



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ  
ΤΩΝ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΑ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Νικόλαος Α. Κουμιώτης

**Επίβλεψη:** Παύλος Σ. Γεωργιάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015





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

## ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Νικόλαος Α. Κουμιώτης

**Επίβλεψη:** Παύλος Σ. Γεωργιλιάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .... Φεβρουαρίου 2015

.....  
Παύλος Γεωργιλιάκης  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....  
Σταύρος Παπαθανασίου  
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015

.....

Νικόλαος Α. Κουμιώτης

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

Copyright © Νικόλαος Κουμιώτης, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση της βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης των Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς (ΕΣΜ) στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός της βέλτιστης κατανομής των ΕΣΜ είναι ο καθορισμός των βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης και των βέλτιστων μεγεθών των ΕΣΜ, με σκοπό να βελτιστοποιείται ο σχεδιασμός και η λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των δικτύων καθώς και τους λειτουργικούς περιορισμών των ΕΣΜ.

Η βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση των ΕΣΜ (ΒΤΔΕΣΜ) βοηθάει στη μείωση της ροής ισχύος των υπερφορτισμένων γραμμών μεταφοράς, αυξάνει τη διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς του συστήματος, αυξάνει τη δυνατότητα φόρτισης του συστήματος, μειώνει τις απώλειες στις γραμμές μεταφοράς, μειώνει το κόστος παραγωγής ενέργειας, βελτιώνει την ευστάθεια και την ασφάλεια του συστήματος και καθορίζει ένα περισσότερο ενεργειακά αποδοτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Αρκετά μοντέλα και μέθοδοι έχουν προταθεί για την επίλυση του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ. Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μία ταξινομημένη και περιεκτική περιγραφή των μοντέλων και των μεθόδων που εφαρμόζονται στο πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ, αναλύοντας και ταξινομώντας τωρινές και μελλοντικές ερευνητικές τάσεις αυτού του πεδίου.

Αυτή η μελέτη μπορεί να αποτελέσει ένα εργαλείο για ερευνητές και μηχανικούς ηλεκτρικών συστημάτων στα διαθέσιμα μοντέλα και στις διαθέσιμες μεθόδους του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ.

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς (ΕΣΜ), Βέλτιστη Τοποθέτηση και Διαστασιολόγηση των ΕΣΜ (ΒΤΔΕΣΜ), βελτιστοποίηση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, σχεδιασμός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the study of the optimal placement and sizing of Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) in the power systems. The aim of the optimal allocation of FACTS is to determine the best locations and sizes of FACTS devices to optimize transmission system operation and planning taking into account network and FACTS operation constraints.

The optimal FACTS allocation (OFA) helps reduce power flow on overloaded lines, increase power system loadability, increase available transfer capability, reduce transmission line losses, reduce the operation cost of power system, improve power system stability and security and obtain a more energy-efficient power system.

Several models and methods have been proposed for the solution of OFA problem. This diploma thesis presents a taxonomy of the state of the art models and methods applied to the OFA problem, analyzing and classifying current and future research trends in this field.

This work serves as a guide for researchers and power system engineers on the available models and methods for OFA.

## **KEY WORDS**

Flexible alternating current transmission systems (FACTS); Optimal FACTS allocation (OFA); power system optimization; power system planning.





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., τον οποίο ευχαριστώ ιδιαίτερος για την ανάθεσή της, καθώς και για την απλόχερη βοήθεια και καθοδήγησή του σε οποιαδήποτε δυσκολία και αν προέκυπτε. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Αντώνη και Αγγελική, τη γιαγιά μου, Άννα, και τους φίλους μου για τη στήριξη και βοήθειά τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στη μνήμη του παππού μου, Αγγελου Βιδάλη και της γιαγιάς μου, Ασπασίας Κουμιώτη.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Εισαγωγή των ΕΣΜ στα ΣΗΕ	3
1.3	Βέλτιστη Τοποθέτηση και Διαστασιολόγηση Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς (ΒΤΔΕΣΜ)	4
1.4	Δομή της εργασίας	5

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

2.1	Εισαγωγή	7
2.2	Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς ελεγχόμενα από θυρίστορ	11
2.2.1	Στατικός Αντισταθμιστής Αέργου Ισχύος (SVC)	11
2.2.2	Πυκνωτής Σειράς Ελεγχόμενος από Θυρίστορ (TCSC)	13
2.2.3	Ρυθμιστής Φασικής Γωνίας Ελεγχόμενος από θυρίστορ (TCPAR ή TCPST)	15
2.2.4	Ρυθμιστής Τάσης Ελεγχόμενος από Θυρίστορ (TCVR)	18
2.3	Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς ελεγχόμενα από μετατροπείς ισχύος	19
2.3.1	Στατικός Σύγχρονος Αντισταθμιστής (STATCOM)	19
2.3.2	Στατικός Σύγχρονος Σειριακός Αντισταθμιστής (SSSC)	22
2.3.3	Ενοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος (UPFC)	24
2.4	Υπόλοιπα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς	26
2.4.1	Δυναμικός Αποκαταστάτης Τάσης (DVR)	26
2.4.2	Αντισταθμιστής Σειράς με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWMSC)	27

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

3.1	Εισαγωγή	29
3.2	Μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ	31
3.3	Αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ	32
3.3.1	Βελτίωση ευστάθειας ΣΗΕ	32
3.3.2	Μεγιστοποίηση διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς ΣΗΕ	37
3.3.3	Μεγιστοποίηση φόρτισης ΣΗΕ	39
3.3.4	Ελαχιστοποίηση κόστους συμφόρησης	39
3.3.5	Ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους ΣΗΕ και κόστους επένδυσης ΕΣΜ	41
3.3.6	Μεγιστοποίηση χρησιμότητας καταναλωτή, ελαχιστοποίηση απωλειών ΣΗΕ και βελτίωση των τάσεων του ΣΗΕ	46
3.4	Περιορισμοί του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ	49
3.4.1	Περιορισμοί ισότητας	50
3.4.2	Ανισωτικοί περιορισμοί	51

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**

4.1	Εισαγωγή	61
4.2	Αναλυτικές μέθοδοι (analytical methods)	64
4.2.1	Ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis)	65
4.2.1.1	Ευαισθησία δείκτη απόδοσης ενεργού ροής ισχύος (real power flow performance index sensitivity)	71
4.2.1.2	Sensitivity factors/indicators	73
4.2.1.3	Άλλες μέθοδοι ευαισθησίας	78
4.2.2	Ανάλυση ρυθμών (modal analysis)	80
4.2.3	Άλλες αναλυτικές μέθοδοι	87
4.2.3.1	Δείκτες ευαισθησίας τάσης (voltage stability indicators)	88
4.2.3.2	Διάφορες άλλες αναλυτικές μέθοδοι	90
4.3	Αριθμητικές μέθοδοι (numerical methods)	99
4.3.1	Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming, LP)	100
4.3.2	Διαδοχικός Τετραγωνικός Προγραμματισμός (Sequential Quadratic Programming, SQP)	103
4.3.3	Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (Nonlinear Programming, NLP)	105
4.3.4	Διατεταγμένη Βελτιστοποίηση (Ordinal Optimization, OO)	107
4.3.5	Αποσύνθεση Benders (Benders Decomposition)	109
4.3.6	Αλγόριθμος Διακλάδωσης και Φράγματος (Branch and Bound)	111
4.3.7	Εξαντλητική Αναζήτηση (Exhaustive Search)	112
4.4	Ευρετικές μέθοδοι (Heuristic methods)	113
4.4.1	Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm, GA)	117
4.4.2	Αλγόριθμος Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις και Αλγόριθμος Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Tabu Search & Simulated Annealing, TS & SA)	125
4.4.3	Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO)	129
4.4.4	Αναζήτηση Ελάχιστης Τομής (Min Cut Search)	134
4.4.5	Εξελικτικός Αλγόριθμος (Evolutionary Algorithm, EA)	134
4.4.6	Διαφορική Εξέλιξη (Differential Evolution, DE)	135
4.4.7	Αναζήτηση Αρμονίας (Harmony Search, HS)	137
4.4.8	Βελτιστοποίηση Σμήνους Γατών (Cat Swarm Optimization, CSO)	138
4.4.9	Πρακτικές Ευρετικές Μέθοδοι (Practical Heuristic Methods)	140

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΟΦΕΛΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΒΤΔΕΣΜ**

5.1	Εισαγωγή	143
5.2	Βελτίωση ευστάθειας ΣΗΕ	143
5.2.1	Βελτίωση ευστάθειας μόνιμης κατάστασης ΣΗΕ	143
5.2.2	Βελτίωση μεταβατικής ευστάθειας ΣΗΕ	144
5.2.3	Βελτίωση ευστάθειας τάσης ΣΗΕ	145
5.3	Αύξηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς	145
5.4	Μείωση του κόστους σημόρφησης ΣΗΕ	145
5.5	Αύξηση της φόρτισης ΣΗΕ	146
5.6	Μείωση του λειτουργικού κόστους ΣΗΕ	146
5.7	Αύξηση της χρησιμότητας καταναλωτή, μείωση απωλειών ΣΗΕ και βελτίωση των τάσεων του ΣΗΕ	147
5.8	Αποτελέσματα βελτίωσης ευστάθειας ΣΗΕ με ΒΤΔΕΣΜ	148
5.8.1	Αποτελέσματα βελτίωσης ευστάθειας μόνιμης κατάστασης ΣΗΕ με	148

	ΒΤΔΕΣΜ	
5.8.2	Αποτελέσματα βελτίωσης μεταβατικής ευστάθειας ΣΗΕ με ΒΤΔΕΣΜ	154
	ΒΤΔΕΣΜ	
5.8.3	Αποτελέσματα βελτίωσης ευστάθειας τάσης ΣΗΕ με ΒΤΔΕΣΜ	157
5.9	Αποτελέσματα αύξησης της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς με ΒΤΔΕΣΜ	161
5.10	Αποτελέσματα μείωσης κόστους συμφόρησης ΣΗΕ με ΒΤΔΕΣΜ	164
5.11	Αποτελέσματα αύξησης φόρτισης ΣΗΕ με ΒΤΔΕΣΜ	166
5.12	Αποτελέσματα μείωσης του λειτουργικού κόστους ΣΗΕ με ΒΤΔΕΣΜ	172
5.13	Αποτελέσματα αύξησης χρησιμότητας καταναλωτή, μείωσης απωλειών ΣΗΕ και βελτίωσης των τάσεων του ΣΗΕ με ΒΤΔΕΣΜ	175

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

6.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	179
6.2	Περιοχές για μελλοντική έρευνα	180
6.3	Συμπεράσματα	182

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

183

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στους σταθμούς παραγωγής και μεταφέρεται με το σύστημα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι όλη η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στους σταθμούς παραγωγής, μεταφέρεται με τις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης σε πολύ μεγάλες αποστάσεις με λιγότερες απώλειες, καθώς οι σταθμοί παραγωγής είναι συνήθως μακριά από μεγάλα αστικά κέντρα.

Το δίκτυο μεταφοράς μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς μεταφοράς. Η μεταφορά γίνεται σε υψηλή τάση, μέσω του δικτύου υψηλής τάσης για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος, όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες. Οι γραμμές μεταφοράς δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα τους καταναλωτές που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση αλλά φθάνουν μέχρι ορισμένα σημεία, τους υποσταθμούς μεταφοράς, όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στη μέση τάση. Οι υποσταθμοί αποτελούν κόμβους στο δίκτυο του ηλεκτρισμού. Από αυτά τα σημεία, όπου βρίσκονται οι υποσταθμοί μεταφοράς, αρχίζουν οι γραμμές διανομής, που καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής όπου γίνεται υποβιβασμός της μέσης τάσης στη χαμηλή τάση, που χρησιμοποιούν οι περισσότεροι καταναλωτές.

Από τους σημαντικότερους παράγοντες της μεγάλης ανάπτυξης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι η αύξηση της απόδοσης της μετατροπής της ενέργειας, με την αύξηση του μεγέθους των μονάδων παραγωγής. Έτσι, είναι όχι μόνο καταλληλότερη αλλά και αποδοτικότερη η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες και η ηλεκτρική μεταφορά της στις περιοχές κατανάλωσης, σε αντίθεση με την παραγωγή μικρών ποσοτήτων ενέργειας κοντά στις περιοχές κατανάλωσης. Η αρχή αυτή συντέλεσε στην ανάπτυξη μεγάλων μονάδων παραγωγής και στη διασύνδεση των φορτίων, ώστε οι σταθμοί παραγωγής να μπορούν να εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό μικρών φορτίων. Μεταξύ άλλων τα διασυνδεδεμένα δίκτυα μεταφοράς έχουν τη δυνατότητα της ένταξης μεγαλύτερων και οικονομικότερων μονάδων παραγωγής στο σύστημα και της μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής προς τα μείζονα κέντρα φορτίου. Επίσης, μειώνουν τις απαιτήσεις εφεδρείας κάθε μίας από τις διασυνδεδεμένες περιοχές ή συστήματα και παρέχουν οικονομία ισχύος.

Επειδή δεν είναι δυνατή η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να καταναλώνεται ταυτόχρονα με την παραγωγή της ή να αποθηκεύεται αφού πρώτα μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας (π.χ. χημική, δυναμική κλπ.). Η ανάγκη για άμεση κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει στην κατασκευή των διασυνδεδεμένων

ηλεκτρικών δικτύων, έτσι ώστε να μπορεί να μεταφέρεται εύκολα, από το σημείο παραγωγής της, στο σημείο κατανάλωσης. Στη σημερινή εποχή, στην οποία τα ΣΗΕ, είναι υψηλής πολυπλοκότητας και διασύνδεσης και αποτελούνται συνήθως από χιλιάδες ζυγούς και εκατοντάδες γεννήτριες, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για καλύτερη χρησιμοποίηση, αξιοποίηση και εκμετάλλευση της ηλεκτρικής ισχύος, εξασφαλίζοντας την ίδια στιγμή ασφάλεια τροφοδοσίας και αξιοπιστία.

Η μεταφερόμενη ισχύς μιας γραμμής μεταφοράς είναι συνάρτηση της επαγωγικής της αντίδρασης, του μέτρου της τάσης αναχώρησης και άφιξης και της μεταξύ τους γωνίας. Έτσι μπορεί να ελεγχθεί η ενεργός καθώς επίσης και η άεργος ισχύς σε μία γραμμή μεταφοράς ελέγχοντας έναν ή περισσότερους από τους παραπάνω παράγοντες. Στο παρελθόν τα συστήματα ισχύος ήταν απλά και σχεδιασμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ενεργειακά αυτόνομα. Ήταν σπάνια η ανταλλαγή ενεργού ισχύος μεταξύ συστημάτων καθώς τα συστήματα μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος δεν είχαν τη δυνατότητα ελέγχου ώστε να χειρίζονται γρήγορα τις δυναμικές διαταραχές που συνέβαιναν στο σύστημα, με αποτέλεσμα τα δυναμικά προβλήματα που δημιουργούνται, να λύνονται συνήθως κρατώντας πολύ μεγάλα περιθώρια ευστάθειας.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος, οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας προτίμησαν να βασιστούν στον ήδη υπάρχοντα εξοπλισμό παραγωγής/μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αντί να κατασκευάσουν καινούριες γραμμές μεταφοράς το οποίο δεν είναι πάντα εφικτό καθώς υπόκεινται στην έγκριση των ρυθμιστικών αρχών και περιβαλλοντικών περιορισμών αυξάνοντας σημαντικά το κόστος. Από την άλλη πλευρά, η ροή ισχύος σε κάποιες γραμμές είναι πολύ χαμηλότερη από το θερμοκτικό όριο των αγωγών, ενώ συγκεκριμένες γραμμές είναι υπερφορτωμένες, πράγμα το οποίο έχει άμεση συνέπεια τη δυσκολία κατά την ελεγχσιμότητα της ροής ισχύος, τη χειροτέρευση της τάσης και τη μείωση της αξιοπιστίας και ευστάθειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη, οι υπάρχουσες παραδοσιακές γραμμές μεταφοράς, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι σχεδιασμένες ώστε να διαχειρίζονται αυτόματα τις απαιτήσεις σε ισχύ των σύγχρονων πολύπλοκων και διασυνδεδεμένων δικτύων και συστημάτων.

Στα συστήματα ισχύος είθισται να εγκαθίστανται εγκάρσιοι πυκνωτές για να διατηρούν την τάση του συστήματος σε ικανοποιητικά επίπεδα. Οι εν-σειρά πυκνωτές εγκαθίστανται για να μειώνουν τη συνολική επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς, που οδηγεί στην αύξηση του ορίου μεταφερόμενης ισχύος της γραμμής. Η μετατόπιση γωνίας εφαρμόζεται για τον έλεγχο της ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, εισάγοντας μια επιπρόσθετη γωνία μεταξύ της τάσης αναχώρησης και άφιξης. Μέχρι και πριν από λίγα χρόνια όλες αυτές οι συσκευές ελέγχονταν μηχανικά για αυτό και ήταν σχετικά αργές. Είναι πολύ χρήσιμες στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, αλλά από πλευράς δυναμικού ελέγχου η χρονική απόκριση είναι πολύ αργή για να ελαχιστοποιήσει τις μεταβατικές ταλαντώσεις. Επίσης δεν επιτρέπουν την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του συστήματος ισχύος και δημιουργούν προβλήματα αστάθειας.

Κατά το πέρασμα των τελευταίων δεκαετιών πολλές αλλαγές έχουν πραγματοποιηθεί στα ΣΗΕ με αποτέλεσμα η αναζήτηση τρόπων αποδοτικότερης αξιοποίησής τους και η προσπάθεια συστηματικής εξάντλησης και επέκτασης των λειτουργικών δυνατοτήτων τους να έχουν γίνει διεθνώς επιτακτική ανάγκη. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 η τεχνολογική πρόοδος σε ηλεκτρονικά ισχύος έχει διευκολύνει την ανάπτυξη του ηλεκτρονικού εξοπλισμού που

προσφέρει τη δυνατότητα χειρισμού μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας, κατά συνέπεια, η χρήση και η εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής σε ηλεκτρικά συστήματα ισχύος έχει αυξηθεί σημαντικά και επιτρέπει την καλύτερη αξιοποίηση και επέκταση των δυνατοτήτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι ηλεκτρονικές συσκευές, που ονομάζονται Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος ή FACTS (Flexible AC Transmission Systems), έχουν ως βάση ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος και παρέχουν τη δυνατότητα γρήγορων προσαρμογών και ελέγχου του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

## 1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΕΣΜ ΣΤΑ ΣΗΕ

Τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς (ΕΣΜ) είναι συστήματα που ενσωματώνουν στη δομή τους ελεγκτές βασισμένους σε ηλεκτρονικά ισχύος αλλά και άλλους στατικούς ελεγκτές με σκοπό τη βελτίωση της ικανότητας ασφαλούς μεταφοράς ισχύος, τη μείωση της διαφοράς μεταξύ θερμικού ορίου και ορίου ευστάθειας και τη βελτίωση της δυνατότητας ελέγχου. Τα ΕΣΜ έχουν σημαντικά οφέλη στην λειτουργία όλου του συστήματος έχοντας δύο κύριους στόχους: να αυξήσουν τα όρια μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος μεταφοράς και να κατευθύνουν την μεταφερόμενη ισχύ σε προδιαγεγραμμένες διαδρομές στο σύστημα μεταφοράς [103].

Η μεγάλη πρόκληση των σύγχρονων ΣΗΕ είναι η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας όπως επιτάσσεται από τους κανόνες για πιο ανταγωνιστική αγορά. Η δημιουργία ενός δικτύου ελεύθερης πρόσβασης για προμηθευτές, παραγωγούς, καταναλωτές και τους εκάστοτε φορείς της αγοράς είναι η βασική επιδίωξη αυτών των κανόνων. Ο ανταγωνισμός έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη διαφοροποίηση των συνθηκών τόσο στην παραγωγή όσο και στην μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα συστήματα μεταφοράς εμφανίζονται προβλήματα, όπως υπερφόρτιση των γραμμών μεταφοράς, θέματα ευστάθειας τάσης και μεταβατικής ευστάθειας. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, η λύση της εγκατάστασης και όδευσης νέων γραμμών μεταφοράς δεν είναι μία εύκολη επιλογή, εξαιτίας του μεγάλου κόστους και χρόνου κατασκευής και λόγω της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος και των περιορισμών που τίθενται από τις ρυθμιστικές αρχές ενέργειας και άλλους οργανισμούς. Ως εκ τούτου, λόγω της πρόκλησης της αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων καθώς και των απαιτήσεων των νέων ΣΗΕ, η τεχνολογία των ΕΣΜ αποτελεί μία εναλλακτική λύση τόσο για τα σημερινά όσο και για τα μελλοντικά ΣΗΕ.



### 1.3 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (ΒΤΔΕΣΜ)

Οι επιδράσεις των ΕΣΜ στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντικές, πολύπλευρες και ευεργετικές. Τα τελευταία χρόνια ένα νέο ζήτημα έχει γίνει δημοφιλές, αυτό της βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης των ΕΣΜ για την επίτευξη διάφορων στόχων στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα ΕΣΜ ενισχύουν το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε θέματα όπως η ικανότητα φόρτισης, η αξιοπιστία και η ευελιξία στη μεταφορά του εναλλασσόμενου ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα τα ΕΣΜ.:

- Βελτιώνουν την ευστάθεια του συστήματος. Έχουν την ικανότητα να επηρεάζουν σημαντικά τόσο την ευστάθεια γωνίας δρομέα των συστημάτων, με τη βελτίωση της ευστάθειας μόνιμης κατάστασης και τη διεύρυνση του ορίου μεταβατικής ευστάθειας, όσο και την ευστάθεια τάσης.
- Αυξάνουν τα όρια μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος μεταφοράς με την αύξηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς.
- Παρέχουν καλύτερο έλεγχο της ροής πραγματικής και αέργου ισχύος.
- Βελτιώνουν τον έλεγχο της τάσης αλλά και την ευστάθεια της τάσης (μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης λειτουργίας) του δικτύου με τη βελτίωση του περιθωρίου φόρτισης, ενός ευρέως γνωστού και αποδεκτού δείκτη ευστάθειας τάσης.
- Βελτιώνουν το προφίλ της τάσης του συστήματος με την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων της τάσης από τις προδιαγραφές, των διακυμάνσεων της τάσης (flicker) και των αρμονικών.
- Αυξάνουν τη φόρτιση του συστήματος, μειώνοντας τις υπερφορτίσεις των γραμμών μεταφοράς.
- Βελτιώνουν την ποιότητα της ενέργειας.
- Ενισχύουν τις αποσβέσεις των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων του συστήματος.
- Μειώνουν το φαινόμενο της συμφόρησης κατά τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ελαχιστοποιούν τις απώλειες του συστήματος.
- Μεγιστοποιούν τη χρησιμότητα του καταναλωτή.

Το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης των ΕΣΜ (ΒΤΔΕΣΜ) στο σύστημα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας έχει να κάνει με την εξάρτηση που έχουν όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα των ΕΣΜ με τον αριθμό, τον τύπο, το μέγεθος (την διάσταση), τη ρύθμιση των παραμέτρων και φυσικά τη θέση τους στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Με λίγα λόγια, το πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ διερευνά πόσο ευεργετικά ή όχι επιδρούν τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη (μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ) στα οφέλη των ΕΣΜ και στοχεύει στην εύρεση της βέλτιστης λύσης, που θα οδηγήσει στην εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των ΕΣΜ στο μέγιστο βαθμό.

Ένας μεγάλος αριθμός ερευνητικών άρθρων έχει γραφεί για το πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ στα ΣΗΕ τα τελευταία είκοσι χρόνια, που υποδεικνύουν διάφορα μοντέλα και μεθόδους σχετικά με το πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ και σχετίζονται με τη βέλτιστη επιλογή της θέσης εγκατάστασης, του αριθμού, του τύπου, των παραμέτρων και του μεγέθους του εκάστοτε ΕΣΜ. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία έχει γίνει μία ταξινόμηση των μοντέλων και των μεθόδων πάνω στο

πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ στα δίκτυα μεταφοράς λαμβάνοντας υπόψη μερικά από τα πιο σημαντικά και αντιπροσωπευτικά άρθρα που βρέθηκαν από το 1997 και μετέπειτα.

#### 1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αυτή η διπλωματική εργασία έχει ως κύριο στόχο να παρουσιάσει τις μεθόδους και τα μοντέλα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία της ΒΤΔΕΣΜ, υποδεικνύοντας τη συνεισφορά όλων αυτών, και να προσδιορίσει τη μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη αυτού του πεδίου. Πιο αναλυτικά η δομή της εργασίας οργανώνεται σε 7 κεφάλαια:

Το παρών Κεφάλαιο 1 αποτελεί μία εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, στα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς και στο πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται συνοπτικά τα ΕΣΜ που αναφέρονται στη βιβλιογραφία της διπλωματικής εργασίας και τα οφέλη που προσφέρει η χρήση του καθενός στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται αρχικά οι μεταβλητές σχεδίασης (τοποθεσία, διάσταση, τύπος, αριθμός, ρύθμιση παραμέτρων) και έπειτα παρουσιάζονται με ομαδοποιημένο και μαθηματικό τρόπο όλες οι διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις και οι περιορισμοί που παρουσιάζονται στα άρθρα της βιβλιογραφίας πάνω στην ΒΤΔΕΣΜ.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται όλες οι διαφορετικές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης των ΕΣΜ. Κάθε μέθοδος περιγράφεται και αναλύεται με διάγραμμα ροής. Αναφέρονται πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφονται και ομαδοποιούνται όλα τα αποτελέσματα και οφέλη από την ΒΤΔΕΣΜ. Πιο συγκεκριμένα, κάθε όφελος περιγράφεται και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο αυτό το χαρακτηριστικό του δικτύου βελτιώνεται χάρη στα ΕΣΜ. Έπειτα όλα τα αποτελέσματα των άρθρων της βιβλιογραφίας ομαδοποιούνται και καταγράφονται για καθένα από τα οφέλη.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται μια σύνοψη της εργασίας, παρουσιάζονται συμπεράσματα και περιοχές για μελλοντική έρευνα πάνω σε αυτό το πεδίο.

Στο Κεφάλαιο 7 καταγράφεται η βιβλιογραφία αυτής της διπλωματικής εργασίας.



## ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

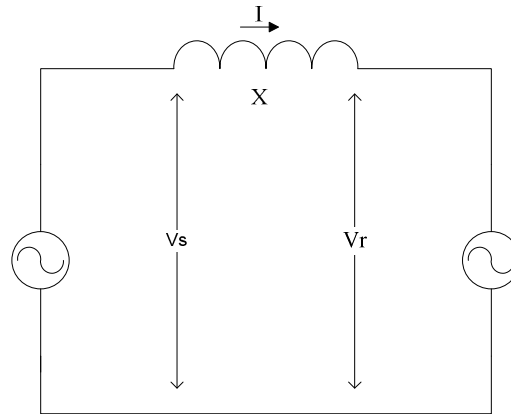
### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι υψηλής πολυπλοκότητας και διασύνδεσης και αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό ζυγών και γεννητριών. Έτσι, καθίσταται ως επιτακτική ανάγκη η καλύτερη αξιοποίηση και εκμετάλλευση της ηλεκτρικής ισχύος με την ταυτόχρονη εξασφάλιση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας τροφοδότησης. Οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας αποφάσισαν να βασιστούν στον ήδη υπάρχοντα εξοπλισμό παραγωγής/μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αντί να κατασκευάσουν νέες γραμμές μεταφοράς για την εξυπηρέτηση των συνεχών αυξανόμενων απαιτήσεων της ηλεκτρικής ισχύος. Οι υπάρχουσες παραδοσιακές γραμμές μεταφοράς συνήθως δεν είναι σχεδιασμένες ώστε να διαχειρίζονται αυτόματα τις απαιτήσεις σε ισχύ των σύγχρονων ΣΗΕ. Επίσης, σε κάποιες από αυτές, η ροή ισχύος είναι πολύ χαμηλότερη από το θερμικό όριο των αγωγών ενώ κάποιες άλλες είναι υπερφορτωμένες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δυσκολεύει ο έλεγχος της ροής ισχύος, να χειροτερεύει η τάση και να μειώνεται η αξιοπιστία και η ευστάθεια του ΣΗΕ.

Η μεταφερόμενη ισχύς σε μία γραμμή μεταφοράς είναι συνάρτηση της επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής, του μέτρου της τάσης αναχώρησης και άφιξης και της μεταξύ τους γωνίας. Ελέγχοντας έτσι μία ή περισσότερες από τις παραπάνω παραμέτρους είναι δυνατόν να ελεγχθεί η ενεργός ισχύς καθώς και η άεργος ισχύς σε μία γραμμή μεταφοράς. Σύμφωνα με το μοντέλο δύο μηχανών και της γραμμής μεταφοράς χωρίς απώλειες και εγκάρσιες αγωγιμότητες (Σχήμα 2.1) και θεωρώντας δίχως βλάβη της γενικότητας ότι το διάνυσμα ρεύματος είναι το διάνυσμα μεταφοράς  $\vec{I} = I \angle 0^\circ$ , τότε η ενεργός ισχύς έχει την ίδια τιμή σε οποιοδήποτε σημείο του κυκλώματος και δίνεται από τη σχέση (2.1). Η άεργος ισχύς στην αρχή και στο πέρας της γραμμής είναι διαφορετικές και υπολογίζονται από τις σχέσεις (2.2) και (2.3) αντίστοιχα.

$$P_s = P_r = P = \frac{V_s V_r}{X} \sin(\delta_s - \delta_r) \quad (2.1)$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{X} - \frac{V_s V_r \cos(\delta_s - \delta_r)}{X} \quad (2.2)$$



**Σχήμα 2.1:** Μοντέλο δύο μηχανών και γραμμής μεταφοράς.

$$Q_r = \frac{V_r^2}{X} - \frac{V_r V_s \cos(\delta_r - \delta_s)}{X} \quad (2.3)$$

όπου  $P_s$ ,  $P_r$  : η ενεργός ισχύς στην αναχώρηση και στην άφιξη της γραμμής μεταφοράς, αντίστοιχα,  $Q_s$ ,  $Q_r$  : η άεργος ισχύς στην αναχώρηση και στην άφιξη της γραμμής μεταφοράς, αντίστοιχα,  $V_s$ ,  $V_r$ ,  $\delta_s$ ,  $\delta_r$  : τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων στην αναχώρηση και στην άφιξη της γραμμής μεταφοράς, αντίστοιχα.

Η βασική ιδέα σχετικά με τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς είναι η ικανότητα ελέγχου των παραπάνω παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο. Η ικανότητα γρήγορου ελέγχου της ισχύος, μέσα στα κατάλληλα καθορισμένα όρια, μπορεί να αυξήσει τη μεταβατική και δυναμική ευστάθεια, καθώς επίσης και την ικανότητα απόσβεσης διαφόρων ταλαντώσεων στο ΣΗΕ. Σύμφωνα με το IEEE, μεταβατική ευστάθεια είναι η ικανότητα του ΣΗΕ να παραμένει σε συγχρονισμό όταν υπόκειται σε μεγάλες διαταραχές, όπως σφάλματα (βραχυκυκλώματα, απώλεια γραμμών μεταφοράς), ή μεγάλες απώλειες στην παραγωγή. Δυναμική ευστάθεια είναι η ικανότητα του ΣΗΕ να παραμένει σε συγχρονισμό όταν υπόκειται σε μικρές διαταραχές.

