28	Συνεισφορά των παραγωγών στη ροή των γραμμών με χρήση των συντελεστών GGDF (ή d factors) στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC.
10	d_factors_and_trans_usage_case_1.m	32	Συνεισφορά των παραγωγών στη ροή των γραμμών με χρήση των συντελεστών GGDF (ή d factors) στην περίπτωση χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC.
11	c_factors.m	22	Συνεισφορά των καταναλωτών στη ροή των γραμμών με χρήση των συντελεστών GLDF (ή c factors).
12	roi_stis_grammes_me_upfc.m	39	Υπολογισμός dc ροής φορτίου στις γραμμές στην περίπτωση χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC.
13	save_data.m	59	Μεταφορά αποτελεσμάτων σε αρχείο Excel.
14	cost.m	67	Συνάρτηση για υπολογισμό κόστους με χρήση των μεθόδων postage stamp και mw-mile με βάση την αχρησιμοποίητη ικανότητα των γραμμών μεταφοράς.
15	costused.m	34	Συνάρτηση για υπολογισμό κόστους με χρήση της μεθόδου mw-mile με βάση την χρησιμοποιούμενη ικανότητα των γραμμών μεταφοράς.
16	c_factors_case_1.m	25	Συνεισφορά των καταναλωτών στη ροή των γραμμών με χρήση των συντελεστών GLDF (ή c factors) στην περίπτωση χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC.

Πίνακας 6.4: Περιγραφή αρχείων m files που αναπτύχθηκαν. Τα αρχεία αυτά συνολικά έχουν 1574 γραμμές κώδικα (συνέχεια)

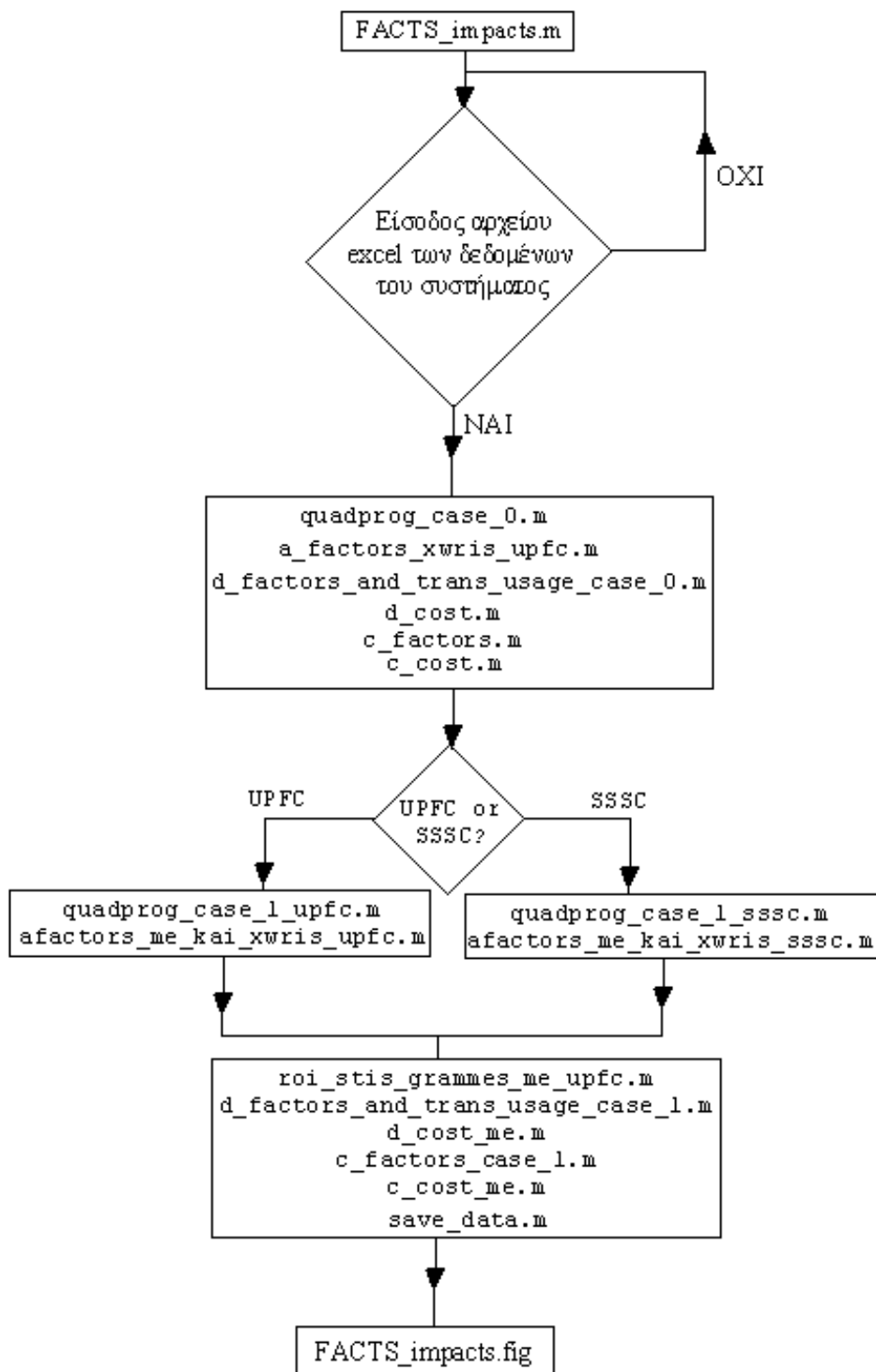
A/A	Όνομα αρχείου	Γραμμές κώδικα	Περιγραφή λειτουργίας
17	d_cost.m	9	Χρέωση παραγωγών για τη ροή που προκαλούν με βάση τους d factors με χρήση των συναρτήσεων cost.m και costused.m.
18	c_cost.m	9	Χρέωση καταναλωτών για τη ροή που προκαλούν με βάση τους c factors με χρήση των συναρτήσεων cost.m και costused.m.
19	c_cost_me.m	9	Χρέωση καταναλωτών για τη ροή που προκαλούν με βάση τους c factors με χρήση των συναρτήσεων cost.m και costused.m στην περίπτωση χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC.
20	d_cost_me.m	9	Χρέωση παραγωγών για τη ροή που προκαλούν με βάση τους d factors με χρήση των συναρτήσεων cost.m και costused.m στην περίπτωση χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC.

Πίνακας 6.5: Περιγραφή αρχείων Excel που αναπτύχθηκαν

A/A	Όνομα αρχείου	Περιγραφή
1	4_bus_system_upfc.xls	Αρχείο με τα δεδομένα του συστήματος των 4 ζυγών στην περίπτωση του UPFC.
2	4_bus_system_sssc.xls	Αρχείο με τα δεδομένα του συστήματος των 4 ζυγών στην περίπτωση του SSSC.
3	14_bus_system_sssc.xls	Αρχείο με τα δεδομένα του συστήματος των 14 ζυγών RTS του IEEE στην περίπτωση του SSSC.
4	14_bus_system_upfc.xls	Αρχείο με τα δεδομένα του συστήματος των 14 ζυγών RTS του IEEE στην περίπτωση του UPFC.

6.3.1 Παρουσίαση αναπτυχθέντος λογισμικού

Για να είναι λειτουργικό το λογισμικό που αναπτύχθηκε, θα πρέπει τα m files που δημιουργήθηκαν να εκτελούνται με συγκεκριμένη σειρά. Συγκεκριμένα, πρώτα γίνεται επεξεργασία των δεδομένων του συστήματος στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC και στη συνέχεια λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις εισαγωγής του ευέλικτου συστήματος μεταφοράς σε κάποια γραμμή του δικτύου. Το ιεραρχικό διάγραμμα των αρχείων του λογισμικού παρουσιάζεται στο σχήμα 6.9.



Σχήμα 6.9: Ιεραρχικό διάγραμμα αρχείων λογισμικού

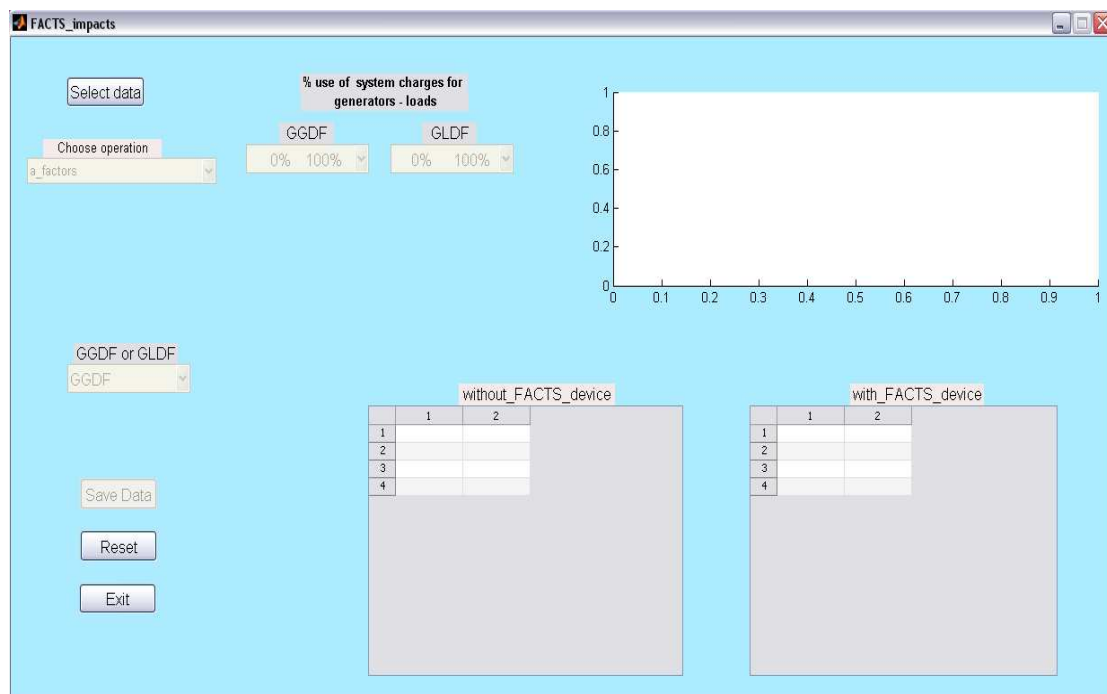
Βάσει αυτού του διαγράμματος, έγινε ο προγραμματισμός του γραφικού περιβάλλοντος, το οποίο δημιουργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας

6.3.2 Παρουσίαση αναπτυχθέντος γραφικού περιβάλλοντος

Το γραφικό περιβάλλον που αναπτύχθηκε ονομάστηκε FACTS_impacts. Τα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ακόλουθα:

- 4 push buttons για την επιλογή δεδομένων, καθαρισμό δεδομένων, αποθήκευση και έξοδο από το πρόγραμμα.
- 8 static texts για εισαγωγή τίτλων.
- 2 tables για εμφάνιση αποτελεσμάτων σε μορφή πίνακα.
- 4 popurmenu, όπου ο χρήστης επιλέγει τα αποτελέσματα που θέλει να εμφανιστούν στα tables και στο γράφημα.
- 1 axes για παρουσίαση των αποτελεσμάτων γραφικά.
- 1 slider για να κάνει zoom στη γραφική παράσταση.

Μετά την εκκίνηση της MATLAB, αφού ο χρήστης δώσει την εντολή FACTS_impacts στο Command Window, εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 6.10. Αρχικά, οι επιλογές που είναι ενεργές στο παράθυρο είναι τα κουμπιά Select Data, Reset και Exit. Το κουμπί Reset είναι ενεργοποιημένο καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας του προγράμματος και χρησιμοποιείται όταν ο χρήστης θέλει να ξαναρχίσει από το αρχικό παράθυρο, επιλέγοντας ένα νέο σύστημα προς μελέτη. Το κουμπί Exit χρησιμοποιείται όταν ο χρήστης επιθυμεί να κλείσει το πρόγραμμα και είναι και αυτό ενεργοποιημένο καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας του προγράμματος. Συγκεκριμένα, αν ο χρήστης πατήσει το κουμπί Exit εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο που τον ρωτάει αν επιθυμεί να κλείσει το πρόγραμμα. Το παράθυρο αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11.

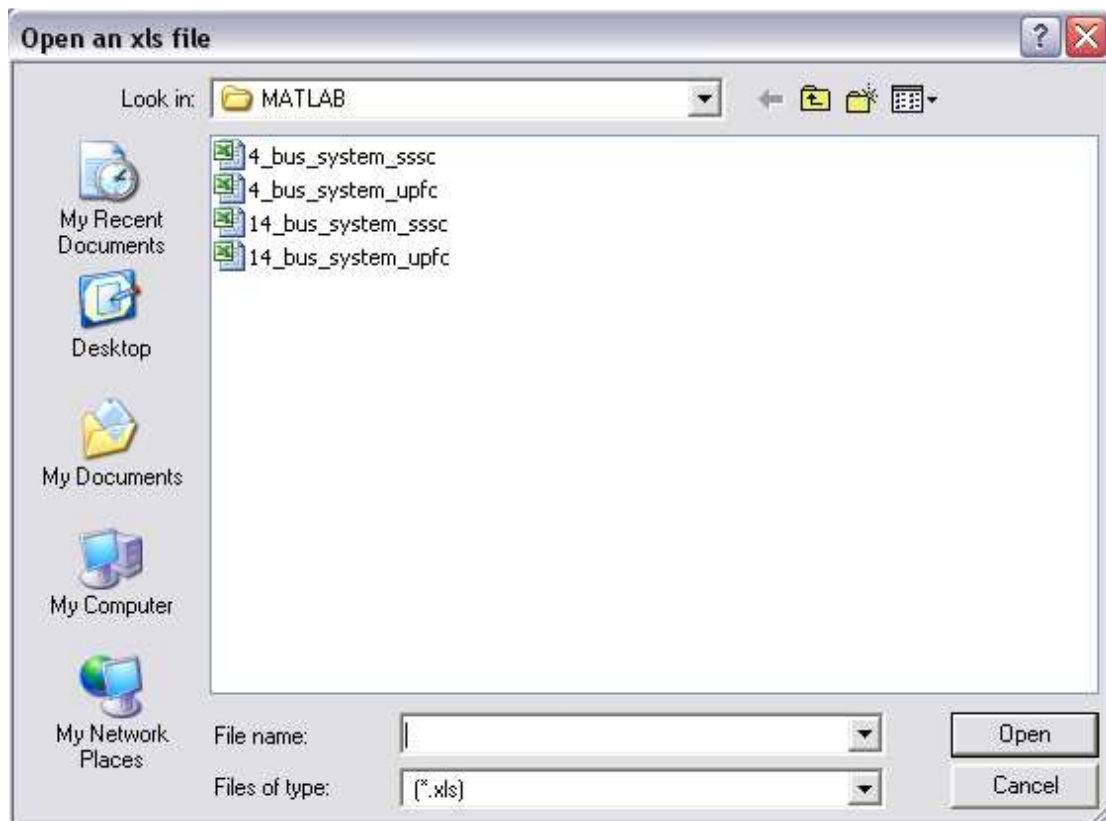


Σχήμα 6.10: Αρχικό παράθυρο του προγράμματος FACTS_impacts



Σχήμα 6.11: Τερματισμός προγράμματος

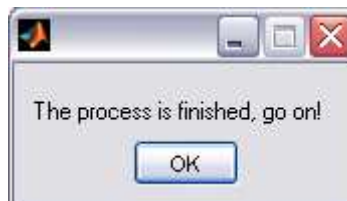
Στην περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει το κουμπί Select Data ανοίγει ένα νέο παράθυρο με τα αρχεία εισόδου (αρχεία Excel) που περιέχουν τα δεδομένα των προς μελέτη συστημάτων. Το παράθυρο αυτό φαίνεται στο Σχήμα 6.12. Αν ο χρήστης επιλέξει “cancel” τότε επιστρέφει στο αρχικό παράθυρο. Αν επιλέξει κάποιο από τα υπάρχοντα αρχεία excel και ακολούθως πατήσει “open” τότε το πρόγραμμα ξεκινάει να επεξεργάζεται τα δεδομένα του συστήματος και ένα παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 6.13) ενημερώνει το χρήστη ότι πρέπει να περιμένει μέχρι να ολοκληρωθεί η επεξεργασία. Μόλις τελειώσει η επεξεργασία των δεδομένων ένα νέο μήνυμα ενημερώνει το χρήστη ότι η διαδικασία ολοκληρώθηκε (Σχήμα 6.14).



Σχήμα 6.12: Παράθυρο επιλογής δεδομένων εισόδου



Σχήμα 6.13: Ενημέρωση του χρήστη ότι γίνεται επεξεργασία των δεδομένων εισόδου



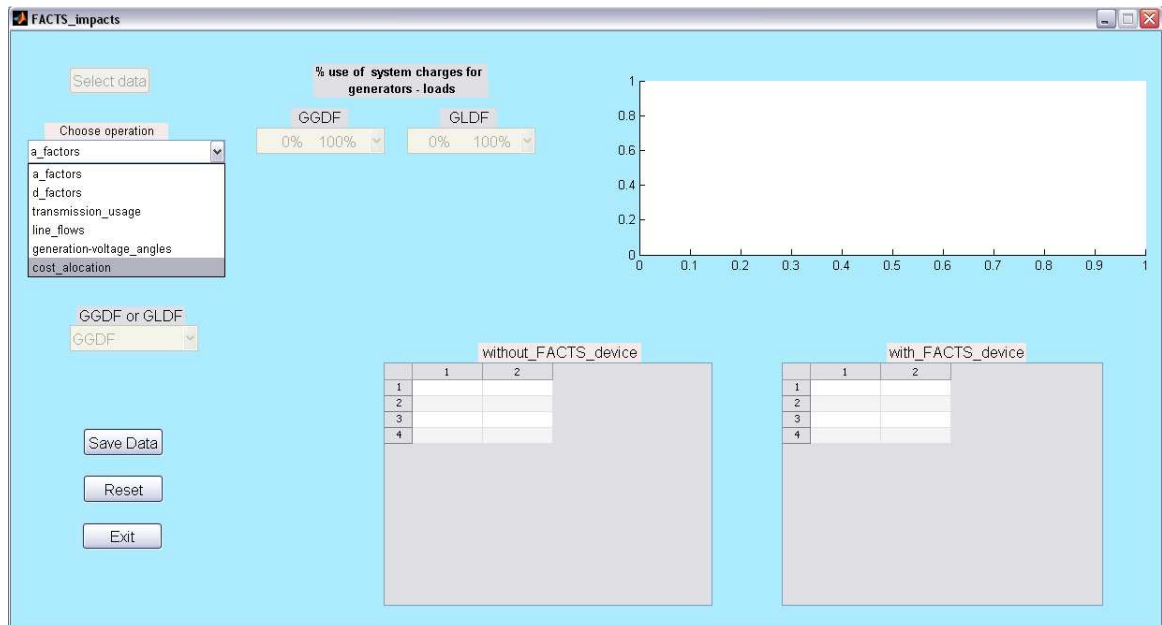
Σχήμα 6.14: Ενημέρωση του χρήστη ότι η επεξεργασία των δεδομένων εισόδου ολοκληρώθηκε

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία ενεργοποιείται ένα εκ των τεσσάρων popurmenu που χρησιμοποιήθηκαν, τα δύο tables, το γράφημα καθώς και το κουμπί Save Data (Σχήμα 6.15). Μέσω του popurmenu που ενεργοποιείται, ο χρήστης μπορεί να διαλέξει τα αποτελέσματα που θέλει να εμφανιστούν στους δύο πίνακες και στο γράφημα. Συγκεκριμένα, υπάρχουν οι ακόλουθες περιπτώσεις:

1. Αν ο χρήστης επιλέξει `a_factors`, εμφανίζονται στους δύο πίνακες, οι οποίοι αντιστοιχούν στις περιπτώσεις χρησιμοποίησης ή όχι UPFC ή SSSC, οι συντελεστές GSDF (ή A factors). Επίσης στο γράφημα γίνεται σύγκριση των συντελεστών GSDF στο ζυγό εισαγωγής του UPFC ή SSSC για τις περιπτώσεις χρησιμοποίησης ή όχι ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα.
2. Αν ο χρήστης επιλέξει `d_factors`, εμφανίζονται στους δύο πίνακες, οι οποίοι αντιστοιχούν στις περιπτώσεις χρησιμοποίησης ή όχι UPFC ή SSSC, οι συντελεστές GSDF (ή D factors). Επίσης στο γράφημα γίνεται σύγκριση των συντελεστών GSDF στο ζυγό εισαγωγής του UPFC ή SSSC για τις περιπτώσεις χρησιμοποίησης ή όχι ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα.
3. Αν ο χρήστης επιλέξει `transmission_usage`, εμφανίζεται στους δύο πίνακες, οι οποίοι αντιστοιχούν στις περιπτώσεις χρησιμοποίησης ή όχι UPFC ή SSSC, η χρησιμοποίηση των γραμμών από τους χρήστες του συστήματος. Επίσης στο γράφημα γίνεται σύγκριση του `transmission_usage` στο ζυγό εισαγωγής του UPFC ή SSSC για τις περιπτώσεις χρησιμοποίησης ή όχι ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα.
4. Αν ο χρήστης επιλέξει `line_flows`, εμφανίζονται στους δύο πίνακες, οι οποίοι αντιστοιχούν στις περιπτώσεις χρησιμοποίησης ή όχι UPFC ή SSSC, οι ροές των γραμμών. Επίσης στο γράφημα γίνεται σύγκριση των `line_flows` στο ζυγό εισαγωγής του UPFC ή SSSC για τις περιπτώσεις χρησιμοποίησης ή όχι ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα.
5. Αν ο χρήστης επιλέξει `generation-voltage_angles`, εμφανίζονται στους δύο πίνακες, οι οποίοι αντιστοιχούν στις περιπτώσεις χρησιμοποίησης ή όχι UPFC ή SSSC, οι βασικές παράμετροι του συστήματος. Επίσης στο γράφημα γίνεται σύγκριση της

παραγωγής και των γωνιών στο ζυγό εισαγωγής του UPFC ή SSSC για τις περιπτώσεις χρησιμοποίησης ή όχι ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα.

6. Αν ο χρήστης επιλέξει `cost_allocation`, εμφανίζεται ένα μήνυμα (Σχήμα 6.16) που ειδοποιεί το χρήστη ότι πρέπει να επιλέξει GGDF ή GLDF, όπου το GGDF αναφέρεται στις χρεώσεις που αφορούν στους παραγωγούς και το GLDF αναφέρεται στις χρεώσεις που αφορούν στους καταναλωτές, ενώ ταυτόχρονα ενεργοποιείται το αντίστοιχο `porupmenu`. Στη συνέχεια, ανάλογα με την επιλογή του χρήστη μεταξύ GGDF ή GLDF εμφανίζεται ένα νέο μήνυμα (Σχήμα 6.17) που ειδοποιεί το χρήστη ότι πρέπει να επιλέξει μεταξύ κάποιων μεθόδων κατανομής του κόστους στους παραγωγούς και στους καταναλωτές και ταυτόχρονα ενεργοποιείται το αντίστοιχο `porupmenu`. Μόλις επιλεγθεί μια από αυτές τις μεθόδους, η διαδικασία επιμερισμού του κόστους μεταφοράς έχει ολοκληρωθεί και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις επιλογές του χρήστη παρουσιάζονται στους δύο πίνακες και στο γράφημα (Σχήμα 6.18).



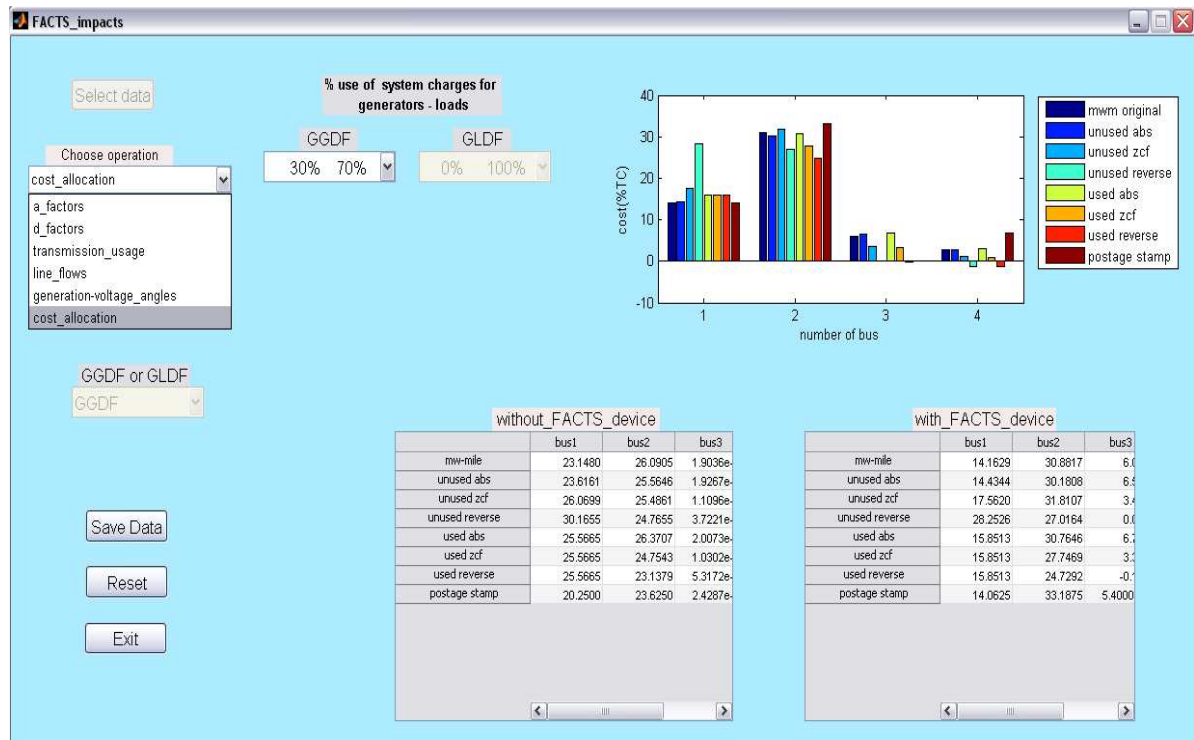
Σχήμα 6.15: Ενεργοποίηση `porupmenu` για επιλογή λειτουργίας του προγράμματος



Σχήμα 6.16: Ενημέρωση του χρήστη για επιλογή μεταξύ GGDF ή GLDF



Σχήμα 6.17: Ενημέρωση του χρήστη για επιλογή μεταξύ των περιπτώσεων κατανομής του κόστους μεταφοράς στους παραγωγούς και στους καταναλωτές



Σχήμα 6.18: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Τέλος με το κουμπί Save Data ο χρήστης έχει τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων από το λογισμικό μέσω της αποθήκευσης των αποτελεσμάτων σε κάποιο εξωτερικό αρχείο Excel. Πατώντας το κουμπί αυτό, ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου όμοιο με αυτό του Σχήματος 6.12, το οποίο ζητά από το χρήστη να δώσει ένα δικό του όνομα σε κάποιο αρχείο Excel στο οποίο θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα των υπολογισμών του προς μελέτη συστήματος. Αν ο χρήστης δώσει ένα δικό του όνομα και πατήσει “save” τότε δημιουργείται ένα νέο αρχείο excel με το όνομα που έδωσε ο χρήστης, το οποίο αποθηκεύεται στο Current Folder της MATLAB. Αν ο χρήστης επιλέξει κάποιο αρχείο από όσα ήδη υπάρχουν, τότε θα ρωτηθεί αν θέλει να αντικαταστήσει το υπάρχον αρχείο ή όχι. Αν επιλέξει “yes” τότε το προηγούμενο αρχείο διαγράφεται και επομένως, αν αυτό περιέχει τα δεδομένα εισόδου ενός συστήματος, αυτά χάνονται. Τέλος, αν ο χρήστης επιλέξει άκυρο, δεν γίνεται αποθήκευση, αλλά επιστροφή στο παράθυρο της εφαρμογής. Οι γραφικές παραστάσεις που εμφανίζονται στο GUI δεν αποθηκεύονται στο αρχείο Excel.

