

Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Μεθοδολογία βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων για την εύρεση της βέλτιστης θέσης και των βέλτιστων ρυθμίσεων ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΟΙΒΟΣ Χ. ΠΑΛΑΙΟΓΙΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2010



Εθνικό Μετσοβίο Πολυτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Μεθοδολογία βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων για την εύρεση της βέλτιστης θέσης και των βέλτιστων ρυθμίσεων ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΟΙΒΟΣ Χ. ΠΑΛΑΙΟΓΙΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης Λέκτορας ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29η Οκτωβρίου 2010

..... Παύλος Γεωργιλάκης Λέκτορας ΕΜΠ

..... Κωνσταντίνος Βουρνάς Καθηγητής ΕΜΠ Γεώργιος Κορρές Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

.....

Φοίβος Χ. Παλαιογιάννης

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

Copyright © Φοίβος Παλαιογιάννης 2010

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.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στο πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς και των βέλτιστων ρυθμίσεων αυτών με σκοπό τη μεγιστοποίση της φόρτισης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης των ευέλικτων συσημάτων μεταφοράς. Το θερμικό όριο των γραμμών και τα όρια των τάσεων των ζυγών συνιστούν τους περιορισμούς του προβλήματος.

Στην εργασία αυτή αναπτύσσεται κατάλληλο λογισμικό που υλοποιεί τη μέθοδο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization Technique) με σκοπό την επίλυση του εν λόγω προβλήματος βελτιστοποίησης. Εξετάζονται οι περιπτώσεις εγκατάστασης τριών ειδών ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς, TCSC, SVC και UPFC καθώς, επίσης, και ο συνδυασμός αυτών (Multi-type). Για κάθε μια από τις τέσσερις περιπτώσεις πραγματοποιούνται προσομοιώσεις σε συστήματα 6, 30 και 118 ζυγών με σκοπό να συγκριθούν οι επιδόσεις τους στη βελτιστοποίηση του προβλήματος.

Λέξεις Κλειδιά

Μέθοδος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς, Μέγιστη Φόρτιση Συστήματος, Κόστος Εγκατάστασης, TCSC, SVC, UPFC.

Abstract

The present thesis focuses on the problem of finding the optimal location and settings of flexible AC transmission systems in order to maximize the loadability of the electical power system and to minimize the cost of installation of FACTS devices. The thermal limit of the lines and the bus voltage limits are the constraints of the current problem.

In this thesis, the appropriate software is developed, which implements the particle swarm optimization technique in order to solve the current optimization problem. Three different types of FACTS devices are being used, TCSC, SVC, and UPFC. Combinations of these FACTS types are, also, being considered (Multi-type). For each of the four types (TCSC, SVC, UPFC, Multi-type) simulations on 6, 30 and 118 bus systems are being carried out in order to compare their performance in optimizing the problem.

Keywords

Particle Swarm Optimization Technique, Flexible AC Transmission Systems, Maximum System Loadability, Installation Cost, TCSC, SVC, UPFC.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Παύλο Γεωργιλάκη για το ενδιαφέρον του, τις συμβουλές του και το χρόνο που αφιέρωσε κατά τη διάρκεια της συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας.

Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους γονείς μου και την αδερφή μου που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια της φοίτησής μου, καθώς και όλα τα κοντινά και αγαπημένα μου πρόσωπα.

<u>HEPIEXOMENA</u>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς	15
1.2	Αντικείμενο της εργασίας και διατύπωση του προβλήματος	16
1.3	Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας	17
1.4	Δομή της εργασίας	17
1.5	Βιβλιογραφία	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΤΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥΣ

2.1	Εισαγωγή	21
2.2	Γενικά στοιχεία για τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς	. 21
2.3	Τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς TCSC, SVC και UPFC	. 24
	2.3.1 Στατικός αντισταθμιστής αέργου ισχύος – Static Var Compensatior (SVC)	. 24
	2.3.2 Πυκνωτές σειράς ελεγχόμενοι από θυρίστορ – Thyristor Controlled series capacitors (TCSC)	25
	2.3.3 Ενοποιημένος ρυθμιστής ελέγχου ισχύος – Unified Power Flow Controller (UPFC)	27
2.4	Διατύπωση του προβλήματος της εύρεσης της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς	. 29
	2.4.1 Αντικειμενική συνάρτηση προβλήματος βελτιστοποίησης	. 29
	2.4.2 Μεταβλητές σχεδίασης προβλήματος βελτιστοποίησης	. 32
	2.4.3 Περιορισμοί προβλήματος βελτιστοποίησης	35
	2.4.4 Διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης	. 38
2.5	Βιβλιογραφία	. 38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (ΒΣΣ)

3.1	Εισαγωγή	41
3.2	Παρουσίαση της μεθόδου ΒΣΣ	41
3.3	Παράμετροι ελέγχου μεθόδου ΒΣΣ	44
	3.3.1 Μέγεθος σμήνους	44
	3.3.2 Μέγιστη ταχύτητα	45
	3.3.3 Αριθμός επαναλήψεων	45
	3.3.4 Συντελεστές επιτάχυνσης	45
	3.3.5 Συντελεστής αδράνειας	46

	3.3.6 Κριτήριο τερματισμού	46
3.4	Εφαρμογή της μεθόδου ΒΣΣ για την επίλυση του υπο μελέτη προβλήματος	47
	3.4.1 Οι τροποποιημένες τεχνικές PSO-TVIW και PSO-TVAC	47
	3.4.2 Εισαγωγή των μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος στη μέθοδο ΒΣΣ	49
	3.4.3 Εισαγωγή περιορισμών και συνάρτηση καταλληλότητας	49
3.5	Βιβλιογραφία	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

4.1	Εισαγωγή	55
4.2	Παρουσιάση προτεινόμενης μεθόδου για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης σε προγραμματιστικό επίπεδο	55
	4.2.1 Αναλυτική περιγραφή μεθοδολογίας	55
	4.2.2 Περιγραφή ρουτινών και κύριων στοιχείων του λογισμικού που αναπτύχθηκε	61
4.3	Το περιβάλλον ανάπτυξης και οι απαιτήσεις του συστήματος	68
4.4	Περιβάλλον διεπαφής προγράμματος με χρήστη	68
	4.4.1 Το γραφικό περιβάλλον χρήστη interf	68
	4.4.2 Εισαγωγή δεδομένων από το χρήστη	71
	4.4.3 Εζαγωγή αποτελεσμάτων προς το χρήστη	74
4.5	Μελλοντικές επεκτάσεις λογισμικού	80
4.6	Βιβλιογραφία	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

5.1	Εισαγωγή	83
5.2	Προσομοίωση σε σύστημα 6 ζυγών	83
	5.2.1 Δεδομένα του συστήματος	83
	5.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	84
	5.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	86
5.3	Προσομοίωση σε σύστημα 30 ζυγών	87
	5.3.1 Δεδομένα του συστήματος	87
	5.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	90
	5.3.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	92
5.4	Προσομοίωση σε σύστημα 118 ζυγών	93
	5.4.1 Δεδομένα του συστήματος	93
	5.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	101
	5.4.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	105
	5.4.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	Ì

5.5	Σύνοψη	106
5.6	Βιβλιογραφία	107

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1	Γενικά συμπεράσματα	109
-----	---------------------	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται παγκοσμίως μια αλματώδης αύξηση στη ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου με άμεσο επακόλουθο την απαίτηση για αντίστοιχη αύξηση της παραγωγής. Το γεγονός αυτό, η αύξηση δηλαδή της συνολικής διακινούμενης ισχύος, σε συνδυασμό με τους διάφορους περιορισμούς που παρουσιάζει η διακίνηση αυτής και τις δυσκολίες που ανακύπτουν (οικονομοτεχνικές, περιβαλλοντικές, χωροταξικές κ.α.) κατά την επέκταση και αναβάθμιση του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για τον όσο το δυνατόν καλύτερο έλεγχο της ροής ισχύος. Η ανάγκη αυτή γίνεται ακόμη μεγαλύτερη δεδομένης της τάσης για απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας που έχει ως συνέπεια την ύπαρξη πολλών παραγωγών/παρόχων και πολύπλοκων σχέσεων με τους πελάτες/καταναλωτές.

Μέχρι πρόσφατα, ο έλεγχος της ροής ισχύος στηριζόταν κυρίως στον έλεγχο των γεννητριών, στη ρύθμιση της τάσης μέσω μετασχηματιστών ρύθμισης τάσης και μετασχηματιστών αλλαγής φάσης, στην αντιστάθμιση αέργου ισχύος με χρήση σύγχρονων πυκνωτών και συστοιχιών πυκνωτών, κ.α. Οι μέθοδοι αυτές, ωστόσο, αφενός μεν παρουσιάζουν σημαντικές δυσκολίες ελέγχου αφετέρου έχουν περιορισμένες δυνατότητες και λειτουργίες. Νέα ώθηση στον τομέα αυτό έδωσε η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος και ως εκ τούτου των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς ΕΡ (ΕΣΜ). Τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς θεωρούνται, πλέον, πολύ αξιόπιστα εργαλεία για τη μεταφορά και τον έλεγχο της ηλεκτρικής ισχύος αυξάνοντας συγχρόνως τόσο την απόδοση όσο και την αξιοπιστία του συστήματος μεταφοράς.

Η χρήση ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παρέχει ένα σύνολο δυνατοτήτων στο διαχειριστή του συστήματος. Δύο από τις σημαντικότερες είναι η δυνατότητα κατεύθυνσης της μεταφερόμενης ισχύος

σε προδιαγεγραμμένες διαδρομές στο σύστημα μεταφοράς και η αύξηση των ορίων μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Αυτές οι δυνατότητες σε συνδυασμό με τη θετική επίδραση των συστημάτων αυτών στην ευστάθεια του ΣΗΕ, δυναμική και μεταβατική, καθώς και η συμβολή τους στην απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος και στο περιορισμό των συνεπειών των διαφόρων σφαλμάτων δικαιολογούν στο έπακρο τη συνεχώς αυξανόμενη τάση για χρησιμοποίηση ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η απαίτηση για ευρεία χρήση ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς δημιούργησε νέα πεδία ερευνών με προσανατολισμό τόσο στο κατασκευαστικό κομμάτι των ΕΣΜ όσο και σε ό,τι αφορά την εγκατάστασή τους στα ΣΗΕ. Η δεύτερη προσέγγιση, που είναι αντικείμενο του κλάδου ηλεκτρικής ισχύος, περιλαμβάνει μεταξύ άλλων έρευνα σχετικά με τις θέσεις στο δίκτυο, το είδος, τις ρυθμίσεις, το κόστος, το πλήθος, τις δυνατότητες, τη συμπεριφορά και τις επιπτώσεις των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς στα ΣΗΕ. Η πλειονότητα των προβλημάτων που απασχολούν τις ερευνητικές εργασίες του κλάδου αυτού είναι προβλήματα βελτιστοποίησης όπου αναζητούνται οι βέλτιστες τιμές συνήθως για κάποια από τα προαναφερθέντα μεγέθη (συνήθως τις θέσεις, το είδος, τις ρυθμίσεις και το πλήθος), με σκοπό τη βέλτιστη δυνατή αντιμετώπιση του δεδομένου προβλήματος (όπως η μέγιστη φόρτιση, οι απώλειες ισχύος, η συμβολή στην ευστάθεια, κ.α.). Στην Ενότητα 1.3, όπου γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, δίνεται μια εικόνα για την έρευνα στον κλάδο αυτό.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την αύξηση της μέγιστης δυνατής μεταφερόμενης ισχύος σε ένα σύστημα μεταφοράς. Για τρία μοντέλα συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας – 6 ζυγών, 30 ζυγών και 118 ζυγών – και για τρία διαφορετικά είδη ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (TCSC, SVC και UPFC) αναζητούνται οι βέλτιστες θέσεις τοποθέτησης, οι κατάλληλες ρυθμίσεις και το απαιτούμενο πλήθος των ΕΣΜ για την επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης φόρτισης των δεδομένων ΣΗΕ. Καθοριστικός παράγοντας στην αναζήτηση των τιμών των προαναφερθέντων μεγεθών είναι το συνολικό κόστος, το οποίο απαιτείται να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, για τη μέγιστη φόρτιση. Στο πρόβλημα πρέπει να ληφθούν υπόψιν διάφοροι περιορισμοί, τους οποίους επιβάλλουν τα ΣΗΕ (θερμικό όριο γραμμών, εύρος μέτρου τάσεως ζυγών), η ροή φορτίου και τα μοντέλα των ΕΣΜ. Το εν λόγω πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού το οποίο με χρήση της μαθηματικής μεθόδου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization technique) θα επιλύει το ανωτέρω πρόβλημα βελτιστοποίησης. Για κάθε είδος ΕΣΜ, αλλά και για συνδυασμό αυτών, θα αναζητείται η βέλτιστη λύση, η λύση δηλαδή που θα επιτυγχάνει τη μέγιστη δυνατή φόρτιση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

1.3 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης που σχετίζονται με την εγκατάσταση ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν κατά καιρούς μελετηθεί κάνοντας χρήση ποικίλων μαθηματικών εργαλείων όπως ο γενετικός αλγόριθμος (genetic algorithm), η αναζήτηση tabu (tabu search), η προσομοιωμένη ανώπτηση (simulated annealing) και διάφορα άλλα.

Στο [1.1] γίνεται χρήση του υβριδικού γενετικού αλγορίθμου για την επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου σε ένα σύστημα με εγκατεστημένα TCPS και TCSC. Στην εργασία αυτή βρίσκονται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων ελέγχου για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους καυσίμου και τη διατήρηση των ροών ισχύος εντός των ορίων ασφαλείας. Οι βέλτιστες θέσεις συσκευών UPFC σε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση βέλτιστης ροής φορτίου, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της συνάρτησης κόστους καυσίμου, των απωλειών ισχύος και της φόρτισης του συστήματος με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της επένδυσης αναζητούνται στο [1.2]. Στο [1.3] γίνεται χρήση γενετικού αλγορίθμου για τη βέλτιστη επιλογή μεταξύ διάφορων ΕΣΜ σε απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρισμού. Την ίδια μέθοδο χρησιμοποιεί το [1.4] για την εύρεση των βέλτιστων θέσεων ρυθμιστών φάσης (phase shifter, PS) με σκοπό τη μείωση των ροών φορτίου σε υπερφορτισμένες γραμμές του γαλλικού δικτύου καθώς και τη μείωση του κόστους παραγωγής. Η χρήση εξελικτικών στρατηγικών για την εύρεση των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών ελέγχου ΕΣΜ εγκατεστημένων σε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας προτείνεται στο [1.5]. Στο [1.6] χρησιμοποιείται μέθοδος βασισμένη στην παράλληλη αναζήτηση tabu για τον καθορισμό των βέλτιστων θέσεων ΕΣΜ σε σύστημα βελτιστοποίησης ηλεκτρικής ενέργειας. Η μέθοδος σμήνους σωματιδίων χρησιμοποιείται στο [1.7] για την εύρεση της βέλτιστης θέσης ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς με σκοπό τη μεγιστοποίηση της μέγιστης δυνατής φόρτισης του συστήματος ενώ στο [1.8] η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση των ενεργών απωλειών συστήματος με εγκατεστημένα ΕΣΜ σε αυτό. Στο τελευταίο χρησιμοποιούνται και μέθοδοι προσομοιωμένης ανόπτησης. Τέλος, τη μέθοδο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων με έναν υβριδικό γενετικό αλγόριθμο χρησιμοποιεί και το [1.9] για την εύρεση των βέλτιστων θέσεων και ρυθμισεων ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς για βέλτιστη ροή φορτίου.

1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία απαρτίζεται από πέντε κεφάλαια (εκτός του εισαγωγικού Κεφαλαίου 1). Στα δύο πρώτα κεφάλαια (Κεφάλαια 2 και 3) παρουσιάζεται το απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο και διατυπώνεται σαφώς το πρόβλημα και η μαθηματική μέθοδος επίλυσής του. Στα επόμενα κεφάλαια περιγράφεται διεξοδικά το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε (Κεφάλαιο 4) και παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του προγράμματος αυτού (Κεφάλαιο 5). Στο τελευταίο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 6) διατυπώνονται τα συνολικά συμπεράσματα.

Πιο συγκεκριμένα, στο **Κεφάλαιο 2** δίνονται ορισμένα θεωρητικά στοιχεία για τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς και περιγράφονται πιο λεπτομερώς τα είδη που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία. Ακόμη, διατυπώνεται το πρόβλημα εύρεσης της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης των ΕΣΜ για τη βελτιστοποίηση της μέγιστης φόρτισης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται μια γενική περιγραφή του μαθηματικού εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του υπό μελέτη προβλήματος, δηλαδή της μεθόδου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων. Σημαντικά ζητήματα που αφορούν την εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης στο εν λόγω πρόβλημα αναλύονται λεπτομερώς στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού.

Η επίλυση του προβλήματος σε προγραμματιστικό επίπεδο και το λογισμικό που αναπτύχθηκε παρουσιάζονται ενδελεχώς στο **Κεφάλαιο 4**. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού περιγράφεται το προγραμματιστικό περιβάλλον χρήστη που δημιουργήθηκε, καθώς και ενδεχόμενες μελλοντικές επεκτάσεις του λογισμικού.

Το **Κεφάλαιο 5** περιλαμβάνει τα πειραματικά αποτελέσματα που εξήχθησαν μετά την εκτέλεση του αναπτυχθέντος προγράμματος, τα οποία και σχολιάζονται διεξοδικά. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται επιπρόσθετα σχόλια για τη μέθοδο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, τα οποία βασίζονται στα εξαχθέντα αποτελέσματα προσομοίωσης.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την πραγματοποίηση της εργασίας.

1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] T. S. Chung, Y. Z. Li, "A hybrid GA approach for OPF with consideration of FACTS devices," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 20, no. 8, pp 54-57, Aug. 2000.
- [1.2] M. Beshad, A. Lashkarara, A. H. Rahmani, "Optimal location of UPFC device considering system loadability, total fuel cost, power losses and cost of installation," in 2009 International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS), pp. 231-237.
- [1.3] J. L. Cai, I. Erlich, G. Stamtsis, "Optimal choice and allocation of FACTS devices in deregulated electricity market using genetic algorithms," in 2004 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, vol. 1, pp. 201-207.
- [1.4] P. Paterni, S. Vitet, M. Bena, A. Yokoyama, "Optimal location of phase shifters in the French network by genetic algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 37-42, Feb. 1999.
- [1.5] J. A. Dominiguez-Navarro, J. L. Bernal-Agustin, A. Diaz, D. Requena, E. P. Vargas, "Optimal parameters of FACTS devices in electric power systems applying evolutionary strategies," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 29, no. 1, pp 83-90, Jan. 2007.

- [1.6] H. Mori, Y. Goto, "A parallel tabu search based method for determining optimal allocation of FACTS in power systems," in *Proceedings of the 2000 International Conference on Power System Technology*, vol. 2, pp. 1077-1082.
- [1.7] M. Saravanan, S. Mary Raja Slochanal, P. Venkatesh, J. Prince Stephen Abraham, "Application of particle swarm optimization technique for optimal location of FACTS devices considering cost of installation and system loadability," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, pp. 276-283, 2007.
- [1.8] S. Mahumdar, A. K. Chakraborty, P. K. Chattopadhyay, "Active power loss minimization with FACTS devices using SA/PSO techniques," in 2009 International Conference on Power Systems, pp. 1-5.
- [1.9] M. A. Abido, M. M. Al-Hulail, "Optimal Location and Settings of FACTS for Optimal Power Flow Problem Using a Hybrid GA/PSO Algorithm," *Proceedings of the 2006 Saudi Technical Conference and Exhibition*, December 2-6, Riyadh, Saudi Arabia.

κέφ.1 Είσαγωγη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται, αρχικά, μια σύντομη και περιεκτική εισαγωγική παρουσίαση των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (ΕΣΜ, Flexible AC Transmission Systems-FACTS), η οποία επικεντρώνεται, κυρίως, στη σημασία και συμβολή τους στη μεταφορά και διαχείριση της ηλεκτρικής ισχύος.

Έπειτα, ακολουθεί μια πιο λεπτομερής και αναλυτική παρουσίαση που αφορά τα τρία είδη των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, δηλαδή των TCSC, SVC και UPFC. Η προσέγγιση των συσκευών αυτών θα γίνει από την σκοπιά της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας (steady-state).

Το Κεφάλαιο 2 κλείνει με την αναλυτική διατύπωση του προβλήματος της εύρεσης της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης συσκευών ΕΣΜ, το οποίο πραγματεύεται η εργασία αυτή. Η μοντελοποίηση των τριών προαναφερθέντων ΕΣΜ για την εύρεση της βέλτιστης θέσης τους, το κόστος εγκατάστασης αυτών, η αντικειμενική συνάρτηση που προκύπτει, καθώς και οι περιορισμοί που τίθενται, θα είναι τα θέματα που θα αναπτυχθούν.

2.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Σύμφωνα με τον ορισμό που έχει δοθεί από το IEEE, ένα ευέλικτο σύστημα μεταφοράς περιγράφεται ως " ένα σύστημα που βασίζεται σε ηλεκτρονικά ισχύος και

άλλα στατικά εξαρτήματα και ελέγχει μία ή περισσότερες παραμέτρους ενός συστήματος μεταφοράς EP με σκοπό την ελεγξιμότητα αυτού και την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος" [2.1]. Οι παράμετροι του συστήματος μεταφοράς που μπορεί να ελέγχει μια τέτοια συσκευή είναι η επαγωγική αντίδραση μιας γραμμής μεταφοράς, οι τάσεις των ζυγών στα δύο άκρα της γραμμής και η φασική γωνία μεταξύ των δυο αυτών τάσεων, τα μεγέθη δηλαδή που καθορίζουν τη ροή ισχύος σε ένα τέτοιο σύστημα. Τα ΕΣΜ διακρίνονται ανάλογα με την παράμετρο που ελέγχουν και τη δομή τους (βλ ενότητα 2.3).

Υπάρχουν πολλοί λόγοι, για τους οποίους η έρευνα πάνω στις συσκευές αυτές είναι εκτεταμένη τα τελευταία χρόνια και η χρήση τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχει εξαπλωθεί παγκοσμίως. Οι λόγοι αυτοί σχετίζονται με τις σημαντικές λειτουργίες που μπορεί να επιτελέσει ένα ΕΣΜ εγκατεστημένο σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Κάποιες από τις βασικότερες δυνατότητες αυτών των συστημάτων [2.2] είναι οι ακόλουθες :

- Κατεύθυνση της ισχύος σε προδιαγεγραμμένες διαδρομές του συστήματος μεταφοράς και κατά συνέπεια δημιουργία συγκεκριμένης επιθυμητής κατάστασης λειτουργίας του συστήματος.
- 2. Φόρτιση των γραμμών κοντά στα όρια της μόνιμης κατάστασης και των δυναμικών και μεταβατικών καταστάσεων.
- 3. Απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος, οι οποίες θα μπορούσαν να βλάψουν το δίκτυο και να περιορίσουν την ικανότητα μεταφοράς ισχύος.
- 4. Θετική επίδραση στη δυναμική ευστάθεια (ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να παραμένει συγχρονισμένο κάτω από μικρές διαταραχές) και στη μεταβατική ευστάθεια (ικανότητα ενός ΣΗΕ να παραμένει συγχρονισμένο κάτω από μεταβατικές διαταραχές, όπως σφάλματα ή απώλειες παραγωγής) του συστήματος.
- 5. Περιορισμός της επέκτασης των συνεπειών από πολλαπλά σφάλματα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε σημαντικές ανωμαλίες (σβέσεις).

Από τις δυνατότητες που περιγράφησαν παραπάνω, οι δύο πρώτες συμβάλλουν στη σημαντική βελτίωση της απόδοσης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και ως εκ τούτου στην οικονομικότερη λειτουργία του, ενώ οι υπόλοιπες αυξάνουν σημαντικά τη λειτουργική του αξιοπιστία.

Ωστόσο, για να επιτευχθεί η επιθυμητή, αλλά και αποδοτική, λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με την εγκατάσταση των συσκευών ΕΣΜ πρέπει να ληφθούν, μεταξύ άλλων, και κάποιες αποφάσεις που θα αφορούν: το είδος του ΕΣΜ που θα χρησιμοποιηθεί, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της συσκευής και τη θέση που θα τοποθετηθεί στο δίκτυο [2.3].

Το είδος του ευέλικτου συστήματος μεταφοράς που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζεται κάθε φορά από το επιθυμητό αποτέλεσμα. Έτσι, για παράδειγμα, όταν υπάρχει ανάγκη της στήριξης της τάσης κάποιου ζυγού ή του ελέγχου της ροής αέργου ισχύος, τότε επιλέγεται το είδος συσκευών με ελεγχόμενη παράμετρο τις τάσεις των ζυγών στα άκρα μιας γραμμής (μέσω έγχυσης αέργου ισχύος σε ζυγό, shunt Q). Μια τέτοια συσκευή είναι η λεγόμενη Static VAR Compensator ή SVC (βλ. Ενότητα 2.3). Αυτή η λειτουργία δεν θα ήταν εξίσου εύκολα πραγματοποιήσιμη με το

είδος των ΕΣΜ, των οποίων η ελεγχόμενη παράμετρος είναι η επαγωγική αντίδραση της γραμμής (π.χ TCSC). Φυσικά, σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα του ενός είδη ευέλικτων συστημάτων. Τέλος, για την επιλογή του είδους της συσκευής καθοριστικό ρόλο έχει και το κόστος εγκατάστασής της.

Πριν από την εγκατάσταση ενός ή περισσότερων ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς, πρέπει να καθοριστούν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και η ικανότητα που πρέπει να έχουν οι συσκευές αυτές. Οι ρυθμίσεις των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των συστημάτων γίνονται ανάλογα με την λειτουργία που είναι επιθυμητό να εκτελέσουν. Οι ρυθμίσεις αυτές προκύπτουν συνήθως ύστερα από κατάλληλες προσομοιώσεις και αποτελούν σημαντικό βήμα πριν από την εγκατάσταση των συσκευών στο δίκτυο. Σημαντική, ωστόσο, παράμετρο αποτελεί και η ικανότητα της προς εγκατάσταση συσκευής. Η εγκατάσταση μιας συσκευής σε γραμμή που το όριο μεταφοράς ισχύος είναι σημαντικά μικρότερο από την ικανότητα της συσκευής θα οδηγούσε σε μη πλήρη αξιοποίησή της και επομένως σε μη αποδοτική λειτουργία. Αν συμβεί το αντίθετο, δηλαδή αν η ικανότητα της συσκευής είναι μικρότερη από το όριο λειτουργίας της γραμμής, τότε η εγκατάστασή της θα έχει ως συνέπεια την αναγκαστική μείωση του ορίου λειτουργίας της γραμμής (rating). Έτσι, το μέγεθος της γραμμής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την επιλογή της προς εγκατάσταση συσκευής, έχοντας πάντα στο νου την πιθανή μελλοντική αναβάθμιση της γραμμής.

Μια σημαντική απόφαση που πρέπει να ληφθεί για την εγκατάσταση ενός ευέλικτου συστήματος μεταφοράς αφορά τη θέση, όπου θα τοποθετηθεί αυτό στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η θέση στην οποία θα τοποθετηθεί μια συσκευή, ανάλογα φυσικά και με τις ρυθμίσεις που έχουν γίνει σε αυτή, μπορεί να αλλάξει σημαντικά ολόκληρη τη ροή ισχύος του συστήματος μεταφοράς. Μπορεί να "ελαφρύνει", για παράδειγμα, υπερφορτισμένες γραμμές και να κατευθύνει τη ροή σε γραμμές με μικρότερη φόρτιση. Μια συσκευή με συγκεκριμένες ρυθμίσεις, μπορεί τοποθετημένη σε μία γραμμή μεταφοράς να επηρεάζει ελάχιστα το σύστημα ή τουλάχιστον όχι με τον επιθυμητό τρόπο, ενώ σε μία άλλη γραμμή η σημασία της να είναι καθοριστική. Η βαρύτητα που έχει δοθεί στην έρευνα για το θέμα αυτό αναδεικνύει τη σημασία της εύρεσης της βέλτιστης τοποθέτησης των συσκευών ΕΣΜ. Διάφορες μέθοδοι, βασιζόμενες σε ποικίλα μαθηματικά εργαλεία, έχουν κατά καιρούς προταθεί για την εύρεση της βέλτιστης θέσης συναρτήσει κάποιων συγκεκριμένων μεταβλητών, όπως για παράδειγμα, το κόστος εγκατάστασης.

Η εγκατάσταση συσκευών ΕΣΜ σε ένα σύστημα μεταφοράς επηρεάζει και τις απώλειες που σχετίζονται με τη μεταφερόμενη ισχύ στο σύστημα, γιατί τόσο οι απώλειες, με κύριες τις διακοπτικές, της συσκευής που εγκαθίσταται, όσο και η αλλαγή των παραμέτρων του συστήματος λόγω της λειτουργίας της συσκευής συμβάλλουν προς την κατεύθυνση αυτή. Ωστόσο, αυτό δε σημαίνει ότι οι απώλειες του συστήματος αυξάνονται. Για την ακρίβεια, η εγκατάσταση ΕΣΜ μπορεί και να μειώσει ακόμα τις συνολικές απώλειες του συστήματος. Εκ πρώτης όψεως, κάτι τέτοιο φαίνεται να έρχεται σε αντίθεση με το θεώρημα του Tellegan, σύμφωνα με το οποίο η λύση που προκύπτει φυσικά σε ένα σύστημα είναι η λύση με τις λιγότερες απώλειες. Ωστόσο, η εγκατάσταση συσκευών ΕΣΜ σε ένα σύστημα ηλεκτρικής

ενέργειας αλλάζει τις παραμέτρους του συστήματος αυτού, οπότε το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί διαφορετικό σε σχέση με το προηγούμενο και για το λόγο αυτό δύναται να ισορροπήσει σε λύση με χαμηλότερες απώλειες ισχύος [2.3]. Συνεπώς, δεν προκύπτει τέτοιου είδους αντίφαση.