Κάνοντας μία αναδρομή στο παρελθόν, οι πρώτες μορφές αντιστάθμισης σε μία γραμμή μεταφοράς που εφαρμόστηκαν, κυρίως τα προηγούμενα χρόνια, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιούν για να επιτύχουν την επιθυμητή αντιστάθμιση. Οι τρεις κατηγορίες αυτές είναι: η σειριακή αντιστάθμιση, η εγκάρσια αντιστάθμιση και η αντιστάθμιση μέσω μετασχηματιστών ρύθμισης φασικής γωνίας και τάσης. Είναι συνήθης τακτική στα συστήματα ισχύος να τοποθετούνται εν σειρά πυκνωτές (σειριακή αντιστάθμιση) για τη μείωση της συνολικής επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής μεταφοράς, που οδηγεί στην αύξηση του ορίου μεταφερόμενης ισχύος της γραμμής και της ικανότητας φόρτισης μίας γραμμής μεγάλου μήκους υπερυψηλής τάσης, καταβάλλοντας μόνο ένα μέρος του κόστους που θα χρειαζόταν για την εγκατάσταση μιας νέας γραμμής μεταφοράς. Οι εγκάρσιοι πυκνωτές (εγκάρσια αντιστάθμιση) χρησιμοποιούνται ώστε να παρέχουν μέρος της

αέργου ισχύος που ζητείται από το φορτίο και να μειωθεί συνεπώς η άεργος ισχύς που μεταφέρεται μέσω της γραμμής, διατηρώντας την τάση του συστήματος σε ικανοποιητικά επίπεδα. Η ρύθμιση φασικής γωνίας και μέτρου της τάσης επιτυγχανόταν αρχικά με τη μεσολάβηση μετασχηματιστών. Η μετατόπιση γωνίας εφαρμόζεται για τον έλεγχο της ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, εισάγοντας μια επιπρόσθετη γωνία μεταξύ της τάσης αναχώρησης και άφιξης.

Μέχρι και πριν από λίγα χρόνια όλες αυτές οι συσκευές ελέγχονταν μηχανικά, για αυτό και ήταν σχετικά αργές. Είναι πολύ χρήσιμες στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, αλλά από πλευράς δυναμικού ελέγχου, η χρονική απόκριση είναι πολύ αργή για να ελαχιστοποιήσει τις μεταβατικές ταλαντώσεις. Στην πραγματικότητα οι κλασσικές μέθοδοι αντιστάθμισης αέργου ισχύος καλύπτουν μόνο κάποια από τα προβλήματα που συναντώνται στα ενεργειακά δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος. Έτσι, με τους τρόπους που προαναφέρθηκαν, βελτιώνεται η ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος και σε κάποιο βαθμό η ικανότητά του να επανέρχεται γρήγορα σε ομαλή λειτουργία μετά από διάφορες μεταβατικές καταστάσεις. Επομένως, ενώ ο έλεγχος του συστήματος, η μεταφορά και επεξεργασία δεδομένων γίνεται ταχύτατα και σύμφωνα με τη σύγχρονη τεχνολογία, η διαδικασία αντιστάθμισης καθυστερεί εμφανώς λόγω της αδράνειας και της μηχανικής καταπόνησης των κινούμενων ηλεκτρομηχανικών τμημάτων. Αποτέλεσμα όλων αυτών των περιορισμών είναι η αδυναμία εφαρμογής ουσιαστικού ελέγχου σε περιπτώσεις μεταβατικών/δυναμικών καταστάσεων, όπου είναι αναγκαίος ο ταχύτατος έλεγχος. Ένα άλλο βασικό μειονέκτημα των κλασσικών μεθόδων αντιστάθμισης είναι ότι η άεργος ισχύς ελέγχεται ασυνεχώς (κατά βήματα) και μόνο ως προς τη θετική κατεύθυνση. Αυτό συμβαίνει διότι εισάγοντας ή εξάγοντας πυκνωτές στο δίκτυο, εισάγονται ή εξάγονται στην ουσία σταθερές χωρητικές ποσότητες, με αποτέλεσμα την εμφάνιση «σκαλοπατιών» στην αντιστάθμιση. Προκειμένου λοιπόν να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα ελέγχου μέσω διακοπτικών στοιχείων έγινε απαραίτητη η διερεύνηση άλλων τεχνικών ελέγχου. Η πρόοδος που συντελέστηκε στα ηλεκτρονικά ισχύος οδήγησε σε μία νέα προσέγγιση του προβλήματος, αρχικά από το EPRI (Electrical Power Research Institute) στα τέλη του 1980. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς (ΕΣΜ) (Flexible AC Transmission Systems, FACTS) ήταν η απάντηση στο αίτημα για αποδοτικότερη χρήση των ήδη υπαρχόντων πόρων και δυνατοτήτων των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι που επέτρεψε τη αξιοποίηση και εξέλιξη των δυνατοτήτων μεταφοράς.

Με τον όρο Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς (ΕΣΜ) περιγράφεται ένα ευρύ φάσμα ελεγκτών, οι οποίοι βασίζονται σε ηλεκτρονικά ισχύος και άλλα στατικά εξαρτήματα και ελέγχουν μία ή περισσότερες παραμέτρους του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κάνοντάς το έτσι πιο ευέλικτο και πιο ελέγξιμο. Πιο συγκεκριμένα, τα ΕΣΜ έχουν σαν ρόλο να αλλάζουν τις παραμέτρους του συστήματος προκειμένου να αυξήσουν τον έλεγχο της ροής ισχύος ενώ παράλληλα μπορούν να βελτιώσουν την ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος, φτάνοντάς την στα επιθυμητά επίπεδα, διατηρώντας πάντα το σύστημα ευσταθές. Ο έλεγχος της ροής ισχύος γίνεται στην πλευρά της υψηλής τάσης του δικτύου κατά τη διάρκεια συνθηκών μόνιμης αλλά και μεταβατικής κατάστασης. Μερικά από αυτά έχουν ήδη εδραιωθεί, ενώ μερικά είναι ακόμα σε ερευνητικό στάδιο ή στάδιο ανάπτυξης.

Από πλευράς δομής, τα ΕΣΜ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στα ΕΣΜ που βασίζονται σε θυρίστορ (thyristor based FACTS) και στα ΕΣΜ που βασίζονται

σε μετατροπείς πηγών τάσεως (Voltage-Source Converter (VSC) based FACTS). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν μετατροπείς που επιτρέπουν την ευέλικτη διαχείριση συνιστωσών, όπως πηνίων ή πυκνωτών ή μετασχηματιστών με ρύθμιση φάσεως. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα στατά συστήματα ελέγχου αέργου ισχύος (Static Var Compensators, SVC), οι ελεγχόμενοι αντισταθμιστές σειράς (Thyristor Controlled Series Capacitors, TCSC), οι ρυθμιστές γωνίας φάσεως (Phase Shifters, PS) και πιο συγκεκριμένα οι (Thyristor Controlled Phase-Shifting Transformer, TCPST) ή αλλιώς (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator, TCPAR) ή αλλιώς (Static Phase Shifting Transformers, SPST), και τέλος ο ρυθμιστής τάσης ελεγχόμενος από θυρίστορ (Thyristor-Controlled Voltage Regulator, TCVR). Κάθε μία από τις υποκατηγορίες των ΕΣΜ, που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, χρησιμοποιεί θυρίστορς (ημιαγωγικά στοιχεία χωρίς δυνατότητα εξαναγκασμένης σβέσης) και επιδρά σε μία διαφορετική παράμετρο της γραμμής μεταφοράς (τάση, σύνθετη αντίσταση, γωνία). Έτσι λοιπόν, το SVC επιδρά στην τάση, το TCSC επιδρά στη σύνθετη αντίσταση και το TCPST στη φασική γωνία. Τα συστήματα αυτά είναι παρόμοια με συστοιχίες πυκνωτών ή πηνίων με διακοπτική ζεύξη και μετασχηματιστές με μηχανική αλλαγή λήψεως γωνίας, αλλά έχουν πολύ ταχύτερη απόκριση και καλύτερο έλεγχο.

Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν μετατροπείς που υλοποιούν ελεγχόμενες σύγχρονες πηγές τάσεως ή ρεύματος (SVS/SCS-Synchronous Voltage/Current Sources) και χρησιμοποιούν συνήθως GTO (Gate Turn Off thyristors), δηλαδή ημιαγωγικά στοιχεία με δυνατότητα εξαναγκασμένης σβέσης. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι ελεγχόμενοι σύγχρονοι αντισταθμιστές (STATic synchronous COMpensators, STATCOM), οι ελεγχόμενοι σύγχρονοι αντισταθμιστές σειράς (Static Synchronous Series Compensators, SSSC), οι ενοποιημένοι ρυθμιστές ροής ισχύος (Unified Power Flow Controllers, UPFC) καθώς και οι ρυθμιστές ροής ισχύος μεταξύ γραμμών μεταφοράς (Interline Power Flow Controllers, IPFC). Τα ΕΣΜ αυτής της κατηγορίας εμφανίζουν βελτίωση, σε σχέση με τα αντίστοιχα συστήματα της προηγούμενης κατηγορίας, επιτρέποντας επιπρόσθετα την έγχυση ή την απορρόφηση ενεργού ισχύος. Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς που εντάσσονται σε αυτή την κατηγορία είναι τα εξής: Το STATCOM (όπως και το SVC) ρυθμίζει την τάση της γραμμής μέσω εγκάρσιας άεργης αντιστάθμισης. Το SSSC (όπως και το TCSC) παρέχει αντιστάθμιση σειράς, με άμεσο έλεγχο της τάσης κατά μήκος της γραμμής. Το UPFC μπορεί να ελέγξει μεμονωμένα ή σε συνδυασμό με άλλα συστήματα FACTS, και τις τρεις παραμέτρους της γραμμής (τάση, σύνθετη αντίσταση, και γωνία) ή άμεσα τη ροή ενεργού και αέργου ισχύος στη γραμμή.

Από πλευράς σύνδεσης στο δίκτυο, τα ΕΣΜ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ακολούθως [104]:

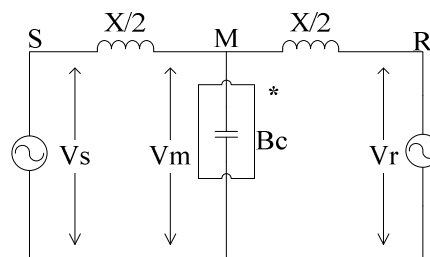
- Εγκάρσια, όπως το SVC και το STATCOM, που παρέχουν ολικό έλεγχο της αέργου ισχύος και της τάσης του συστήματος.
- Σειριακά, όπως το TCSC και το SSSC, που παρέχουν ολικό έλεγχο της ενεργούς ισχύος και μερικό της αέργου ισχύος.
- Συνδυασμός των παραπάνω, όπως το UPFC, το TCPST και το TCVR.

## 2.2 ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΘΥΡΙΣΤΟΡ

### 2.2.1 Στατικός Αντισταθμιστής Αέργου Ισχύος (SVC)

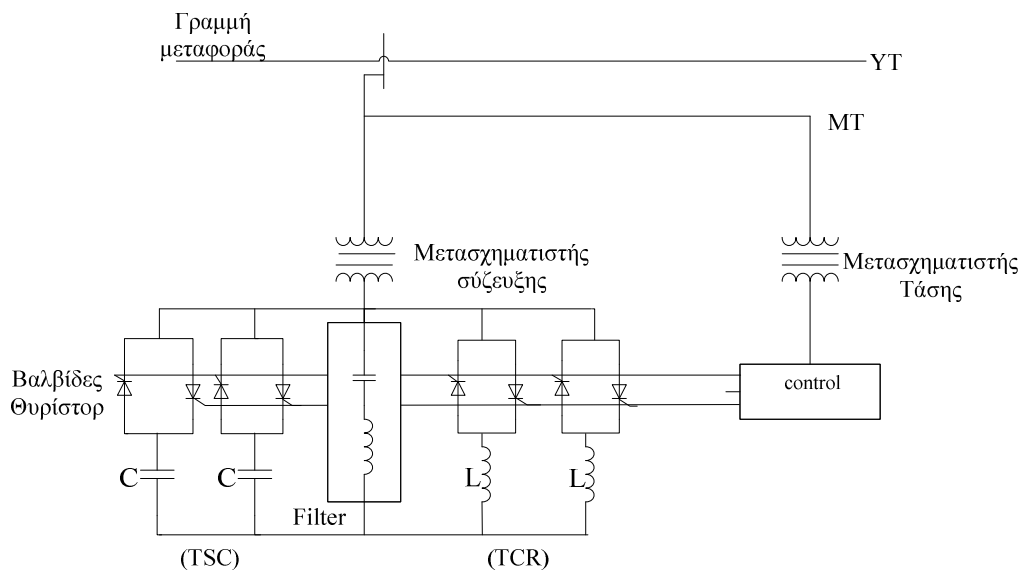
Πρόκειται για εγκάρσια αντιστάθμιση. Η χρήση των στατικών διακοπών με θυρίστορ έλυσε τα προβλήματα των μηχανικών διακοπτικών στοιχείων που αναφέρθηκαν παραπάνω και οδήγησε στην ανάπτυξη των SVC στις αρχές τις δεκαετίας του 1960. Το πρώτο εμπορικό SVC εγκαταστάθηκε το 1972 για ένα electrical arc furnace. Σε επίπεδο μεταφοράς το SVC χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1979 και από τότε πολλά SVCs έχουν εγκατασταθεί στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [107]. Το SVC θεωρείται ως μία εγκάρσια σύνθετη αντίσταση (ιδανικός πυκνωτής ή πηνίο) με ρυθμιζόμενο ρεύμα αντιστάθμισης. Το SVC μπορεί να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ στο σημείο που συνδέεται. Η εγκάρσια παρεχόμενη αντιστάθμιση είναι συνάρτηση του μέτρου της τάσης του ζυγού που συνδέεται το SVC.

(α)



(β)

όπου \*



**Σχήμα 2.2:** (α) Σύστημα δύο ζυγών συνδεδεμένων με γραμμή μικρού μήκους χωρίς απώλειες και αντισταθμιστής SVC στο μέσον της και (β) Εγκάρσιος αντισταθμιστής αέργου ισχύος αποτελούμενος από TSCs/TCRs (SVC) [105].



Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 (β), ένας τυπικός εγκάρσιος στατικός αντισταθμιστής αέργου ισχύος αποτελείται από βαθμίδες πυκνωτών ελεγχόμενων από θυρίστορ (TSCs-Thyristor Switched Capacitors) καθώς και βαθμίδες πηνίων ελεγχόμενων από θυρίστορ (TCRs-Thyristor Control Reactors), οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα, βοηθώντας στη λειτουργική ευελιξία της αντιστάθμισης κατά τη διάρκεια μεγάλων διαταραχών και μειώνοντας τις απώλειες στην μόνιμη κατάσταση. Ένα TCR αποτελείται από μία αντί-παράλληλη σύνδεση βαλβίδων θυρίστορ που συνδέονται σε σειρά με μία γραμμική επαγωγική αντίδραση. Οι βαλβίδες θυρίστορ λειτουργούν σαν ένας αμφίδρομος διακόπτης. Το TCR παρέχει γρήγορο, συνεχόμενο έλεγχο της αέργου ισχύος στην επιλεγμένη περιοχή με την ταυτόχρονη όμως παραγωγή αρμονικών ρευμάτων [105]. Ένα TSC αποτελείται από ένα πυκνωτή που συνδέεται σε σειρά με ένα αμφίδρομο διακόπτη από θυρίστορ. Το TSC παράγει χωρητική άεργο ισχύ. 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. Διάφορες στρατηγικές ελέγχου μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα σε ένα τέτοιο αντισταθμιστή, όπως για παράδειγμα εκείνες που αφορούν τα εξωτερικά συμπληρωματικά σήματα για την επίτευξη σημαντικών βελτιώσεων στην απόδοση του συστήματος. Η τάση αναφοράς καθώς και η κλίση του ρεύματος (current slope) μπορούν να ελεγχθούν με απλό τρόπο. Επίσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές σύζευξης και μετασχηματιστές τάσης για την αλλαγή του επίπεδου της τάσης από ΥΤ σε ΜΤ.

Θεωρώντας, χωρίς βλάβης της γενικότητας, ότι το SVC συνδέεται στο μέσο μιας γραμμής μεταφοράς, για την οποία χρησιμοποιείται το μοντέλο μικρού μήκους χωρίς απώλειες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 (α), και ότι επιπλέον ισχύει ότι:  $|V_s| = |V_r| = V$ , τότε προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις για το ΣΗΕ του Σχήμα 2.2 (α) [103]:

$$\tilde{V}_m = \frac{V \cos \frac{(\delta_s - \delta_r)}{2}}{1 - \frac{X}{4} B_c} \quad (2.4)$$

$$P_{sm} = P_{mr} = P = \frac{V^2}{\frac{X}{1 - \frac{X}{4} B_c}} \sin(\delta_s - \delta_r) \quad (2.5)$$

όπου  $\tilde{V}_m$ : η τάση στο μέσο της γραμμής και  $P_{sm}$ : η μεταφερόμενη ενεργός ισχύς από το ζυγό s στο ζυγό m.  $B_c$ : η χωρητική αγωγιμότητα του SVC. Η γενική ιδέα είναι ότι μπορεί να αυξηθεί η μεταφερόμενη ενεργός ισχύς αυξάνοντας την τάση κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς (μέσω χωρητικής αντιστάθμισης), όταν οι γεννήτριες επιταχύνονται, ή να μειωθεί η μεταφερόμενη ενεργός ισχύς μειώνοντας την τάση της γραμμής (μέσω επαγωγικής αντιστάθμισης), όταν οι μηχανές επιβραδύνονται [103].

Το SVC διαθέτει αποκλειστικά διακόπτες στερεάς κατάστασης. Ελέγχοντας τις γωνίες έναυσης των θυρίστορ, μπορεί να καθοριστεί η ποσότητα της αέργου ισχύος που εγγχεί το SVC

στο δίκτυο, λαμβάνοντας όλες τις ενδιάμεσες τιμές, από πλήρως χωρητική σε πλήρως επαγωγική, μέσα σε ένα κύκλο της θεμελιώδους συχνότητας. Τα πλεονεκτήματα του SVC είναι ότι είναι γρήγορο, παρέχει ικανοποιητικό έλεγχο και ταχύτατη σύνδεση ή αποσύνδεση των πυκνωτών χωρίς μεταβατικές υπερτάσεις για αποκατάσταση του συστήματος μετά την εκκαθάριση βραχυκυκλωμάτων. Επιπλέον, μπορεί να διατηρεί την τάση εντός των προδιαγραφών στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας του συστήματος και να συμβάλει στη βελτίωση της μεταβατικής και δυναμικής ευστάθειας του συστήματος. Στα μειονεκτήματα του SVC συγκαταλέγεται το ότι δεν μπορεί να ελέγξει τη ροή πραγματικής ισχύος και το ότι η ποσότητα της αέργου ισχύος που παρέχει είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης με αποτέλεσμα να είναι σχετικά μικρή σε περιπτώσεις βυθίσεων τάσης, τότε δηλαδή που το σύστημα την έχει περισσότερο ανάγκη [109]. Η ύπαρξη κυρίως του δεύτερου μειονεκτήματος οδήγησε στη σχεδίαση του στατικού σύγχρονου αντισταθμιστή (STATCOM), ο οποίος παρέχει άεργο ισχύ ίση με το γινόμενο της τάσης με το ρεύμα [109].

Εν κατακλείδι, το SVC χρησιμοποιείται κυρίως για τη ρύθμιση/ενίσχυση της τάσης και τον έλεγχο της αέργου ισχύος του δικτύου και τοποθετείται σαν εγκάρσιο κύκλωμα. Έχει κάποια ικανότητα να βελτιώνει τη μεταβατική και τη δυναμική ευστάθεια του συστήματος δεδομένου ότι μπορεί να αυξήσει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, αλλά δεν μπορεί να ελέγξει τη ροή πραγματικής ισχύος. Σαν ελεγχόμενο εγκάρσιο στοιχείο μπορεί να προσφέρει ακόμα ορισμένες υπηρεσίες όπως: 1) σταθεροποίηση της λειτουργίας του συστήματος λόγω της βελτίωσης των μεταβατικών χαρακτηριστικών μεταφοράς, 2) αύξηση της ικανότητας μεταφοράς των συνδέσεων του δικτύου, 3) απόσβεση των υπό-σύγχρονων συντονισμών, 4) απόσβεση των διακυμάνσεων της ενεργού ισχύος με κατάλληλη ρύθμιση της αέργου ισχύος, η οποία εγχέεται στο δίκτυο [108].

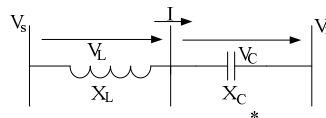
### 2.2.2 Πυκνωτής Σειράς Ελεγχόμενος από Θυρίστορ (TCSC)

Πρόκειται για σειριακή αντιστάθμιση. Το πρώτο TCSC ανατέθηκε το 1996 σε επίπεδο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [107]. Ένα τυπικό TCSC μπορεί να παρέχει συνεχόμενο έλεγχο της ισχύος στη γραμμή μεταφοράς με μία μεταβλητή χωρητική αντιστάθμιση. Το TCSC επιτυγχάνει μια συνεχή μεταβολή της εν σειρά επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής, με αποτέλεσμα τη μείωση ή αύξηση της φόρτισης κυματικής αντίστασης, και με αυτόν τον τρόπο, το TCSC μπορεί να τροφοδοτεί (κατά την υπερφόρτιση) ή να απορροφά (κατά την υποφόρτιση) άεργο ισχύ. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3 (γ), ένα σύστημα TCSC μπορεί να αποτελείται από πολλές μονάδες TCSC. Οι μονάδες αυτές αποτελούνται από ένα σειριακό πυκνωτή αντιστάθμισης ( $C_1, \dots, C_n$ ), συνδεδεμένο παράλληλα με ένα TCR και παράλληλα επίσης με μία αντίσταση από μεταλλικό οξειδίο (MOV, Metal Oxide Varistor). Σκοπός της αντίστασης από μεταλλικό οξειδίο είναι να εμποδίζει φαινόμενα υπερτάσεων κατά μήκος της γραμμής. Αυτές οι μονάδες συνδέονται με ένα σταθερό σειριακό πυκνωτή ( $C_F$ ), που χρησιμοποιείται κυρίως για την ελαχιστοποίηση του κόστους [105]. Στρατηγικές ελέγχου, όπως αντίστοιχα και στο SVC, εφαρμόζονται με ευκολία και σε αυτό τον αντισταθμιστή.

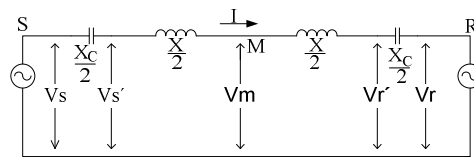
Το TCSC είναι παρόμοιο με το SVC. Η διαφορά τους είναι ότι το TCSC συνδέεται σε σειρά με τη γραμμή μεταφοράς, ενώ το SVC συνδέεται παράλληλα σε ένα τοπικό ζυγό. Σε αντίθεση, με το SVC, τα αρμονικά ρεύματα που παράγονται από το TCR δεν τείνουν να διαφύγουν από

το δίκτυο. Στο TCSC, τα αρμονικά ρεύματα παγιδεύονται στο εσωτερικό του, λόγω χαμηλής αντίδρασης του πυκνωτή, σε σχέση με την ισοδύναμη αντίδραση του δικτύου [106]. Το TCSC παρέχει γρήγορο συνεχόμενο έλεγχο του σειριακού επιπέδου αντιστάθμισης της γραμμής μεταφοράς, αυξάνει τη μεταφερόμενη ισχύ της γραμμής, βελτιώνει το προφίλ της τάσης, ενώ με κατάλληλες προστατευτικές διατάξεις μπορεί να συμβάλει στη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Επίσης αποτελεί ένα αποδοτικό μέσο για τη βελτίωση της ευστάθειας του δικτύου και έχει αποδειχτεί πολύ αποτελεσματικός στην απόσβεση του φαινομένου του υπό-σύγχρονου συντονισμού (Sub-Synchronous Resonance, SSR), ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο που είναι αποτέλεσμα της χρήσης πυκνωτών σειράς, και των ταλαντώσεων ισχύος. Ιστορικά, η αντιστάθμιση σειράς εφαρμοζόταν κυρίως για τη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ με την πρόσφατη ανάπτυξη των ελεγχόμενων πυκνωτών σειράς, έχουν βελτιωθεί τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και απόδοσης του σειριακού αντισταθμιστή και έχουν δημιουργηθεί νέες δυνατότητες εφαρμογών στον έλεγχο της ροής ισχύος σε διασυνδεδεμένα δίκτυα και στην απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος σε διασυνδεδετικές γραμμές [104].

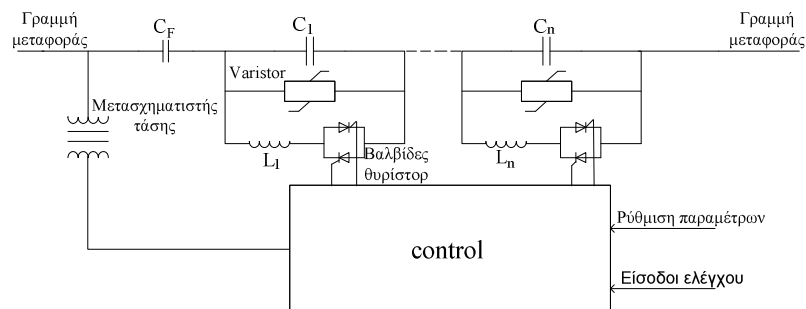
(α)



(β)



(γ) Όπου \*



**Σχήμα 2.3:** (α) γραμμή μικρού μήκους με πυκνωτή συνδεδεμένο σε σειρά (β) σύστημα δύο ζυγών που συνδέονται με γραμμή μικρού μήκους χωρίς απώλειες και σε σειρά αντιστάθμιση (γ) η εν σειρά αυτή αντιστάθμιση περιλαμβάνει μονάδες από TCR συνδεδεμένες παράλληλα με πυκνωτές σειράς και επίσης παράλληλα με varistors, οι οποίες συνδέονται σε σειρά με πυκνωτή [105], [106].

Στο Σχήμα 2.3 (α) έχουμε μία γραμμή μικρού μήκους χωρίς απώλειες και επαγωγική αντίδραση  $X_L$ , όπου εφαρμόζεται χωρητική αντιστάθμιση σειράς  $X_c$ . Στο Σχήμα 2.3 (β) θεωρείται το μοντέλο δύο μηχανών για την παραπάνω γραμμή μεταφοράς. Χωρίζεται η γραμμή στη μέση και ορίζεται ως  $k$ :

$$k = \frac{X_c}{X}, 0 \leq k \leq 1 \quad (2.6)$$

το ποσοστό αντιστάθμισης της γραμμής μεταφοράς. Το ποσοστό αντιστάθμισης της γραμμής μεταφοράς ελέγχεται με την αύξηση ή τη μείωση του αριθμού των βαλβίδων των πυκνωτών (μονάδες TCSC) [103], [104]. Αυτό επιτυγχάνεται με είσοδο ή παράκαμψη κάθε πυκνωτή μέσω της βαλβίδας (διακόπτης) του θυρίστορ. Χωρίς βλάβης της γενικότητας, για άλλη μία φορά θεωρείται ότι ισχύει  $|V_s| = |V_r| = V$ , καθώς επίσης και ότι το διάνυσμα του ρεύματος θεωρείται ως διάνυσμα αναφοράς  $\bar{I} = I \angle 0^\circ$ , οπότε προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις [103]:

$$P_s = P_r = P_m = \frac{V^2}{(1-k)X} \sin(\delta_s - \delta_r) \quad (2.7)$$

$$Q_s = \frac{V^2}{(1-k)X} (1 - \cos(\delta_s - \delta_r)) \quad (2.8)$$

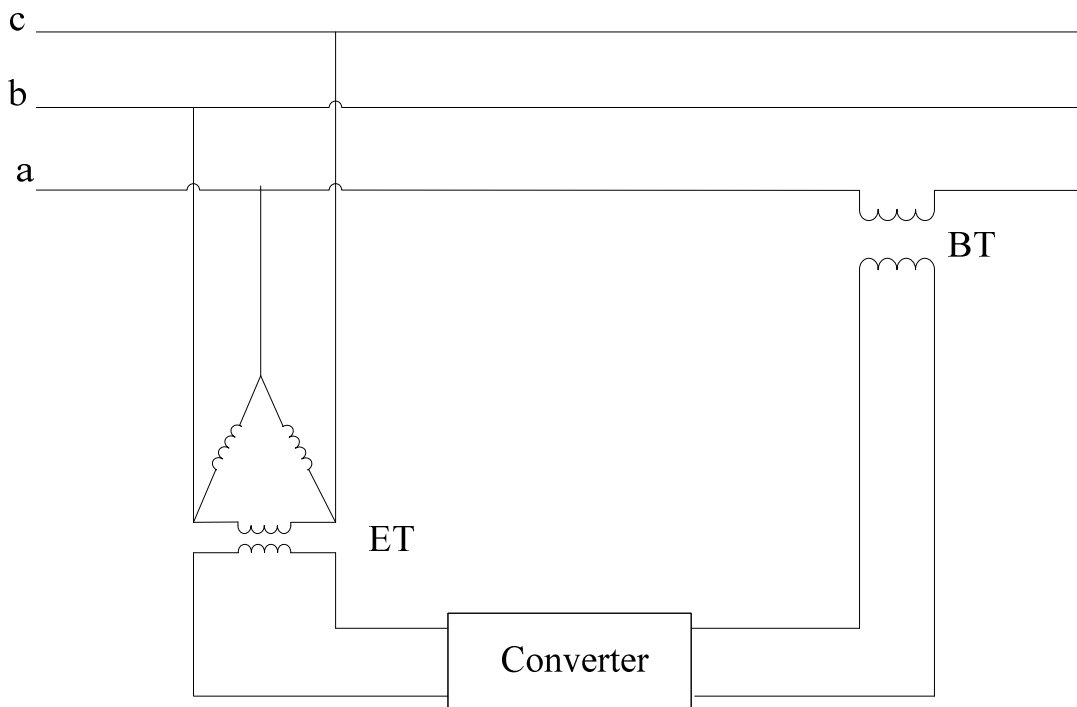
$$Q_r = -\frac{V^2}{(1-k)X} (1 - \cos(\delta_s - \delta_r)) \quad (2.9)$$

όπου  $P_s$ ,  $P_r$ ,  $P_m$ : η ενεργός ισχύς στην αναχώρηση, στο μέσο και στην άφιξη της γραμμής μεταφοράς, αντίστοιχα,  $Q_s$ ,  $Q_r$ : η άεργος ισχύς στην αναχώρηση και στην άφιξη της γραμμής μεταφοράς, αντίστοιχα.

Όσο το  $k$  τείνει προς τη μονάδα ( $k=1$  ιδανική περίπτωση) τόσο αυξάνεται το όριο στατικής ευστάθειας ( $P_{max}$ ). Για κάθε τιμή του  $k$ , το όριο στατικής ευστάθειας γραμμής με TCSC είναι μεγαλύτερο από το όριο στατικής ευστάθειας χωρίς αντιστάθμιση. Γενικά, το TCSC έχει ως αποτέλεσμα μία τάση αντιστάθμισης, η οποία αυξάνει την τάση κατά μήκος της γραμμής, επηρεάζοντας το ρεύμα της γραμμής και τη μεταφερόμενη ισχύ. Συμπερασματικά, η αντιστάθμισης σειράς είναι συνάρτηση του ρεύματος γραμμής.