6.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το πρόγραμμα μπορεί να δεχτεί σαν εισόδους και άλλα συστήματα δικτύων, αρκεί τα δεδομένα εισόδου να έχουν αποθηκευτεί σε αρχείο excel με ίδιο format με αυτό που παρουσιάστηκε στην ενότητα 6.3 του παρόντος κεφαλαίου. Επίσης, το λογισμικό μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην περίπτωση UPFC όσο και σε αυτή του SSSC.

Το πρόγραμμα μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικά δίκτυα και να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή πολύτιμων αποτελεσμάτων όσον αφορά στον υπολογισμό των αλλαγών στις παραμέτρους του συστήματος εξαιτίας της εισαγωγής κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς, στον υπολογισμό της ροής των γραμμών, της χρησιμοποίησης των γραμμών του συστήματος από τους χρήστες του αλλά και στον επιμερισμό του κόστους μεταφοράς.

Το λογισμικό που κατασκευάστηκε μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα, ώστε να εκτελεί κάποια/ες από τις παρακάτω λειτουργίες:

1. Να συνυπολογίζει τις απώλειες (στο μαθηματικό μοντέλο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η γραμμή μεταφοράς θεωρήθηκε χωρίς απώλειες).
2. Να εφαρμόζει ac ροές φορτίου ή ac βέλτιστες ροές φορτίου (OPF).
3. Να δέχεται και άλλα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς εκτός του UPFC και του SSSC.
4. Να υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής ευέλικτων συστημάτων σε περισσότερες από μια γραμμές του συστήματος.
5. Να εξάγει συμπεράσματα για την ταχύτητα απόκρισης του UPFC και του SSSC στις δυναμικές ταλαντώσεις καθώς και για την επίδρασή τους στην ευστάθεια του συστήματος.

6.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] "MathWorks – MATLAB and Simulink Student Version – Release 2010a," [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.mathworks.com/support/sysreq/sv-r2010a/>, προσπελάστηκε τον Ιούλιο 2011.
- [6.2] A. Gilat, *MATLAB: an introduction with applications*. Wiley, 2008.
- [6.3] A. Gilat, V. Subramaniam, *Numerical Methods with MATLAB*. John Wiley & Sons, 2010.
- [6.4] Γ. Γεωργίου, Χ. Ξενοφώντος, *Εισαγωγή στη MATLAB*. Λευκωσία, 2007.
- [6.5] S. T. Smith, *MATLAB: advanced GUI development*. Dogearpublishing, 2006.
- [6.6] Δ. Βαρσάμης, "MATLAB - Graphical User Interfaces," [Online]. Διαθέσιμο: http://teiserron.gr/index.php?topic=1531.0;prev_next=prev, προσπελάστηκε τον Ιούλιο 2011.
- [6.7] Κ. Διαμαντάρας, "Εργαστηριακές ασκήσεις νευρωνικών δικτύων και σύντομο εγχειρίδιο MATLAB," [Online]. Διαθέσιμο: http://aetos.it.teithe.gr/~kdiamant/Neural/Matlab_Ref@26_3_2008.pdf, προσπελάστηκε τον Ιούλιο 2011.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

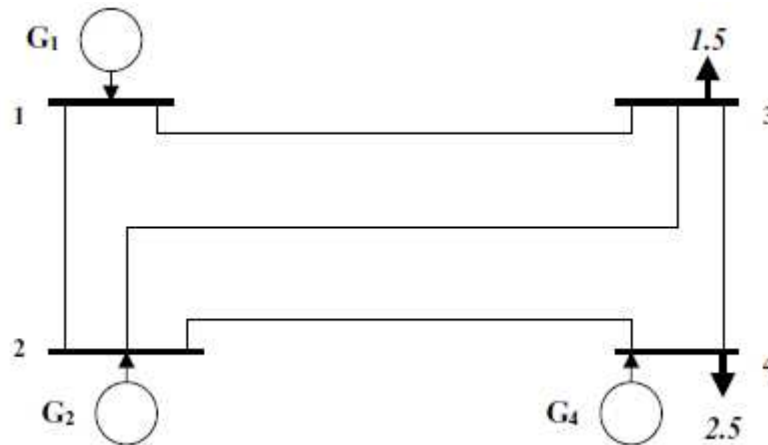
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόγραμμα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6 εφαρμόστηκε αρχικά σε σύστημα 4 ζυγών και στη συνέχεια στο σύστημα των 14 ζυγών RTS του IEEE. Σε κάθε σύστημα μελετήθηκαν διαδοχικά οι περιπτώσεις εισαγωγής UPFC και SSSC. Τα αποτελέσματα δείχνουν πώς μεταβάλλονται οι ροές των γραμμών και η χρησιμοποίηση του δικτύου καθώς και πώς επιμερίζεται το κόστος μεταφοράς στους χρήστες του συστήματος για τις περιπτώσεις πριν και μετά την εισαγωγή κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα των δύο συστημάτων, τα αποτελέσματα του προγράμματος για τα δύο συστήματα καθώς και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

7.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ 4 ΖΥΓΩΝ

7.2.1 Δεδομένα του συστήματος

Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζεται η τοπολογία του συστήματος 4 ζυγών, το οποίο μελετήθηκε αρχικά μέσω του αναπτυχθέντος λογισμικού. Επίσης, στους Πίνακες 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται τα δεδομένα αυτού του συστήματος [7.1]. Τα δεδομένα αυτά καταχωρήθηκαν σε αρχείο Microsoft Excel, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και στη συνέχεια επιλέχθηκαν ως είσοδος στο πρόγραμμα. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα δεδομένα των γραμμών του συστήματος. Στην πρώτη στήλη του πίνακα υπάρχει ένας αύξων αριθμός που δείχνει την γραμμή στην οποία γίνεται αναφορά (*number of line*), στη δεύτερη και στην τρίτη στήλη φαίνεται αντίστοιχα ο ζυγός αναχώρησης (*from bus*) και τερματισμού (*to bus*) της γραμμής, στην τέταρτη στήλη υπάρχει η επαγωγική αντίδραση της κάθε γραμμής ($x(pu)$), ενώ η τελευταία στήλη παρουσιάζει το μέγιστο όριο ενεργού ισχύος που μπορεί να αντέξει η κάθε γραμμή ($fmax(MW)$). Στον πίνακα 7.2 παρατίθενται τα δεδομένα των ζυγών του συστήματος. Στην πρώτη στήλη του πίνακα υπάρχει ένας αύξων αριθμός που δείχνει τον ζυγό στον οποίο γίνεται αναφορά (*number of bus*), στη δεύτερη και στην τρίτη στήλη φαίνεται αντίστοιχα η ελάχιστη ($Pgmin(pu)$) και η μέγιστη ($Pgmax(pu)$) παραγωγή που μπορεί να έχει κάθε ζυγός, στην τέταρτη στήλη απεικονίζεται η ζήτηση φορτίου ($Pload(pu)$) σε κάθε ζυγό, ενώ στις τρεις τελευταίες στήλες παρουσιάζονται οι συντελεστές της συνάρτησης κόστους παραγωγής κάθε γεννήτριας ($a(\$/), b(\$/MW), c(\$/MW^2)$).



Σχήμα 7.1: Σύστημα 4 ζυγών

Πίνακας 7.1: Δεδομένα γραμμών του συστήματος 4 ζυγών

number of line	from bus	to bus	x (pu)	Fmax (MW)	cost (k€)
1	1	2	0,2	70	20
2	1	3	0,2	100	40
3	2	3	0,1	100	60
4	2	4	0,2	150	40
5	3	4	0,3	70	20

Πίνακας 7.2: Δεδομένα ζυγών του συστήματος 4 ζυγών

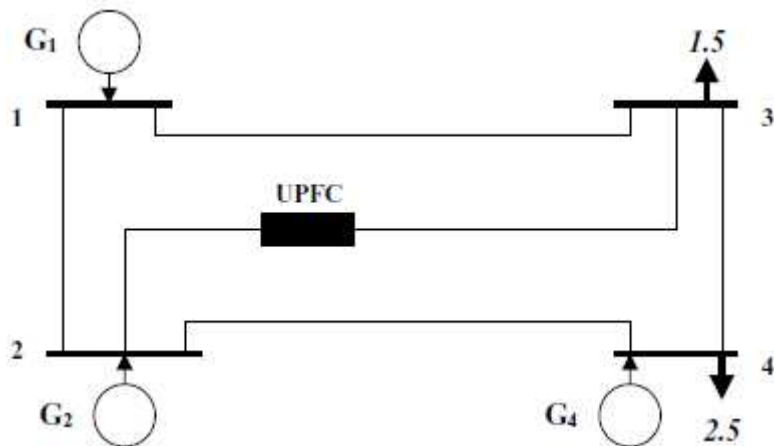
number of bus	Pg min(pu)	Pg max (pu)	Pload(pu)	a(\$)	b(\$/MW)	c(\$/MW ²)
1	0,5	4	0	230	11	0,007
2	0,5	3,5	0	200	10	0,005
3	0	0	1,5	0	0	0
4	0,5	3,5	2,5	240	12	0,009

7.2.2 Αποτελέσματα

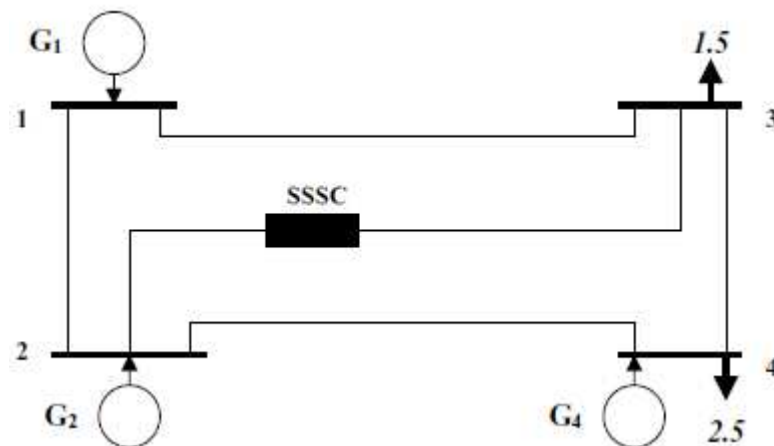
Στο σύστημα των 4 ζυγών που φαίνεται στο σχήμα 7.1 υπάρχουν τρεις παραγωγοί και δύο φορτία. Στο σύστημα αυτό εισήχθησαν διαδοχικά το UPFC και το SSSC στη γραμμή 2-3 κοντά στον ζυγό 2 και μελετήθηκαν οι ακόλουθες τρεις περιπτώσεις:

1. Μη χρησιμοποίηση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα (Σχήμα 7.1)
2. Εισαγωγή UPFC στο σύστημα (Σχήμα 7.2)
3. Εισαγωγή SSSC στο σύστημα (Σχήμα 7.3)

Και στις τρεις περιπτώσεις εφαρμόστηκε βέλτιστη dc ροή φορτίου, στην οποία ως αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής των γεννητριών. Επίσης οι γραμμές μεταφοράς θεωρήθηκαν χωρίς απώλειες, ενώ ως βάση ισχύος θεωρήθηκαν τα 100MW ($S_B=100\text{MW}$).



Σχήμα 7.2: Σύστημα 4 ζυγών με χρήση UPFC



Σχήμα 7.3: Σύστημα 4 ζυγών με χρήση SSSC

Στους Πίνακες 7.3 και 7.4 παρουσιάζονται τα δεδομένα του UPFC και του SSSC αντίστοιχα για την περίπτωση χρησιμοποίησής τους στο σύστημα 4 ζυγών που μελετήθηκε [7.2], [7.3]. Στην πρώτη και στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 7.3 φαίνεται αντίστοιχα ο ζυγός αναχώρησης (ζυγός αναχώρησης) και τερματισμού (ζυγός άφιξης) της γραμμής στην οποία έχει εισαχθεί το UPFC, στην τρίτη και την τέταρτη στήλη υπάρχουν αντίστοιχα η εν σειρά (X_{se} (pu)) και η εγκάρσια (X_{sh} (pu)) επαγωγική αντίδραση που αναφέρεται στο UPFC, η πέμπτη στήλη αναφέρεται στο ζυγό στον οποίο αποδίδεται ως παραγωγή (θετική έγχυση) η εγχεόμενη ισχύς του UPFC (ζυγός έγχυσης ισχύος από το UPFC) και η τελευταία στήλη παρουσιάζει την τιμή ανά μονάδα της ισχύος αυτής (P_{g_upfc} (pu)).

Πίνακας 7.3: Δεδομένα UPFC

ζυγός αναχώρησης	ζυγός άφιξης	X_{se} (pu)	X_{sh} (pu)	ζυγός έγχυσης ισχύος από το UPFC	P_{g_upfc} (pu)
2	3	0,1	10	3	0,5134

Όμοια, στην πρώτη και στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 7.4 φαίνεται αντίστοιχα ο ζυγός αναχώρησης (ζυγός αναχώρησης) και τερματισμού (ζυγός άφιξης) της γραμμής στην οποία έχει εισαχθεί το SSSC, στην τρίτη στήλη υπάρχει η εν σειρά (X_{se} (pu)) επαγωγική αντίδραση που αναφέρεται στο SSSC, η τέταρτη στήλη αναφέρεται στο ζυγό στον οποίο αποδίδεται ως παραγωγή (θετική έγχυση) η εγχεόμενη ισχύς του SSSC (ζυγός έγχυσης ισχύος από το SSSC) και η τελευταία στήλη παρουσιάζει την τιμή ανά μονάδα της ισχύος αυτής (P_{g_SSSC} (pu)).

Πίνακας 7.4: Δεδομένα SSSC

ζυγός αναχώρησης	ζυγός άφιξης	X_{se} (pu)	ζυγός έγχυσης ισχύος από το SSSC	P_{g_sssc} (pu)
2	3	0,1	3	0,5938

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προγράμματος για καθεμία από τις τρεις περιπτώσεις που αναφέραμε προηγουμένως. Να σημειωθεί ότι ο δείκτης ⁰ αναφέρεται στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα, ο δείκτης ¹ αναφέρεται στην περίπτωση που έχει εισαχθεί UPFC στο σύστημα, ενώ ο δείκτης ² αναφέρεται στην περίπτωση που έχει εισαχθεί SSSC στο σύστημα.

7.2.2.1 Βασικές παράμετροι του συστήματος

Στους Πίνακες 7.5 και 7.6 παρουσιάζονται οι μεταβολές των βασικών παραμέτρων του συστήματος λόγω της εισαγωγής UPFC ή SSSC στη γραμμή μεταφοράς 2-3.

Συγκεκριμένα, στην πρώτη γραμμή του Πίνακα 7.5 παρουσιάζεται η παραγωγή κάθε ζυγού στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα. Η δεύτερη γραμμή του ίδιου πίνακα αναφέρεται στην παραγωγή κάθε ζυγού στην περίπτωση που έχει εισαχθεί UPFC στο σύστημα. Στην τρίτη και στην τέταρτη γραμμή φαίνεται αντίστοιχα η μεταβολή της παραγωγής λόγω της χρησιμοποίησης του UPFC και η εγχεόμενη ισχύς του UPFC σε κάθε ζυγό. Τέλος, στις τρεις τελευταίες γραμμές παρουσιάζονται τα ίδια μεγέθη για την περίπτωση χρησιμοποίησης του SSSC.

Πίνακας 7.5: Παραγωγή γεννητριών, μεταβολή στην παραγωγή, παραγωγή UPFC και SSSC

	G_1	G_2	G_3	G_4
P_G^0	1,5	1,75	0	0,75
P_G^1	1,0417	2,4583	0	0,5
ΔP_G^1	-0,4583	0,7083	0	-0,25
ΔP_C^1	0	-0,5134	0,5134	0
P_G^2	1,0417	2,4583	0	0,5
ΔP_G^2	-0,4583	0,7083	0	-0,25
ΔP_C^2	0	-0,5938	0,5938	0

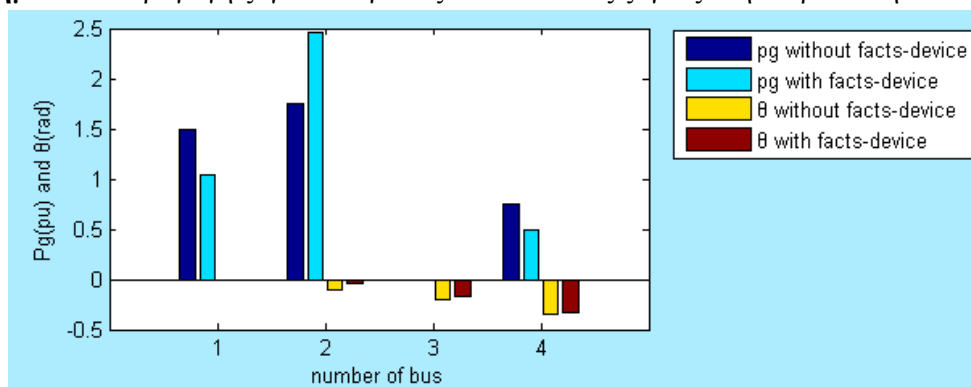
Στον Πίνακα 7.6 παρουσιάζονται οι γωνίες των τάσεων στους ζυγούς και οι μεταβολές των γωνιών αυτών λόγω της εισαγωγής UPFC ή SSSC στο σύστημα. Συγκεκριμένα, στην πρώτη γραμμή του Πίνακα 7.6 φαίνεται η γωνία της τάσης κάθε ζυγού στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα. Η δεύτερη γραμμή του ίδιου πίνακα δείχνει τις γωνίες των τάσεων στους ζυγούς στην περίπτωση που έχει εισαχθεί UPFC στο σύστημα. Στην τρίτη γραμμή παρουσιάζεται η μεταβολή στις γωνίες των τάσεων των ζυγών λόγω της χρησιμοποίησης του UPFC. Στην τέταρτη, στην πέμπτη και στην έκτη γραμμή φαίνονται οι τρεις παράμετροι στις οποίες διακρίνεται η μεταβολή στις γωνίες των τάσεων όπως αυτές αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4 στις σχέσεις (4.104), (4.105) και (4.106). Τέλος, στις πέντε τελευταίες γραμμές παρουσιάζονται τα ίδια μεγέθη για την περίπτωση χρησιμοποίησης του SSSC.

Πίνακας 7.6: Γωνίες τάσεων στους ζυγούς και μεταβολή στις γωνίες σε rad

	G_1	G_2	G_3	G_4
θ^0	0	-0,1	-0,2	-0,35
θ^1	0	-0,0376	-0,1708	-0,3308
$\Delta\theta^1$	0	0,0625	0,0292	0,0192
$\Delta\theta_G^1$	0	0,0632	0,0285	0,0193
$\Delta\theta_M^1$	0	0,0263	-0,0263	0,0053
$\Delta\theta_C^1$	0	-0,027	0,027	-0,0054
θ^2	0	-0,0418	-0,1666	-0,3317
$\Delta\theta^2$	0	0,0582	0,0334	0,0183
$\Delta\theta_G^2$	0	0,0632	0,0285	0,0193
$\Delta\theta_M^2$	0	0,0263	-0,0263	0,0053
$\Delta\theta_C^2$	0	-0,0313	0,0313	-0,0063

Στο σχήμα 7.4 παρατίθεται το γράφημα που δείχνει σχηματικά τη μεταβολή της παραγωγής των γεννητριών και των γωνιών των τάσεων στους ζυγούς στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα. Να σημειωθεί ότι δεν παρατίθεται το αντίστοιχο γράφημα για την περίπτωση του SSSC καθώς οι διαφορές του με το γράφημα που αναφέρεται στο UPFC είναι μικρές και δεν μπορούν να φανούν σχηματικά. Το γράφημα αυτό ελήφθη από το αναπτυχθέν λογισμικό.

Σχήμα 7.4: Παραγωγή ζυγών και γωνίες τάσεων στους ζυγούς στην περίπτωση του UPFC



7.2.2.2 Ροές ισχύος στις γραμμές του συστήματος και μεταβολή τους λόγω χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC

Στους Πίνακες 7.7 και 7.8 παρουσιάζονται οι ροές των γραμμών του συστήματος για τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα στην πρώτη στήλη του Πίνακα 7.7 φαίνεται η γραμμή στην οποία αναφερόμαστε. Στη δεύτερη στήλη του ίδιου πίνακα φαίνεται το όριο ισχύος που μπορεί να αντέξει κάθε γραμμή ενώ στην τρίτη στήλη παρουσιάζεται η ροή ισχύος στην περίπτωση που δεν γίνεται χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς. Η τέταρτη και η πέμπτη στήλη δείχνουν αντίστοιχα τη ροή στις γραμμές και τη μεταβολή στη ροή λόγω της εισαγωγής του UPFC στο σύστημα. Στις τρεις επόμενες στήλες φαίνονται οι τρεις παράμετροι στις οποίες διακρίνεται η μεταβολή στις ροές των γραμμών όπως αυτές αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4 στις σχέσεις (4.114), (4.115) και (4.116). Αντίστοιχα, στον πίνακα 7.8 παρουσιάζονται τα ίδια μεγέθη για την περίπτωση χρησιμοποίησης του SSSC. Να σημειώσουμε ότι και στους δύο πίνακες χρησιμοποιείται ως μονάδα ισχύος το MW.

Πίνακας 7.7: Ροές ισχύος στις γραμμές και μεταβολή τους λόγω εισαγωγής του UPFC

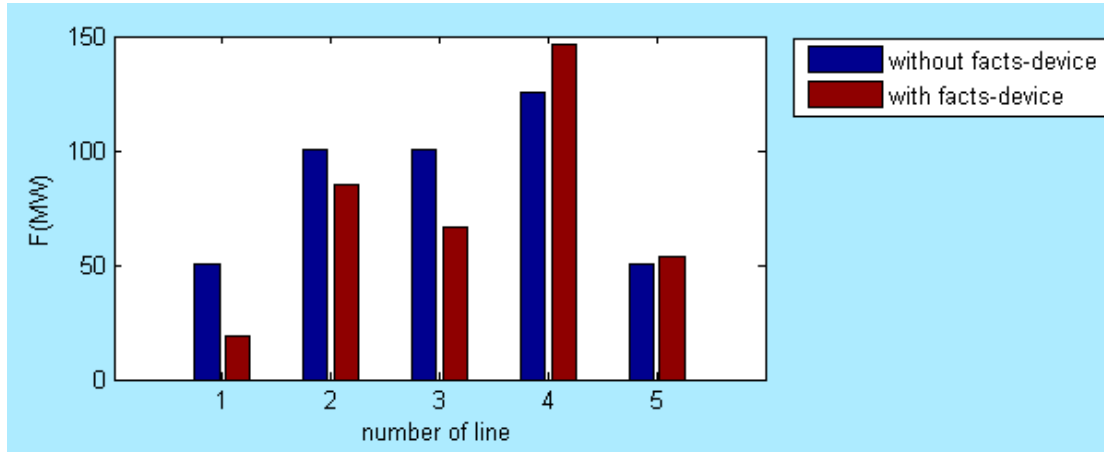
line	Limit	F^0 (MW)	F^1 (MW)	ΔF^1 (MW)	ΔF_M^1 (MW)	ΔF_G^1 (MW)	ΔF_C^1 (MW)
1-2	70	50	18,7737	-31,2263	-13,1579	-31,5789	13,5105
1-3	100	100	85,393	-14,607	13,1579	-14,2544	-13,5105
2-3	100	100	66,6193	-33,3807	-23,6842	17,3246	-27,0211
2-4	150	125	146,6477	21,6477	10,5263	21,9298	-10,8084
3-4	70	50	53,3523	3,3523	-10,5263	3,0702	10,8084

Πίνακας 7.8: Ροές ισχύος στις γραμμές και μεταβολή τους λόγω εισαγωγής του SSSC

line	Limit	F^0 (MW)	F^2 (MW)	ΔF^2 (MW)	ΔF_M^2 (MW)	ΔF_G^2 (MW)	ΔF_C^2 (MW)
1-2	70	50	20,88947	-29,1105	-13,1579	-31,5789	15,62632
1-3	100	100	83,27719	-16,7228	13,15789	-14,2544	-15,6263
2-3	100	100	62,38772	-37,6123	-23,6842	17,32456	-31,2526
2-4	150	125	144,9551	19,95509	10,52632	21,92982	-12,5011
3-4	70	50	55,04491	5,044912	-10,5263	3,070175	12,50105

Στο σχήμα 7.5 παρατίθεται το γράφημα που δείχνει σχηματικά τη μεταβολή των ροών στις γραμμές στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα. Να σημειωθεί ότι δεν παρατίθεται το αντίστοιχο διάγραμμα για την περίπτωση του SSSC καθώς οι διαφορές του με το γράφημα που αναφέρεται στο UPFC είναι μικρές και δεν μπορούν να φανούν σχηματικά. Το γράφημα αυτό ελήφθη από το αναπτυχθέν λογισμικό.

Σχήμα 7.5: Ροή ισχύος στις γραμμές του συστήματος στην περίπτωση του UPFC



7.2.2.3 A-factors

Στους Πίνακες 7.9, 7.10 και 7.11 παρουσιάζονται οι A-factors του συστήματος για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Οι τιμές που σημειώνονται σε αυτούς τους πίνακες είναι ανά μονάδα.