2.3 ΤΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤCSC, SVC, UPFC

Τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς μπορούν να διακριθούν ως προς τη μεταβλητή ή μεταβλητές του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που ελέγχουν. Έτσι, υπάρχουν συστήματα τα οποία ελέγχουν αποκλειστικά την επαγωγική αντίδραση Χ της γραμμής και υλοποιούν αντιστάθμιση σειράς, άλλα που ελέγχουν την τάση στους ζυγούς (μέσω της εγχεόμενης αέργου ισχύος σε αυτούς) και υλοποιούν εγκάρσια αντιστάθμιση, άλλα που ρυθμίζουν τις γωνίες φάσεως και άλλα που πραγματοποιούν κάποιο συνδυασμό των παραπάνω.

Η κατάταξη, ωστόσο, μπορεί να γίνει και ως προς τη δομή των συστημάτων αυτών [2.4]. Έτσι, διακρίνουμε δύο μεγάλες κατηγορίες: (1) τους μετατροπείς που επιτρέπουν την ευέλικτη διαχείριση συνιστωσών, όπως πηνίων, πυκνωτών ή μετασχηματιστών με ρύθμιση φάσης και ως διακοπτικά στοιχεία χρησιμοποιούν θυρίστορ και (2) τους μετατροπείς που υλοποιούν ελεγχόμενες πηγές τάσεως ή ρεύματος και χρησιμοποιύν συνήθως ημιαγωγικά στοιχεία με δυνατότητα εξαναγκασμένης απόσβεσης, όπως για παράδειγμα τα GTO (Gate Turn Off Thyristors). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι στατικοί αντισταθμιστές αέργου ισχύος (Static Var Compensators, SVC), οι πυκνωτές σειράς ελεγγόμενοι από θυρίστορ (Thyristor Controlled Series Capacitors, TCSC) και οι ρυθμιστές γωνίας φάσης (Phase Shifters). Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι ελεγχόμενοι σύγχρονοι αντισταθμιστές (Static Synchronous Compensators, STATCOM), οι ελεγχόμενοι σύγχρονοι αντισταθμιστές σειράς (Static Synchronus Series Compensators, SSSC), οι ενοποιημένοι ρυθμιστές ροής ισχύος (Unified Power Flow Controllers, UPFC) και, τέλος, οι ρυθμιστές ροής ισχύος μεταξύ γραμμών μεταφοράς (Interline Power Flow Converters, IPFC). Τα συστήματα της δεύτερης κατηγορίας εμφανίζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με τη πρώτη επιτρέποντας, επιπλέον, την έγχυση ή απορρόφηση ενεργού ισχύος. Το γεγονός αυτό έχει σαν συνέπεια, οι μετατροπείς αυτοί να έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με τους πρώτους.

Για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν μόνο SVC, TCSC και UPFC. Συνεπώς, θα παρουσιαστούν μόνο τα τρία αυτά είδη ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς.

2.3.1 Στατικός Αντισταθμιστής Αέργου Ισχύος – Static VAR Compensator (SVC)

Ένας τυπικός αντισταθμιστής αέργου ισχύος αποτελείται από βαθμίδες Πηνίων Ελεγχόμενων από Θυρίστορ (Thyristor Controlled Reactor, TCR) για την παραγωγή αέργου ισχύος, με την ταυτόχρονη όμως παραγωγή αρμονικών ρευμάτων, και βαθμίδες Πυκνωτών Διακοπτόμενων από Θυρίστορ (Thyristor Switched Capacitors, TSC), για την παραγωγή χωρητικής αέργου ισχύος. Μέρος της χωρητικής αέργου ισχύος παράγεται από τα μόνιμα συνδεδεμένα φίλτρα αρμονικών, τα οποία εγκαθίστανται για την απορρόφηση των αρμονικών ρευμάτων που παράγονται από τα TCR. Το μονογραμμικό διάγραμμα μιας συσκευής SVC φαίνεται στο Σχήμα 2.1 [2.5].

Οι αντισταθμιστές αυτοί, όπως γίνεται αντιληπτό από την εσωτερική τους δομή, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν ή να απορροφούν άεργο ισχύ στο σημείο σύνδεσής τους. Αποτελούν, δηλαδή, μια εγκάρσια αντιστάθμιση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, με τη δυνατότητα όμως να μεταβάλλεται δυναμικά. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κύρια για την υποστήριξη της τάσης σε απρόσπτες κρίσιμες καταστάσεις, αλλά εφαρμόζονται επίσης για την απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος, τη στήριξη της τάσης στη μόνιμη κατάσταση και τη σταθεροποίησή της σε μεταβαλλόμενα βιομηχανικά φορτία [2.5]. Συμβάλλουν, επίσης, στη βελτίωση της μεταβατικής και δυναμικής ευστάθειας του συστήματος και στην απόσβεση των υποσύγχρονων συντονισμών. Παρόλα αυτά, δεν έχουν την ικανότητα ελέγχου της ροής ενεργού ισχύος.



Σχήμα 2.1: Τυπικό μονογραμμικό διάγραμμα ενός SVC [2.5]

2.3.2 Πυκνωτές Σειράς Ελεγχόμενοι από Θυρίστορ – Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC)

Η βασική μονάδα ενός TCSC αποτελείται από ένα TCR (Thyristor Controlled Reactance, Πηνίο Ελεγχόμενο από θυρίστορ) παράλληλα με ένα πυκνωτή. Συχνά, μια εγκατάσταση TCSC αποτελείται από περισσότερες της μίας τέτοιες μονάδες. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα μιας συσκευής εγκατεστημένης στον υποσταθμό Slatt 500 kV στο Oregon [2.6].



Σχήμα 2.2: Μονογραμμικό διάγραμμα εγκατεστημμένων TCSC στον υποσταθμό Slatt [2.6].

Με την εγκατάσταση ενός TCSC πραγματοποιείται αντιστάθμιση σειράς καθότι επιτυγχάνεται ο έλεγχος της σύνθετης αντίστασης της γραμμής μεταφοράς. Η τιμή της φαινόμενης (apparent) αντίδρασης του TCSC, που τοποθετείται σε σειρά με τη σύνθετη αντίδραση της γραμμής μεταφοράς, καθορίζει και το βαθμό αντιστάθμισης. Οι λειτουργικές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένα TCSC εξαρτώνται από τη γωνία έναυσης (firing angle) α των θυρίστορ και είναι οι ακόλουθες [2.4]-[2.6]:

- Κατάσταση αποκοπής (Blocking Mode), όπου η βαλβίδα των θυρίστορ είναι συνεχώς κλειστή, το ρεύμα περνά μόνο από τον πυκνωτή και συνεπώς το TCSC συμπεριφέρεται ως σταθερός πυκνωτής. Η δυνατότητα αυτή χρησιμοποιείται μόνο σε επίπεδο δοκιμών.
- Κατάσταση παράλληλης λειτουργίας (By pass Mode), όπου η βαλβίδα των θυρίστορ είναι συνεχώς ανοικτή και το TCSC λειτουργεί ως πηνίο παράλληλα σε πυκνωτή.
- 3) Χωρητική / Επαγωγική λειτουργία (Capacitive/Inductive Boost Mode), όπου ανάλογα με την τιμή της γωνίας έναυσης α των θυρίστορ το ρεύμα που κυκλοφορεί στο κλειστό κύκλωμα μπορεί να έχει την ίδια ή αντίθετη φορά με το ρεύμα της γραμμής, με αποτέλεσμα η διάταξη να παρουσιάζει χωρητική ή επαγωγική μεταβλητή αντίδραση. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η τιμή της ισοδύναμης φαινόμενης αντίδρασης του TCSC συναρτήσει της γωνίας έναυσης α [2.6].

Οι διατάξεις αυτές, επειδή παρέχουν τη δυνατότητα του συνεχούς ελέγχου της ισοδύναμης αντίδρασης X_{TCSC} , μπορούν να συμβάλλουν στον έλεγχο της ροής της ενεργού ισχύος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Αυτό συνεπάγεται και τη δυνατότητα ευελιξίας στον έλεγχο των υπερφορτίσεων. Η εγκατάσταση μιας τέτοιας διάταξης μπορεί να συμβάλλει επίσης στην αύξηση της

μεταφερόμενης ισχύος, στη βελτίωση της δυναμικής και μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος και στην απόσβεση των από σφάλματα προκαλούμενων ταλαντώσεων. Επιπλέον, η τοποθέτηση TCSC σε ένα ΣΗΕ μπορεί με την κατάλληλη μελέτη να μειώσει τις συνολικές απώλειες του συστήματος.



Σχήμα 2.3: Ισοδύναμη αντίδραση TCSC συναρτήσει της γωνίας έναυσης [2.6].

2.3.3 Ενοποιημένος Ρυθμιστής Ελέγχου Ισχύος – Unified Power Flow Controller (UPFC)

Η διάταξη ενός ενοποιημένου ρυθμιστή ελέγχου ισχύος αποτελείται από δύο μετατροπείς ελεγχόμενους από θυρίστορ, οι οποίοι λειτουργούν μέσω μιας κοινής DC ζεύξης που παρέχεται από ένα συσσωρευτή (back to back).Ο ένας μετατροπέας είναι συνδεδεμένος σε σειρά στη γραμμή μεταφοράς και επιτελεί την κύρια λειτουργία του UPFC εισάγοντας μια τάση εναλλασσόμενου ρεύματος με ελεγχόμενο μέγεθος και γωνία.

Ο δεύτερος μετατροπέας συνδέεται εγκάρσια στη γραμμή και η βασική του λειτουργία είναι να παρέχει ή να απορροφά την ενεργό ισχύ, η οποία ζητείται από τον δεύτερο μετατροπέα μέσω της κοινής ζεύξης. Και οι δύο μετατροπείς έχουν την ικανότητα να ανταλλάσσουν, ανεξάρτητα ο καθένας, άεργο ισχύ με το σύστημα. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται μια τέτοια διάταξη [2.6].



Σχήμα 2.4: Ο ενοποιημένος ρυθμιστής ελέγχου ισχύος, UPFC [2.6].

Η έγχυση της τάσεως σε σειρά με τη γραμμή μεταφοράς (μέσω μετασχηματιστή ισχύος) δρα ως μια σύγχρονη πηγή εναλλασσόμενης τάσης, όπου το ρεύμα γραμμής ρέει μέσω αυτής, όπως και η ενεργός και άεργος ισχύς που ανταλλάσεται μεταξύ πηγής και συστήματος. Το διάνυσμα της τάσης που εγχέεται έχει μεταβλητό μέγεθος και γωνία και συνεπώς αθροιζόμενο με τη φασική τάση δίνει ένα συνιστάμενο διάνυσμα με επίσης μεταβλητό μέγεθος και γωνία. Με τον τρόπο αυτό, μια συσκευή UPFC έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει: ρύθμιση τάσης, αντιστάθμιση μέσω της σύνθετης αντίστασης γραμμής, στροφή γωνίας ή όλα αυτά μαζί. Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι η διάταξη αυτή μπορεί να ρυθμίζει ταυτόχρονα και τις τρεις παραμέτρους ροής ισχύος, δηλαδή την τάση, τη γωνία και τη σύνθετη αντίσταση.

Η δυνατότητα ελέγχου όλων των παραμέτρων του συστήματος από το UPFC χαρίζει στις συσκευές αυτές μοναδική ευελιξία και μεγάλο εύρος δυνατοτήτων ελέγχου του συστήματος μεταφοράς. Επιπλέον, οι διατάξεις αυτές μπορούν να παρέχουν άεργο ισχύ ή να ανταλλάσσουν ενεργό ισχύ με το σύστημα αλλά και να ελέγχουν ανεξάρτητα την ενεργό και άεργο ισχύ σε μια γραμμή μεταφοράς. Ακόμη, μπορούν να ανταποκριθούν με μεγάλη ταχύτητα για την απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος, όπως είναι οι υποσύγχρονες ταλαντώσεις συντονισμού και συνεπώς να ενισχύσουν την ασφάλεια του συστήματος. Όλες οι δυνατότητες αυτές δικαιολογούν το όνομα του συγκεκριμένου ΕΣΜ ως ενοποιημένου ρυθμιστή ελέγχου ισχύος. Οι διατάξεις αυτές συγκεντρώνουν τα χαρακτηριστικά των άλλων δύο ειδών ΕΣΜ που παρουσιάστηκαν (SVC, TCSC), με μοναδικό μειονέκτημά τους το υψηλό κόστος τους.

2.4 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΥΡΕΣΗΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Στην Ενότητα 2.2 παρουσιάστηκε, μεταξύ άλλων, και η σημασία της επιλογής της θέσης τοποθέτησης των συσκευών ΕΣΜ. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην εύρεση των βέλτιστων θέσεων των ΕΣΜ σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με περιορισμούς τη φόρτιση του συστήματος και το κόστος των ΕΣΜ. Το πρόβλημα αυτό είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Τα βασικά στοιχεία που ορίζουν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης [2.7] είναι: α) η αντικειμενική συνάρτηση (objective function), που αντιπροσωπεύει την ποσότητα που πρέπει να βελτιστοποιηθεί (ελαχιστοποιηθεί ή μεγιστοποιηθεί ανάλογα με το πρόβλημα), β) το σύνολο των αγνώστων (μεταβλητών σχεδίασης) που επηρεάζουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και γ) το σύνολο των περιορισμών οι οποίοι περιορίζουν τις τιμές που μπορούν να ανατεθούν στις μεταβλητές σχεδίασης. Το πεδίο τιμών εντός του οποίου κινούνται οι μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος είναι ο χώρος αναζήτησης των υποψήφιων λύσεων και τα όριά του καθορίζονται από τους εκάστοτε περιορισμούς.

Στη συνέχεια το πρόβλημα βελτιστοποίησης που πραγματεύεται η εργασία διατυπώνεται, παρουσιάζοντας αναλυτικά την αντικειμενική του συνάρτηση, τις μεταβλητές σχεδίασής του και τους περιορισμούς του. Η τεχνική με την οποία θα επιλυθεί το πρόβλημα παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3.

2.4.1 Αντικειμενική Συνάρτηση Προβλήματος Βελτιστοποίησης

Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που μελετάται δύο είναι τα μεγέθη που εξετάζονται κάθε φορά για την εύρεση της βέλτιστης θέσης: η φόρτιση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και το συνολικό κόστος εγκατάστασης των ΕΣΜ που χρησιμοποιούνται. Συγκεκριμένα, επιδιώκεται η μεγιστοποίηση του πρώτου μεγέθους και η ελαχιστοποίηση του δεύτερου.

2.4.1.1 Φόρτιση Συστήματος (System Loadability)

Στην εργασία αυτή, η φόρτιση συστήματος ορίζεται από το λόγο του συνολικού φορτίου (MW) του συστήματος μιας συγκεκριμένης λειτουργικής κατάστασης προς το συνολικό φορτίο (MW) της αρχικής κατάστασης του συστήματος. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν η αρχική κατάσταση αναφέρεται στα δεδομένα ζυγών των μοντέλων ΣΗΕ (test cases) που χρησιμοποιήθηκαν. Η φόρτιση συστήματος, SL, υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$SL = \frac{\Sigma P_L}{\Sigma P_{L, TEST \ CASE}}$$
(2.1)

όπου ΣP_L (σε MW) είναι το συνολικό φορτίο του συστήματος στην παρούσα κατάστασή του και $\Sigma P_{L,TEST CASE}$ (σε MW) είναι το συνολικό φορτίο του συστήματος όπως αυτό προκύπτει από τα αρχικά δεδομένα της προσομοίωσης.

Έτσι, λοιπόν, φόρτιση συστήματος ίση με 1.10 σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη

κατάσταση το συνολικό φορτίο του συστήματος είναι 10% μεγαλύτερο από την αρχική του κατάσταση.

Μέγιστη φόρτιση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (Maximum System Loadability, MSL) είναι η μέγιστη τιμή της φόρτισης του συστήματος για την οποία δεν παραβιάζονται οι περιορισμοί λειτουργίας του συστήματος, όπως για παράδειγμα το θερμικό όριο των γραμμών. Η τοποθέτηση των συσκευών ΕΣΜ σε κάποιες θέσεις στο σύστημα μπορεί να επιτύχει μια συγκεκριμένη τιμή του MSL. Σκοπός είναι να βρεθούν οι θέσεις τοποθέτησης των συσκευών (και οι αντίστοιχες ρυθμίσεις τους) για τις οποίες η τιμή του MSL είναι η μέγιστη.

2.4.1.2 Κόστος Εγκατάστασης (Installation Cost)

Στην παρούσα εργασία, όταν γίνεται αναφορά στο κόστος εγκατάστασης της κάθε συσκευής, εννοείται το συνολικό κόστος της επένδυσης για την κάθε συσκευή, το μέγεθος δηλαδή που περιλαμβάνει το κόστος κάθε συσκευής (το κόστος των εξαρτημάτων της συσκευής) και το κόστος υποδομής (το κόστος για την τοποθέτηση της συσκευής στον υποσταθμό). Στα Σχήματα 2.5 και 2.6 [2.8] παρουσιάζονται τυπικές τιμές κόστους εγκατάστασης των ΕΣΜ. Για κάθε είδος αντιστοιχεί μια περιοχή τιμών κόστος. Το κάτω όριο της περιοχής αντιστοιχεί στο κόστος της συσκευής, ενώ το πάνω όριο, που είναι και αυτό που μας ενδιαφέρει, αντιστοιχεί στο κόστος εγκατάστασης, όπως θα αναφέρεται στο εξής.



Σχήμα 2.5: Κόστος εγκατάστασης συσκευών UPFC, TCSC και FSC [2.8].



Σχήμα 2.6: Κόστος εγκατάστασης συσκευών STATCOM και SVC [2.8].

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.5 και 2.6, το κόστος εγκατάστασης εξαρτάται από το εύρος λειτουργίας S (σε MVAr), που δίνεται από τη σχέση:

$$Operating Range = S = \|Q_{after}| - |Q_{before}\|$$
(2.2)

όπου Q_{after} (σε MVAr) είναι η ροή αέργου ισχύος στη γραμμή που εγκαθίσταται η συσκευή μετά την εγκατάσταση της συσκευής, ενώ Q_{before} (σε MVAr) η ροή αέργου ισχύος στη γραμμή πριν από την εγκατάσταση της συσκευής. Και τα δύο μεγέθη σε MVAr. Να σημειωθεί ότι το κόστος εγκατάστασης δεν περιορίζεται στα πλαίσια λειτουργίας που παρουσιάζονται στα σχήματα. Για μικρότερες τιμές του εύρους λειτουργίας το κόστος εγκατάστασης είναι ακόμη μεγαλύτερο από αυτό που παρουσιάζεται, ενώ για μεγαλύτερες τιμές ακόμη μικρότερο.

Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης θα χρειαστούν οι εξισώσεις που περιγράφουν το κόστος εγκατάστασης κάθε ΕΣΜ [2.9] και που παρουσάζεται στα Σχήματα 2.5 και 2.6. Οι εξισώσεις αυτές είναι οι ακόλουθες:

$$C_{UPFC} = 0.0003 \cdot S^2 - 0.2691 \cdot S + 188.22 \tag{2.3a}$$

$$C_{TCSC} = 0.0015 \cdot S^2 - 0.7130 \cdot S + 153.75 \tag{2.36}$$

$$C_{SVC} = 0.0003 \cdot S^2 - 0.3051 \cdot S + 127.38 \tag{2.3}$$

όπου C_{UPFC} , C_{TCSC} , C_{SVC} είναι το κόστος εγκατάστασης (σε US\$/kVAr) για το UPFC, TCSC και SVC, αντίστοιχα, και S (σε MVAr) είναι το εύρος λειτουργίας.. Συνεπώς, το κόστος εγκατάστασης κάθε ΕΣΜ σε US\$ θα είναι :

$$IC_{UPFC} = C_{UPFC} \cdot S \cdot 1000 \tag{2.4a}$$

$$IC_{TCSC} = C_{TCSC} \cdot S \cdot 1000 \tag{2.4\beta}$$

$$IC_{SVC} = C_{SVC} \cdot S \cdot 1000 \tag{2.4\gamma}$$

όπου IC_{UPFC} , IC_{TCSC} , IC_{SVC} το κόστος εγκατάστασης των UPFC, TCSC και SVC, αντίστοιχα, σε US\$

2.4.1.3 Αντικειμενική Συνάρτηση (Objective Function)

Δύο είναι τα μεγέθη των οποίων αναζητείται η βέλτιστη τιμή: η φόρτιση του συστήματος και το κόστος εγκατάστασης. Ωστόσο, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης περιλαμβάνει μόνο το κόστος εγκατάστασης των συσκευών. Για την εύρεση της μέγιστης φόρτισης του συστήματος εξετάζεται απλώς αν για τις δεδομένες θέσεις τοποθέτησης των συσκευών και τη δεδομένη φόρτιση συστήματος παραβιάζονται οι περιορισμοί του ΣΗΕ. Αν δεν παραβιάζονται, το SL αυξάνει και γίνεται πάλι έλεγχος. Η διαδικασία σταματάει, όταν δε βρεθούν θέσεις, για τις οποίες για το δεδομένο SL οι συνθήκες δεν παραβιάζονται. Η μέγιστη τιμή SL που βρέθηκε είναι και η επιθυμητή. Αναλυτικότερα η διαδικασία αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

Η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης για την εγκατάσταση μιας συσκευής δίνεται από τον τύπο (2.4). Φυσικά, αν χρησιμοποιούνται περισσότερα του ενός ΕΣΜ η αντικειμενική συνάρτηση είναι το συνολικό κόστος εγκατάστασης όλων των χρησιμοποιούμενων συσκευών. Τελικά, η αντικειμενική συνάρτηση της οποίας επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Min IC_{tot} = Min \left(\sum IC_{UPFC} + \sum IC_{TCSC} + \sum IC_{SVC} \right)$$
(2.5)

2.4.2 Μεταβλητές Σχεδίασης Προβλήματος Βελτιστοποίησης

Οι μεταβλητές σχεδίασης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, όπως έχει αναφερθεί, είναι τα μεγέθη που καθορίζουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Στην προηγούμενη ενότητα έγινε φανερό ότι η αντικειμενική συνάρτηση εξαρτάται από τη ροή αέργου ισχύος στις γραμμές του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου, λοιπόν, ότι η ροή αέργου ισχύος στις γραμμές ενός ΣΗΕ εξαρτάται από τις τιμές των ηλεκτρικών παραμέτρων του συστήματος, ότι η εγκατάσταση ΕΣΜ επηρεάζει τις τιμές αυτών, και ότι ο βαθμός επίδρασης των ΕΣΜ εξαρτάται και από τη θέση όπου τοποθετούνται, είναι προφανές ότι οι θέσεις των συσκευών ΕΣΜ, το είδος τους, το πλήθος και οι ρυθμίσεις τους είναι οι μεταβλητές σχεδίασης αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης. Επειδή, όπως παρουσιάζεται και στο Κεφάλαιο 4, το είδος και το πλήθος των συσκευών που χρησιμοποιούνται κάθε φορά στους υπολογισμούς καθορίζεται εξωτερικά, δηλαδή από το χρήστη του προγράμματος που αναπτύχθηκε, οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη μαθηματική επίλυση του προβλήματος είναι η θέση (location) και οι ρυθμίσεις (settings) των συσκευών.

Οι μεταβλητές που αντιστοιχούν στις ρυθμίσεις του ευέλικτου συστήματος μεταφοράς εξαρτώνται από το είδος αυτού και τη μοντελοποίησή του. Προκύπτει, συνεπώς, η αναγκαιότητα καθορισμού των μαθηματικών μοντέλων των συσκευών που θα χρησιμοποιηθούν στο εν λόγω πρόβλημα και τον προσδιορισμό των

ρυθμίσεών τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν για τα τρία ευέλικτα συστήματα μεταφοράς, δηλαδή τα TCSC, SVC και UPFC.

2.4.2.1 Μοντέλο TCSC

Στην εργασία αυτή το TCSC θα μοντελοποιηθεί ως μια μεταβλητή αντίδραση που συνδέεται σε σειρά με την επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς [2.9]. Η μεταβλητή αυτή αντίδραση ισοδυναμεί με τη επαγωγική αντίδραση του TCSC,

 X_{TCSC} , για την οποία έγινε αναφορά στην Ενότητα 2.3. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται το μοντέλο του TCSC εγκατεστημένο σε γραμμή μεταφοράς με επαγωγική αντίδραση X.



Σχήμα 2.7: Το μοντέλο ενός TCSC στη γραμμή μεταφοράς.

Η τιμή της επαγωγικής αντίδρασης του TCSC πρέπει να κυμαίνεται εντός κάποιων ορίων τα οποία, όμως, δεν είναι σταθερές τιμές, αλλά εξαρτώνται από την τιμή της αντίδρασης της γραμμής μεταφοράς στην οποία εγκαθίσταται το σύστημα. [2.10], [2.11]. Αυτό δίνει ευελιξία στην αναζήτηση τιμών για το X_{TCSC} και αποφεύγεται ο κίνδυνος τα επιλεγμένα σταθερά όρια να είναι είτε πολύ μικρά για γραμμές με μεγάλη επαγωγική αντίδραση είτε πολύ μεγάλα για γραμμές με μικρή. Έτσι, η επαγωγική αντίδραση του TCSC πρέπει να παίρνει τιμές βάσει της ακόλουθης σχέσης:

$$-0.8 \cdot X \le X_{TCSC} \le 0.2 \cdot X \tag{2.6}$$

2.4.2.2 Μοντέλο SVC

Για το μοντέλο του στατικού αντισταθμιστή αέργου ισχύος χρησιμοποιείται πηγή αέργου ισχύος, η οποία εισάγεται εγκάρσια και στους δυο ζυγούς στα άκρα της γραμμής που τοποθετείται η συσκευή [2.11]. Αν η συνολική εγχεόμενη από τη συσκευή άεργος ισχύς είναι Q_{SVC} , τότε σε κάθε ζυγό εγχέεται $Q_{SVC}/2$. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται το μοντέλο του SVC εγκατεστημένο σε γραμμή μεταφοράς επαγωγικής αντίδρασης X.



Σχήμα 2.8: Το μοντέλο ενός SVC στη γραμμή μεταφοράς.

Το εύρος λειτουργίας της συσκευής δίνεται στη σχέση (2.7). Σε αντίθεση με το TCSC, τα όρια λειτουργίας είναι σταθερά και αποτελούν συνήθεις τιμές στη μοντελοποίηση της εν λόγω συσκευής.

$$-100 \, MVAr \le Q_{SVC} \le 100 \, MVAr \tag{2.7}$$

2.4.2.3 Μοντέλο UPFC

Για την υλοποίηση του μοντέλου του UPFC χρησιμοποιείται ο συνδυασμός των μοντέλων του TCSC και του SVC όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω. Έτσι, αποτελείται από μια μεταβλητή αντίδραση X_{UPFC} τοποθετημένη σε σειρά με την επαγωγική αντίδραση της γραμμής (μοντέλο TCSC) και δύο πηγές αέργου ισχύος εγκάρσια τοποθετημένες στους ζυγούς στα άκρα της γραμμής που εγκαθίσταται η συσκευή (μοντέλο SVC) [2.11]. Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η μοντελοποιήση ενός UPFC με ρυθμίσεις X_{UPFC} και Q_{UPFC} εγκατεστημένου σε γραμμή μεταφορά επαγωγικής αντίδρασης X.

Κατά αντιστοιχία, το εύρος λειτουργίας του μοντέλου UPFC θα είναι ίδιο με τα μοντέλα των TCSC και SVC. Δηλαδή:

$$-0.8 \cdot X \le X_{UPFC} \le 0.2 \cdot X \tag{2.8a}$$

$$-100 MVAr \le Q_{UPFC} \le 100 MVAr \tag{2.86}$$



Σχήμα 2.9: Το μοντέλο ενός UPFC στη γραμμή μεταφοράς.

2.4.3 Περιορισμοί Προβλήματος Βελτιστοποίησης

Η πλειονότητα των προβλημάτων βελτιστοποίησης υπόκεινται σε ένα σύνολο περιορισμών, οι οποίοι καθορίζουν περιοχές του χώρου αναζήτησης εντός των οποίων οι λύσεις δεν είναι αποδεκτές. Οι περιορισμοί αυτοί διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες [2.7]: α) τους συνοριακούς περιορισμούς (boundary constraints), οι οποίοι ορίζουν άμεσα τα σύνορα του χώρου αναζήτησης των υποψήφιων λύσεων, β) τους περιορισμούς ισότητας (equality constraints), που καθορίζουν ότι μια συνάρτηση των μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος είναι ίση με μια σταθερά και γ) τους ανισωτικούς περιορισμούς (inequality constraints), οι οποίοι καθορίζουν ότι η τιμή μιας συνάρτησης των μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος είναι άση με ασταθερά και γ) τους μικρότερη-ίση ή μεγαλύτερη/μεγαλύτερη-ίση από μια σταθερά. Οι περιορισμοί μπορεί να είναι είτε γραμμικοί είτε μη γραμμικοί.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται ο χώρος αναζήτησης πιθανών λύσεων ενός απλού προβλήματος βελτιστοποίσης με μια αντικειμενική συνάρτηση f(x), που διατυπώνεται ως εξής [2.7]:

Ελαχιστοποίηση της $f(\mathbf{x}), \mathbf{x} = (x_1, ..., x_n)$ με περιορισμό ισότητας $\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$, $A \in \mathbb{R}^{mxn}$ και $b \in \mathbb{R}^m$



Σχήμα 2.10: Χώρος αναζήτησης πιθανών λύσεων του παραδείγματος [2.7].

Στο παράδειγμα αυτό γίνεται φανερό ότι οι περιορισμοί σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι καθοριστικοί για την εύρεση της βέλτιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Το *Α* που είναι το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης δεν αποτελεί λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης επειδή βρίσκεται στο χώρο μη αποδεκτών λύσεων, δηλαδή παραβιάζει τον περιορισμό ισότητας..

Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της παρούσας εργασίας τίθενται περιορισμοί και των τριών τύπων. Οι περιορισμοί αυτοί παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.4.3.1 Συνοριακοί Περιορισμοί του Προβλήματος

Στην παράγραφο 2.4.2, όπου παρουσιάστηκαν τα μοντέλα των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα, εισήχθησαν στις ρυθμίσεις αυτών περιορισμοί (εξισώσεις (2.6),(2.7),(2.8)). Οι περιορισμοί αυτοί είναι συνοριακοί περιορισμοί του χώρου αναζήτησης.