### 2.2.3 Ρυθμιστής Φασικής Γωνίας Ελεγχόμενος από Θυρίστορ (TCPAR ή TCPST)

Σε πολλές περιπτώσεις, η ικανότητα μεταφοράς ενός ΣΗΕ βελτιώνεται, μειώνοντας την κυκλοφορία ισχύος σε βρόχους, ή εκτρέποντας τη ροή ισχύος από γραμμές που βρίσκονται στα όρια στατικής ευστάθειας προς παράλληλες γραμμές με μεγαλύτερα περιθώρια. Για αυτό το λόγο ρυθμιστές φασικής γωνίας (Phase Shifting Transformer, PST ή Phase Angle Regulator,

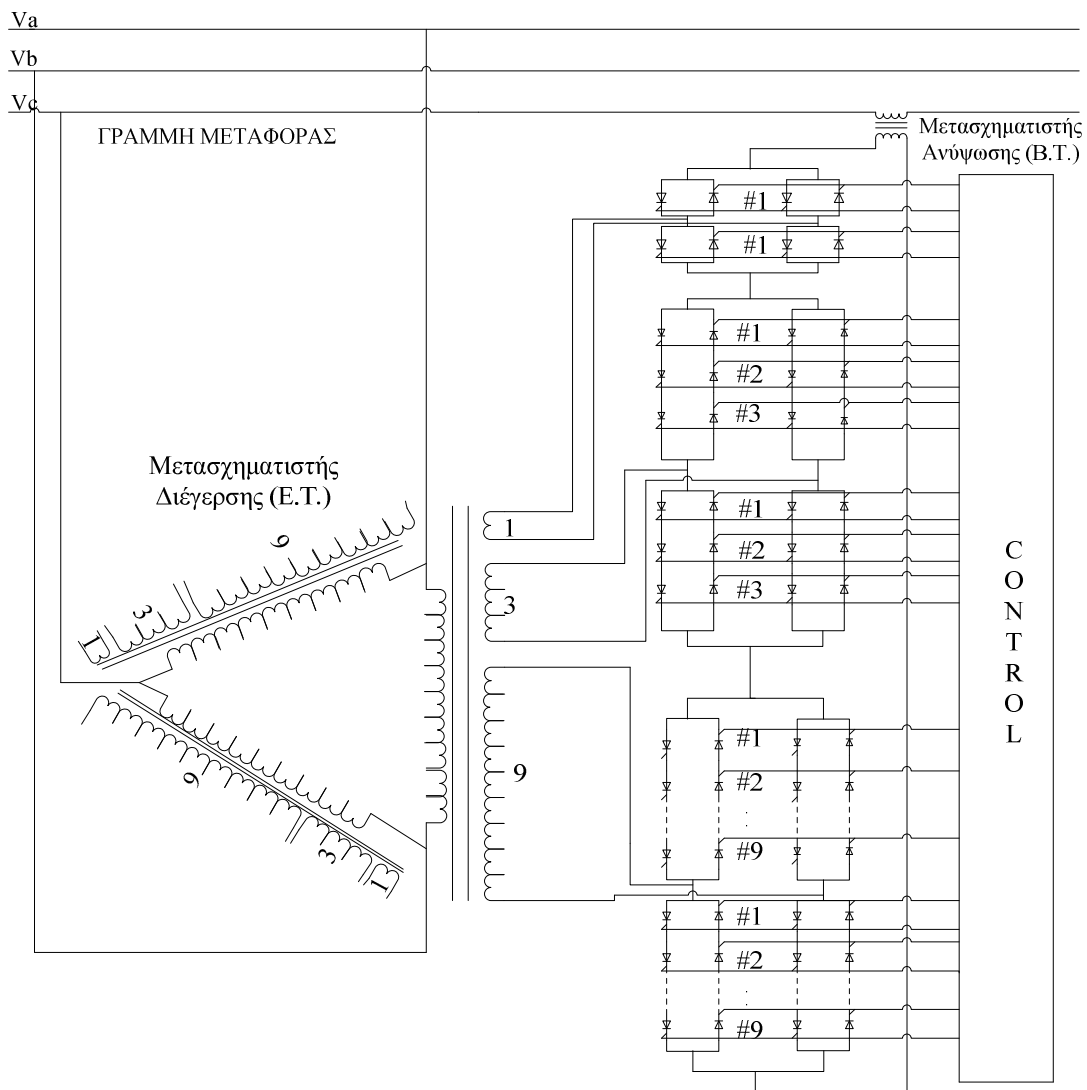


**Σχήμα 2.4:** Σχηματικό διάγραμμα ρυθμιστή φασικής γωνίας [108].

PAR) (της τάσης) χρησιμοποιούνται από το 1930 για τον έλεγχο της ροής ισχύος σε γραμμές μεταφοράς στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας [108], χρησιμοποιώντας μετασχηματιστές με κατάλληλη συνδεσμολογία τυλιγμάτων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, το κύκλωμα ισχύος του ρυθμιστή αποτελείται από ένα μετασχηματιστή διέγερσης (Excitation Transformer, ET) από ένα μετασχηματιστή ανύψωσης (Boost Transformer, BT) και ένα μετατροπέα (converter). Οι δευτερεύουσες περιελίξεις (secondary windings) του μετασχηματιστή διέγερσης, συνδέονται παράλληλα, υποστηρίζοντας το μετασχηματιστή ανύψωσης που συνδέεται σε σειρά με τη γραμμή μεταφοράς. Ο μετασχηματιστής διέγερσης παρέχει την τάση εισόδου για το ρυθμιστή φασικής γωνίας, ενώ ο μετασχηματιστής ανύψωσης εγγχεί μία ελεγχόμενη τάση, σε σειρά με τη γραμμή. Το μέτρο και/ή γωνία της εγγεόμενης φάσης εξαρτάται από το μετατροπέα.

Το τμήμα του μετατροπέα ενός συνηθισμένου ρυθμιστή φασικής γωνίας αποτελείται από μηχανικούς διακόπτες. Οι τυπικοί ρυθμιστές φασικής γωνίας δεν έχουν σαν σκοπό να βοηθήσουν στην αύξηση της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία γραμμή μεταφοράς και ως εκ τούτου δεν προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε γραμμές μεγάλου μήκους. Τα κύρια τεχνικά μειονεκτήματα ενός τυπικού ρυθμιστή φασικής γωνίας είναι: η αργή απόκριση λόγω της υπάρχουσας αδράνειας των μηχανικών διακοπών, τα μειωμένα όρια ζωής και η απαίτηση για διατήρηση της συχνότητας σχετικά με τη μηχανική καταπόνηση και τη γήρανση του λαδιού [103]. Το πρώτο μειονέκτημα αφορά τις εφαρμογές του ρυθμιστή φασικής γωνίας μόνο για τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και παράλληλα για τη ρύθμιση της τάσης. Το δεύτερο μειονέκτημα αντισταθμίζεται μερικώς, από το σύνολο των βοηθητικών ημιαγωγικών στοιχείων.

Με την εφαρμογή των ελεγκτών ηλεκτρονικών ισχύος, η λειτουργία των αναβαθμισμένων ρυθμιστών φασικής γωνίας έχει γίνει πολύ πιο γρήγορη και επιτρέπει τη δυναμική ρύθμιση της



Σχήμα 2.5: Κύκλωμα ελεγχόμενου από θυρίστορ ρυθμιστή φασικής γωνίας [104].

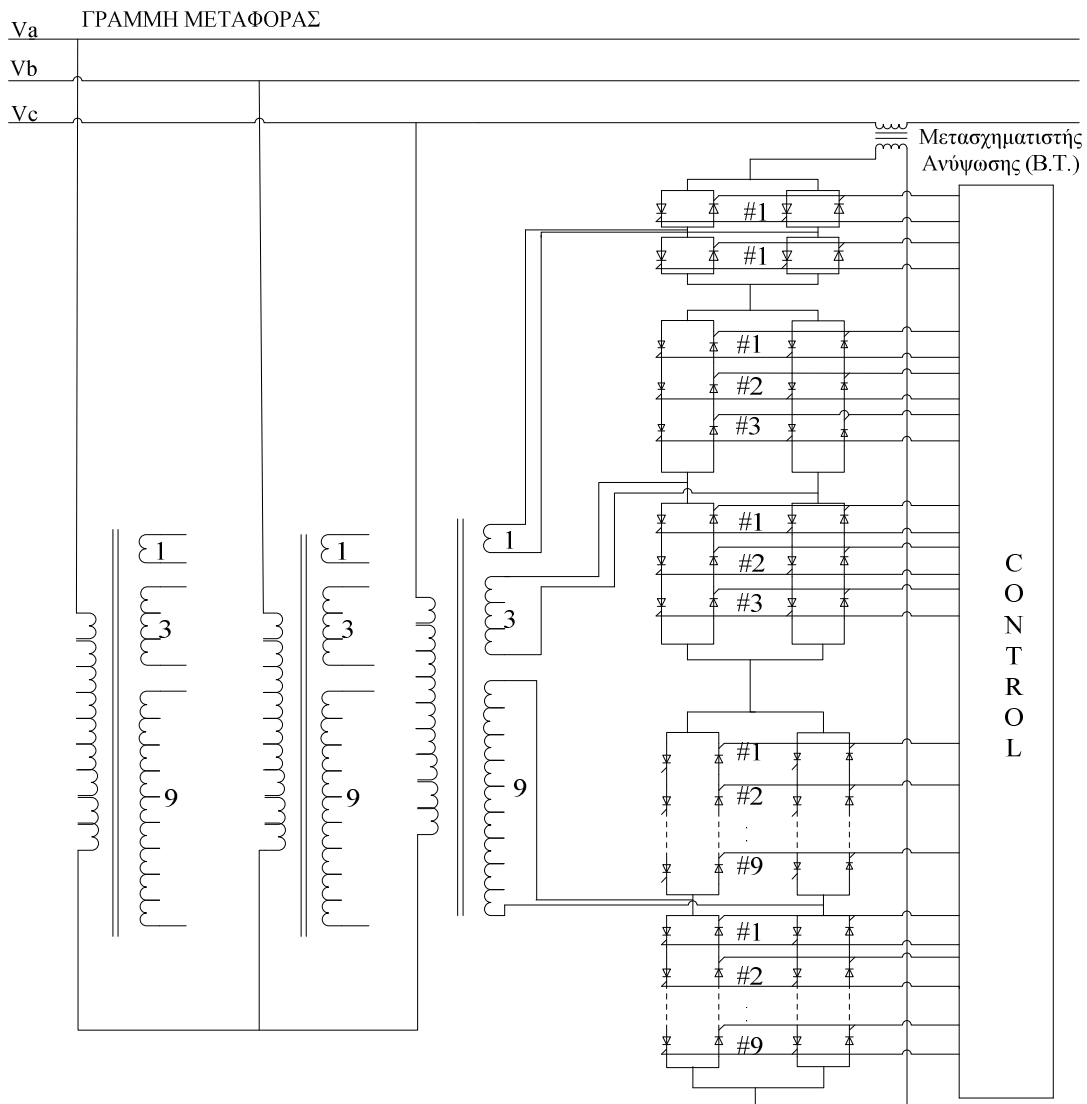
ροής ισχύος, την απόσβεση των ταλαντώσεων και τη βελτίωση της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος αλλά και την ενίσχυση της ευστάθειας της τάσης [108]. Αυτοί ονομάζονται ρυθμιστές φασικής γωνίας ελεγχόμενοι από θυρίστορ (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer, TCPST ή Thyristor Controlled Phase Angle Regulator, TCPAR). Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται το κύκλωμα των TCPSTs. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται αμφίδρομοι διακόπτες από θυρίστορ (bidirectional thyristor switches). Ισχύει ότι και στις περιπτώσεις των SVCs και TCSCs για την εύκολη εφαρμογή ελέγχου στο σύστημα του ρυθμιστή.

Εν κατακλείδι, στην κατηγορία μεθόδων αντιστάθμισης που προσβλέπει στη φασική γωνία, ο τρόπος δράσης του TCPST στηρίζεται στη γρήγορη εισαγωγή μιας τάσης εν σειρά με την τάση στο ένα άκρο της γραμμής, ώστε να ελέγχεται η ροή ισχύος στη γραμμή. Παρόλο που έχουν προταθεί κυκλώματα με ρύθμιση και του μέτρου και της φασικής γωνίας της εισαγόμενης

τάσης, λόγω της απλότητας τους, έχουν επικρατήσει τα κυκλώματα με ρύθμιση μόνο του μέτρου, ενώ η φασική γωνία είναι  $90^\circ$ . Επειδή το TCPAR δεν παράγει άεργο ισχύ, όλη η άεργος ισχύς που εισάγεται στη γραμμή ως αποτέλεσμα της φασικής στροφής της τάσης, απορροφάται από το ζυγό. Για αυτό το λόγο το TCPST πρέπει να συνδέεται σε ισχυρούς ζυγούς για να αποφεύγονται οι διακυμάνσεις της τάσης [104].

### 2.2.4 Ρυθμιστής Τάσης Ελεγχόμενος από Θυρίστορ (TCVR)

Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται το κύκλωμα του ρυθμιστή τάσης ελεγχόμενου από θυρίστορ (Thyristor Controlled Voltage Regulator, TCVR). Το TCVR έχει πολλά κοινά με το TCPST, αφού χρησιμοποιεί την ίδια διάταξη από αμφίδρομους διακόπτες από θυρίστορ, παρέχει μία μεταβλητού μεγέθους τάση εν σειρά με τη γραμμή με συνεχόμενο έλεγχο. Ένας τέτοιος ελεγκτής με χαμηλό σχετικά κόστος μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικός στον έλεγχο της ροής αέργου ισχύος μεταξύ δύο συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχήμα 2.6: Κύκλωμα ρυθμιστή τάσης ελεγχόμενου από θυρίστορ [104].

### 2.3 ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ

Πρόκειται για ελεγχόμενες σύγχρονες πηγές εναλλασσόμενης τάσης ή ρεύματος (SVS/SCS-Synchronous Voltage/Current Sources). Έχουν πολύ ανώτερη λειτουργικότητα για κάθε είδος αντιστάθμισης και, εκτός της άεργης αντιστάθμισης, έχουν τη δυνατότητα άμεσης ανταλλαγής ενεργού ισχύος με το δίκτυο, εξασφαλίζοντας πιο ευέλικτη διαχείριση ροής ισχύος και αντιμετώπιση δυναμικών διαταραχών. Μία τέτοια πηγή είναι ανάλογη με μία ιδανική στρεφόμενη σύγχρονη μηχανή, η οποία παράγει ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων στη θεμελιώδη συχνότητα, με ελεγχόμενο πλάτος και φάση. Αυτή η ιδανική μηχανή δεν έχει καθόλου αδράνεια, η απόκρισή της είναι πρακτικά στιγμιαία, δεν αλλάζει σημαντικά τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου και μπορεί να παράγει άεργο ισχύ (χωρητική και επαγωγική). Επίσης μπορεί να ανταλλάσσει ενεργό ισχύ με το δίκτυο, εάν διασυνδεθεί με μία κατάλληλη πηγή ενέργειας η οποία θα μπορεί να παρέχει ή να απορροφά την ισχύ που το SVS παρέχει ή απορροφά από το δίκτυο.

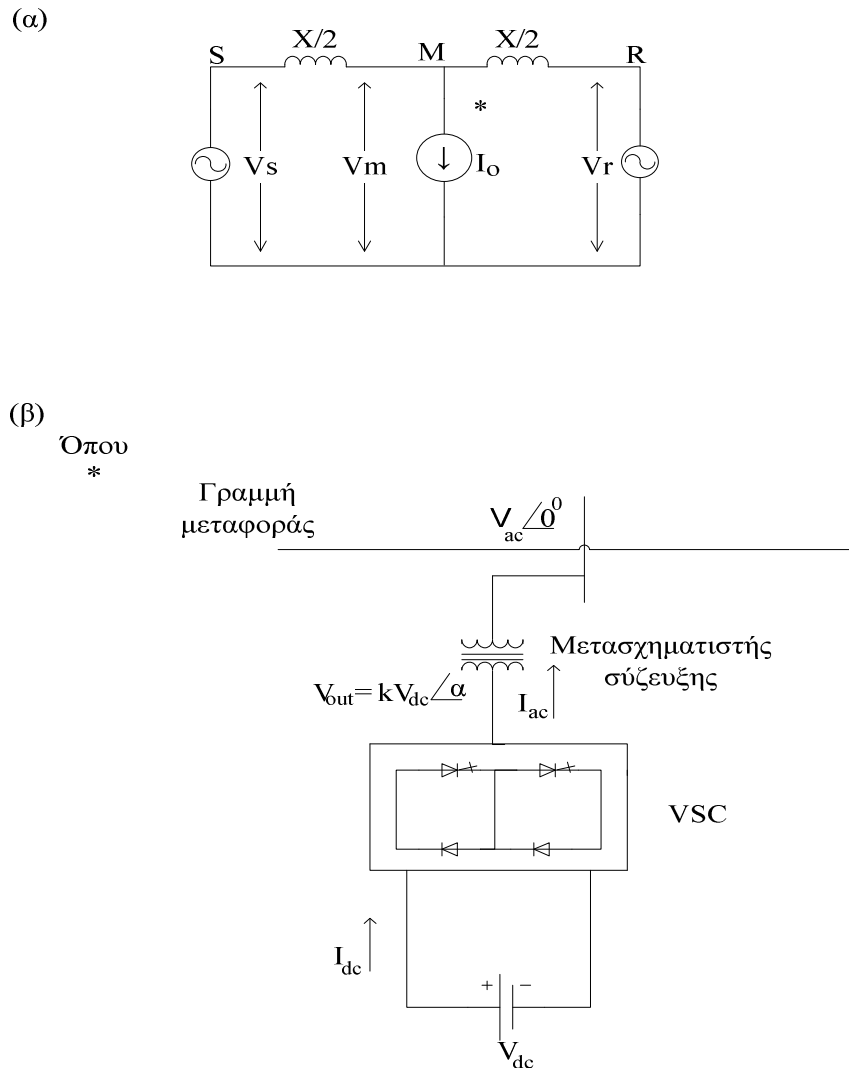
Το SVS μπορεί να επιτύχει ένα επιθυμητό ρεύμα παρέχοντας μία προκαθορισμένη τάση (ή μία επιθυμητή τάση παρέχοντας ένα προκαθορισμένο ρεύμα). Σε αντίθεση με την αντιστάθμιση ελεγχόμενης σύνθετης αντίστασης, η αντιστάθμιση SVS είναι πρακτικά ανεξάρτητη από τις μεταβλητές του δικτύου (ρεύμα, τάση, γωνία) και μπορεί να διατηρηθεί σταθερή κατά τη διάρκεια μεγάλων διαταραχών στο δίκτυο. Επίσης το SVS με σταθερές εισόδους θα λειτουργεί μόνο στη θεμελιώδη συχνότητα ενώ η σύνθετη αντίσταση εξόδου σε άλλες συχνότητες θα είναι πρακτικά μηδενική. Επομένως με τα SVS δε δημιουργείται συντονισμός με το δίκτυο. Τέλος και λόγω της δυνατότητας αμφίπλευρης μεταφοράς ενεργού ισχύος μεταξύ των κόμβων AC και DC του SVS, είναι δυνατή η ζεύξη των DC κόμβων δύο ή περισσότερων SVSs και επομένως ο καθορισμός διαδρομών μεταφοράς ισχύος μεταξύ ζυγών ή γραμμών.

#### 2.3.1 Στατικός Σύγχρονος Αντισταθμιστής (STATCOM)

Πρόκειται για εγκάρσια αντιστάθμιση. Το πρώτο STATCOM τέθηκε σε λειτουργία το 1999 [107]. Το STATCOM αποτελεί το πιο εξελιγμένο μοντέλο εγκάρσιας αντιστάθμισης, δηλαδή είναι μία προέκταση του SVC βασισμένη σε dc-ac μετατροπείς, οι οποίοι παράγουν μία εναλλασσόμενη τάση (ή ρεύμα) από μία συνεχή τάση (ή ρεύμα) με τη μέθοδο συγχρονισμένης διαμόρφωσης πλάτους παλμών (Synchronized Pulse-Width Modulation, SPWM). Στο Σχήμα 2.7 (β) φαίνεται το μοντέλο λειτουργίας του STATCOM που αποτελείται από ένα μετατροπέα πηγής τάσεως (Voltage Source Converter – VSC) με ημιαγωγικά στοιχεία, τα οποία είναι συνήθως GTO thyristors, και τον μετασχηματιστή σύζευξης. Ο πρωταρχικός στόχος του STATCOM σε δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι η γρήγορη ρύθμιση της τάσης σε ένα φορτίο ή σε ένα ενδιάμεσο ζυγό. Αυτό επίσης θα αυξήσει την ικανότητα μεταφοράς ρεύματος του δικτύου και έτσι θα αυξηθεί η διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς του δικτύου.

Το STATCOM είναι ανάλογο με μία ιδανική σύγχρονη μηχανή, η οποία παράγει τριφασική φάση στη θεμελιώδη συχνότητα με ελεγχόμενο μεταβλητό πλάτος και φασική γωνία. Αυτή





**Σχήμα 2.7:** (α) Σύστημα δύο ζυγών συνδεδεμένων με γραμμή μικρού μήκους χωρίς απώλειες και αντισταθμιστής STATCOM στο μέσον της (β) λειτουργικό διάγραμμα STATCOM [103].

η ιδανική μηχανή δεν έχει αδράνειες, δεν μεταβάλλει σημαντικά την υπάρχουσα αντίσταση του συστήματος και μπορεί να παρέχει άεργο ισχύ [107]. Πιο συγκεκριμένα, η βασική συμπεριφορά του STATCOM βασίζεται στη λειτουργία του σύγχρονου αντισταθμιστή. Εάν η παραγόμενη τάση από τον STATCOM είναι μικρότερη από την τάση του ζυγού του συστήματος στον οποίο είναι συνδεδεμένο, τότε το STATCOM συμπεριφέρεται ως επαγωγικό φορτίο απορροφώντας άεργο ισχύ από το σύστημα. Αντίθετα, το STATCOM παρέχει άεργο ισχύ στο σύστημα, όταν η παραγόμενη τάση από το STATCOM είναι μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος, άρα συμπεριφέρεται σαν εγκάρσιος πυκνωτής. Οι απώλειες παρέχονται από το σύστημα και όχι από κάποια πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος. Ο μετατροπέας διατηρεί τον πυκνωτή φορτισμένο στην επιθυμητή τάση, η οποία επιτυγχάνεται όταν οι τάσεις εξόδου του μετατροπέα έπονται των τάσεων του δικτύου με μία μικρή γωνία. Έτσι, ο μετατροπέας απορροφά μικρό ποσό ενεργού ισχύος από το AC σύστημα, με σκοπό να καλύπτει τις εσωτερικές απώλειες και να διατηρεί την τάση του πυκνωτή στα επιθυμητά επίπεδα. Ο ίδιος μηχανισμός ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση ή μείωση της τάσης του

πυκνωτή και επομένως και του πλάτους της τάσης εξόδου του μετατροπέα, ώστε να ελέγχεται η παροχή ή η απορρόφηση αέργου ισχύος. Ο πυκνωτής DC εξασφαλίζει επίσης την ενεργειακή ισορροπία μεταξύ εισόδου-εξόδου κατά τη διάρκεια δυναμικών αλλαγών της αέργου ισχύος. Αυτός ο τύπος SVS έχει παρόμοια λειτουργικά χαρακτηριστικά όπως ένας ιδανικός σύγχρονος αντισταθμιστής και για αυτό ονομάζεται STATic synchronous COMpensator.

Το STATCOM εξασφαλίζει χωρητική και επαγωγική εγκάρσια αντισταθμηση, ελέγχει το ρεύμα εξόδου στην περιοχή λειτουργίας του και το ότι δίνει πλήρες χωρητικό ρεύμα υπό οποιαδήποτε τάση δικτύου (πρακτικά και για μηδενική) βοηθάει αποτελεσματικά στη βελτίωση της μεταβατικής ευστάθειας. Δηλαδή το STATCOM στηρίζει την τάση του συστήματος όταν αυτή παίρνει πολύ χαμηλές τιμές, δεδομένου του ότι ο πυκνωτής θα μπορεί να παρέχει αρκετή ενέργεια ώστε να αντισταθμιστούν οι απώλειες. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να αυξάνει ή να μειώνει την πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής παρέχοντας ή απορροφώντας άεργο ισχύ και συμβάλλει σημαντικά στην απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος. Ο συγκεκριμένος αντισταθμιστής επιτυγχάνει έλεγχο της τάσης σε μόνιμες, μεταβατικές και δυναμικές συνθήκες λειτουργίας, αντιμετωπίζει τις γρήγορες διακυμάνσεις της τάσης, συμβάλλει στην απόσβεση των ταλαντώσεων ισχύος και μπορεί να αποτρέψει τον υπερσύγχρονο συντονισμό. Το μειονέκτημα του STATCOM μέχρι στιγμής έχει να κάνει με την κατασκευή του, που απαιτεί τη χρήση ηλεκτρονικών διακοπτικών στοιχείων με δυνατότητες ελέγχου του χρόνου σβέσης, που επί του παρόντος απαιτεί μεγάλη ισχύ χειρισμού, μεγάλη συχνότητα αναβοσβήσιματος (στην περιοχή των kHz ώστε να προσφέρονται για την εφαρμογή της μεθόδου διαμόρφωσης πλάτους παλμών), μικρές απώλειες και λογικό κόστος [109].

Θεωρώντας, χωρίς βλάβης της γενικότητας, ότι στο σύστημα των δύο ζυγών, συνδεδεμένων με γραμμή μικρού μήκους χωρίς απώλειες, το STATCOM να βρίσκεται στη μέση της γραμμής μεταφοράς, σύμφωνα με το Σχήμα 2.7 (α), και υποθέτοντας ότι  $|V_s| = |V_r| = V$ , καθώς επίσης και ότι  $V_m = V_m \angle 0^0$  (τάση στο μέσο της γραμμής) και  $\tilde{I}_0 = I_0 \angle 90^0$  (μοντελοποίηση του STATCOM με πηγή ρεύματος), προκύπτει ότι η μεταφερόμενη ενεργός ισχύς είναι [103]:

$$P_{sm} = P_{mr} = \frac{V^2}{X} \sin(\delta_s - \delta_r) + \frac{VI_0}{2} \sin \frac{(\delta_s - \delta_r)}{2} \quad (2.10)$$

Το STATCOM έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι του SVC. Αρχικά, σε αντίθεση με το SVC που η ποσότητα της αέργου ισχύος που παρέχει είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης, το STATCOM παρέχει στο μεγαλύτερο μέρος των χαρακτηριστικών του, άεργο ισχύ που είναι ίση με το γινόμενο της τάσης με το ρεύμα. Έτσι, όταν βυθίζεται η τάση του, εκμεταλλευόμενος τη δυνατότητα υπερρεύματος που έχει, μπορεί να τροφοδοτεί σημαντικό ποσό αέργου ισχύος. Επιπλέον, όταν διαθέτει ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, μπορεί να τροφοδοτεί το σύστημα με πραγματική ισχύ για μικρό χρονικό διάστημα, όπως κάνει ο σύγχρονος αντισταθμιστής (Synchronous Condenser) λόγω της αποθηκευμένης ενέργειας που υπάρχει στα στρεφόμενα μέρη του. Τέλος, έχει ταχύτερη απόκριση από το SVC, η οποία είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Συνοψίζοντας, το STATCOM μπορεί να παρέχει υποστήριξη τάσης με την παραγωγή ή την απορρόφηση αέργου ισχύος στο σημείο σύνδεσης χωρίς την ανάγκη μεγάλων εξωτερικών αντιδράσεων ή πυκνωτών.

### 2.3.2 Στατικός Σύγχρονος Σειριακός Αντισταθμιστής (SSSC)

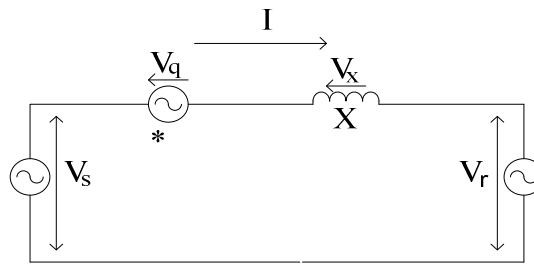
Πρόκειται για σειριακή αντιστάθμιση. Η αντιστάθμιση σειράς με σύγχρονες πηγές τάσης ή ρεύματος (SSSC), αποτελούμενη από ημιαγωγικά στοιχεία, έχει τη δυνατότητα να διατηρεί μία σταθερή εγχόμενη τάση αντιστάθμισης ή ακόμα να ελέγχει το μέτρο της, ανεξάρτητα από το μέτρο του ρεύματος της γραμμής. Το SSSC είναι ένας ελεγκτής ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς συνδεδεμένος σε σειρά που, όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.8 (β), αποτελείται από ένα μετατροπέα πηγής τάσης (Voltage Source Converter – VSC) με ημιαγωγικά στοιχεία, τα οποία είναι συνήθως GTO thyristors, μία βαθμίδα αποθήκευσης ενέργειας, όπως μία μπαταρία μεγάλης ισχύος, έτσι ώστε να επιτρέπεται η ανταλλαγή τόσο αέργου όσο και ενεργού ισχύος, ένα μετασχηματιστή σύζευξης και έναν ελεγκτή. Μπορεί να θεωρηθεί ως ένα προηγμένο είδος ελεγχόμενης αντιστάθμισης σειράς, δηλαδή το SSSC είναι μία προηγμένη μορφή του TCSC, όπως ακριβώς το STATCOM είναι ένα προηγμένο είδος του SVC.

Το SSSC χρησιμοποιείται για να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ προς ή από τη γραμμή και για αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί για τον έλεγχο της ροής ισχύος της γραμμής. Βασικά παράγει στην έξοδό του μία ημιτονοειδή τάση μεταβλητού πλάτους, το διάνυσμα της οποίας προηγείται ή έπεται κατά  $90^\circ$  του διανύσματος του ρεύματος της γραμμής, θεωρώντας ότι οι απώλειες του SSSC είναι αμελητέες. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο θεωρείται ότι η εγχόμενη τάση ισοδυναμεί με μία επαγωγική ή χωρητική αντίδραση σε σειρά με τη γραμμή, η οποία αυξάνει ή μειώνει τη συνολική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς, έχοντας ως συνέπεια την αύξηση ή την μείωση της μεταφερόμενης ισχύος στη γραμμή μεταφοράς καθώς και την ενίσχυση της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος.

Το SSSC είναι ανάλογο με μία ιδανική σύγχρονη πηγή τάσης, που παράγει τριφασική τάση μεταβλητού πλάτους και γωνίας, στην επιθυμητή θεμελιώδη συχνότητα. Μπορεί επίσης να παρομοιαστεί με ένα σύγχρονο αντισταθμιστή, που παρέχει ή απορροφά άεργο ισχύ προς ή από το σύστημα, και μπορεί ακόμη να παράγει ενεργό ισχύ, αν χρησιμοποιηθεί μία βαθμίδα αποθήκευσης ενέργειας στη θέση του πυκνωτή. Το SSSC περιορίζεται στην ανταλλαγή αέργου ισχύος με το εναλλασσόμενο σύστημα μεταφοράς, αμελώντας το μικρό ποσό ενεργού ισχύος που απαιτείται για την κάλυψη των απωλειών του κυκλώματος και των διακοπών.