Πίνακας 7.9: A-factors στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G_1	G_2	G_3	G_4
1-2	0	-0,5862	-0,4138	-0,5172
1-3	0	-0,4138	-0,5862	-0,4828
2-3	0	0,3448	-0,3448	0,069
2-4	0	0,069	-0,069	-0,5862
3-4	0	-0,069	0,069	-0,4138

Πίνακας 7.10: A-factors στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

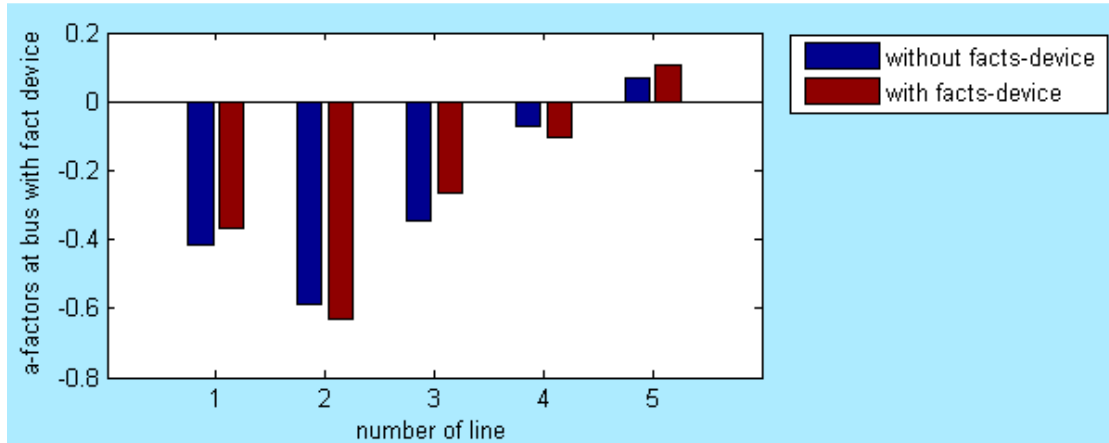
line	G_1	G_2	G_3	G_4
1-2	0	-0,6316	-0,3684	-0,5263
1-3	0	-0,3684	-0,6316	-0,4737
2-3	0	0,2632	-0,2632	0,0526
2-4	0	0,1053	-0,1053	-0,5789
3-4	0	-0,1053	0,1053	-0,4211

Πίνακας 7.11: A-factors στην περίπτωση εισαγωγής SSSC στο σύστημα

line	G_1	G_2	G_3	G_4
1-2	0	-0,6316	-0,3684	-0,5263
1-3	0	-0,3684	-0,6316	-0,4737
2-3	0	0,2632	-0,2632	0,0526
2-4	0	0,1053	-0,1053	-0,5789
3-4	0	-0,1053	0,1053	-0,4211

Στο σχήμα 7.6 παρατίθεται το γράφημα που δείχνει σχηματικά τη μεταβολή των A-factors του ζυγού κοντά στον οποίο έχει εισαχθεί το UPFC. Να σημειωθεί ότι δεν παρατίθεται το αντίστοιχο διάγραμμα για την περίπτωση του SSSC, καθώς οι διαφορές του με το γράφημα που αναφέρεται στο UPFC είναι μικρές και δεν μπορούν να φανούν σχηματικά. Το γράφημα αυτό ελήφθη από το αναπτυχθέν λογισμικό.

Σχήμα 7.6: A-factors του ζυγού κοντά στον οποίο έχει εισαχθεί UPFC



7.2.2.4 D-factors

Στους Πίνακες 7.12, 7.13 και 7.14 παρουσιάζονται οι D-factors του συστήματος για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Οι τιμές που σημειώνονται σε αυτούς τους πίνακες είναι ανά μονάδα.

Πίνακας 7.12: D-factors στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G_1	G_2	G_3	G_4
1-2	0,4784	-0,1078	0,0647	-0,0388
1-3	0,5215	0,1078	-0,0647	0,0388
2-3	0,0862	0,431	-0,2586	0,1552
2-4	0,3922	0,4612	0,3233	-0,194
3-4	0,2328	0,1638	0,3017	-0,181

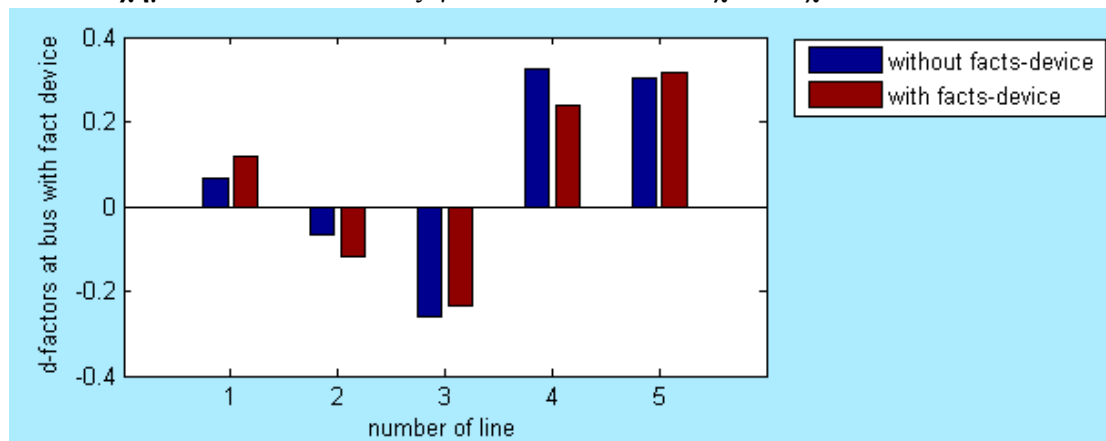
Πίνακας 7.13: D-factors στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G_1	G_2	G_3	G_4
1-2	0,4858	-0,1458	0,1174	-0,0405
1-3	0,5142	0,1458	-0,1174	0,0405
2-3	0,0284	0,2915	-0,2348	0,081
2-4	0,3437	0,4489	0,2384	-0,2353
3-4	0,2102	0,1049	0,3155	-0,2108

Πίνακας 7.14: D-factors στην περίπτωση εισαγωγής SSSC στο σύστημα

line	G_1	G_2	G_3	G_4
1-2	0,4884	-0,1432	0,1199	-0,0379
1-3	0,5116	0,1432	-0,1199	0,0379
2-3	0,0233	0,2864	-0,2399	0,0759
2-4	0,3358	0,4411	0,2306	-0,2431
3-4	0,2084	0,1031	0,3136	-0,2127

Στο σχήμα 7.7 παρατίθεται το γράφημα που δείχνει σχηματικά τη μεταβολή των D-factors του ζυγού κοντά στον οποίο έχει εισαχθεί το UPFC. Να σημειωθεί ότι δεν παρατίθεται το αντίστοιχο διάγραμμα για την περίπτωση του SSSC, καθώς οι διαφορές του με το γράφημα που αναφέρεται στο UPFC είναι μικρές και δεν μπορούν να φανούν σχηματικά. Το γράφημα αυτό ελήφθη από το αναπτυχθέν λογισμικό.

Σχήμα 7.7: D-factors του ζυγού κοντά στον οποίο έχει εισαχθεί UPFC

7.2.2.5 Χρησιμοποίηση του συστήματος από τους χρήστες του λόγω των d-factors (transmission usage based on d-factors)

Στους Πίνακες 7.15, 7.16 και 7.17 παρουσιάζεται η χρησιμοποίηση του συστήματος από τους χρήστες του λόγω των d-factors για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Οι τιμές που σημειώνονται σε αυτούς τους πίνακες είναι σε MW.

Πίνακας 7.15: Transmission usage στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G_1	G_2	G_3	G_4	Total
1-2	71,7672	-18,8578	0	-2,9095	50
1-3	78,2328	18,8578	0	2,9095	100
2-3	12,931	75,431	0	11,6379	100
2-4	58,8362	80,7112	0	-14,5474	125
3-4	34,9138	28,6638	0	-13,5776	50

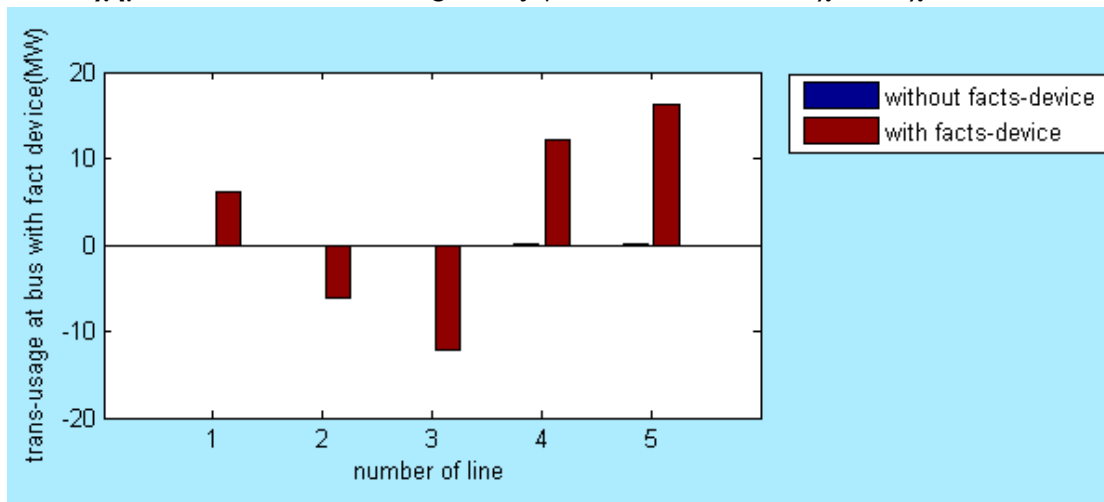
Πίνακας 7.16: Transmission usage στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	Total
1-2	50,6056	-35,8338	6,0269	-2,0251	18,7737
1-3	53,561	35,8338	-6,0269	2,0251	85,393
2-3	2,9554	71,6677	-12,0539	4,0502	66,6193
2-4	35,8013	110,3682	12,2409	-11,7628	146,6477
3-4	21,8973	25,8004	16,1966	-10,5419	53,3523

Πίνακας 7.17: Transmission usage στην περίπτωση εισαγωγής SSSC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	Total
1-2	50,8714	-35,2067	7,1223	-1,8975	20,8895
1-3	53,2953	35,2067	-7,1223	1,8975	83,2772
2-3	2,4239	70,4134	-14,2446	3,7951	62,3877
2-4	34,9828	108,4366	13,6913	-12,1556	144,9551
3-4	21,7059	25,3488	18,6239	-10,6338	55,04491

Στη συνέχεια παρατίθεται το γράφημα που δείχνει σχηματικά τη μεταβολή του transmission usage του ζυγού κοντά στον οποίο έχει εισαχθεί το UPFC. Να σημειωθεί ότι δεν παρατίθεται το αντίστοιχο διάγραμμα για την περίπτωση του SSSC, καθώς οι διαφορές του με το γράφημα που αναφέρεται στο UPFC είναι μικρές και δεν μπορούν να φανούν σχηματικά. Το γράφημα αυτό ελήφθη από το αναπτυχθέν λογισμικό.

Σχήμα 7.8: Transmission usage του ζυγού κοντά στον οποίο έχει εισαχθεί UPFC

7.2.2.6 C-factors

Στους Πίνακες 7.18, 7.19 και 7.20 παρουσιάζονται οι C-factors του συστήματος για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Οι τιμές που σημειώνονται σε αυτούς τους πίνακες είναι ανά μονάδα.

Πίνακας 7.18: C-factors στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
1-2	-0,3534	0,2328	0,0603	0,1638
1-3	-0,2716	0,1422	0,3147	0,2112
2-3	0,1638	-0,181	0,5086	0,0948
2-4	-0,0797	-0,1487	-0,0108	0,5065
3-4	-0,1078	-0,0388	-0,1767	0,306

Πίνακας 7.19: C-factors στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
1-2	-0,389	0,2425	-0,0206	0,1373
1-3	-0,3122	0,0562	0,3194	0,1615
2-3	0,0768	-0,1863	0,34	0,0242
2-4	-0,0553	-0,1606	0,0499	0,5236
3-4	-0,0881	0,0172	-0,1934	0,3329

Πίνακας 7.20: C-factors στην περίπτωση εισαγωγής SSSC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
1-2	-0,3771	0,2545	-0,0087	0,1492
1-3	-0,3171	0,0513	0,3145	0,1566
2-3	0,06	-0,2031	0,3232	0,0074
2-4	-0,0641	-0,1693	0,0412	0,5149
3-4	-0,0827	0,0225	-0,1879	0,3383

7.2.2.7 Χρησιμοποίηση του συστήματος από τους χρήστες του λόγω των c-factors (transmission usage based on c-factors)

Στους Πίνακες 7.21, 7.22 και 7.23 παρουσιάζεται η χρησιμοποίηση του συστήματος από τους χρήστες του λόγω των c-factors για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Οι τιμές που σημειώνονται σε αυτούς τους πίνακες είναι σε MW.

Πίνακας 7.21: Transmission usage στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	Total
1-2	0	0	9,0517	40,9483	50
1-3	0	0	47,1983	52,8017	100
2-3	0	0	76,2931	23,7069	100
2-4	0	0	-1,6164	126,6164	125
3-4	0	0	-26,5086	76,5086	50

Πίνακας 7.22: Transmission usage στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	Total
1-2	0	-12,4519	-3,093	34,3186	18,7737
1-3	0	-2,8866	47,907	40,3721	85,393
2-3	0	9,5653	51,001	6,0535	66,6193
2-4	0	8,2434	7,4937	130,91	146,648
3-4	0	-0,8811	-29,005	83,238	53,3523

Πίνακας 7.23: Transmission usage στην περίπτωση εισαγωγής SSSC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	Total
1-2	0	-15,1107	-1,3026	37,3027	20,8895
1-3	0	-3,0486	47,1748	39,151	83,2772
2-3	0	12,062	48,4774	1,8483	62,3877
2-4	0	10,0547	6,1798	128,7206	144,9551
3-4	0	-1,3382	-28,1984	84,5816	55,0449

7.2.2.8 Επιμερισμός του κόστους μεταφοράς

Για τον επιμερισμό του κόστους μεταφοράς, χρησιμοποιήθηκαν οι οκτώ μέθοδοι χρέωσης που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.5 της παρούσας εργασίας. Και οι οκτώ αυτές μέθοδοι στηρίχθηκαν στη συνεισφορά των χρηστών του συστήματος όπως αυτή υπολογίστηκε μέσω των συντελεστών κατανομής. Επίσης, μελετήθηκαν 3 ποσοστά επιμερισμού:

1. 0% χρέωση για παραγωγούς και 100% για καταναλωτές
2. 30% χρέωση για παραγωγούς και 70% για καταναλωτές
3. 50% χρέωση για παραγωγούς και 50% για καταναλωτές

Επιπλέον, να σημειωθεί ότι έγινε επιμερισμός του συνολικού κόστους μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένου και του κόστους συμφόρησης. Επίσης, η επαγωγική αντίδραση των γραμμών θεωρήθηκε 1Ω/km και το ετήσιο κόστος της κάθε γραμμής θεωρήθηκε 1κ€/km.

Τα αποτελέσματα του επιμερισμού του κόστους μεταφοράς για την περίπτωση εισαγωγής ή όχι κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα των 4 ζυγών παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες 7.24-7.41.

- **Χρέωσεις παραγωγών χωρίς ευέλικτα συστήματα μεταφοράς:**

Πίνακας 7.24: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 0% στους παραγωγούς χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

	GGDF(0%-100%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	0	0	0	0	0
unused abs	0	0	0	0	0
unused zcf	0	0	0	0	0
unused reverse	0	0	0	0	0
used abs	0	0	0	0	0
used zcf	0	0	0	0	0
used reverse	0	0	0	0	0
postage stamp	0	0	0	0	0

Πίνακας 7.25: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 30% στους παραγωγούς χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

	GGDF(30%-70%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	23,148	26,0905	0	4,7616	54
unused abs	23,6161	25,5646	0	4,8193	54
unused zcf	26,0699	25,4861	0	2,444	54
unused reverse	30,1655	24,7655	0	-0,931	54
used abs	25,5665	26,3707	0	5,0209	56,95813
used zcf	25,5665	24,7543	0	2,444	52,76478
used reverse	25,5665	23,1379	0	-0,133	48,57143
postage stamp	20,25	23,625	0	10,125	54

Πίνακας 7.26: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 50% στους παραγωγούς χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

	GGDF(50%-50%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	38,5799	43,4841	0	7,9359	90
unused abs	39,3602	42,6076	0	8,0322	90
unused zcf	43,4498	42,4769	0	4,0733	90
unused reverse	50,2759	41,2759	0	-1,552	90
used abs	42,6108	43,9511	0	8,3682	94,93021
used zcf	42,6108	41,2572	0	4,0733	87,9413
used reverse	42,6108	38,5632	0	-0,222	80,95238
postage stamp	33,75	39,375	0	16,875	90

- Χρεώσεις παραγωγών μετά την εισαγωγή του UPFC:

Πίνακας 7.27: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 0% στους παραγωγούς μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

	GGDF(0%-100%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	0	0	0	0	0
unused abs	0	0	0	0	0
unused zcf	0	0	0	0	0
unused reverse	0	0	0	0	0
used abs	0	0	0	0	0
used zcf	0	0	0	0	0
used reverse	0	0	0	0	0
postage stamp	0	0	0	0	0

Πίνακας 7.28: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 30% στους παραγωγούς μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

	GGDF(30%-70%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	14,38528	31,4726	5,2499	2,8922	54
unused abs	14,68503	30,7692	5,6851	2,8607	54
unused zcf	17,8365	31,8843	3,0868	1,1925	54
unused reverse	29,8908	24,8801	0,6455	-1,416	54
used abs	16,03793	31,3126	5,7771	2,9902	56,11789
used zcf	16,03793	28,2412	2,8842	0,972	48,13528
used reverse	16,03793	25,1697	-0,0088	-1,046	40,15267
postage stamp	14,0625	33,1875	0	6,75	54

Πίνακας 7.29: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 50% στους παραγωγούς μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

	GGDF(50%-50%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	23,9755	52,4543	8,7498	4,8204	90
unused abs	24,475	51,282	9,4751	4,7679	90
unused zcf	29,7275	53,1405	5,1446	1,9875	90
unused reverse	49,818	41,4668	1,0758	-2,361	90
used abs	26,7299	52,1877	9,6285	4,9837	93,52982
used zcf	26,7299	47,0686	4,8069	1,6201	80,22547
used reverse	26,7299	41,9495	-0,015	-1,744	66,92112
postage stamp	23,4375	55,3125	0	11,25	90

- Χρεώσεις παραγωγών μετά την εισαγωγή του SSSC:

Πίνακας 7.30: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 0% στους παραγωγούς μετά την εισαγωγή του SSSC στο σύστημα

	GGDF(0%-100%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	0	0	0	0	0
unused abs	0	0	0	0	0
unused zcf	0	0	0	0	0
unused reverse	0	0	0	0	0
used abs	0	0	0	0	0
used zcf	0	0	0	0	0
used reverse	0	0	0	0	0
postage stamp	0	0	0	0	0

Πίνακας 7.31: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 30% στους παραγωγούς μετά την εισαγωγή του SSSC στο σύστημα

	GGDF(30%-70%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	14,1629	30,8817	6,0819	2,8735	54
unused abs	14,4344	30,1808	6,5821	2,8027	54
unused zcf	17,562	31,8107	3,484	1,1433	54
unused reverse	28,2526	27,0164	0,0731	-1,342	54
used abs	15,8513	30,7646	6,7208	2,9574	56,29408
used zcf	15,8513	27,7469	3,3021	0,9108	47,8111
used reverse	15,8513	24,7292	-0,117	-1,1358	39,32812
postage stamp	14,0625	33,1875	0	6,75	54

Πίνακας 7.32: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 50% στους παραγωγούς μετά την εισαγωγή του SSSC στο σύστημα

	GGDF(50%-50%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	23,6048	51,4694	10,1365	4,7892	90
unused abs	24,0573	50,3013	10,9702	4,6712	90
unused zcf	29,27	53,0179	5,80662	1,9055	90
unused reverse	47,0877	45,0273	0,12176	-2,2367	90
used abs	26,4188	51,2743	11,2014	4,929	93,82346
used zcf	26,4188	46,2448	5,50355	1,518	79,68516
used reverse	26,4188	41,2153	-0,19429	-1,8929	65,54687
postage stamp	23,4375	55,3125	0	11,25	90

- Χρεώσεις καταναλωτών χωρίς ευέλικτα συστήματα μεταφοράς:

Πίνακας 7.33: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 100% στους καταναλωτές χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

	GLDF(0%-100%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	0	0	71,6588	108,3412	180
unused abs	0	0	73,9265	106,0735	180
unused zcf	0	0	68,2759	111,7241	180
unused reverse	0	0	57,1552	122,8448	180
used abs	0	0	75,2463	102,6683	177,9146
used zcf	0	0	67,2414	102,6683	169,9097
used reverse	0	0	59,2365	102,6683	161,9048
postage stamp	0	0	67,5	112,5	180

Πίνακας 7.34: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 70% στους καταναλωτές χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

	GLDF(30%-70%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	0	0	50,1611	75,8389	126
unused abs	0	0	51,7486	74,2514	126
unused zcf	0	0	47,7931	78,2069	126
unused reverse	0	0	40,0086	85,9914	126
used abs	0	0	52,6724	71,8678	124,5402
used zcf	0	0	47,069	71,8678	118,9368
used reverse	0	0	41,4655	71,8678	113,3333
postage stamp	0	0	47,25	78,75	126

Πίνακας 7.35: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 50% στους καταναλωτές χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

	GLDF(50%-50%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	0	0	35,8294	54,17062	90
unused abs	0	0	36,9633	53,03675	90
unused zcf	0	0	34,1379	55,8621	90
unused reverse	0	0	28,5776	61,4224	90
used abs	0	0	37,6232	51,3342	88,9573
used zcf	0	0	33,6207	51,3342	84,9548
used reverse	0	0	29,6182	51,3342	80,9524
postage stamp	0	0	33,75	56,25	90

- Χρεώσεις καταναλωτών μετά την εισαγωγή του UPFC:

Πίνακας 7.36: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 100% στους καταναλωτές μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

	GLDF(0%-100%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	0	13,8014	63,5229	102,6757	180
unused abs	0	17,2801	75,3655	87,3544	180
unused zcf	0	10,8634	69,6843	99,4523	180
unused reverse	0	-4,0843	56,2501	127,8342	180
used abs	0	12,9015	60,9324	88,278	162,1119
used zcf	0	7,9375	51,7616	88,278	147,9771
used reverse	0	2,9734	42,5909	88,278	133,8422
postage stamp	0	26,5049	77,4393	129,0656	233,0098

Πίνακας 7.37: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 70% στους καταναλωτές μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

	GLDF(30%-70%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	0	9,661	44,4661	71,873	126
unused abs	0	12,0961	52,7558	61,1481	126
unused zcf	0	7,6044	48,779	69,6166	126
unused reverse	0	-2,859	39,3751	89,4839	126
used abs	0	9,0311	42,6527	61,7946	113,4783
used zcf	0	5,5562	36,2331	61,7946	103,5839
used reverse	0	2,0814	29,8136	61,7946	93,6896
postage stamp	0	18,5534	54,2075	90,3459	163,1069

Πίνακας 7.38: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 50% στους καταναλωτές μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

	GLDF(50%-50%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	0	6,9007	31,7615	51,3379	90
unused abs	0	8,6401	37,6827	43,6772	90
unused zcf	0	5,4317	34,8421	49,7262	90
unused reverse	0	-2,0422	28,1251	63,9171	90
used abs	0	6,4508	30,4662	44,139	81,056
used zcf	0	3,9687	25,8808	44,139	73,9885
used reverse	0	1,4867	21,2954	44,139	66,9211
postage stamp	0	13,2525	38,7197	64,5328	116,5049

- Χρεώσεις καταναλωτών μετά την εισαγωγή του SSSC:

Πίνακας 7.39: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 100% στους καταναλωτές μετά την εισαγωγή του SSSC στο σύστημα

	GLDF(0%-100%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	0	17,2299	61,5495	101,2206	180
unused abs	0	21,6001	74,8676	83,5323	180
unused zcf	0	14,375	70,1863	95,4387	180
unused reverse	0	-2,0428	59,4938	122,549	180
used abs	0	15,8376	58,0332	85,919	159,7897
used zcf	0	9,9185	49,6043	85,919	145,4417
used reverse	0	3,9993	41,1754	85,919	131,0937
postage stamp	0	31,3793	79,2672	132,112	242,7585

Πίνακας 7.40: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 70% στους καταναλωτές μετά την εισαγωγή του SSSC στο σύστημα

	GLDF(30%-70%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	0	12,0609	43,0846	70,8545	126
unused abs	0	15,1201	52,4073	58,4726	126
unused zcf	0	10,0625	49,1304	66,8071	126
unused reverse	0	-1,43	41,6456	85,7843	126
used abs	0	11,0863	40,6232	60,1433	111,8528
used zcf	0	6,9429	34,723	60,1433	101,8092
used reverse	0	2,7995	28,8228	60,1433	91,76562
postage stamp	0	21,9655	55,4871	92,4784	169,9309

Πίνακας 7.41: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 50% στους καταναλωτές μετά την εισαγωγή του SSSC στο σύστημα

	GLDF(50%-50%)				
number of bus	1	2	3	4	total
mw-mile	0	8,6149	30,7747	50,6103	90
unused abs	0	10,8	37,4338	41,7662	90
unused zcf	0	7,1875	35,0932	47,7194	90
unused reverse	0	-1,0214	29,7469	61,2745	90
used abs	0	7,9188	29,0166	42,9595	79,8949
used zcf	0	4,9592	24,8022	42,9595	72,7209
used reverse	0	1,9997	20,5877	42,9595	65,5469
postage stamp	0	15,6896	39,6336	66,056	121,3792

7.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η συμφόρηση σε ένα δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχει αρνητικές επιπτώσεις στους συμμετέχοντες στην αγορά (παραγωγούς ή καταναλωτές) και επιπλέον μειώνει την ασφάλεια και την αξιοπιστία του ίδιου του δικτύου. Η περιορισμένη μεταφορά συνοδεύεται από πρόσθετα κόστη συμφόρησης, από χαμηλότερη χρήση του συστήματος καθώς και από υψηλότερες τιμές ενέργειας εξαιτίας της ανάγκης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από περισσότερο δαπανηρές μονάδες παραγωγής προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση. Επίσης, η περιορισμένη μεταφορά οδηγεί στη μείωση του αριθμού των επιθυμητών συναλλαγών. Οι παραδοσιακές μέθοδοι για τον περιορισμό της συμφόρησης οδηγούν συχνά σε ακριβές ή ανεπιθύμητες λύσεις. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος απαιτείται περισσότερος έλεγχος της ροής ισχύος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτόν ακριβώς το ρόλο επιτελούν τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς όπως εξάλλου φαίνεται και από τα αποτελέσματα του λογισμικού που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Για την περίπτωση χρησιμοποίησης UPFC στο σύστημα των 4 ζυγών προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η συμφόρηση στις γραμμές 1-3 και 2-3 μετριάστηκε με την χρήση του UPFC. Αυτό φαίνεται στον Πίνακα 7.42.