Στο πρόβλημα αυτό, η θέση όπου τοποθετείται μια συσκευή εκφράζεται από έναν ακέραιο αριθμό που αντιστοιχεί στο αύξοντα αριθμό γραμμής όπου είναι τοποθετημένη. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι η τιμή της μεταβλητής αυτή δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από το πλήθος των γραμμών του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο είναι εγκατεστημένη η συσκευή. Αυτός είναι ένας ακόμη συνοριακός περιορισμός του προβλήματος και εκφράζεται απο την εξίσωση (2.9):

$$X_{loc} \le Lines_{tot} \tag{2.9}$$

όπου X_{loc} η μεταβλητή που εκφράζει τη θέση της συσκευής στο ΣΗΕ και Lines_{max} ο συνολικός αριθμός γραμμών του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

2.4.3.2 Ανισωτικοί Περιορισμοί του Προβλήματος

Ως γνωστόν, η ικανότητα ενός συστήματος μεταφοράς να μεταφέρει ηλεκτρική ισχύ περιορίζεται από διάφορους δυναμικούς περιορισμούς και περιορισμούς μόνιμης κατάστασης. Τέτοιοι είναι : η γωνιακή ευστάθεια, το μέτρο τάσεως ζυγών, τα θερμικά όρια, η μεταβατική ευστάθεια και η δυναμική ευστάθεια. Τα όρια αυτά καθορίζουν τη μέγιστη δυνατή μεταφερόμενη ηλεκτρική ισχύ χωρίς την πρόκληση ζημιών στις γραμμές μεταφοράς και στον ηλεκτρικό εξοπλισμό.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης οι περιορισμοί που θα ελέγχεται αν ικανοποιούνται είναι το μέτρο τάσης στους ζυγούς και το θερμικό όριο των γραμμών μεταφοράς. Και τα δυο μεγέθη που ελέγχεται η τιμή τους (τάση, ενεργός ισχύς) προκύπτουν ως συνάρτηση της θέσης και των ρυθμίσεων των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς που τοποθετούνται στις γραμμές του συστήματος (μη γραμμική συνάρτηση). Οι δυο αυτοί ανισωτικοί περιορισμοί περιγράφονται στη συνέχεια:

2.4.3.2.1 Μέτρο τάσεως ζυγών

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι επιθυμητό η τάση στους ζυγούς, στη μόνιμη κατάσταση, να κυμαίνεται εντός ενός στενού εύρους τιμών γύρω από την ονομαστική τάση του συστήματος διότι ειδάλλως προκύπτει σημαντικό πρόβλημα στη λειτουργία του ηλεκτρικού εξοπλισμού.

Έτσι, για το εν λόγω πρόβλημα, η τάση V_i σε κάθε ζυγό i του συστήματος πρέπει να κυμαίνεται στο διάστημα:

$$0.9 \, p.u. \le V_i \le 1.1 \, p.u., \, \forall \, i \tag{2.10}$$

2.4.3.2.2 Θερμικό όριο γραμμών

Το ρεύμα που διαρρέει τους αγωγούς των γραμμών μεταφοράς προκαλεί τη θέρμανση αυτών εξαιτίας των ωμικών απωλειών. Εάν η θέρμανση αυτή είναι
σημαντική μπορεί να προκαλέσει διαστολή των αγωγών και αύξηση της καμπυλότητάς τους με αποτέλεσμα να προσεγγίσουν επικίνδυνα παρακείμενους αγωγούς ή το έδαφος. Η υπερθέρμανση μπορεί να οδηγήσει μέχρι και στην καταστροφή των αγωγών. Για την αποφυγή των φαινομένων αυτών, ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αγωγού και του συστήματος, τίθεται ένα μέγιστο όριο ροής ρεύματος (άρα και ροής ισχύος), το θερμικό όριο. Έτσι, λοιπόν, ο δευτερος ανισωτικός περιορισμός που εισάγεται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης απαιτεί η ροή ενεργού ισχύος κάθε γραμμής να υπακούει στη σχέση:

$$P_l \le P_l^{max}, \forall l \tag{2.11}$$

όπου P_l (MW) η ροή ενεργού ισχύος της γραμμής l και P_l^{max} (MW) το θερμικό όριο της γραμμής l.

2.4.3.3 Περιορισμοί Ισότητας του Προβλήματος

Ο περιορισμός που εισάγει η ανάλυση ροών φορτίου, δηλαδή οι εξισώσεις ροής φορτίου, είναι ο τελευταίος περιορισμός του προβλήματος βελτιστοποίησης. Σύμφωνα με τον περιορισμό αυτό η συνάρτηση που δίνεται από τη σχέση (2.12) πρέπει να είναι ικανοποιεί την ισοτική σχέση που δίνεται από τη (2.13).

$$f(V,\theta) = \begin{cases} P_k(V,\theta) - P_{kO} \\ Q_k(V,\theta) - Q_{kO} \\ P_m(V,\theta) - P_{mO} \end{cases}$$
(2.12)

όπου V το μέτρο τάσης των ζυγών, θ οι φασικές γωνίες των τάσεων των ζυγών, $P_k(V,\theta)$, $Q_k(V,\theta)$ η υπολογιζόμενη ενεργός και άεργος ισχύς του k ζυγού φορτίου, P_{k0} , Q_{k0} η ενεργός και άεργος ισχύς του ζυγού φορτίου που είναι γνωστές, $P_m(V,\theta)$ η υπολογιζόμενη ενεργός ισχύς του m ζυγού παραγωγής και P_{m0} η άγνωστη παραγωγή ενεργού ισχύος του m ζυγού παραγωγής.

$$f(V,\theta) = 0 \tag{2.13}$$

Στην εισαγωγή της παρούσας ενότητας ορίσθηκαν οι περιορισμοί ισότητας ως οι περιορισμοί που καθορίζουν ότι μια συνάρτηση των μεταβλητών σχεδίασης πρέπει να είναι ίση με μια σταθερά. Στη σχέση (2.12) όμως, η f παρουσιάζεται ως συνάρτηση των μεταβλητών V, θ που δεν είναι μεταβλητές σχεδίασης. Ωστόσο, οι V, θ εξαρτώνται άμεσα από τη θέση και τις ρυθμίσεις των ΕΣΜ που εγκαθίστανται στις γραμμές (αφού ουσιαστικά αλλάζουν τις παραμέτρους του ΣΗΕ), και συνεπώς η f, εξαρτάται τελικά από τις μεταβλητές σχεδίασης.

Συνοπτικά, το πρόβλημα βελτιστοποίησης που πραγματεύεται η εργασία αυτή έχει ώς αντικειμενική συνάρτηση τη συνάρτηση που δίνεται από τη σχέση (2.5). Η τιμή της συνάρτησης αυτής εξαρτάται από τη θέση και τις ρυθμίσεις των προς εγκατάσταση ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς. Τα δυο μεγέθη αυτά αποτελούν τις μεταβλητές του προβλήματος και κινούνται σε ένα χώρο πιθανών λύσεων που φράσσεται από τις συνοριακές συνθήκες (2.6) έως (2.13).

2.4.4 Διατύπωση του Προβλήματος Βελτιστοποίησης

Συνοψίζοντας, το πρόβλημα βελτιστοποίησης της παρούσας εργασίας διατυπώνεται ως ακολούθως:

$$\min IC_{tot} = \min\{\sum IC_{TCSC} + \sum IC_{SVC} + \sum IC_{UPFC}\}$$
(2.14)

υπό τους περιορισμούς:

$$-0.8 \cdot X \le X_{TCSC} \le 0.2 \cdot X \tag{2.16}$$

(2.15)

$$-100 MVAr \le Q_{SVC} \le 100 MVAr \tag{2.18}$$

$$-0.8 \cdot X \le X_{TCSC} \le 0.2 \cdot X \tag{2.19}$$

$$-100 MVAr \le Q_{UPFC} \le 100 MVAr \tag{2.20}$$

$$X_{loc} \le Lines_{tot} \tag{2.21}$$

$$0.9 \, p.u. \le V_i \le 1.1 \, p.u., \, \forall \, i$$
 (2.22)

$$P_l \le P_l^{max}, \forall l \tag{2.23}$$

$$f(V,\theta) = 0 \tag{2.24}$$

Το πρόβλημα είναι πρόβλημα βελτιστοποίησης μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Οι μεταβλητές σχεδίασης είναι οι θέσεις εγκατάστασης των ΕΣΜ (ακέραια μεταβλητή) και οι ρυθμίσεις αυτών (πραγματική μεταβλητή).

2.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] A. A. Edris et al, "Proposed terms and definitions for flexible AC transmission system (FACTS)," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no.4, pp. 1848–1853, Oct. 1997.
- [2.2] Β. Κ. Παπαδιάς, Ε. Α. Λεωνιδάκη, "Επίδραση των Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (FACTS) στη Λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας," Τεχν. Χρον. Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ, ΙΙΙ, τευχ. 1-2, 2002.
- [2.3] D. J. Gotham, G. T. Heydt, "Power Flow Control and Power Flow Studies for Systems with FACTS Devices," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.13, no. 1, pp. 60-65, Feb. 1998.
- [2.4] Γ. Κορρές, Σημειώσεις Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς. Αθήνα: ΕΜΠ, 2007.
- [2.5] Γ. Ι. Γεωργαντζής, "Εφαρμογές Ηλεκτρονικών Ισχύος στη Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας," στο Διήμερο 28-29 Σεπτεμβρίου 2000 Τεχνολογία και Βιομηχανικές Εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος – Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά, τεύχος 2118.

- [2.6] E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles-Camacho *FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks.* Wiley, 2004.
- [2.7] A. P. Engelbrecht, *Fundamentals of computational swarm intelligence*. John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [2.8] K. Habul, D. O'Leary, "FACTS-For Cost Effective and ReliableTransmission of Electrical Energy," Reactive Power Compensation, Power Transmission and Distribution Group of Siemens, 2005.
- [2.9] K. Chandrasekaran, K. Arul Jeyaraz, L. Sahayasenthamil, M. Saravanan, "A new method to incorporate FACTS devices in Optimal Power Flow using Particle Swarm Optimization," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 5, no. 1, 2009.
- [2.10] J. Baskaran, V. Palanisamy, "Genetic Algorithm applied to Optimal Location of FACTS Devices in a Power System Network considering economic saving cost," *Academic Open Internet Journal*, vol. 15, 2005 [Online]. Available: <u>http://www.acadjournal.com/ 2005/v15/part6/p3/</u>. Accessed on September 2010.
- [2.11] M. Saravanan, S. Mary Raja Slochanal, P. Venkatesh, J. Prince Stephen Abraham, "Application of Particle Swarm Optimization Technique for Optimal Location of FACTS Devices considering Cost of Installation and System Loadability," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 3-4, pp. 276-283, Mar. 2007.

КЕФАЛАЮ <u>3</u>

ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη επίλυσης όλο και πιο πολύπλοκων και δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης, που προέκυψαν με την αναπόφευκτη αύξηση της πολυπλοκότητας των συστημάτων, οδήγησε τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη και εξέλιξη διάφορων ευριστικών εργαλείων (heuristic tools), η διάδοση των οποίων ευνοήθηκε από την πρόοδο στα υπολογιστικά συστήματα και από τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε όλους τους τομείς της επιστημονικής έρευνας. Τέτοια εργαλεία είναι ο εξελικτικός προγραμματισμός (evolutionary computing), η αναζήτηση tabu (tabu search), οι αλγόριθμοι πληθυσμού (population algorithms) και πολλά άλλα. Καθεμιά από τις τεχνικές αυτές βασίζεται σε διαφορετική φιλοσοφία και έχει τα δικά της χαρακτηριστικά, προτερήματα και μειονεκτήματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα άλλες τεχνικές να είναι αποτελεσματικές σε μια κατηγορία προβλημάτων βελτιστοποίησης και άλλες σε κάποια διαφορετική.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μαθηματική μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (ΒΣΣ), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που διατυπώθηκε στο Κεφάλαιο 2. Αρχικά, παρουσιάζεται η λεγόμενη βασική (ή κλασική) μέθοδος ΒΣΣ. Οι τροποποιημένες μέθοδοι αυτής που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία επεξηγούνται στη συνέχεια, ενώ στο τέλος παρουσιάζεται ο τρόπος εισαγωγής των μοντέλων των ΕΣΜ στην τεχνική, καθώς και ο τρόπος χειρισμού των περιορισμών του προβλήματος βελτιστοποίησης.

3.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΒΣΣ

Η τεχνική βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων $B\Sigma\Sigma$ (particle swarm optimization technique, PSO) είναι μια τεχνική που εντάσσεται στη λεγόμενη

νοημοσύνη σμήνους (swarm intelligence). Πρόκειται για ένα στοχαστικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί ένα πληθυσμό σημείων βελτιστοποίησης. Αρχικά, προτάθηκε το 1995 από τους Kennedy και Eberhart [3.1], [3.2] Η ανάπτυξή του βασίστηκε στην προσπάθεια προσομοίωσης της κίνησης ενός σμήνους πτηνών ή ενός κοπαδιού ψαριών ως μέρος μιας κοινωνιογνωστικής μελέτης πάνω στην ιδέα της συλλογικής νοημοσύνης των βιολογικών πληθυσμών. Έκτοτε η τεχνική έχει δεχθεί διάφορες τροποποιήσεις σε μια προσπάθεια βελτίωσης της σύγκλισής της και όχι μόνο [3.3]-[3.7], ενώ έχει εφαρμοστεί σε ποικίλα προβλήματα βελτιστοποίησης· μεταξύ αυτών και σε προβλήματα του κλάδου της ηλεκτρολογίας [3.8]-[3.10].

Ο αλγόριθμος ΒΣΣ έχει ως βάση ένα σμήνος (swarm) από σωματίδια (particles), όπου κάθε σωματίδιο αναπαριστά μια υποψήφια λύση (candidate solution) για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Τα σωματίδια αυτά κινούνται σε ένα πολυδιάστατο χώρο αναζήτησης, όπου η θέση του καθενός κάθε χρονική στιγμή – για την ακρίβεια σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας – καθορίζεται τόσο από την ίδια του την εμπειρία όσο και από αυτή του υπόλοιπου σμήνους. Σε αναλογία με τους εξελικτικούς αλγορίθμους (EA, evolutionary algorithms), το σμήνος της ΒΣΣ αντιστοιχεί στον πληθυσμό (population) των ΕΑ, ενώ τα σωματίδια αντιστοιχούν στα άτομα (individuals). Ωστόσο, σε αντίθεση με τους ΕΑ, η ΒΣΣ δε χρησιμοποιεί εξελικτικούς τελεστές, όπως η διασταύρωση (crossover) και η μετάλλαξη (mutation).

Έστω ότι η θέση ενός σωματιδίου *i* την χρονική στιγμή *t* συμβολίζεται με x(t) και ότι το *t* αναφέρεται σε διακριτά χρονικά βήματα – αντιστοιχούν στα βήματα του επαναληπτικού βρόχου του αλγορίθμου ΒΣΣ – τότε η θέση του σωματιδίου την χρονική στιγμή t+1 θα είναι:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + V_i(t+1)$$
(3.1)

όπου V_i είναι το διάνυσμα της ταχύτητας του σωματιδίου το οποίο "κινεί" τη διαδικασία βελτιστοποίησης και περιλαμβάνει την εμπειρική γνώση του σωματιδίου και την κοινωνικά ανταλλασσόμενη πληροφορία με τα υπόλοιπα σωματίδια του σμήνους. Η εμπειρική γνώση του σωματιδίου αποκαλείται γνωστική συνιστώσα (cognitive component), ενώ η κοινωνικά ανταλλασσόμενη πληροφορία αποκαλείται κοινωνική συνιστώσα (social component).

Κατά την κίνηση ενός σωματιδίου στο χώρο αναζήτησης, το σωματίδιο εξετάζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τις διάφορες υποψήφιες λύσεις (κάθε θέση του σωματιδίου είναι μια υποψήφια λύση). Η θέση του σωματιδίου για την οποία η αντικειμενική συνάρτηση δίνει τη βέλτιστη τιμή (μέγιστη ή ελάχιστη ανάλογα με το πρόβλημα) σε σχέση με τις υπόλοιπες θέσεις του καλείται προσωπικό βέλτιστο (personal best, pbest). Έστω ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση f. Το προσωπικό βέλτιστο θα είναι τότε:

$$pbest_{i}(t+1) = \begin{cases} pbest_{i}(t), \gamma i \alpha f(x_{i}(t+1)) \ge f(pbest_{i}(t)) \\ x_{i}(t+1), \gamma i \alpha f(x_{i}(t+1)) < f(pbest_{i}(t)) \end{cases}$$
(3.2)

Εάν από όλα τα σωματίδια επιλεγούν το προσωπικό βέλτιστο του καθενός και συγκριθούν οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε ένα από αυτά, αυτό που δίνει την βέλτιστη τιμή αυτής καλείται ολικό βέλτιστο (global best, gbest). Το ολικό

βέλτιστο θα είναι τότε:

$$gbest(t) \in (pbest_0(t), pbest_1(t), \dots, pbest_n(t))$$

$$\mu \varepsilon f(gbest(t)) = min(f(pbest_0(t)), f(pbest_1(t)), \dots, f(pbest_n(t)))$$
(3.3)

Τελικά, η ταχύτητα που αθροίζεται στην κίνηση του σωματιδίου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{i}(t+1) = V_{i}(t) + c_{1} \cdot r_{1} \cdot [pbest_{i}(t) - x_{i}(t)] + c_{2} \cdot r_{2} \cdot [gbest(t) - x_{i}(t)]$$
(3.4)

Όπου r_1 , r_2 είναι τυχαίες τιμές στο διάστημα [0,1]. Αυτές οι τυχαίες τιμές εισάγουν στον αλγόριθμο το στοχαστικό στοιχείο. Οι συντελεστές c_1 και c_2 ονομάζονται συντελεστές επιτάχυνσης (acceleration coefficients) και είναι στην ουσία οι συντελεστές βαρύτητας για τη γνωστική και την κοινωνική συνιστώσα, αντίστοιχα.

Το μέγεθος $V_i(t)$ αντιστοιχεί στην προηγούμενη ταχύτητα του σωματιδίου, η οποία λειτουργεί ως μνήμη για την παρελθοντική κίνησή του. Ο όρος αυτός μπορεί να χαρακτηριστεί και ως η ορμή του σωματιδίου, καθώς το αποτρέπει να αλλάξει απότομα την κατεύθυνσή του. Ωστόσο, συνήθως αναφέρεται ως συνιστώσα αδράνειας και δέχεται ένα συντελεστή βαρύτητας, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, το συντελεστή βαρύτητας αδράνειας (inertia weight).

Η γνωστική συνιστώσα του σωματιδίου εκφράζεται στην εξίσωση (3.4) μέσω του όρου $c_1 \cdot r_1 \cdot [pbest_i(t) - x_i(t)]$. Γενικά, η γνωστική συνιστώσα εκφράζει την ατομική μνήμη του σωματιδίου για την καλύτερη θέση στην οποία έχει βρεθεί. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όρος αυτός – γεγονός που εξαρτάται και από το συντελεστή βαρύτητας c_1 – τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση του σωματιδίου να επιστρέψει σε θέσεις που το ικανοποίησαν περισσότερο στο παρελθόν.

Η κοινωνική συνιστώσα του σωματιδίου εκφράζεται στην εξίσωση (3.4) μέσω του όρου $c_2 \cdot r_2 \cdot [gbest(t) - x_i(t)]$. Ο όρος αυτός αναφέρεται στην επίδραση που ασκεί το κοινωνικό σύνολο στο σωματίδιο το οποίο καλείται να υιοθετήσει μια κοινή με το σύνολο συμπεριφορά. Όσο μεγαλύτερος ο όρος αυτός, τόσο μεγαλύτερη η τάση του σωματιδίου να κινηθεί προς το ολικό βέλτιστο, τη θέση δηλαδή που ικανοποίησε περισσότερο το σμήνος.

Υπενθυμίζεται ότι οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν τη βασική μέθοδο ΒΣΣ. Οι διάφορες τροποποιήσεις που έχουν κατά καιρούς προταθεί βασίζονται στις εξισώσεις (3.1) έως (3.4) με κάποιες αλλαγές που έχουν ως σκοπό συνήθως τη βελτίωση της σύγκλισης της μεθόδου ή τη βελτίωση της κίνησης του σμήνους στο χώρο αναζήτησης. Η αρκετά μεγάλη ποικιλία των παραλλαγών και το γεγονός ότι ξεφεύγουν από το αντικείμενο της παρούσας εργασίας δεν καθιστά σκόπιμη την παρουσίασή τους. Ωστόσο, στην Ενότητα 3.4.1 θα γίνει η περιγραφή μόνο των δύο τροποποιημένων τεχνικών που θα χρησιμοποιηθούν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της εργασίας.

Στο Σχήμα 3.1 [3.11] παρουσιάζεται εποπτικά το διάνυσμα της κίνησης του σωματιδίου *i* στο χώρο αναζήτησης.. Σε κάθε βήμα *t*, το σωματίδιο ενημερώνει την θέση του και την ταχύτητά του. Σύμφωνα με τη σχέση (3.4) η νέα ταχύτητα του σωματιδίου προκύπτει από το άθροισμα των εξής διανυσμάτων: του διανύσματος της συνιστώσας αδράνειας $V_i(t)$, του διανύσματος της γνωστικής συνιστώσας που το μέτρο της είναι ανάλογο της απόστασης του σωματιδίου από το προσωπικό του βέλτιστο (μνήμη σωματιδίου) και του διανύσματος της κοινωνικής συνιστώσας που το μέτρο του είναι ανάλογο της απόστασης του σωματιδίου από το ολικό βέλτιστο (επιρροή σμήνους). Η νέα του θέση θα δίνεται από τη σχέση (3.1).



Σχήμα 3.1: Διάνυσμα κίνησης του σωματιδίου στο χώρο αναζήτησης [3.11].

3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΘΟΔΟΥ ΒΣΣ

Η βασική τεχνική ΒΣΣ επηρεάζεται από ένα σύνολο παραμέτρων ελέγχου. Αυτές είναι το μέγεθος του σμήνους, η μέγιστη ταχύτητα, ο αριθμός επαναλήψεων, οι συντελεστές επιτάχυνσης και ο συντελεστής αδράνειας. Επειδή οι βέλτιστες ρυθμίσεις των παραμέτρων αυτών διαφέρουν από πρόβλημα σε πρόβλημα είναι σημαντικό να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο αυτές επηρεάζουν την λειτουργία και την επίδοση της μεθόδου [3.12],[3.13]. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εν λόγω παράμετροι.

3.3.1 Μέγεθος Σμήνους

Το μέγεθος του σμήνους (swarm size) αφορά το πλήθος των σωματιδίων σε αυτό. Όπως είναι αντιληπτό, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος, τόσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά των σωματιδίων στο χώρο αναζήτησης, δεδομένης φυσικά μιας ομοιόμορφης κατανομής αυτών στο χώρο. Παρόλα αυτά, μεγάλο σμήνος αυξάνει σημαντικά την υπολογιστική πολυπλοκότητα του αλγόριθμου, ενώ δε συνεπάγεται κατα ανάγκη βελτίωση της επίδοσης της μεθόδου. Εμπειρικές μελέτες [3.4], [3.14], [3.15] έχουν δείξει ότι βέλτιστες λύσεις μπορούν κάλλιστα να επιτευχθούν με μέγεθος σμήνους από 10 έως 30 σωματίδια και για το λόγο αυτό είναι κοινή πλέον πρακτική να επιλέγονται τέτοιου μεγέθους σμήνη (συχνά και έως 60 σωματίδια).

3.3.2 Μέγιστη Ταχύτητα

Η μέγιστη ταχύτητα καθορίζει τη μέγιστη μεταβολή που μπορεί να δεχθεί ένα σωματίδιο στη θέση του σε μια επανάληψη και χρησιμοποιείται για να αποφεύγεται η άσκοπη κίνηση των σωματιδίων εκτός των ορίων αναζήτησης. Συνήθως ορίζεται ίση με το επιτρεπτό εύρος τιμών της θέσης του σωματιδίου. Σε πολλές περιπτώσεις το όριο της μέγιστης ταχύτητας βελτιώνει την αναζήτηση του βέλτιστου.

3.3.3 Αριθμός Επαναλήψεων

Ο αριθμός επαναλήψεων που χρειάζεται για να επιτύχει η διαδικασία μια καλή λύση εξαρτάται από το πρόβλημα. Λίγες επαναλήψεις πιθανόν να τερματίσουν την αναζήτηση πριν την ώρα της, δηλαδή πριν βρεθεί μια ικανοποιητική λύση. Αντίθετα, ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων θα είχε ως συνέπεια περιττές επαναλήψεις· συνεπώς θα αύξανε την υπολογιστική πολυπλοκότητα χωρίς λόγο.

3.3.4 Συντελεστές Επιτάχυνσης

Οι συντελεστές επιτάχυνσης είναι οι τιμές c_1 και c_2 της εξίσωσης (3.4). Οι δυο τιμές αυτές πολλαπλασιασμένες αντίστοιχα με τις τυχαίες μεταβλητές r_1 και r_2 συνιστούν σε κάθε επανάληψη τους στοχαστικούς συντελεστές βαρύτητας της γνωσιακής και κοινωνικής συνιστώσας. Ο συντελεστής c_1 θα μπορούσε να ειδωθεί ως η εμπιστοσύνη που έχει το σωματίδιο στον εαυτό του ενώ ο συντελεστής c_2 η εμπιστοσύνη που έχει προς το υπόλοιπο σμήνος. Οι Kennedy και Eberhart

αποκάλεσαν τον συντελεστή c_1 ως "νοσταλγία" (nostalgia) ενώ τον c_2 ως "φθόνο" (envy). Έτσι, λοιπόν, όταν $c_2=0$ και $c_1>0$ τότε χάνεται η κοινωνική συνοχή μεταξύ των σωματιδίων και κάθε ένα αναζητά την λύση αυτόνομα και τοπικά. Αν ισχύει το αντίθετο, δηλαδή $c_1 = 0$ ενώ $c_2 > 0$, τότε χάνεται η ατομική πρωτοβουλία και το σμήνος λειτουργεί ως μια ενιαία οντότητα η οποία έλκεται από το ολικό βέλτιστο. Είναι φανερό από τις δυο αυτές ακραίες περιπτώσεις, ότι οι τιμές και η αναλογία των συντελεστών καθορίζουν τη συμπεριφορά του σμήνους. Σε αρκετές εφαρμογές οι τιμές των δυο συντελεστών εξισώνονται με αποτέλεσμα τα σωματίδια να κατευθύνονται προς τον μέσο όρο του προσωπικού βέλτιστου και του ολικού βέλτιστου. Γενικά, οι τιμές που θα δωθούν στους συντελεστές επιτάχυνσης εξαρτώνται από το είδος του προβλήματος·πρέπει, ωστόσο να σημειωθεί, ότι η επιλογή αυτή είναι σημαντική διότι μια λάθος αρχικοποίηση των συντελεστών θα μπορούσε να οδηγήσει στην απόκλιση της επαναληπτικής διαδικασίας ή ακόμα και σε κυκλική συμπεριφορά.

Στην Ενότητα 3.4.1 θα παρουσιαστεί μια τεχνική η οποία μεταβάλλει

γραμμικά τους δυο συντελεστές προκειμένου να εκμεταλλευτεί τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που προσδίδει η τιμή του κάθε συντελεστή στην κίνηση του σμήνους στο χώρο αναζήτησης. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται στην επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που αφορά την παρούσα εργασία.

3.3.5 Συντελεστής Αδράνειας

Ο συντελεστής αδράνειας (inertia weight, w) εισήχθη από τους Eberhart και Shi [3.4], [3.5] με σκοπό να ελέγξει την ορμή (momentum) του σωματιδίου, λειτουργώντας ως συντελεστής βαρύτητας στη συνεισφορά της προηγούμενης ταχύτητας (συνιστώσα αδράνειας της εξίσωσης (3.4)). Αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής αυτός ελέγχει πόση μνήμη από την προηγούμενη πορεία του σωματιδίου θα επηρεάσει τη νέα ταχύτητα. Έτσι, εάν w<<1, λίγη μόνο ορμή διατηρείται από την προηγούμενη κίνηση του σωματιδίου και, κατά συνέπεια, απότομες αλλαγές στην κατεύθυνσή του είναι εφικτές με τη ρύθμιση αυτή. Ωστόσο, μικρές τιμές του w έχουν και ως συνέπεια να μειώνεται η ικανότητα του σμήνους στην εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης. Η έννοια της αδράνειας χάνεται τελείως όταν θεωρηθεί ότι w=0. Αν, αντιθέτως, θεωρηθούν μεγάλες τιμές για το συντελεστή αδράνειας (w>1), τότε παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο με την ανάθεση μικρών τιμών στους συντελεστές επιτάχυνσης. Τα σωματίδια είναι μεν δύσκολο να αλλάξουν απότομα κατεύθυνση ή να περιστραφούν (λόγω μεγάλης ορμής), ωστόσο καλύπτουν μεγαλύτερο τμήμα του χώρου αναζήτησης με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διασπορά του σμήνους και να ευνοείται έτσι η "εξερευνητική" ικανότητά του. Στην περίπτωση, όμως, αυτή τα σωματίδια εμφανίζονται "απρόθυμα" να συγκλίνουν προς το βέλτιστο.

Με την εισαγωγή του συντελεστή αδράνειας στη μέθοδο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων η εξίσωση (3.4) θα πάρει πλέον την ακόλουθη μορφή:

$$V_{i}(t+1) = w \cdot V_{i}(t) + c_{1} \cdot r_{1} \cdot [pbest_{i}(t) - x_{i}(t)] + c_{2} \cdot r_{2} \cdot [gbest(t) - x_{i}(t)]$$
(3.5)

Όπως προκύπτει από τα προηγούμενα, η επιλογή της τιμής του συντελεστή αδράνειας είναι σημαντική για την επίδοση του αλγόριθμου. Στην Ενότητα 3.4.1 θα παρουσιαστεί μια τεχνική κατά την οποία η τιμή του w μεταβάλλεται γραμμικά. Αυτή είναι η δεύτερη και τελευταία παραλλαγή της κλασικής μεθόδου ΒΣΣ με την οποία θα ασχοληθεί η παρούσα εργασία.

3.3.6 Κριτήριο Τερματισμού

Σημαντικό ζήτημα στην υλοποίηση της μεθόδου ΒΣΣ, όπως και σε κάθε άλλη επαναληπτική μέθοδο, συνιστούν τα κριτήρια τερματισμού της επαναληπτικής διαδικασίας αναζήτησης. Κατα καιρούς διάφορα κριτήρια έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή.