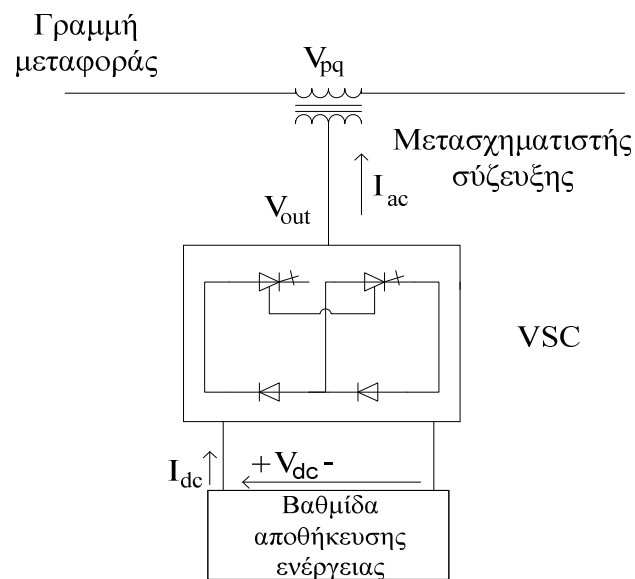
Το SSSC έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι του TCSC όπως: (α) εξάλειψη των μεγάλων παθητικών στοιχείων (πυκνωτές, αντιδράσεις), (β) βελτίωση τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος, (γ) συμμετρική ικανότητα τόσο σε επαγωγικούς όσο και σε χωρητικούς τρόπους λειτουργίας, (δ) δυνατότητα μίας πηγής ενέργειας στη DC πλευρά για την ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο AC [108]. Υπάρχουν πολλά τεχνικά πλεονεκτήματα του SSSC έναντι του TCSC. Ωστόσο, η εφαρμογή ενός SSSC θα εξαρτηθεί από την τεchnο-οικονομική αξιολόγηση και την αξιοπιστία και θα βασίζεται στη λειτουργική εμπειρία. Ένα σημαντικό μειονέκτημα του SSSC είναι η ανάγκη για ένα μετασχηματιστή σύζευξης (και ίσως ένα ενδιάμεσο μετασχηματιστή αν οι πολύ-παλμικοί μετατροπείς είναι μεταχειρισμένοι), ενώ αντίθετα τα TCSCs δεν απαιτούν οποιεσδήποτε μαγνητικές συσκευές ή μετασχηματιστές ζεύξης [108]. Στο μέλλον οι βελτιώσεις στα χαρακτηριστικά των συσκευών τροφοδοσίας αλλά και η μείωση του κόστους θα ωθήσει σε εφαρμογές των SSSCs στη θέση των TCSCs.

(α)



(β)

Όπου \*



**Σχήμα 2.8:** (α) αντιστάθμιση σειράς με σύγχρονη πηγή τάσης SSSC (β) λειτουργικό διάγραμμα SSSC [103].

Η γενικευμένη έκφραση τάσης  $\tilde{V}_q$  δίνεται από την σχέση [103]:

$$\tilde{V}_q = V_q (\zeta) e^{j(\varphi \mp 90^\circ)} \quad (2.11)$$

όπου  $\zeta$  παράμετρος ελέγχου και  $\vec{I} = I \angle \varphi$  το ρεύμα της γραμμής. Αρνητικό (θετικό) πρόσημο σημαίνει αντίστοιχα χωρητική (επαγωγική) αντιστάθμιση. Θεωρώντας, χωρίς βλάβης της γενικότητας, ότι στο σύστημα των δύο ζυγών συνδεδεμένων με γραμμή μικρού μήκους χωρίς απώλειες που έχει συνδεθεί αντιστάθμιση σειράς με σύγχρονη πηγή τάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8 (α), ισχύει ότι  $|V_s| = |V_r| = V$  και ότι το διάνυσμα ρεύματος έχει θεωρηθεί ως διάνυσμα αναφοράς  $\vec{I} = I \angle 0^\circ$  τότε προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις για την μεταφερόμενη ενεργό ισχύ [103]:

$$P_r = \frac{V^2}{X \mp \frac{V_q(\zeta)}{I}} \sin(\delta_s - \delta_r) \quad (2.12)$$

$$Q_r = -\frac{V^2}{X \mp \frac{V_q(\zeta)}{I}} (1 - \cos(\delta_s - \delta_r)) \quad (2.13)$$

όπου  $P_r$ ,  $Q_r$  : η ενεργός και άεργος ισχύς στο άκρο άφιξης της γραμμής αντίστοιχα. Αρνητικό (θετικό) πρόσημο σημαίνει αντίστοιχα χωρητική (επαγωγική) αντιστάθμιση.

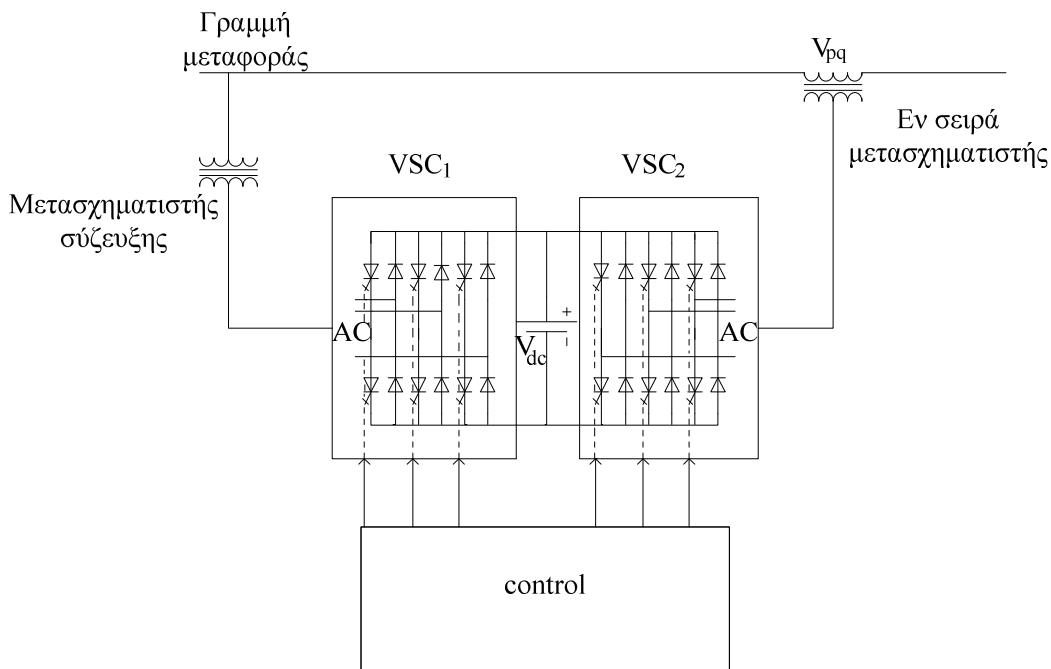
Συνοψίζοντας, διαπιστώνεται ότι το SSSC είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς ελεγκτές ΕΣΜ που προσφέρει αντιστάθμιση σειράς και παρέχει ευελιξία στον έλεγχο του συστήματος μεταφοράς. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της ενεργούς και της άεργου ισχύος της γραμμής, για τη βελτίωση της ικανότητας μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος του συστήματος και για την αύξηση της αξιοπιστίας του.

### 2.3.3 Ενοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος (UPFC)

Το UPFC είναι το πιο “ευέλικτο” και το πιο καλοσχεδιασμένο ΕΣΜ για την ρύθμιση της τάσης και της ροής ισχύος σε μία γραμμή μεταφοράς. Αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσεως (VSCs), ο ένας συνδεδεμένος παράλληλα και ο άλλος συνδεδεμένος σε σειρά. Εναλλακτικά, μπορεί να ειπωθεί πως το UPFC αποτελείται από ένα SSSC και ένα STATCOM συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να μοιράζονται έναν κοινό DC πυκνωτή. Το UPFC έχει τρεις (3) βαθμούς ελευθερίας, σε αντίθεση με άλλα ΕΣΜ που έχουν μόνο ένα βαθμό ελευθερίας (μεταβλητή ελέγχου). Οι ελεγκτές UPFC έχουν μεγάλο εύρος δυνατοτήτων ελέγχου του συστήματος μεταφοράς. Συγκεκριμένα, οι ελεγκτές UPFC κάνουν χρήση των μετατροπέων ισχύος ως σύγχρονων πηγών τάσεως και μπορούν να παρέχουν άεργο ισχύ ή να ανταλλάσσουν ενεργό ισχύ με το σύστημα μεταφοράς. Επιπλέον, το UPFC έχει την ικανότητα να ελέγχει, μεμονωμένα ή και με άλλα ΕΣΜ, ταυτοχρόνως ή επιλεκτικά όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη ροή ισχύος σε μία γραμμή μεταφοράς (π.χ. τάση, επαγωγική αντίδραση, γωνία). Εναλλακτικά, έχει τη δυνατότητα να ελέγχει ανεξάρτητα και την ενεργό και την άεργο ισχύ σε μία γραμμή μεταφοράς. Με αυτό τον τρόπο, η εφαρμογή του στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει εντυπωσιακά τα όρια της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος τους.

Το UPFC κατασκευάστηκε για έλεγχο σε πραγματικό χρόνο και για δυναμική αντιστάθμιση ενός συστήματος μεταφοράς εναλλασσόμενης τάσης, παρέχοντας μοναδική ευελιξία. Το UPFC γενικά ανταλλάσσει και ενεργό και άεργο ισχύ με το σύστημα μεταφοράς. Αφού, εξ ορισμού, το UPFC (το οποίο είναι μία ειδική περίπτωση SVS) είναι ικανό να παρέχει μόνο την άεργο ισχύ προς το σύστημα, η ενεργός ισχύς πρέπει να παρέχεται σε αυτό ή να απορροφάται από αυτό, από μία κατάλληλη διάταξη παροχής ισχύος. Στη διάταξη αυτή η ενεργός ισχύς που

ανταλλάσσεται, παρέχεται από τους τερματικούς ζυγούς άφιξης ή αναχώρησης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9, το UPFC αποτελείται από δύο συνδεδεμένους μετατροπείς ac/dc ( $VSC_1$  και



Σχήμα 2.9: λειτουργικό διάγραμμα UPFC [103], [104].

$VSC_2$ ), οι οποίοι λειτουργούν από μία κοινή dc ζεύξη που παρέχεται από ένα συσσωρευτή (μπαταρία). Οι μετατροπείς αυτοί συνδέονται με το υπόλοιπο ac σύστημα με τη βοήθεια δύο μετασχηματιστών, ενός εν σειρά και ενός εγκάρσιου. Η συνολική διάταξη λειτουργεί ως ένας ιδανικός ac/ac μετατροπέας, στον οποίο η ενεργός ισχύς μπορεί να ρέει και προς τις δύο κατευθύνσεις των δύο τερματικών ζυγών του μετατροπέα, ενώ κάθε μετατροπέας μπορεί ανεξάρτητα να παράγει ή να απορροφά την άεργο ισχύ στο δικό του τερματικό ζυγό εξόδου. Διάφορες στρατηγικές ελέγχου μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν στο σύστημα για την καλύτερη λειτουργία του.

Ο εν σειρά μετατροπέας ( $VSC_2$ ) παρέχει την κύρια λειτουργία του UPFC, η οποία συνίσταται στην έγχυση μιας τάσης εν σειρά με τη γραμμή μεταφοράς μέσω του εν σειρά μετασχηματιστή (μετασχηματιστής ενίσχυσης). Η εγχόμενη τάση δρα ουσιαστικά ως μια σύγχρονη πηγή εναλλασσόμενης τάσης, όπου το ρεύμα γραμμής ρέει μέσω αυτής όπως και η ανταλλασσόμενη άεργος και ενεργός ισχύς μεταξύ της πηγής και του συστήματος. Η άεργος ισχύς που ανταλλάσσεται στα άκρα του μετασχηματιστή παράγεται εσωτερικά από το μετατροπέα [103]. Η ενεργός ισχύς που ανταλλάσσεται στα άκρα μετατρέπεται σε dc ισχύ και εμφανίζεται στη dc ζεύξη ως θετική ή αρνητική απαίτηση ενεργού ισχύος. Ο εγκάρσιος μετατροπέας ( $VSC_1$ ) έχει ως κύρια λειτουργία την παροχή ή την απορρόφηση της απαιτούμενης από τον εν σειρά μετατροπέα ενεργού ισχύος στην κοινή DC ζεύξη. Αυτή η dc ισχύς μετατρέπεται και πάλι σε εναλλασσόμενη και υπερτίθεται με αυτή της γραμμής μεταφοράς μέσω ενός εγκάρσια συνδεδεμένου πυκνωτή. Ο εγκάρσιος μετατροπέας μπορεί επίσης ελεγχόμενα να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ, εάν είναι επιθυμητό, έτσι ώστε να παρέχει ανεξάρτητα εγκάρσια άεργο αντιστάθμιση στη γραμμή μεταφοράς [103].

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αν και υπάρχει κλειστό ευθύ μονοπάτι για την παροχή ενεργού ισχύος, με την έγχυση της εν σειρά τάσης, διαμέσου του εν σειρά μετατροπέα και του εγκάρσιου μετατροπέα και της γραμμής, η αντίστοιχη ανταλλασσόμενη άεργος ισχύς παρέχεται ή απορροφάται τοπικά από τον εν σειρά μετατροπέα και για αυτό το λόγο δε χρειάζεται να μεταφερθεί διαμέσου της γραμμής. Συνεπώς ο εγκάρσιος μετατροπέας μπορεί, είτε να λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, είτε να ανταλλάσσει άεργο ισχύ με τη γραμμή μεταφοράς ανεξάρτητα από τον εν σειρά μετατροπέα [103]. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει ροή αέργου ισχύος μέσω του UPFC.

Όλες οι δυνατότητες αυτές δικαιολογούν το όνομα του συγκεκριμένου ΕΣΜ ως ενοποιημένου ρυθμιστή ελέγχου ισχύος. Οι διατάξεις αυτές συγκεντρώνουν τα χαρακτηριστικά των άλλων ειδών ΕΣΜ που παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου αυτού, αλλά και μερικά ακόμη, όπως η ενίσχυση της απόσβεσης των ταλαντώσεων, η βελτίωση της μεταβατικής ευστάθειας καθώς και η μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Μοναδικό μειονέκτημά είναι το υψηλό κόστος των UPFC.

## 2.4 ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

### 2.4.1 Δυναμικός Αποκαταστάτης Τάσης (DVR – Dynamic Voltage Restorer)

Ο Δυναμικός αποκαταστάτης τάσης (DVR – Dynamic Voltage Restorer) είναι μία συσκευή, που αξιοποιεί ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος στερεάς κατάστασης και συνδέεται σε σειρά με το δίκτυο διανομής. Χρησιμοποιείται για να προστατεύει ένα ευαίσθητο φορτίο από την παραμόρφωση της τάσης στην πλευρά της παροχής αυτής κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος ή υπερφόρτισης στα συστήματα ενέργειας. Η βασική αρχή ενός τέτοιου σειριακού αντισταθμιστή είναι απλή: εισάγοντας μία τάση με το απαιτούμενο πλάτος και συχνότητα, ο σειριακός αντισταθμιστής μπορεί να επαναφέρει την τάση στην πλευρά του φορτίου στο επιθυμητό πλάτος και κυματομορφή, ακόμη κι όταν η τάση από την πηγή είναι ασύμμετρη ή παραμορφωμένη [110]. Η συσκευή του DVR χρησιμοποιεί GTO θυρίστορ σε μία δομή αντιστροφέα που λειτουργεί με τη βοήθεια της τεχνικής PWM (διαμόρφωση εύρους παλμών).

Το DVR μπορεί να παράγει ή να απορροφά ανεξάρτητα ελεγχόμενη πραγματική και άεργο ισχύ στην πλευρά του φορτίου. Το DVR, επίσης, αποτελείται από έναν διακοπτικό dc σε ac μετατροπέα (δηλ. έναν αντιστροφέα) που εγχέει μία τριφασική εναλλασσόμενη τάση σε σειρά και συγχρονισμένη με τις τάσεις που τροφοδοτούνται από τη διανομή. Το εύρος και η φασική γωνία των εγχεόμενων τάσεων μεταβάλλονται και έτσι υπάρχει έλεγχος της πραγματικής και της αέργου ισχύος που ανταλλάσσεται μεταξύ του DVR και του συστήματος διανομής. Η dc πλευρά (πλευρά που συνδέεται με την παροχή) ενός DVR συνδέεται σε μία πηγή ενέργειας ή μία συσκευή αποθήκευσης ενέργειας κατάλληλης χωρητικότητας. Η άεργος ισχύς που ανταλλάσσεται μεταξύ του DVR και του συστήματος διανομής «δημιουργείται» από το DVR χωρίς τη συμμετοχή παθητικών έργων συνιστωσών. Η πραγματική ισχύς που ανταλλάσσεται στην ac πλευρά (πλευρά φορτίου) παρέχεται από την dc πλευρά από μία εξωτερική πηγή

ενέργειας ή ένα σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης. Η δομή του DVR αποτελείται από ανορθωτή, αντιστροφέα, φίλτρο και συζευγμένο μετασχηματιστή [110]. Επιπλέον, η PWM τεχνική χρησιμοποιείται για να ελέγχονται οι μεταβαλλόμενες τάσεις. Το φίλτρο χρησιμοποιείται για απαλοιφή των αρμονικών που δημιουργούνται από την υψηλή διακοπτική συχνότητα στην PWM τεχνική. Στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, το σύστημα του DVR συνδέεται σε σειρά με την τροφοδοσία (στο σύστημα διανομής) που τροφοδοτεί ένα ευαίσθητο φορτίο.

#### **2.4.2 Αντισταθμιστής Σειράς με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWMSC)**

Ο αντισταθμιστής σειράς με διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse-width modulation based Series compensator, PWMSC) είναι ένας νέος σειριακός ελεγκτής ΕΣΜ, ο οποίος παρέχει αντισταθμισμό της σύνθετης αντίστασης της γραμμής μεταφοράς [91]. Η δυνατότητα του PWMSC να λειτουργεί τόσο σε επαγωγική όσο και σε χωρητική λειτουργία τον καθιστά πολύ αποτελεσματικό στον έλεγχο της ροής ισχύος του δικτύου. Αυτοί οι αντισταθμιστές έχουν το πλεονέκτημα να είναι πιο απλοί τόσο στη δομή του κυκλώματος τροφοδοσίας όσο και στον έλεγχό τους. Είναι γνωστό ότι η φόρτωση των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να περιορίζεται από τη δυναμική ευστάθεια του συστήματος. Το PWMSC είναι ένα ισχυρό νέο εργαλείο για να βοηθήσει να προσπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί. Τέλος, ο ελεγκτής του μπορεί να σχεδιαστεί για να τροποποιήσει την αντίδραση της γραμμής και να παρέχει αρκετή απόσβεση στις ταλαντώσεις του συστήματος [91].





## **ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**

### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (ΒΤΔΕΣΜ) στα ΣΗΕ έχει απασχολήσει πολλούς επιστήμονες και ερευνητές στις μέρες μας και έχει οδηγήσει στην συγγραφή πολλών επιστημονικών άρθρων. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας έχουν μελετηθεί και έχουν αναλυθεί συνολικά 101 άρθρα για το θέμα της ΒΤΔΕΣΜ, τα οποία έχουν δημοσιευτεί σε κορυφαία διεθνή επιστημονικά περιοδικά. Το πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ είναι ένα σύνθετο μικτό ακέραιο μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ ασχολείται με τον προσδιορισμό της βέλτιστης θέσης, του βέλτιστου μεγέθους, του βέλτιστου τύπου, του βέλτιστου αριθμού και της βέλτιστης ρύθμισης των παραμέτρων των συσκευών των ΕΣΜ, που τοποθετούνται σε υπάρχοντα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος του μηχανικού, κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, είναι η εύρεση ενός συνδυασμού ανεξαρτήτων μεταβλητών, που ονομάζονται μεταβλητές σχεδίασης, με σκοπό την ελαχιστοποίηση (ή την μεγιστοποίηση) της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος. Κατά τη βελτιστοποίηση λαμβάνονται υπόψιν οι περιορισμοί λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου, οι περιορισμοί λειτουργίας των ΕΣΜ καθώς και οι περιορισμοί επένδυσης. Αυτοί οι περιορισμοί καθορίζουν το χώρο των αποδεκτών λύσεων του προβλήματος. Γενικά, οι εφαρμογές βελτιστοποίησης στα ΣΗΕ αποτελούν κλάδο που έχει συνεισφέρει σημαντικά στη λειτουργία και στο σχεδιασμό των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ υπάρχουν ορισμένες παράμετροι του προβλήματος, που θα αναλυθούν σε αυτό το κεφάλαιο και για κάθε περίπτωση διαφέρουν (101 διαφορετικά άρθρα). Επίσης, στο τέλος του κεφαλαίου επισυνάπτεται πίνακας (Πίνακας 3.1) με καταγεγραμμένα ορισμένα από αυτά τα στοιχεία για καθένα από τα 101 άρθρα. Οι παράμετροι αυτοί είναι οι ακόλουθες:

- Οι παράμετροι εκείνες οι οποίες όταν λάβουν συγκεκριμένη τιμή καθορίζουν πλήρως μία σχεδίαση ονομάζονται μεταβλητές σχεδίασης (design variables). Οι μεταβλητές σχεδίασης ενδέχεται να είναι είτε συνεχείς, είτε διακριτές, οπότε επιτρέπεται να

λάβουν συγκεκριμένες και μόνο τιμές. Οι μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ μπορούν κάθε φορά να είναι μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες: θέση, μέγεθος, τύπος, αριθμός ΕΣΜ και όταν το πρόβλημα αναφέρεται σε ελεγκτές ΕΣΜ τότε σαν μεταβλητή σχεδίασης μπορεί να είναι και η ρύθμιση των παραμέτρων του ελεγκτή. Ορισμένες φορές επιλέγεται μεγαλύτερος αριθμός μεταβλητών σχεδίασης από ότι είναι απαραίτητος για τη σωστή μοντελοποίηση του συστήματος. Έτσι προστίθενται περισσότεροι βαθμοί ελευθερίας στο μοντέλο και δίνεται μεγαλύτερη ευελιξία στη διαδικασία εξεύρεσης της βέλτιστης λύσης. Έπειτα, είναι δυνατόν να απαλειφθούν οι επιπλέον μεταβλητές σχεδίασης, αναθέτοντας σε αυτές συγκεκριμένες τιμές για τη συνέχιση της διαδικασίας της βελτιστοποίησης. Η ανεξαρτησία μεταξύ των μεταβλητών σχεδίασης είναι ένα επίσης σημαντικό θέμα που πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα κατά την επιλογή τους. Αν επιλεγούν μεταβλητές σχεδίασης εξαρτημένες η μία από την άλλη, τότε το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος θα γίνει ιδιαίτερα πολύπλοκο.

- Οι απαιτήσεις του μηχανικού εισάγονται στο μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης με τη μορφή ανισοτήτων και ισοτήτων οι οποίες καλούνται περιορισμοί (constraints). Κάθε περιορισμός θα πρέπει να εξαρτάται τουλάχιστον από μία μεταβλητή σχεδίασης του προβλήματος, αλλιώς δεν θα υπάρχει νόημα να υφίσταται στο μαθηματικό μοντέλο. Όταν μία σχεδίαση, δηλαδή μία συγκεκριμένη τιμή των μεταβλητών σχεδίασης δεν πληρεί κάποιον ή κάποιους περιορισμούς του προβλήματος ονομάζεται ανέφικτη, ενώ στην αντίθετη περίπτωση που πληρεί όλους ανεξαιρέτως τους περιορισμούς ονομάζεται εφικτή. Μία εφικτή σχεδίαση δεν είναι πάντοτε βέλτιστη, αλλά είναι σίγουρα υλοποιήσιμη. Το πεδίο τιμών εντός του οποίου κινούνται οι μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος είναι ο χώρος αναζήτησης των υποψηφίων λύσεων και τα όριά του καθορίζονται από τους εκάστοτε περιορισμούς. Οι περιορισμοί του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ έχουν να κάνουν κυρίως με περιορισμούς της λειτουργίας του ΣΗΕ, της λειτουργίας των ΕΣΜ και διάφορων οικονομικών περιορισμών (περιορισμοί κόστους ή περιορισμοί επένδυσης).
- Όπως προαναφέρθηκε μία σχεδίαση μπορεί να είναι εφικτή ή ανέφικτη. Σε κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης υπάρχουν πολλές το πλήθος εφικτές σχεδιάσεις, κάποιες όμως είναι πιο ισχυρές από κάποιες άλλες και κάποια από αυτές αποτελεί τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Για να γίνει η διάκριση καλής και ακόμη καλύτερης σχεδίασης, είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός κριτηρίου για τη σύγκριση και την αξιολόγηση της σχεδίασης. Το κριτήριο αυτό είναι μία συνάρτηση η οποία λαμβάνει μία συγκεκριμένη τιμή για κάθε σχεδίαση. Αυτή η συνάρτηση ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση (objective function) και εξαρτάται από τις μεταβλητές σχεδίασης. Η επιλογή της κατάλληλης αντικειμενικής συνάρτησης είναι ένα σημαντικότερο θέμα για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης και στην ουσία αντιπροσωπεύει την ποσότητα που πρέπει να βελτιστοποιηθεί (ελαχιστοποιηθεί ή μεγιστοποιηθεί) ανάλογα με το πρόβλημα. Κατά τη διάρκεια της αναζήτησης της βέλτιστης σχεδίασης, απώτερος στόχος της βελτιστοποίησης είναι η εύρεση του καθολικού βέλτιστου. Ο χώρος αναζήτησης όμως, στη συνήθη περίπτωση των μη κυρτών προβλημάτων (non-convex problems), περιέχει πολλά τοπικά ελάχιστα, στα οποία ενδέχεται να παγιδευτεί η βελτιστοποίηση. Αυτό είναι ένα από τα κυριότερα προβλήματα των μαθηματικών μεθόδων βελτιστοποίησης και οφείλεται στον ντετερμινιστικό τρόπο λειτουργίας τους. Αντίθετα, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που βασίζονται σε πιθανοτικές θεωρήσεις, έχουν περισσότερες πιθανότητες να εντοπίσουν το καθολικό βέλτιστο, καθώς λόγω της στοχαστικής αναζήτησης που τις διέπει μπορούν να ξεφύγουν με μεγαλύτερη ευκολία από πιθανά τοπικά βέλτιστα. Αυτές είναι έννοιες που θα αναλυθούν με εκτενή τρόπο στο επόμενο κεφάλαιο. Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να έχει περισσότερες από μία αντικειμενικές

συναρτήσεις. Αυτά τα προβλήματα ονομάζονται προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων (multi-objective optimization problems, MOP).

### 3.2 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΒΤΔΕΣΜ

Οι μεταβλητές σχεδίασης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης είναι τα μεγέθη που καθορίζουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας πολλά μεγέθη προβλημάτων που σχετίζονται με αυτά εξαρτώνται από τις τιμές των ηλεκτρικών παραμέτρων του ΣΗΕ. Η εγκατάσταση των ΕΣΜ στα ΣΗΕ έχει μεγάλη επίδραση στις τιμές αυτών των παραμέτρων. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι στο πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ η θέση των ΕΣΜ, η διάσταση (το μέγεθος), το είδος, ο αριθμός και οι ρυθμίσεις των παραμέτρων τους αποτελούν τις μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος, αφού ο βαθμός επίδρασης των ΕΣΜ στο ΣΗΕ σχετίζεται με τις παραπάνω μεταβλητές.

Η θέση (location) των συσκευών των ΕΣΜ στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επηρεάσει τη μόνιμη και τη μεταβατική λειτουργία του συστήματος. Η μόνιμη λειτουργία του συστήματος βελτιώνεται με την τοποθέτηση των ΕΣΜ σε κατάλληλες θέσεις στο ΣΗΕ, οι οποίες προσδιορίζονται μέσω μεθόδων ανάλυσης ευαισθησίας και μέσω μοντελοποίησης της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας των ΕΣΜ. Οι θέσεις των ΕΣΜ στο ΣΗΕ, που προσδιορίζονται με ανάλυση ρυθμών (modal analysis), ή προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου, καθώς και η δυναμική μοντελοποίηση των ΕΣΜ έχουν ως στόχο να ενισχύσουν τη δυναμική απόδοση του συστήματος.

Το μέγεθος (size) των συσκευών των ΕΣΜ είναι επίσης ένα πολύ σημαντικό ζήτημα διότι το κόστος των ΕΣΜ είναι ανάλογο με το μέγεθός τους. Το πρόβλημα της βέλτιστης διαστασιολόγησης των ΕΣΜ, κατά το στάδιο του σχεδιασμού της συσκευής, είναι να βρεθεί το βέλτιστο μέγεθος που ικανοποιεί τους επιθυμητούς στόχους ταυτόχρονα με την ελάχιστη οικονομική επένδυση. Ορισμένα από τα σημαντικά ζητήματα, που καθορίζονται από το μέγεθος των ΕΣΜ, είναι η διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου για τις πιθανές ροές ισχύος και για τις πιθανές διαταραχές (contingencies), που μπορούν να συμβούν στο σύστημα που εξετάζεται.

Το είδος (type) και ο αριθμός (number) των συσκευών των ΕΣΜ, που χρησιμοποιούνται κάθε φορά στους υπολογισμούς καθορίζεται εξωτερικά, δηλαδή από το χρήστη κατάλληλου λογισμικού ΒΤΔΕΣΜ. Ανάλογα με τον αριθμό των συσκευών των ΕΣΜ που τοποθετούνται στο ΣΗΕ, το πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: 1) της μίας συσκευής (single), όταν μόνο ένα ΕΣΜ τοποθετείται στο εξεταζόμενο σύστημα και 2) των πολλαπλών συσκευών (multiple), όταν περισσότερα από ένα ΕΣΜ τοποθετούνται στο υπό εξέταση σύστημα. Σε αυτή την περίπτωση αναζητείται ο βέλτιστος αριθμός των ΕΣΜ για τους επιθυμητούς στόχους της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος.

Ανάλογα του είδους των συσκευών των ΕΣΜ που τοποθετούνται στο σύστημα, το πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: 1) του ενός είδους (single), όταν ένα είδος ΕΣΜ (π.χ. το SVC) μελετάται στο πρόβλημα, και 2) των πολλών ειδών (multiple), όταν

περισσότερα από ένα είδη ΕΣΜ (π.χ. το SVC, το STATCOM, και άλλων ΕΣΜ με τα πιο συνηθισμένα εκ των οποίων να είναι τα εξής: το SVC, το STATCOM, το SSSC, το TCSC, το UPFC, το TCPST, και το TCVR) εξετάζονται στο πρόβλημα. Στην περίπτωση αυτή αναζητείται εκείνο ή εκείνα τα βέλτιστα είδη ΕΣΜ, που πρέπει να τοποθετηθούν στο σύστημα για να βελτιωθούν τα ζητήματα που εξετάζει η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος.

Όταν το πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ αναφέρεται σε ελεγκτή ΕΣΜ, τότε η ρύθμιση των παραμέτρων (parameter settings) του μπορεί να είναι και αυτή στις εξεταζόμενες μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος.

Στα 101 άρθρα που εξετάστηκαν οι ακόλουθες μεταβλητές σχεδίασης (άγνωστοι) υπολογίζονται εναλλακτικά για κάθε ΕΣΜ: 1) θέση, 2) μέγεθος, 3) ρύθμιση παραμέτρων, 4) αριθμός και θέση, 5) αριθμός και μέγεθος, 6) είδος και θέση, 7) θέση και μέγεθος, 8) ρύθμιση παραμέτρων και θέση, 9) αριθμός, είδος και θέση, 10) αριθμός, θέση και μέγεθος, 11) θέση, είδος και ρύθμιση παραμέτρων, 12) είδος, θέση και μέγεθος, 13) αριθμός, είδος, θέση και μέγεθος [102].