Πίνακας 7.42: Αντιμετώπιση της συμφόρησης στις γραμμές 1-3 και 2-3 με χρήση του UPFC

line	Limit	F^0 (MW)	F^1 (MW)
1-3	100	100	85,393
2-3	100	100	66,6193

2. Η παραγωγή της γεννήτριας G_2 αυξάνεται ενώ της γεννήτριας G_4 μειώνεται. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς, σύμφωνα με τους συντελεστές κόστους παραγωγής, η G_2 είναι η πιο οικονομική γεννήτρια ενώ η G_4 είναι η πιο δαπανηρή γεννήτρια. Με τον τρόπο αυτό, το UPFC επιτυγχάνει μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην συνέχεια παρατίθεται πίνακας με τους συντελεστές κόστους παραγωγής και με την μεταβολή της παραγωγής των γεννητριών G_1 , G_2 και G_4 . Βάσει των δεδομένων αυτού του πίνακα και της σχέσης

$$TC = \sum_{i=1}^{NG} a_i + b_i P_{G_i} + c_i (P_{G_i})^2, \text{ μπορεί να υπολογιστεί το συνολικό κόστος παραγωγής}$$

για τις περιπτώσεις με ή χωρίς την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα (Πίνακας 7.44). Προκύπτει ότι με την χρησιμοποίηση του UPFC έχουμε μείωση του κόστους παραγωγής κατά 56,458\$/h (5331,25\$/h – 5274,792\$/h). Σε συστήματα υψηλότερης πολυπλοκότητας διασύνδεσης, όπως είναι τα πραγματικά ΣΗΕ, η μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής που επιτυγχάνεται με την χρησιμοποίηση του UPFC αναμένεται να είναι μεγαλύτερη.

Πίνακας 7.43: Συντελεστές κόστους γεννητριών του συστήματος 4 ζυγών και παραγωγή γεννητριών G_1 , G_2 και G_4 πριν και μετά την εισαγωγή UPFC στο σύστημα

number of bus	P_G^0 (pu)	P_G^1 (pu)	a(\$)	b(\$/MW)	c(\$/MW ²)
1	1,5	1,75	230	11	0,007
2	1,75	2,4583	200	10	0,005
3	0	0	0	0	0
4	0,75	0,5	240	12	0,009

Πίνακας 7.44: Συνολικό κόστος παραγωγής

	TC (\$/h)
ΣΗΕ χωρίς FACTS-device	5331,25
ΣΗΕ με UPFC	5274,792

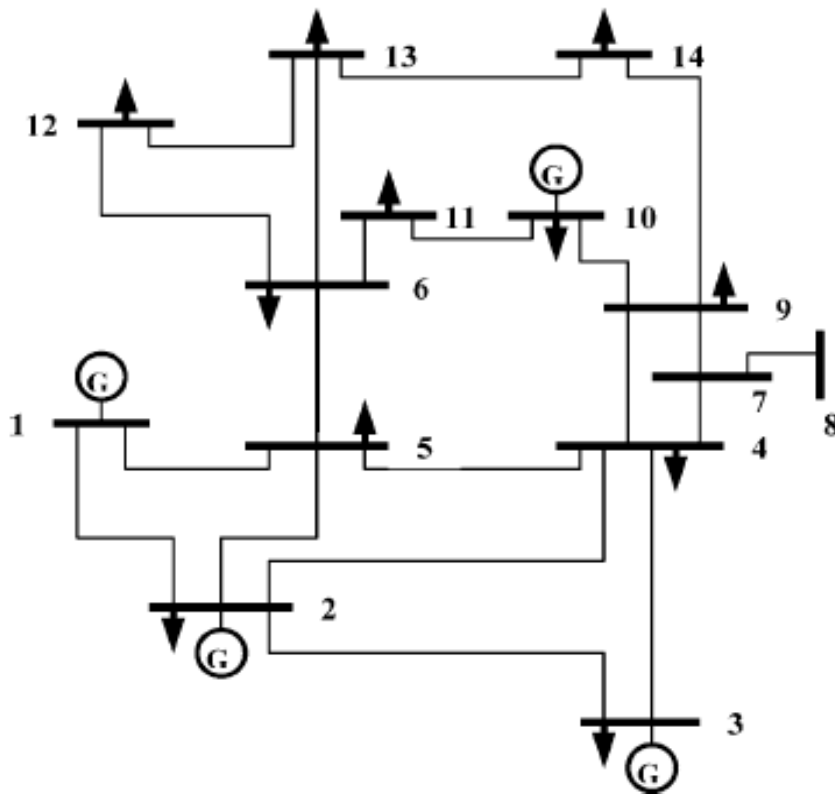
3. Η ροή ισχύος στη γραμμή 2-4 αυξάνεται κατά πολύ και τείνει να πλησιάσει το όριο ισχύος της γραμμής. Το γεγονός αυτό συμβαίνει έτσι ώστε να επιτραπεί στη οικονομική γεννήτρια G_2 να αυξήσει την παραγωγή της για να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου που βρίσκεται στο ζυγό 4. Με τον τρόπο αυτό επιλέγεται η οικονομικά πιο συμφέρουσα συναλλαγή μεταξύ παραγωγού στο ζυγό 2 και καταναλωτή στο ζυγό 4.
4. Γενικά, διαπιστώνεται ότι με την χρήση του UPFC εξακολουθούν να τηρούνται τα όρια ισχύος που μπορεί να αντέξει η κάθε γραμμή ενώ παράλληλα επιλέγονται οι οικονομικά πιο συμφέρουσες συναλλαγές.
5. Επίσης διαπιστώνεται κάποια μεταβολή τόσο στους A-factors όσο και στους D-factors λόγω της εισαγωγής του UPFC στο σύστημα. Η μεταβολή αυτή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την κοστολόγηση κάθε χρήστη του συστήματος ώστε αυτή η διαδικασία να είναι δικαιότερη.
6. Η χρήση του συστήματος από κάθε χρήστη του μεταβάλλεται. Αυτό συμβαίνει επειδή αλλάζουν οι ροές ισχύος στις γραμμές του συστήματος.
7. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται και η τιμολόγηση των υπηρεσιών μεταφοράς για κάθε χρήστη του συστήματος (παραγωγό ή καταναλωτή). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι μετά την εισαγωγή κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα των 4 ζυγών στη γραμμή 2-3 κοντά στο ζυγό 2, ο ζυγός 3 θεωρείται ως παραγωγός και συνεπώς έχει μια μικρή συμβολή στις χρεώσεις που αφορούν στους παραγωγούς ενώ ο ζυγός 2 θεωρείται ως καταναλωτής και συνεπώς έχει μια μικρή συμβολή στις χρεώσεις που αφορούν στους καταναλωτές.

Για την περίπτωση χρησιμοποίησης SSSC στο σύστημα των 4 ζυγών γίνονται ανάλογες παρατηρήσεις. Με άλλα λόγια δεν διαπιστώνονται ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις στη χρήση UPFC και SSSC και αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το σύστημα των 4 ζυγών έχει εξαιρετικά απλή τοπολογία. Οι διαφορές στη χρησιμοποίηση των δύο αυτών ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς θα φανούν κυρίως στο σύστημα 14 ζυγών RTS του IEEE, που μελετάται στην ενότητα 7.3.

7.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ 14 ΖΥΓΩΝ RTS ΤΟΥ ΙΕΕΕ

7.3.1 Δεδομένα του συστήματος

Στο Σχήμα 7.9 παρουσιάζεται η τοπολογία του συστήματος 14 ζυγών RTS του ΙΕΕΕ, το οποίο μελετήθηκε μέσω του αναπτυχθέντος λογισμικού. Επίσης, στους Πίνακες 7.45 και 7.46 παρουσιάζονται τα δεδομένα αυτού του συστήματος [7.4]. Τα δεδομένα αυτά καταχωρήθηκαν σε αρχείο Microsoft Excel, όπως περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο και στη συνέχεια επιλέχθηκαν ως είσοδος στο πρόγραμμα. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 7.45 παρουσιάζονται τα δεδομένα των γραμμών του συστήματος. Στην πρώτη στήλη του Πίνακα υπάρχει ένας αύξων αριθμός που δείχνει την γραμμή στην οποία αναφερόμαστε (*number of line*), στη δεύτερη και στην τρίτη στήλη φαίνεται αντίστοιχα ο ζυγός αναχώρησης (*from bus*) και τερματισμού (*to bus*) της γραμμής, στην τέταρτη στήλη υπάρχει η επαγωγική αντίδραση της κάθε γραμμής ($x(pu)$), ενώ η τελευταία στήλη παρουσιάζει το μέγιστο όριο ενεργού ισχύος που μπορεί να αντέξει η κάθε γραμμή ($fmax(MW)$). Στον Πίνακα 7.46 παρατίθενται τα δεδομένα των ζυγών του συστήματος. Στην πρώτη στήλη του Πίνακα υπάρχει ένας αύξων αριθμός που δείχνει τον ζυγό στον οποίο αναφερόμαστε (*number of bus*), στη δεύτερη και στην τρίτη στήλη φαίνεται αντίστοιχα η ελάχιστη ($Pgmin(pu)$) και η μέγιστη ($Pgmax(pu)$) παραγωγή που μπορεί να έχει κάθε ζυγός, στην τέταρτη στήλη απεικονίζεται η ζήτηση φορτίου ($Pload(pu)$) σε κάθε ζυγό, ενώ στις τρεις τελευταίες στήλες παρουσιάζονται οι συντελεστές της συνάρτησης κόστους παραγωγής κάθε γεννήτριας ($a(\$/), b(\$/MW), c(\$/MW^2)$).



Σχήμα 7.9: Σύστημα 14 ζυγών RTS του ΙΕΕΕ

Πίνακας 7.45: Δεδομένα γραμμών του συστήματος 14 ζυγών RTS του IEEE

number of line	from bus	to bus	x (pu)	fmax (MW)
1	1	2	0,05917	100
2	1	5	0,22304	150
3	2	3	0,19797	100
4	2	4	0,17632	150
5	2	5	0,17388	150
6	3	4	0,17103	100
7	4	5	0,04211	100
8	4	7	0,20912	100
9	4	9	0,55618	50
10	5	6	0,25202	120
11	6	11	0,1989	50
12	6	12	0,25581	50
13	6	13	0,13027	50
14	7	8	0,17615	50
15	7	9	0,11001	100
16	9	10	0,0845	20
17	9	14	0,27038	50
18	10	11	0,19207	50
19	12	13	0,19988	50
20	13	14	0,34802	50

Πίνακας 7.46: Δεδομένα ζυγών του συστήματος 14 ζυγών RTS του IEEE

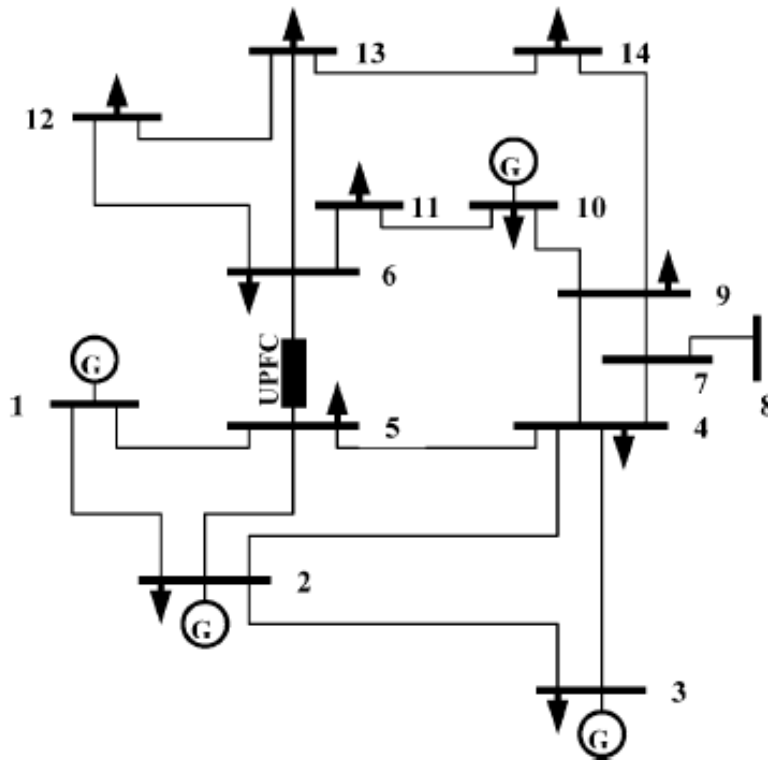
number of bus	Pg min (pu)	Pg max (pu)	Pload (pu)	a(\$)	b(\$/MW)	c (\$/MW ²)
1	0,5	2	0	213,1	11,669	0,00533
2	0,375	2,5	0,2	200	10,333	0,00889
3	0,45	3	0,8	240	10,833	0,00741
4	0	0	1,6	0	0	0
5	0	0	0,2	0	0	0
6	0	0	0,4	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0,4	0	0	0
10	0,2	2	0,5	300	16,752	0,01274
11	0	0	0,5	0	0	0
12	0	0	0,2	0	0	0
13	0	0	0,5	0	0	0
14	0	0	0,5	0	0	0

7.3.2 Αποτελέσματα

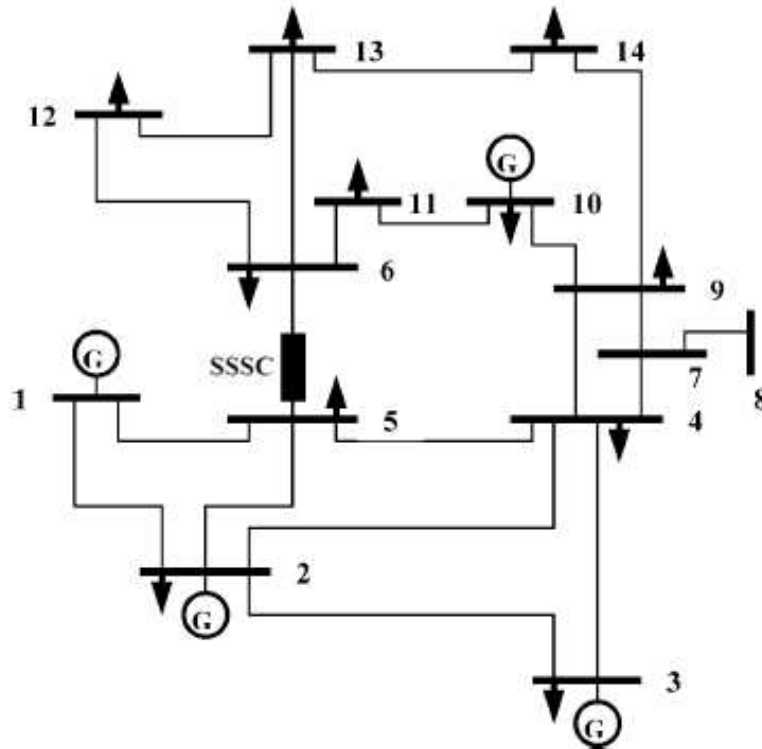
Στο σύστημα των 14 ζυγών RTS του IEEE που φαίνεται στο σχήμα 7.9 υπάρχουν τέσσερις παραγωγοί και έντεκα φορτία. Στο σύστημα αυτό εισήχθησαν διαδοχικά το UPFC και το SSSC στη γραμμή 5-6 κοντά στον ζυγό 5 και μελετήθηκαν οι ακόλουθες τρεις περιπτώσεις:

4. Μη χρησιμοποίηση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα (Σχήμα 7.9)
5. Εισαγωγή UPFC στο σύστημα (Σχήμα 7.10)
6. Εισαγωγή SSSC στο σύστημα (Σχήμα 7.11)

Και στις τρεις περιπτώσεις εφαρμόστηκε βέλτιστη dc ροή φορτίου, στην οποία ως αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής των γεννητριών. Επίσης οι γραμμές μεταφοράς θεωρήθηκαν χωρίς απώλειες ενώ ως βάση ισχύος θεωρήθηκαν τα 100MW ($S_B=100\text{MW}$).



Σχήμα 7.10: Σύστημα 14 ζυγών RTS του IEEE με χρήση UPFC



Σχήμα 7.11: Σύστημα 14 ζυγών RTS του IEEE με χρήση SSSC

Στους Πίνακες 7.47 και 7.48 παρουσιάζονται τα δεδομένα του UPFC και του SSSC αντίστοιχα για την περίπτωση χρησιμοποίησής τους στο σύστημα 14 ζυγών RTS του IEEE που μελετήθηκε [7.2]. Στην πρώτη και στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 7.47 φαίνεται αντίστοιχα ο ζυγός αναχώρησης (*ζυγός αναχώρησης*) και τερματισμού (*ζυγός άφιξης*) της γραμμής στην οποία έχει εισαχθεί το UPFC, στην τρίτη και την τέταρτη στήλη υπάρχουν αντίστοιχα η εν σειρά (X_{se} (pu)) και η εγκάρσια (X_{sh} (pu)) επαγωγική αντίδραση που αναφέρεται στο UPFC, η πέμπτη στήλη αναφέρεται στο ζυγό στον οποίο αποδίδεται ως παραγωγή (θετική έγχυση) η εγγεόμενη ισχύς του UPFC (*ζυγός έγχυσης ισχύος από το UPFC*) και η τελευταία στήλη παρουσιάζει την τιμή ανά μονάδα της ισχύος αυτής (P_{g_upfc} (pu)).

Πίνακας 7.47: Δεδομένα UPFC

ζυγός αναχώρησης	ζυγός άφιξης	X_{se} (pu)	X_{sh} (pu)	ζυγός έγχυσης ισχύος από το UPFC	P_{g_upfc} (pu)
5	6	0,1	10	6	0,4642

Όμοια, στην πρώτη και στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 7.48 φαίνεται αντίστοιχα ο ζυγός αναχώρησης (*ζυγός αναχώρησης*) και τερματισμού (*ζυγός άφιξης*) της γραμμής στην οποία έχει εισαχθεί το SSSC, στην τρίτη στήλη υπάρχει η εν σειρά (X_{se} (pu)) επαγωγική αντίδραση που αναφέρεται στο SSSC, η τέταρτη στήλη αναφέρεται στο ζυγό στον οποίο αποδίδεται ως παραγωγή (θετική έγχυση) η εγγεόμενη ισχύς του SSSC (*ζυγός έγχυσης ισχύος*

από το SSSC) και η τελευταία στήλη παρουσιάζει την τιμή ανά μονάδα της ισχύος αυτής (Pg_SSSC (pu)).

Πίνακας 7.48: Δεδομένα SSSC

ζυγός αναχώρησης	ζυγός άφιξης	Xse (pu)	ζυγός έγχυσης ισχύος από το SSSC	Pg_sssc (pu)
5	6	0,1	6	0,4885

Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα του προγράμματος για καθεμία από τις τρεις περιπτώσεις που αναφέραμε προηγουμένως. Να σημειώσουμε ότι ο δείκτης ⁰ αναφέρεται στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα, ο δείκτης ¹ αναφέρεται στην περίπτωση που έχει εισαχθεί UPFC στο σύστημα, ενώ ο δείκτης ² αναφέρεται στην περίπτωση που έχει εισαχθεί SSSC στο σύστημα.

7.3.2.1 Βασικές παράμετροι του συστήματος

Στους Πίνακες 7.49 και 7.50 παρουσιάζονται οι μεταβολές των βασικών παραμέτρων του συστήματος λόγω της εισαγωγής UPFC ή SSSC στη γραμμή μεταφοράς 2-3.

Συγκεκριμένα, στην πρώτη γραμμή του Πίνακα 7.49 παρουσιάζεται η παραγωγή κάθε ζυγού στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα. Η δεύτερη γραμμή του ίδιου πίνακα αναφέρεται στην παραγωγή κάθε ζυγού στην περίπτωση που έχει εισαχθεί UPFC στο σύστημα. Στην τρίτη και στην τέταρτη γραμμή φαίνεται αντίστοιχα η μεταβολή της παραγωγής λόγω της χρησιμοποίησης του UPFC και η εγχεόμενη ισχύς του UPFC σε κάθε ζυγό. Τέλος, στις τρεις τελευταίες γραμμές παρουσιάζονται τα ίδια μεγέθη για την περίπτωση χρησιμοποίησης του SSSC.

Στον πίνακα 7.50 παρουσιάζονται οι γωνίες των τάσεων στους ζυγούς και οι μεταβολές των γωνιών αυτών λόγω της εισαγωγής UPFC ή SSSC στο σύστημα. Συγκεκριμένα, στην πρώτη γραμμή του πίνακα 7.50 φαίνεται η γωνία της τάσης κάθε ζυγού στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα. Η δεύτερη γραμμή του ίδιου πίνακα δείχνει τις γωνίες των τάσεων στους ζυγούς στην περίπτωση που έχει εισαχθεί UPFC στο σύστημα. Στην τρίτη γραμμή παρουσιάζεται η μεταβολή στις γωνίες των τάσεων των ζυγών λόγω της χρησιμοποίησης του UPFC. Στην τέταρτη, στην πέμπτη και στην έκτη γραμμή φαίνονται οι τρεις παράμετροι στις οποίες διακρίνεται η μεταβολή στις γωνίες των τάσεων όπως αυτές αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4 στις σχέσεις (4.104), (4.105) και (4.106). Τέλος, στις πέντε τελευταίες γραμμές παρουσιάζονται τα ίδια μεγέθη για την περίπτωση χρησιμοποίησης του SSSC.

Πίνακας 7.50: Γωνίες τάσεων στους ζυγούς και μεταβολή στις γωνίες

	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_9	G_{10}	G_{11}	G_{12}	G_{13}	G_{14}
θ^0	0	-0,0392	-0,0623	-0,2334	-0,2109	-0,5133	-0,3708	-0,3708	-0,4431	-0,4548	-0,5324	-0,5708	-0,5758	-0,5772
θ^1	0	-0,0434	-0,073	-0,2441	-0,2217	-0,512	-0,3862	-0,3862	-0,4609	-0,4778	-0,5435	-0,571	-0,5771	-0,5878
$\Delta\theta^1$	0	-0,0041	-0,0107	-0,0107	-0,0108	0,00134	-0,0154	-0,0154	-0,0178	-0,023	-0,011	-0,0002	-0,0014	-0,0106
$\Delta\theta_G^1$	0	-0,0043	-0,0114	-0,0118	-0,0101	-0,024	-0,023	-0,023	-0,0289	-0,0367	-0,0304	-0,0244	-0,0247	-0,0271
$\Delta\theta_M^1$	0	-0,0005	-0,0019	-0,003	0,0018	-0,07	-0,0212	-0,0212	-0,0308	-0,0378	-0,0536	-0,0669	-0,0645	-0,0455
$\Delta\theta_C^1$	0	0,0007	0,0025	0,0041	-0,002	0,0953	0,0289	0,0289	0,0419	0,0514	-0,532	0,0911	0,0878	0,062
θ^2	-0,568	-0,0394	-0,065	-0,236	-0,215	-0,4925	-0,3706	-0,3706	-0,4414	-0,4535	-0,5215	-0,5515	-0,5576	-0,5683
$\Delta\theta^2$	0,0089	-0,0002	-0,0026	-0,0026	-0,0041	0,0209	0,00022	0,0002	0,0017	0,0013	0,0109	0,0194	0,01816	0,0089
$\Delta\theta_G^2$	-0,011	-0,0004	-0,0034	-0,004	-0,0033	-0,0094	-0,009	-0,009	-0,0116	-0,0151	-0,0123	-0,0096	-0,0098	-0,0108
$\Delta\theta_M^2$	-0,046	-0,0005	-0,0019	-0,003	0,0018	-0,07	-0,0212	-0,0212	-0,0308	-0,0378	-0,0536	-0,0669	-0,0645	-0,0455
$\Delta\theta_C^2$	0,0652	0,0007	0,0027	0,0044	-0,0026	0,1003	0,0304	0,0304	0,0441	0,0541	0,0768	0,0959	0,0924	0,0652

7.3.2.2 Ροές ισχύος στις γραμμές του συστήματος και μεταβολή τους λόγω χρησιμοποίησης UPFC ή SSSC

Στους Πίνακες 7.51 και 7.52 παρουσιάζονται οι ροές των γραμμών του συστήματος για τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα στην πρώτη στήλη του Πίνακα 7.51 φαίνεται η γραμμή στην οποία αναφερόμαστε. Στη δεύτερη στήλη του ίδιου πίνακα φαίνεται το όριο ισχύος που μπορεί να αντέξει κάθε γραμμή ενώ στην τρίτη στήλη παρουσιάζεται η ροή ισχύος στην περίπτωση που δεν γίνεται χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς. Η τέταρτη και η πέμπτη στήλη δείχνουν αντίστοιχα τη ροή στις γραμμές και τη μεταβολή στη ροή λόγω της εισαγωγής του UPFC στο σύστημα. Στις τρεις επόμενες στήλες φαίνονται οι τρεις παράμετροι στις οποίες διακρίνεται η μεταβολή στις ροές των γραμμών όπως αυτές αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4 στις σχέσεις (4.114), (4.115) και (4.116). Αντίστοιχα, στον Πίνακα 7.52 παρουσιάζονται τα ίδια μεγέθη για την περίπτωση χρησιμοποίησης του SSSC. Να σημειώσουμε ότι και στους δύο πίνακες χρησιμοποιείται ως μονάδα ισχύος το MW.

Πίνακας 7.51: Ροές ισχύος στις γραμμές και μεταβολή τους λόγω εισαγωγής του UPFC

line	Limit	F^0 (MW)	F^1 (MW)	ΔF^1 (MW)	ΔF_M^1 (MW)	ΔF_G^1 (MW)	ΔF_C^1 (MW)
1-2	100	66,2579	73,2676	7,0098	0,8169	7,3053	-1,1124
1-5	150	94,5639	99,4044	4,8405	-0,817	4,545	1,1124
2-3	100	11,6846	14,9962	3,3116	0,6928	3,5622	-0,9435
2-4	150	110,119	113,837	3,7182	1,45	4,2427	-1,9745
2-5	150	98,7523	102,576	3,8237	-1,326	3,344	1,8055
3-4	100	100	100	0	0,6928	0,2506	-0,9435
4-5	100	-53,3162	-53,0964	0,2198	-11,55	-3,9567	15,722
4-7	100	65,7237	67,9466	2,2229	8,6979	5,3692	-11,844
4-9	50	37,7115	38,987	1,2755	4,9908	3,0808	-6,7961
5-6	120	120	82,464	-37,536	-13,69	3,9323	-27,78
6-11	50	9,59247	15,8176	6,2252	-8,243	3,2434	11,225
6-12	50	22,4752	23,0663	0,5911	-1,211	0,1532	1,6486
6-13	50	47,9323	50	2,0677	-4,235	0,5358	5,767
7-8	50	0	0	0	0	0	0
7-9	100	65,7237	67,9466	2,2229	8,6979	5,3692	-11,844
9-10	20	13,8428	20	6,1572	8,243	9,139	-11,225
9-14	50	49,5925	46,9337	-2,6588	5,4457	-0,6889	-7,4156
10-11	50	40,4075	34,1824	-6,2252	8,243	-3,2434	-11,225
12-13	50	2,47523	3,06634	0,5911	-1,211	0,1532	1,6486
13-14	50	0,40753	3,06634	2,6588	-5,446	0,6889	7,4156

Πίνακας 7.52: Ροές ισχύος στις γραμμές και μεταβολή τους λόγω εισαγωγής του SSSC

line	Limit	F^0 (MW)	F^2 (MW)	ΔF^2 (MW)	ΔF_M^2 (MW)	ΔF_G^2 (MW)	ΔF_C^2 (MW)
1-2	100	66,2579	66,559	0,3012	0,8169	0,6549	-1,1707
1-5	150	94,5639	96,414	1,8502	-0,817	1,4965	1,1707
2-3	100	11,6846	12,926	1,241	0,6928	1,541	-0,9928
2-4	150	110,119	111,51	1,3934	1,45	2,0213	-2,0778
2-5	150	98,7523	101,02	2,2708	-1,326	1,6967	1,9
3-4	100	100	100	0	0,6928	0,3	-0,9928
4-5	100	-53,3162	-49,774	3,5424	-11,55	-1,457	16,546
4-7	100	65,7237	64,358	-1,365	8,6979	2,4009	-12,464
4-9	50	37,7115	36,928	-0,783	4,9908	1,3776	-7,1519
5-6	120	120	78,813	-41,19	-13,69	1,736	-29,234
6-11	50	9,59247	14,597	5,0046	-8,243	1,4353	11,812
6-12	50	22,4752	23,066	0,5911	-1,211	0,0669	1,7349
6-13	50	47,9323	50	2,0677	-4,235	0,2339	6,0688
7-8	50	0	0	0	0	0	0
7-9	100	65,7237	64,358	-1,365	8,6979	2,4009	-12,464
9-10	20	13,8428	14,353	0,5099	8,243	4,0792	-11,812
9-14	50	49,5925	46,934	-2,659	5,4457	-0,301	-7,8038
10-11	50	40,4075	35,403	-5,005	8,243	-1,435	-11,812
12-13	50	2,47523	3,0663	0,5911	-1,211	0,0669	1,7349
13-14	50	0,40753	3,0663	2,6588	-5,446	0,3007	7,8038

7.3.2.3 A-factors

Στους Πίνακες 7.53, 7.54 και 7.55 παρουσιάζονται οι A-factors του συστήματος για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Οι τιμές που σημειώνονται σε αυτούς τους πίνακες είναι ανά μονάδα.