Ένα σύνηθες κριτήριο τερματισμού είναι η χρήση ενός μέγιστου αριθμού επαναλήψεων. Όταν η διαδικασία ολοκληρώσει ένα προκαθορισμένο πλήθος επαναλήψεων τότε αυτή τερματίζεται. Το πρόβλημα που προκύπτει στην περίπτωση

αυτή – όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παρουσίαση των παραμέτρων ελέγχου – είναι η επιλογή του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων ο οποίος δεν πρέπει να είναι ούτε πολύ μεγάλος (αύξηση υπολογιστικής πολυπλοκότητας) ούτε πολύ μικρός (πρόωρη σύγκλιση).

Σε συνδυασμό με το κριτήριο του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων χρησιμοποιείται το κριτήριο σύμφωνα με το οποίο η επαναληπτική διαδικασία τερματίζει, όταν δεν παρατηρείται κάποια βελτίωση μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων. Η έννοια της βελτίωσης μπορεί να αναφερθεί σε διάφορα μεγέθη, όπως η θέση, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, κ.ά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται ότι όταν η μέση ταχύτητα μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων είναι πολύ μικρή (κοντά στο μηδέν, για την ακρίβεια μικρότερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλι), τότε οι μετατοπίσεις των σωματιδίων είναι πάρα πολύ μικρές και η διαδικασία τερματίζει. Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι η μη βελτίωση των θέσεων δεν συνεπάγεται κατα ανάγκη ότι η μέθοδος έχει βρει κάποιο βέλτιστο.

3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΒΣΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

3.4.1 Οι Τροποποιημένες Τεχνικές PSO-TVIW και PSO-TVAC

Διάφορες τροποποιήσεις της βασικής μεθόδου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.3, έχουν κατά καιρούς παρουσιαστεί. Οι τροποποιήσεις αυτές στοχεύουν στη βελτίωση κάποιου χαρακτηριστικού της μεθόδου και η καταλληλότητά τους κρίνεται, συνήθως, ανάλογα με το εκάστοτε πρόβλημα. Για την επίλυση του διατυπωμένου στο Κεφάλαιο 2 προβλήματος βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές (για την ακρίβεια, παρέχεται στο χρήστη του λογισμικού – βλ. Κεφάλαιο 4 – η δυνατότητα επιλογής μεταξύ των δύο τεχνικών), η λεγόμενη PSO-TVIW (PSO with Time Varying Inertia Weight, BΣΣ με χρονικά μεταβαλλόμενο συντελεστή αδράνειας) [3.4], [3.5] και η λεγόμενη PSO-TVAC (PSO with Time Varying Acceleration Coefficients, BΣΣ με Χρονικά Μεταβαλλόμενους Συντελεστές Επιτάχυνσης) [3.5]. Να σημειωθεί ότι σκοπός της παρούσας εργασίας δεν είναι η σύγκριση των δύο αυτών τεχνικών, κάτι που άλλωστε είναι εμφανές και στα Κεφάλαια 4 και 5. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τροποποιημένες αυτές μέθοδοι ΒΣΣ.

3.4.1.1 Μέθοδος PSO-TVIW

Όπως δηλώνει και το όνομά της, στη μέθοδο αυτή ο συντελεστής αδράνειας w μεταβάλλεται με το χρόνο. Αρχικές υλοποιήσεις της ΒΣΣ με συντελεστή αδράνειας χρησιμοποιούσαν σταθερές τιμές για το w. Ωστόσο, αποδείχθηκε ότι δυναμική μεταβολή του συντελεστή στη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας οδηγούσε σε βελτιωμένη συμπεριφορά της κίνησης του σμήνους στο χώρο αναζήτησης. Για την ακρίβεια, αρχικοποίηση του w σε μεγάλες τιμές και μείωσή του με το χρόνο σε μικρότερες έχει ως αποτέλεσμα τα σωματίδια στα πρώτα στάδια να σαρώνουν μεγάλο μέρος του χώρου αναζήτησης (να "εξερευνούν" δηλαδή) και με το χρόνο να περιορίζονται σε τοπικές αναζητήσεις. Η δυναμική μεταβολή του συντελεστή αδράνειας μπορεί να γίνει είτε με τυχαίες ρυθμίσεις αυτού, είτε με γραμμική μείωσή του, είτε με μη γραμμική μείωση αυτού.

Η μέθοδος PSO-TVIW, όπως αρχικά παρουσιάστηκε από τους Eberhart και Shi [3.4] υλοποιεί γραμμική μείωση του συντελεστή αδράνειας με το χρόνο. Η τεχνική αυτή υιοθετείται και στην παρούσα εργασία. Ο συντελεστής αρχικοποιείται στην τιμή 0.9, ενώ η τελική τιμή του είναι ίση με 0.4. Συνεπώς, η τιμή του συντελεστή w θα δίνεται κάθε χρονική στιγμή από την ακόλουθο σχέση:

$$w = w_{init} - \frac{w_{init} - w_{final}}{iter_{max}} \cdot iter$$
(3.6)

όπου $w_{init}=0.9$ και $w_{final}=0.4$, $iter_{max}$ ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων της επαναληπτικής διαδικασίας και *iter* ο αύξων αριθμός της τρέχουσας επανάληψης. Τέλος, να σημειωθεί ότι στη μέθοδο αυτή οι τιμές και των δυο συντελεστών επιταχύνσεως είναι ίσες με 2.

3.4.1.2 Μέθοδος PSO-TVAC

Σύμφωνα με την Ενότητα 3.3, οι τιμές των συντελεστών επιταχύνσεως έχουν καθοριστική σημασία στην κίνηση του σμήνους και στη σύγκλιση της μεθόδου. Οι τιμές τους μπορεί να είναι σταθερές ή να μεταβάλλονται με το χρόνο. Στην περίπτωση που επιλέγονται σταθερές τιμές αυτές κυμαίνονται στο διάστημα [0,4] και συχνά επιλέγεται να είναι ίσες.

Στη μέθοδο PSO-TVAC οι συντελεστές μεταβάλλονται γραμμικά με το χρόνο. Ωστόσο, η μεταβολή δε γίνεται με τον ίδιο τρόπο και για τον c_1 και για τον c_2 . Μάλιστα, έχει δειχθεί ότι εάν και οι δύο συντελεστές μειώνονται γραμμικά με τον χρόνο δεν παρατηρείται κάποια βελτίωση στην επίδοση της μεθόδου [3.16]. Για το λόγο αυτό προτάθηκε [3.5] το c_1 να μειώνεται γραμμικά με το χρόνο, ενώ το c_2 να αυξάνεται γραμμικά. Η αρχικοποίηση γίνεται για τον πρώτο συντελεστή στην τιμή 2.5, ενώ για τον δεύτερο στην τιμή 0.5. Είναι φανερό ότι με τον τρόπο αυτό αρχικά δίνεται βαρύτητα στην αυτόνομη συμπεριφορά κάθε σωματιδίου (μέσω της γνωστικής συνιστώσας της (3.4)), ενώ με την πάροδο του χρόνου στην κοινωνική λειτουργία του σμήνους (μέσω της κοινωνικής συνιστώσας της (3.4)). Έτσι, στα πρώτα στάδια της διαδικασίας ενισχύεται η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης σε όλο το χώρο (global search), ενώ προς το τέλος της διαδικασίας ενθαρρύνεται η σύγκλιση των σωματιδίων στο ολικό βέλτιστο. Επομένως, οι τιμές των συντελεστών θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$c_{1}(iter) = c_{1max} - (c_{1max} - c_{1min}) \cdot \frac{iter}{iter_{max}}$$
(3.7a)

$$c_{2}(iter) = c_{1\min} + (c_{2\max} - c_{2\min}) \cdot \frac{iter}{iter_{max}}$$
(3.7β)

Όπου $c_{1max} = c_{2max} = 2.5$ και $c_{1min} = c_{2min} = 0.5$, iter_{max} ο μέγιστος αριθμός

επαναλήψεων της μεθόδου και iter ο αύξων αριθμός της τρέχουσας επανάληψης. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι στη μέθοδο αυτή η τιμή του συντελεστή αδράνειας επιλέγεται να μεταβάλλεται γραμμικά σύμφωνα με τη σχέση (3.6).

3.4.2 Εισαγωγή των Μεταβλητών Σχεδίασης του Προβλήματος στη Μέθοδο ΒΣΣ

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 2, οι μεταβλητές του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι οι θέσεις των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς στο ΣΗΕ και οι ρυθμίσεις αυτών. Κατά συνέπεια, ένα σωματίδιο θα πρέπει να περιλαμβάνει τα μεγέθη αυτά και να κινείται στο χώρο αναζήτησης υποψήφιων λύσεων για να βρεί τον συνδυασμό που δίνει τη βέλτιστη λύση. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι, για δεδομένο πλήθος συσκευών ΕΣΜ, έστω Ν, και προκαθορισμένο είδος συσκευών, ένα σωματίδιο είναι ένα διάνυσμα που περιλαμβάνει Ν ζεύγη μεγεθών θέση-ρύθμιση. Η θέση περιγράφεται από τον αύξοντα αριθμό της γραμμής στην οποία είναι εγκατεστημένη το ΕΣΜ ενώ η ρύθμιση από τις τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του κάθε είδους συσκευής (βλ. Ενότητα 2.4.2). Ο χώρος αναζήτησησης περιορίζεται από τα όρια επιτρεπτών τιμών των ρυθμίσεων και των θέσεων. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικές με την υλοποίηση της μεθόδου παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

3.4.3 Εισαγωγή Περιορισμών και Συνάρτηση Καταλληλότητας

Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα στην περίπτωση των προβλημάτων βελτιστοποίησης με περιορισμούς (constrained optimization) είναι ο ορθός χειρισμός των περιορισμών. Διάφορες μέθοδοι χειρισμού περιορισμών έχουν κατά καιρούς προταθεί και μερικοί από αυτούς παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω [3.12]:

- Απόρριψη μη αποδεκτών λύσεων: Η αναζήτηση των λύσεων δεν περιορίζεται μόνο εντός του αποδεκτού χώρου. Όταν βρίσκονται λύσεις οι οποίες δεν είναι αποδεκτές απλώς απορρίπτονται ή αγνοούνται.
- Μέθοδοι συνάρτησης ποινής: Εισάγουν μια ποινή/τιμωρία στην αντικειμενική συνάρτηση για να αποθαρρύνουν την αναζήτηση σε περιοχές που οι λύσεις δεν είναι αποδεκτές.
- Μετατροπή σε πρόβλημα χωρίς περιορισμούς: Το πρόβλημα με περιορισμούς (constrained) μετατρέπεται σε πρόβλημα χωρίς περιορισμους (unconstrained) και στη συνέχεια επιλύεται κατά τα γνωστά.
- Μέθοδοι διατήρησης αποδοχής (preserving feasibility methods): Οι οποίες υποθέτουν ότι οι λύσεις αρχικοποιούνται σε επιτρεπτό χώρο και εφαρμόζουν ειδικούς τελεστές για να μετασχηματίσουν τις αποδεκτές λύσεις σε νέες, επίσης αποδεκτές. Οι μέθοδοι αυτές περιορίζουν τις λύσεις να κινούνται μόνο σε αποδεκτούς χώρους ικανοποιπώντας συνεχώς όλους τους περιορισμούς.
- Μέθοδοι ταξινόμησης pareto : Χρησιμοποιούν ιδέες από τη βελτιστοποίηση πολλών κριτηρίων (πολυαντικειμενική βελτιστοποίηση – multi-objective optimization) για την ταξινόμηση των λύσεων ως προς το βαθμό παραβίασης των περιορισμών.

 Μέθοδοι διόρθωσης: Εφαρμόζουν ειδικούς τελεστές ή ενέργειες στις μη αποδεκτές λύσεις προκειμένου να τις αλλάξουν σε αποδεκτές.

Για το χειρισμό των περιορισμών του προβλήματος βελτιστοποίησης (βλ. Ενότητα 2.4.3) της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εισαγωγής ποινής για τις μη αποδεκτές λύσεις.

Για κάθε υποψήφια λύση (άρα για κάθε σωματίδιο) υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος η οποία επιδιώκεται να έχει την ελάχιστη δυνατή τιμή. Συνεπώς, θα πρέπει να έχει μια μορφή τέτοια ώστε για τις τιμές εντός του αποδεκτού χώρου αναζήτησης να υπολογίζεται κανονικά ενώ για τις μη επιτρεπτές τιμές να προστίθεται σε αυτή μια ποσότητα ανάλογη του συντελεστή ποινής (ο οποίος είναι μια σταθερά) και το αποτέλεσμα να είναι τέτοιο που να αποθαρρύνει την κίνηση του σωματιδίου στο χώρο αυτό.

Σύμφωνα με την Ενότητα 2.4.3 οι περιορισμοί που υφίστανται στο εν λόγω πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι συνοριακοί, ισωτικοί και ανισωτικοί. Επειδή η υλοποίηση της μεθόδου είναι τέτοια ώστε να μην πραγματοποιείται παραβίαση των συνοριακών περιορισμών (βλ. Κεφάλαιο 4), ο χειρισμός των περιορισμών επικεντρώνεται στους ανισωτικούς (οι ισωτικοί περιορισμοί χρησιμοποιούνται από τη μέθοδο επίλυσης των εξισώσεων ροής φορτίου). Αυτό σημαίνει ότι πριν από τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης θα πρέπει κάθε φορά να ελέγχεται αν παραβιάζονται τα όρια των τάσεων των ζυγών και τα θερμικά όρια των γραμμών.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου πρέπει να γίνεται γνωστό στην αντικειμενική συνάρτηση. Για το λόγο αυτό χρησμοποιείται ο συντελεστής περιορισμών (constraint factor) που συμβολίζεται με CF. Ο συντελεστής αυτός είναι 1 όταν δεν πραγματοποιείται οποιαδήποτε παραβίαση των περιορισμών και μεγαλύτερος του 1 όταν παραβιάζεται κάποιο όριο. Η τιμή του συντελεστή CF προκύπτει ως το γινόμενο του συντελεστή παραβίασης της τάσης των ζυγών, ο οποίος συμβολίζεται ΠΤ, και του συντελεστή παραβίασης θερμικού ορίου, ΠΘΟ. Επειδή ο ΠΤ υπολογίζεται για κάθε ζυγό και ο ΠΘΟ για κάθε γραμμή, προκύπτει ότι:

$$CF = \prod_{line} \Pi \Theta O \mathbf{x} \prod_{bus} \Pi T$$
(3.8)

Στην περίπτωση του συντελεστή ΠΘΟ, εάν πραγματοποιείται παραβίαση του θερμικού ορίου, η τιμή του συντελεστή εξαρτάται εκθετικά από την ποσοστιαία μεταβολή του P_i (ροή ενεργού ισχύος στη γραμμή l) σε σχέση με το θερμικό όριο. Συνεπώς:

$$\Pi\Theta O = \begin{cases} 1 , \gamma \iota \alpha P_{l} \leq P_{l.therm} \\ \exp\left(k \cdot \left| 1 - \frac{P_{l}}{P_{l.therm}} \right| \right) , \gamma \iota \alpha P_{l} > P_{l.therm} \end{cases}$$
(3.9a)

όπου P_{l,therm} είναι το θερμικό όριο και k είναι ο συντελεστής βαρύτητας μεταβολής.

Όσο μεγαλύτερη η τιμή του k τόσο μεγαλύτερη η βαρύτητα που δίνεται στην παραβίαση του θερμικού ορίου.

Στην περίπτωση του συντελεστή ΠT , η τιμή του συντελεστή εξαρτάται εκθετικά από την ποσοστιαία μεταβολή της τάσης Vb του ζυγού b σε σχέση με την ονομαστική τάση του ζυγού. Επειδή στο πρόβλημα οι τάσεις δίνονται σε ανα μονάδα, η ονομαστική τάση σε κάθε ζυγό είναι ίση με 1, και η σχέση που δίνει την τιμή του συντελεστή είναι η ακόλουθη:

$$\Pi T = \begin{cases} 1 & , \quad \gamma \iota \alpha \, 0.9 \le Vb \le 1.1 \\ \exp\left(\mu \cdot |1 - Vb|\right) & , \quad \alpha \lambda \lambda o \phi \end{cases}$$
(3.9β)

όπου μ είναι ο συντελεστής βαρύτητας μεταβολής. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του μ, τόσο μεγαλύτερη η βαρύτητα που δίνεται στην παραβίαση της τάσης του ζυγού.

Με βάση τα παραπάνω είναι εύκολο, πλέον, να προκύψει η μορφή της συνάρτησης που βελτιστοποιεί η μέθοδος ΒΣΣ και που ονομάζεται συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function). Η συνάρτηση αυτή περιλαμβάνει την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και τον όρο που υλοποιεί τη μέθοδο χειρισμού περιορισμών με την εισαγωγή ποινής. Η συνάρτηση καταλληλότητας, *FF*, είναι η ακόλουθη:

$$FF = IC_{tot} + PF \cdot ||CF - 1|| \tag{3.10}$$

όπου IC_{tot} είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίσης (δηλαδή το συνολικό κόστος εγκατάστασης των συσκευών) που δίνεται από την εξίσωση (2.5) και *PF* ο συντελεστής ποινής (Penalty Factor).

Η τιμή που δίνεται στο συντελεστή ποινής παίζει σημαντικό ρόλο στην εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος. Ο συντελεστής πρέπει να έχει τέτοια τιμή ώστε τα σωματίδια αφενός μεν να απομακρύνονται από τις λύσεις που παραβιάζουν τους περιορισμούς αφετέρου, όμως, η απομάκρυνση αυτή να μην είναι πολύ μεγάλη με αποτέλεσμα να μην προσπελαύνεται ο χώρος πιθανών λύσεων που βρίσκονται κοντά στην μη αποδεκτή. Στην εργασία αυτή, δεδομένου ότι το κόστος εγκατάστασης κυμαίνεται από 10⁶ έως 10⁸ η τιμή του συντελεστή ποινής επιλέγεται μεταξύ του 10¹² και 10¹⁵. Για χαμήλές τιμές του κόστους προτιμώνται τιμές του συντελεστή κοντά στο 10¹² ενώ για μεγαλύτερες τιμές του κόστους επιλέγεται μεγαλύτερη τιμή για τον συντελεστή ποινής.

3.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[3.1] J. Kennedy, R. C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," in *Proceedings* of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 1942-1948.

- [3.2] R. C. Eberhart, J. Kennedy, "A New Optimizer using Particle Swarm Theory," in *Proceedings of the 1995 International Symposium on Micromachine and Human Science*, pp 39-43.
- [3.3] Y. Shi, R. C. Eberhart, "A Modified Particle Swarm Optimizer," in *Proceedings of the 1998 IEEE World Congress on Computational Intelligence*, pp. 69-73.
- [3.4] Y. Shi, R. C. Eberhart, "Empirical Study of Particle Swarm Optimization," in *Proceedings of the 1999 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, vol.3, pp 1945-1950.
- [3.5] A. Ratnaweera, S. K. Halgamuge, H. C. Watson, "Self-Organizing Hierarchical Particle Swarm Optimizer with Time-Varying Acceleration Coefficients," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 3 pp. 240-255, June 2004.
- [3.6] V. Miranda, N. Fonesca," EPSO-Evolutionary Particle Swarm Optimization, A New Algorithm with Applications in Power Systems," in *Proceedings of* the 2002 IEEE/PES Asia-Pacific Transmission and Distribution Conference and Exhibition, pp.745-750.
- [3.7] C. K. Mohan, B. Al-Kazemi, "Discrete Particle Swarm Optimization," in 2001 Workshop on Particle Swarm Optimazation, Indianapolis.
- [3.8] H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama, S. Takayama, Y. Nakanishi, "A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control considering Voltage Security Assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, pp. 1232-1239, 2000.
- [3.9] M. Saravanan, S. Mary Raja Slochanal, P. Venkatesh, J. Prince Stephen Abraham, "Application of Particle Swarm Optimization Technique for Optimal Location of FACTS Devices considering Cost of Installation and System Loadability," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, pp. 276-283, 2007.
- [3.10] S. Kannan, S. Mary Raja Slochanal, P. Subbaraj, N. P. Pandhay, "Application of Particle Swarm Optimazation Technique and its Variants to Generation Expansion Planning Problem," *Electric Power Systems Research*, vol. 70, pp. 203-210, Aug. 2004.
- [3.11] E. V. Onet, "Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithms," *Journal* of Computer Science and Control Systems, vol. 1, no. 2, pp.43-47, 2009.
- [3.12] A. P. Engelbrecht, *Fundamentals of computational swarm intelligence*. John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [3.13] S. Das, A. Abraham, A. Konar, Particle Swarm Optimization and Differential Evolution Algorithms: Technical Analysis, Applications and Hybridization Perspectives, Advances of Computational Intelligence in Industrial Systems, Ying Liu et al. (Eds.), Studies in Computational Intelligence, Springer Verlag, Germany, 2008.
- [3.14] R. Brits, A. P. Engelbrecht, F. van den Bergh, "A Niching Particle Swarm Optimizer," in *Proceedings of the 2002 Fourth Asia-Pacific Conference on Simulated Evolution and Learning*, pp 692-696.

- [3.15] F. van den Bergh, A. P. Engelbrecht, "Effects of Swarm Size on Cooperative Particle Swarm Optimizers," in *Proceedings of the 2001 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 892-899.
- [3.16] P.N. Suganthan, "Particle Swarm Optimizer with Neighborhood Operator," in *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1958-1962.

КЕФАЛАІО 4

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε και διατυπώθηκε το υπό μελέτη πρόβλημα βελτιστοποίησης, καθώς και η μαθηματική τεχνική επίλυσής του, δηλαδή η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά αναλυτική περιγραφή της μεθόδου που εφαρμόστηκε για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με την τεχνική ΒΣΣ σε επίπεδο λογισμικού. Η προγραμματιστική υλοποίηση αυτής της μεθόδου, που έγινε σε περιβάλλον Matlab, θα παρουσιαστεί, ακολούθως, μέσω της περιγραφής των κύριων ρουτινών που αναπτύχθηκαν και γενικότερα των συστατικών στοιχείων του προγράμματος. Στη συνέχεια, θα γίνει παρουσίαση του γραφικού περιβάλλοντος διεπαφής χρήστη που αναπτύχθηκε με την βοήθεια του εργαλείου GUIDE (Graphical User Interface Design Environment) της Matlab ενώ, τέλος, θα γίνει αναφορά σε δυνατές μελλοντικές επεκτάσεις του προγράμματος.

4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

4.2.1 Αναλυτική Περιγραφή Μεθοδολογίας

Πριν από την αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας κρίνεται σκόπιμη η συγκεντρωτική και συνοπτική παρουσίαση των βασικών σχέσεων που θα χρησιμοποιηθούν (για λεπτομερή παρουσίασή τους βλ. Κεφάλαια 2, 3), αφενός για την απόκτηση ολοκληρωμένης εικόνας επί του ζητήματος, αφετέρου για να επισημανθούν λεπτομέρειες, απαραίτητες για την κατανόηση ορισμένων σημείων της μεθοδολογίας.

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 2, το κόστος εγκατάστασης σε US\$ για κάθε συσκευή ΕΣΜ δίνεται από τις σχέσεις:

$$IC_{TCSC} = C_{TCSC} \cdot S \cdot 1000 \tag{4.1a}$$

$$IC_{SVC} = C_{SVC} \cdot S \cdot 1000 \tag{4.1\beta}$$

$$IC_{UPFC} = C_{UPFC} \cdot S \cdot 1000 \tag{4.1\gamma}$$

όπου τα C_{TCSC} , C_{SVC} , C_{UPFC} είναι το κόστος εγκατάστασης για τα TCSC, SVC και UPFC (σε /kVAr), αντίστοιχα, και δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$C_{TCSC} = 0.0015 \cdot S^2 - 0.7130 \cdot S + 153.75 \tag{4.2a}$$

$$C_{SVC} = 0.0003 \cdot S^2 - 0.3051 \cdot S + 127.38 \tag{4.2}$$

$$C_{UPFC} = 0.0003 \cdot S^2 - 0.2691 \cdot S + 188.22 \tag{4.2}$$

όπου S είναι το εύρος λειτουργίας των συσκευών ΕΣΜ (σε MVAr), δηλαδή είναι:

$$S = \|Q_a| - |Q_b\| \tag{4.3}$$

όπου Q_a είναι η ροή αέργου ισχύος (σε MVAr) της γραμμής όπου εγκαθίσταται η συσκευή, μετά την εγκατάστασή της (after) και Q_b η ροή αυτή πριν την εγκατάσταση της συσκευής (before). Να σημειωθεί ότι οι δυο αυτές τιμές ροών αναφέρονται στην ίδια τιμή φόρτισης συστήματος (System Loadabilty, SL). Είναι προφανές ότι η πρώτη τιμή (Q_a) εξαρτάται από τις ρυθμίσεις των συσκευών που εγκαθίστανται και πρέπει να υπολογίζεται για κάθε διαφορετική ανάθεση τιμών σε αυτές ενώ η δεύτερη (Q_b) είναι ανεξάρτητη από αυτές –εξαρτάται μόνο από τον τύπο του ΣΗΕ– και αρκεί να υπολογιστεί, για κάθε SL, μία μόνο φορά.

Η συνάρτηση *IC* είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και επιδιώκεται κάθε φορά η ελαχιστοποίησή της. Για να είναι, όμως, αποδεκτή η τιμή της βελτιστοποίησης πρέπει να ικανοποιούνται, όπως είδαμε, περιορισμοί σχετικά με το ΣΗΕ και σχετικά με τις ρυθμίσεις των εγκατεστημένων συσκευών.

Σύμφωνα με το κεφάλαιο 2, οι περιορισμοί που τίθενται όσον αφορά τις ρυθμίσεις των συσκευών, είναι οι ακόλουθοι:

για το TCSC:

$$-0.8 \cdot X_L \le X_{TCSC} \le 0.2 \cdot X_L \tag{4.4a}$$

όπου X_L είναι η επαγωγική αντίδραση της γραμμής και η τιμή της εξαρτάται από το είδος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που θα επιλεγεί.

για το SVC:

$$-100 \text{MVAr} \le Q_{SVC} \le 100 \text{MVAr} \tag{4.4\beta}$$

Τόσο οι σταθερές 0.2 και 0.8 του περιορισμού του TCSC, όσο και τα όρια του περιορισμού του SVC, έχουν επιλεγεί εξαρχής και δε δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη του προγράμματος να μεταβάλλει τις τιμές εξωτερικά, μέσω παραμέτρων, παρά μόνο επενεργώντας στον κώδικα.

Τέλος, για το UPFC, όπως έχει εξηγηθεί, ισχύουν συγχρόνως οι συνθήκες (4.4α) και (4.4β). Ο περιορισμοί στις ρυθμίσεις των συσκευών ΕΣΜ, σε αντίθεση με τους περιορισμούς του ΣΗΕ, δεν εισάγονται με την μορφή ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση, απλώς η επιλογή των πιθανών λύσεων γίνεται εντός αυτών των διαστημάτων.

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3, οι ακόλουθες σχέσεις εκφράζουν την παραβίαση των απαιτήσεων η ροή ισχύος κάθε γραμμής να είναι μικρότερη από το θερμικό της όριο και η τιμή της τάσης κάθε ζυγού να βρίσκεται στο διάστημα [0.9,1.1].

Για την παραβίαση του θερμικού ορίου είναι:

$$\Pi\Theta O = \begin{cases} 1 , \gamma \iota \alpha P_l \le P_{lmax} \\ \exp(\lambda \cdot \left| 1 - \frac{P_l}{P_{lmax}} \right|) , \gamma \iota \alpha P_l > P_{lmax} \end{cases}$$
(4.5a)

όπου P_l η είναι ροή ισχύος της γραμμής σε MW και P_{lmax} το θερμικό όριο (line rating) της γραμμής αυτής, επίσης σε MW. Η τιμή του τελευταίου εξαρτάται από το μοντέλο ΣΗΕ που θα επιλεγθεί και είναι καθοριστική για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. (ΠΘΟ = Παραβίαση Θερμικού Ορίου).

Για την παραβίαση του ορίου της τάσης των ζυγών είναι:

$$\Pi T = \begin{cases} 1 & , \quad \gamma \iota \alpha \, 0.9 \le Vb \le 1.1 \\ \exp\left(\mu \cdot |1 - Vb|\right) & , \quad \alpha \lambda \lambda o \psi \end{cases}$$
(4.5β)

όπου Vb είναι η τάση στους ζυγούς του συστήματος σε α.μ.. (ΠΤ = Παραβίαση Τάσης ζυγών).

Και στις δυο παραπάνω σχέσεις (4.5α) και (4.5β) επιλέχθηκε συντελεστής βαρύτητας της μεταβολής $\lambda = \mu = 0.1$.

Όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η εισαγωγή των περιορισμών στην αντικειμενική συνάρτηση γίνεται μέσω του συντελεστή CF που είναι ίσος με:

$$CF = \prod_{line} \Pi \Theta O \mathbf{x} \prod_{bus} \Pi T$$
(4.6)

Δηλαδή για κάθε γραμμή και κάθε ζυγό υπολογίζεται ο αντίστοιχος συντελεστής παραβίασης και, τελικά, το συνολικό γινόμενο. Οι τιμές των S_l και Vb, που είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό των ΠΘΟ και ΠΤ, προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου για το σύστημα, μετά την εγκατάσταση των συσκευών βάσει της μοντελοποίησης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2. Αν δεν υπάρχει καμία παραβίαση περιορισμών θα είναι CF=1, ειδάλλως θα είναι CF>1.

Τελικά, η συνάρτηση καταλληλότητας (Fitness Function) θα είναι, όπως έχει αναφερθεί, ίση με:

$$FF = IC_{tot} + PF \cdot ||CF - 1||$$

$$\mu\epsilon \quad IC_{tot} = \sum IC_{UPFC} + \sum IC_{TCSC} + \sum IC_{SVC}$$

$$(4.7)$$

όπου *PF*= Penalty Factor δηλαδή ο συντελεστής ποινής. Η τιμή του *PF* παίζει ρόλο, όπως εξηγήθηκε, στην εύρεση της λύσης και για το λόγο αυτό δίνεται η δυνατότητα να καθοριστεί εξωτερικά από τον χρήστη.