### **3.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΒΤΔΕΣΜ**

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται όλες οι αντικειμενικές συναρτήσεις, που εμφανίζονται στα 101 άρθρα ΒΤΔΕΣΜ, που μελετήθηκαν για τη συγγραφή αυτής της διπλωματικής εργασίας. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις παρουσιάζονται με ομαδοποιημένο και μαθηματικό τρόπο. Οι περιορισμοί του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ θα παρουσιαστούν αναλυτικά στην ενότητα 3.4.

#### **3.3.1 Βελτίωση ευστάθειας ΣΗΕ**

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως προαναφέρθηκε, αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό διασυνδεδεμένων σύγχρονων γεννητριών, οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, που μέσω του συστήματος μεταφοράς και διανομής καταλήγει τους καταναλωτές. Η ευστάθεια αποτελεί ένα μεγάλο ζήτημα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γιατί εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία τους. Ως ευστάθεια ενός ΣΗΕ ορίζεται η ικανότητα του ΣΗΕ, για μία δοσμένη αρχική συνθήκη λειτουργίας, να παραμένει σε μία κατάσταση ισορροπίας αφού έχει υποστεί μία φυσική διαταραχή. Η διαταραχή αυτή μπορεί να είναι ένα σφάλμα, μία αλλαγή φορτίου, μία μεγάλη απώλεια στην παραγωγή, μία απώλεια στις γραμμές μεταφοράς, μία κατάρρευση τάσης (voltage collapse) ή ένας συνδυασμός κάποιων από αυτών. Η ευστάθεια ενός ΣΗΕ μπορεί να κατηγοριοποιηθεί, ανάλογα με τη φύση των εμπλεκόμενων φαινομένων, σε ευστάθεια γωνίας δρομέα, σε ευστάθεια συχνότητας και σε ευστάθεια τάσης [112].

Η ευστάθεια γωνίας δρομέα (rotor angle stability) είναι η ικανότητα ενός συνόλου συνδεδεμένων σύγχρονων μηχανών να παραμένουν σε συγχρονισμό μετά από την υποβολή τους σε μία διαταραχή. Η μελέτη της ευστάθειας γωνίας δρομέα ενός ΣΗΕ καλείται να απαντήσει σε δύο βασικά ερωτήματα: 1) Είναι ευσταθές το σημείο λειτουργίας που εξετάζετε; Δηλαδή μετά από κάποια διαταραχή, θα επανέλθουν οι γεννήτριες στο αρχικό σημείο λειτουργίας ή θα απομακρυνθούν από αυτό; 2) Μετά από μία διαταραχή ή ανωμαλία στο σύστημα (βραχυκύκλωμα ορισμένης διάρκειας, απώλεια ενός φορτίου ή μονάδας παραγωγής, κλπ), θα μπορέσουν να ξαναβρεθούν οι γεννήτριες σε κατάσταση συγχρονισμού ή κάποιες από αυτές θα έχουν αποσυγχρονιστεί παρασύροντας και τις υπόλοιπες; Έτσι οι απαντήσεις των παραπάνω ερωτημάτων ορίζουν δύο διαφορετικά είδη ευστάθειας γωνίας δρομέα του συστήματος, την ευστάθεια μόνιμης κατάστασης και τη μεταβατική ευστάθεια [111]. Αστάθεια εμφανίζεται με τη μορφή μη αποσβενυόμενων ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων ή μονότονης επιτάχυνσης του δρομέα που οδηγεί σε αποσυγχρονισμό. Το χρονικό πλαίσιο της ευστάθειας γωνίας είναι αυτό των ηλεκτρομηχανικών φαινομένων, με διάρκεια μερικών δευτερολέπτων και άρα τα φαινόμενα αστάθειας γωνίας κατατάσσονται στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα (short term).

Η ευστάθεια μόνιμης κατάστασης ή σημείου λειτουργίας (steady-state stability), λέγεται επίσης και ευστάθεια μικρών διαταραχών. Η ανάλυση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων με την εξέταση ιδιαίτερα της συμβολής των διατάξεων ελέγχου (ελεγκτές ΕΣΜ, ρυθμιστών στροφών και τάσεων) των σύγχρονων γεννητριών και η ανάλυση της στατικής ευστάθειας αποτελούν τη μελέτη της ευστάθειας μόνιμης κατάστασης ενός ΣΗΕ. Η μεταβατική ευστάθεια, ή ευστάθεια μεγάλων διαταραχών (transient stability), αφορά τις απότομες και μεγάλες διαταραχές, όπως αυτές που προκαλούνται από βραχυκυκλώματα του δικτύου και αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών να διατηρήσουν το συγχρονισμό τους κατά τη διάρκεια των πρώτων ταλαντώσεων που ακολουθούν την εμφάνιση της διαταραχής. Μάλιστα για κάθε σύστημα υπάρχει πάντα κάποια διαταραχή που είναι οριακά ικανή να το αποσταθεροποιήσει, η οποία ονομάζεται κρίσιμη διαταραχή, και τα μεγέθη της οποίας ονομάζονται κρίσιμα μεγέθη. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι ο όρος δυναμική ευστάθεια έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για να δηλώσει την ευστάθεια μικρών διαταραχών όταν λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση των ρυθμιστών των γεννητριών και πιο συγκεκριμένα όταν εξετάζεται η απόσβεση των ταλαντώσεων μεταξύ των δρομέων των γεννητριών. Σήμερα όμως ο όρος δυναμική ευστάθεια δεν χρησιμοποιείται πλέον [111].

Η ευστάθεια συχνότητας (frequency stability) είναι η ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τη συχνότητα κοντά στην ονομαστική τιμή μετά από μια σοβαρή διαταραχή (μεταβατική ευστάθεια). Αστάθεια συχνότητας προκαλείται λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ενεργού ισχύος. Η ευστάθεια τάσης (voltage stability) είναι η ικανότητα του συστήματος να διατηρήσει ικανοποιητικές τάσεις σε όλους τους ζυγούς μετά από μια διαταραχή. Αστάθεια τάσης προκαλείται από την αδυναμία του συστήματος να τροφοδοτήσει την απαιτούμενη ισχύ στα φορτία και κινητήρια δύναμη της αποτελούν οι μηχανισμοί αποκατάστασης φορτίου. Αστάθεια τάσης μπορεί επίσης να προκληθεί με την

## ΤΥΠΟΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ



Σχήμα 3.1: Τύποι ευστάθειας συστήματος.

επίδραση μικρών (στατική) ή μεγάλων διαταραχών (μεταβατική). Η εξέλιξη της αστάθειας τάσεως ενός συστήματος μπορεί να έχει διάρκεια από μερικά δευτερόλεπτα έως και μερικές δεκάδες πρώτων λεπτών. Άρα μπορεί να οριστεί ένας ακόμα διαχωρισμός στην αστάθεια τάσης ως προς τη χρονική κλίμακα εξέλιξης των φαινομένων που την προκαλούν. Έτσι διακρίνεται η βραχυπρόθεσμη και η μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης. Όλες οι παραπάνω κατηγορίες και η ταξινόμηση των διαφόρων μορφών της ευστάθειας ενός ΣΗΕ φαίνεται στο Σχήμα. 3.1.

Στα άρθρα [1],[2],[5],[6],[8],[9],[10],[16],[35],[38],[39],[42],[65],[77],[83],[91] το πρόβλημα βελτιστοποίησης έγκειται στην βελτίωση της ευστάθειας γωνίας δρομέα (rotor angle stability). Δηλαδή το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει να κάνει με το ποια είναι η βέλτιστη θέση, ο βέλτιστος τύπος και ποιες είναι οι βέλτιστες ρυθμίσεις παραμέτρων των ελεγκτών-ΕΣΜ που πρέπει να εγκατασταθούν στο σύστημα ώστε να βελτιώσουν την ευστάθεια γωνίας δρομέα αυτού.

Πιο συγκεκριμένα, στα άρθρα [8],[38],[65],[77],[83],[91] το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει να κάνει με την ενίσχυση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων μεταξύ περιοχών (inter-area modes of oscillation) του ΣΗΕ. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται η ευστάθεια μόνιμης κατάστασης (ή ευστάθεια μικρών διαταραχών) του ΣΗΕ. Αν η ιδιοτιμή ενός τρόπου ταλάντωσης εκφράζεται ως  $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$ , τότε ο συντελεστής απόσβεσης δίνεται από την σχέση:

$$\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (3.1)$$

Ένα αρνητικό πραγματικό μέρος μίας ιδιοτιμής δίνει θετικό συντελεστή απόσβεσης που δηλώνει φθίνουσα ταλάντωση, ενώ ένα θετικό πραγματικό μέρος δίνει αρνητικό συντελεστή απόσβεσης που δηλώνει αυξανόμενη ταλάντωση. Στα άρθρα [8],[38],[65],[83] η αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στη μεγιστοποίηση του συντελεστή απόσβεσης των συστημάτων για διάφορες τοποθεσίες, διαφόρων τύπων ΕΣΜ με σκοπό την ενίσχυση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων και την καλύτερη λειτουργία του ΣΗΕ. Αυτό εκφράζεται διαφορετικά στο άρθρο [77] όπου η αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στην ελαχιστοποίηση ενός δείκτη απόσβεσης που ορίζεται ως:

$$CDI = J = \min(1 - |\zeta_i|) \quad (3.2)$$

ή στο άρθρο [91] όπου η αντικειμενική συνάρτηση είναι η εξής:

$$J = \min_{t_c} \int_{t_c}^{t_f} \sum_i \Delta\omega_i^2 dt \quad (3.3)$$

όπου  $\Delta\omega$ : η απόκλιση της ταχύτητας των διασυνδεδεμένων τρόπων ταλάντωσης,  $t_c, t_f$ : ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος και ο τελικός χρόνος προσομοίωσης, αντίστοιχα.

Στα άρθρα [16],[35],[39],[42] το πρόβλημα βελτιστοποίησης έγκειται στην βελτίωση της μεταβατικής ευστάθειας (ευστάθειας μεγάλων διαταραχών) του συστήματος. Στο άρθρο [16] προσδιορίζεται η κατάλληλη τοποθεσία του UPFC με σκοπό την ενίσχυση της απόσβεσης της μεταβατικής συμπεριφοράς των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων του ΣΗΕ. Στα άρθρα [35],[39] η αντικειμενική συνάρτηση ασχολείται κατά αποκλειστικότητα με τη βελτίωση της μεταβατικής ευστάθειας του ΣΗΕ. Στο άρθρο [35] παρουσιάζεται ένα σύστημα δύο ζυγών (περιοχών, μηχανών) (two-area test system) με εγκάρσια αντιστάθμιση, SVC ή STATCOM, συνδεδεμένη κάπου μεταξύ των δύο μηχανών. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ακόλουθη:

$$J = \min\{|\text{maximum}(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2)|\} \quad (3.4)$$

διότι

$$\text{An } |\text{maximum}(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2)| < 180^\circ \text{ το σύστημα ευσταθές} \quad (3.5)$$

Τα μεγέθη  $\Delta\delta_1, \Delta\delta_2$ : αποτελούν την απόκλιση της γωνίας του δρομέα των μηχανών 1 και 2 (των δύο περιοχών) ύστερα από μία διαταραχή, αντίστοιχα. Το μέγεθος  $|\text{maximum}(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2)|$  αποτελεί την απόλυτη τιμή της μέγιστης διαφοράς των αποκλίσεων των γωνιών των δρομέων των δύο μηχανών. Στο άρθρο [42] η αντικειμενική συνάρτηση έχει να κάνει με τη βελτίωση του ορίου της ευστάθειας πρώτης ταλάντωσης του ΣΗΕ (improve first swing stability limit of the system). Η βελτίωση του ορίου της ευστάθειας πρώτης ταλάντωσης είναι πολύ σημαντικό ζήτημα για την ομαλή λειτουργία του ΣΗΕ. Ένα σύστημα μπορεί να είναι ευσταθές στην πρώτη ταλάντωση αλλά να ξεφύγει και να αποσυγχρονιστεί στη δεύτερη ή σε μεγαλύτερη ταλάντωση.

Στα άρθρα [1],[2],[5],[6],[9],[10] προσδιορίζονται οι θέσεις των ΕΣΜ (SVC και TCSC) έτσι ώστε να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση της ελεγχιμότητας και της παρατηρησιμότητας του ΣΗΕ. Αυτό γίνεται με σκοπό την ενίσχυση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων του



ΣΗΕ, της ευστάθειας αλλά και για την ομαλότερη λειτουργία του. Οι δείκτες ελεγχιμότητας και παρατηρησιμότητας  $b_{z_i}(\lambda_i)$  και  $c_{z_i}(\lambda_i)$  ορίζονται ως εξής:

Έστω το σύστημα  $\dot{x} = Ax + Bu$  και  $y = C^T x + Du$ , με τον  $A$  να αποτελεί έναν  $m$ -τάξης πίνακα με  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) ιδιοτιμές. Τότε

$$b_{z_i}(\lambda_i) = W_i^T B \quad (3.6)$$

$$c_{z_i}(\lambda_i) = C^T V_i \quad (3.7)$$

οι δείκτες ελεγχιμότητας και παρατηρησιμότητας, αντίστοιχα. Με  $V = [V_1, V_2, \dots, V_m]$  και  $V^{-1} = W = [W_1, W_2, \dots, W_m]$  να αποτελούν το δεξί και το αριστερό ιδιοδιάνυσμα  $m$ -τάξης του πίνακα  $A$  της ιδιοτιμής  $\lambda_i$ . Επίσης ορίζεται και το γινόμενο των δύο δεικτών ως:

$$R_i = b_{z_i}(\lambda_i) c_{z_i}(\lambda_i) \quad (3.8)$$

Βέβαια όλοι αυτοί οι υπολογισμοί είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε μεγάλα συστήματα λόγω της μεγάλης αριθμητικής πολυπλοκότητας των λύσεών τους. Έτσι στα παραπάνω άρθρα εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι που μειώνουν αυτή την πολυπλοκότητα και κάνουν πιο εύκολους τους υπολογισμούς, οι οποίοι αναλύονται στο Κεφάλαιο 4. Έτσι προσδιορίζονται οι καταλληλότερες θέσεις των ΕΣΜ στο ΣΗΕ.

Πλέον, η λειτουργία των δικτύων υπό εντατικότερες συνθήκες, λόγω της διαρκούς αύξησης των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια (αύξηση φορτίου), οδηγεί σε νέες μορφές ασταθούς συμπεριφοράς στα ΣΗΕ. Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των φαινομένων αστάθειας είναι η βαθμιαία βύθιση της τάσης, που μπορεί να καταλήξει και σε απότομη κατάρρευση. Αστάθεια τάσης δημιουργείται όταν γίνεται προσπάθεια αποκατάστασης της κατανάλωσης ισχύος από τα φορτία πέρα από την ικανότητα φόρτισης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς. Συνεπώς η αστάθεια τάσης σχετίζεται με το όριο της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος σε ένα σημείο του ΣΗΕ. Η υπέρβαση του ορίου αυτού καθιστά ασταθή τη διαδικασία ανάκτησης της ισχύος του φορτίου, καταλήγοντας σε μείωση αντί για αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος. Το φαινόμενο κατάρρευσης της τάσης (voltage collapse phenomenon) [11] οδηγεί στην απότομη βύθιση των τάσεων στην περιοχή εμφάνισης του προβλήματος. Κοντά στο σημείο κατάρρευσης, η χρονική απόκριση των τάσεων γίνεται ολοένα και πιο γρήγορη και καταλήγει σε μία κατακόρυφη πτώση τη χρονική στιγμή της κατάρρευσης. Είδη φορτίων όπως οι κινητήρες επαγωγής ή τα θερμοστατικά φορτία, ή διατάξεις όπως τα συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) καταπραΰνουν τέτοιους είδους φαινόμενα. Στα άρθρα [11],[20],[23],[41],[43] σκοπός της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι συνολική βελτίωση της ευστάθειας τάσης του ΣΗΕ για την αποφυγή τέτοιων δυσμενών φαινομένων με διάφορους μεθόδους που θα παρουσιαστούν στο Κεφάλαιο 4. Στο άρθρο [41] η αντικειμενική συνάρτηση έχει ως σκοπό την ελαχιστοποίηση της παράστασης

$$J = \min \{ \sum_{abs} |V_i - V_{ref_i}|^3 \} \quad (3.9)$$

όπου  $V_i, V_{ref_i}$  : η πραγματική και η ονομαστική τάση στο ζυγό  $i$ , αντίστοιχα.

### 3.3.2 Μεγιστοποίηση διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς ΣΗΕ

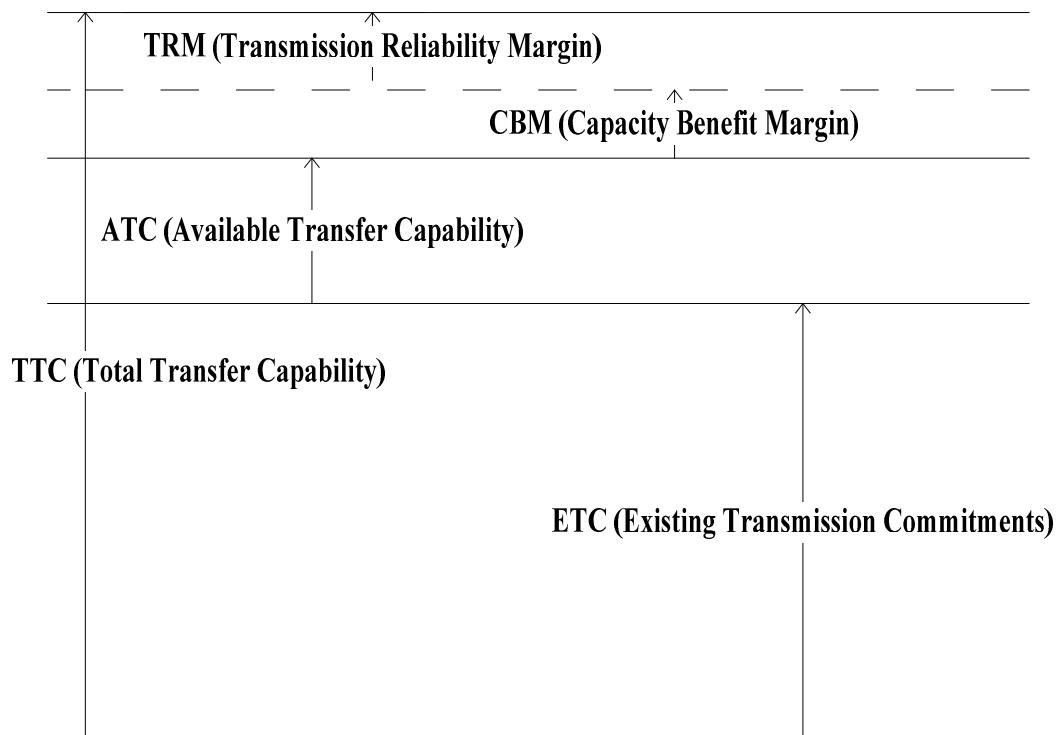
Ένα ΣΗΕ διατρέχει μεγάλο κίνδυνο απώλειας της ευστάθειας λειτουργίας του όσο αυξάνεται το φορτίο του. Πλέον, η διαρκής αύξηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια θα έπρεπε να επιβάλλει την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς των ηλεκτρικών δικτύων. Ωστόσο, λόγω οικονομικών και περιβαλλοντικών περιορισμών δυσχεραίνεται η κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς, για την ικανοποίηση των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εντατικότερη χρήση των ήδη διαθέσιμων δικτύων ΣΗΕ. Στα άρθρα [7],[15],[50],[55],[80],[81],[95] η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης ασχολείται με τη μεγιστοποίηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς (ATC, Available Transfer Capability) του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση λαμβάνονται υπόψιν η τοποθεσία, το μέγεθος και το είδος του ΕΣΜ, που τοποθετείται στο δίκτυο. Σε μία απελευθερωμένη δομή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας και οι πελάτες μοιράζονται ένα κοινό δίκτυο μεταφοράς από το σημείο παραγωγής στο σημείο της κατανάλωσης. Σε αυτό το ανοιχτό περιβάλλον πρόσβασης, ο καθένας μπορεί να προσπαθήσει να παράγει ενέργεια από την φθηνότερη πηγή για μεγαλύτερο περιθώριο κέρδους, το οποίο όμως μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτωση και συμφόρηση σε ορισμένους διαδρόμους του δικτύου μεταφοράς. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στη ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, στα όρια της τάσης και στην ευστάθεια του συστήματος και έτσι να κινδυνεύσει η ασφάλειά του [80]. Έτσι οι εταιρείες κοινής ωφέλειας πρέπει να προσδιορίζουν επαρκώς τη διαθέσιμη ικανότητα μεταφορά τους (ATC, Available Transfer Capability) ώστε η αξιοπιστία του συστήματος να είναι εξασφαλισμένη, ενώ εξυπηρετείται ένα ευρύ φάσμα διμερών και πολυμερών συναλλαγών. Η Διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς είναι η ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που παραμένει στην γραμμή μεταφοράς για περαιτέρω εμπορική δραστηριότητα, επιπλέον από αυτή που έχει ήδη εκχωρηθεί, χωρίς να κινδυνεύσει η ασφάλεια του ΣΗΕ [50]. Η διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς πρέπει να υπολογιστεί για τη συναλλαγή ισχύος μεταξύ δύο ζυγών ή δύο περιοχών για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια. Αφού οι συνθήκες του ΣΗΕ αλλάζουν συνεχώς, η διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς πρέπει συνεχώς να ανανεώνεται [50].

Η διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς είναι ένα μέτρο της ικανότητας μεταφοράς (TC, Transfer Capability) που παραμένει στο φυσικό δίκτυο μεταφοράς για περαιτέρω εμπορική δραστηριότητα πέραν από τις ήδη υπάρχουσες χρήσεις. Ορίζεται με την ακόλουθη μαθηματική σχέση (Σχήμα 3.2) [80]:

$$ATC = TTC - TRM - ETC - CBM \quad (3.10)$$

όπου η συνολική ικανότητα μεταφοράς (TTC, Total Transfer Capability) είναι η το μέγιστο πρόγραμμα ανταλλαγών μεταξύ δύο περιοχών ελέγχου [15], το οποίο είναι συμβατό με τα λειτουργικά πρότυπα ασφάλειας που εφαρμόζονται σε κάθε ΣΗΕ, όταν διάφορα χαρακτηριστικά του ΣΗΕ είναι γνωστά εκ των προτέρων, όπως οι μελλοντικές συνθήκες του ΣΗΕ, η παραγωγή και η καμπύλη φορτίου. Οι υφιστάμενες δεσμεύσεις μεταφοράς (ETC, Existing Transmission Commitments) είναι το άθροισμα των υφιστάμενων δεσμεύσεων

μεταφοράς μεταξύ αυτών των περιοχών και είναι καθορισμένες για κάθε συγκεκριμένη συναλλαγή [50]. Το περιθώριο αξιοπιστίας μεταφοράς [80] (TRM, Transmission Reliability Margin) είναι ένα περιθώριο ασφαλείας που αντιμετωπίζει τις αβεβαιότητες των υπολογιζόμενων τιμών της συνολικής ικανότητας μεταφοράς, οι οποίες προκύπτουν από δυο λόγους. Πρώτον, λόγω ακούσιων αποκλίσεων των φυσικών ροών κατά τη διάρκεια των χειρισμών, λόγω της φυσικής λειτουργίας της δευτερεύουσας ρύθμισης και δεύτερον, λόγω έκτακτων ανταλλαγών μεταξύ των διαχειριστών συστημάτων για την αντιμετώπιση μη αναμενόμενων καταστάσεων. Το περιθώριο της ικανότητας μεταφοράς (CBM, Capacity Benefit Margin) ορίζεται ως το ποσό της ικανότητας μεταφοράς, το οποίο δεσμεύεται από τις εταιρίες εξυπηρέτησης του φορτίου (LSEs, load-serving entities), ώστε να εξασφαλίζεται η πρόσβαση στην παραγωγή από διασυνδεδεμένα συστήματα για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις αξιοπιστίας της παραγωγής [80].



**Σχήμα 3.2:** Γραφική αναπαράσταση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς και των σχετιζόμενων με αυτήν όρων.

### 3.3.3 Μεγιστοποίηση φόρτισης ΣΗΕ

Στα άρθρα [13],[24],[28],[44],[86],[88],[94],[96],[97] η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης που μελετάται είναι η μεγιστοποίηση της φόρτισης του ΣΗΕ (maximization system loadability) λαμβάνοντας υπόψιν την τοποθεσία, το μέγεθος, το είδος, τον αριθμό αλλά και τις παραμέτρους των ΕΣΜ, ανάλογα με την περίπτωση. Στο άρθρο [32] η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση της μέσης φόρτισης των υψηλά φορτισμένων γραμμών μεταφοράς του ΣΗΕ. Στόχος της βελτιστοποίησης σε αυτά τα άρθρα είναι να επιτευχθεί μία καλύτερη χρησιμοποίηση των υφιστάμενων γραμμών μεταφοράς. Τα ΕΣΜ τοποθετούνται με σκοπό τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος από το δίκτυο στους καταναλωτές [13], διατηρώντας την ασφάλεια του ΣΗΕ, χωρίς δηλαδή να παραβιάζονται οι περιορισμοί λειτουργίας του (όπως παραβιάσεις τάσεων ζυγών, υπερφορτώσεις κλάδων, παραβιάσεις θερμικών ορίων γραμμών).

Στα περισσότερα άρθρα [86],[88],[94],[96] η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζεται με την βοήθεια του συντελεστή φορτίου (load factor)  $\lambda$ . Έτσι, σκοπός του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση αυτού του συντελεστή με την τοποθέτηση των ΕΣΜ, τηρώντας ταυτόχρονα του λειτουργικούς περιορισμούς του ΣΗΕ. Έτσι η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει τη μορφή:

$$J = \text{Max}\{\lambda\} \quad (3.11)$$

Στο άρθρο [32] η αντικειμενική συνάρτηση αλλάζει λίγο, αφού σκοπός του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση της φόρτισης των υπερφορτισμένων γραμμών του δικτύου και έχει τη μορφή:

$$J = \text{Min}Z = \frac{1}{nl} \sum_{i=1}^{nl} \frac{MVA_i}{MVA_{i,\max}} \quad (3.12)$$

όπου  $nl$ : ο αριθμός των γραμμών μεταφοράς,  $MVA_i$ ,  $MVA_{i,\max}$ : φαινόμενη ισχύς στη γραμμή μεταφοράς  $i$  και μέγιστη φαινόμενη ισχύς στις γραμμή μεταφοράς  $i$ , αντίστοιχα.

### 3.3.4 Ελαχιστοποίηση κόστους συμφόρησης

Η αναδιάρθρωση της αγοράς ηλεκτρισμού έχει μεταβάλλει το ρόλο των παραδοσιακών συμμετεχόντων και έχει δημιουργήσει νέους συμμετέχοντες που λειτουργούν ανεξάρτητα. Οι συμμετέχοντες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στον ανεξάρτητο διαχειριστή συστήματος (Independent System Operator, ISO) και στους υπόλοιπους συμμετέχοντες. Ο ISO είναι ο κύριος συμμετέχοντας σε μία αγορά ηλεκτρισμού και καθορίζει τους κανόνες της. Οι βασικότεροι από τους υπόλοιπους συμμετέχοντες είναι οι εταιρείες παραγωγής (Generation Companies, GENCOs), οι εταιρείες διανομής (Distribution Companies, DISCOs), οι εταιρείες μεταφοράς (Transmission Companies, TRANSCOs), οι προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας (Retail Companies, RETAILCOs) και οι πελάτες. Τα μοντέλα αγοράς ηλεκτρισμού χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες [87]. Στο μοντέλο κοινοπραξίας (Pool model), όπου δεν υπάρχει

δυνατότητα απευθείας συναλλαγών μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών, αλλά όλη η ενέργεια αγοράζεται ή πωλείται μέσω της κεντρικής αγοράς. Στο μοντέλο διμερών συμβάσεων (Bilateral contract model), όπου γίνονται απευθείας συναλλαγές μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών, οι οποίοι διαπραγματεύονται ανεξάρτητα από τρίτους την ποσότητα και την τιμή της ενέργειας την οποία θα ανταλλάξουν σύμφωνα με δικούς τους οικονομικούς όρους. Τέλος, το υβριδικό μοντέλο (hybrid model) που συνδυάζει χαρακτηριστικά των δύο παραπάνω μοντέλων.

Η ύπαρξη των περιορισμών του δικτύου υπαγορεύει την πεπερασμένη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να μεταφερθεί μεταξύ δύο σημείων στο ΣΗΕ. Στην πράξη, μπορεί να μην είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν όλες οι διμερείς και πολυμερείς συμβάσεις είτε να ικανοποιηθεί πλήρως η ζήτηση σε ένα μοντέλο κοινοπραξίας λόγω της παραβίασης των λειτουργικών περιορισμών, όπως τα όρια τάσης και οι υπερφορτίσεις των γραμμών, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο επαναλαμβανόμενες ή μεγάλης διάρκειας διακοπές με ανεξέλεγκτη απώλεια φορτίου. Η παρουσία τέτοιων περιορισμών δικτύου ή μεταφοράς αναφέρεται ως συμφόρηση (congestion) [12]. Η διαχείριση της συμφόρησης (congestion management) είναι κύρια λειτουργία κάθε ISO και είναι η διαδικασία που εξασφαλίζει ότι το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας δεν παραβιάζει τα λειτουργικά του όρια. Η διαχείριση της συμφόρησης αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ζήτημα για τα ΣΗΕ και αν δεν εφαρμοστεί σωστά μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο στο εμπόριο της ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος για την αντιμετώπιση της συμφόρησης μπορεί να αυξηθεί σε τέτοια επίπεδα που να δυσχεραίνουν, επίσης, το εμπόριο της ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτό το λόγο, η μελέτη αυτού του φαινομένου και οι τρόποι αντιμετώπισής του, με όσο το δυνατόν λιγότερο κόστος, αποτελεί σημαντικό ζήτημα [12]. Στα άρθρα [12],[17],[84],[87] η μείωση του κόστους συμφόρησης (congestion cost, CC) του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Η μέθοδος της τοπικής οριακής τιμής (Locational Marginal Price, LMP) είναι αυτή που δίνει τα κατάλληλα σήματα στην αγορά και θεωρείται ότι είναι η καλύτερη τιμολογιακή πολιτική από επιστημονικής άποψης. Η τοπική οριακή τιμή ορίζεται ως το επιπλέον κόστος για την εξυπηρέτηση ενός επιπλέον MW φορτίου σε οποιοδήποτε ζυγό του συστήματος με την προϋπόθεση ότι τηρούνται όλοι οι περιορισμοί του δικτύου. Όταν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί των γραμμών μεταφοράς του δικτύου όλοι οι ζυγοί έχουν την ίδια LMP, η οποία είναι ίση με το κόστος του τελευταίου MW παραγωγής που προκύπτει από την κατανομή του φορτίου στις μονάδες παραγωγής ξεκινώντας από την ελάχιστη προσφορά των γεννητριών. Δηλαδή το συνολικό φορτίο εξυπηρετείται από το ελάχιστο κόστος παραγωγής. Σε αυτή την περίπτωση, η αύξηση της ζήτησης του φορτίου σε κάποιο ζυγό δεν θα προκαλέσει συμφόρηση σε κάποια γραμμή του δικτύου. Οι τοπικές οριακές τιμές καθορίζονται από τον ISO, μέσω της επίλυσης του προβλήματος μεγιστοποίησης του κοινωνικού οφέλους με περιορισμούς μεταφοράς. Η μέθοδος αυτή ταιριάζει περισσότερο σε μοντέλα αγοράς τύπου κοινοπραξίας. Αν οι ροές όλων των γραμμών είναι μικρότερες από τη μέγιστη ικανότητά τους, τότε καμία γραμμή δεν είναι συνωστισμένη και έτσι το κόστος συμφόρησης είναι μηδενικό. Συμφόρηση συμβαίνει όταν η διαθέσιμη παραγωγή χαμηλού κόστους δεν μπορεί να μεταφερθεί σε κάποιο ζυγό φορτίου εξαιτίας των περιορισμών μεταφοράς. Έτσι, για να μην παραβιαστούν τα όρια των γραμμών, η παραγωγή κατανέμεται σε μεγαλύτερου κόστους γεννήτριες, ενώ κάποιες γραμμές χρησιμοποιούνται 100% (ύπαρξη δεσμευτικών ορίων). Τότε οι LMP των ζυγών διαφέρουν μεταξύ τους από ζυγό σε ζυγό και

μπορεί να είναι μεγαλύτερες από τις προσφορές των γεννητριών. Έτσι προκύπτει κόστος συμφόρησης.