Πίνακας 7.53: A-factors στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	0	-0,838	-0,7465	-0,6675	-0,6106	-0,6299	-0,6573
1-5	0	-0,162	-0,2535	-0,3325	-0,3894	-0,3701	-0,3427
2-3	0	0,02734	-0,532	-0,1514	-0,1031	-0,1195	-0,1427
2-4	0	0,05722	-0,1434	-0,3168	-0,2157	-0,2501	-0,2987
2-5	0	0,07741	-0,0711	-0,1994	-0,2918	-0,2604	-0,2159
3-4	0	0,02734	0,468	-0,1514	-0,1031	-0,1195	-0,1427
4-5	0	0,08002	0,3071	0,50325	-0,3016	-0,0279	0,3589
4-7	0	0,00289	0,0111	0,01817	-0,0109	-0,2171	-0,6342
4-9	0	0,00166	0,0064	0,01043	-0,0062	-0,1246	-0,1661
5-6	0	-0,0045	-0,0174	-0,0286	0,0171	-0,6584	-0,1997
6-11	0	-0,0027	-0,0105	-0,0172	0,0103	0,2057	-0,1202
6-12	0	-0,0004	-0,0015	-0,0025	0,0015	0,0302	-0,0177
6-13	0	-0,0014	-0,0054	-0,0088	0,0053	0,1057	-0,0618
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0	0,00289	0,0111	0,01817	-0,0109	-0,2171	0,3658
9-10	0	0,00274	0,0105	0,01722	-0,0103	-0,2057	0,1202
9-14	0	0,00181	0,0069	0,01138	-0,0068	-0,1359	0,0794
10-11	0	0,00274	0,0105	0,01722	-0,0103	-0,2057	0,1202
12-13	0	-0,0004	-0,0015	-0,0025	0,0015	0,0302	-0,0177
13-14	0	-0,0018	-0,0069	-0,0114	0,0068	0,1359	-0,0794
line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	-0,6573	-0,6519	-0,648	-0,6391	-0,6317	-0,633	-0,6437
1-5	-0,3427	-0,3481	-0,352	-0,3609	-0,3683	-0,367	-0,3563
2-3	-0,1427	-0,1382	-0,1348	-0,1273	-0,121	-0,1221	-0,1311
2-4	-0,2987	-0,2891	-0,2822	-0,2664	-0,2532	-0,2556	-0,2745
2-5	-0,2159	-0,2246	-0,231	-0,2454	-0,2575	-0,2553	-0,2381
3-4	-0,1427	-0,1382	-0,1348	-0,1273	-0,121	-0,1221	-0,1311
4-5	0,3589	0,28302	0,2278	0,10215	-0,0034	0,0158	0,16621
4-7	-0,6342	-0,4513	-0,4097	-0,3151	-0,2356	-0,2501	-0,3633
4-9	-0,1661	-0,259	-0,2351	-0,1808	-0,1352	-0,1435	-0,2085
5-6	-0,1997	-0,2897	-0,3552	-0,5041	-0,6292	-0,6065	-0,4282
6-11	-0,1202	-0,1744	-0,2846	-0,535	0,17569	0,1522	-0,0316
6-12	-0,0177	-0,0256	-0,0157	0,00686	-0,5201	-0,1687	-0,0882
6-13	-0,0618	-0,0896	-0,0549	0,02399	-0,2849	-0,59	-0,3084
7-8	-1	0	0	0	0	0	0
7-9	0,3658	-0,4513	-0,4097	-0,3151	-0,2356	-0,2501	-0,3633
9-10	0,1202	0,17445	-0,7154	-0,465	-0,1757	-0,1522	0,03162
9-14	0,0794	0,11525	0,0706	-0,0308	-0,1951	-0,2413	-0,6034
10-11	0,1202	0,17445	0,2846	-0,465	-0,1757	-0,1522	0,03162
12-13	-0,0177	-0,0256	-0,0157	0,00686	0,47994	-0,1687	-0,0882
13-14	-0,0794	-0,1152	-0,0706	0,03085	0,19509	0,2413	-0,3966

Πίνακας 7.54: A-factors στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	0	-0,8381	-0,7467	-0,6677	-0,6104	-0,6344	-0,6587
1-5	0	-0,1619	-0,2533	-0,3323	-0,3896	-0,3656	-0,3413
2-3	0	0,02732	-0,5321	-0,1515	-0,103	-0,1233	-0,1439
2-4	0	0,05717	-0,1436	-0,3171	-0,2155	-0,258	-0,3011
2-5	0	0,07746	-0,0709	-0,199	-0,292	-0,2531	-0,2137
3-4	0	0,02732	0,46787	-0,1515	-0,103	-0,1233	-0,1439
4-5	0	0,08046	0,30876	0,506	-0,3033	0,03541	0,37815
4-7	0	0,00256	0,00982	0,0161	-0,0096	-0,2648	-0,6487
4-9	0	0,00147	0,00564	0,00924	-0,0055	-0,1519	-0,1744
5-6	0	-0,004	-0,0155	-0,0253	0,01518	-0,5833	-0,1769
6-11	0	-0,0024	-0,0093	-0,0153	0,00914	0,25095	-0,1065
6-12	0	-0,0004	-0,0014	-0,0022	0,00134	0,03686	-0,0156
6-13	0	-0,0012	-0,0048	-0,0078	0,0047	0,12893	-0,0547
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0	0,00256	0,00982	0,0161	-0,0096	-0,2648	0,35132
9-10	0	0,00243	0,00931	0,01525	-0,0091	-0,251	0,10653
9-14	0	0,0016	0,00615	0,01008	-0,006	-0,1658	0,07038
10-11	0	0,00243	0,00931	0,01525	-0,0091	-0,251	0,10653
12-13	0	-0,0004	-0,0014	-0,0022	0,00134	0,03686	-0,0156
13-14	0	-0,0016	-0,0061	-0,0101	0,00604	0,16579	-0,0704
line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	-0,6587	-0,6539	-0,6504	-0,6426	-0,6359	-0,6371	-0,6466
1-5	-0,3413	-0,3461	-0,3496	-0,3574	-0,3641	-0,3629	-0,3534
2-3	-0,1439	-0,1398	-0,1369	-0,1302	-0,1246	-0,1256	-0,1336
2-4	-0,3011	-0,2926	-0,2865	-0,2725	-0,2608	-0,2629	-0,2796
2-5	-0,2137	-0,2214	-0,2271	-0,2398	-0,2506	-0,2486	-0,2333
3-4	-0,1439	-0,1398	-0,1369	-0,1302	-0,1246	-0,1256	-0,1336
4-5	0,3782	0,3109	0,26194	0,15066	0,05718	0,0742	0,2074
4-7	-0,6487	-0,4723	-0,4355	-0,3516	-0,2812	-0,294	-0,3944
4-9	-0,1744	-0,271	-0,2499	-0,2018	-0,1614	-0,1687	-0,2263
5-6	-0,1769	-0,2566	-0,3147	-0,4466	-0,5574	-0,5373	-0,3793
6-11	-0,1065	-0,1545	-0,2602	-0,5004	0,21891	0,1939	-0,0022
6-12	-0,0156	-0,0227	-0,0121	0,01194	-0,5137	-0,1625	-0,0838
6-13	-0,0547	-0,0794	-0,0424	0,04178	-0,2626	-0,5686	-0,2933
7-8	-1	0	0	0	0	0	0
7-9	0,3513	-0,4723	-0,4355	-0,3516	-0,2812	-0,294	-0,3944
9-10	0,1065	0,15455	-0,7398	-0,4996	-0,2189	-0,1939	0,00221
9-14	0,0704	0,1021	0,05449	-0,0537	-0,2236	-0,2688	-0,6229
10-11	0,1065	0,15455	0,2602	-0,4996	-0,2189	-0,1939	0,00221
12-13	-0,0156	-0,0227	-0,0121	0,01194	0,48629	-0,1625	-0,0838
13-14	-0,0704	-0,1021	-0,0545	0,05373	0,22364	0,2688	-0,3771

Πίνακας 7.55: A-factors στην περίπτωση εισαγωγής SSSC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	0	-0,8381	-0,7467	-0,6677	-0,6104	-0,6344	-0,6587
1-5	0	-0,1619	-0,2533	-0,3323	-0,3896	-0,3656	-0,3413
2-3	0	0,02732	-0,5321	-0,1515	-0,103	-0,1233	-0,1439
2-4	0	0,05717	-0,1436	-0,3171	-0,2155	-0,258	-0,3011
2-5	0	0,07746	-0,0709	-0,199	-0,292	-0,2531	-0,2137
3-4	0	0,02732	0,4679	-0,1515	-0,103	-0,1233	-0,1439
4-5	0	0,08046	0,3088	0,506	-0,3033	0,0354	0,37815
4-7	0	0,00256	0,0098	0,0161	-0,0096	-0,2648	-0,6487
4-9	0	0,00147	0,0056	0,0092	-0,0055	-0,1519	-0,1744
5-6	0	-0,004	-0,0155	-0,0253	0,01518	-0,5833	-0,1769
6-11	0	-0,0024	-0,0093	-0,0153	0,00914	0,251	-0,1065
6-12	0	-0,0004	-0,0014	-0,0022	0,00134	0,0369	-0,0156
6-13	0	-0,0012	-0,0048	-0,0078	0,0047	0,1289	-0,0547
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0	0,00256	0,0098	0,0161	-0,0096	-0,2648	0,35132
9-10	0	0,00243	0,0093	0,0153	-0,0091	-0,251	0,10653
9-14	0	0,0016	0,0061	0,0101	-0,006	-0,1658	0,07038
10-11	0	0,00243	0,0093	0,0153	-0,0091	-0,251	0,10653
12-13	0	-0,0004	-0,0014	-0,0022	0,00134	0,0369	-0,0156
13-14	0	-0,0016	-0,0061	-0,0101	0,00604	0,1658	-0,0704
line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	-0,6587	-0,6539	-0,6504	-0,6426	-0,6359	-0,6371	-0,6466
1-5	-0,3413	-0,3461	-0,3496	-0,3574	-0,3641	-0,3629	-0,3534
2-3	-0,1439	-0,1398	-0,1369	-0,1302	-0,1246	-0,1256	-0,1336
2-4	-0,3011	-0,2926	-0,2865	-0,2725	-0,2608	-0,2629	-0,2796
2-5	-0,2137	-0,2214	-0,2271	-0,2398	-0,2506	-0,2486	-0,2333
3-4	-0,1439	-0,1398	-0,1369	-0,1302	-0,1246	-0,1256	-0,1336
4-5	0,3782	0,3109	0,26194	0,1507	0,0572	0,0742	0,2074
4-7	-0,6487	-0,4723	-0,4355	-0,3516	-0,2812	-0,294	-0,3944
4-9	-0,1744	-0,271	-0,2499	-0,2018	-0,1614	-0,1687	-0,2263
5-6	-0,1769	-0,2566	-0,3147	-0,4466	-0,5574	-0,5373	-0,3793
6-11	-0,1065	-0,1545	-0,2602	-0,5004	0,2189	0,1939	-0,0022
6-12	-0,0156	-0,0227	-0,0121	0,0119	-0,5137	-0,1625	-0,0838
6-13	-0,0547	-0,0794	-0,0424	0,0418	-0,2626	-0,5686	-0,2933
7-8	-1	0	0	0	0	0	0
7-9	0,3513	-0,4723	-0,4355	-0,3516	-0,2812	-0,294	-0,3944
9-10	0,1065	0,1545	-0,7398	-0,4996	-0,2189	-0,1939	0,00221
9-14	0,0704	0,1021	0,05449	-0,0537	-0,2236	-0,2688	-0,6229
10-11	0,1065	0,1545	0,2602	-0,4996	-0,2189	-0,1939	0,00221
12-13	-0,0156	-0,0227	-0,0121	0,0119	0,4863	-0,1625	-0,0838
13-14	-0,0704	-0,1021	-0,0545	0,0537	0,2236	0,2688	-0,3771

7.3.2.4 D-factors

Στους πίνακες 7.56, 7.57 και 7.58 παρουσιάζονται οι D-factors του συστήματος για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Οι τιμές που σημειώνονται σε αυτούς τους πίνακες είναι ανά μονάδα.

Πίνακας 7.56: D-factors στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	0,6683	-0,1698	-0,0783	0,0008	0,0577	0,0383	0,011
1-5	0,3317	0,16976	0,07828	0	-0,058	-0,038	-0,011
2-3	0,1841	0,21147	-0,3479	0,0328	0,0811	0,0646	0,0414
2-4	0,2515	0,30876	0,10811	-0,065	0,0358	0,0015	-0,0471
2-5	0,1981	0,27553	0,12704	-0,001	-0,094	-0,062	-0,0178
3-4	0,0462	0,07354	0,51416	-0,105	-0,057	-0,073	-0,0965
4-5	-0,2352	-0,1551	0,07193	0,2681	-0,537	-0,263	0,1238
4-7	0,1633	0,1662	0,1744	0,1815	0,1524	-0,054	-0,4709
4-9	0,0937	0,09537	0,10007	0,1041	0,0875	-0,031	-0,0724
5-6	0,2602	0,25567	0,24277	0,2316	0,2774	-0,398	0,0605
6-11	0,058	0,05524	0,04747	0,0408	0,0683	0,2637	-0,0623
6-12	0,0414	0,04099	0,03985	0,0389	0,0429	0,0716	0,0237
6-13	0,0919	0,09047	0,08648	0,083	0,0972	0,1976	0,0301
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0,1633	0,1662	0,1744	0,1815	0,1524	-0,054	0,5291
9-10	0,1144	0,11717	0,12494	0,1317	0,1041	-0,091	0,2347
9-14	0,0736	0,07543	0,08057	0,085	0,0668	-0,062	0,1531
10-11	0,0282	0,03096	0,03873	0,0454	0,0179	-0,178	0,1485
12-13	0,0069	0,00651	0,00537	0,0044	0,0084	0,0371	-0,0108
13-14	0,0126	0,01077	0,00564	0,0012	0,0194	0,1485	-0,0669
line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	0,011	0,0163	0,0203	0,0291	0,0366	0,0352	0,0246
1-5	-0,011	-0,0163	-0,0203	-0,029	-0,037	-0,0352	-0,025
2-3	0,0414	0,046	0,0493	0,0568	0,0632	0,062	0,053
2-4	-0,0471	-0,0376	-0,0306	-0,015	-0,002	-0,004	-0,023
2-5	-0,0178	-0,0265	-0,0329	-0,047	-0,059	-0,0572	-0,04
3-4	-0,0965	-0,092	-0,0886	-0,081	-0,075	-0,0759	-0,085
4-5	0,1238	0,0479	-0,0074	-0,133	-0,239	-0,2193	-0,069
4-7	-0,4709	-0,288	-0,2464	-0,152	-0,072	-0,0867	-0,2
4-9	-0,0724	-0,1653	-0,1414	-0,087	-0,041	-0,0498	-0,115
5-6	0,0605	-0,0295	-0,095	-0,244	-0,369	-0,3462	-0,168
6-11	-0,0623	-0,1165	-0,2266	-0,477	0,2337	0,2102	0,0264
6-12	0,0237	0,0158	0,0257	0,0482	-0,479	-0,1273	-0,047
6-13	0,0301	0,0023	0,037	0,1159	-0,193	-0,4981	-0,217

7-8	-1	0	0	0	0	0	0
7-9	0,5291	-0,288	-0,2464	-0,152	-0,072	-0,0867	-0,2
9-10	0,2347	0,2889	-0,601	-0,351	-0,061	-0,0378	0,1461
9-14	0,1531	0,1889	0,1442	0,0428	-0,121	-0,1677	-0,53
10-11	0,1485	0,2027	0,3128	-0,437	-0,147	-0,124	0,0598
12-13	-0,0108	-0,0187	-0,0088	0,0138	0,4868	-0,1618	-0,081
13-14	-0,0669	-0,1027	-0,058	0,0434	0,2077	0,2539	-0,384

Πίνακας 7.57: D-factors στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	0,6656	-0,1724	-0,081	-0,0021	0,0552	0,0312	0,007
1-5	0,3344	0,17244	0,08104	0,00208	-0,055	-0,031	-0,007
2-3	0,1795	0,20682	-0,3526	0,02797	0,0765	0,0562	0,0356
2-4	0,2518	0,30895	0,10814	-0,0653	0,0363	-0,006	-0,049
2-5	0,2024	0,27987	0,13153	0,00338	-0,09	-0,051	-0,011
3-4	0,0518	0,07911	0,51966	-0,0997	-0,051	-0,072	-0,092
4-5	-0,2184	-0,138	0,09033	0,28757	-0,522	-0,183	0,1597
4-7	0,1694	0,17195	0,17921	0,18549	0,1597	-0,095	-0,479
4-9	0,0972	0,09866	0,10283	0,10643	0,0917	-0,055	-0,077
5-6	0,2123	0,2083	0,19687	0,18699	0,2275	-0,371	0,0354
6-11	0,0365	0,03403	0,02715	0,0212	0,0456	0,2874	-0,07
6-12	0,0358	0,03544	0,03443	0,03355	0,0371	0,0727	0,0201
6-13	0,0762	0,07497	0,07144	0,06838	0,0809	0,2052	0,0215
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0,1694	0,17195	0,17921	0,18549	0,1597	-0,095	0,5207
9-10	0,1232	0,12561	0,13249	0,13844	0,114	-0,128	0,2297
9-14	0,0796	0,08115	0,0857	0,08963	0,0735	-0,086	0,1499
10-11	0,0434	0,04579	0,05267	0,05862	0,0342	-0,208	0,1499
12-13	0,0039	0,00351	0,0025	0,00163	0,0052	0,0407	-0,012
13-14	0,0003	-0,0013	-0,0059	-0,0098	0,0063	0,1661	-0,07
line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	0,007	0,0117	0,0152	0,0231	0,0297	0,0285	0,019
1-5	-0,007	-0,012	-0,015	-0,023	-0,03	-0,028	-0,019
2-3	0,0356	0,0397	0,0426	0,0493	0,0549	0,0539	0,046
2-4	-0,0493	-0,041	-0,035	-0,021	-0,009	-0,011	-0,028
2-5	-0,0113	-0,019	-0,025	-0,037	-0,048	-0,046	-0,031
3-4	-0,0921	-0,088	-0,085	-0,078	-0,073	-0,074	-0,082
4-5	0,1597	0,0925	0,0435	-0,068	-0,161	-0,144	-0,011
4-7	-0,4793	-0,303	-0,266	-0,182	-0,112	-0,125	-0,225
4-9	-0,0772	-0,174	-0,153	-0,105	-0,064	-0,072	-0,129
5-6	0,0354	-0,044	-0,102	-0,234	-0,345	-0,325	-0,167
6-11	-0,0701	-0,118	-0,224	-0,464	0,2554	0,2303	0,034
6-12	0,0201	0,0131	0,0237	0,0477	-0,478	-0,127	-0,048

6-13	0,0215	-0,003	0,0338	0,118	-0,186	-0,492	-0,217
7-8	-1	0	0	0	0	0	0
7-9	0,5207	-0,303	-0,266	-0,182	-0,112	-0,125	-0,225
9-10	0,2297	0,2777	-0,617	-0,376	-0,096	-0,071	0,125
9-14	0,1499	0,1817	0,134	0,0258	-0,144	-0,189	-0,543
10-11	0,1499	0,1979	0,3036	-0,456	-0,176	-0,151	0,046
12-13	-0,0118	-0,019	-0,008	0,0158	0,4902	-0,159	-0,08
13-14	-0,0701	-0,102	-0,054	0,054	0,2239	0,2691	-0,377

Πίνακας 7.58: D-factors στην περίπτωση εισαγωγής SSSC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	0,6654	-0,1727	-0,0813	-0,002	0,055	0,031	0,0068
1-5	0,3346	0,17265	0,08125	0,0023	-0,055	-0,031	-0,007
2-3	0,1792	0,20652	-0,3529	0,0277	0,0762	0,0559	0,0353
2-4	0,2516	0,30881	0,108	-0,065	0,0361	-0,006	-0,049
2-5	0,2028	0,28021	0,13188	0,0037	-0,089	-0,05	-0,011
3-4	0,052	0,07931	0,51986	-0,1	-0,051	-0,071	-0,092
4-5	-0,2164	-0,136	0,09235	0,2896	-0,52	-0,181	0,1617
4-7	0,1688	0,17133	0,1786	0,1849	0,1591	-0,096	-0,48
4-9	0,0968	0,09831	0,10248	0,1061	0,0913	-0,055	-0,078
5-6	0,2114	0,20742	0,19599	0,1861	0,2266	-0,372	0,0345
6-11	0,0363	0,03385	0,02697	0,021	0,0454	0,2872	-0,07
6-12	0,0357	0,03529	0,03428	0,0334	0,037	0,0725	0,02
6-13	0,0759	0,07466	0,07113	0,0681	0,0806	0,2048	0,0212
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0,1688	0,17133	0,1786	0,1849	0,1591	-0,096	0,5201
9-10	0,1227	0,12517	0,13205	0,138	0,1136	-0,128	0,2293
9-14	0,0793	0,08087	0,08542	0,0893	0,0732	-0,087	0,1496
10-11	0,0432	0,04566	0,05254	0,0585	0,0341	-0,208	0,1498
12-13	0,0038	0,00349	0,00248	0,0016	0,0052	0,0407	-0,012
13-14	0,0002	-0,0014	-0,0059	-0,01	0,0063	0,166	-0,07
line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	0,0068	0,0115	0,015	0,0228	0,0295	0,0283	0,0188
1-5	-0,007	-0,012	-0,015	-0,023	-0,029	-0,028	-0,019
2-3	0,0353	0,0394	0,0423	0,049	0,0546	0,0536	0,0456
2-4	-0,049	-0,041	-0,0348	-0,021	-0,009	-0,011	-0,028
2-5	-0,011	-0,019	-0,0243	-0,037	-0,048	-0,046	-0,031
3-4	-0,092	-0,088	-0,0849	-0,078	-0,073	-0,074	-0,082
4-5	0,1617	0,0945	0,0455	-0,066	-0,159	-0,142	-0,009
4-7	-0,48	-0,304	-0,2667	-0,183	-0,112	-0,125	-0,226
4-9	-0,078	-0,174	-0,153	-0,105	-0,065	-0,072	-0,129
5-6	0,0345	-0,045	-0,1032	-0,235	-0,346	-0,326	-0,168

6-11	-0,07	-0,118	-0,2239	-0,464	0,2552	0,2302	0,0341
6-12	0,02	0,013	0,0235	0,0476	-0,478	-0,127	-0,048
6-13	0,0212	-0,003	0,0335	0,1177	-0,187	-0,493	-0,217
7-8	-1	0	0	0	0	0	0
7-9	0,5201	-0,304	-0,2667	-0,183	-0,112	-0,125	-0,226
9-10	0,2293	0,2773	-0,6171	-0,377	-0,096	-0,071	0,1249
9-14	0,1496	0,1814	0,1338	0,0255	-0,144	-0,19	-0,544
10-11	0,1498	0,1978	0,3034	-0,456	-0,176	-0,151	0,0454
12-13	-0,012	-0,019	-0,0083	0,0158	0,4901	-0,159	-0,08
13-14	-0,07	-0,102	-0,0542	0,054	0,2239	0,2691	-0,377

7.3.2.5 Χρησιμοποίηση του συστήματος από τους χρήστες του λόγω των d-factors (transmission usage based on d-factors)

Στους Πίνακες 7.59, 7.60 και 7.61 παρουσιάζεται η χρησιμοποίηση του συστήματος από τους χρήστες του λόγω των d-factors για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Οι τιμές που σημειώνονται σε αυτούς τους πίνακες είναι σε MW.