Η συνάρτηση *FF* είναι η συνάρτηση που θα ελέγχεται και θα επιδιώκεται η ελαχιστοποίησή της. Όταν δεν παρατηρείται παραβίαση των περιορισμών, ταυτίζεται με τη συνάρτηση κόστους, *IC*_{tot} ενώ όταν οποιαδήποτε παραβίαση λαμβάνει χώρα η τιμή της γίνεται σημαντικά μεγάλη, ανάλογα πάντα με το μέγεθος της παραβίασης και την τιμή του συντελεστή ποινής.

Τέλος, οι εξισώσεις που αφορούν την τεχνική $B\Sigma\Sigma$ παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Εαν στις εξισώσεις αυτές αντικατασταθεί η μεταβλητή t που εκφράζει τα βήματα, ή αλλιώς τις επαναλήψεις, της διαδικασίας με το δείκτη *iter* (από το iterations) τότε οι σχέσεις (3.5) και (3.6) θα είναι:

$$V_i^{iter+1} = w(iter) \cdot V_i^{iter} + C_1 \cdot rand \cdot (P_{best-i} - x_i^{iter}) + C_2 \cdot rand \cdot (G_{best} - x_i^{iter})$$
(4.8a)

$$x_i^{iter+1} = x_i^{iter+1} + V_i^{iter+1}$$
(4.8β)

όπου το *i* αναφέρεται στο *i*-οστό σωματίδιο και το *iter* στην *iter*-οστή επανάληψη και όσον αφορά το συντελεστή αδράνειας (inertia weight), αυτός δίνεται από την:

$$w = w_{init} - \frac{w_{init} - w_{final}}{iter_{max}} \cdot iter$$
(4.9)

όπου το $iter_{max}$ είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων και καθορίζεται από το χρήστη.

Για την επίλυση του προβλήματος, όπως προκύπτει και από τα παραπάνω, απαιτείται η δήλωση κάποιων παραμέτρων εξωτερικά. Αρχικά, απαιτείται να καθοριστεί το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί, κάτι το οποίο σημαίνει τον καθορισμό των δεδομένων των ζυγών και των γραμμών του συστήματος. Επίσης, το πλήθος των συσκευών ΕΣΜ που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και το είδος τους πρέπει να είναι γνωστά. Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στις συσκευές TCSC, SVC και UPFC, καθώς και σε συνδυασμό αυτών. Όταν χρησιμοποιείται μόνο ένα είδος ΕΣΜ αποκαλείται single-type mode, ενώ όταν χρησιμοποιούνται περισσότερα του ενός είδη, multi-type mode. Στην τελευταία περίπτωση, το πλήθος των συσκευών αναφέρεται στο συνολικό αριθμό τους και όχι στον αριθμό κάθε είδους χωριστά. Επιπλέον αυτών, απαιτείται ο καθορισμός των παραμέτρων που αφορούν την τεχνική βελτιστοποίησης.

Στην Ενότητα 3.3.1 παρουσιάστηκαν δυο παραλλαγές της τεχνικής

βελτιστοποίησης ως προς τους δύο συντελεστές επιταχύνσεως, οι PSO-TVIW και PSO-TVAC. Η επιλογή μεταξύ αυτών των δύο γίνεται κάθε φορά εξωτερικά. Επίσης, γνωστά πρέπει να είναι το πλήθος των σωματιδίων που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων. Όπως έχει ήδη επισημανθεί, αντικειμενικός σκοπός της διαδικασίας είναι η εύρεση για κάθε είδος (ή συνδυασμό) και πλήθος συσκευών των θέσεων και των ρυθμίσεων αυτών, ώστε να επιτυγχάνεται, πρωτίστως, η μέγιστη δυνατή φόρτιση του συστήματος (System Loadabilty, SL) και, δευτερευόντως, το ελάχιστο κόστος εγκατάστασης για τη φόρτιση αυτή. Ο τρόπος με τον οποίο θα αναζητηθούν οι λύσεις αυτές θα διασαφηνιστεί στη συνέχεια, αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι το εύρος τιμών φόρτισης του συστήματος, στο οποίο θα αναζητηθεί η μέγιστη δυνατή φόρτιση αυτού (Maximum System Loadabilty), καθορίζεται ως παράμετρος. Τέλος, επιπρόσθετες εξωτερικές παράμετροι που απαιτούν καθορισμό είναι το πλήθος των επαναλήψεων - "προσπαθειών" για την εύρεση λύσης για δεδομένη τιμή φόρτισης συστήματος SL και ο συντελεστής ποινής (Penalty Factor) της σχέσης (4.7), η σημασία της τιμής του οποίου αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.

Αφού καθοριστούν οι τιμές όλων των απαιτούμενων παραμέτρων, ακολουθεί η διάκριση μεταξύ single-type mode και multi-type mode. Για την εύρεση της λύσης και στις δύο περιπτώσεις ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία (για το λόγο αυτό καλείται και στις δυο περιπτώσεις η ίδια ρουτίνα όπως θα δειχθεί αργότερα). Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στη δεύτερη περίπτωση, επειδή είναι γνωστό μόνο το συνολικό πλήθος συσκευών και όχι το πλήθος για κάθε είδος από αυτές, υπάρχει ένας επιπλέον εξωτερικός βρόχος, σκοπός του οποίου είναι να καθορίζει με τυχαίο τρόπο το πλήθος συσκευών κάθε είδους και να επαληθεύει την εγκυρότητά τους, για παράδειγμα, να ελέγχει αν ο συγκεκριμένος συνδυασμός έχει ξαναχρησιμοποιηθεί. Για κάθε συνδυασμό πλήθους συσκευών ακολουθείται η ίδια διαδικασία με το singletype mode και επιστρέφεται το αποτέλεσμα. Από όλους τους συνδυασμούς που έχουν δοκιμαστεί, επιλέγεται και επιστρέφει στο χρήστη, εκείνος στον οποίο αντιστοιχεί το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Από το σημείο αυτό και εξής, για κάθε τιμή της φόρτισης συστήματος SL εντός του προκαθορισμένου εύρους, εφαρμόζεται η τεχνική ΒΣΣ για την εύρεση της βέλτιστης λύσης.

Σε πρώτη φάση, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των σωματιδίων, των οποίων το πλήθος είναι γνωστό. Κάθε σωματίδιο του πληθυσμού αποτελείται από ένα πλήθος μεταβλητών που αντιπροσωπεύουν τις τοποθεσίες και τις ρυθμίσεις των συσκευών που έχουν επιλεγεί. Για την ακρίβεια, για single-type mode, αν έχουν επιλεγεί Ν το πλήθος συσκευές TCSC ή SVC, τότε κάθε σωματίδιο αποτελείται από 2 Ν μεταβλητές: Ν που εκφράζουν την θέση της κάθε συσκευής και Ν που εκφράζουν τις εκάστοτε ρυθμίσεις, X, δηλαδή επαγωγική αντίδραση για TCSC και Q, δηλαδή εγχεόμενη άεργος ισχύς για SVC. Στην περίπτωση του UPFC, το πλήθος των μεταβλητών είναι 3 N, όπου N το πλήθος των συσκευών, δηλαδή N για τις θέσεις των ΕΣΜ, Ν για την ρύθμιση επαγωγικής αντίδρασης Χ και Ν για την ρύθμιση αέργου ισχύος Q. Για το multi-type mode πλήθος των μεταβλητών είναι $2 \cdot N_{TCSC} + 2 \cdot N_{SVC} + 3 \cdot N_{UPFC}$, súmowna me ta paratána. Básei two szésew (4.4α) και (4.4β) οι μεταβλητές των ρυθμίσεων πρέπει να βρίσκονται εντός αυτών

των διαστημάτων. Επίσης, η τιμή των μεταβλητών της θέσης δεν πρέπει να είναι μικρότερη του 1, αλλά ούτε και μεγαλύτερη του μέγιστου πλήθους γραμμών του συστήματος, δεδομένου ότι θέτουμε ως προϋπόθεση σε κάθε γραμμή να μπορεί να τοποθετηθεί μια συσκευή το μέγιστο. Για την αποφυγή λαθών πρέπει να ελέγχεται κάθε φορά κάθε διαφορετική μεταβλητή αν είναι αποδεκτή. Η αρχικοποίηση γίνεται σε κανονικοποιημένη μορφή, δηλαδή σε κάθε μεταβλητή τοποθετούνται με τυχαίο τρόπο τιμές από το 0 ως το 1. Η μορφή αυτή, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, διευκολύνει συν τοις άλλοις την εφαρμογή των εξισώσεων ΒΣΣ.

Κάθε σωματίδιο αποτελεί πιθανή λύση· συνεπώς, πρέπει να εξεταστεί η πιθανότητα να βελτιστοποιεί τη συνάρτηση καταλληλότητας. Πριν, όμως, γίνει αυτό για κάθε σωματίδιο ελέγχονται οι μεταβλητές που εκφράζουν την τοποθεσία των συσκευών στο ΣΗΕ. Ο λόγος είναι ότι έχει τεθεί ως προϋπόθεση να είναι δυνατή η εγκατάσταση μιας συσκευής το μέγιστο σε κάθε γραμμή. Αν τύχει σε μια γραμμή να βρεθούν περισσότερες από μια συσκευές τότε όλες πλην μιας τοποθετούνται σε διαφορετικές γραμμές. Να σημειωθεί εδώ, ότι η μεταβλητή θέσης περιγράφει την τοποθεσία της συσκευής με έναν αριθμό, τον αριθμό γραμμής, όπως αυτός έχει οριστεί από τα δεδομένα γραμμής του ΣΗΕ.

Τον έλεγχο της μεταβλητής θέσης ακολουθεί για κάθε σωματίδιο η αποκανονικοποίηση των μεταβλητών του, η οποία πραγματοποιείται, όπως είναι γνωστό, με τον ακόλουθο τρόπο:

$$X_{den} = X_{min} + (X_{max} - X_{min}) \cdot X_{norm}$$

όπου X_{max} , X_{min} είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του επιτρεπόμενου εύρους τιμών, όπως αυτά ορίζονται από τις σχέσεις (4.4α) και (4.4β) και X_{norm} η κανονικοποιημένη τιμή του σωματιδίου. Στην περίπτωση της αποκανονικοποίησης των μεταβλητών θέσης, επειδή ο αριθμός γραμμής είναι ακέραιος, πραγματοποιείται στρογγυλοποίηση.

Είναι πλέον γνωστές και οι τοποθεσίες, καθώς και οι ρυθμίσεις όλων των συσκευών κάθε σωματιδίου του πλήθους. Έτσι, είναι δυνατή η "εγκατάσταση" των ΕΣΜ στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή η εισαγωγή τους βάσει της μοντελοποίησης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2. Αφού εισαχθούν όλες οι συσκευές του σωματιδίου, επιλύεται η ροή φορτίου χρησιμοποιώντας τη γνωστή μέθοδο Newton-Raphson. Με την εφαρμογή της μεθόδου αυτής καθίστανται γνωστές οι τάσεις όλων των ζυγών, οι ροές ενεργού και αέργου ισχύος, καθώς και οι αντίστοιχες εγχύσεις στους ζυγούς, ως αποτέλεσμα της εγκατάστασης των ΕΣΜ. Στη συνέχεια, οι τάσεις των ζυγών και οι ροές ενεργού ισχύος των γραμμών χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί αν παραβιάζεται κάποιος περιορισμός του συστήματος. Για τον έλεγχο αυτό χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (4.5α), (4.5β), (4.6). Τέλος, το αποτέλεσμα της σχέσης (4.6), καθώς και οι τιμές των άεργων ροών ισχύος των γραμμών όπου είναι εγκατεστημένες οι συσκευές, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness function) βάσει των σχέσεων (4.1), (4.2), (4.3) και (4.7). Επιπροσθέτως, στους υπολογισμούς χρησιμοποιείται και η άεργος ροή των γραμμών πριν την εγκατάσταση των συσκευών.

Η τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας, δηλαδή το κόστος εγκατάστασης, αυξημένο πιθανόν κατά μια ποσότητα ανάλογη του συντελεστή ποινής, συγκρίνεται

στη συνέχεια με την τιμή του personal best του σωματιδίου. Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι όλη η διαδικασία από την αποκανονικοποίηση έως εδώ γίνεται για κάθε σωματίδιο χωριστά. Εάν η τιμή είναι μικρότερη από την τιμή του personal best, τότε το τελευταίο κρατά την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας.

Αφού τα παραπάνω πραγματοποιηθούν για κάθε σωματίδιο, επιλέγεται το καλύτερο personal best και αν αυτό έχει μικρότερη τιμή από το global best το αντικαθιστά. Τέλος, οι τιμές των σωματιδίων ανανεώνονται βάσει των σχέσεων (4.8α) (4.8β) και (4.9) (και φυσικά ανάλογα με την τεχνική που έχει επιλεγεί PSO-TVIW ή PSO-TVAC) και κλείνει ένας βρόχος. Οι προηγούμενες εξισώσεις εφαρμόζονται για την κανονικοποιημένη μορφή του σωματιδίου. Αυτό διευκολύνει σημαντικά τα πράγματα αφού δεν απαιτείται ξεχωριστός έλεγχος για κάθε μεταβλητή. Όλη αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται το πολύ για τόσες επαναλήψεις όσες έχουν δηλωθεί ως μέγιστες, εκτός και αν το μέγιστο σφάλμα μεταξύ δυο διαδοχικών επαναλήψεων γίνει μικρότερο από 10^{-7} .

Η έξοδος από την προηγούμενη διαδικασία επιστρέφει πάντοντε μια λύση. Επιστρέφει, δηλαδή, μια τιμή κόστους εγκατάστασης και το σωματίδιο από το οποίο προκύπτει, ανεξάρτητα αν παραβιάζονται οι περιορισμοί ή όχι (άλλωστε η παραβίαση των περιορισμών έχει εισαχθεί στη συνάρτηση καταλληλότητας). Για τον λόγο αυτό, επενεξετάζεται η ικανοποίηση των συνθηκών και αν αυτές ικανοποιούνται τότε η λύση είναι αποδεκτή, ειδάλλως απορρίπτεται.

Όλη η προηγούμενη διαδικασία πραγματοποιείται για κάθε SL. Η μέγιστη τιμή της φόρτισης τους συστήματος για την οποία είναι δυνατή η εύρεση αποδεκτής λύσης αποτελεί τη μέγιστη φόρτιση του συστήματος (MSL) που μπορεί να επιτευχθεί για το δεδομένο πλήθος και είδος (ή συνδυασμό) συσκευών FACTS.

Στα Σχήματα 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται τα δύο λογικά διαγράμματα που περιγράφουν την προηγούμενη μέθοδο. Το πρώτο είναι το γενικό και το δεύτερο εστιάζει στην τεχνική ΒΣΣ.

4.2.2 Περιγραφή Ρουτινών και Κύριων Στοιχείων του Λογισμικού που Αναπτύχθηκε

Η υλοποίηση της διαδικασίας που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα έγινε με ένα σύνολο ρουτινών γραμμένων σε κώδικα της Matlab και ένα σύνολο αρχείων. Συνολικά, το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 19 αρχεία: 1 αρχείο .fig, 3 αρχεία .mat και 15 αρχεία .m. Στη συνέχεια, περιγράφεται η λειτουργία των βασικότερων ρουτινών και παρουσιάζονται συνοπτικά τα υπόλοιπα αρχεία του προγράμματος. Την περιγραφή ακολουθεί το ιεραρχικό διάγραμμα των συναρτήσεων του προγράμματος.



Σχήμα 4.1: Λογικό διάγραμμα μεθόδου 1 (εξωτερικοί βρόχοι).



Σχήμα 4.2: Λογικό διάγραμμα μεθόδου 2 (τεχνική ΒΣΣ).

4.2.2.1 Ρουτίνα interf.m

Η ρουτίνα interf.m δημιουργεί το γραφικό περιβάλλον χρήστη της Matlab, μέσω του οποίου ο χρήστης εισάγει τιμές στις παραμέτρους του προγράμματος. Καλεί τη συνάρτηση main.m. Το γραφικό περιβάλλον χρήστη παρουσιάζεται εκτενέστερα στην Ενότητα 4.4.

4.2.2.2 Ρουτίνα main.m

Η εισαγωγή των παραμέτρων από το χρήστη γίνεται μέσω της συνάρτησης interf.m. Την είσοδο των παραμέτρων ακολουθεί η κλήση της συνάρτησης main.m, της οποίας κύριος σκοπός είναι η διάκριση μεταξύ single-type mode και multi-type mode. Και στις δύο περιπτώσεις καλείται η συνάρτηση mcode.m. Η διαφορά είναι ότι στην πρώτη περίπτωση οι παράμετροι εισάγονται αυτούσιες στη συνάρτηση mcode και επιστρέφουν αυτούσιες, μαζί με τη λύση (μοναδική), για την παρουσίαση του αποτελέσματος. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση, κάθε φορά πριν από την κλήση της mcode δημιουργούνται τυχαίοι συνδυασμοί πλήθους συσκευών FACTS και αυτοί δίνονται, μαζί με τα υπόλοιπα δεδομένα, ως παράμετροι. Το συνολικό πλήθος συνδυασμών που θα δημιουργήσει η συνάρτηση καθορίζεται μόνο εσωτερικά. Εάν ο συνδυασμώς είναι αποδεκτός (δηλαδή όταν δεν έχει ξαναχρησιμοποιηθεί και όταν δεν αντιστοιχεί σε sinlge-type mode) δίδεται μαζί με τις υπόλοιπες παραμέτρους στην mcode. Η mcode επιστρέφει στη main τη λύση που αντιστοιχεί στον εκάστοτε συνδυασμό, και από το σύνολο των λύσεων επιλέγεται η βέλτιστη, η οποία και επιστρέφει στην interf.m για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

4.2.2.3 Ρουτίνα mcode.m

Η ρουτίνα mcode.m, που καλείται από την main.m, υλοποιεί τον επαναληπτικό βρόχο της διαδικασίας που αφορά τη φόρτιση του συστήματος, όπως αυτός φαίνεται στο λογικό διάγραμμα του Σχήματος 4.1. Η συνάρτηση αυτή δέχεται ως είσοδο τις παραμέτρους του προγράμματος μέσω της main.m και κρατάει τον μετρητή της τιμής της φόρτισης συστήματος. Για κάθε τιμή αυτής καλεί τη συνάρτηση pso_rout.m για την εκτέλεση της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και της μεταβιβάζει τις απαιτούμενες τιμές των παραμέτρων. Τη λύση που επιστρέφει η pso_rout επεξεργάζεται η mcode και ελέγχει εάν είναι αποδεκτή ή όχι. Εάν δεν είναι την απορρίπτει, ειδάλλως την αποθηκεύει σε ένα πίνακα με όλες τις λύσεις που έχουν βρεθεί. Επιπλέον, κρατάει και ένα δείκτη του αριθμού επαναλήψεων για κάθε τιμή του SL, η μέγιστη τιμή των οποίων έχει οριστεί από το χρήστη. Όταν τελειώσουν όλες οι επαναλήψεις επιλέγεται από τον πίνακα το αποτέλεσμα το οποίο ικανοποιεί ταυτόχρονα δύο προϋποθέσεις: μέγιστη φόρτιση συστήματος (MSL) και ελάχιστο κόστος εγκατάστασης (για MSL). Τη λύση αυτή επιστρέφει στη main.

4.2.2.4 Ρουτίνα pso_rout.m

Η συνάρτηση αυτή καλείται από την mcode.m και υλοποιεί την τεχνική βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων ακολουθώντας την μέθοδο που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.2.1 και φαίνεται στο λογικό διάγραμμα του Σχήματος 4.2. Δέχεται ως είσοδο τις παραμέτρους που περνάει η mcode.m σε αυτή και αφορούν

το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που έχει επιλεχθεί, το είδος και το πλήθος των συσκευών, την τιμή της φόρτισης του συστήματος (SL) για την οποία θα αναζητήσει λύσεις καθώς και τον αριθμό των σωματιδίων του πληθυσμού που θα δημιουργήσει, το είδος της τεχνικής που θα ακολουθήσει (PSO-TVIW ή PSO-TVAC) και τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων. Επίσης δέχεται την τιμή του συντελεστή ποινής και τη ροή αέργου ισχύος των γραμμών πριν από την εγκατάσταση των συσκευών. Η τελευταία είχε υπολογιστεί εντός της mcode.m και έξω από το βρόχο επανάληψης της φόρτισης του συστήματος. Το αποτέλεσμα που επιστρέφει, υπάρχει η πιθανότητα να παραβιάζει τους περιορισμούς του συστήματος και για αυτό ελέγχεται στην mcode.m. Κάνει χρήση των υπορουτινών check_arrangement.m, denormalize.m, lfnewton.m, constr_factor.m, και fitness_function.m.

4.2.2.5 Άλλες ρουτίνες

Οι ρουτίνες που περιγράφηκαν προηγουμένως αποτελούν τις βασικές συναρτήσεις για την υλοποίηση της μεθόδου. Άλλες ρουτίνες που χρησιμοποιούνται αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

Η check_arrangement.m είναι η συνάρτηση η οποία ελέγχει τη διάταξη των συσκευών στις γραμμές του συστήματος. Αν δύο ή περισσότερες συσκευές βρεθούν στην ίδια γραμμή τότε η συνάρτηση, πέραν της πρώτης συσκευής (κατά σειρά προσπέλασης των τιμών του σωματιδίου), μεταφέρει τις υπόλοιπες σε άλλες γραμμές (εξετάζονται με αύξουσα σειρά) που δεν περιέχουν συσκευές. Ο έλεγχος και η τοποθέτηση των συσκευών αυτών σε άδειες γραμμές γίνεται με μια υπορουτίνα που χρησιμοποιεί αναδρομική λογική. Τα δεδομένα που δέχεται και επιστρέφει είναι σε κανονικοποιημένη μορφή. Καλείται από την pso_rout.m.

Η *denormize.m* πραγματοποιεί τη διαδικασία αποκανονικοποίησης των σωματιδίων βάσει των σχέσεων (4.4α) και (4.4β). Καλείται γιια κάθε σωματίδιο χωριστά. Καλείται και από την mcode.m και από την pso_rout.m.

Η *lfnewton.m* επιλύει το πρόβλημα ροής φορτίου. Στο εσωτερικό της γίνεται η εισαγωγή των μοντέλων των FACTS στο ΣΗΕ. Καλείται και από την mcode.m και από την pso_rout.m.

Η constr_factor.m υπολογίζει την τιμή του συντελεστή JF βάσει των σχέσεων (4.5α), (4.5β) και (4.6). Καλείται και από την mcode.m και από την pso_rout.m.

Η fitness_function υπολογίζει την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας βάσει των σχέσεων (4.1),(4.2),(4.3) και (4.7). Καλείται από την pso_rout.m.

Η calc_q_before.m υπολογίζει την άεργο ροή στις γραμμές του συστήματος. Καλείται από την mcode.m.

Η facts_settings.m δέχεται ως όρισμα ένα σωματίδιο (πίνακας γραμμή), εξάγει τις τιμές των μεταβλητών του και τις εισάγει ως εγγραφές (εγγραφή τοποθεσίας, εγγραφή επαγωγικής αντίδρασης, εγγραφή αέργου ισχύος) σε άλλες μεταβλητές (TCSC, SVC, UPFC). Η διαδικασία αυτή διευκολύνει την εισαγωγή των μοντέλων των FACTS στο σύστημα. Καλείται απο την lfnewton.m και την fitness_function.m.

Η insertpar.m χρησιμοποιείται για να εισάγει σε μεταβλητές τις τιμές και τις επιλογές του χρήστη, διότι αυτές αποθηκεύονται αυτόματα από το GUI σε δομές που αποκαλούνται handles. Καλείται από την interf.m.

Η *lfybus.m* υπολογίζει τη μήτρα αγωγιμοτήτων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που επιλέχθηκε. Καλείται από την lfnewton.m.

4.2.2.6 Άλλα αρχεία προγράμματος

Εκτός από τις ρουτίνες που υλοποιήθηκαν και περιγράφηκαν παραπάνω από το πρόγραμμα, χρησιμοποιούνται κάποια αρχεία απαραίτητα για την λειτουργία του. Τα αρχεία αυτά είναι τα ακόλουθα:

- nbusdatas.m: Αρχείο .m που περιλαμβάνει τα δεδομένων των ζυγών σε μορφή πίνάκων για τα συστήματα των 6, 30 και 118 ζυγών. Στην πραγματικότητα έχει γραφεί ως συνάρτηση που δέχεται ως όρισμα το πλήθος των ζυγών και επιστρέφει τον πίνακα.
- *nlinedatas.m:* Το ίδιο με το αρχείο nbusdatas.m, με τη διαφορά ότι περιέχει τα δεδομένα των γραμμών για τα τρία συστήματα.
- b6rep.mat, b30rep.mat, b118rep.mat: Αρχεία τύπου .mat τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μόνιμη αποθήκευση των αποτελεσμάτων του Χρησιμοποιούνται, επίσης, για την προγράμματος. εμφάνιση των αποτελεσμάτων που έχουν αποθηκευτεί με επιθυμία του χρήστη. Η χρήση θα γίνει περισσότερο κατανοητή στη συνέχεια. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα αποθηκεύονται σε μορφή δομών με εγγραφές, οι οποίες είναι αριθμημένες. Έτσι, για παράδειγμα, το αποτέλεσμα που αντιστοιχεί σε επίλυση του προβλήματος για 6 συσκευές TCSC σε σύστημα 6 ζυγών βρίσκεται στο αρχείο b6rep.m και είναι το tcsc(6) με εγγραφές tcsc(6).ic, tcsc(6).msl και tcsc(6).part, που αντιστοιχούν στο κόστος εγκατάστασης, τη μέγιστη φόρτιση του συστήματος και τις θέσεις και ρυθμίσεις των TCSC στο σύστημα. Τέλος, βάσει των δεδομένων αυτών σχεδιάζονται οι γραφικές παραστάσεις στο πρόγραμμα.
- interf.fig: Αρχείο που σε συνδυασμό με το interf.m υλοποιεί το γραφικό περιβάλλον χρήστη της Matlab.

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το ιεραρχικό διάγραμμα των συναρτήσεων του προγράμματος. Σε ένα ιεραρχικό διάγραμμα παρουσιάζονται οι σχέσεις ιεραρχίας μεταξύ των συναρτήσεων, ή αλλιώς οι σχέσεις κλήσης μεταξύ τους. Διαβάζοντας από πάνω προς τα κάτω, οι συναρτήσεις που βρίσκονται σε υψηλότερο ιεραρχικό επίπεδο καλούν τις συναρτήσεις χαμηλότερου ιεραρχικού επιπέδου με τις οποίες συνδέονται και αυτές επιστρέφουν τα δεδομένα στις πρώτες.



Σχήμα 4.3: Ιεραρχικό διάγραμμα συναρτήσεων προγράμματος.

4.3 ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η ανάπτυξη του λογισμικού πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab 7.9 (R2009b) 32-bit και 64-bit (αναπτύχθηκε σε δύο διαφορετικά υπολογιστικά συστήματα). Οι απαιτήσεις συστήματος για την εύρυθμη λειτουργία της έκδοσης αυτής είναι οι ακόλουθες: Λειτουργικό σύστημα Windows XP service pack 2 και μετά, επεξεργαστής Intel Pentium 4 και μετά (να υποστηρίζει το σύνολο εντολών SSE2), και ελάχιστη μνήμη RAM 512 MB (προτεινόμενη 1024MB) για την 32-μπιτη έκδοση και 1024MB (προτεινόμενη 2048MB) για την 64-μπιτη έκδοση. Ο απαιτούμενος χώρος στο δίσκο είναι τουλάχιστον 4GB.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής Matlab είναι η δυνατότητα που παρέχει για την ανάπτυξη γραφικού περιβάλλοντος χρήστη, GUI [4.1]-[4.3]. Με τη χρήση του εργαλείου GUIDE αναπτύχθηκε το γραφικό περιβάλλον διεπαφής του προγράμματος με το χρήστη, που παρουσιάζεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα. Το εργαλείο αυτό δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης γραφικού περιβάλλοντος που θα επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει δεδομένα μέσω διάφορων γραφικών οντοτήτων, όπως pushbutton, αναδυόμενες λίστες, χώροι πληκτρολόγησης και πολλά άλλα και τα δεδομένα αυτά να τα περάσει ως παραμέτρους σε συναρτήσεις. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων μέσω γραφικών παραστάσεων, πινάκων κλπ. Γενικότερα, δίνεται στο δημιουργό μεγάλη ελευθερία παραμετροποίησης και εξατομίκευσης του γραφικού περιβάλλοντος.

4.4 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΔΙΕΠΑΦΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΤΗ

4.4.1 Το Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη interf

Το γραφικό περιβάλλον διεπαφής του προγράμματος με το χρήστη που αναπτύχθηκε αποτελείται από δύο αρχεία, το interf.m και το interf.fig. Στο πρώτο βρίσκεται ο κώδικας που αντιστοιχεί στο γραφικό περιβάλλον και εκεί είναι καθορισμένες όλες οι λειτουργίες του προγράμματος διεπαφής και οι ενέργειες που πραγματοποιούνται με κάθε επιλογή του χρήστη. Στο αρχείο interf.fig βρίσκεται η μορφή που θα έχει το γραφικό περιβάλλον, η διάταξη δηλαδή και τοποθέτηση στο χώρο των διάφορων γραφικών που χρησιμοποιούνται.

Συνολικά, για την υλοποίηση του περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα γραφικά αντικείμενα (βλ. και Σχήμα 4.3):

- 6 pushbuttons με διάφορες λειτουργίες όπως η εισαγωγή δεδομένων, η έναρξη εκτέλεσης του προγράμματος βελτιστοποίησης, η αποθήκευση και εμφάνιση αποτελεσμάτων, η δημιουργία γραφικών παραστάσεων και η έξοδος από το πρόγραμμα.
- 3 πτυσσόμενες λίστες για την εισαγωγή δεδομένων από προκαθορισμένες τιμές.
- 7 edit texts για την εισαγωγή τιμών στις παραμέτρους.

- 2 check boxes για την επιλογή μεταξύ εμφάνισης της γραφικής παράστασης με γραμμή ή όχι.
- 2 πίνακες για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων του προγράμματος και των αποθηκευμένων εγγραφών.
- 2 axes για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων γραφικά.
- 34 static texts, άλλα για την παρουσίαση μέρους των αποτελεσμάτων και άλλα για χρήση ως τίτλοι.
- -12 panels για την αισθητικότερη παρουσίαση του περιβάλλοντος.