Έτσι, σκοπός του προβλήματος βελτιστοποίησης εδώ είναι να βρεθεί η ελάχιστη τιμή του κόστους συμφόρησης του συστήματος, ανάλογα με την τοποθεσία και το είδος του ΕΣΜ που εγκαθίσταται κάθε φορά, ενώ ικανοποιούνται οι αναγκαίοι περιορισμοί. Η αντικειμενική συνάρτηση στα άρθρα [84],[87] παίρνει τη μορφή:

$$J = \min CC = \min \sum_{d=1}^{nd} \Delta C(P_g^{up}) + \sum_{d=1}^{nd} \Delta C(P_g^{down}) \quad (3.13)$$

όπου

$$\Delta C(P_g^{up}) = k_1 \cdot \Delta P_g^{up} \cdot bsmva + R_g^{up} \quad (3.14)$$

$$\Delta C(P_g^{down}) = k_2 \cdot \Delta P_g^{down} \cdot bsmva + R_g^{down} \quad (3.15)$$

όπου τα συστατικά του κόστους συμφόρησης (CC) είναι το άθροισμα των γραμμικών συναρτήσεων προσφοράς, μείωσης και αύξησης παραγωγής, των GENCOs, που υποβάλλονται στο ISO για την διαχείριση της συμφόρησης, bsmva: η βασική ισχύς σε MVA,  $R_g^{up}$ ,  $R_g^{down}$ : το άνω και κάτω συστατικό κόστους των γραμμικών συναρτήσεων προσφοράς που υποβλήθηκαν (σε χρ.μον./h),  $k_1, k_2$ : σταθερές κόστους των συναρτήσεων προσφοράς που υποβλήθηκαν στο ISO (σε χρ.μον./MW). Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ικανοποιητική διαχείριση της συμφόρησης μπορεί να γίνει με τη βελτίωση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς του ΣΗΕ [80]. Από αυτό γίνεται κατανοητή η σχέση που έχουν αυτές οι δύο έννοιες.

### 3.3.5 Ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους ΣΗΕ και κόστους επένδυσης ΕΣΜ

Στα άρθρα [18],[34],[60],[69],[92] η μείωση του λειτουργικού κόστους του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Επιδιώκεται το, όσο το δυνατόν μικρότερο, λειτουργικό κόστος, πράγμα που θα επιτευχθεί με την ενίσχυση, τον εκσυγχρονισμό και την αυτοματοποίηση του δικτύου, αλλά και με την εστίαση μας στην ιδιαίτερη εξέταση της κάθε συνιστώσας του κόστους λειτουργίας. Η κυριότερη συνιστώσα του κόστους λειτουργίας του συστήματος είναι το κόστος παραγωγής των μονάδων του δικτύου (κόστος καυσίμου). Το κόστος παραγωγής ή κόστος λειτουργίας των μονάδων του συστήματος αποτελεί μεταβλητό κόστος και είναι συνάρτηση της ισχύος εξόδου των μονάδων. Οι μονάδες του συστήματος οφείλουν να λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιείται το συνολικό φορτίο με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Σε αυτά τα άρθρα παρουσιάζονται προβλήματα βέλτιστης ροής φορτίου (optimal power flow, OPF) με τη χρησιμοποίηση διαφόρων ΕΣΜ, που πραγματεύονται ανάλογα την περίπτωση τη βέλτιστη τοποθέτηση, τη διαστασιολόγηση και τον αριθμό των ΕΣΜ. Το γενικό πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου έχει να κάνει με την ελαχιστοποίηση μιας γενικής αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία εξαρτάται από ένα σύνολο μεταβλητών με την

προϋπόθεση ότι τηρούνται ταυτόχρονα κάποιοι περιορισμοί ως προς τις τιμές των μεταβλητών αυτών. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να πάρει πολλές μορφές, όπως για παράδειγμα η ελαχιστοποίηση των απωλειών μεταφοράς του συστήματος, η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας των γεννητριών για την βέλτιστη κατανομή του συνολικού φορτίου ανάμεσα στις μονάδες παραγωγής, η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής των γεννητριών (κόστος καυσίμου). Οι λύσεις του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου διεξάγονται για να προσδιοριστεί η βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας ενός ΣΗΕ, ενώ αυτό υπόκειται σε φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς [69]. Η γενική μορφή ενός προβλήματος (OPF) περιγράφεται από το σύνολο των παρακάτω εξισώσεων [92]:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(x, u) \\ & \text{έτσι ώστε} \\ & g(x, u) = 0 \\ & h(x, u) \leq 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

όπου  $f$ : αντικειμενική συνάρτηση προβλήματος βελτιστοποίησης,  $g$ : περιορισμοί ισότητας διανυσμάτων  $x$  και  $u$ ,  $h$ : ανισωτικοί περιορισμοί διανυσμάτων  $x$  και  $u$ ,  $x$ : διάνυσμα μεταβλητών απόφασης και  $u$ : διάνυσμα εξαρτημένων μεταβλητών.

Στα προαναφερόμενα άρθρα το πρόβλημα βελτιστοποίησης προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος παραγωγής ενεργού ισχύος του ΣΗΕ (ή αλλιώς συνολικό κόστος καυσίμου). Συγκεκριμένα στα άρθρα [18],[34],[69],[92] το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος επιλύεται με τη βοήθεια του μοντέλου κόστους καυσίμου τετραγωνικής μορφής και η αντικειμενική συνάρτηση των προβλημάτων βελτιστοποίησης παίρνει τη μορφή:

$$J = \min C_t = \min \sum_{i \in N_g} C_i(P_{g_i}) \quad (\text{σε χρ.μον./ώρα}) \quad (3.17)$$

όπου

$$C_i(P_{g_i}) = a_i + b_i P_{g_i} + c_i P_{g_i}^2 \quad (3.18)$$

όπου  $P_{g_i}$ : η παραγωγή ενεργού ισχύος στο ζυγό  $i$ ,  $a_i, b_i, c_i$ : οι συντελεστές κόστους της  $i$ -οστής παραγωγικής μονάδας,  $N_g$ : οι ζυγοί παραγωγής. Στο άρθρο [60] η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους παραγωγής ενεργού ισχύος συμπεριλαμβάνει και το κόστος απωλειών του ΣΗΕ.

Στα άρθρα [14],[21],[49],[62],[64],[79] η μείωση του κόστους επένδυσης των ΕΣΜ και του λειτουργικού κόστους του συστήματος είναι η αντικειμενική συνάρτηση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που αναλύεται σε κάθε άρθρο. Μοιάζει με την προηγούμενη περίπτωση απλά εδώ μελετάται και η μείωση του κόστους επένδυσης των ΕΣΜ (ή αλλιώς το κόστος εγκατάστασής τους στο ΣΗΕ), και εξετάζεται η βέλτιστη τοποθεσία ή/και η διαστασιολόγηση ή/και ο τύπος των ΕΣΜ για την βελτιστοποίηση αυτού του μεγέθους, αναλόγως το πρόβλημα που μελετάται κάθε φορά. Στο άρθρο [68] η ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης των ΕΣΜ και του κόστους ασφαλείας του ΣΗΕ αποτελούν τη συνάρτηση ως προς ελαχιστοποίηση.

Στο άρθρο [14] σκοπός της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η μείωση του κόστους παραγωγής και του κόστους εγκατάστασης των ΕΣΜ, που σε αυτή την περίπτωση είναι το TCSC και το TCPAR, σε ένα υβριδικό μοντέλο αγοράς ηλεκτρισμού. Η αντικειμενική συνάρτηση έχει τη μορφή:

$$J = \min_{P_{pi}} \sum_{i \in I_G} C_i(P_{pi}) - \sum_{j \in I_D} B_j(D_{pj}) + C_{TCSC}^t \quad (3.19)$$

όπου

$$C_{TCSC}^t = \frac{\alpha \cdot C_{TCSC}(k)}{8760} \quad (3.20)$$

όπου το κόστος του TCSC στη γραμμή k:

$$C_{TCSC}(k) = c \cdot x_c(k) \cdot P_t^2 \cdot \text{base\_power} \quad (3.21)$$

και ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου (capital recovery factor, CRF)  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (3.22)$$

όπου  $I_G, I_D$ : οι ζυγοί παραγωγής και φορτίου του μοντέλου κοινοπραξίας, αντίστοιχα,  $P_{pi}, D_{pj}$ : η ενεργός ισχύς της γεννήτριας- $i$  με τιμή προσφοράς  $C_i$  και η ενεργός ισχύς του φορτίου- $j$  με τιμή προσφοράς  $B_j$  του μοντέλου κοινοπραξίας, αντίστοιχα,  $c$ : το μοναδιαίο κόστος επένδυσης (χρ.μον./MVAR),  $x_c(k)$ : η σειριακή χωρητική αντίδραση,  $P_t$ : η ροή ισχύος στη γραμμή k,  $r$ : το επιτόκιο,  $n$ : σχέδιο ανάκτησης κεφαλαίου (χρόνια). Η παραπάνω ανάλυση γίνεται όταν επιλέγεται να εγκατασταθεί TCSC, ενώ όταν τοποθετείται TCPST ο όρος  $C_{TCSC}^t$  παραλείπεται και στη θέση του δεν μπαίνει τίποτα αφού το κόστος του TCPST είναι το ίδιο για όλες τις γραμμές. Παρεμφερής είναι και η αντικειμενική συνάρτηση στο άρθρο [49], που εξετάζεται μόνο η περίπτωση εγκατάστασης TCSC και η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την πιο απλοποιημένη μορφή:

$$J = \min_{P_{pi}} \sum_{i \in I_G} C_i(P_{pi}) + C_{TCSC}(k) \quad (3.23)$$

Στο άρθρο [62] σκοπός της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής της ενεργού και αέργου ισχύος και του κόστους των επιλεγμένων για τοποθέτηση ΕΣΜ για ένα ορισμένο εύρος λειτουργικών συνθηκών. Τέσσερα (4) διαφορετικά ΕΣΜ τοποθετούνται στο ΣΗΕ (TCSC, SVC, TCPST, TCVR). Η αντικειμενική συνάρτηση έχει τη μορφή:

$$J = \min \sum_{ii=1}^{OC} \left( \sum_{i=1}^n (C_{Pi} + C_{Qi}) \right) + \sum_{j=1}^m C_{FACTSj} \quad (3.24)$$

όπου  $C_{Pi}, C_{Qi}, C_{FACTSj}$ : συνάρτηση κόστους ενεργού ισχύος, συνάρτηση κόστους αέργου ισχύος και η συνάρτηση κόστους των κατανεμημένων ΕΣΜ, αντίστοιχα,  $OC, n, m$ : ο αριθμός λειτουργικών συνθηκών, ο αριθμός των γεννητριών και ο αριθμός των ΕΣΜ, αντίστοιχα. Οι



συναρτήσεις κόστους ενεργού και αέργου ισχύος έχουν τη μορφή πολυωνύμου δεύτερης και πρώτης τάξης αντίστοιχα με του συντελεστές να είναι συγκεκριμένοι:

$$C_p = a_2 P + a_1 P + a_0 \quad (\text{χρ.μον./h}) \quad (3.25)$$

$$C_Q = \beta_1 Q + \beta_0 \quad (\text{χρ.μον./h}) \quad (3.26)$$

Οι συναρτήσεις κόστους διαφέρουν για καθένα από τα 4 ΕΣΜ. Οι συναρτήσεις κόστους του SVC και του TCSC είναι και αυτές πολυώνυμα δευτέρου βαθμού με μεταβλητή το μέγεθος του ΕΣΜ σε KVAR.

$$C_{SVC} = 0.0003S^2 - 0.3051S + 127.38 \quad (\text{χρ.μον./KVAR}) \quad (3.27)$$

$$C_{TCSC} = 0.0015S^2 - 0.713S + 153.75 \quad (\text{χρ.μον./KVAR}) \quad (3.28)$$

Εν αντιθέσει, οι συναρτήσεις κόστους των TCPST και TCVR είναι σταθερές για όλο το ΣΗΕ. Στο άρθρο [79] η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ίδια με το άρθρο [62] μόνο που εδώ μελετάται μόνο η τοποθέτηση του UPFC, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν διάφορες λειτουργικές συνθήκες και η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την απλουστευμένη μορφή:

$$J = \min \sum_{i=1}^n (C_{P_i} + C_{Q_i}) + \sum_{j=1}^m C_{UPFC_j}^t \quad (3.29)$$

όπου η ετήσια συνάρτηση κόστους του UPFC (χρ.μον./h):

$$AIC_{UPFC} = C_{UPFC_j}^t = IC_{UPFC} \cdot a = \frac{C_{UPFC_j} \cdot S_j \cdot 1000 \cdot a}{8760} \quad (3.30)$$

όπου  $IC_{UPFC}$ : το συνολικό κόστος επένδυσης του UPFC,  $C_{UPFC_j}$ : η συνάρτηση κόστους του UPFC, που είναι πολυώνυμο δευτέρου βαθμού με μεταβλητή το μέγεθος του UPFC σε KVAR:

$$C_{UPFC_j} = 0.0003S_j^2 - 0.2691S_j + 188.22 \quad (\text{χρ.μον./KVAR}) \quad (3.31)$$

$S_j$ : το εύρος λειτουργίας των ΕΣΜ σε MVA,  $a$ : ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου. Οι συναρτήσεις κόστους ενεργού και αέργου ισχύος έχουν την ίδια μορφή με τις εξισώσεις (3.25) και (3.26), με διαφορετικούς συντελεστές.

Στο άρθρο [21] η αντικειμενική συνάρτηση σκοπεύει στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του κόστους εγκατάστασης και του λειτουργικού κόστους σε φυσιολογικές συνθήκες αλλά και σε συνθήκες διαταραχών. Το πρόβλημα σε αυτό το άρθρο χωρίζεται σε τρία στάδια, στο στάδιο της φυσιολογικής περίπτωσης Α, στο στάδιο αμέσως μετά την **διαταραχή** Β και στο στάδιο C, που είναι το στάδιο του διορθωμένου ελέγχου. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος έχει τη μορφή:

$$J = \min F = \min F_{lt} + F_A + \sum_{k=1}^m (F_B^{(k)} + F_C^{(k)}) \quad (3.32)$$

όπου

$$F_{lt}(c_{lt}) = \sum_{i \in \Omega} (\mu_{fi} + \mu_{vi} c_{lti}) d_i \quad (3.33)$$

$$F_A = F_{EC} + \omega(\bar{\lambda}_A) F_{BD} \quad (3.34)$$

$$F_B = \alpha^{(k)} \beta^{(k)} (\bar{\lambda}_B) F_{BD} \quad (3.35)$$

$$F_C = \alpha^{(k)} (1 - \beta^{(k)} (\bar{\lambda}_B)) (F_{CC} + \gamma^{(k)} (\bar{\lambda}_C) F_{BD}) \quad (3.36)$$

όπου  $F_A, F_B, F_C, F_{EC}, F_{BD}, F_{CC}, F_{lt}$  : το λειτουργικό κόστος της φυσιολογικής περίπτωσης, το κόστος αμέσως μετά την απρόβλεπτη περίπτωση, το κόστος διορθωτικού σταδίου απρόβλεπτης περίπτωσης  $k$ , το κόστος παραγωγής ή το κόστος απωλειών ισχύος, η κατανομή του κόστους, το κόστους του διορθωμένου ελέγχου και το συνολικό κόστος επένδυσης, αντίστοιχα,  $\bar{\lambda}_A, \bar{\lambda}_B, \bar{\lambda}_C$  : τιμές παραμέτρων φορτίων για τα τρία στάδια, αντίστοιχα,  $\alpha^{(k)}$  : πιθανότητα να συμβεί η απρόβλεπτη περίπτωση  $k$ ,  $\omega, \beta, \gamma$  : κατανομές πιθανοτήτων στα στάδια A,B,C, αντίστοιχα,  $\mu_{fi}, \mu_{vi}, c_{lti}, d_i$  : το σταθερό κόστος για την υποψήφια συσκευή ΕΣΜ  $i$ , το μεταβλητό κόστος για την υποψήφια συσκευή ΕΣΜ  $i$ , το μέγεθος του επιπροσθέτου VAR της συσκευής  $i$ , ο αριθμός 1 όταν η περιοχή  $i$  επιλέγεται για την τοποθέτηση του ΕΣΜ, 0 διαφορετικά, αντίστοιχα,  $\Omega$ : όλες οι πιθανές τοποθεσίες για το ΕΣΜ,  $m$ : ο αριθμός των απρόβλεπτων περιπτώσεων.

Στο άρθρο [64] η αντικειμενική συνάρτηση, που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, κατά τη διάρκεια της κατανομής των ΕΣΜ είναι  $J = \min(f_1 + f_2)$ , όπου  $f_1, f_2$  : το κόστος υπερφόρτωσης σε γραμμές και μετασχηματιστές και το κόστος των TCPSTs που τοποθετούνται, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, οι συναρτήσεις  $f_1, f_2$  έχουν τη μορφή:

$$f_1 = \text{Penalty} \cdot \sum_{im \in \Omega} (PI_{im} - PI_{im}^{\max}) \cdot nH \cdot nY \quad (3.37)$$

$$f_2 = \sum_{im \in \Omega} \alpha \cdot SI_{\max, im} \quad (3.38)$$

όπου penalty: η αξία της τιμωρίας που καταβάλλεται από το δίκτυο μεταφοράς λόγω της συμφόρησης (χρ.μον./kWh),  $\Omega$ : ο αριθμός των κλάδων με παραβιασμένα τα όρια ενεργού ισχύος,  $PI_{im}^{\max}$  : η μέγιστη ροή ενεργού ισχύος από τον ζυγό  $i$  στον ζυγό  $m$ ,  $nH, nY$  : ο αριθμός ωρών ανά έτος του θεωρούμενου επιπέδου φόρτισης και ο αριθμός χρόνων που μελετιούνται,

αντίστοιχα,  $n$ : το σύνολο των κλάδων που τοποθετούνται TCPST,  $a$ : το κόστος TCPST (χρ.μον./KVA),  $SI_{\max,im}$ : η μέγιστη ροή φαινόμενης ισχύος στον κλάδο που έχει τοποθετηθεί το TCPST.

Τέλος, στο άρθρο [68] η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους ασφάλειας του ΣΗΕ μαζί με το λειτουργικό κόστος υπό φυσιολογικές και απρόβλεπτες συνθήκες. Τα ΕΣΜ που τοποθετούνται σε αυτό το άρθρο είναι το SVC και το TCSC. Οπότε, η αντικειμενική συνάρτηση έχει τη μορφή:

$$J = \min \text{Total Cost} = \min[\text{AIC}_{\text{devices}} - \Delta \text{ESC}] = \min[\text{AIC}_{\text{devices}} - (\text{ESC}_{\text{χωρίς ΕΣΜ}} - \text{ESC}_{\text{με ΕΣΜ}})] \quad (3.39)$$

όπου  $\text{AIC}_{\text{devices}}$ : το ετήσιο κόστος επένδυσης των ΕΣΜ,  $\Delta \text{ESC}$ : το κέρδος σε κόστος ασφάλειας ΣΗΕ λόγω της εγκατάστασης των συσκευών ΕΣΜ που ορίζεται με τη διαφορά μεταξύ του ετήσιου κόστους ασφάλειας ΣΗΕ χωρίς και με ΕΣΜ,

$$\text{AIC}_{\text{devices}} = \text{IC}_{\text{devices}} \frac{ir(1+ir)^{LT}}{(1+ir)^{LT} - 1} \quad (3.40)$$

όπου

$$\text{IC}_{\text{dev}} = \sum_{m \in M} S_{\text{TCSC},m} \cdot C_{\text{TCSC},m} + \sum_{n \in N} S_{\text{SVC},n} \cdot C_{\text{SVC},n} \quad (3.41)$$

όπου  $C_{\text{SVC}}$ ,  $C_{\text{TCSC}}$  δίνονται από τις σχέσεις (3.27),(3.28), αντίστοιχα,  $ir$ : το επιτόκιο,  $LT$ : η διάρκεια ζωής των συσκευών ΕΣΜ,  $\text{IC}_{\text{dev}}$ : το συνολικό κόστος επένδυσης των ΕΣΜ,  $S_{\text{SVC}}$ ,  $S_{\text{TCSC}}$ : η ικανότητα των SVC,TCSC σε MVAR, αντίστοιχα,  $n$ ,  $m$ : υποψήφιες τοποθεσίες για SVC και TCSC, αντίστοιχα,

$$\text{ESC} = \sum_{t=1}^T [\pi^{(0,t)} C^{(0,t)} + \sum_{k=1}^K \pi^{(k,t)} C^{(k,t)}] \quad (3.42)$$

όπου  $C^{(0,t)}$ ,  $C^{(k,t)}$ : το ωριαίο λειτουργικό κόστος φυσιολογικής και απρόβλεπτης συνθήκης  $k$  για επίπεδο φόρτισης  $t$ , αντίστοιχα,  $\pi^{(k,t)}$ : το γινόμενο της συχνότητας και της διάρκειας της απρόβλεπτης συνθήκης  $k$  σε ένα χρόνο για επίπεδο φόρτισης  $t$ .

### 3.3.6 Μεγιστοποίηση χρησιμότητας καταναλωτή, ελαχιστοποίηση απωλειών ΣΗΕ και βελτίωση των τάσεων του ΣΗΕ

Στα άρθρα [31],[66],[75],[90] η αύξηση της κοινωνικής ευημερίας (social welfare), ορισμένες φορές ονομάζεται και χρησιμότητα του καταναλωτή (consumer utility), είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Στο άρθρο [66] ένα διπλής-δράσης μοντέλο κοινοπραξίας αγοράς ηλεκτρισμού χρησιμοποιείται για την κατανομή της παραγωγής και του φορτίου με οικονομικό τρόπο. Ο σκοπός της λειτουργίας της αγοράς είναι να μεγιστοποιηθεί το όφελος του καταναλωτή με τη

βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση του SSSC στο ΣΗΕ. Η αντικειμενική συνάρτηση, οπότε, παίρνει τη μορφή:

$$J = \max \left\{ \sum_{j=1}^{N_D} (\alpha_{dj} + b_{dj} P_{Dj} + c_{dj} P_{Dj}^2) - \sum_{i=1}^{N_G} [(\alpha_{gi} + b_{gi} P_{Gi} + c_{gi} P_{Gi}^2) + |e_{gi} \cdot \sin(f_{gi} \cdot (P_{Gi} - P_{\min_i}))|] - \text{cost}(\text{SSSC}) \right\} \quad (3.43)$$

όπου το κόστος του SSSC:

$$\text{cost}(\text{SSSC}) = \text{SSSC\_capacity} \cdot n \cdot \text{CRF} \quad (3.44)$$

η συνάρτηση κέρδους των εταιρειών διανομής (DISCOs benefit function):

$$B(P_D) = \sum_{j=1}^{N_D} (\alpha_{dj} + b_{dj} P_{Dj} + c_{dj} P_{Dj}^2) \quad (3.45)$$

η συνάρτηση κόστους των εταιρειών παραγωγής (GENCOs cost function) με έναν επιπρόσθετο ημιτονοειδές όρο για να μοντελοποιεί τη μη γραμμικότητα (valve effects) στο κόστος καυσίμου:

$$C(P_G) = \sum_{i=1}^{N_G} (\alpha_{gi} + b_{gi} P_{Gi} + c_{gi} P_{Gi}^2) + |e_{gi} \cdot \sin(f_{gi} \cdot (P_{Gi} - P_{\min_i}))| \quad (3.46)$$

όπου  $\alpha_{dj}, b_{dj}, c_{dj}$ : οι συντελεστές της συνάρτησης κέρδους,  $\alpha_{gi}, b_{gi}, c_{gi}, e_{gi}, f_{gi}$ : οι συντελεστές της συνάρτησης κόστους,  $P_{Dj}, N_D$ : κατανεμημένο φορτίο στον κόμβο  $j$  και ο αριθμός φορτίων, αντίστοιχα,  $P_{Gi}, N_G$ : η κατανεμημένη παραγωγή στον κόμβο  $i$  και ο αριθμός των γεννητριών, αντίστοιχα,  $n$ : συντελεστής κόστους επένδυσης του SSSC, CRF: κόστος ανάκτησης κεφαλαίου, που δίνεται από τη σχέση (3.22).

Στα άρθρο [75],[90] κυριαρχεί ένα μοντέλο αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας της ακόλουθης μορφής: οι εταιρείες παραγωγής που συμμετέχουν στην κοινοπραξία προσφέρουν παραγόμενη ισχύ με συγκεκριμένη συνάρτηση κόστους και επιθυμούν να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή τους. Ομοίως, τα φορτία προσφέρουν καταναλισκόμενη ισχύ με συγκεκριμένη συνάρτηση κόστους, καθώς και τη μέγιστη ζήτηση, την οποία επιθυμούν να αγοράσουν από την κοινοπραξία. Οπότε ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$P_d^T = P_d^P + P_d^{bt}, \quad P_g^T = P_g^P + P_g^{bt} \quad (3.47)$$

όπου  $P_d^P, P_g^P$ : διανύσματα ζήτησης και παραγωγής ενεργού ισχύος στην κοινοπραξία,  $P_d^T, P_g^T$ : διανύσματα συνολικής ζήτησης και παραγωγής ενεργού ισχύος,  $P_d^{bt}, P_g^{bt}$ : διμερείς συναλλαγές ζήτησης και παραγωγής ενεργού ισχύος. Στο άρθρο [75] το ΕΣΜ που τοποθετείται στο ΣΗΕ είναι το UPFC, ενώ στο άρθρο [90] είναι το TCSC. Η αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στην μεγιστοποίηση του κοινωνικού οφέλους του καταναλωτή με την ταυτόχρονη μείωση του κόστους παραγωγής και του κόστους επένδυσης του ΕΣΜ και έχει την εξής μορφή:

$$J = \max \left\{ \sum_{j=1}^{n_D} B_j(Pd_j^P) - \sum_{i=1}^{n_G} C_i(Pg_i^P) - \sum_{k=1}^{N_{ΕΣΜ}} AIC_{ΕΣΜ}(k) \right\} \quad (3.48)$$

όπου  $n_D, n_G, n_{ΕΣΜ}$ : ο αριθμός ζυγών φορτίου, ο αριθμός ζυγών παραγωγής, και ο αριθμός ΕΣΜ (UPFC για το άρθρο [75], TCSC για το άρθρο [90]), αντίστοιχα,  $AIC_{ΕΣΜ}(k)$ : το κόστος επένδυσης ΕΣΜ σε ετήσια βάση (χρ.μον./h.), που δίνεται από τον τύπο (3.37) και είναι διαφορετικός για το UPFC και διαφορετικός για το TCSC, αφού τα δύο ΕΣΜ έχουν διαφορετικές συναρτήσεις κόστους (τύπος (3.28) για TCSC, τύπος (3.31) για UPFC),  $C_i(Pg_i^P)$ : η καμπύλη κόστους παραγωγής, που προσφέρεται στην κοινοπραξία με την παραγωγή στο ζυγό  $i$ ,  $B_j(Pd_j^P)$ : η καμπύλη κέρδους για το φορτίο, η οποία είναι εξαρτημένη από την τιμή. Αναπαριστά την τιμή, που το φορτίο είναι σε θέση να πληρώσει για να αγοράσει μία ποσότητα ενέργειας  $Pd_j^P$ . Στον τύπο (3.48) μπορεί να προστεθεί ακόμη ένας όρος, ο  $E_{bt}(T_s^{bt})$ , ο οποίος να αντιπροσωπεύει όλες τις ταυτόχρονες διμερείς συναλλαγές που είναι έτοιμες να πληρώσουν την οριακή τιμή του ΣΗΕ για τη μεταφορά ισχύος  $T_s^{bt}$  διαμέσου του δικτύου μεταφοράς, και η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει τότε τη μορφή:

$$J = \max \left\{ \sum_{j=1}^{n_D} B_j(Pd_j^P) + \sum_{bt=1}^{ntr} E_{bt}(T_s^{bt}) - \sum_{i=1}^{n_G} C_i(Pg_i^P) - \sum_{k=1}^{N_{ΕΣΜ}} AIC_{ΕΣΜ}(k) \right\} \quad (3.49)$$

όπου  $ntr$ : ο αριθμός των διμερών συναλλαγών. Όπως είναι λογικό οι αντικειμενικές συναρτήσεις, οι οποίες δίνουν αποτελέσματα σε χρ.μον./h., των άρθρων αυτών, αλλά και του [66], που αναφέρθηκε παραπάνω, είναι παρεμφερείς.

Επίσης από τον τύπο (3.48) μπορεί να αφαιρεθεί ένας όρος και να πάρει τη μορφή

$$J = \max \left\{ \sum_{j=1}^{n_D} B_j(Pd_j^P) - \sum_{i=1}^{n_G} C_i(Pg_i^P) \right\} = \min \left\{ \sum_{i=1}^{n_G} C_i(Pg_i^P) - \sum_{j=1}^{n_D} B_j(Pd_j^P) \right\} \quad (3.50)$$

όπως στα άρθρα [45],[51] που σκοπός της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας σε ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος, έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι κομβικές τιμές ενεργού και αέργου ισχύος (nodal active and reactive power price) με την τοποθέτηση συσκευών SVC και UPFC στο ΣΗΕ, αντίστοιχα. Εδώ οι συναρτήσεις  $C_i(Pg_i^P)$ ,  $B_j(Pd_j^P)$ : αποκαλούνται ως συνάρτηση προσφοράς  $i$ -στου παραγωγού και συνάρτηση προσφοράς  $i$ -στου αγοραστή, αντίστοιχα. Επίσης, στο άρθρο [37] μελετάται το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος με την αντικειμενική συνάρτηση του τύπου (3.50), μέσω της βέλτιστης τοποθέτησης του TCSC, μόνο που σκοπός της ανάλυσης σε αυτό το άρθρο είναι η ελαχιστοποίηση, είτε του εύρους συμφόρησης, είτε του συνολικού κόστους παραγωγής του ΣΗΕ.

Στα άρθρα [3],[33],[48] η μείωση των απωλειών ισχύος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αντικειμενική συνάρτηση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την μορφή:

$$J = \min F = \min \sum_{l=1}^{nl} P_l \quad (3.51)$$

όπου  $nl$ : ο αριθμός των γραμμών μεταφοράς του δικτύου,  $P_l$ : οι απώλειες ισχύος του ΣΗΕ στη γραμμή  $l$ .

Στα άρθρα [52],[61] η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος έχει ως σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού βυθίσεων τάσης στο ΣΗΕ, ώστε να βελτιωθεί το προφίλ τάσης του δικτύου. Έτσι η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει τη μορφή:

$$J = \min F = \min \sum_{i=1}^{Ns} (w_1 N_{ii} + w_2 N_1 + w_3 N_m) \quad (3.52)$$

όπου  $w_1, w_2, w_3$ : συντελεστές στάθμισης, που το άθροισμα τους είναι ίσο με ένα, που προσδιορίζουν την επιθυμητή μετατόπιση των βυθίσεων από ένα συγκεκριμένο εύρος μεγέθους,  $N_{ii}, N_1, N_m$ : οι αριθμοί των βυθίσεων τάσης σε ένα συγκεκριμένο εύρος μεγέθους τάσης.