Πίνακας 7.59: Transmission usage στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	107,472	-29,5891	-13,1751	0	0	0	0
1-5	53,3502	29,5891	13,1751	0	0	0	0
2-3	29,6111	36,8583	-58,5584	0	0	0	0
2-4	40,4529	53,8168	18,1959	0	0	0	0
2-5	31,8619	48,0236	21,3834	0	0	0	0
3-4	7,4288	12,8172	86,5411	0	0	0	0
4-5	-37,8179	-27,0395	12,1072	0	0	0	0
4-7	26,2647	28,9691	29,3546	0	0	0	0
4-9	15,0704	16,6222	16,8434	0	0	0	0
5-6	41,8486	44,5629	40,8617	0	0	0	0
6-11	9,32451	9,62865	7,99048	0	0	0	0
6-12	6,65663	7,14435	6,70706	0	0	0	0
6-13	14,7763	15,7693	14,5562	0	0	0	0
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	26,2647	28,9691	29,3546	0	0	0	0
9-10	18,4034	20,4227	21,0294	0	0	0	0
9-14	11,8405	13,148	13,5606	0	0	0	0
10-11	4,53944	5,39705	6,51947	0	0	0	0
12-13	1,11106	1,13407	0,90308	0	0	0	0
13-14	2,02343	1,87772	0,94936	0	0	0	0

line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	0	0	1,5506	0	0	0	0
1-5	0	0	-1,551	0	0	0	0
2-3	0	0	3,7735	0	0	0	0
2-4	0	0	-2,347	0	0	0	0
2-5	0	0	-2,517	0	0	0	0
3-4	0	0	-6,787	0	0	0	0
4-5	0	0	-0,566	0	0	0	0
4-7	0	0	-18,86	0	0	0	0
4-9	0	0	-10,82	0	0	0	0
5-6	0	0	-7,273	0	0	0	0
6-11	0	0	-17,35	0	0	0	0
6-12	0	0	1,9672	0	0	0	0
6-13	0	0	2,8304	0	0	0	0
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0	0	-18,86	0	0	0	0
9-10	0	0	-46,01	0	0	0	0
9-14	0	0	11,043	0	0	0	0
10-11	0	0	23,952	0	0	0	0
12-13	0	0	-0,673	0	0	0	0
13-14	0	0	-4,443	0	0	0	0

Πίνακας 7.60: Transmission usage στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	114,9339	-30,7183	-13,3719	0	0	1,44905	0
1-5	57,73808	30,71829	13,3719	0	0	-1,449	0
2-3	30,99484	36,843	-58,1857	0	0	2,60905	0
2-4	43,47524	55,03661	17,8428	0	0	-0,2902	0
2-5	34,95089	49,85627	21,7028	0	0	-2,3518	0
3-4	8,942918	14,09254	85,7455	0	0	-3,3192	0
4-5	-37,7178	-24,5796	14,9047	0	0	-8,4958	0
4-7	29,24921	30,63169	29,571	0	0	-4,429	0
4-9	16,78288	17,57613	16,9675	0	0	-2,5413	0
5-6	36,66261	37,1064	32,4838	0	0	-17,219	0
6-11	6,294935	6,062235	4,47944	0	0	13,3415	0
6-12	6,180591	6,31291	5,68053	0	0	3,37251	0
6-13	13,16112	13,35603	11,7875	0	0	9,52316	0
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	29,24921	30,63169	29,571	0	0	-4,429	0
9-10	21,26996	22,37584	21,8613	0	0	-5,9312	0
9-14	13,73616	14,45675	14,1409	0	0	-4,0032	0
10-11	7,487514	8,156803	8,69095	0	0	-9,6363	0
12-13	0,667612	0,625295	0,41237	0	0	1,89044	0
13-14	0,046285	-0,23772	-0,97048	0	0	7,70842	0

line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	0	0	0,9748	0	0	0	0
1-5	0	0	-0,9748	0	0	0	0
2-3	0	0	2,735	0	0	0	0
2-4	0	0	-2,2271	0	0	0	0
2-5	0	0	-1,5822	0	0	0	0
3-4	0	0	-5,4618	0	0	0	0
4-5	0	0	2,7922	0	0	0	0
4-7	0	0	-17,076	0	0	0	0
4-9	0	0	-9,7982	0	0	0	0
5-6	0	0	-6,5702	0	0	0	0
6-11	0	0	-14,36	0	0	0	0
6-12	0	0	1,5198	0	0	0	0
6-13	0	0	2,1722	0	0	0	0
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0	0	-17,076	0	0	0	0
9-10	0	0	-39,576	0	0	0	0
9-14	0	0	8,6031	0	0	0	0
10-11	0	0	19,483	0	0	0	0
12-13	0	0	-0,5294	0	0	0	0
13-14	0	0	-3,4802	0	0	0	0

Πίνακας 7.61: Transmission usage στην περίπτωση εισαγωγής SSSC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	108,4434	-30,8876	-13,5753	0	0	1,5145	0
1-5	54,52972	30,8876	13,57532	0	0	-1,5145	0
2-3	29,20568	36,9474	-58,9652	0	0	2,7312	0
2-4	41,01042	55,2465	18,0433	0	0	-0,3123	0
2-5	33,04412	50,131	22,03295	0	0	-2,458	0
3-4	8,472832	14,1881	86,85458	0	0	-3,4833	0
4-5	-35,2706	-24,3238	15,42851	0	0	-8,8421	0
4-7	27,5057	30,652	29,83893	0	0	-4,691	0
4-9	15,78247	17,5878	17,12125	0	0	-2,6916	0
5-6	34,46002	37,1075	32,74454	0	0	-18,163	0
6-11	5,912636	6,05659	4,506209	0	0	14,031	0
6-12	5,810045	6,31418	5,727835	0	0	3,542	0
6-13	12,37091	13,3571	11,8832	0	0	10,006	0
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	27,5057	30,652	29,83893	0	0	-4,691	0
9-10	20,00343	22,3925	22,06203	0	0	-6,2632	0
9-14	12,91832	14,4676	14,27085	0	0	-4,2267	0
10-11	7,045396	8,16796	8,777913	0	0	-10,147	0
12-13	0,626832	0,62436	0,414186	0	0	1,9884	0
13-14	0,039713	-0,24309	-0,98673	0	0	8,1107	0

line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	0	0	1,064	0	0	0	0
1-5	0	0	-1,064	0	0	0	0
2-3	0	0	3,0066	0	0	0	0
2-4	0	0	-2,4754	0	0	0	0
2-5	0	0	-1,7269	0	0	0	0
3-4	0	0	-6,0322	0	0	0	0
4-5	0	0	3,23419	0	0	0	0
4-7	0	0	-18,947	0	0	0	0
4-9	0	0	-10,872	0	0	0	0
5-6	0	0	-7,3357	0	0	0	0
6-11	0	0	-15,91	0	0	0	0
6-12	0	0	1,67223	0	0	0	0
6-13	0	0	2,38238	0	0	0	0
7-8	0	0	5,8E-15	0	0	0	0
7-9	0	0	-18,947	0	0	0	0
9-10	0	0	-43,842	0	0	0	0
9-14	0	0	9,50352	0	0	0	0
10-11	0	0	21,5589	0	0	0	0
12-13	0	0	-0,5875	0	0	0	0
13-14	0	0	-3,8543	0	0	0	0

7.3.2.6 C-factors

Στους Πίνακες 7.62, 7.63 και 7.64 παρουσιάζονται οι C-factors του συστήματος για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Οι τιμές που σημειώνονται σε αυτούς τους πίνακες είναι ανά μονάδα.

Πίνακας 7.62: C-factors στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	-0,554	0,284	0,1925	0,1135	0,0565	0,0759	0,1033
1-5	-0,1687	-0,0067	0,0848	0,1638	0,2207	0,2014	0,174
2-3	-0,164	-0,1913	0,3681	-0,013	-0,061	-0,044	-0,021
2-4	-0,0617	-0,1189	0,0818	0,2551	0,154	0,1884	0,237
2-5	-0,0279	-0,1053	0,0432	0,1715	0,2639	0,2325	0,1881
3-4	0,12622	0,0989	-0,3417	0,2776	0,2293	0,2457	0,2689
4-5	0,14323	0,0632	-0,1639	-0,36	0,4449	0,1712	-0,216
4-7	-0,05	-0,0529	-0,0611	-0,068	-0,039	0,1671	0,5842
4-9	-0,0287	-0,0303	-0,0351	-0,039	-0,022	0,0959	0,1374
5-6	-0,0533	-0,0488	-0,0359	-0,025	-0,07	0,605	0,1464
6-11	-0,0414	-0,0387	-0,0309	-0,024	-0,052	-0,247	0,0788
6-12	-0,0026	-0,0022	-0,0011	0	-0,004	-0,033	0,015

6-13	-0,0092	-0,0078	-0,0038	0	-0,015	-0,115	0,0525
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	-0,05	-0,0529	-0,0611	-0,068	-0,039	0,1671	-0,416
9-10	-0,0906	-0,0933	-0,1011	-0,108	-0,08	0,1152	-0,211
9-14	0,01188	0,0101	0,0049	0,0005	0,0187	0,1478	-0,068
10-11	0,04144	0,0387	0,0309	0,0242	0,0518	0,2472	-0,079
12-13	-0,0026	-0,0022	-0,0011	0	-0,004	-0,033	0,015
13-14	-0,0119	-0,0101	-0,0049	0	-0,019	-0,148	0,0676
line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	0,1033	0,0979	0,094	0,0851	0,0776	0,079	0,0896
1-5	0,174	0,1794	0,1833	0,1922	0,1996	0,1983	0,1876
2-3	-0,021	-0,0258	-0,029	-0,037	-0,043	-0,0419	-0,033
2-4	0,237	0,2274	0,2205	0,2047	0,1915	0,1939	0,2128
2-5	0,1881	0,1968	0,2031	0,2176	0,2297	0,2275	0,2102
3-4	0,2689	0,2644	0,2611	0,2535	0,2472	0,2483	0,2574
4-5	-0,216	-0,1398	-0,085	0,0411	0,1466	0,1274	-0,023
4-7	0,5842	0,4013	0,3597	0,2651	0,1856	0,2001	0,3133
4-9	0,1374	0,2303	0,2064	0,1521	0,1065	0,1148	0,1798
5-6	0,1464	0,2364	0,3019	0,4508	0,5759	0,5531	0,3749
6-11	0,0788	0,133	0,2432	0,4935	-0,2171	-0,1937	-0,01
6-12	0,015	0,023	0,0131	-0,009	0,5174	0,166	0,0855
6-13	0,0525	0,0804	0,0457	-0,033	0,2756	0,5808	0,2992
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	-0,416	0,4013	0,3597	0,2651	0,1856	0,2001	0,3133
9-10	-0,211	-0,265	0,6248	0,3744	0,0851	0,0616	-0,122
9-14	-0,068	-0,1034	-0,059	0,0427	0,207	0,2532	0,6153
10-11	-0,079	-0,133	-0,243	0,5065	0,2171	0,1937	0,0098
12-13	0,015	0,023	0,0131	-0,009	-0,4826	0,166	0,0855
13-14	0,0676	0,1034	0,0587	-0,043	-0,207	-0,2532	0,3847

Πίνακας 7.63: C-factors στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	-0,5379	0,3001	0,2088	0,1298	0,0725	0,0965	0,1207
1-5	-0,1385	0,0235	0,1149	0,1938	0,2511	0,2271	0,2029
2-3	-0,1647	-0,192	0,3674	-0,013	-0,062	-0,041	-0,021
2-4	-0,0447	-0,102	0,0989	0,2724	0,1708	0,2133	0,2563
2-5	0,0054	-0,072	0,0763	0,2044	0,2974	0,2585	0,2191
3-4	0,1445	0,1172	-0,323	0,2961	0,2475	0,2678	0,2884
4-5	0,2097	0,1292	-0,099	-0,296	0,513	0,1743	-0,168
4-7	-0,0698	-0,072	-0,08	-0,086	-0,06	0,195	0,5788
4-9	-0,0401	-0,042	-0,046	-0,049	-0,035	0,1119	0,1343
5-6	-0,0974	-0,093	-0,082	-0,072	-0,113	0,4859	0,0795

6-11	-0,0147	-0,012	-0,005	0,0005	-0,024	-0,266	0,0918
6-12	0,001	0,0013	0,0023	0,0032	0	-0,036	0,0166
6-13	0,0034	0,0047	0,0082	0,0112	-0,001	-0,126	0,0581
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	-0,0698	-0,072	-0,08	-0,086	-0,06	0,195	-0,421
9-10	-0,1055	-0,108	-0,115	-0,121	-0,096	0,1454	-0,212
9-14	-0,0044	-0,006	-0,011	-0,014	0,0017	0,1614	-0,075
10-11	0,0147	0,0123	0,0054	0	0,0239	0,2657	-0,092
12-13	0,001	0,0013	0,0023	0,0032	0	-0,036	0,0166
13-14	0,0044	0,006	0,0105	0,0145	-0,002	-0,161	0,0748
line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	0,1207	0,116	0,1125	0,1046	0,098	0,0992	0,1087
1-5	0,2029	0,2076	0,2111	0,219	0,2256	0,2244	0,2149
2-3	-0,021	-0,025	-0,028	-0,035	-0,04	-0,039	-0,031
2-4	0,2563	0,2479	0,2417	0,2278	0,216	0,2182	0,2349
2-5	0,2191	0,2269	0,2325	0,2453	0,256	0,254	0,2387
3-4	0,2884	0,2844	0,2814	0,2747	0,2691	0,2701	0,2781
4-5	-0,168	-0,101	-0,052	0,059	0,1525	0,1355	0,0023
4-7	0,5788	0,4025	0,3656	0,2818	0,2114	0,2242	0,3245
4-9	0,1343	0,2309	0,2098	0,1617	0,1213	0,1286	0,1862
5-6	0,0795	0,1593	0,2173	0,3493	0,4601	0,4399	0,282
6-11	0,0918	0,1398	0,2455	0,4856	-0,234	-0,209	-0,013
6-12	0,0166	0,0237	0,0131	-0,011	0,5147	0,1635	0,0848
6-13	0,0581	0,0828	0,0458	-0,038	0,2661	0,572	0,2967
7-8	1	0	0	0	0	0	0
7-9	-0,421	0,4025	0,3656	0,2818	0,2114	0,2242	0,3245
9-10	-0,212	-0,26	0,6343	0,3941	0,1134	0,0883	-0,108
9-14	-0,075	-0,106	-0,059	0,0493	0,2193	0,2645	0,6185
10-11	-0,092	-0,14	-0,245	0,5144	0,2337	0,2086	0,0125
12-13	0,0166	0,0237	0,0131	-0,011	-0,485	0,1635	0,0848
13-14	0,0748	0,1065	0,0589	-0,049	-0,219	-0,264	0,3815

Πίνακας 7.64: C-factors στην περίπτωση εισαγωγής SSSC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	-0,5502	0,2879	0,1965	0,1175	0,0602	0,0842	0,1084
1-5	-0,143	0,019	0,1104	0,1893	0,2466	0,2226	0,1984
2-3	-0,1689	-0,1962	0,3632	-0,017	-0,066	-0,046	-0,025
2-4	-0,0483	-0,1055	0,0953	0,2688	0,1672	0,2097	0,2527
2-5	0,00385	-0,0736	0,0747	0,2029	0,2958	0,2569	0,2176
3-4	0,14566	0,1183	-0,3222	0,2972	0,2486	0,269	0,2895
4-5	0,21831	0,1378	-0,0905	-0,288	0,5216	0,1829	-0,16
4-7	-0,0769	-0,0794	-0,0867	-0,093	-0,067	0,1879	0,5718
4-9	-0,0441	-0,0456	-0,0497	-0,053	-0,039	0,1078	0,1303

5-6	-0,1047	-0,1007	-0,0893	-0,079	-0,12	0,4785	0,0722
6-11	-0,0172	-0,0147	-0,0078	-0,002	-0,026	-0,268	0,0894
6-12	0,00097	0,0013	0,0023	0,0032	0	-0,036	0,0166
6-13	0,0034	0,0046	0,0082	0,0112	-0,001	-0,126	0,0581
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	-0,0769	-0,0794	-0,0867	-0,093	-0,067	0,1879	-0,428
9-10	-0,1166	-0,119	-0,1259	-0,132	-0,107	0,1343	-0,223
9-14	-0,0044	-0,006	-0,0105	-0,014	0,0017	0,1614	-0,075
10-11	0,01715	0,0147	0,0078	0,0019	0,0263	0,2681	-0,089
12-13	0,00097	0,0013	0,0023	0,0032	0	-0,036	0,0166
13-14	0,00437	0,006	0,0105	0,0145	-0,002	-0,161	0,0748
line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	0,1084	0,1037	0,1002	0,0924	0,0857	0,0869	0,0964
1-5	0,1984	0,2031	0,2066	0,2145	0,2211	0,2199	0,2105
2-3	-0,025	-0,0291	-0,032	-0,039	-0,0443	-0,0433	-0,035
2-4	0,2527	0,2443	0,2381	0,2242	0,2124	0,2146	0,2313
2-5	0,2176	0,2253	0,2309	0,2437	0,2544	0,2525	0,2372
3-4	0,2895	0,2855	0,2825	0,2759	0,2703	0,2713	0,2793
4-5	-0,16	-0,0926	-0,044	0,0676	0,1611	0,1441	0,0109
4-7	0,5718	0,3955	0,3586	0,2747	0,2043	0,2171	0,3175
4-9	0,1303	0,2269	0,2057	0,1576	0,1172	0,1246	0,1822
5-6	0,0722	0,1519	0,2099	0,3419	0,4527	0,4325	0,2746
6-11	0,0894	0,1374	0,243	0,4832	-0,2361	-0,211	-0,015
6-12	0,0166	0,0237	0,0131	-0,011	0,5147	0,1635	0,0848
6-13	0,0581	0,0828	0,0458	-0,038	0,266	0,572	0,2967
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	-0,428	0,3955	0,3586	0,2747	0,2043	0,2171	0,3175
9-10	-0,223	-0,2712	0,6232	0,383	0,1023	0,0773	-0,119
9-14	-0,075	-0,1065	-0,059	0,0494	0,2193	0,2645	0,6185
10-11	-0,089	-0,1374	-0,243	0,5168	0,2361	0,211	0,0149
12-13	0,0166	0,0237	0,0131	-0,011	-0,4853	0,1635	0,0848
13-14	0,0748	0,1065	0,0589	-0,049	-0,2193	-0,2645	0,3815

7.3.2.7 Χρησιμοποίηση του συστήματος από τους χρήστες του λόγω των c-factors (transmission usage based on c-factors)

Στους Πίνακες 7.65, 7.66 και 7.67 παρουσιάζεται η χρησιμοποίηση του συστήματος από τους χρήστες του λόγω των c-factors για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Οι τιμές που σημειώνονται σε αυτούς τους πίνακες είναι σε MW.

Πίνακας 7.65: Transmission usage στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	0	5,68	15,401	18,157	1,1306	3,0358	0
1-5	0	-0,1344	6,7812	26,208	4,415	8,0554	0
2-3	0	-3,8264	29,444	-2,017	-1,218	-1,779	0
2-4	0	-2,378	6,5403	40,817	3,0805	7,5359	0
2-5	0	-2,1053	3,4575	27,439	5,2785	9,2997	0
3-4	0	1,9776	-27,34	44,414	4,5858	9,8286	0
4-5	0	1,2642	-13,108	-57,6	8,8973	6,8464	0
4-7	0	-1,0578	-4,8869	-10,91	-0,782	6,6834	0
4-9	0	-0,6069	-2,804	-6,258	-0,449	3,8348	0
5-6	0	-0,9755	-2,8698	-3,956	-1,409	24,201	0
6-11	0	-0,7741	-2,4748	-3,876	-1,035	-9,887	0
6-12	0	-0,0448	-0,0878	-0,018	-0,083	-1,314	0
6-13	0	-0,1566	-0,3072	-0,063	-0,291	-4,597	0
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0	-1,0578	-4,8869	-10,91	-0,782	6,6834	0
9-10	0	-1,8661	-8,0859	-17,25	-1,605	4,6065	0
9-14	0	0,2014	0,395	0,0806	0,3739	5,9117	0
10-11	0	0,7741	2,4748	3,8756	1,0352	9,8868	0
12-13	0	-0,0448	-0,0878	-0,018	-0,083	-1,314	0
13-14	0	-0,2014	-0,395	-0,081	-0,374	-5,912	0
line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	0	3,9158	4,6993	4,2549	1,5527	3,9496	4,4815
1-5	0	7,1753	9,1646	9,609	3,9929	9,9143	9,3824
2-3	0	-1,033	-1,457	-1,834	-0,8602	-2,0928	-1,642
2-4	0	9,098	11,025	10,237	3,8297	9,6948	10,639
2-5	0	7,8714	10,157	10,878	4,5934	11,373	10,51
3-4	0	10,575	13,053	12,676	4,9438	12,417	12,868
4-5	0	-5,5918	-4,227	2,054	2,9318	6,3694	-1,149
4-7	0	16,053	17,985	13,254	3,7119	10,003	15,667
4-9	0	9,2113	10,32	7,6049	2,1298	5,7396	8,9893
5-6	0	9,4549	15,095	22,541	11,518	27,657	18,744
6-11	0	5,3202	12,158	24,677	-4,3426	-9,6828	-0,491
6-12	0	0,9192	0,6529	-0,475	10,348	8,3014	4,2762
6-13	0	3,2155	2,2837	-1,661	5,5122	29,039	14,958
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0	16,053	17,985	13,254	3,7119	10,003	15,667
9-10	0	-10,601	31,242	18,722	1,7024	3,0824	-6,109
9-14	0	-4,1347	-2,937	2,1363	4,1393	12,66	30,765
10-11	0	-5,3202	-12,16	25,323	4,3426	9,6828	0,491
12-13	0	0,9192	0,6529	-0,475	-9,6516	8,3014	4,2762
13-14	0	4,1347	2,9366	-2,136	-4,1393	-12,66	19,235

Πίνακας 7.66: Transmission usage στην περίπτωση εισαγωγής UPFC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	0	6,003	16,7	20,767	-1,916	3,8598	0
1-5	0	0,4692	9,1887	31,011	-6,633	9,0846	0
2-3	0	-3,8406	29,394	-2,108	1,6312	-1,657	0
2-4	0	-2,0383	7,9118	43,581	-4,511	8,5314	0
2-5	0	-1,4409	6,1036	32,712	-7,857	10,34	0
3-4	0	2,3442	-25,867	47,37	-6,539	10,713	0
4-5	0	2,5849	-7,925	-47,41	-13,55	6,9715	0
4-7	0	-1,4481	-6,3734	-13,75	1,5904	7,7983	0
4-9	0	-0,8309	-3,657	-7,89	0,9126	4,4746	0
5-6	0	-1,8667	-6,5523	-11,52	2,9735	19,436	0
6-11	0	-0,2464	-0,435	0,0815	0,6311	-10,63	0
6-12	0	0,0266	0,1873	0,5143	0,0097	-1,435	0
6-13	0	0,0931	0,6552	1,7991	0,0341	-5,021	0
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0	-1,4481	-6,3734	-13,75	1,5904	7,7983	0
9-10	0	-2,1593	-9,1879	-19,33	2,5468	5,8165	0
9-14	0	-0,1197	-0,8425	-2,313	-0,044	6,4564	0
10-11	0	0,2464	0,435	-0,081	-0,631	10,628	0
12-13	0	0,0266	0,1873	0,5143	0,0097	-1,435	0
13-14	0	0,1197	0,8425	2,3134	0,0438	-6,456	0
line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	0	4,6395	5,6262	5,2325	1,9607	4,962	5,4333
1-5	0	8,3049	10,554	10,948	4,5115	11,219	10,747
2-3	0	-0,9954	-1,391	-1,725	-0,8022	-1,9545	-1,555
2-4	0	9,9153	12,087	11,388	4,3204	10,908	11,744
2-5	0	9,0741	11,624	12,263	5,1198	12,702	11,937
3-4	0	11,374	14,071	13,737	5,3826	13,507	13,907
4-5	0	-4,0478	-2,612	2,9523	3,0504	6,7755	0,1149
4-7	0	16,1	18,28	14,089	4,2271	11,208	16,226
4-9	0	9,2377	10,489	8,0839	2,4255	6,4313	9,3104
5-6	0	6,3714	10,867	17,463	9,2017	21,996	14,099
6-11	0	5,5921	12,273	24,28	-4,6731	-10,431	-0,627
6-12	0	0,9469	0,6544	-0,549	10,294	8,1762	4,241
6-13	0	3,3123	2,2892	-1,919	5,321	28,601	14,835
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0	16,1	18,28	14,089	4,2271	11,208	16,226
9-10	0	-10,404	31,713	19,705	2,2674	4,4166	-5,387
9-14	0	-4,2593	-2,944	2,4672	4,3852	13,223	30,924
10-11	0	-5,5921	-12,27	25,72	4,6731	10,431	0,6268
12-13	0	0,9469	0,6544	-0,549	-9,7062	8,1762	4,241
13-14	0	4,2593	2,9436	-2,467	-4,3852	-13,223	19,076

Πίνακας 7.67: Transmission usage στην περίπτωση εισαγωγής SSSC στο σύστημα

line	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
1-2	0	5,757	15,716	18,799	-1,738	3,3679	0
1-5	0	0,3796	8,8302	30,294	-7,114	8,9053	0
2-3	0	-3,9242	29,059	-2,777	1,9018	-1,824	0
2-4	0	-2,1102	7,6241	43,006	-4,822	8,3876	0
2-5	0	-1,4722	5,9785	32,462	-8,534	10,277	0
3-4	0	2,3668	-25,777	47,551	-7,173	10,758	0
4-5	0	2,7569	-7,2368	-46,03	-15,05	7,3156	0
4-7	0	-1,5887	-6,9359	-14,88	1,9395	7,517	0
4-9	0	-0,9116	-3,9797	-8,536	1,1129	4,3132	0
5-6	0	-2,0144	-7,1433	-12,71	3,4601	19,14	0
6-11	0	-0,2945	-0,6276	-0,304	0,7586	-10,72	0
6-12	0	0,0266	0,1872	0,5141	0,0107	-1,435	0
6-13	0	0,0929	0,6547	1,7982	0,0374	-5,021	0
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0	-1,5887	-6,9359	-14,88	1,9395	7,517	0
9-10	0	-2,3808	-10,074	-21,1	3,1005	5,3736	0
9-14	0	-0,1195	-0,8418	-2,312	-0,048	6,4567	0
10-11	0	0,2945	0,6276	0,3037	-0,759	10,724	0
12-13	0	0,0266	0,1872	0,5141	0,0107	-1,435	0
13-14	0	0,1195	0,8418	2,3122	0,0481	-6,457	0
line	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	G ₁₄
1-2	0	4,1476	5,0113	4,6176	1,7148	4,3471	4,8183
1-5	0	8,1257	10,33	10,724	4,4219	10,994	10,523
2-3	0	-1,1626	-1,6	-1,934	-0,8858	-2,1635	-1,764
2-4	0	9,7714	11,907	11,208	4,2485	10,728	11,564
2-5	0	9,0116	11,546	12,185	5,0885	12,624	11,859
3-4	0	11,419	14,127	13,794	5,4052	13,564	13,964
4-5	0	-3,7037	-2,182	3,3825	3,2224	7,2056	0,545
4-7	0	15,818	17,929	13,737	4,0865	10,857	15,875
4-9	0	9,0763	10,287	7,8822	2,3448	6,2296	9,1087
5-6	0	6,0759	10,497	17,094	9,054	21,627	13,73
6-11	0	5,4958	12,152	24,16	-4,7213	-10,551	-0,747
6-12	0	0,9468	0,6543	-0,549	10,294	8,1761	4,2409
6-13	0	3,3121	2,2889	-1,919	5,3209	28,6	14,835
7-8	0	0	0	0	0	0	0
7-9	0	15,818	17,929	13,737	4,0865	10,857	15,875
9-10	0	-10,846	31,159	19,152	2,0459	3,863	-5,941
9-14	0	-4,259	-2,943	2,4676	4,3854	13,224	30,924
10-11	0	-5,4958	-12,15	25,84	4,7213	10,551	0,7472
12-13	0	0,9468	0,6543	-0,549	-9,7063	8,1761	4,2409
13-14	0	4,259	2,9432	-2,468	-4,3854	-13,224	19,076

7.3.2.8 Επιμερισμός του κόστους μεταφοράς

Για τον επιμερισμό του κόστους μεταφοράς, χρησιμοποιήθηκαν οι οκτώ μέθοδοι χρέωσης που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.5 της παρούσας εργασίας. Και οι οκτώ αυτές μέθοδοι στηρίχθηκαν στη συνεισφορά των χρηστών του συστήματος όπως αυτή υπολογίστηκε μέσω των συντελεστών κατανομής. Επίσης, μελετήθηκαν 3 ποσοστά επιμερισμού:

4. 0% χρέωση για παραγωγούς και 100% για καταναλωτές
5. 30% χρέωση για παραγωγούς και 70% για καταναλωτές
6. 50% χρέωση για παραγωγούς και 50% για καταναλωτές

Επιπλέον, να σημειωθεί ότι έγινε επιμερισμός του συνολικού κόστους μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένου και του κόστους συμφόρησης. Επίσης, η επαγωγική αντίδραση των γραμμών θεωρήθηκε 1Ω/km και το ετήσιο κόστος της κάθε γραμμής θεωρήθηκε 1κ€/km.