Εκτός από τα παραπάνω αντικείμενα, χρησιμοποιήθηκαν και αρκετά γραφικά μηνυμάτων διαλόγου που εμφανίζονται για την προειδοποίηση και ενημέρωση του χρήστη ύστερα από συγκεκριμένες ενέργειές του ή και για την επιβεβαίωση της πραγματοποίησης κάποιων επιλογών του (π.χ. αποθήκευση αποτελεσμάτων στο αρχείο, έξοδος από το πρόγραμμα).

Η έναρξη λειτουργίας του γραφικού περιβάλλοντος μπορεί να γίνει εύκολα πληκτρολογώντας interf στην command line του Matlab, δεδομένου ότι το Current Folder είναι το σωστό. Χρειάζεται να σημειωθεί ότι αν επιχειρηθεί η ενεργοποίηση διπλοπατώντας το αρχείο interf.fig θα εμφανιστεί μεν το περιβάλλον λειτουργίας και θα είναι δυνατή η χρήση των γραφικών, όπως για παράδειγμα η πτυσσόμενη λίστα, ωστόσο η εκτέλεση του προγράμματος δε θα είναι εφικτή, καθώς τα δύο αρχεία interf.m και interf.fig δε θα έχουν συνδεθεί. Τέλος, η έξοδος από το πρόγραμμα μπορεί να γίνει είτε πατώντας το κουμπί Quit είτε το κουμπί κλεισίματος παραθύρου. Σε κάθε περίπτωση θα εμφανιστεί κουτί διαλόγου για την επιβεβαίωση του κλεισίματος το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.4.

Εν γένει, το περιβάλλον χωρίζεται σε δύο άτυπα τμήματα. Το τμήμα εισόδου, το οποίο περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα αντικείμενα για τη δήλωση από το χρήστη των τιμών των παραμέτρων που απαιτούνται για την εκτέλεση του προγράμματος βελτιστοποίησης και περιλαμβάνει το πάνελ με τίτλο "Program Parameters". Και το τμήμα εξόδου, που εμφανίζει στο χρήστη τα αποτελέσματα του προγράμματος, παλαιότερα αποτελέσματα και γραφικές παραστάσεις αυτών και αποτελείται από τα πάνελ με τίτλο "Program Results", "Results from Archive" και "Plot". Ο τρόπος λειτουργίας όλων αυτών θα περιγραφεί αναλυτικά στις ενότητες που ακολουθούν.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον χρήστη interf που αναπτύχθηκε.



Σχήμα 4.4: Κουτί διαλόγου για την επιβεβαίωση της εξόδου από το πρόγραμμα.

70



Σχήμα 4.5: Γραφικό περιβάλλον χρήστη για το πρόγραμμα βελτιστοποίησης.

4.4.2 Εισαγωγή Δεδομένων από το Χρήστη

Για τη λειτουργία του προγράμματος βελτιστοποίησης απαραίτητη είναι η αρχικοποίηση των τιμών συγκεκριμένων παραμέτρων. Η δυνατότητα αυτή δίνεται στο χρήστη μέσω του τμήματος εισόδου του γραφικού περιβάλλοντος και, για την ακρίβεια, του τμήματος που ονομάζεται "Program Parameters". Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το τμήμα αυτό.

Programme Parameters
EPS model
Choose power system:
6-bus system 💌
FACTS settings
Choose type of FACTS:
TCSC
Give number of FACTS:
1
PSO settings
Choose PSO technique:
PSO-TVIW
Give number of particles:
25
Give max iterations:
500
500
Execution parameters
Give range of SL :
From: 1.06 To: 1.15
Give power of Penalty Factor:
10^ 12
Give loops per SL :
1

Σχήμα 4.6: Τμήμα αρχικοποίησης παραμέτρων του γραφικού περιβάλλοντος.

Όπως καθίσταται εμφανές στο Σχήμα 4.6, ο χρήστης αρχικά πρέπει να ορίσει το ΣΗΕ ('Choose power system') στο οποίο θέλει να εφαρμοστεί η μέθοδος βελτιστοποίησης (καρτέλα "EPS model"). Η πτυσσόμενη λίστα παρέχει τρεις επιλογές: σύστημα 6 ζυγών, σύστημα 30 ζυγών και σύστημα 118 ζυγών.

Έπειτα, απαιτείται η δήλωση του είδους ('Choose type of FACTS') και του πλήθους ('Give number of FACTS') των συσκευών FACTS που επιθυμεί ο χρήστης στην καρτέλα "FACTS settings". Όσον αφορά το είδος των συσκευών, στην πτυσσόμενη λίστα παρέχονται οι επιλογές TCSC, SVC, UPFC και Multi-type, εκ των οποίων ο χρήστης καλείται να επιλέξει μία από αυτές. Το πλήθος των συσκευών

πρέπει να πληκτρολογηθεί στο άσπρο κουτί ακριβώς από κάτω, με προκαθορισμένη τιμή το 1. Σε περίπτωση που ο χρήστης πληκτρολογήσει χαρακτήρα που δεν είναι αποδεκτός, τότε εμφανίζεται μήνυμα σφάλματος, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.7. (βλ. Σχήμα 4.7). Το ίδιο πράγμα συμβαίνει εάν το πλήθος των συσκευών είναι μεγαλύτερο από τον αριθμό των γραμμών του συστήματος που έχει επιλεγεί. Αν, για παράδειγμα, δοθεί ως πλήθος συσκευών 14, ενώ έχει επιλεχθεί σύστημα 6 ζυγών, άρα 11 γραμμών, εμφανίζεται το μήνυμα που φαίνεται στο σχήμα 4.8. Σε περίπτωση τέτοιου σφάλματος το πλήθος των συσκευών αυτόματα ορίζεται ίσο με το πλήθος των γραμμών του συστήματος.



Σχήμα 4.7: Μήνυμα λάθους για μη αποδεκτή εισαγωγή δεδομένων.



Σχήμα 4.8: Μήνυμα λάθους για εσφαλμένη εισαγωγή πλήθους συσκευών.

Επιπλέον, σε περίπτωση που ο χρήστης στο είδος συσκευών κάνει την επιλογή multi-type και επειδή το πλήθος, στην περίπτωση αυτή, αναφέρεται στον συνολικό αριθμό συσκευών, η τιμή "1" δεν είναι αποδεκτή και συνεπώς αν πληκτρολογηθεί – ή δεν αλλάξει, δεδομένου ότι το πλήθος είναι by default 1– εμφανίζεται αντίστοιχο μήνυμα λάθους.

Τον ορισμό των ρυθμίσεων για τα FACTS ακολουθούν οι ρυθμίσεις για την τεχνική ΒΣΣ που γίνονται στην καρτέλα "PSO settings". Αρχικά, η τεχνική που επιθυμεί ο χρήστης επιλέγεται από την πτυσσόμενη λίστα με τίτλο "Choose PSO technique". Οι επιλογές που παρέχονται είναι δύο, οι PSO-TVIW και PSO-TVAC, μόνο μία εκ των οποίων είναι δυνατόν να επιλεγεί. Έπειτα, ορίζεται ο αριθμός των σωματιδίων (particles) στο κουτί με τίτλο "Give number of particles". Ο αριθμός αυτός μπορεί να είναι οσοδήποτε μεγάλος, αρκεί να είναι θετικός ακέραιος. Στο αμέσως επόμενο κουτί με τίτλο "Give max iterations" δηλώνεται ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων της μεθόδου βελτιστοποίησης, ο οποίος πρέπει επίσης ομοίως να είναι
θετικός ακέραιος. Στα δύο τελευταία τμήματα δηλώσεων σε περίπτωση που δεν πληκτρολογηθεί αποδεκτή τιμή (π.χ χαρακτήρας), εμφανίζεται μήνυμα σφάλματος, παρόμοιο με του Σχήματος 4.7, και οι τιμές των δύο μεταβλητών ορίζονται πάλι στην προκαθορισμένη τιμή τους, δηλαδή 25 για το πλήθος σωματιδίων και 250 για το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων.

Στην επόμενη καρτέλα, με τίτλο "Execution Parameters", δηλώνονται οι μεταβλητές που δεν εντάσσονται σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες. Πρόκειται για τις μεταβλητές που αφορούν το εύρος φόρτισης του συστήματος, το συντελεστή ποινής και τον αριθμό των επαναλήψεων - 'προσπαθειών' που θα πραγματοποιούνται για κάθε τιμή του SL. Όσον αφορά τη φόρτιση συστήματος (SL), το εύρος τιμών στο οποίο το πρόγραμμα αναζητά τη μέγιστη φόρτιση για συγκεκριμένα δεδομένα (MSL) δίνεται στο τμήμα με τίτλο "Give range of SL", όπου η κατώτερη τιμή γράφεται στο κουτί με τίτλο "From" και η ανώτερη στο κουτί με τίτλο "To". Οι προκαθορισμένες τιμές των τμημάτων αυτών εξαρτώνται κάθε φορά από το μοντέλο συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που έχει επιλεγεί. Η προκαθορισμένη τιμή για το κάτω όριο του εύρους είναι η μέγιστη τιμή φόρτισης του συστήματος, την οποία μπορεί να επιτύχει χωρίς καμία εγκατεστημένη συσκευή. Από την αμέσως επόμενη τιμή παραβιάζονται οι συνθήκες ροής ενεργού ισχύος και τάσεως ζυγών. Η προκαθορισμένη τιμή για το άνω όριο του εύρους είναι, απλώς, η μέγιστη τιμή φόρτισης συστήματος που έχει επιτευχθεί ανεξαρτήτως συσκευής. Έτσι, για παράδειγμα, εάν επιλεγεί το σύστημα 6 ζυγών, τότε αυτόματα το κάτω όριο παίρνει την τιμή 1.06, μέγιστη τιμή για την οποία το ΣΗΕ 6 ζυγών χωρίς την εγκατάσταση κάποιου FACTS δεν παραβιάζει τους περιορισμούς, και ως άνω όριο την τιμή 1.15, που είναι η μέγιστη τιμή φόρτισης που έχει επιτευχθεί για το εν λόγω ΣΗΕ· επιτυγχάνεται μάλιστα με την εγκατάσταση UPFC, ή συνδυασμού ειδών (multi-type). Φυσικά, τα όρια αυτά είναι ενδεικτικά και ο χρήστης μπορεί να τα αλλάξει όπως επιθυμεί, χωρίς να υπάρχει περιορισμός πέραν της εισόδου χαρακτήρα, οπότε και εμφανίζεται μήνυμα, παρόμοιο με αυτό του Σχήματος 4.7.

Τέλος, στο τμήμα με τίτλο ''Give power of Penalty Factor" ο χρήστης εισάγει τη δύναμη στην οποία είναι υψωμένο το 10, αριθμός ο οποίος συνιστά τον συντελεστή ποινής. Μεγαλύτερη ακρίβεια για αυτόν το συντελεστή δεν είναι απαραίτητη. Στο τμήμα με τίτλο "Give loops per SL" μπορεί να οριστεί το πλήθος των επαναλήψεων που πραγματοποιούνται στην προσπάθεια εύρεσης λύσης για κάθε SL. Ο συντελεστής ποινής έχει προκαθορισμένη τιμή 12, ικανοποιητική κυρίως για το σύστημα 6 ζυγών, και ο αριθμός επαναλήψεων έχει προκαθορισμένη τιμή 1. Και στις δύο περιπτώσεις ο αριθμός πρέπει να είναι θετικός ακέραιος. Σε περίπτωση εισαγωγής μη αποδεκτής τιμής –αρνητικός, μηδέν ή χαρακτήρας– εμφανίζεται σχετικό μήνυμα.

Όλα τα παραπάνω δεδομένα μεταφέρονται στις απαραίτητες μεταβλητές για την εκτέλεση του προγράμματος μόνο όταν πατηθεί το πλήκτρο "ΟΚ". Σε διαφορετική περίπτωση, αν δεν έχει προηγηθεί άλλη εισαγωγή παραμέτρων, καμία άλλη ενέργεια δεν είναι εφικτή. Αφού ο χρήστης πατήσει "ΟΚ" έχει πλέον τη δυνατότητα να εκτελέσει το πρόγραμμα βελτιστοποίησης, να ανακτήσει παλαιότερα αποτελέσματα ή να εμφανίσει γραφικές παραστάσεις, σχετικά με τα εισαγόμενα δεδομένα.

4.4.3 Εξαγωγή αποτελεσμάτων προς τον χρήστη

Η εξαγωγή αποτελεσμάτων προς τον χρήστη περιλαμβάνει την εκτέλεση του προγράμματος βελτιστοποίησης και παρουσίαση της λύσης, αν υπάρχει, την παρουσίαση αποτελεσμάτων που έχουν βρεθεί σε παλαιότερες εκτελέσεις του προγράμματος και έχουν αποθηκευτεί στο αρχείο και την εξαγωγή των γραφικών παραστάσεων. Όλα αυτά με την προϋπόθεση ότι έχουν εισαχθεί κατάλληλα δεδομένα, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Τα τμήματα του γραφικού περιβάλλοντος interf που καθιστούν δυνατή την εκτέλεση των ενεργειών αυτών είναι τα "Program Results", "Results from Archive" και "Plot", και αποτελούν το τμήμα εξόδου του γραφικού περιβάλλοντος. Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται το τμήμα εξόδου του γραφικού περιβάλλοντος interf.





Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν καθένα από τα τρία επιμέρους τμήματα χωριστά.

4.4.3.1 Τμήμα Program Results

Στο τμήμα αυτό πραγματοποιείται η εκτέλεση του προγράμματος βελτιστοποίησης και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Επίσης, είναι δυνατή η μόνιμη αποθήκευση του αποτελέσματος στη βάση δεδομένων, εφόσον ο χρήστης το επιθυμεί.

Για την εκτέλεση του προγράμματος βελτιστοποίησης, του κώδικα δηλαδή που αναπτύχθηκε και περιγράφηκε στην Ενότητα 4.2, αρκεί ο χρήστης να πατήσει το κουμπί "RUN", με την προϋπόθεση φυσικά να έχει πατήσει προηγουμένως το κουμπί

"ΟΚ" για την επιβεβαίωση των τιμών των παραμέτρων.

Από την στιγμή αυτή ο κώδικας ξεκινά να εκτελείται. Για να γίνει αντιληπτό στον χρήστη ότι το πρόγραμμα είναι απασχολημένο, απενεργοποιούνται τα υπόλοιπα πλήκτρα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.10.

	Particle	
ок	RUNI SAVE RESULT	PLOT
	TCSC: . SVC: . UPFC: .	
	Installation Cost :	Line
	Particle	
	<< SHOW RECORD >>	

Σχήμα 4.10: Απενεργοποίηση πλήκτρων κατά την εκτέλεση του προγράμματος.

Όταν το πρόγραμμα τελειώσει την λειτουργία του επιστρέφει τα αποτελέσματα στο interf. Ο χρήστης ενημερώνεται για το πέρας της εκτέλεσης του προγράμματος μέσω μηνυμάτων για επιτυχή ή ανεπιτυχή έκβαση, εύρεση δηλαδή (Σχήμα 4.11) ή όχι (Σχήμα 4.12) αποδεκτής λύσης.



Σχήμα 4.11: Μήνυμα ανεπιτυχούς έκβασης προγράμματος.



Σχήμα 4.12: Μήνυμα επιτυχούς έκβασης προγράμματος.

Στην περίπτωση που το πρόγραμμα βρήκε αποδεκτή λύση την παρουσιάζει στο χρήστη. Η παρουσίαση γίνεται στις θέσεις όπου στο Σχήμα 4.8 υπάρχουν παύλες (πάντα αναφερόμενοι στο τμήμα "Program Results") και στον πίνακα. Συγκεκριμένα, δίπλα από τους τίτλους "TCSC:", "SVC:" και "UPFC:" εμφανίζεται το πλήθος κάθε είδους FACTS που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση αυτού του αποτελέσματος. Δίπλα από τον τίτλο "Installation Cost:" εμφανίζεται το συνολικό κόστος εγκατάστασης σε \$, ενώ δίπλα από τον τίτλο "Maximum SL:" εμφανίζεται η μέγιστη φόρτιση του συστήματος που επιτεύχθηκε στη συγκεκριμένη εκτέλεση προγράμματος με τα συγκεκριμένα δεδομένα, και που φυσικά αντιστοιχεί στη λύση που παρουσιάζεται. Οι ρυθμίσεις και τοποθεσίες των FACTS με τις οποίες επιτυγχάνονται τα παραπάνω παρουσιάζονται στον πίνακα, και συγκεκριμένα στη γραμμή με τίτλο "Particle" . Οι στήλες με τίτλο "Location" αναφέρονται στις θέσεις των σωματιδίων στο ΣΗΕ και οι στήλες με τίτλους "Χ", "Q" στις αντίστοιχες ρυθμίσεις. Η σειρά με την οποία εμφανίζονται τα FACTS στον πίνακα, από αριστερά προς τα δεξιά είναι TCSC, SVC, UPFC. Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται ενδεικτικά κάποιο αποτέλεσμα της εκτέλεσης του προγράμματος.

Στην περίπτωση που το πρόγραμμα δε βρήκε αποδεκτή λύση τότε στις θέσεις τοποθετούνται παύλες και στον πίνακα εμφανίζεται η λέξη 'NaN'.

Στη συνέχεια, εάν ο χρήστης θεωρεί ότι το αποτέλεσμα που βρέθηκε είναι ικανοποιητικό, έχει τη δυνατότητα να το αποθηκεύσει στο αρχείο που περιλαμβάνει όλα τα αποτελέσματα πατώντας απλώς το κουμπί "SAVE RESULT". Υπενθυμίζεται ότι το αρχείο αποτελούν τα τρία .mat files που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.2.2.

Πρέπει να σημειωθεί ότι εάν ο χρήστης προχωρήσει στην αποθήκευση του νέου αποτελέσματος τότε αυτό θα αντικαταστήσει το παλιό, που αντιστοιχεί στη θέση αυτή (κάθε θέση ορίζεται από το πλήθος των συσκευών FACTS), το οποίο και θα χαθεί οριστικά. Στο ενδεχόμενο πατήματος του κουμπιού από λάθος και, κατά συνέπεια, απώλειας δεδομένων, πάντα, με το πάτημα του "SAVE RESULT", εμφανίζεται ένα μήνυμα (Σχήμα 4.14) το οποίο ζητά από το χρήστη να επιβεβαιώσει την ενέργειά του. Αν ο χρήστης επιλέξει 'Yes' ενώ το πρόγραμμα δεν έχει βρει λύση τότε εμφανίζεται σχετικό μήνυμα λάθους (σχήμα 4.15).

Program Resu	lts		
TCSC :	5		
SVC:	0		
UPFC :	0		
Installation Cos	st: 3	.27533e+	006
Maximum SL	:	1.14	
FACTS position	n & set	tings :	
	Locat	ion	X(p
Particle		3	
	•		P.
RUN !		SAVE	RESULT

Σχήμα 4.13: Παρουσίαση αποτελέσματος από εκτέλεση προγράμματος.



Σχήμα 4.14: Μήνυμα για επιβεβαίωση από χρήστη της αποθήκευσης του αποτελέσματος.



\mathbf{n}	4 4 8 3 6 /		c	,	0 /		,	<u>^</u>	
2 ynua	4 15 Mir	w π	$\cos(\pi \alpha \sigma)$	$1n\sigma nc vio$	$\alpha \pi_0 \theta n \kappa_{\text{ED}} \sigma n$	$110 10\pi$	αοκτου	αποτελεσι	INTOC
		l'ona u	pooloono			pul on	in preto o	0.1000000	aa tog.

4.4.3.2 Τμήμα Results from Archive

Στο τμήμα αυτό δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ανακτήσει από το αρχείο αποτελέσματα παλαιότερων εκτελέσεων του προγράμματος. Το αποτέλεσμα που θα εμφανίσει εξαρτάται, φυσικά, από τα δεδομένα που έχει εισαγάγει ο χρήστης και για την ακρίβεια, εξαρτάται από το είδος και το πλήθος των συσκευών FACTS, και το σύστημα ΣΗΕ. Όλα τα υπόλοιπα δεδομένα είναι ανεξάρτητα. Η χρησιμότητα αυτής της επιλογής, της εμφάνισης δηλαδή παλαιότερων αποτελεσμάτων, έγκειται στο γεγονός ότι δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να αξιολογήσει τη σημασία του αποτελέσματος, συγκρίνοντάς το με το βέλτιστο, μέχρι εκείνη τη στιγμή, αποτέλεσμα. Αν το καινούργιο αποτέλεσμα είναι καλύτερο από το παλαιότερο, ο χρήστης μπορεί να το αντικαταστήσει, με τον τρόπο που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Τα αποθηκευμένα αποτελέσματα βρίσκονται στα αρχεία b6rep.mat, b30rep.mat, και b118rep.mat, που αντιστοιχούν στα συστήματα 6, 30 και 118 ζυγών και που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.2.2.

Για την εμφάνιση του αποτελέσματος από το αρχείο που αντιστοιχεί στα εισαγόμενα δεδομένα αρκεί το πάτημα του κουμπιού "SHOW RECORD". Η παρουσίαση της εγγραφής γίνεται με τον ίδιο τρόπο που έγινε και η παρουσίαση του αποτελέσματος στο τμήμα "Program Results".

Εάν ο χρήστης επιθυμεί την εμφάνιση εγγραφής η οποία όμως είναι κενή, τότε εμφανίζεται το μήνυμα που φαίνεται στο Σχήμα 4.16.



Σχήμα 4.16: Μήνυμα προειδοποίησης ότι δεν υπάρχει η εγγραφή που έχει ζητηθεί.

4.4.3.3 Τμήμα Plot

Στο τελευταίο τμήμα του γραφικού περιβάλλοντος interf ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εμφανίσει τις γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων που είναι αποθηκευμένα στη βάση δεδομένων. Δύο γραφικές παραστάσεις είναι δυνατό να παρουσιαστούν, η πρώτη αφορά το κόστος εγκατάστασης των FACTS συναρτήσει του πλήθους των συσκευών και η δεύτερη αφορά τη μέγιστη φόρτιση του συστήματος (MSL), ομοίως συναρτήσει του πλήθους των συσκευών FACTS. Όπως και στο τμήμα "*Results from Archive*", έτσι και σε αυτό, τα αποτελέσματα – δηλαδή οι γραφικές παραστάσεις – που παρουσιάζονται εξαρτώνται αποκλειστικά από το μοντέλο συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και το είδος των FACTS, δεδομένα που ο χρήστης έχει εισαγάγει στο τμήμα εισόδου.

Για την εμφάνιση των γραφικών παραστάσεων αρκεί ο χρήστης να πιέσει το πλήκτρο "Plot". Το πλήκτρο αυτό αναφέρεται και στις δυο γραφικές παραστάσεις, οι οποίες εμφανίζονται ταυτόχρονα και έχει προκαθοριστεί να εμφανίζονται με σημεία και για την ακρίβεια αστερίσκους. Ωστόσο, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ενώσει τα σημεία αυτά με γραμμή για οποιαδήποτε από τις δύο παραστάσεις επιθυμεί, επιλέγοντας το αντίστοιχο από τα δυο check boxes που τιτλοφορούνται με τη λέξη "Line". Επιπλέον, στην περίπτωση της γραφικής παράστασης της συνάρτησης κόστους δίνεται η δυνατότητα εμφάνισης του άξονα κόστους σε λογαριθμική

κλίμακα.

Οι γραφικές παραστάσεις μπορούν να σχεδιαστούν ανεξαρτήτως αν τα αποθηκευμένα δεδομένα αντιστοιχούν σε όλες τις τιμές του άξονα x. Ο άξονας x, όπως έχει ειπωθεί, αντιστοιχεί στο πλήθος των συσκευών FACTS. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές του ισούνται με πλήθος των γραμμών του ΣΗΕ που έχει επιλεγεί. Επειδή, όμως, υπάρχει πιθανότητα να μην είναι υπάρχουν αποτελέσματα για κάθε αριθμό συσκευών, έχει προκαθοριστεί για τις τιμές που δεν υπάρχει αποθηκευμένη εγγραφή να παρουσιάζονται στο διάγραμμα με το 0. Έτσι, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εμφανίζει τις γραφικές παραστάσεις ανεξάρτητα από το πλήθος των εγγραφών. Στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που αντιστοιχούν σε ΣΗΕ 6 ζυγών και είδος TCSC.



Σχήμα 4.17: Γραφικές παραστάσεις για ΣΗΕ 6 ζυγών και TCSC.

4.5 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Το πρόγραμμα μπορεί να δεχθεί κάποιες επεκτάσεις χωρίς την απαίτηση σημαντικών αλλαγών σε αυτό. Μια τέτοια επέκταση αφορά την εισαγωγή επιπλέον μοντέλων ΣΗΕ, πέραν δηλαδή των μοντέλων 6, 30 και 118 ζυγών, όπως για παράδειγμα συστήματα 14, 24 ή 57 ζυγών [4.4], [4.5]. Για την εισαγωγή νέων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αρκεί η επέκταση των αρχείων nbusdatas.m και nlinedatas.m, με την προϋπόθεση φυσικά τα δεδομένα να έχουν την ίδια μορφή με τα ήδη υπάρχοντα (να είναι πίνακες με τον ίδιο αριθμό και είδος στηλών). Φυσικά, απαιτείται και η κατάλληλη ενημέρωση του γραφικού περιβάλλοντος, ώστε να εμφανίζονται τα νέα μοντέλα στις διαθέσιμες επιλογές.

Μια άλλη επέκταση του λογισμικού θα μπορούσε να αφορά τις μεθόδους της ΒΣΣ που εφαρμόζονται. Στην εργασία αυτή υλοποιήθηκαν οι μέθοδοι PSO-TVIW και PSO-TVAC, που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3, και παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα επιλογής μεταξύ αυτών των δύο σε κάθε εκτέλεση του προγράμματος. Ωστόσο, θα μπορούσαν να ενταχθούν και διάφορες άλλες μέθοδοι, όπως για παράδειγμα η enhanced-PSO [4.6], η Self-Organizing Hierarchical PSO (HPSO) [4.7] και πολλές άλλες. Η ένταξη των μεθόδων αυτών δεν απαιτεί επίσης σημαντικές αλλαγές στον υπάρχοντα κώδικα καθώς αυτές θα περιορίζονται κυρίως στο αρχείο pso_rout.m, όπου υλοποιείται η τεχνική βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων.

Τέλος, πολλές επεκτάσεις θα μπορούσε να δεχθεί και το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού, interf, ώστε να δίνει στο χρήστη ακόμη μεγαλύτερη δυνατότητα παραμετροποίησης του προγράμματος ορίζοντας, για παράδειγμα, εξωτερικά μεταβλητές όπως το σφάλμα σύγκλισης, τους περιορισμούς του συστήματος και των ρυθμίσεων των συσκευών, το πλήθος των συνδυασμών στην περίπτωση multi-type mode και πολλά άλλα. Ένα εξίσου ενδιαφέρον χαρακτηριστικό που θα μπορούσε να προστεθεί στο γραφικό περιβάλλον είναι η παροχή στο χρήστη της άμεσης διακοπής του προγράμματος, που εκτελείται μέσω κάποιου κουμπιού. Κάτι τέτοιο στο παρόν πρόγραμμα είναι εφικτό μόνο με το συνδυασμό Ctrl+C.

4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] "Mathworks- Matlab and Simulink for Technical Computing" [Online] Διαθέσιμο: <u>http://www.mathworks.com/</u>.
- [4.2] "Matlab, the Language of Technical Computing- Creating Graphical User Interfaces, Version 1 ", [Online]
 Διαθέσιμο: <u>http://webee.technion.ac.il/courses/matlab/Matlab%20PDFs/</u> <u>buildgui.pdf</u>.
- [4.3] "blinkdagger- an engineering and Matlab blog" [Online]
 Διαθέσιμο: <u>http://blinkdagger.com</u>

81

- [4.4] Power System Test Case Archive, University of Washington, College of Engineering. [Online]
 Διαθέσιμο: http://www.ee.washington.edu/research/pstca/
- [4.5] "Matpower- A Matlab Power System Simulation Package" [Online] Διαθέσιμο: <u>http://www.pserc.cornell.edu/matpower/</u>
- [4.6] Y. del Valle, M. Digman, A. Gray, J. Perkel, G. Venayagamoorthy, and R. Harley, "Enhanced Particle Swarm Optimizer for Power Systemapplications," Proc. 2008 IEEE Swarm Intelligence Symposium, St. Louis, Missouri, September 21-23, pp 1-7
- [4.7] A. Ratnaweera, S. Halgamuge, and H. Watson, "Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 8, no. 3, pp. 240–255, Jun. 2004.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Την ανάπτυξη του προγράμματος για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης ακολούθησε η πραγματοποίηση προσομοιώσεων για τρια μοντέλα συστημάτων ηλεκρικής ενέργειας: ένα σύστημα 6 ζυγών, ένα σύστημα 30 ζυγών και ένα σύστημα 118 ζυγών.

Η διεξαγωγή της διαδικασίας συλλογής αποτελέσματων έγινε σε δυο υπολογιστικά συστήματα. Τα χαρακτηριστικά του πρώτου είναι: Λειτουργικό σύστημα Window 7 Home Premium 64-bit, εξεργαστής Intel Core i3 M350 @ 2.27GHz, μνήμη RAM 4,00 GB και ελεύθερο χώρο στο σκληρό δίσκο 400 GB. Στο σύστημα αυτό χρησιομοποιήθηκε η 64-μπιτη έκδοση της Matlab R2009b. Τα χαρακτηριστικά του δεύτερου συστήματος είναι: Λειτουργικό σύστημα Windows Vista Business 32-bit, επεξεργαστής Intel Core 2 T7200 @ 2.00 GHz, μνήμη RAM 2,00 GB και ελεύθερος χώρος στο σκληρό δίσκο 70GB. Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε η 32-μπιτη έκδοση της Matlab R2009b.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται, αρχικά, τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του προγράμματος για τα τρια αυτά ΣΗΕ και ταυτόχρονα γίνεται ο σχολιασμός τους. Έπειτα από αυτά, ακολουθούν κάποια ειδικά σχόλια που αφορούν την μέθοδο ΒΣΣ, και που βασίζονται στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν.

5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ 6 ΖΥΓΩΝ

5.2.1 Δεδομένα του Συστήματος

Τα δεδομένα των ζυγών και των γραμμών του συστήματος έχουν προκύψει από το [5.1] και παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.1 και 5.2, αντίστοιχα. Στους πίνακες αυτούς, καθώς και στους πίνακες των συστημάτων 30 και 118 ζυγών, το είδος των ζυγών μπορεί να είναι 1 (ζυγός αναφοράς), 2 (ζυγός παραγωγής) ή 0 (ζυγός φορτίου). Για το σύστημα 6 ζυγών η βασική ισχύς είναι 100 MVA και η βασική τάση είναι για όλους τους ζυγούς ίση με 230 kV. Το σύστημα αυτό αποτελείται από 11 γραμμές και έχει συνολικό φορτίο 210 MW. Η μέγιστη δυνατή φόρτιση που μπορεί να επιτευχθεί, χωρίς την εγκατάσταση ΕΣΜ, είναι 1.04, δηλαδή 218.4 MW (4% αύξηση).