Μέχρι τώρα όσες περιπτώσεις αντικειμενικών συναρτήσεων αναφέρθηκαν ήταν με μονό στόχο (single). Σε ορισμένα άρθρα οι αντικειμενικές συναρτήσεις έχουν πολλαπλούς στόχους (multi-objective), οι οποίες αποτελούνται από διαφορετικούς, κάθε φορά, συνδυασμούς των αντικειμενικών συναρτήσεων που αναλύθηκαν παραπάνω. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις πολλαπλών στόχων μπορούν αρχικά να ταξινομηθούν σε:

α) **Πολλαπλών στόχων (multi-objective)** σύνθεση που λαμβάνει υπόψιν παραπάνω από έναν αντικρουόμενους στόχους και επιλέγει την καλύτερη συμβιβαστική λύση σε μία σειρά από εφικτές λύσεις ([36],[56],[57],[70],[71],[74],[82],[85],[100]). Σε αυτή την κατηγορία τα προβλήματα αντιμετωπίζονται με διάφορες μεθόδους, οι οποίες θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο 4.

β) **Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών (multi-objective with weights)**, όπου η πολλαπλών στόχων σύνθεση μετατρέπεται σε μία ενιαία αντικειμενική συνάρτηση, χρησιμοποιώντας την μέθοδο του σταθμισμένου αθροίσματος των επιμέρους στόχων. ([19],[22],[30],[40],[46],[47],[54],[63],[67],[72],[76],[89],[93],[101]). Η μέθοδος αυτή αναλύεται επίσης στο Κεφάλαιο 4.

### 3.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΒΤΔΕΣΜ

Η πλειονότητα των προβλημάτων βελτιστοποίησης υπόκεινται σε ένα σύνολο περιορισμών. Πριν την εύρεση της βέλτιστης λύσης πρέπει να προσδιοριστεί αν υπάρχει η δυνατότητα να ικανοποιηθούν όλοι οι περιορισμοί. Το πρόβλημα αυτό ονομάζεται πρόβλημα εφικτότητας και απαιτεί την εύρεση μίας τουλάχιστον λύσης στο σύνολο των εφικτών λύσεων δίχως να απασχολεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι περιορισμοί των προβλημάτων βελτιστοποίησης διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: α) τους συννοριακούς 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 μικρότερη/μικρότερη-ίση ή μεγαλύτερη/μεγαλύτερη-ίση από μια σταθερά. Οι περιορισμοί μπορεί να είναι είτε γραμμικοί είτε μη γραμμικοί και παίζουν σημαντικό ρόλο στην λειτουργία του συστήματος καθώς και στην επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

### 3.4.1 Περιορισμοί ισότητας

Οι περιορισμοί ισότητας έχουν να κάνουν με τις μη γραμμικές εξισώσεις ροής φορτίου:

$$P_i(\theta, v) - P_{Gi} + P_{Di} = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.53)$$

$$Q_i(\theta, v) - Q_{Gi} + Q_{Di} = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.54)$$

όπου

$$P_i(\theta, v) = \sum_{j=1}^{N_b} V_i \|V_j\| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (3.55)$$

, i=1, 2, ..., n-1

$$Q_i(\theta, v) = \sum_{j=1}^{N_b} V_i \|V_j\| (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (3.56)$$

, i=1, 2, ..., m

όπου  $P_i, Q_i, V_i, V_j$  : η καθαρή έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος στο ζυγό i, και το μέτρο της τάση στο ζυγό i και j, αντίστοιχα, m, n: ο αριθμός των ζυγών φορτίου και ο αριθμός των συνολικών ζυγών του ΣΗΕ, αντίστοιχα,  $\theta_{ij}$  : διαφορά γωνίας της τάσης μεταξύ ζυγών i και j,  $P_{Gi}, Q_{Gi}, P_{Di}, Q_{Di}$  : η ενεργός και άεργος παραγωγή ισχύος στο ζυγό i και η ενεργός και άεργος ζήτηση ισχύος στο ζυγό i, αντίστοιχα,  $G_{ij}, B_{ij}$  : το πραγματικό και φανταστικό μέρος της σύνθετης αγωγιμότητας της γραμμής μεταφοράς, που συνδέει τους ζυγούς i και j.

Αν τοποθετηθεί κάποιο ΕΣΜ στο σύστημα, τότε οι εξισώσεις (3.53), (3.54) αλλάζουν, ανάλογα με τον τύπο του ΕΣΜ που έχει εγκατασταθεί. Αναφέρονται ορισμένες τέτοιες περιπτώσεις. Όταν τοποθετείται ένα SVC στο σύστημα [45] τότε οι εξισώσεις παίρνουν την εξής μορφή:

$$P_i(\theta, v) - P_{Gi} + P_{Di} = 0 \quad (3.57)$$

$$Q_i(\theta, v) - Q_{Gi} + Q_{Di} - B_{SVCi} V_i^2 = 0$$

όπου  $B_{SVC,i}$  : το φανταστικό μέρος της σύνθετης αγωγιμότητας του SVC στο ζυγό  $i$ . Όταν τοποθετείται ένα TCSC στο σύστημα [90], στη γραμμή μεταξύ των ζυγών  $i$  και  $j$ , τότε οι εξισώσεις παίρνουν τη μορφή:

$$\begin{aligned} P_i(\theta, v) - P_{Gi} + P_{Di} + P_i^{TCSC} &= 0 \\ Q_i(\theta, v) - Q_{Gi} + Q_{Di} + Q_i^{TCSC} &= 0 \\ P_j(\theta, v) - P_{Gj} + P_{Dj} + P_j^{TCSC} &= 0 \\ Q_j(\theta, v) - Q_{Gj} + Q_{Dj} + Q_j^{TCSC} &= 0 \end{aligned} \quad (3.58)$$

όπου  $P_i^{TCSC}, Q_i^{TCSC}, P_j^{TCSC}, Q_j^{TCSC}$  : η έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος από το TCSC στο ζυγό  $i$  και  $j$ , αντίστοιχα. Όταν τοποθετείται ένα UPFC στο σύστημα [51], τότε οι εξισώσεις διαμορφώνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} P_i(\theta, v) - P_{Gi} + P_{Di} - P_i^{UPFC} &= 0 \\ Q_i(\theta, v) - Q_{Gi} + Q_{Di} - Q_i^{UPFC} &= 0 \end{aligned} \quad (3.59)$$

όπου  $P_i^{UPFC}, Q_i^{UPFC}$  : η έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος από το UPFC στο ζυγό  $i$ , αντίστοιχα.

### 3.4.2 Ανισωτικοί περιορισμοί

Οι ανισωτικοί περιορισμοί έχουν να κάνουν με τους περιορισμούς του ΣΗΕ και τους περιορισμούς (λειτουργικά όρια) των ΕΣΜ που τοποθετούνται στο υπό εξέταση δίκτυο. Αναφέρονται οι βασικότεροι από αυτούς που εμφανίστηκαν στα 101 άρθρα που μελετήθηκαν. Τα όρια παραγωγής σε κάθε ζυγό παραγωγής:

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, i = 1, 2, \dots, n_G \quad (3.60)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, i = 1, 2, \dots, n_G \quad (3.61)$$

Τα όρια ζήτησης σε κάθε ζυγό φορτίου:

$$P_{Di}^{\min} \leq P_{Di} \leq P_{Di}^{\max}, i = 1, 2, \dots, n_D \quad (3.62)$$

$$Q_{Di}^{\min} \leq Q_{Di} \leq Q_{Di}^{\max}, i = 1, 2, \dots, n_D \quad (3.63)$$

Τα όρια της τάσης σε κάθε ζυγό του ΣΗΕ:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, i = 1, 2, \dots, n_B \quad (3.64)$$

$$|\delta_{ij}| \leq \delta_{ij}^{\text{crit}}, i = 1, 2, \dots, n_T \quad (3.65)$$



Τα όρια της μεταφοράς σε κάθε γραμμή μεταφοράς ΣΗΕ:

$$|S_m(\theta, v)| \leq S_m^{\max}, m = 1, 2, \dots, n_T \quad (3.66)$$

όπου  $S_m^{\max}$  : το μέγιστο όριο φαινόμενης ισχύος στη γραμμή μεταφοράς,

Το θερμικό όριο των γραμμών μεταφοράς του ΣΗΕ:

$$\Psi_k^{\max} \geq \left| j \frac{bk_0}{2} V_i e^{j\theta_i} + (G_k + jB_k)(V_i e^{j\theta_i} - V_j e^{j\theta_j}) \right|, k = (i, j) = 1, 2, \dots, n_T \quad (3.67)$$

όπου  $\Psi_k^{\max}$  : το μέγεθος ρεύματος της γραμμής μεταφοράς,  $bk_0$  : το φανταστικό μέρος της εγκάρσιας σύνθετης αγωγιμότητας της γραμμής μεταφοράς που συνδέει τους ζυγούς  $i$  και  $j$ .

Στη συνέχεια αναφέρονται τα λειτουργικά όρια των ΕΣΜ, τα οποία εμφανίζονται στο πρόβλημα ως ανισωτικοί περιορισμοί.

$$B_{SVCi}^{\min} \leq B_{SVCi} \leq B_{SVCi}^{\max} \quad (3.68)$$

$$X_{TCSCi}^{\min} \leq X_{TCSCi} \leq X_{TCSCi}^{\max} \quad (3.69)$$

$$\begin{aligned} V_{SEi}^{\min} &\leq V_{SEi} \leq V_{SEi}^{\max} \\ \theta_{SEi}^{\min} &\leq \theta_{SEi} \leq \theta_{SEi}^{\max} \end{aligned} \quad (3.70)$$

$$\begin{aligned} V_{SEi}^{\min} &\leq V_{SEi} \leq V_{SEi}^{\max} \\ 0 &\leq \theta_{SEi} \leq 2\pi \\ V_{SHi}^{\min} &\leq V_{SHi} \leq V_{SHi}^{\max} \\ 0 &\leq \theta_{SHi} \leq 2\pi \end{aligned} \quad (3.71)$$

$$\begin{aligned} P_{ij} &\leq P_{ij_{\max}} \\ -2\pi &\leq \varphi_{Si} \leq 2\pi \\ I_{qi}^{\min} &\leq I_{qi} \leq I_{qi}^{\max} \end{aligned}$$

Οι περιορισμοί (3.68), (3.69) αναφέρονται στην τοποθέτηση συσκευών SVC και TCSC στο ΣΗΕ, αντίστοιχα, και προσδιορίζουν το μέγεθος της αντίδρασης που αυτές οι συσκευές προσθέτουν στο σύστημα. Οι περιορισμοί (3.70), (3.71) έχουν να κάνουν με τα όρια των μετατροπέων πηγών τάσης που συνδέονται στο ΣΗΕ όταν σε αυτό τοποθετούνται οι συσκευές SSSC και UPFC, αντίστοιχα. Στην περίπτωση που συνδέεται το SSSC τα όρια αφορούν το μέτρο και τη γωνία του σειριακού μετατροπέα πηγής τάσης, ενώ όταν συνδέεται το UPFC τα όρια αφορούν τα μέτρα και τις γωνίες και των δύο (σειριακού και εγκάρσιου) μετατροπέων πηγών τάσης.  $P_{ij}$ : η ενεργός ισχύς της γραμμής μεταφοράς, που συνδέεται με συσκευή UPFC,

που συνδέει τους ζυγούς  $i$  και  $j$ ,  $I_{qi}, \varphi_{si}$  : το εγχεόμενο όριο ρεύματος και γωνίας τάσης του UPFC στο ζυγό  $i$ . Αρκετοί ακόμη περιορισμοί που αφορούν τη λειτουργία των ΕΣΜ εμφανίζονται στα διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης. Είναι φανερό πως όσο πιο σύγχρονο και σύνθετο είναι ένα ΕΣΜ, τόσο περισσότεροι περιορισμοί λειτουργίας θα το διέπουν. Τέλος, ορισμένες φορές στα προβλήματα βελτιστοποίησης υπάρχουν περιορισμοί στον αριθμό των ΕΣΜ που τοποθετούνται στο ΣΗΕ που μελετάται.

**Πίνακας 3.1:** Ταξινόμηση των άρθρων του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ

Άρθρο	Αριθμός ΕΣΜ	Τύπος ΕΣΜ	Μεταβλητές Σχεδίασης	Στόχος	Αντικειμενική Συνάρτηση
[1]	Μονός	SVC	Θέση	Πολλαπλός	Μεγιστοποίηση παρατηρησιμότητας + ελεγχιμότητας ΣΗΕ
[2]	Μονός	SVC	Θέση	Πολλαπλός	Μεγιστοποίηση παρατηρησιμότητας + ελεγχιμότητας
[3]	Μονός	SVC	Θέση	Μονός	Ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος στο ΣΗΕ
[4]	Πολλαπλός	Phase Shifter	Θέση + αριθμός	Μονός	Μεγιστοποίηση του λόγου του ετήσιου κόστους παραγωγής με το ετήσιο κόστος επένδυσης των PSs
[5]	Πολλαπλός	SVC	Θέση	Πολλαπλός	Μεγιστοποίηση παρατηρησιμότητας + ελεγχιμότητας ΣΗΕ
[6]	Μονός	TCSC	Θέση	Πολλαπλός	Μεγιστοποίηση παρατηρησιμότητας + ελεγχιμότητας ΣΗΕ
[7]	Πολλαπλός	SVC	Θέση + μέγεθος	Μονός	Μεγιστοποίηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς ΣΗΕ
[8]	Πολλαπλός	TCSC, SSSC	Θέση	Μονός	Ενίσχυση απόσβεσης ηλ/μηχ. ταλαντώσεων ΣΗΕ
[9]	Μονός	TCSC	Θέση	Πολλαπλός	Μεγιστοποίηση παρατηρησιμότητας + ελεγχιμότητας ΣΗΕ
[10]	Μονός	SVC	Θέση	Μονός	Μεγιστοποίηση ελεγχιμότητας ΣΗΕ
[11]	Μονός	SVC	Θέση + μέγεθος	Μονός	Βελτίωση ευστάθειας τάσης ΣΗΕ
[12]	Μονός	TCSC, TCPAR	Θέση + ρύθμιση παραμέτρων	Μονός	Ελαχιστοποίηση κόστους συμφόρησης
[13]	Πολλαπλός	TCSC, TCPST, TCVR, SVC	Θέση + μέγεθος + αριθμός + τύπος	Μονός	Μεγιστοποίηση φόρτισης ΣΗΕ

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση των άρθρων του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ (συνέχεια)

Άρθρο	Αριθμός ΕΣΜ	Τύπος ΕΣΜ	Μεταβλητές Σχεδίασης	Στόχος	Αντικειμενική Συνάρτηση
[14]	Μονός	TCSC, TCPAR	Θέση + μέγεθος	Μονός	Ελαχιστοποίηση κόστους επένδυσης ΕΣΜ και λειτουργικού κόστους ΣΗΕ
[15]	Μονός	TCSC, TCPAR	Θέση + μέγεθος	Μονός	Ενίσχυση της ολικής ικανότητας μεταφοράς ΣΗΕ
[16]	Μονός	UPFC	Θέση	Μονός	Ενίσχυση απόσβεσης μεταβατικής συμπεριφοράς ηλ/μηχ. ταλαντώσεων ΣΗΕ
[17]	Μονός	TCSC	Θέση	Μονός	Ελαχιστοποίηση κόστους συμφόρησης
[18]	Πολλαπλός	TCSC, TCPS	Μέγεθος + αριθμός	Μονός	Ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους ΣΗΕ
[19]	Μονός	TCSC, UPFC	Θέση + μέγεθος	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών
[20]	Πολλαπλός	SVC, TCSC, UPFC	Θέση + τύπος	Μονός	Αύξηση περιθωρίου ευστάθειας τάσης (βελτίωση ευστάθεια τάσης ΣΗΕ)
[21]	Μονός	SVC	Θέση	Μονός	Ελαχιστοποίηση κόστους επένδυσης ΕΣΜ και λειτουργικού κόστους ΣΗΕ
[22]	Πολλαπλός	TCSC, TCVR, TCPST, SVC, UPFC	Θέση + μέγεθος + αριθμός + τύπος	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών
[23]	Πολλαπλός	SVC, STATCOM, UPFC	Θέση + τύπος	Μονός	Βελτίωση ευστάθειας τάσης ΣΗΕ
[24]	Πολλαπλός	TCPST	Θέση + αριθμός	Μονός	Μεγιστοποίηση φόρτισης ΣΗΕ
[25]	Μονός	UPFC	Θέση	Μονός	Διάφοροι μονοί στόχοι
[26]	Πολλαπλός	Πολλαπλός	Θέση + τύπος	Μονός	Βελτίωση ασφάλειας ΣΗΕ
[27]	Μονός	UPFC	Θέση	Μονός	Διάφοροι μονοί στόχοι (ελαχιστοποίηση δύο δεικτών ασφάλειας ΣΗΕ)
[28]	Πολλαπλός	SVC, TCSC	Θέση + τύπος + μέγεθος	Μονός	Μεγιστοποίηση φόρτισης ΣΗΕ
[29]	Μονός	SVC	Θέση + ρύθμιση παραμέτρων	Μονός	Μεγιστοποίηση πιθανολογικού δείκτη ευαισθησίας

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση των άρθρων του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ (συνέχεια)

Άρθρο	Αριθμός ΕΣΜ	Τύπος ΕΣΜ	Μεταβλητές Σχεδίασης	Στόχος	Αντικειμενική Συνάρτηση
[30]	Πολλαπλός	TCPST	Θέση + αριθμός	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών
[31]	Μονός	Πολλαπλός	Θέση + μέγεθος	Μονός	Μεγιστοποίηση κοινωνικής ευημερίας
[32]	Μονός	UPFC	Ρύθμιση Παραμέτρων	Μονός	Ελαχιστοποίηση μέσης φόρτισης των γραμμών
[33]	Πολλαπλός	SVC, STATCOM, SSSC, UPFC	Ρύθμιση Παραμέτρων	Μονός	Ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος στο ΣΗΕ
[34]	Μονός	UPFC	Θέση	Μονός	Ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους ΣΗΕ
[35]	Μονός	SVC, STATCOM	Θέση + τύπος	Μονός	Βελτίωση μεταβατικής ευστάθειας
[36]	Πολλαπλός	SVC, TCSC, UPFC	Θέση + τύπος + αριθμός	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων
[37]	Μονός	TCSC	Θέση	Μονός	Δύο Διαφορετικοί μονοί στόχοι (ελαχιστοποίηση είτε εύρους συμφόρησης είτε συνολικού κόστους παραγωγής ΣΗΕ)
[38]	Μονός	SVC, TCSC, UPFC	Θέση + τύπος	Μονός	Ενίσχυση απόσβεσης ηλ/μηχ. ταλαντώσεων ΣΗΕ
[39]	Μονός	TCSC	Θέση	Μονός	Βελτίωση μεταβατικής ευστάθειας
[40]	Ένα ανά είδος	TCSC, TCPS, UPFC, SVC	Θέση + μέγεθος + τύπος	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών
[41]	Πολλαπλός	SVC	Θέση + μέγεθος	Μονός	Βελτίωση ευστάθειας τάσης ΣΗΕ
[42]	Μονός	SVC	Θέση + μέγεθος	Μονός	Βελτίωση ορίου ευστάθειας πρώτης ταλάντωσης ΣΗΕ
[43]	Μονός	SVC	Θέση	Μονός	Βελτίωση ευστάθειας τάσης ΣΗ
[44]	Πολλαπλός	SVC	Θέση + αριθμός	Μονός	Μεγιστοποίηση περιθωρίου φόρτισης του ΣΗΕ
[45]	Πολλαπλός	SVC	Θέση	Μονός	Μεγιστοποίηση οριακής τιμής αέργου ισχύος στο ΣΗΕ (αύξηση κοινωνικής ευημερίας)
[46]	Πολλαπλός	TCSC	Θέση + αριθμός + μέγεθος	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών
[47]	Πολλαπλός	TCSC	Θέση + μέγεθος	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση των άρθρων του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ (συνέχεια)

Άρθρο	Αριθμός ΕΣΜ	Τύπος ΕΣΜ	Μεταβλητές Σχεδίασης	Στόχος	Αντικειμενική Συνάρτηση
[48]	Πολλαπλός	SSSC	Μέγεθος	Μονός	Ελαχιστοποίηση απωλειών ισχύος στο ΣΗΕ
[49]	Μονός	TCSC	Θέση	Μονός	Ελαχιστοποίηση κόστους επένδυσης ΕΣΜ και λειτουργικού κόστους ΣΗΕ
[50]	Μονός	TCSC	Θέση + μέγεθος	Μονός	Μεγιστοποίηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς ΣΗΕ
[51]	Μονός	UPFC	Θέση	Μονός	Μεγιστοποίηση δεικτών κατανομής της φόρτισης του ΣΗΕ (αύξηση κοινωνικής ευημερίας)
[52]	Πολλαπλός	TCSC, STATCOM, UPFC	Μέγεθος	Μονός	Βελτίωση προφίλ τάσεως ΣΗΕ
[53]	Πολλαπλός	UPFC, SSSC	Θέση	Μονός	Διάφοροι μονοί στόχοι (μεγιστοποίηση οριακής ροής ενεργού ισχύος στην αντισταθμισμένη γραμμή που έχει συνδεθεί το VSC, μεγιστοποίηση οριακής συνολικής ικανότητας μεταφοράς ΣΗΕ)
[54]	Πολλαπλός	UPFC	Θέση + ρύθμιση παραμέτρων	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών
[55]	Μονός	STATCOM, UPFC	Θέση + τύπος	Μονός	Μεγιστοποίηση της δυναμικής διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς ΣΗΕ
[56]	Μονός	STATCOM	Θέση	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων
[57]	Πολλαπλός	SVC, TCSC	Θέση + μέγεθος + τύπος	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων
[58]	Πολλαπλός	SVC, STATCOM, DVR	Θέση + μέγεθος + τύπος	Μονός	Διάφοροι μονοί στόχοι (Ελαχιστοποίηση αποπληρωμής ετών και της καθαρής παρούσας αξίας της επένδυσης)
[59]	Πολλαπλός	STATCOM, SSSC	Θέση + αριθμός	Μονός	Ελαχιστοποίησης ενός σύνθετου δείκτη τιμών
[60]	Μονός	TCSC	Θέση	Μονός	Ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους ΣΗΕ
[61]	Πολλαπλός	SVC, STATCOM, DVR	Θέση + μέγεθος + τύπος	Μονός	Ελαχιστοποίηση αριθμών βυθίσεων τάσης (Βελτίωση προφίλ τάσης ΣΗΕ)

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση των άρθρων του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ (συνέχεια)

Άρθρο	Αριθμός ΕΣΜ	Τύπος ΕΣΜ	Μεταβλητές Σχεδίασης	Στόχος	Αντικειμενική Συνάρτηση
[62]	Πολλαπλός	SVC, TCSC, TCVR, TCPST	Θέση + μέγεθος + τύπος	Μονός	Ελαχιστοποίηση κόστους επένδυσης ΕΣΜ και λειτουργικού κόστους ΣΗΕ
[63]	Μονός	UPFC	Θέση + ρύθμιση παραμέτρων	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών
[64]	Πολλαπλός	TCPST	Θέση	Μονός	Ελαχιστοποίηση κόστους επένδυσης ΕΣΜ και λειτουργικού κόστους ΣΗΕ
[65]	Μονός	UPFC	Θέση	Μονός	Ενίσχυση απόσβεσης ηλ/μηχ. ταλαντώσεων ΣΗΕ
[66]	Μονός	SSSC	Θέση + μέγεθος	Μονός	Μεγιστοποίηση κοινωνικής ευημερίας
[67]	Πολλαπλός	TCSC	Θέση + αριθμός + μέγεθος	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών
[68]	Πολλαπλός	TCSC, SVC	Θέση + τύπος	Μονός	Ελαχιστοποίηση κόστους επένδυσης ΕΣΜ και κόστους ασφαλείας ΣΗΕ
[69]	Μονός	TCSC	Θέση + μέγεθος	Μονός	Ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους ΣΗΕ
[70]	Μονός	HFC, PST, UPFC	Θέση + μέγεθος + τύπος	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων
[71]	Πολλαπλός	SVC	Θέση	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων
[72]	Πολλαπλός	SVC	Θέση + μέγεθος	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών
[73]	Πολλαπλός	TCSC, SVC	Θέση + μέγεθος + τύπος	Μονός	Μεγιστοποίηση κερδών από κατανομή ΕΣΜ
[74]	Μονός	STATCOM	Θέση + μέγεθος	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων
[75]	Πολλαπλός	UPFC	Θέση + αριθμός + μέγεθος	Μονός	Μεγιστοποίηση κοινωνικής ευημερίας
[76]	Πολλαπλός	SVC, TCSC	Θέση	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών
[77]	Μονός	SVC, TCSC	Θέση + τύπος + ρύθμιση παραμέτρων	Μονός	Ενίσχυση απόσβεσης ηλ/μηχ. ταλαντώσεων ΣΗΕ.

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση των άρθρων του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ (συνέχεια)

Άρθρο	Αριθμός ΕΣΜ	Τύπος ΕΣΜ	Μεταβλητές Σχεδίασης	Στόχος	Αντικειμενική Συνάρτηση
[78]	Πολλαπλός	SVC, STATCOM	Θέση + μέγεθος	Μονός	Διάφοροι μονοί στόχοι ( μεγιστοποίηση ορίου ευστάθειας τάσης ΣΗΕ, ελαχιστοποίηση βυθίσεων τάσης, ελαχιστοποίηση κόστους ΕΣΜ, ελαχιστοποίηση απωλειών ΣΗΕ
[79]	Μονός	UPFC	Θέση + μέγεθος	Μονός	Ελαχιστοποίηση κόστους επένδυσης ΕΣΜ και λειτουργικού κόστους ΣΗΕ
[80]	Μονός	SVC, TCSC	Θέση + μέγεθος + τύπος	Μονός	Μεγιστοποίηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς ΣΗΕ
[81]	Μονός	STATCOM, SSSC, UPFC	Θέση + τύπος	Μονός	Μεγιστοποίηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς ΣΗΕ
[82]	Πολλαπλός	SVC	Θέση	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων
[83]	Μονός	UPFC	Θέση + ρύθμιση παραμέτρων	Μονός	Ενίσχυση απόσβεσης ηλ/μηχ. ταλαντώσεων ΣΗΕ
[84]	Πολλαπλός	STATCOM, SSSC, UPFC	Θέση + τύπος	Μονός	Ελαχιστοποίησης κόστους συμφόρησης
[85]	Πολλαπλός	TCSC	Θέση	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων
[86]	Πολλαπλός	SVC, TCSC, TCVR, TCPST, UPFC	Θέση + μέγεθος + αριθμός + τύπος	Μονός	Μεγιστοποίηση φόρτισης ΣΗΕ
[87]	Μονός	UPFC, Sen Transformer (ST)	Θέση	Μονός	Ελαχιστοποίηση κόστους συμφόρησης
[88]	Πολλαπλός	STATCOM	Θέση + μέγεθος + αριθμός	Μονός	Μεγιστοποίηση φόρτισης ΣΗΕ
[89]	Μονός	STATCOM	Θέση + μέγεθος	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών
[90]	Μονός	TCSC	Θέση + ρύθμιση παραμέτρων + μέγεθος	Μονός	Μεγιστοποίηση κοινωνικής ευημερίας
[91]	Πολλαπλός	PWMS	Θέση + ρύθμιση παραμέτρων	Μονός	Ενίσχυση απόσβεσης ηλ/μηχ. ταλαντώσεων ΣΗΕ
[92]	Μονός	TCSC	Θέση	Μονός	Ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους ΣΗΕ

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση των άρθρων του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ (συνέχεια)

Άρθρο	Αριθμός ΕΣΜ	Τύπος ΕΣΜ	Μεταβλητές Σχεδίασης	Στόχος	Αντικειμενική Συνάρτηση
[93]	Μονός	SVC	Θέση + μέγεθος	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών
[94]	Πολλαπλός	TCPST,SVC	Θέση + μέγεθος + τύπος	Μονός	Μεγιστοποίηση φόρτισης ΣΗΕ
[95]	Μονός	STATCOM, SSSC,UPFC	Θέση + τύπος	Μονός	Μεγιστοποίηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς ΣΗΕ
[96]	Πολλαπλός	TCSC,SVC, TCVR, TCPST, STATCOM, UPFC	Θέση + μέγεθος + αριθμός + τύπος	Μονός	Μεγιστοποίηση φόρτισης ΣΗΕ
[97]	Πολλαπλός	STATCOM	Θέση	Μονός	Μεγιστοποίηση φόρτισης ΣΗΕ
[98]	Πολλαπλός	UPFC	Θέση + αριθμός	Μονός	Δύο διαφορετικοί μονοί στόχοι (ελαχιστοποίηση λειτουργικού κόστους και απωλειών μεταφοράς ΣΗΕ)
[99]	Μονός	SSSC, STATCOM	Θέση + τύπος	Μονός	Αύξηση προβλεψιμότητας ΣΗΕ
[100]	Μονός	TCSC	Θέση	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων
[101]	Πολλαπλός	UPFC	Θέση +μέγεθος	Πολλαπλός	Πολλαπλών στόχων με βαρύτητες τιμών





## ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ είναι το πρόβλημα βελτιστοποίησης, με το οποίο ασχολείται αυτή η διπλωματική εργασία. Με τον όρο βελτιστοποίηση (optimization) καλείται η διαδικασία, στην οποία καθορίζονται οι παράμετροι ενός μαθηματικού μοντέλου, ώστε να προκύψει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Οι μεταβλητές σχεδίασης, οι αντικειμενικές συναρτήσεις και οι περιορισμοί ορίζουν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Τα τρία αυτά χαρακτηριστικά αναλύθηκαν συγκεκριμένα για το πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ στο κεφάλαιο 3 με εκτενή τρόπο. Αυτό το κεφάλαιο ασχολείται με τις μεθόδους επίλυσης του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ. Παρουσιάζει και αναλύει διεξοδικά όλες τις μεθόδους που βρέθηκαν στα 101 άρθρα, καθώς επίσης τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μίας. Οι μέθοδοι, ή οι αλγόριθμοι, επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: 1) τις αναλυτικές (analytical), 2) τις αριθμητικές (numerical) και 3) τις ευρετικές (heuristic).

Ένας επίσης σημαντικός διαχωρισμός είναι των προβλημάτων βελτιστοποίησης ενός στόχου (single-objective optimization problem) και των προβλημάτων βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων (multiple-objective optimization problem, MOP). Η βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων είναι η διαδικασία της ταυτόχρονης βελτιστοποίησης δύο ή περισσότερων (συνήθως αντικρουόμενων) αντικειμενικών συναρτήσεων με διάφορους περιορισμούς [71], [100]:

$$\begin{aligned} \min/\max f(u) &= [f_1(u), f_2(u), \dots, f_k(u)]^T, k \geq 2 \\ \text{S.t } h(u) &= 0, g(u) \leq 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

όπου  $k$ : οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος,  $h, g$ : οι περιορισμοί ισότητας και οι ανισωτικοί περιορισμοί αντίστοιχα,  $u$ : οι μεταβλητές ελέγχου. Η βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων διαφέρει σημαντικά από τη βελτιστοποίηση ενός στόχου κυρίως λόγω της αδυναμίας καθορισμού μίας μοναδικής λύσης. Αυτό συμβαίνει διότι δεν είναι εφικτή η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των αντικρουόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων. Στη βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το διάνυσμα  $f(u)$ , ορίζονται δύο έννοιες: η κυριαρχία και η μη-κυριαρχία.