Τα αποτελέσματα του επιμερισμού του κόστους μεταφοράς για την περίπτωση εισαγωγής ή όχι κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα των 4 ζυγών παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες 7.68-7.85.

- **Χρεώσεις παραγωγών χωρίς ευέλικτα συστήματα μεταφοράς:**

Πίνακας 7.68: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 0% στους παραγωγούς χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

	GGDF(0%-100%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	0	0	0	0	0	0	0
unused abs	0	0	0	0	0	0	0
unused zcf	0	0	0	0	0	0	0
unused reverse	0	0	0	0	0	0	0
used abs	0	0	0	0	0	0	0
used zcf	0	0	0	0	0	0	0
used reverse	0	0	0	0	0	0	0
postage stamp	0	0	0	0	0	0	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	0	0	0	0	0	0
unused abs	0	0	0	0	0	0	0
unused zcf	0	0	0	0	0	0	0
unused reverse	0	0	0	0	0	0	0
used abs	0	0	0	0	0	0	0
used zcf	0	0	0	0	0	0	0
used reverse	0	0	0	0	0	0	0
postage stamp	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 7.69: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 30% στους παραγωγούς χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

	GGDF(30%-70%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	40,2009	37,6168	37,7883	0	0	0	0
unused abs	37,3103	36,5417	34,894	0	0	0	0
unused zcf	41,7374	39,6414	37,0345	0	0	0	0
unused reverse	109,396	104,419	-11,382	0	0	0	0
used abs	35,0185	33,1625	35,5118	0	0	0	0
used zcf	32,7494	29,7648	27,6943	0	0	0	0
used reverse	30,4803	26,3671	19,8768	0	0	0	0
postage stamp	34,9371	37,8648	36,5651	0	0	0	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	0	10,3941	0	0	0	0
unused abs	1,5658	0	15,6881	0	0	0	0
unused zcf	1,5658	0	6,0209	0	0	0	0
unused reverse	1,5658	0	-77,999	0	0	0	0
used abs	0	0	17,1809	0	0	0	0
used zcf	0	0	4,83433	0	0	0	0
used reverse	0	0	-7,5122	0	0	0	0
postage stamp	0	0	16,633	0	0	0	0

Πίνακας 7.70: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 50% στους παραγωγούς χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

	GGDF(50%-50%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	67,0015	62,6946	62,9804	0	0	0	0
unused abs	62,1838	60,9029	58,1567	0	0	0	0
unused zcf	69,5623	66,069	61,7242	0	0	0	0
unused reverse	182,327	174,032	-18,97	0	0	0	0
used abs	58,3641	55,2709	59,1864	0	0	0	0
used zcf	54,5823	49,608	46,1572	0	0	0	0
used reverse	50,8005	43,9452	33,128	0	0	0	0
postage stamp	58,2286	63,1079	60,9418	0	0	0	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	0	17,3234	0	0	0	0
unused abs	2,61	0	26,1469	0	0	0	0
unused zcf	2,61	0	10,0348	0	0	0	0
unused reverse	2,61	-0	-130	0	0	0	0
used abs	0	0	28,6348	0	0	0	0

used zcf	0	0	8,05722	0	0	0	0
used reverse	0	0	-12,52	0	0	0	0
postage stamp	0	0	27,7217	0	0	0	0

- Χρεώσεις παραγωγών μετά την εισαγωγή του UPFC:

Πίνακας 7.71: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 0% στους παραγωγούς μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

	GGDF(0%-100%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	0	0	0	0	0	0	0
unused abs	0	0	0	0	0	0	0
unused zcf	0	0	0	0	0	0	0
unused reverse	0	0	0	0	0	0	0
used abs	0	0	0	0	0	0	0
used zcf	0	0	0	0	0	0	0
used reverse	0	0	0	0	0	0	0
postage stamp	0	0	0	0	0	0	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	0	0	0	0	0	0
unused abs	0	0	0	0	0	0	0
unused zcf	0	0	0	0	0	0	0
unused reverse	0	0	0	0	0	0	0
used abs	0	0	0	0	0	0	0
used zcf	0	0	0	0	0	0	0
used reverse	0	0	0	0	0	0	0
postage stamp	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 7.72: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 30% στους παραγωγούς μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

	GGDF(30%-70%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	39,9835	35,5562	35,0497	0	0	7,0272	0
unused abs	34,6644	32,4643	31,3292	0	0	14,499	0
unused zcf	38,017	34,3574	31,3658	0	0	13,977	0
used abs	36,5281	32,8913	34,5859	0	0	9,2774	0
used zcf	34,265	29,5449	26,6849	0	0	4,6736	0
used reverse	32,0019	26,1985	18,7838	0	0	0,0698	0
postage stamp	37,5115	38,6998	35,8457	0	0	0	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	0	8,38334	0	0	0	0

unused abs	1,5	0	11,5348	0	0	0	0,0084
unused zcf	3	0	5,28295	0	0	0	0
used abs	0	0	14,5164	0	0	0	0
used zcf	0	0	3,93633	0	0	0	0
used reverse	0	0	-6,6437	0	0	0	0
postage stamp	0	0	13,9431	0	0	0	0

Πίνακας 7.73: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 50% στους παραγωγούς μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

	GGDF(50%-50%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	66,6392	59,2604	58,4161	0	0	11,712	0
unused abs	57,7739	54,1072	52,2153	0	0	24,165	0
unused zcf	63,3617	57,2623	52,2763	0	0	23,295	0
used abs	60,8801	54,8189	57,6432	0	0	15,462	0
used zcf	57,1084	49,2416	44,4748	0	0	7,7893	0
used reverse	53,3366	43,6642	31,3063	0	0	0,1163	0
postage stamp	62,5192	64,4996	59,7428	0	0	0	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	0	13,9722	0	0	0	0
unused abs	2,5	0	19,2246	0	0	0	0,014
unused zcf	5	0	8,80491	0	0	0	0
used abs	0	0	24,194	0	0	0	0
used zcf	0	0	6,56056	0	0	0	0
used reverse	0	0	-11,073	0	0	0	0
postage stamp	0	0	23,2384	0	0	0	0

- Χρέωσεις παραγωγών μετά την εισαγωγή του SSSC:

Πίνακας 7.74: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 0% στους παραγωγούς μετά την εισαγωγή του SSSC στο σύστημα

	GGDF(0%-100%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	0	0	0	0	0	0	0
unused abs	0	0	0	0	0	0	0
unused zcf	0	0	0	0	0	0	0
unused reverse	0	0	0	0	0	0	0
used abs	0	0	0	0	0	0	0
used zcf	0	0	0	0	0	0	0
used reverse	0	0	0	0	0	0	0
postage stamp	0	0	0	0	0	0	0

	8	9	10	11	12	13	14
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	0	0	0	0	0	0
unused abs	0	0	0	0	0	0	0
unused zcf	0	0	0	0	0	0	0
unused reverse	0	0	0	0	0	0	0
used abs	0	0	0	0	0	0	0
used zcf	0	0	0	0	0	0	0
used reverse	0	0	0	0	0	0	0
postage stamp	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 7.75: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 30% στους παραγωγούς μετά την εισαγωγή του SSSC στο σύστημα

	GGDF(30%-70%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	37,8274	35,789	35,6366	0	0	7,4198	0
unused abs	33,1881	32,9575	31,9124	0	0	14,964	0
unused zcf	37,2389	35,6464	32,4338	0	0	14,57	0
unused reverse	74,5917	71,1023	-24,666	0	0	0	0
used abs	34,397	32,9502	34,9961	0	0	9,7607	0
used zcf	32,2807	29,6084	26,9873	0	0	4,9111	0
used reverse	30,1645	26,2665	18,9786	0	0	0,0615	0
postage stamp	35,4045	38,865	36,2955	0	0	0	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	0	9,32718	0	0	0	0
unused abs	0,3544	0	12,6232	0	0	0	0
unused zcf	0	0	6,11113	0	0	0	0
unused reverse	-0,464	0	-18,575	0	0	0	0
used abs	0	0	16,0774	0	0	0	0
used zcf	0	0	4,35268	0	0	0	0
used reverse	0	0	-7,372	0	0	0	0
postage stamp	0	0	15,4351	0	0	0	0

Πίνακας 7.76: Χρέωση παραγωγών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GGDF για την περίπτωση χρέωσης 50% στους παραγωγούς μετά την εισαγωγή του SSSC στο σύστημα

	GGDF(50%-50%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	63,0456	59,6484	59,3944	0	0	12,366	0
unused abs	55,3135	54,9292	53,1874	0	0	24,941	0
unused zcf	62,0649	59,4106	54,0563	0	0	24,283	0
unused reverse	124,319	118,504	-41,11	0	0	0	0
used abs	57,3283	54,9171	58,3268	0	0	16,268	0

used zcf	53,8012	49,3473	44,9789	0	0	8,1852	0
used reverse	50,2741	43,7775	31,631	0	0	0,1025	0
postage stamp	59,0075	64,7749	60,4925	0	0	0	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	0	15,5453	0	0	0	0
unused abs	0,5906	0	21,0386	0	0	0	0
unused zcf	0	0	10,1852	0	0	0	0
unused reverse	-0,773	0	-30,958	0	0	0	0
used abs	0	0	26,7957	0	0	0	0
used zcf	0	0	7,25447	0	0	0	0
used reverse	0	0	-12,287	0	0	0	0
postage stamp	0	0	25,7251	0	0	0	0

- Χρεώσεις καταναλωτών χωρίς ευέλικτα συστήματα μεταφοράς:

Πίνακας 7.77: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 100% στους καταναλωτές χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

	GLDF(0%-100%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	0	7,5214	43,0891	79,786	10,4275	33,4862	0
unused abs	0	8,2927	46,8174	60,4854	8,64966	31,0558	0
unused zcf	0	3,4922	50,4487	43,5855	11,3268	27,21153	0
unused reverse	0	-25,456	75,9642	33,9234	-24,273	-296,342	0
used abs	0	6,6452	37,0681	62,974	8,40148	33,10695	0
used zcf	0	2,2578	18,6992	35,8166	5,92669	23,98044	0
used reverse	0	-2,1297	0,33026	8,65917	3,45189	14,85393	0
postage stamp	0	14,483	57,931	115,862	14,4828	28,96552	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	31,2102	39,524	39,6158	24,3183	56,7177	54,3038
unused abs	0	30,8085	34,5266	34,3104	35,7698	66,1506	63,1331
unused zcf	0	30,2204	37,1283	38,3582	29,4679	72,5671	76,1935
unused reverse	0	230,818	205,996	-45,279	-258,15	-508,36	1031,16
used abs	0	32,8022	47,4846	43,6784	28,5088	64,7545	63,641
used zcf	0	22,4255	41,8629	40,6185	21,7798	56,9168	59,6017
used reverse	0	12,0488	36,2412	37,5587	15,0509	49,0791	55,5623
postage stamp	0	28,9655	36,2069	36,2069	14,4828	36,2069	36,2069

Πίνακας 7.78: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 70% στους καταναλωτές χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

	GLDF(30%-70%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	0	5,265	30,1624	55,8502	7,29924	23,44034	0
unused abs	0	5,8049	32,7722	42,3398	6,05476	21,73906	0
unused zcf	0	2,4445	35,3141	30,5098	7,92876	19,04807	0
unused reverse	0	-17,819	53,1749	23,7464	-16,991	-207,44	0
used abs	0	4,6516	25,9477	44,0818	5,88103	23,17486	0
used zcf	0	1,5804	13,0894	25,0716	4,14868	16,78631	0
used reverse	0	-1,4908	0,23118	6,06142	2,41633	10,39775	0
postage stamp	0	10,138	40,5517	81,1034	10,1379	20,27586	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	21,8471	27,6668	27,731	17,0228	39,7024	38,0127
unused abs	0	21,566	24,1686	24,0173	25,0389	46,3054	44,1932
unused zcf	0	21,1543	25,9898	26,8507	20,6275	50,797	53,3355
unused reverse	0	161,573	144,197	-31,695	-180,71	-355,85	721,815
used abs	0	22,9615	33,2392	30,5749	19,9561	45,3282	44,5487
used zcf	0	15,6978	29,304	28,433	15,2459	39,8418	41,7212
used reverse	0	8,43417	25,3688	26,2911	10,5356	34,3554	38,8936
postage stamp	0	20,2759	25,3448	25,3448	10,1379	25,3448	25,3448

Πίνακας 7.79: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 50% στους καταναλωτές χωρίς τη χρήση κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς

	GLDF(50%-50%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	0	3,7607	21,5446	39,893	5,21374	16,7431	0
unused abs	0	4,1464	23,4087	30,2427	4,32483	15,5279	0
unused zcf	0	1,7461	25,2244	21,7927	5,6634	13,60577	0
unused reverse	0	-12,728	37,9821	16,9617	-12,136	-148,171	0
used abs	0	3,3226	18,5341	31,487	4,20074	16,55347	0
used zcf	0	1,1289	9,34959	17,9083	2,96334	11,99022	0
used reverse	0	-1,0648	0,16513	4,32959	1,72595	7,426967	0
postage stamp	0	7,2414	28,9655	57,931	7,24138	14,48276	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	15,6051	19,762	19,8079	12,1592	28,3589	27,1519
unused abs	0	15,4043	17,2633	17,1552	17,8849	33,0753	31,5666
unused zcf	0	15,1102	18,5641	19,1791	14,7339	36,2835	38,0968
unused reverse	0	115,409	102,998	-22,64	-129,08	-254,18	515,582
used abs	0	16,4011	23,7423	21,8392	14,2544	32,3773	31,8205

used zcf	0	11,2127	20,9314	20,3093	10,8899	28,4584	29,8008
used reverse	0	6,02441	18,1206	18,7793	7,52546	24,5395	27,7812
postage stamp	0	14,4828	18,1034	18,1034	7,24138	18,1034	18,1034

- Χρεώσεις καταναλωτών μετά την εισαγωγή του UPFC:

Πίνακας 7.80: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 100% στους καταναλωτές μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

	GLDF(0%-100%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	0	7,6227	42,8562	83,3149	14,3142	33,4226	0
unused abs	0	8,2288	47,2599	64,0361	11,5492	31,91199	0
unused zcf	0	4,7639	49,2675	46,2777	4,55947	29,60239	0
used abs	0	7,0687	38,6118	70,2377	11,6217	35,56027	0
used zcf	0	2,663	20,2507	41,0178	3,27854	25,74151	0
used reverse	0	-1,7427	1,88956	11,7979	-5,0646	15,92275	0
postage stamp	0	15,743	62,9709	125,942	20,7961	31,48544	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	30,1162	38,0961	39,1671	23,7006	55,2978	52,0917
unused abs	0	29,2032	33,1559	34,6585	35,3236	65,0596	59,6131
unused zcf	0	31,2725	35,5606	39,6745	29,9941	73,2197	75,8076
used abs	0	33,1182	48,0054	45,561	29,3629	66,7003	63,6506
used zcf	0	23,0347	42,7058	42,1844	22,4708	58,5431	60,2096
used reverse	0	12,9513	37,4063	38,8077	15,5787	50,3858	56,7685
postage stamp	0	31,4854	39,3568	39,3568	15,7427	39,3568	39,3568

Πίνακας 7.81: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 70% στους καταναλωτές μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

	GLDF(30%-70%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	0	5,3359	29,9993	58,3204	10,0199	23,39582	0
unused abs	0	5,7602	33,0819	44,8253	8,08444	22,33839	0
unused zcf	0	3,3347	34,4872	32,3944	3,19163	20,72167	0
used abs	0	4,9481	27,0282	49,1664	8,13517	24,89219	0
used zcf	0	1,8641	14,1755	28,7125	2,29498	18,01906	0
used reverse	0	-1,2199	1,32269	8,25853	-3,5452	11,14593	0
postage stamp	0	11,02	44,0796	88,1592	14,5573	22,03981	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	21,0813	26,6672	27,417	16,5904	38,7085	36,4642
unused abs	0	20,4423	23,2091	24,261	24,7265	45,5417	41,7292
unused zcf	0	21,8908	24,8924	27,7721	20,9959	51,2538	53,0653

used abs	0	23,1827	33,6038	31,8927	20,554	46,6902	44,5554
used zcf	0	16,1243	29,8941	29,5291	15,7296	40,9801	42,1467
used reverse	0	9,06591	26,1844	27,1654	10,9051	35,2701	39,738
postage stamp	0	22,0398	27,5498	27,5498	11,0199	27,5498	27,5498

Πίνακας 7.82: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 50% στους καταναλωτές μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα

	GLDF(50%-50%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	0	3,8114	21,4281	41,6574	7,15708	16,7113	0
unused abs	0	4,1144	23,63	32,0181	5,7746	15,95599	0
unused zcf	0	2,3819	24,6337	23,1388	2,27974	14,8012	0
used abs	0	3,5344	19,3059	35,1188	5,81084	17,78013	0
used zcf	0	1,3315	10,1253	20,5089	1,63927	12,87075	0
used reverse	0	-0,8714	0,94478	5,89895	-2,5323	7,961376	0
postage stamp	0	7,8714	31,4854	62,9709	10,3981	15,74272	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	15,0581	19,048	19,5835	11,8503	27,6489	26,0459
unused abs	0	14,6016	16,5779	17,3293	17,6618	32,5298	29,8065
unused zcf	0	15,6363	17,7803	19,8372	14,9971	36,6099	37,9038
used abs	0	16,5591	24,0027	22,7805	14,6815	33,3502	31,8253
used zcf	0	11,5174	21,3529	21,0922	11,2354	29,2715	30,1048
used reverse	0	6,47565	18,7031	19,4039	7,78937	25,1929	28,3843
postage stamp	0	15,7427	19,6784	19,6784	7,87136	19,6784	19,6784

- Χρέωσεις καταναλωτών μετά την εισαγωγή του SSSC:

Πίνακας 7.83: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 100% στους καταναλωτές μετά την εισαγωγή του SSSC στο σύστημα

	GLDF(0%-100%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	0	7,8186	42,613	83,5584	15,803	33,2271	0
unused abs	0	8,437	46,3528	65,0324	12,797	31,8285	0
unused zcf	0	5,0499	49,9996	48,3139	4,76544	29,7251	0
unused reverse	0	-13,83	90,0152	51,4142	8,93121	-40,214	0
used abs	0	7,3203	38,8343	71,2614	12,9869	35,1881	0
used zcf	0	2,6525	19,8168	40,4394	3,92484	25,2829	0
used reverse	0	-2,015	0,79929	9,61737	-5,1373	15,3776	0
postage stamp	0	15,815	63,259	126,518	22,8128	31,6295	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	29,807	37,5773	38,8876	23,619	55,08469	52,0042

unused abs	0	28,7097	32,8275	34,4963	35,2868	64,97796	59,2538
unused zcf	0	28,8952	36,1632	40,2872	30,0885	73,52043	73,1913
unused reverse	0	51,9486	75,2263	37,588	-66,3603	19,0579	206,227
used abs	0	32,9733	47,2705	45,0477	29,1766	66,23457	63,7382
used zcf	0	22,6897	41,9977	41,587	22,2414	57,96949	59,9127
used reverse	0	12,4062	36,7248	38,1263	15,3062	49,70441	56,0871
postage stamp	0	31,6295	39,5369	39,5369	15,8147	39,53685	39,5369

Πίνακας 7.84: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 70% στους καταναλωτές μετά την εισαγωγή του SSSC στο σύστημα

	GLDF(30%-70%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	0	5,4731	29,8291	58,4909	11,0621	23,259	0
unused abs	0	5,9059	32,447	45,5227	8,95793	22,28	0
unused zcf	0	3,535	34,9997	33,8198	3,33581	20,8076	0
unused reverse	0	-9,684	63,0107	35,9899	6,25185	-28,15	0
used abs	0	5,1242	27,184	49,8829	9,09085	24,6317	0
used zcf	0	1,8568	13,8717	28,3076	2,74739	17,698	0
used reverse	0	-1,411	0,55951	6,73216	-3,5961	10,7643	0
postage stamp	0	11,07	44,2813	88,5626	15,9689	22,1406	0
number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	20,8649	26,3041	27,2213	16,5333	38,55928	36,4029
unused abs	0	20,0968	22,9792	24,1474	24,7007	45,48457	41,4777
unused zcf	0	20,2267	25,3143	28,2011	21,062	51,4643	51,2339
unused reverse	0	36,364	52,6584	26,3116	-46,4522	13,34053	144,359
used abs	0	23,0813	33,0894	31,5334	20,4236	46,3642	44,6167
used zcf	0	15,8828	29,3984	29,1109	15,569	40,57864	41,9389
used reverse	0	8,68432	25,7074	26,6884	10,7143	34,79309	39,261
postage stamp	0	22,1406	27,6758	27,6758	11,0703	27,6758	27,6758

Πίνακας 7.85: Χρέωση καταναλωτών (σε κ€) βάσει των συντελεστών GLDF για την περίπτωση χρέωσης 50% στους καταναλωτές μετά την εισαγωγή του SSSC στο σύστημα

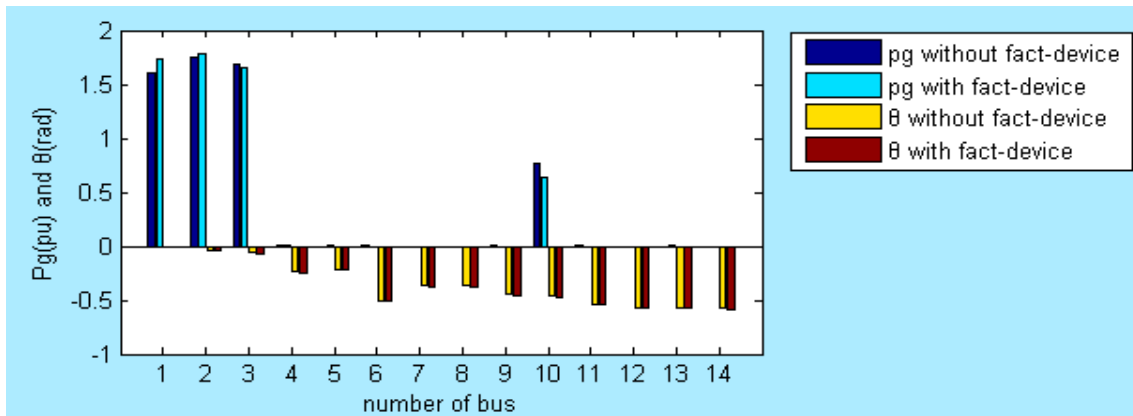
	GLDF(50%-50%)						
number of bus	1	2	3	4	5	6	7
mw-mile	0	3,9093	21,3065	41,7792	7,90151	16,6135	0
unused abs	0	4,2185	23,1764	32,5162	6,39852	15,9143	0
unused zcf	0	2,525	24,9998	24,157	2,38272	14,8626	0
unused reverse	0	-6,917	45,0076	25,7071	4,4656	-20,107	0
used abs	0	3,6602	19,4171	35,6307	6,49346	17,594	0
used zcf	0	1,3263	9,90839	20,2197	1,96242	12,6414	0
used reverse	0	-1,008	0,39965	4,80868	-2,5686	7,68881	0
postage stamp	0	7,9074	31,6295	63,259	11,4064	15,8147	0

number of bus	8	9	10	11	12	13	14
mw-mile	0	14,9035	18,7887	19,4438	11,8095	27,54234	26,0021
unused abs	0	14,3549	16,4137	17,2482	17,6434	32,48898	29,6269
unused zcf	0	14,4476	18,0816	20,1436	15,0443	36,76021	36,5957
unused reverse	0	25,9743	37,6131	18,794	-33,1802	9,528951	103,114
used abs	0	16,4866	23,6353	22,5238	14,5883	33,11728	31,8691
used zcf	0	11,3449	20,9988	20,7935	11,1207	28,98475	29,9563
used reverse	0	6,20309	18,3624	19,0632	7,65309	24,85221	28,0436
postage stamp	0	15,8147	19,7684	19,7684	7,90737	19,76843	19,7684

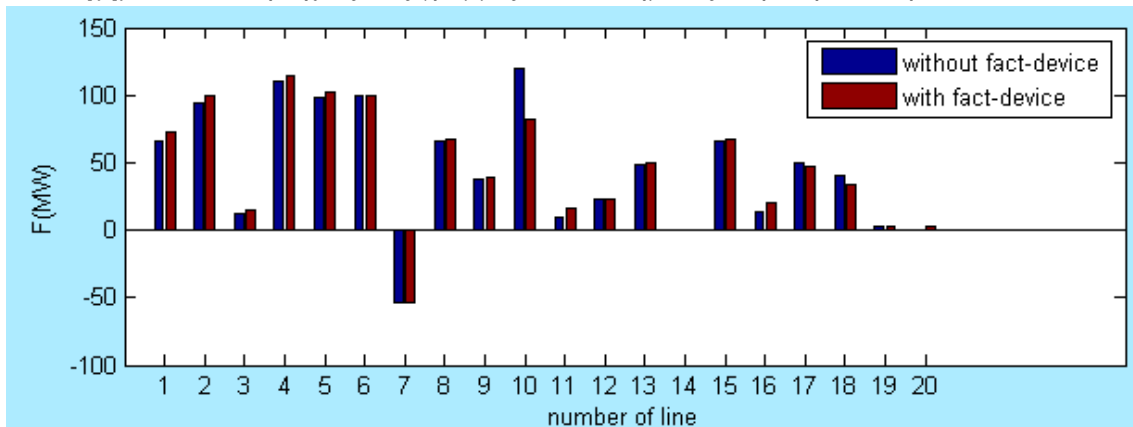
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε κάποιες περιπτώσεις παραλείπεται η μέθοδος unused reverse καθώς αυτή δεν μπορούσε να δώσει ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα του επιμερισμού του κόστους μεταφοράς για αυτές τις περιπτώσεις.