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων στο σύστημα των 6 ζυγών χρησιμοποιήθηκαν από την τεχνική ΒΣΣ 20 σωματίδια ενώ ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων επιλέχθηκε να είναι 300 επαναλήψεις.

			2		5		11	5 51		
Αριθμός	Είδος	Μέτρο	Γωνία Τί	Φ_{c}	ορτίο		Παρ	Εγχεόμενα		
Ζυγού	Ζυγού	Τάσης	Τάσης	MW	MVAr	MW	MVAr	Qmin	Qmax	MVAr
1	1	1.05	0.0	0	0	0	0	-100	100	0
2	2	1.07	0.0	0	0	50	0	-100	100	0
3	2	1.07	0.0	0	0	60	0	-100	100	0
4	0	1.00	0.0	70	70	0	0	0	0	0
5	0	1.00	0.0	70	70	0	0	0	0	0
6	0	1.00	0.0	70	70	0	0	0	0	0

Πίνακας 5.1: Δεδομένα ζυγών συστήματος 6 ζυγών.

	-			•	1 3 3 1	
Α/Α Γραμμής	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Άφιζης	R (p.u)	X (p.u)	½ B (p.u)	Θερμικό Όριο Γραμμών (MW)
1	1	2	0.10	0.20	0.020	40
2	1	4	0.05	0.20	0.020	60
3	1	5	0.08	0.30	0.030	40
4	2	3	0.05	0.25	0.030	40
5	2	4	0.05	0.10	0.010	60
6	2	5	0.10	0.30	0.020	30
7	2	6	0.07	0.20	0.025	90
8	3	5	0.12	0.26	0.025	70
9	3	6	0.02	0.10	0.010	80
10	4	5	0.20	0.40	0.040	20
11	5	6	0.10	0.30	0.030	40

Πίνακας 5.2: Δεδομένα γραμμμών συστήματος 6 ζυγών.

5.2.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στα Σχήματα 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται η μέγιστη φόρτιση του συστήματος και το συνολικό κόστος εγκατάστασης σε εκατομμύρια \$ συναρτήσει του αριθμού εγκατεστημένων συσκευών ΕΣΜ.

Οι βέλτιστες λύσεις που επιτεύχθησαν για κάθε περίπτωση ΕΣΜ καθώς και οι θέσεις και ρυθμίσεις των ΕΣΜ που δίνουν τις λύσεις αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 5.3α και 5.3β, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα μέγιστης φόρτισης συστήματος – πλήθους εγκατεστημένων ΕΣΜ.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα κόστους εγκατάστασης – πλήθους εγκατεστημένων ΕΣΜ.

Τύπος ΕΣΜ	MSL	Κόστος εγκατάστασης (εκατ. \$)	Αριθμός Συσκευών
TCSC	1.14	0.245	7
SVC	1.10	8.273	4
UPFC	1.15	3.959	5
Multi-Type	1.15	3.190	5 (TCSC=2, SVC=0, UPFC=3)

Πίνακας 5.3α: Βέλτιστες λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης για το σύστημα 6 ζυγών.

Πίνακας 5.3β: Θέσεις και ρυθμίσεις ΕΣΜ για την επίτευξη της βέλτιστης λύσης.

T	Line No	<i>Line No</i> 10 1 1		11	2			3		7		9		
C S C	X _{TCSC} (p.u)	<i>rcsc</i> 0.080 0.037		0.	006 - 0.018		186	0.0600		0.023		7	0.0046	
s	Line No	2			6				8			10		
V C	Qsvc (MVAr)	99.38	99.3845			88.0142 -92.			-92.8252			89	9.9050	
	Line No	11		3		-	1		4				2	
U P F	X _{UPFC} (p.u)	0.060 -0.0143			3 -0.1026			0.0	0.05		-0.0536			
C	Q _{UPFC} (MVAr)	90.3154 -100			-24.3392				-1()0			100	
	Line No			6						7				
M	X _{TCSC} (p.u)		0.0	135						-0.0057				
l	Line No		10			1	1					3		
t i	X _{UPFC} (p.u)	-	0.1411			-0.1	724				C).059	96	
	Q _{UPFC} (MVAr)		100		2.8946				-65.1290					

5.2.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Στην περίπτωση της εγκατάστασης συσκευών TCSC στο σύστημα η μέγιστη δυνατή φόρτιση που μπορεί να επιτευχθεί είναι 1.14 (συνολικό φορτίο ίσο με 239.4 MW), δηλαδή, δεδομένου ότι χωρίς εγκατεστημένα ΕΣΜ η μέγιστη φόρτιση του συστήματος είναι 1.04, έχουμε αύξηση του μέγιστου επιτρεπτού φορτίου περίπου κατά 9.6%. Στην περίπτωση που εγκαθίστανται SVC, η μέγιστη φόρτιση που μπορεί να επιτευχθεί είναι 1.10 ή ισοδύναμα φορτίο ίσο με 231 MW, δηλαδή αύξηση του MSL περίπου κατά 5.77%. Τέλος, η εγκατάσταση συσκευών UPFC μπορεί να αυξήσει τη μέγιστη φόρτιση του συστήματος περίπου κατά 10.57% που αντιστοιχεί σε MSL ίσο με 1.15 ή αλλιώς σε συνολικό φορτίο 241.5 MW. Το ίδιο ποσοστό επιτυγχάνεται για εγκατάσταση 2 TCSC και 3 UPFC στις κατάλληλες θέσεις και με τις κατάλληλες ρυθμίσεις.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερή η βελτίωση που επιφέρουν και τα τρία είδη ΕΣΜ στη φόρτιση του συστήματος. Από αυτά, όμως, το SVC είναι με διαφορά το λιγότερο αποτελεσματικό ενώ το UPFC και ο multi-type συνδυασμός πραγματοποιούν τη μεγαλύτερη αύξηση στο MSL, που είναι ελάχιστα μεγαλύτερη του 10%.

Το συνολικό κόστος εγκατάστασης των 4 συσκευών SVC προκειμένου να επιτευχθεί MSL=110% είναι 8.27 εκατομμύρια δολλάρια (Πίνακας 5.3α), που είναι και η μεγαλύτερη τιμή κόστους εγκατάστασης από όλες τις συσκευές στην περίπτωση του βέλτιστου MSL. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το μικρό MSL, καθιστά την επιλογή εγκατάστασης συσκευών SVC για το παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης και για το μικρό μοντέλο ΣΗΕ μη αποδοτική σε σχέση με τις υπόλοιπες δυνατές επιλογές.

Όσον αφορά τις επιλογές UPFC και Multi-Type (συνδυασμός 2 συσκευών TCSC και 3 συσκευών UPFC), δεδομένου ότι επιτυγχάνουν ίδια μέγιστη φόρτιση συστήματος, η δεύτερη περίπτωση κρίνεται καταλληλότερη καθότι απαιτεί μικρότερο συνολικό κόστος εγκατάστασης.

Σε γενικές γραμμές, όμως, η εγκατάσταση συσκευών TCSC κρίνεται πιο ορθολογική και αποδοτική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, αφενός μεν οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της φόρτισης του συστήματος, όχι πολύ μικρότερη από αυτή που επιτυγχάνεται με UPFC ή Multi-Type, και αφετέρου το κόστος εγκατάστασης (0.245 εκατομμύρια δολλάρια) είναι σημαντικά μικρότερο από κάθε άλλη περίπτωση (Πίνακας 5.3α).

Από το Σχήμα 5.1 γίνεται φανερό ότι αύξηση του αριθμού εγκατεστημένων ΕΣΜ δεν συνεπάγεται κατά ανάγκη αύξηση της μέγιστης φόρτισης του συστήματος (MSL). Για την ακρίβεια, παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση από μια τιμή του πλήθους συσκευών και έπειτα δεν επιτυγχάνεται περαιτέρω βελτίωση του MSL. Η οριακή αυτή τιμή για το TCSC και το UPFC είναι 3 συκευές ενώ για το SVC και το Multi-Type είναι 4 συσκευές.

5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ 30 ΖΥΓΩΝ

5.3.1 Δεδομένα του Συστήματος

Τα δεδομένα των ζυγών και των γραμμών του συστήματος παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.4 και 5.5 αντίστοιχα [5.2]. Η βασική ισχύς του συστήματος είναι 100 MVA ενώ η βασική τάση είναι για τους ζυγούς 1-8 και 28 ίση με 132 kV, για τους 10,12,14-27,29,30 ίση με 33 kV, για τους 11,13 είναι 11 kV και για τον 9 ίση με 1kV. Το σύστημα αποτελείται από 41 γραμμές και έχει συνολικό φορτίο 283.4 MW. Η μέγιστη δυνατή φόρτιση που μπορεί να επιτευχθεί στο σύστημα των 30 ζυγών για τα συγκεκριμένα δεδομένα, χωρίς την εγκατάσταση ΕΣΜ, είναι 1.33, δηλαδή 376.922 MW.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων στο σύστημα των 30 ζυγών χρησιμοποιήθηκαν από την τεχνική ΒΣΣ 25 σωματίδια ενώ ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων επιλέχθηκε στις 300 επαναλήψεις.

Αριθμός	Είδος	Μέτρο	Γωνία	Φo_{f}	οτίο		Παμ	ραγωγή		Εγχεόμενα
Ζυγού	Ζυγού	Τάσης	Τάσης	MW	MVAr	MW	MVAr	Qmin	Qmax	MVAr
1	1	1.060	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	2	1.043	0.0	21.70	12.7	80.0	0.0	-40.0	50.0	0.0
3	0	1.000	0.0	2.4	1.2	0.0	00	0.0	0.0	0.0
4	0	1.000	0.0	7.6	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	2	1.010	0.0	94.2	19.0	50.0	0.0	-40.0	40.0	0.0
6	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0	1.000	0.0	22.8	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	2	1.010	0.0	30.0	30.0	20.0	0.0	-10.0	60.0	0.0
9	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0	1.000	0.0	5.8	2.0	0.0	0.0	-6.0	24.0	19.0
11	2	1.082	0.0	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0	1.000	0.0	11.2	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	2	1.071	0.0	0.0	0.0	20.0	0.0	-6.0	24	0.0
14	0	1.000	0.0	6.2	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0	1.000	0.0	8.2	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0	1.000	0.0	3.5	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0	1.000	0.0	9.0	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0	1.000	0.0	3.2	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0	1.000	0.0	9.5	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0	1.000	0.0	2.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0	1.000	0.0	17.5	11.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0	1.000	0.0	3.2	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0	1.000	0.0	8.7	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3
25	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	0	1.000	0.0	3.5	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	0	1.000	0.0	2.4	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0	1.000	0.0	10.6	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Πίνακας 5.4: Δεδομένα ζυγών συστήματος 30 ζυγών.

Πίνακας 5.5: Δεδομένα γραμμών συστήματος 30 ζυγών.

Α/Α Γραμμής	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Άφιζης	R (p.u)	X (p.u)	¹ / ₂ B (p.u)	Θερμικό Όριο Γραμμών (MW)
1	1	2	0.0192	0.0575	0.019	130
2	1	3	0.0452	0.1852	0.0452	130
3	2	4	0.0570	0.1737	0.0570	65
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0132	130
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0042	130
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0209	65
7	4	6	0.0119	0.0414	0.0187	90
8	5	7	0.0460	0.1160	0.0045	70
9	6	7	0.0267	0.0820	0.0102	130
10	6	8	0.0120	0.0420	0.0085	32
11	6	9	0.0	0.2080	0.0045	65
12	6	10	0.0	0.5560	0.0	32
13	9	11	0.0	0.2080	0.0	65
14	9	10	0.0	0.1100	0.0	65
15	4	12	0.0	0.2560	0.0	65
16	12	13	0.0	0.1400	0.0	65
17	12	14	0.1231	0.2559	0.0	32
18	12	15	0.0662	0.1304	0.0	32
19	12	16	0.0945	0.1987	0.0	32
20	14	15	0.2210	0.1997	0.0	16
21	16	17	0.0824	0.1923	0.0	16
22	15	18	0.1073	0.2185	0.0	16
23	18	19	0.0639	0.1292	0.0	16
24	19	20	0.0340	0.0680	0.0	32
25	10	20	0.0936	0.2090	0.0	32
26	10	17	0.0324	0.0845	0.0	32
27	10	21	0.0348	0.0749	0.0	32
28	10	22	0.0727	0.1499	0.0	32
29	21	22	0.0116	0.0236	0.0	32
30	15	23	0.1000	0.2020	0.0	16
31	22	24	0.1150	0.1790	0.0	16
32	23	24	0.1320	0.2700	0.0	16
33	24	25	0.1885	0.3292	0.0	16
34	25	26	0.2544	0.3800	0.0	16
35	25	27	0.1093	0.2087	0.0	16
36	28	27	0.0	0.3960	0.0	65
37	27	29	0.2198	0.4153	0.0	16
38	27	30	0.3202	0.6027	0.0	16
39	29	30	0.2399	0.4533	0.0	16
40	8	28	0.0636	0.2000	0.0214	32
41	6	28	0.0169	0.0599	0.065	32

5.3.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στα Σχήματα 5.3 και 5.4 παρουσιάζονται η μέγιστη φόρτιση του συστήματος και το συνολικό κόστος εγκατάστασης σε εκατομμύρια \$ συναρτήσει του αριθμού εγκατεστημένων συσκευών ΕΣΜ. Οι βέλτιστες λύσεις που επιτεύχθησαν για κάθε περίπτωση ΕΣΜ καθώς και οι θέσεις και ρυθμίσεις των ΕΣΜ που δίνουν τις λύσεις αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακα 5.6α και 5.6β, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα μέγιστης φόρτισης συστήματος – πλήθους εγκατεστημένων ΕΣΜ.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα κόστους εγκατάστασης – πλήθους εγκατεστημένων ΕΣΜ

Πίνακας 5.6α: Βέλτιστες λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης για το σύστημα 30 ζυγών.

Τύπος ΕΣΜ	MSL	Κόστος εγκατάστασης (εκατ. \$)	Αριθμός Συσκευών
TCSC	1.51	2.593	9
SVC	1.35	20.914	7
UPFC	1.51	4.071	8
Multi-Type	1.51	1.739	8 (TCSC:7 SVC:1 UPFC:0)

T	Line No	26	2	1	5		22		12		8		29	34		20	
C S C	X _{TCSC} (p.u)	0.0026	-0.1229	-0.0	.0705		-0.0690		.1828	-0.	0850	0.0	- 0011	-0.23	65	-0.0651	
S	Line No	1	2			15		4	1		3		4	ŀ		5	
V C	Qsvc (MVAr)	-100	10	0	12.:		12.5260		2.5260 39.5946 -3.7233 100		39.5946		-3.7233		00	-3	8.3731
	Line No	18	13		20		1	.9	21	-	1	0		23		2	
U P F	X _{UPFC} (p.u)	-0.0248	-0.016	6 -	0.0060 -0.0		-0.()981	-0.02	258	-0.0	113	3 -0	0.0503	-	-0.1273	
C	Q _{UPFC} (MVAr)	-10.3888	0.4019) ().518	2	14.8657		-12.1	722	17.4	405	5 7	.4296	-	10.0460	
M	Line No	32	17	7		2		4	0		29		5	5		22	
M U 1	X _{TCSC} (p.u)	-0.0042	0.00	64	-0	.1327		-0.1	353	-0	-0.0123		-0.0	727	-(0.0307	
<i>t</i>	Line No							,	7								
l	Q _{svc} (MVAr)	-48.4918															

Πίνακας 5.6β: Θέσεις και ρυθμίσεις ΕΣΜ για την επίτευξη της βέλτιστης λύσης.

5.3.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Για το σύστημα των 30 ζυγών η εγκατάσταση συσκευών TCSC μπορεί να αυξήσει τη μέγιστη φόρτιση του συστήματος έως το 1.51 δηλαδή το σύστημα θα μπορεί να λειτουργεί υπό φορτίο 427.934 MW χωρίς να παραβιάζονται τα θερμικά όρια και τα όρια των τάσεων στους ζυγούς. Σε σχέση με τη μέγιστη φόρτιση που επιτυγχάνεται, με τα αρχικά δεδομένα, χωρίς ΕΣΜ πραγματοποιείται αύξηση 13.53%. Οι ίδιες τιμές μπορούν να επιτευχθούν και με την εγκατάσταση UPFC ή στην περίπτωση του Multi-type. Στην περίπτωση που εγκαθίστανται SVC η μέγιστη φόρτιση που μπορούμε να επιτύχουμε είναι 1.35 (φορτίο ίσο με 382.59 MW), δηλαδή αύξηση του MSL μόλις κατά 1.5%.

Το ελάχιστο κόστος εγκατάστασης για MSL=1.35, στην περίπτωση του SVC, επιτυγχάνεται για 7 συσκευές, για τις θέσεις και ρυθμίσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6β, και είναι ίσο με 20.914 εκατομμύρια \$. Η τιμή αυτή είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες τιμές για τις άλλες συσκευές, γεγονός που καθιστά την επιλογή SVC μη αποδοτική.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.6α, η ελάχιστη τιμή κόστους εγκατάστασης για MSL=1.51 επιτυγχάνεται για συνδυασμό 7 TCSC και 1 SVC (για τις θέσεις και ρυθμίσεις του Πίνακα 5.6β) και είναι ίσο με 1.739 εκατομμύρια \$. Λίγο μεγαλύτερο κόστος αντιστοιχεί στις 8 συσκευές TCSC ενώ αρκετά μεγαλύτερο είναι το κόστος εγκατάστασης των UPFC. Δεδομένου ότι και στις τρεις περιπτώσεις επιτυγχάνουμε ακριβώς την ίδια μέγιστη φόρτιση συστήματος, το χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης του συνδυασμού Multi-type καθιστά τη λύση αυτή αποδοτικότερη. Παρατηρώντας, ωστόσο, τα διαγράμμα του κόστους εγκατάστασης του Σχήματος 5.3 είναι φανερό ότι

η γενικότερη συμπεριφορά του TCSC είναι καλύτερη της περίπτωσης Multi-type, αφού για MSL=1.51, εμφανίζει στις περσσότερες περιπτώσεις χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης.

Ο κορεσμός του MSL γίνεται φανερός στο σχήμα 5.4. Η μέγιστη φόρτιση του συστήματος δεν μπορεί πλέον να πάρει μεγαλύτερες τιμές παρά την αύξηση των εγκατεστημένων συσκευών.

5.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ 118 ΖΥΓΩΝ

5.4.1 Δεδομένα του Συστήματος

Για το σύστημα αυτό τα δεδομένα γραμμών και ζυγών παρουσιάζονται στους πίνακες 5.7 και 5.8 και έχουν προκύψει απο το [5.2]. Η βασική ισχύς του συστήματος είναι 100 MVA. Η βασική τάση είναι ίση με 138 kV για τους ζυγούς 1-7, 11-25, 27-29, 31-37, 39-62, 66, 67, 69-80, 82-86, 88-118, για το ζυγό 87 είναι ίση με 161 kV και για τους υπόλοιπους ίση με 345 kV. Το σύστημα αυτό αποτελείται από 186 γραμμές και έχει συνολικό φορτίο 3732.4 MW. Η μέγιστη φόρτιση που μπορεί να επιτευχθεί, χωρίς την εγκατάσταση ΕΣΜ, για τα συγκεκριμένα δεδομένα είναι 1.04, δηλαδή φορτίο ίσο με 3881.696 MW.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων στο σύστημα των 118 ζυγών χρησιμοποιήθηκαν από την τεχνική ΒΣΣ 25 σωματίδια ενώ ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων επιλέχθηκε ίσος με 300 επαναλήψεις.

Αριθμός	Είδος	Μέτρο	Γωνία Τί	Φομ	οτίο		Παμ	οαγωγή		Εγχεόμενα
Ζυγού	Ζυγού	Τάσης	Τάσης	MW	MVAr	MW	MVAr	Qmin	Qmax	MVAr
1	2	1.000	0.0	54.14	28.66	0.0	0.0	-5.0	15.0	0.0
2	0	1.000	0.0	21.23	9.55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0	1.000	0.0	41.4	10.62	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	2	0.998	0.0	31.85	12.74	0.0	0.0	-30.0	300.0	0.0
5	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-40.0
6	2	0.990	0.0	55.2	23.35	0.0	0.0	-13.0	50.0	0.0
7	0	1.000	0.0	20.17	2.12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	2	1.015	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-300.0	300.0	0.0
9	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2	1.050	0.0	0.0	0.0	450.0	0.0	-147.0	200.0	19.0
11	0	1.000	0.0	74.31	24.42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	2	0.990	0.0	49.89	10.62	85.0	0.0	-35.0	120.0	0.0
13	0	1.000	0.0	36.09	16.99	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0	1.000	0.0	14.86	1.06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	2	0.970	0.0	95.54	31.85	0.0	0.0	-10.0	30.0	0.0

Πίνακας 5.7 : Δεδομένα ζυγών συστήματος 118 ζυγών.

Αριθμός	Είδος	Μέτρο	Γωνία	Φ_{O_f}	οτίο		Πα	οαγωγή		Εγχεόμενα
Ζυγού	Ζυγού	Τάσης	Τάσης	MW	MVAr	MW	MVAr	Qmin	Qmax	MVAr
16	0	1.000	0.0	26.54	10.62	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0	1.000	0.0	11.68	3.18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	2	0.973	0.0	63.69	36.09	0.0	0.0	-16.0	50.0	0.0
19	2	0.962	0.0	47.77	26.54	0.0	0.0	-8.0	24.0	0.0
20	0	1.000	0.0	19.11	3.18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0	1.000	0.0	14.16	8.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0	1.000	0.0	10.62	5.31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0	1.000	0.0	7.43	3.18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	2	0.992	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-300.0	300.0	4.3
25	2	1.050	0.0	0.0	0.0	220.0	0.0	-47.0	140.0	0.0
26	2	1.015	0.0	0.0	0.0	314.0	0.0	-1000.0	1000.0	0.0
27	2	0.968	0.0	65.83	13.8	0.0	0.0	-300.0	300.0	0.0
28	0	1.000	0.0	18.05	7.43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	0	1.000	0.0	25.48	4.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	2	0.967	0.0	45.65	28.66	7.0	0.0	-300.0	300.0	0.0
32	2	0.963	0.0	62.63	24.42	0.0	00	-14.0	42.0	0.0
33	0	1.000	0.0	24.42	9.55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	2	0.984	0.0	62.63	27.6	0.0	0.0	-8.0	24.0	14.0
35	0	1.000	0.0	35.03	9.55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	2	0.980	0.0	32.91	18.05	0.0	0.0	-8.0	24.0	0.0
37	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-25.0
38	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	0	1.000	0.0	27.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	2	0.970	0.0	20.0	23.0	0.0	0.0	-300.0	300.0	0.0
41	0	1.000	0.0	37.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	2	0.985	0.0	37.0	23.0	0.0	0.0	-300.0	300.0	0.0
43	0	1.000	0.0	18.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	0	1.000	0.0	16.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0
45	0	1.000	0.0	53.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0
46	2	1.005	0.0	28.0	10.0	19	0.0	-100.0	100.0	10.0
47	0	1.000	0.0	34.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	0	1.000	0.0	20.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	2	1.025	0.0	87.0	30.0	204.0	0.0	-85.0	210.0	15.0
50	0	1.000	0.0	17.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
51	0	1.000	0.0	17.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Πίνακας 5.7 : Δεδομένα ζυγών συστήματος 118 ζυγών (συνέχεια).

Αριθμός	Είδος	Μέτρο	Γωνία	$\Phi_{O_{f}}$	οτίο		Παμ	οαγωγή		Εγχεόμενα
Ζυγού	Ζυγού	Τάσης	Τάσης	MW	MVAr	MW	MVAr	Qmin	Qmax	MVAr
52	0	1.000	0.0	18.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53	0	1.000	0.0	23.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54	2	0.955	0.0	113.0	32.0	48	0.0	-300.0	300.0	0.0
55	2	0.952	0.0	63.0	22.0	0.0	0.0	-8.0	23.0	0.0
56	2	0.954	0.0	84.0	18.0	0.0	0.0	-8.0	15.0	0.0
57	0	1.000	0.0	12.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
58	0	1.000	0.0	12.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
59	2	0.985	0.0	277.0	113.0	155	0.0	-60.0	180.0	0.0
60	0	1.000	0.0	78.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
61	2	0.995	0.0	0.0	0.0	160	00	-100.0	300.0	0.0
62	2	0.998	0.0	77.0	14.0	0.0	0.0	-20.0	20.0	0.0
63	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
64	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
65	2	1.005	0.0	0.0	0.0	391.0	0.0	-67.0	200.0	0.0
66	2	1.050	0.0	39.0	18.0	392.0	0.0	-67.0	200.0	0.0
67	0	1.000	0.0	28.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
68	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
69	1	1.035	0.0	0.0	0.0	516.4	0.0	-300.0	300.0	0.0
70	2	0.984	0.0	66.0	20.0	0.0	0.0	-10.0	32.0	0.0
71	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72	2	0.980	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-100.0	100.0	0.0
73	2	0.991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-100.0	-100.0	0.0
74	2	0.958	0.0	68.0	27.0	0.0	0.0	-6.0	9.0	12.0
75	0	1.000	0.0	47.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
76	2	0.943	0.0	68.0	36.0	0.0	0.0	-8.0	23.0	0.0
77	2	1.006	0.0	61.0	28.0	0.0	0.0	-20.0	70.0	0.0
78	0	1.000	0.0	71.0	26.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
79	0	1.000	0.0	39.0	32.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0
80	2	1.040	0.0	130.0	26.0	477	0.0	-165.0	280.0	10.0
81	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
82	0	1.000	0.0	54.0	27.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
83	0	1.000	0.0	20.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
84	0	1.000	0.0	11.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
85	2	0.985	0.0	24.0	15.0	0.0	0.0	-8.0	23.0	0.0
86	0	1.000	0.0	21.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
87	2	1.015	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	-100.0	1000.0	0.0
88	0	1.000	0.0	48.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
89	2	1.005	0.0	0.0	0.0	607.0	0.0	-210.0	300.0	0.0
90	2	0.985	0.0	78.0	42.0	0.0	00	-300.0	300.0	0.0
91	2	0.980	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-100.0	100.0	0.0

Πίνακας 5.7 : Δεδομένα ζυγών συστήματος 118 ζυγών (συνέχεια).

Αριθμός	Είδος	Μέτρο	Γωνία	Φ_{O_f}	οτίο		Παμ	οαγωγή		Εγχεόμενα
Ζυγού	Ζυγού	Τάσης	Τάσης	MW	MVAr	MW	MVAr	· Qmin	Qmax	MVAr
92	2	0.990	0.0	65.0	10.0	0.0	0.0	-3.0	9.0	0.0
93	0	1.000	0.0	12.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
94	0	1.000	0.0	30.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
95	0	1.000	0.0	42.0	31.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
96	0	1.000	0.0	38.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
97	0	1.000	0.0	15.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
98	0	1.000	0.0	34.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
99	2	1.010	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-100.0	100.0	0.0
100	2	1.017	0.0	37.0	18.0	252.0	0.0	-50.0	155.0	0.0
101	0	1.000	0.0	22.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
102	0	1.000	0.0	5.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
103	2	1.010	0.0	23.0	16.0	40.0	0.0	-15.0	40.0	0.0
104	2	0.971	0.0	38.0	25.0	0.0	0.0	-8.0	23.0	0.0
105	2	0.965	0.0	41.0	26.0	0.0	0.0	-8.0	23.0	20.0
106	0	1.000	0.0	43.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
107	2	0.952	0.0	28.0	12.0	0.0	0.0	-200.0	200.0	6.0
108	0	1.000	0.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
109	0	1.000	0.0	8.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
110	2	0.973	0.0	39.0	30.0	0.0	0.0	-8.0	23.0	6.0
111	2	0.980	0.0	0.0	0.0	36	0.0	-100.0	1000.0	0.0
112	2	0.975	0.0	25.0	13.0	0.0	0.0	-100.0	1000.0	0.0
113	2	0.993	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-100.0	200.0	0.0
114	0	1.000	0.0	8.49	3.18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
115	0	1.000	0.0	23.35	7.43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
116	2	1.005	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1000.0	1000.0	0.0
117	0	1.000	0.0	21.23	8.49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
118	0	1.000	0.0	33.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Πίνακας 5.7 : Δεδομένα ζυγών συστήματος 118 ζυγών (συνέχεια).

Πίνακας 5.8 : Δεδομένα γραμμών συστήματος 118 ζυγών.

Α/Α Γραμμής	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Άφιζης	R (p.u)	X (p.u)	¹ / ₂ B (p.u)	Θερμικό Όριο Γραμμών (MW)
1	1	2	0.0303	0.0999	0.0254	100
2	1	3	0.0129	0.0424	0.0108	100
3	4	5	0.0018	0.0080	0.0021	500
4	3	5	0.0241	0.1080	0.0284	100
5	5	6	0.0119	0.0540	0.0143	100

Α/Α Γραμμής	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Άφιζης	R (p.u)	X (p.u)	¹ / ₂ B (p.u)	Θερμικό Όριο Γραμμών (MW)
6	6	7	0.0046	0.0208	0.0055	100
7	8	9	0.0024	0.0305	1.1620	500
8	8	5	0.0000	0.0267	0.0000	500
9	9	10	0.0026	0.0322	1.2300	500
10	4	11	0.0209	0.0688	0.0175	100
11	5	11	0.0203	0.0682	0.0174	100
12	11	12	0.0060	0.0196	0.0050	100
13	2	12	0.0187	0.0616	0.0157	100
14	3	12	0.0484	0.1600	0.0406	100
15	7	12	0.0086	0.0340	0.0087	100
16	11	13	0.0223	0.0731	0.0188	100
17	12	14	0.0215	0.0707	0.0182	100
18	13	15	0.0744	0.2444	0.0627	100
19	14	15	0.0595	0.1950	0.0502	100
20	12	16	0.0212	0.0834	0.0214	100
21	15	17	0.0132	0.0437	0.0444	500
22	16	17	0.0454	0.1801	0.0466	100
23	17	18	0.0123	0.0505	0.0130	100
24	18	19	0.0112	0.0493	0.0114	100
25	19	20	0.0252	0.1170	0.0298	100
26	15	19	0.0120	0.0394	0.0101	100
27	20	21	0.0183	0.0849	0.0216	100
28	21	22	0.0209	0.0970	0.0246	100
29	22	23	0.0342	0.1590	0.0404	100
30	23	24	0.0135	0.0492	0.0498	100
31	23	25	0.0156	0.0800	0.0864	500
32	26	25	0.0000	0.0382	0.0000	500
33	25	27	0.0318	0.1630	0.1764	500
34	27	28	0.0191	0.0855	0.0216	100
35	28	29	0.0237	0.0943	0.0238	100
36	30	17	0.0000	0.0388	0.0000	500
37	8	30	0.0043	0.0504	0.5140	100
38	26	30	0.0080	0.0860	0.9080	500
39	17	31	0.0474	0.1563	0.0399	100
40	29	31	0.0108	0.0331	0.0083	100
41	23	32	0.0317	0.1153	0.1173	100
42	31	32	0.0298	0.0985	0.0251	100
43	27	32	0.0229	0.0755	0.0193	100
44	15	33	0.0380	0.1244	0.0319	100
45	19	34	0.0752	0.2470	0.0632	100
46	35	36	0.0022	0.0102	0.0027	100

Πίνακας 5.8 : Δεδομένα γραμμών συστήματος 118 ζυγών (συνέχεια).