Τέλος, παρατίθενται πέντε γραφήματα που δείχνουν σχηματικά την επίδραση της χρησιμοποίησης του UPFC στις διάφορες παραμέτρους του συστήματος 14-ζυγών RTS του IEEE. Να σημειωθεί ότι δεν παρατίθενται τα αντίστοιχα γραφήματα για την περίπτωση του SSSC καθώς οι διαφορές τους με τα γραφήματα που αναφέρονται στο UPFC είναι μικρές και δεν μπορούν να φανούν σχηματικά.

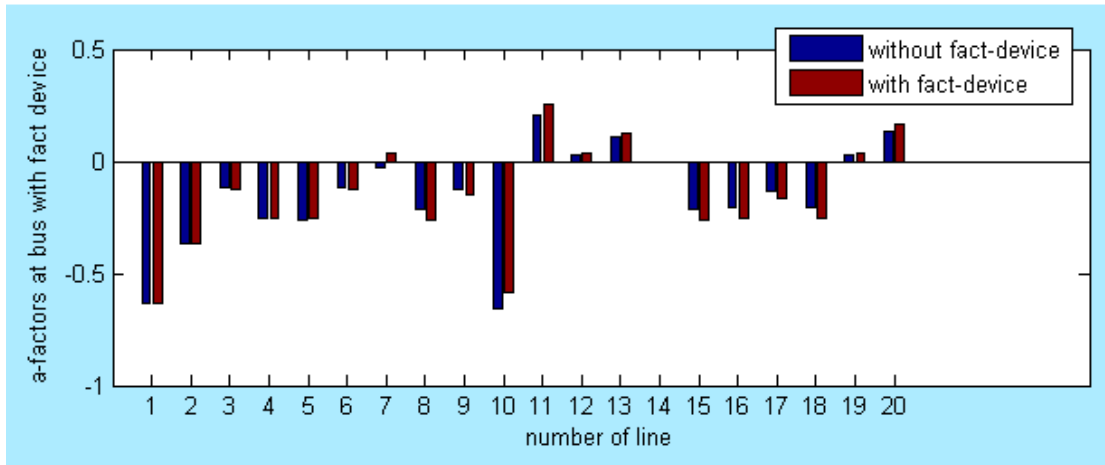
Σχήμα 7.12: Παραγωγή γεννητριών και γωνίες τάσεων στους ζυγούς στην περίπτωση του UPFC



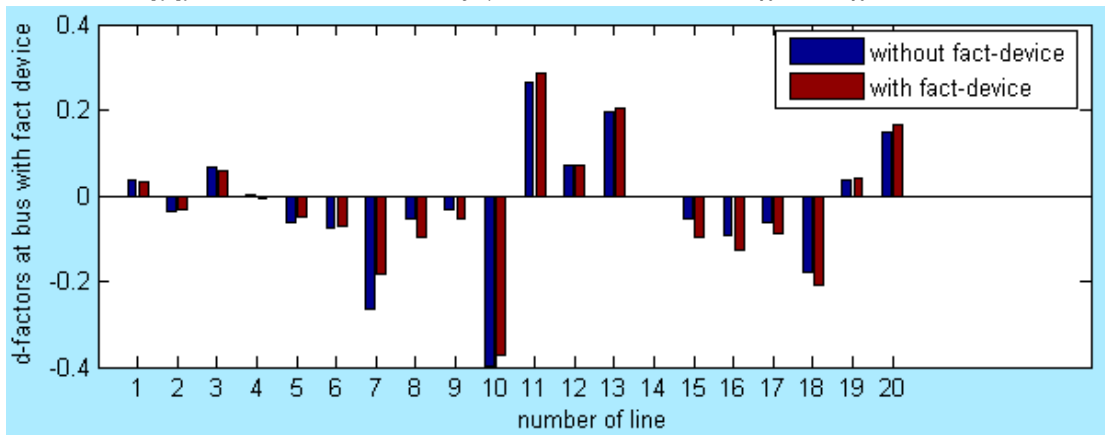
Σχήμα 7.13: Ροή ισχύος στις γραμμές του συστήματος στην περίπτωση του UPFC



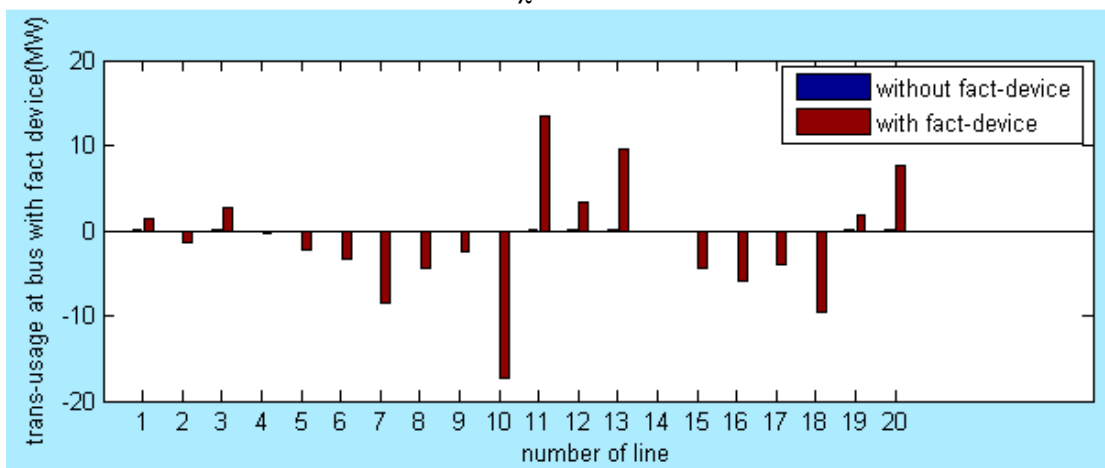
Σχήμα 7.14: A-factors του ζυγού κοντά στον οποίο έχει εισαχθεί UPFC



Σχήμα 7.15: D-factors του ζυγού κοντά στον οποίο έχει εισαχθεί UPFC



Σχήμα 7.16: Transmission usage λόγω των d-factors του ζυγού κοντά στον οποίο έχει εισαχθεί UPFC



7.3.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων χρησιμοποίησης UPFC

Για την περίπτωση χρησιμοποίησης UPFC στο σύστημα των 14 ζυγών RTS του IEEE προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η συμμόρφωση στη γραμμή 5-6 εξαλείφθηκε με την χρήση του UPFC. Αυτό φαίνεται και στον Πίνακα 7.86.

Πίνακας 7.86: Αντιμετώπιση της συμμόρφωσης στη γραμμή 5-6 του συστήματος 14 ζυγών RTS του IEEE με χρήση του UPFC

line	Limit	F^0 (MW)	F^1 (MW)
5-6	120	120	82,464

2. Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 7.87 που παρουσιάζεται στη συνέχεια, οι πιο οικονομικές γεννήτριες είναι οι G_1 και G_2 ενώ οι πιο δαπανηρές είναι οι G_3 και G_{10} . Μετά την εισαγωγή του UPFC στο σύστημα, η παραγωγή των γεννητριών G_1 και G_2 αυξάνεται ενώ των γεννητριών G_3 και G_{10} μειώνεται (Πίνακας 7.88). Με τον τρόπο αυτό, το UPFC επιτυγχάνει μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φαίνεται στον πίνακα 7.89. Συγκεκριμένα, η μείωση αυτή είναι 62,568\$/h (8429,105\$/h – 8366,537\$/h). Σε συστήματα υψηλότερης πολυπλοκότητας διασύνδεσης, όπως είναι τα πραγματικά ΣΗΕ, η μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής που επιτυγχάνεται με την χρησιμοποίηση του UPFC αναμένεται να είναι μεγαλύτερη.

Πίνακας 7.87: Συντελεστές κόστους ζυγών του συστήματος 14 ζυγών RTS του IEEE

number of bus	$P_g \text{ min}(\text{pu})$	$P_g \text{ max}(\text{pu})$	$P_{\text{load}}(\text{pu})$	a(\$)	b(\$/MW)	c(\$/MW ²)
1	0,5	2	0	213,1	11,669	0,00533
2	0,375	2,5	0,2	200	10,333	0,00889
3	0,45	3	0,8	240	10,833	0,00741
10	0,2	2	0,5	300	16,752	0,01274

Πίνακας 7.88: Παραγωγή γεννητριών G_1 , G_2 , G_3 και G_{10} πριν και μετά την εισαγωγή UPFC στο σύστημα

	G_1	G_2	G_3	G_{10}
P_G^0	1,6082	1,7429	1,6832	0,7656
P_G^1	1,7267	1,7814	1,65	0,6418

Πίνακας 7.89: Συνολικό κόστος παραγωγής

	TC (\$/h)
ΣΗΕ χωρίς FACTS-device	8429,105
ΣΗΕ με UPFC	8366,537

3. Η ροή ισχύος στις γραμμές 1-2, 1-5, 2-3, 2-4 και 2-5 αυξάνεται γεγονός που συμβαίνει έτσι ώστε να οδηγηθούν οι γεννήτριες G_1 και G_2 σε μεγαλύτερη παραγωγή για να καλύψουν με τον πιο οικονομικό τρόπο τις ανάγκες των φορτίων που βρίσκονται στους ζυγούς 2, 3, 4 και 5. Αντίθετα, η ροή ισχύος στη γραμμή 10-11 μειώνεται ώστε να οδηγηθεί η δαπανηρή γεννήτρια G_{10} σε μικρότερη παραγωγή. Με άλλα λόγια επιλέγονται οι οικονομικά πιο συμφέρουσες συναλλαγές μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών.

Πίνακας 7.90: Ροή ισχύος σε διάφορες γραμμές του συστήματος 14 ζυγών RTS του IEEE πριν και μετά την εισαγωγή UPFC σε αυτό

line	Limit	F^0 (MW)	F^1 (MW)
1-2	100	66,2579	73,2676
1-5	150	94,5639	99,4044
2-3	100	11,6846	14,9962
2-4	150	110,119	113,837
2-5	150	98,7523	102,576
10-11	50	40,4075	34,1824

4. Διαπιστώνεται συμφόρηση στη γραμμή 9-10 γεγονός που δημιουργεί πρόσθετα κόστη συμφόρησης ενώ παράλληλα η δαπανηρή γεννήτρια G_{10} οδηγείται σε μεγαλύτερη παραγωγή (Πίνακας 7.91). Βέβαια, συνολικά το σύστημα λειτουργεί με πιο οικονομικό τρόπο, γεγονός που φαίνεται από τη συνολική παραγωγή των γεννητριών του συστήματος.

Πίνακας 7.91: Συμφόρηση στη γραμμή 9-10 του συστήματος 14 ζυγών RTS του IEEE λόγω της εισαγωγής UPFC

line	Limit	F^0 (MW)	F^1 (MW)
9-10	20	13,8428	20

5. Γενικά, διαπιστώνεται ότι με την χρήση του UPFC εξακολουθούν να τηρούνται τα όρια ισχύος που μπορεί να αντέξει η κάθε γραμμή ενώ παράλληλα επιλέγονται οι οικονομικά πιο συμφέρουσες συναλλαγές.
6. Επίσης παρατηρείται κάποια μεταβολή τόσο στους A-factors όσο και στους D-factors λόγω της εισαγωγής του UPFC στο σύστημα. Η μεταβολή αυτή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την κοστολόγηση κάθε χρήστη του συστήματος ώστε αυτή η διαδικασία να είναι δικαιότερη.
7. Η χρήση του συστήματος από κάθε χρήστη του (transmission usage) μεταβάλλεται. Αυτό είναι λογικό αν λάβουμε υπόψη μας ότι αλλάζουν οι ροές ισχύος στις γραμμές του συστήματος.
8. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται και η τιμολόγηση των υπηρεσιών μεταφοράς για κάθε χρήστη του συστήματος (παραγωγό ή καταναλωτή).

7.3.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων χρησιμοποίησης SSSC

Για την περίπτωση χρησιμοποίησης SSSC στο σύστημα των 14 ζυγών RTS του IEEE προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Και σε αυτή την περίπτωση, η συμφόρηση στη γραμμή 5-6 επαλείφθηκε (Πίνακας 7.92).

Πίνακας 7.92: Αντιμετώπιση της συμφόρησης στη γραμμή 5-6 του συστήματος 14 ζυγών RTS του IEEE με χρήση του SSSC

line	Limit	F^0 (MW)	F^2 (MW)
5-6	120	120	78,813

2. Και σε αυτή την περίπτωση, η παραγωγή των πιο οικονομικών γεννητριών G_1 και G_2 αυξάνεται ενώ των πιο δαπανηρών G_3 και G_{10} μειώνεται (Πίνακας 7.93). Παρόλα αυτά, παρατηρείται ότι οι μεταβολές στις παραγωγές των γεννητριών είναι μικρότερες από ότι ήταν στην περίπτωση χρησιμοποίησης UPFC. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτει το συμπέρασμα ότι με τη χρήση του SSSC μειώνεται το κόστος παραγωγής αλλά σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με την περίπτωση του UPFC. Με άλλα λόγια, το UPFC, λόγω του συνδυασμού της εν σειρά και εγκάρσιας αντιστάθμισης που προσφέρει, λειτουργεί αποδοτικότερα στο πιο μεγάλο σύστημα των 14 ζυγών RTS του IEEE σε σχέση με το SSSC. Στον Πίνακα 7.94 παρουσιάζεται το συνολικό κόστος παραγωγής για την περίπτωση εισαγωγής ή όχι του SSSC στο σύστημα των 14 ζυγών RTS του IEEE. Η μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής που επιτυγχάνεται με τη χρήση του SSSC είναι 28,405\$/h (8429.105\$/h – 8400,7\$/h) και είναι πράγματι αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη μείωση που αναφέρεται στο UPFC (62,568\$/h).

Πίνακας 7.93: Παραγωγή γεννητριών G_1 , G_2 , G_3 και G_{10} πριν και μετά την εισαγωγή SSSC στο σύστημα

	G_1	G_2	G_3	G_{10}
P_G^0	1,6082	1,7429	1,6832	0,7656
P_G^1	1,6297	1,789	1,6707	0,7105

Πίνακας 7.94: Συνολικό κόστος παραγωγής

	TC (\$)
ΣΗΕ χωρίς FACTS-device	8429,105
ΣΗΕ με SSSC	8400,7

3. Παρατηρείται πολύ μικρή αύξηση της ροής ισχύος των γραμμών 1-2, 1-5, 2-3, 2-4 και 2-5 και πολύ μικρή μείωση της ροής της γραμμής 10-11. Επομένως, οι γεννήτριες G_1 και G_2 οδηγούνται σε ελαφρώς μεγαλύτερη παραγωγή για να καλύψουν με τον πιο οικονομικό τρόπο τις ανάγκες των φορτίων που βρίσκονται στους ζυγούς 2, 3, 4 και 5 ενώ αντίθετα, η δαπανηρή γεννήτρια G_{10} οδηγείται σε ελαφρώς μικρότερη παραγωγή. Με άλλα λόγια, προκύπτει το συμπέρασμα ότι

επιλέγονται οι οικονομικά πιο συμφέρουσες συναλλαγές μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών αλλά σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με την περίπτωση χρησιμοποίησης του UPFC. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στον πίνακα 7.95.

Πίνακας 7.95: Ροή ισχύος σε διάφορες γραμμές του συστήματος 14 ζυγών RTS του IEEE πριν και μετά την εισαγωγή SSSC σε αυτό

line	Limit	F ⁰ (MW)	F ² (MW)
1-2	100	66,2579	66,559
1-5	150	94,5639	96,414
2-3	100	11,6846	12,926
2-4	150	110,119	111,51
2-5	150	98,7523	101,02
10-11	50	40,4075	35,403

4. Σε αντίθεση με την περίπτωση του UPFC, αποφεύγεται η συμφόρηση στη γραμμή 9-10 και με αυτό τον τρόπο η δαπανηρή γεννήτρια G₁₀ διατηρεί σε χαμηλά επίπεδα την παραγωγή της ενώ παράλληλα μετριάζονται τα πρόσθετα κόστη συμφόρησης (Πίνακας 7.96).

Πίνακας 7.96: Ροή ισχύος στη γραμμή 9-10 του συστήματος 14 ζυγών RTS του IEEE πριν και μετά την εισαγωγή SSSC

line	Limit	F ⁰ (MW)	F ² (MW)
9-10	20	13,8428	14,353

5. Γενικά, διαπιστώνεται ότι με την χρήση του SSSC εξακολουθούν να τηρούνται τα όρια ισχύος που μπορεί να αντέξει η κάθε γραμμή ενώ παράλληλα επιλέγονται οι οικονομικά πιο συμφέρουσες συναλλαγές.
6. Όμοια με την περίπτωση του UPFC, διαπιστώνεται κάποια μεταβολή τόσο στους A-factors όσο και στους D-factors λόγω της εισαγωγής του SSSC στο σύστημα. Η μεταβολή αυτή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την κοστολόγηση κάθε χρήστη του συστήματος ώστε αυτή η διαδικασία να είναι δικαιότερη.
7. Επιπλέον, η χρήση του συστήματος από κάθε χρήστη του (transmission usage) μεταβάλλεται. Αυτό είναι λογικό αν λάβουμε υπόψη μας ότι αλλάζουν οι ροές ισχύος στις γραμμές του συστήματος.
8. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται και η τιμολόγηση των υπηρεσιών μεταφοράς για κάθε χρήστη του συστήματος (παραγωγό ή καταναλωτή).
9. Συνολικά, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το SSSC βελτιώνει τη λειτουργία του συστήματος 14 ζυγών RTS του IEEE αλλά σε μικρότερο βαθμό από ότι το UPFC.

7.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [7.1] M. Alomoush, "Derivation of UPFC DC load flow model with examples of its use in restructured power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 3, pp. 1173-1180, 2003.
- [7.2] M. Alomoush, "Impacts of UPFC on line flows and transmission usage," *Electric Power Systems Research*, vol. 71, no 3, pp. 223-234, 2004.
- [7.3] M. Alomoush, "Modeling of Static Synchronous Series Compensator for Energy Markets Approximate Calculations," in *Basic Sciences & Engineering – Refereed research Journal*, Editor: Abhath Al-Yarmouk, July 2009.
- [7.4] "Power Systems Test Case Archive," [Online]. Διαθέσιμο:
<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>, προσπελάστηκε τον Ιούλιο 2011.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Σύνοψη της εργασίας

Στις σύγχρονες ανταγωνιστικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, η εγκατάσταση ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς μπορεί να αυξήσει τα όρια μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και, εν γένει, να βελτιώσει τη λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς αλλάζουν τις παραμέτρους του συστήματος στο οποίο εισάγονται και ελέγχουν την ροή ισχύος των γραμμών του, βοηθώντας το έτσι να λειτουργεί εντός των φυσικών του ορίων. Με τον τρόπο αυτό, αυξάνεται η αξιοπιστία και η ευστάθεια του συστήματος και μειώνονται οι οικονομικές απώλειες λόγω συμφόρησης.

Η αλλαγή στις ροές των γραμμών, λόγω της εισαγωγής των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς, έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της χρησιμοποίησης των γραμμών από τους χρήστες του συστήματος. Επομένως, η μεταβολή αυτή θα πρέπει να συνυπολογιστεί προκειμένου η διαδικασία τιμολόγησης των χρηστών (παραγωγών ή καταναλωτών) να είναι δικαιότερη. Είναι συνήθης πρακτική να χρησιμοποιούνται οι συντελεστές κατανομής για τον επιμερισμό του κόστους μεταφοράς στους χρήστες του συστήματος.

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκαν δύο ευέλικτα συστήματα μεταφοράς, ο ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος (Unified Power Flow Controller – UPFC) και ο ελεγχόμενος σύγχρονος αντισταθμιστής σειράς (Static Synchronous Series Compensator - SSSC). Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οι επιδράσεις αυτών των συστημάτων στις παραμέτρους του δικτύου, στις ροές των γραμμών, στους συντελεστές κατανομής και στη χρησιμοποίηση του συστήματος μεταφοράς από τους χρήστες του και ακολούθως έγινε επιμερισμός του κόστους μεταφοράς. Αρχικά, λύθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου για τις περιπτώσεις χρήσης UPFC, SSSC, καθώς και για την περίπτωση μη χρησιμοποίησης κάποιου ευέλικτου συστήματος μεταφοράς στο σύστημα. Από τη λύση του προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου προσδιορίστηκαν οι παραγωγές ενεργού ισχύος των γεννητριών προκειμένου να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος παραγωγής τους. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο που υπολογίζει τις μεταβολές στις ροές των γραμμών και στη χρησιμοποίηση του συστήματος μεταφοράς από τους χρήστες του λόγω της εισαγωγής UPFC ή SSSC στο σύστημα. Βάσει αυτού του μαθηματικού μοντέλου, αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον MATLAB που μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ανεξαρτήτως της τοπολογίας αυτών. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται στην περίπτωση εισαγωγής UPFC ή SSSC στο υπό μελέτη σύστημα, όμως με κατάλληλες τροποποιήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς. Τέλος, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το λογισμικό εφαρμόστηκε σε σύστημα 4 ζυγών καθώς και στο σύστημα 14 ζυγών RTS του IEEE. Τα αποτελέσματα του λογισμικού για τα δύο συστήματα και για τις περιπτώσεις εισαγωγής UPFC ή SSSC παρατέθηκαν και σχολιάστηκαν.

8.2 Συμπεράσματα της εργασίας

Η εφαρμογή του αναπτυχθέντος λογισμικού στο σύστημα 4 ζυγών και στο σύστημα 14 ζυγών RTS του IEEE ανέδειξε τη σημασία της χρησιμοποίησης του UPFC και του SSSC στα συστήματα μεταφοράς. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή του UPFC και του SSSC συντέλεσε στην αλλαγή της παραγωγής των γεννητριών των συστημάτων που μελετήθηκαν με αποτέλεσμα οι πιο δαπανηρές γεννήτριες να παράγουν λιγότερο και οι πλέον οικονομικές να παράγουν περισσότερο, και επομένως να καλύπτεται η ίδια ζήτηση με μικρότερο κόστος. Επιπλέον, τα ευέλικτα αυτά συστήματα άλλαξαν τη ροή ισχύος των γραμμών του συστήματος προωθώντας έτσι τις οικονομικά πιο συμφέρουσες συναλλαγές μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών. Τέλος, η συμφόρηση σε κάποιες γραμμές αντιμετωπίστηκε και επομένως η λειτουργία των συστημάτων μεταφοράς βελτιώθηκε.

Παράλληλα, μελετήθηκε η μεταβολή των συντελεστών κατανομής και της χρησιμοποίησης του συστήματος μεταφοράς από τους χρήστες του. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε κάποια μεταβολή τόσο στους A-factors όσο και στους D-factors λόγω της εισαγωγής του UPFC και του SSSC στο σύστημα ενώ μεταβλήθηκε και η χρήση του συστήματος από κάθε χρήστη του (transmission usage). Οι μεταβολές αυτές ελήφθησαν υπόψη κατά τον επιμερισμό του κόστους μεταφοράς σε κάθε χρήστη του συστήματος ώστε η διαδικασία αυτή να γίνει δικαιότερη.

Όσον αφορά στη σύγκριση της αποτελεσματικότητας του UPFC και του SSSC κατά την εφαρμογή τους στα συστήματα μεταφοράς 4 και 14 ζυγών, διαπιστώθηκε ότι δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές όταν η πολυπλοκότητα διασύνδεσης του συστήματος που μελετάται είναι χαμηλή (σύστημα 4 ζυγών). Αντίθετα, στα συστήματα μεταφοράς με μεγαλύτερη πολυπλοκότητα διασύνδεσης (σύστημα 14 ζυγών) φαίνεται ότι αφενός το SSSC βελτιώνει τη λειτουργία του συστήματος στο οποίο εισάγεται αλλά, αφετέρου αυτό γίνεται σε μικρότερο βαθμό από ότι στην περίπτωση εισαγωγής του UPFC.

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στην παρούσα εργασία μελετήθηκε μόνο η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας των συστημάτων και όχι κάποια μεταβατική κατάσταση. Έτσι, δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα για την ταχύτητα απόκρισης του UPFC και του SSSC στις δυναμικές ταλαντώσεις του συστήματος καθώς και το αν και κατά πόσο τα ευέλικτα αυτά συστήματα βελτιώνουν την ευστάθεια του συστήματος στο οποίο εισάγονται.

Η εφαρμογή του λογισμικού σε άλλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας θα βοηθήσει στην εξαγωγή περισσότερων συμπερασμάτων.

8.3 Επεκτάσεις της εργασίας

Μέσω του αναπτυχθέντος λογισμικού, μπορούν να μελετηθούν και άλλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, πέραν του συστήματος 4 ζυγών και του συστήματος των 14 ζυγών RTS του IEEE, και να εξαχθούν πολύτιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία των UPFC και SSSC σε αυτά.

Επίσης, με κατάλληλες τροποποιήσεις, το λογισμικό μπορεί να εφαρμοστεί και για άλλα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς εκτός του UPFC και του SSSC.

Επιπλέον, στον υπολογισμό της βέλτιστης ροής φορτίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο της ac ροής φορτίου και να συνυπολογιστούν οι απώλειες στις γραμμές μεταφοράς.

Βάσει της μοντελοποίησης που προτείνεται για τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς, θα μπορούσε ακόμα να μελετηθεί η ταχύτητα απόκρισής τους σε δυναμικές ταλαντώσεις και η επίδρασή τους στην ευστάθεια του συστήματος.

Μια επιπρόσθετη πιθανή επέκταση της εργασίας είναι να γίνει επιμερισμός του κόστους μεταφοράς και με άλλες μεθόδους που δεν θα βασίζονται στους συντελεστές κατανομής όπως αυτοί υπολογίζονται από το αναπτυχθέν λογισμικό, ώστε να μπορούν να γίνουν συγκρίσεις των τιμολογήσεων των διαφορετικών μεθόδων.

Τέλος, με κατάλληλες τροποποιήσεις, το λογισμικό θα μπορούσε να υπολογίζει τις τοπικές οριακές τιμές (LMP - Locational Marginal Price) σε κάθε ζυγό του υπό μελέτη συστήματος καθώς και το συνολικό κόστος συμφόρησης (TCC - Total Congestion Cost). Σε αυτή την περίπτωση, το κόστος συμφόρησης θα μπορούσε να αφαιρεθεί από το ετήσιο συνολικό κόστος του συστήματος και να επιμεριστεί με διαφορετική μέθοδο τιμολόγησης.

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

A.1 ΕΛΛΗΝΙΚΑ

ΣΗΕ : Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας
α.μ. : ανά μονάδα

A.2 ΑΓΓΛΙΚΑ

DC : Direct Current
AC : Alternating Current
RTS : Reliability Test System
IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers
GSDF : Generation Shift Distribution Factors
GGDF : Generalized Generation Distribution Factors
GLDF : Generalized Load Distribution Factors
STATCOM: Static Series Compensator
SSSC : Static Synchronous Series Compensator
TC : Total Cost
TCC : Total Congestion Cost
TIC : Total Investment Cost
UPFC : Unified Power Flow Controller
OPF : Optimal Power Flow
LMP : Locational Marginal Price
GUIDE : Graphical User Interface Design Environment
pu : per unit