Α/Α Γραμμής	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Άφιζης	R (p.u)	X (p.u)	¹ / ₂ B (p.u)	Θερμικό Όριο Γραμμών (MW)
47	35	37	0.0110	0.0497	0.0132	100
48	33	37	0.0415	0.1420	0.0366	100
49	34	36	0.0087	0.0268	0.0057	100
50	34	37	0.0026	0.0094	0.0098	500
51	38	37	0.0000	0.0375	0.0000	500
52	37	39	0.0321	0.1060	0.0270	100
53	37	40	0.0593	0.1680	0.0420	100
54	30	38	0.0046	0.0540	0.4220	100
55	39	40	0.0184	0.0605	0.0155	100
56	40	41	0.0145	0.0487	0.0122	100
57	40	42	0.0555	0.1830	0.0466	100
58	41	42	0.0410	0.1350	0.0344	100
59	43	44	0.0608	0.2454	0.0607	100
60	34	43	0.0413	0.1681	0.0423	100
61	44	45	0.0224	0.0901	0.0224	100
62	45	46	0.0400	0.1356	0.0332	100
63	46	47	0.0380	0.1270	0.0316	100
64	46	48	0.0601	0.1890	0.0472	100
65	47	49	0.0191	0.0625	0.0160	100
66	42	49	0.0715	0.3230	0.0860	100
67	42	49	0.0715	0.3230	0.0860	100
68	45	49	0.0684	0.1860	0.0444	100
69	48	49	0.0179	0.0505	0.0126	100
70	49	50	0.0267	0.0752	0.0187	100
71	49	51	0.0486	0.1370	0.0342	100
72	51	52	0.0203	0.0588	0.0140	100
73	52	53	0.0405	0.1635	0.0406	100
74	53	54	0.0263	0.1220	0.0310	100
75	49	54	0.0730	0.2890	0.0738	100
76	49	54	0.0869	0.2910	0.0730	100
77	54	55	0.0169	0.0707	0.0202	100
78	54	56	0.0028	0.0096	0.0073	100
79	55	56	0.0049	0.0151	0.0037	100
80	56	57	0.0343	0.0966	0.0242	100
81	50	57	0.0474	0.1340	0.0332	100
82	56	58	0.0343	0.0966	0.0242	100
83	51	58	0.0255	0.0719	0.0179	100
84	54	59	0.0503	0.2293	0.0598	100
85	56	59	0.0825	0.2510	0.0569	100
86	56	59	0.0803	0.2390	0.0536	100
87	55	59	0.0474	0.2158	0.0565	100

Πίνακας 5.8 : Δεδομένα γραμμών συστήματος 118 ζυγών (συνέχεια).

		-			31	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,
Α/Α Γραμμής	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Άφιζης	R (p.u)	X (p.u)	¹ / ₂ B (p.u)	Θερμικό Όριο Γραμμών (MW)
88	59	60	0.0317	0.1450	0.0376	100
89	59	61	0.0328	0.1500	0.0388	100
90	60	61	0.0026	0.0135	0.0146	500
91	60	62	0.0123	0.0561	0.0147	100
92	61	62	0.0082	0.0376	0.0098	100
93	63	59	0.0000	0.0386	0.0000	500
94	63	64	0.0017	0.0200	0.2160	500
95	64	61	0.0000	0.0268	0.0000	500
96	38	65	0.0090	0.0986	1.0460	500
97	64	65	0.0027	0.0302	0.3800	500
98	49	66	0.0180	0.0919	0.0248	500
99	49	66	0.0180	0.0919	0.0248	500
100	62	66	0.0482	0.2180	0.0578	100
101	62	67	0.0258	0.1170	0.0310	100
102	65	66	0.0000	0.0370	0.0000	500
103	66	67	0.0224	0.1015	0.0268	100
104	65	68	0.0014	0.0160	0.6380	500
105	47	69	0.0844	0.2778	0.0709	100
106	49	69	0.0985	0.3240	0.0828	100
107	68	69	0.0000	0.0370	0.0000	500
108	69	70	0.0300	0.1270	0.1220	500
109	24	70	0.0022	0.4115	0.1020	100
110	70	71	0.0088	0.0355	0.0088	100
111	24	72	0.0488	0.1960	0.0488	100
112	71	72	0.0446	0.1800	0.0444	100
113	71	73	0.0087	0.0454	0.0118	100
114	70	74	0.0401	0.1323	0.0337	100
115	70	75	0.0428	0.1410	0.0360	100
116	69	75	0.0405	0.1220	0.1240	500
117	74	75	0.0123	0.0406	0.0103	100
118	76	77	0.0444	0.1480	0.0368	100
119	69	77	0.0309	0.1010	0.1038	100
120	75	77	0.1999	0.0498	0.0498	100
121	77	78	0.0124	0.0126	0.0126	100
122	78	79	0.0244	0.0065	0.0065	100
123	77	80	0.0485	0.0472	0.0472	500
124	77	80	0.1050	0.0228	0.0228	500
125	79	80	0.0704	0.0187	0.0187	100
126	68	81	0.0202	0.8080	0.8080	500

127

128

81

77

80

82

0.0370

0.0853

0.0000

0.0817

0.0000

0.0817

500

100

Πίνακας 5.8 : Δεδομένα γραμμών συστήματος 118 ζυγών (συνέχεια).

Α/Α Γραμμής	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Άφιζης	R (p.u)	X (p.u)	¹ / ₂ B (p.u)	Θερμικό Όριο Γραμμών (MW)
129	82	83	0.0367	0.0380	0.0380	100
130	83	84	0.1320	0.0258	0.0258	100
131	83	85	0.1480	0.0348	0.0348	100
132	84	85	0.0641	0.0123	0.0123	100
133	85	86	0.1230	0.0276	0.0276	500
134	86	87	0.2074	0.0445	0.0445	500
135	85	88	0.1020	0.0276	0.0276	100
136	85	89	0.1730	0.0470	0.0470	100
137	88	89	0.0712	0.0193	0.0193	500
138	89	90	0.1880	0.0528	0.0528	500
139	89	90	0.0997	0.1060	0.1060	500
140	90	91	0.0254	0.0836	0.0214	100
141	89	92	0.0099	0.0505	0.0548	500
142	89	92	0.0393	0.1581	0.0414	500
143	91	92	0.0387	0.1272	0.0327	100
144	92	93	0.0258	0.0848	0.0218	100
145	92	94	0.0481	0.1580	0.0406	100
146	93	94	0.0223	0.0732	0.0188	100
147	94	95	0.0132	0.0434	0.0111	100
148	80	96	0.0356	0.1820	0.0494	100
149	82	96	0.0162	0.0530	0.0544	100
150	94	96	0.0269	0.0869	0.0230	100
151	80	97	0.0183	0.0934	0.0254	100
152	80	98	0.0238	0.1080	0.0286	100
153	80	99	0.0454	0.2060	0.0546	100
154	92	100	0.0648	0.2950	0.0472	100
155	94	100	0.0178	0.0580	0.0604	100
156	95	96	0.0171	0.0547	0.0147	100
157	96	97	0.0173	0.0885	0.0240	100
158	98	100	0.0397	0.1790	0.0476	100
159	99	100	0.0180	0.0813	0.0216	100
160	100	101	0.0277	0.1262	0.0328	100
161	92	102	0.0123	0.0559	0.0146	100
162	101	102	0.0246	0.1120	0.0294	100
163	100	103	0.0160	0.0525	0.0536	500
164	100	104	0.0451	0.2040	0.0541	100
165	103	104	0.0466	0.1584	0.0407	100
166	103	105	0.0535	0.1625	0.0408	100
167	100	106	0.0605	0.2290	0.0620	100
168	104	105	0.0099	0.0378	0.0099	100
169	105	106	0.0140	0.0547	0.0143	100

Πίνακας 5.8 : Δεδομένα γραμμών συστήματος 118 ζυγών (συνέχεια).

	-					
Α/Α Γραμμής	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Άφιζης	R (p.u)	X (p.u)	¹ / ₂ B (p.u)	Θερμικό Όριο Γραμμών (MW)
170	105	107	0.0530	0.1830	0.0472	100
171	105	108	0.0261	0.0703	0.0184	100
172	106	107	0.0530	0.1830	0.0472	100
173	108	109	0.0105	0.0288	0.0076	100
174	103	110	0.0391	0.1813	0.0461	100
175	109	110	0.0278	0.0762	0.0202	100
176	110	111	0.0220	0.0755	0.0200	100
177	110	112	0.0247	0.0640	0.0620	100
178	17	113	0.0091	0.0301	0.0077	100
179	32	113	0.0615	0.2030	0.0518	500
180	32	114	0.0135	0.0612	0.0163	100
181	27	115	0.0164	0.0741	0.0197	100
182	114	115	0.0023	0.0104	0.0028	100
183	68	116	0.0003	0.0041	0.1640	500
184	12	117	0.0329	0.1400	0.0358	100
185	75	118	0.0145	0.0481	0.0120	100
186	76	118	0.0164	0.0544	0.0136	100

Πίνακας 5.8 : Δεδομένα γραμμών συστήματος 118 ζυγών (συνέχεια).

5.4.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στα σχήματα 5.5 και 5.6 παρουσιάζονται η μέγιστη φόρτιση του συστήματος και το συνολικό κόστος εγκατάστασης σε εκατομμύρια \$ συναρτήσει του αριθμού εγκατεστημένων συσκευών ΕΣΜ. Οι βέλτιστες λύσεις που επιτεύχθησαν για κάθε περίπτωση ΕΣΜ καθώς και οι θέσεις και ρυθμίσεις των ΕΣΜ που δίνουν τις λύσεις αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακα 5.9α και 5.9β, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα μέγιστης φόρτισης συστήματος – πλήθους εγκατεστημένων $E\Sigma M$.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα κόστους εγκατάστασης – πλήθους εγκατεστημένων ΕΣΜ

Τύπος ΕΣΜ	MSL	Κόστος εγκατάστασης (εκατ. \$)	Αριθμός Συσκευών
TCSC	1.26	43.522	40
SVC	1.10	121.040	53
UPFC	1.27	128.850	50
Multi-Type	1.26	83.146	35 (TCSC:19 SVC:7 UPFC:9)

Πίνακας 5.9α: Βέλτιστες λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης για το σύστημα 118 ζυγών.

Πίνακας 5.9β-i: Θέσεις και ρυθμίσεις TCSC για επίτευξη βέλτιστης λύσης.

	TCSC										
Line No	136	33	146	107	19	186	83	30	1		
X _{TCSC} (p.u)	0.0040	-0.1007	-0.0031	-0.0255	0.0043	-0.0360	-0.0445	-0.0159	-0.0609		
Line No	2	28	37	3	12	5	97	6	22		
X _{TCSC} (p.u)	-0.0033	-0.0521	-0.0111	-0.0014	0.0029	0.0053	-0.0153	-0.0107	-0.0145		
Line No	18	8	40	134	7	132	9	10	11		
Х _{тсsc} (р.и)	-0.1463	-0.0032	-0.0034	-0.0700	0.0061	-0.0262	-0.0157	-0.0362	-0.0229		
Line No	108	13	121	65	110	51	16	20	14		
X _{TCSC} (p.u)	-0.0574	-00037	-0.0065	-0.0323	0.0071	-0.0248	0.0108	0.0023	-0.0592		
Line No	17	4	15	60							
X _{TCSC}	-0.0242	-0.0426	-0.0113	-0.0813							

Πίνακας 5.9β-ii: Θέσεις και ρυθμίσεις SVC για επίτευξη βέλτιστης λύσης.

SVC											
Line No	17	115	148	2	165	19	180	10	41		
Qsvc (MVAr)	80.8487	85.2503	-52.6540	85.8998	12.0118	77.5757	-99.5896	57.8374	-96.6229		
Line No	25	124	1	7	26	136	3	4	5		
Qsvc (MVAr)	99.9903	80.2645	-60.5170	-19.5511	94.1137	90.7269	-96.3461	90.3551	-48.6064		
Line No	46	6	29	15	42	8	12	13	30		
Qsvc (MVAr)	-79.5359	-94.9851	-84.9751	16.5587	-99.9989	-84.8794	-87.2646	-86.7788	-99.9999		

Line No	14	31	11	16	35	43	64	119	20
Qsvc (MVAr)	-99.9980	-50.0033	81.0226	76.4688	26.2444	-92.9325	99.9997	-95.2882	74.0044
Line No	21	18	52	22	23	24	55	49	27
Qsvc (MVAr)	94.3925	-76.5645	82.9614	71.8793	82.1620	99.9995	-85.7797	89.9807	92.9230
Line No	32	33	48	57	36	37	50	38	
Qsvc (MVAr)	-93.9018	-96.3384	62.9365	86.4573	97.1757	-49.4004	-62.9824	-78.3210	

Πίνακας 5.9β-ii: Θέσεις και ρυθμίσεις SVC για επίτευξη βέλτιστης λύσης (συνέχεια).

Πίνακας 5.9β-iii: Θέσεις και ρυθμίσεις UPFC για επίτευξη βέλτιστης λύσης

UPFC									
Line No	114	92	95	41	42	48	179	90	
X _{UPFC} (p.u.)	-0.0440	-0.0067	0.0038	-0.0242	-0.0624	-0.0194	-0.1389	-0.0036	
Q _{UPFC} (MVAr)	-48.2466	89.8211	-37.5396	57.3091	-18.9996	49.4662	82.5098	-54.4547	
Line No	8	17	45	10	51	102	24	103	
X _{UPFC} (p.u.)	0.0034	-0.0217	-0.1120	-0.0094	-0.0201	-0.004	-0.0064	-0.0313	
Q _{UPFC} (MVAr)	22.4287	-46.4188	30.8809	70.0156	79.7125	72.1650	81.2575	-61.0028	
Line No	50	68	70	107	46	143	25	81	
X _{UPFC} (p.u.)	-0.0066	-0.1178	-0.0135	-0.0256	0.0013	-0.0923	-0.0320	0.0047	
Q _{UPFC} (MVAr)	-50.0016	44.7738	-51.8235	76.6714	-21.8173	-76.4968	12.3066	-13.7256	
Line No	104	148	133	26	120	96	116	37	
X _{UPFC} (p.u.)	0.0006	-0.0504	-0.0269	-0.0154	-0.0358	-0.0704	-0.0715	0.0021	
Q _{UPFC} (MVAr)	45.0510	-2.8716	-27.8621	76.3603	87.9554	-23.1845	88.1396	21.3902	
Line No	33	43	60	9	105	22	55	65	
X _{UPFC} (p.u.)	-0.1006	-0.0577	-0.0157	-0.0138	0.0370	-0.0274	-0.0202	-0.0325	
Q _{UPFC} (MVAr)	36.3871	-74.5838	-13.7566	57.6780	-13.5145	79.2428	56.1547	46.7401	
Line No	66	15	52	56	1	44	85	27	
X _{UPFC} (p.u.)	0.0346	-0.0134	0.0019	-0.0262	-0.0037	0.0132	-0.0059	-0.0567	
Q _{UPFC} (MVAr)	-55.0001	-52.3299	56.2983	-55.0483	-9.9349	39.3741	-12.7835	19.9981	
Line No	98	47							
X _{UPFC} (p.u.)	-0.0551	-0.0169	1						
Q _{UPFC} (MVAr)	52.5157	19.6198							

Multi-Type										
TCSC: 19										
Line No	168	117	107	126	112	27	62	184	6	
X _{TCSC} (p.u)	-0.0055	0.0004	-0.0270	0.0016	0.0015	-0.0627	-0.0970	-0.0241	0.0004	
Line No	108	97	113	100	15	35	185	152	5	
Х _{тсsc} (р.и)	-0.0349	-0.0195	0.0005	-0.0962	-0.0002	-0.0166	-0.0128	0.0145	0.0095	
Line No	8									
Х _{тсsc} (р.и)	0.0019									
SVC										
Line No	98	9	10	14	11	57	19			
Q _{svc} (MVAr)	-76.4754	67.6150	74.7700	4.6304	37.5485	-12.8333	64.063			
UPFC										
Line No	12	22	102	23	21	99	24	33	26	
Х _{UPFC} (р.и)	-0.0114	-0.1227	-0.0277	-0.0008	-0.0008	0.0062	-0.0007	-0.1117	0.0042	
Q _{UPFC} (MVAr)	-79.2504	1.1447	-90.9237	63.4502	97.3680	-7.4746	66.7015	-91.0068	44.7326	

Πίνακας 5.9β-iv: Θέσεις και ρυθμίσεις multi-type συνδυασμού για επίτευξη βέλτιστης λύσης.

5.4.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.9α, στο σύστημα των 118 ζυγών η εγκατάσταση TCSC μπορεί να αυξήσει τη μέγιστη δυνατή φόρτιση του συστήματος έως την τιμή 1.26 που αντιστοιχεί σε συνολικό φορτίο 4702.82 MW. Μπορεί, δηλαδή, να πραγματοποιηθεί αύξηση του αρχικού MSL (της μέγιστης φόρτισης χωρίς εγκατεστημένα ΕΣΜ) κατά 21.15%. Την ίδια τιμή μπορεί να επιτύχει και η εγκατάσταση συνδυασμού ΕΣΜ, δηλαδή η περίπτωση Multi-Type. Με την εγκατάσταση συσκευών UPFC το MSL μπορεί να πάρει την τιμή 1.27, δηλαδή φορτίο 4740.14 MW, που σημαίνει αύξηση της μέγιστης φόρτισης του συστήματος χωρίς ΕΣΜ ίση με 22.11%. Τέλος, η τοποθέτηση SVC στο σύστημα αυτό μπορεί να αυξήσει το αρχικό MSL κατά 5.77% που αντιστοιχεί σε μέγιστη φόρτιση συστήματος ίση με 1.10 ή αλλιώς συνολικό φορτίο 4105.64 MW.

Στην περίπτωση του SVC, το ελάχιστο κόστος εγκατάστασης για να επιτευχθεί MSL ίσο με 1.10 είναι 121.04 εκατομμύρια \$ και αντιστοιχεί στην εγκατάσταση 53 συσκευών τοποθετημένες στις θέσεις και έχοντας τις ρυθμίσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9β-ii. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα υψηλή, δεδομένης, μάλιστα, τη μικρής συμβολής της συσκευής στην αύξηση της μέγιστης φόρτισης του

συστήματος.

Η αμέσως μεγαλύτερη τιμή του MSL, δηλαδή το 1.26, επιτυγχάνεται είτε στην περίπτωση του TCSC είτε του Multi-type. Για αυτή τη μέγιστη φόρτιση, το ελάχιστο κόστος εγκατάστασης συσκευών TCSC, σύμφωνα με τον Πίνακα 5.9α είναι 43.522 εκατομμύρια \$ και αντιστοιχεί σε εγκατάσταση 40 συσκευών. Αντίθετα, το ελάχιστο κόστος εγκατάστασης στην περίπτωση Multi-Type επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση συνολικά 35 συσκευών, εκ των οποίων οι 19 TCSC, οι 7 SVC και οι 9 UPFC, στις θέσεις και με τις ρυθμίσεις που δίνονται από τον Πίνακα 5.9β-iv. Το κόστος αυτός είναι ίσο με 83.146 εκατομμύρια \$ αρκετά μεγαλύτερο δηλαδή από το κόστος των TCSC.

Τέλος, τη μέγιστη φόρτιση από όλες τις περιπτώσεις, δηλαδή 1.27, επιτυγχάνει το UPFC, αλλά με κόστος εγκατάστασης ίσο με 128.85 εκατομμύρια \$. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην εγκατάσταση 50 συσκευών τοποθετημένες στις θέσεις και με τις ρυθμίσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9β-iii.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει, όπως και στην περίπτωση του συστήματος 6 ζυγών, ότι ενώ από την σκοπιά της μέγιστης αύξησης της φόρτισης του συστήματος υπερτερεί γενικά το UPFC, από τη σκοπιά της απόδοσης το TCSC είναι προτιμότερο. Αυτό συμβαίνει γιατί το MSL που επιτυγχάνεται με το UPFC είναι ελάχιστα μεγαλύτερο του αντιστοιχου του TCSC (1.27 για το πρώτο, 1.26 για το δεύτερο) ενώ το κόστος του TCSC είναι σχεδόν το 1/3 του κόστους του UPFC.

Από το σχήμα 5.6 είναι εμφανές ότι, και στην περίπτωση αυτή, η μέγιστη φόρτιση του συστήματος σταματά να βελτιώνεται παρά την αύξηση των συσκευών που εγκαθίσταντα, το MSL δηλαδή φθάνει σε κορεσμό.

5.5 ΣΥΝΟΨΗ

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για συστήματα 6, 30 και 118 ζυγών. Από τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα.

Αρχικά, η εγκατάσταση οποιουδήποτε τύπου ΕΣΜ ή συνδυασμού αυτών οδηγεί είτε σε μικρό είτε σε μεγάλο βαθμό σε βελτίωση της μέγιστης φόρτισης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η βελτίωση αυτή δεν είναι ανάλογη του πλήθους των εγκατεστημένων στις γραμμές ΕΣΜ. Αντιθέτα, σε κάθε περίπτωση η μέθοδος αδυνατεί να βελτιώσει περαιτέρω τη μέγιστη φόρτιση του συστήματος από έναν ορισμένο αριθμό εγκατεστημένων ΕΣΜ και άνω. Για παράδειγμα, ο αριθμός αυτός στην περίπτωση του TCSC είναι για το σύστημα των 6 ζυγών οι 3 συσκευές, για το σύστημα των 30 ζυγών οι 5 συσκευές και για το σύστημα των 118 ζυγών οι 32 συσκευές. Στην περίπτωση του SVC οι αριθμοί αυτοί είναι, αντίστοιχα, 4 συσκευές για το ΣΗΕ 6 ζυγών, 7 συσκευές για το ΣΗΕ 30 ζυγών και 53 συσκευές για το ΣΗΕ 118 ζυγών. Τέλος, για το UPFC είναι 3 συσκευές, 5 συσκευές και 42 συσκευές για τα ΣΗΕ 6, 30 και 118 ζυγών αντίστοιχα, ενώ για την περίπτωση του Multi-Type, είναι 4 συσκευές, 2 συσκευές και 32 συσκευές. Από τις προσομοιώσεις προκύπτει, επίσης, το συμπέρασμα ότι το SVC είναι η λιγότερο αποδοτική επιλογή από όλες τις περιπτώσεις αφού πραγματοποιεί τη μικρότερη βελτίωση του MSL (μόλις 5.77% για το σύστημα των 6 και 118 ζυγών, 1.5% για το σύστημα των 30 ζυγών) ενώ ταυτόχρονα απαιτεί και σημαντικό κόστος εγκατάστασης. Γενικά, στην περίπτωση εγκατεστημένων συσκευών SVC παρατηρείται δυσκολία της μεθόδου στη βελτίωση του MSL.

Την αντίθετη περίπτωση του SVC, όσον αφορά τη βελτίωση της μέγιστης φόρτισης του συστήματος, αποτελεί το UPFC. Η εγκατάσταση συσκευών UPFC στα συστήματα που προσομοιώθηκαν αύξησε το MSL κατά 10.57% για το σύστημα 6 ζυγών, 13.53% για το σύστημα των 30 ζυγών και κατά 22.15% για το σύστημα των 118 ζυγών. Δηλαδή, το UPFC επιτυγχάνει κατά κανόνα τις μέγιστες βελτιώσεις και από τις τρεις περιπτώσεις, με μικρή όμως διαφορά σε σχέση με το TCSC ή την περίπτωση Multi-type. Ωστόσο, το κόστος εγκατάστασης αυτών (UPFC) των συσκευών είναι σημαντικά μεγάλο με αποτέλεσμα να μη συνιστούν την αποδοτικότερη δυνατή επιλογή.

Σε αντίθεση με τις δυο προηγούμενες περιπτώσεσεις, η εγκατάσταση TCSC συνδυάζει σημαντική βελτίωση της μέγιστης φόρτισης του συστήματος και σχετικά χαμηλό κόστος εγκατάστασης. Οι βελτιώσεις του MSL που μπορεί να επιτύχει (9.6% για το σύστημα των 6 ζυγών, 13.53% για το σύστημα των 30 ζυγών και 21.15% για το σύστημα των 118 ζυγών) είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες του UPFC ενώ τα αντίστοιχα ελάχιστα κόστη για την επίτευξη των βελτιώσεων αυτών είναι σημαντικά μικρότερα από τα αντίστοιχα του UPFC (βλ. Πίνακες 5.3α, 5.6α και 5.9α). Οι λόγοι αυτοί καθιστούν την εγκατάσταση TCSC την καλύτερη επιλογή.

Η επιλογή συνδυασμού συσκευών, δηλαδή η περίπτωση Multi-Type, μπορεί να επιτύχει βελτιώσεις άλλοτε όπως τα TCSC και άλλοτε όπως τα UPFC. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του συστήματος των 6 ζυγών επιτυγχάνει βελτίωση όμοια με αυτή του UPFC (10.57%, στην περίπτωση του συστήματος 118 ζυγών όμοια με αυτή του TCSC (21.15%) και στην περίπτωση των 30 ζυγών όμοια και με τις δυο περιπτώσεις (έχουν την ίδια βελτίωση και οι τρεις ίση με 13.53%). Ωστόσο, επειδή το ελάχιστο κόστος εγκατάστασης στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερο του TCSC (μικρότερο όμως του UPFC) δε μπορεί να θεωρηθεί καλύτερη επιλογή από αυτό. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι στους περισσότερους των συνδυασμών Multi-Type που προέκυπταν ως λύσεις από τη μέθοδο (για οποιοδήποτε πλήθος συσκευών) η επιλογή συσκευών TCSC κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό κάθε συνδυασμού.

5.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] A. J. Wood, B. F. Woolenberg, *Power Generation, Operation and Control*. Wiley, 1996.
- [5.2] Power System Test Case Archive, University of Washington, College of Engineering. [Online] Διαθέσιμο: <u>http://www.ee.washington.edu/research/pstca/</u>
КЕФАЛАІО 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (ΕΣΜ) σε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ), καθώς και των ρυθμίσεων αυτών, με σκοπό την μεγιστοποίηση της φόρτισης του συστήματος και την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εγκατάστασης των συσκευών, λαμβάνοντας υπόψιν τα θερμικά όρια των γραμμών και τα όρια των τάσεων των ζυγών. Τα εύελικτα συστήματα μεταφοράς που εξετάστηκαν είναι τύπου TCSC, SVC και UPFC. Εξετάστηκε, επίσης, και η περίπτωση συνδυασμού αυτών (Multi-type). Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης έγινε με χρήση της μεθόδου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων.

Σε πρώτο στάδιο αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab το απαιτούμενο λογισμικό για την επίλυση του προβλήματος. Σχεδιάστηκε, επίσης, και αναπτύχθηκε το κατάλληλο γραφικό περιβάλλον χρήστη, με τη βοήθεια του εργαλείου GUIDE της Matlab, με στόχο τη διευκόλυνση του χρήστη στη διεξαγωγή προσομοιώσεων. Σε δεύτερο στάδιο, πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες προσομοιώσεις σε τρια συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας: ένα σύστημα 6 ζυγών, ένα σύστημα 30 ζυγών και ένα σύστημα 118 ζυγών. Στις προσομοιώσεις αυτές αναζητήθηκε για κάθε είδος ΕΣΜ, και για συνδυασμό αυτών, με δεδομένο κάθε φορά το πλήθος των προς εγκατάσταση συσκευών, η μέγιστη φόρτιση του συστήματος που μπορεί να επιτευχθεί και το ελάχιστο κόστος εγκατάστασης που αντιστοιχεί στη φόρτιση αυτή. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για κάθε επιτρεπτό πλήθος συσκευών.

Τα αποτέλεσματα των προσομοιώσεων κατέδειξαν ότι η εγκατάσταση των ΕΣΜ στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει, μεν, τη μέγιστη φόρτιση του συστήματος, παρατηρήθηκε, ωστόσο, ότι η φόρτιση αυτή δε μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με την τοποθέτηση συγκεκριμένου αριθμού συσκευών ΕΣΜ και άνω. Για τα δεδομένα μοντέλα ΣΗΕ προέκυψε ότι η εγκατάσταση UPFC επιτυγχάνει τη μέγιστη δυνατή φόρτιση συστήματος με υψηλό, όμως, κόστος εγκατάστασης ενώ η μικρότερη βελτίωση της μέγιστης φόρτισης συστήματος παρατηρείται για την περίπτωση των SVC. Την καλύτερη επίδοση πραγματοποιεί το TCSC. Η εγκατάσταση αυτού του είδους ΕΣΜ στο ΣΗΕ επιτυγχάνει σημαντικές βελτιώσεις της μέγιστης φόρτισης με πολύ μικρό κόστος εγκατάστασης, γεγονός που το καθιστά την πιο αποδοτική λύση. Τέλος, η επιλογή συνδυασμού ειδών ΕΣΜ (Multi-type) επιτυγχάνει εξίσου σημαντικές βελτιώσεις της μέγιστης φόρτισης με το TCSC με μεγαλύτερο γενικά κόστος εγκατάστασης από αυτό.