**Κυριαρχία (domination):** Μία λύση  $u_1$  λέγεται ότι κυριαρχεί (είναι προτιμότερη από) τη λύση  $u_2$ , αν και μόνο αν η  $u_1$  δεν είναι χειρότερη από τη  $u_2$  σε καμία από τις αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος, και η  $u_1$  είναι αυστηρά καλύτερη από τη  $u_2$  έστω και σε μία.

**Μη-κυριαρχία (non-domination) 1<sup>ος</sup> ορισμός:** Ανάμεσα σε ένα σύνολο λύσεων  $P$ , το μη-κυριαρχούμενο σύνολο λύσεων  $P'$  είναι οι λύσεις, που δεν κυριαρχούνται από κανένα μέλος του συνόλου  $P$ . Αν αντικατασταθεί το σύνολο  $P$  με τον εφικτό χώρο λύσεων του προβλήματος  $X$ , τότε το σύνολο των λύσεων στο  $P'$  ονομάζεται σύνολο Pareto-βέλτιστων λύσεων (Pareto-optimal set) ή σύνολο μετώπου Pareto (Pareto frontier set).

**Μη-κυριαρχία (non-domination) 2<sup>ος</sup> ορισμός:** Μία λύση είναι βέλτιστη, όταν δεν υπάρχει εφικτό διάνυσμα  $x$  (εφικτή λύση που να ικανοποιεί περιορισμούς και απαιτήσεις) το οποίο μπορεί να αυξήσει την ικανοποίηση κάποιου/ων κριτηρίου/ων, χωρίς να προκαλέσει ταυτόχρονη μείωση της ικανοποίησης τουλάχιστον ενός άλλου κριτηρίου. Ο παραπάνω ορισμός οδηγεί σε ένα σύνολο εφικτών λύσεων, που καλούνται Pareto-βέλτιστες (Pareto-optimal) ή μη-κατώτερες (non-inferior) ή παραδεκτές (admissible) ή αποτελεσματικές (efficient), ενώ τα αντίστοιχα διανύσματα ονομάζονται ως μη-κυριαρχούμενα (non-dominated). Τις περισσότερες φορές υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από Pareto-βέλτιστες λύσεις, οι οποίες εξορισμού είναι όλες ισοδύναμες. Στόχος της βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων είναι να βρεθούν όσες περισσότερες τέτοιες λύσεις.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται σύντομα ορισμένες μεθοδολογίες πολύ-κριτηριακής ανάλυσης, καθώς θεωρείται σημαντικό να παρατεθούν τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους και ο τρόπος λειτουργίας τους, αφού χρησιμοποιούνται σε μερικά από τα άρθρα που μελετήθηκαν. Η μέθοδος του σταθμισμένου αθροίσματος (Weighted Sum Method, WSM) είναι η απλούστερη μέθοδος και ίσως η πλέον χρησιμοποιούμενη κλασική μέθοδος πολύ-κριτηριακής βελτιστοποίησης. Στην μέθοδο αυτή υπολογίζεται ένα άθροισμα  $g(x)$  των αντικειμενικών συναρτήσεων  $f_i \in F$ , όπου  $F$  το σύνολο των αντικειμενικών συναρτήσεων. Κάθε αντικειμενική συνάρτηση πολλαπλασιάζεται με ένα βάρος  $w_i \in [0,1]$  που αντιπροσωπεύει τη βαρύτητα του συγκεκριμένου κριτηρίου.

$$g(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (4.3)$$

Χρησιμοποιώντας βάρη με διαφορετικά πρόσημα μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ένα κριτήριο μεγιστοποιώντας παράλληλα ένα άλλο. Με αυτόν τον τρόπο, τα προβλήματα αντικειμενικής βελτιστοποίησης μετατρέπονται σε μόνο-κριτηριακά προβλήματα. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι 1) η εύκολη και κατανοητή εφαρμογή της και 2) για μονοδιάστατα κυρτά προβλήματα (convex problems, προβλήματα με μοναδικό ακρότατο) εξασφαλίζει την εύρεση λύσεων για το σύνολο των βέλτιστων-λύσεων Pareto. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι 1) ο αυθαίρετος ορισμός των βαρών, 2) η αδυναμία εντοπισμού των μη κυρτών περιοχών του

συνόρου Pareto και 3) αν υπάρχουν διαφορετικές μονάδες μέτρησης για τις αντικειμενικές συναρτήσεις, η έννοια του αθροίσματος δεν έχει νόημα.

Η μέθοδος των ε-περιορισμών (ε-constraint method) διατηρεί μόνο έναν από τους στόχους και περιορίζει τους υπόλοιπους στόχους μέσω κάποιων τιμών που καθορίζονται από το χρήστη. Με άλλα λόγια στη μέθοδο των ε-περιορισμών βελτιστοποιείται μία πρωτεύουσα αντικειμενική συνάρτηση  $f_p(x) \in F$ , θεωρώντας τις υπόλοιπες ως μαθηματικούς περιορισμούς που φράσσονται από επιτρεπόμενα όρια  $\varepsilon_i$ . Έτσι, διαμορφώνεται ένα βαθμωτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, με  $n-1$  επιπλέον περιορισμούς της μορφής:

$$f_i(x) \leq \varepsilon_i \quad (4.4)$$

Αλλάζοντας το πρωτεύον κριτήριο και μεταβάλλοντας τις τιμές των περιορισμών προκύπτουν λύσεις που είναι Pareto-βέλτιστες. Η μέθοδος των ε-περιορισμών προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στην επίλυση του προβλήματος πολλαπλών στόχων σε σχέση με τη μέθοδο του σταθμισμένου αθροίσματος που συνδυάζει όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις για την παραγωγή μίας ενιαίας αντικειμενικής συνάρτησης. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι 1) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μη-κυρτά προβλήματα βελτιστοποίησης (non-convex problems, προβλήματα με πολλαπλά ακρότατα) και 2) δεν απαιτείται η αδιαστατοποίηση των κριτηρίων. Το μειονέκτημά της είναι η προσθήκη περιορισμών, εφόσον το αρχικό πρόβλημα είναι χωρίς περιορισμούς.

Η θεωρία των ασαφών συνόλων (fuzzy sets) και γενικά η προσέγγιση της ασαφούς λογικής (fuzzy logic) χρησιμοποιείται, επίσης, για την μετατροπή πολύ-κριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης σε μονό-κριτηριακά. Η ασαφής λογική είναι μία προέκταση της κλασσικής αριστοτέλειας λογικής. Μία πρόταση μπορεί να είναι αληθής με κάποιο βαθμό αλήθειας, και όχι απλά αληθής ή ψευδής. Με άλλα λόγια, στην κλασσική λογική μία πρόταση ή είναι ή δεν είναι αληθής, ενώ στην ασαφή λογική μία πρόταση είναι αληθής μέχρι κάποιο βαθμό. Ένα ασαφές σύνολο ορίζεται ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών  $(x, u_A(x))$  όπου  $x \in X$  και  $u_A(x) \in [0,1]$ . Η συνάρτηση  $u_A(x)$  ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής και καθορίζει το βαθμό, στον οποίο κάθε σημείο του πεδίου ορισμού διαθέτει μία συγκεκριμένη ιδιότητα. Μία συνάρτηση συμμετοχής δίνει την επιθυμητή ευελιξία σε ένα ασαφές σύνολο. Μεγαλύτερες τιμές της συνάρτησης συμμετοχής σημαίνουν μεγαλύτερη συμμετοχή στο σύνολο.

Άλλες δύο μέθοδοι (που χρησιμοποιήθηκαν σε κάποια από τα άρθρα) ανάλυσης πολλαπλών κριτηρίων είναι η διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης και η μεθοδολογία TOPSIS. Η διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process, AHP) βασίζεται στην αποσύνθεση ενός πολύπλοκου προβλήματος στα συστατικά του μέρη, τα οποία οργανώνονται σε μια ιεραρχική δομή. Στο τελικό στάδιο της διαδικασίας σχηματίζεται ένας  $M \cdot N$  πίνακας, όπου  $M$  είναι ο αριθμός των εναλλακτικών και  $N$  ο αριθμός των κριτηρίων. Η μεθοδολογία της διαδικασίας αναλυτικής ιεράρχησης παρουσιάζει ομοιότητες με αυτή της μεθόδου σταθμισμένου αθροίσματος, απλώς η AHP χρησιμοποιεί σχετικές αξίες έναντι των πραγματικών της WMS και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε πολυδιάστατα προβλήματα, όπου δηλαδή τα κριτήρια μπορεί να μετρούνται με διαφορετικές μονάδες. Η μεθοδολογία TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution – Τεχνική για την Ταξινόμηση κατά Προτίμηση με Ομοιότητα προς την Ιδανική Λύση)

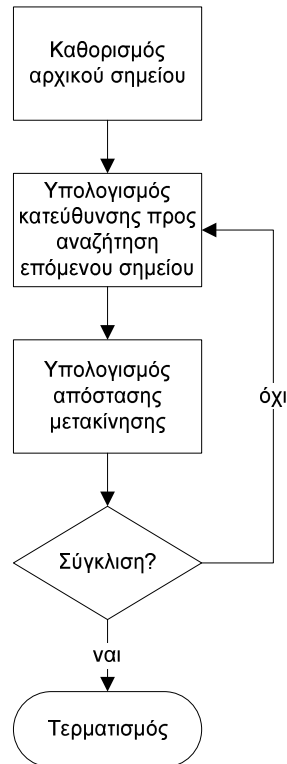
αναπτύχθηκε από τους Hwang και Yoon. Η κεντρική ιδέα της μεθόδου είναι ότι η επιλεγόμενη εναλλακτική πρέπει να απέχει τη μικρότερη απόσταση (σε γεωμετρικούς όρους) από την ιδεατή λύση και τη μεγαλύτερη απόσταση από την πιο αρνητική λύση. Η TOPSIS υποθέτει ότι κάθε χαρακτηριστικό έχει μια αύξουσα ή φθίνουσα χρησιμότητα. Επομένως, είναι εύκολο να εντοπιστούν η ιδανική και η αρνητική λύση. Η προσέγγιση της ευκλείδειας απόστασης χρησιμοποιείται ώστε να εκτιμηθεί η σχετική προσέγγιση των εναλλακτικών στην ιδανική επιλογή. Συνεπώς, οι εναλλακτικές ταξινομούνται συγκρίνοντας τις σχετικές αποστάσεις τους από την ιδανική λύση.

## 4.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ (analytical methods)

Οι αναλυτικές μέθοδοι χρησιμοποιούν αναλυτικούς μαθηματικούς υπολογισμούς προκειμένου να επιτύχουν την ελαχιστοποίηση ή τη μεγιστοποίηση κάποιας αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης μέσω της πληροφορίας που προκύπτει από την παράγωγο της συνάρτησης. Για την περίπτωση ενός μονοδιάστατου προβλήματος αρκεί να βρεθεί το σημείο μηδενισμού της πρώτης παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης. Έπειτα αν, στο σημείο αυτό η δεύτερη παράγωγος είναι θετική πρόκειται για τοπικό ελάχιστο, αν είναι αρνητική πρόκειται για τοπικό μέγιστο. Στη συνέχεια, συγκρίνονται όλα τα τοπικά βέλτιστα και προκύπτει το ολικό βέλτιστο. Το ίδιο συμβαίνει και στα πολυδιάστατα προβλήματα μόνο που εκεί γίνεται χρήση των μερικών παραγώγων.

Η αναλυτική μέθοδος είναι αρκετά ελκυστική συγκριτικά με τους αλγόριθμους που βασίζονται σε τυχαίες πιθανοκρατικές διαδικασίες. Ωστόσο απαιτούνται συνεχείς συναρτήσεις με αναλυτικές παραγώγους, ενώ στη περίπτωση που αντιμετωπίζονται πολυδιάστατα προβλήματα συχνά είναι πολύ δύσκολο να βρεθούν τα τοπικά ακρότατα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν αλγόριθμοι που αξιοποιούν με επιτυχία την χρήση της παραγώγου για την επίλυση αρκετών προβλημάτων. Οι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται για τη γρήγορη εύρεση ενός ακρότατου μίας συνάρτησης. Δεν περιλαμβάνουν επαναληπτικούς αλγορίθμους, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν προβλήματα σύγκλισης και έτσι οι λύσεις να επιτυγχάνονται σχετικά γρήγορα. Από την στιγμή που θα καθοριστεί το αρχικό σημείο αναζήτησης, η σύγκλιση στο τοπικό βέλτιστο αυτής της γειτονιάς είναι εγγυημένη.

Ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις το τοπικό βέλτιστο δεν αποτελεί το ολικό ζητούμενο βέλτιστο και ο αλγόριθμος εγκλωβίζεται. Με αποτέλεσμα, οι αναλυτικές μέθοδοι να είναι ιδανικές όταν είναι γνωστό από πριν σε ποια περιοχή κινείται το ολικό βέλτιστο. Ένα δεύτερο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι οι αναλυτικοί αλγόριθμοι βασίζονται στη γνώση της αντικειμενικής συνάρτησης και της παραγώγου της, καθώς και στον υπολογισμό τους σε διάφορα σημεία. Οι απαιτήσεις αυτές δεν είναι συχνά εφικτές με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η ευρεία εφαρμογή αυτών των αλγορίθμων. Συνοψίζοντας, οι αναλυτικοί αλγόριθμοι μπορούν να αξιοποιηθούν σε ειδικά προβλήματα και να οδηγήσουν με ταχύτητα και ακρίβεια στο επιθυμητό αποτέλεσμα, με τον κίνδυνο όμως για εγκλωβισμό της λύσης στο τοπικό βέλτιστο και για ατελείωτους υπολογισμούς μητρών σε μεγάλα συστήματα. Για αυτές τις περιπτώσεις γίνεται συστηματική χρήση των στοχαστικών και ιδιαίτερα των εξελικτικών αλγορίθμων. Ένα γενικό διάγραμμα ροής ενός αναλυτικού αλγορίθμου δίνεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Γενικό διάγραμμα ροής αναλυτικού αλγορίθμου.

#### 4.2.1 Ανάλυση Ευαισθησίας (sensitivity analysis)

Μία κατηγορία των αναλυτικών μεθόδων είναι η ανάλυση ευαισθησίας, η οποία χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο μερικές παραγώγους και ιακωβιανές μήτρες, ορίζοντας έτσι διάφορους δείκτες τοποθέτησης των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς. Τα άρθρα [7],[10],[19],[53],[55],[81],[84] χρησιμοποιούν ανάλυση ευαισθησίας για την επίλυση του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ.

Στο άρθρο [7] παρουσιάζεται μία γρήγορη μέθοδος εκτίμησης για τον προσδιορισμό της τοποθεσίας εγκατάστασης ενός SVC στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη την διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς του συστήματος κοντά στο όριο χαμηλής τάσης ( Low Voltage Boundary, LVB). Αρχικά επιλύονται οι εξισώσεις ροής φορτίου στην αρχική κατάσταση, όπου δεν έχει εγκατασταθεί το SVC :

$$f(x_0, \mu_0, g_0) = 0 \quad (4.5)$$

όπου  $x$ : το διάνυσμα των εξαρτημένων μεταβλητών του συστήματος (περιέχει τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων των ζυγών του ΣΗΕ),  $\mu$ : το διάνυσμα των ελεγχόμενων παραμέτρων (περιέχει τις εγκάρσιες χωρητικότητες των ζυγών φορτίου (PQ)),  $g$ : η συνολική παραγωγή. Χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα της σειράς Taylor στη σχέση (4.5) μπορούν να

προσδιοριστούν οι μεταβολές στις μεταβλητές του συστήματος  $x$ , όταν τα διανύσματα  $\mu, g$  υπόκεινται σε μικρές μεταβολές:

$$\Delta x = M\Delta\mu + G\Delta g \quad (4.6)$$

όπου  $M, G$ : πίνακες ευαισθησίας, που αποτελούνται από γινόμενα ιακωβιανών μητρών υπολογισμένες στην αρχική κατάσταση  $(x_0, \mu_0, g_0)$ . Η σχέση ευαισθησίας (4.6) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αύξησης του περιθωρίου παραγωγής (generation margin) όταν ένα SVC προστίθεται σε ένα ζυγό  $i$  του ΣΗΕ. Για την προσέγγιση της νέας διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς κοντά στο όριο χαμηλής τάσης, στην παραπάνω περίπτωση, πρέπει να προσδιοριστεί η επιπρόσθετη μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας  $\Delta g_i$ , που παρέχεται στο ΣΗΕ. Αυτό επιτυγχάνεται με μία γραμμική τεχνική, που υπολογίζει τις μεταβολές της τάσης του ζυγού  $i$ ,  $V_i$ , καθώς και της εφαπτομένης  $dV_i/dg$ . Ο τελικός τύπος, κατόπιν μίας ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, δηλώνει την αλλαγή του περιθωρίου μεταφοράς,  $\Delta g$ , στο όριο χαμηλής τάσης του ζυγού  $i$ , όταν τοποθετείται ένα SVC στο ζυγό  $k$  και προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$\Delta g_{i,k} \approx \frac{V_i^{LVB} - (V_i + M_{ik}(M_{kk})^{-1}(1.0 - V_k))}{G_i - M_{ik}(M_{kk})^{-1}G_k} \quad (4.7)$$

όπου όλα τα στοιχεία των πινάκων ευαισθησίας  $M, G$  είναι υπολογισμένα στην αρχική κατάσταση  $(x_0, \mu_0, g_0)$ , και ο παρονομαστής της σχέσης (4.7) δηλώνει τη μεταβολή της εφαπτομένης  $dV_i/dg$ . Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου, σε σχέση με την κλασσική μέθοδο εγκατάστασης ενός SVC σε μία γραμμή μεταφοράς, είναι η ταχύτητα της μεθόδου. Η κλασσική μέθοδος επιλέγει ένα SVC, το τοποθετεί σε κάποιο ζυγό και λύνει τις εξισώσεις ροής φορτίου, και στη συνέχεια το φορτίο αυξάνει μέχρι να φτάσει σε κάποιο όριο. Έπειτα κάποιος άλλος ζυγός επιλέγεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί η τοποθεσία που επιτρέπει την μέγιστη μεταφορά ενέργειας, το οποίο απαιτεί πολλές επαναλήψεις. Αντίθετα, στην μέθοδο που προτείνεται στο άρθρο αυτό χρειάζεται μόνο μία λύση, κοντά στο όριο χαμηλής τάσης, για να εκτιμηθούν τα τελικά αποτελέσματα χωρίς επιπλέον υπολογισμούς ροών φορτίου ή ιακωβιανών μητρών.

Η αξιοποίηση της ανάλυσης των ιδιοδιανυσμάτων (eigenvalue analysis), που αποτελείται από την ανάλυση ρυθμών (modal analysis) και την ανάλυση ευαισθησίας, δεν είχε αξιοποιηθεί πλήρως σε μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ. Το κύριο εμπόδιο ήταν ο τρόπος που διαμορφώνονταν οι εξισώσεις κατάστασης και η δυσκολία του συσχετισμού τους με τις παραμέτρους του συστήματος. Στο άρθρο [10] προτείνει μία ευέλικτη τεχνική που μπορεί να ξεπεράσει αυτό το πρόβλημα βοηθώντας στη μελέτη της ευστάθειας του ΣΗΕ και στην απόσβεση των ταλαντώσεών του. Η μέθοδος αυτή αναφέρει ότι κάθε στοιχείο όπως το SVC, το TCSC, το PS, η γραμμή διασύνδεσης (tie-line), το HVDC (high voltage direct current) και η γεννήτρια μπορεί να προστεθεί στο υφιστάμενο δίκτυο σαν επιπρόσθετη μονάδα μαζί με τον αντίστοιχο εξοπλισμό ελέγχου του (στο άρθρο αναλύεται μόνο η περίπτωση του SVC). Επίσης, με την αξιοποίηση της ανάλυσης ρυθμών και της ανάλυσης ευαισθησίας προσδιορίζονται οι καταλληλότερες θέσεις εγκατάστασης των συσκευών στο ΣΗΕ και των πιο αποτελεσματικών σημάτων απόσβεσης (damping signals). Το σημαντικό χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου είναι ότι ο χώρος των εξισώσεων κατάστασης του συστήματος είναι διαθέσιμος ως ρητή

συνάρτηση κάθε παραμέτρου του και δεν επηρεάζεται από την επιλογή των σημάτων εισόδου/εξόδου και την πολυπλοκότητα του συστήματος. Η ανάλυση ρυθμών προσδιορίζει ποια συσκευή είναι ικανότερη να εξασφαλίσει την ευσταθή λειτουργία του συστήματος. Η ανάλυση ευαισθησίας μαζί με τον δείκτη ελεγχιμότητας προσδιορίζουν τις καταλληλότερες θέσεις εγκατάστασης του SVC στο δίκτυο, ενώ ο δείκτης παρατηρησιμότητας και ο residue index (RI) προσδιορίζουν το καταλληλότερο σήμα απόσβεσης του ελεγκτή SVC.

Κατά την εφαρμογή ΕΣΜ, που βασίζονται σε μετατροπείς πηγών τάσεων (VSC-based FACTS), είναι σημαντικό να μελετηθεί πως το VSC επηρεάζει τις τάσεις και τις ροές ισχύος στο ΣΗΕ. Στο άρθρο [53] μελετάται αυτό το πρόβλημα ελέγχου των ροών, χρησιμοποιώντας δύο μεθόδους ανάλυσης ευαισθησίας. Αρχικά, παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας, που βασίζεται στο μοντέλο πηγής τάσης (voltage source model-based sensitivity analysis). Έπειτα, παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας, που βασίζεται στο μοντέλο ισοδύναμης αντίδρασης (equivalent impedance model-based sensitivity analysis). Στην πρώτη μέθοδο ένας μετατροπέας πηγής τάσης μοντελοποιείται σαν μία εγχεόμενη πηγή τάσης. Σαν παράδειγμα αναφέρεται η εισαγωγή ενός UPFC μεταξύ δύο ζυγών (1 και 2) ενός ΣΗΕ, με  $\tilde{V}_{m_1} = V_{m_1} e^{j\alpha_1}$  συμβολίζεται η εγκάρσια εισαγωγή τάσης, με  $\tilde{V}_{m_2} = V_{m_2} e^{j\alpha_2}$  η σειριακή εισαγωγή τάσης, λόγω του UPFC και με  $X_{t_1}, X_{t_2}$  συμβολίζονται οι αντιστάσεις του εγκάρσιου και σειριακού μετατροπέα αντίστοιχα. Για μία γραμμή, που συνδέεται σειριακά ένα VSC, γραμμή μεταξύ των ζυγών 1 και 2, η ενεργός ροή ισχύος διαμέσου της γραμμής είναι η εξής:

$$P_{t_0} = \frac{V_2(V_{m_2} \sin(\theta_2 - \alpha_2) - V_1 \sin(\theta_2 - \theta_1))}{X_{t_2}} \quad (4.8)$$

όπου  $V_1, V_2, \theta_1, \theta_2$  : τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων των ζυγών 1 και 2, αντίστοιχα. Ακόμη, η αυξητική ενεργός ισχύς της γραμμής μπορεί να εκφραστεί, σύμφωνα με το άρθρο [53], ως εξής:

$$\Delta P_{t_0} = G_{11} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \end{bmatrix} + G_{12} \begin{bmatrix} \Delta V_{m_2} \\ \Delta \alpha_2 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Για τις γραμμές που δεν υπάρχει σύνδεση με VSC, για παράδειγμα για τη γραμμή μεταξύ ζυγών 3 και 4, η ενεργός ισχύς της γραμμής μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P_1 = \frac{V_3 V_4 [R_{34} \cos(\theta_3 - \theta_4) + X_{34} \sin(\theta_3 - \theta_4) - R_{34} V_4^2]}{R_{34}^2 + X_{34}^2} \quad (4.10)$$

και η αυξητική ενεργός ισχύς της γραμμής είναι η εξής:



$$\Delta P_1 = G_{21} \begin{bmatrix} \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

όπου  $V_3, V_4, \theta_3, \theta_4$  : τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων των ζυγών 3 και 4, αντίστοιχα. Οι μήτρες  $G_{11}, G_{12}, G_{21}$  : είναι μήτρες ευαισθησίας που δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$G_{11} = \begin{bmatrix} \frac{\theta P_{t_0}}{\theta V_1} & \frac{\theta P_{t_0}}{\theta V_2} & \frac{\theta P_{t_0}}{\theta \theta_1} & \frac{\theta P_{t_0}}{\theta \theta_2} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$G_{12} = \begin{bmatrix} \frac{\theta P_{t_0}}{\theta V_{m_2}} & \frac{\theta P_{t_0}}{\theta \alpha_2} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$G_{21} = \begin{bmatrix} \frac{\theta P_1}{\theta V_3} & \frac{\theta P_1}{\theta V_4} & \frac{\theta P_1}{\theta \theta_3} & \frac{\theta P_1}{\theta \theta_4} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Στη δεύτερη μέθοδο αναφέρεται ότι η εγχεόμενη πηγή τάσης από το VSC μπορεί να μετατραπεί σε ισοδύναμη αντίδραση χωρίς να αλλάξει η διάταξη του συστήματος. Σαν παράδειγμα αναφέρεται η εισαγωγή ενός SSSC μεταξύ δύο ζυγών (1 και 2). Σκοπός της μεθόδου είναι να υπολογιστεί η αντίδραση αυτή, που συμβολίζεται ως  $Z_{m_2}$ . Αυτό θα μπορούσε να γίνει εύκολα από το νόμο του Ohm ως εξής:

$$\tilde{I}_{12} = \frac{V_1 - V_2 - V_{m_2}}{j(X_{t_2} + X_1)}, \tilde{Z}_{m_2} = \frac{\tilde{V}_{m_2}}{\tilde{I}_{12}} \quad (4.15)$$

όπου  $V_1, V_2, V_{m_2}$  : η τάση στο ζυγό 1, η τάση στο ζυγό 2 και η σειριακά εγχεόμενη πηγή τάσης, αντίστοιχα,  $X_{t_2}$  : η σειριακή αντίσταση του μετασχηματιστή. Όμως, οι τάσεις  $\tilde{V}_1, \tilde{V}_2$  δεν μένουν σταθερές για να είναι εφικτό αυτό. Οι τάσεις μεταβάλλονται λόγω της εισαγωγής της σειριακής πηγής τάσης. Έτσι για τον υπολογισμό του  $Z_{m_2}$  εκτελείται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος. Η πρώτη μέθοδος είναι αρκετά αποδοτική καθώς απαιτεί μόνο την επίλυση μίας ονομαστικής εξίσωσης ροής φορτίου, που συμπεριλαμβάνει το ΕΣΜ. Όμως, αν το ΕΣΜ αλλάξει θέση τότε απαιτείται η επίλυση της εξίσωσης ροής φορτίου με το ΕΣΜ τοποθετημένο στη νέα θέση. Αντίθετα, η δεύτερη μέθοδος απαιτεί μόνο μία μονή λύση των εξισώσεων ροής φορτίου χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το ΕΣΜ. Ο υπολογισμός ευαισθησίας γίνεται με τον ίδιο πίνακα αγωγιμότητας  $Y$  και μπορεί να υπολογιστεί, μέσα σε λίγες επαναλήψεις, για κάθε ΕΣΜ σε οποιαδήποτε θέση. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποδοτική όταν κάποιος θέλει να μελετήσει την επίδραση των ΕΣΜ, όταν αυτά βρίσκονται σε διάφορες θέσεις.

Στο άρθρο [55] παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας της δομής διατήρησης του περιθωρίου ενέργειας (sensitivity analysis of structure preserving energy margin) σε σχέση με τις παραμέτρους ελέγχου του STATCOM και του UPFC για τη βέλτιστη τοποθέτησή τους στο δίκτυο. Η δυναμική ενέργεια που προέρχεται από το STATCOM και το UPFC, έχει συμπεριληφθεί στη συνάρτηση διατήρησης της ενέργειας για να ενσωματώσει την επίδρασή τους στη μεταβατική ευστάθεια. Αρχικά, η ευαισθησία περιθωρίου ενέργειας (energy margin sensitivity) συναρτήσει της εγκάρσιας ροής ρεύματος του STATCOM δίνεται από τον τύπο:

$$n_{\text{STAT}} = \frac{EM_c - EM}{I_{\text{sh}}} \quad (4.16)$$

όπου  $EM, EM_c$ : το περιθώριο ενέργειας χωρίς και με αντιστάθμιση, αντίστοιχα. Ο υπολογισμός του περιθωρίου ενέργειας απαιτεί τον προσδιορισμό του ασταθούς σημείου ισορροπίας, που είναι αρκετά δύσκολο εγχείρημα και απαιτεί τη λεπτομερή αναπαράσταση του ΣΗΕ. Ο ζυγός με το υψηλότερο  $n_{\text{STAT}}$  θεωρείται η βέλτιστη τοποθεσία για την εγκατάσταση του STATCOM. Έπειτα, οι ευαισθησίες περιθωρίου ενέργειας συναρτήσει των τάσεων  $V_{\text{sep}}, V_{\text{seq}}$ , που αποτελούν το πραγματικό και φανταστικό μέρος, αντίστοιχα, της σειριακής εγχεόμενης τάσης του UPFC δίνονται από τον τύπο:

$$n_1 = \frac{EM_{c1} - EM}{V_{\text{sep}}}, \quad n_2 = \frac{EM_{c2} - EM_{c1}}{V_{\text{seq}}} \quad (4.17)$$

$$n_{\text{UPFC}} = n_{1n} + n_{2n}$$

όπου  $n_{1n}, n_{2n}$ : αντιπροσωπεύουν τις αντίστοιχες κανονικοποιημένες ευαισθησίες. Για να υπολογιστεί το  $EM_{c1}$ , το  $V_{\text{seq}}$  ρυθμίζεται στο 0, ενώ το  $V_{\text{sep}}$  γίνεται ίσο με το 40% του πραγματικού μέρους της πτώσης τάσης που εμφανίζεται στη γραμμή, στην οποία υποτίθεται ότι θα τοποθετηθεί το UPFC. Για να υπολογιστεί η τιμή του  $EM_{c2}$  διατηρείται το  $V_{\text{sep}}$  στην προηγούμενη τιμή, ενώ το  $V_{\text{seq}}$  γίνεται ίσο με το 40% του φανταστικού μέρους της πτώσης τάσης που εμφανίζεται στη γραμμή, στην οποία υποτίθεται ότι θα τοποθετηθεί το UPFC. Η γραμμή με το υψηλότερο  $n_{\text{UPFC}}$  θεωρείται η βέλτιστη τοποθεσία για την εγκατάσταση του UPFC.

Στο άρθρο [81] οι δείκτες ευαισθησίας PTDFs (Power Transfer Distribution Factors) έχουν οριστεί με την ενσωμάτωση των ΕΣΜ (STATCOM, SSSC, UPFC) χρησιμοποιώντας την ανάλυση φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson. Σκοπός τους είναι ο υπολογισμός της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς στο ΣΗΕ για διμερείς και πολλαπλές συναλλαγές υπό φυσιολογικές συνθήκες και υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης αποκοπής γραμμής. Οι δείκτες ευαισθησίας PTDFs, για μία μεταβολή ισχύος της γραμμής μεταφοράς  $\Delta P_{ij}$  μίας συναλλαγής  $P_{mn}$  μεταξύ ζυγού-πωλητή  $m$  και ζυγού-αγοραστή  $n$ , ορίζονται από τη σχέση:

$$\text{PTDFs}_{mn, \text{FACTS}}^{ij} = \frac{\Delta P_{ij}^{\text{FACTS}}}{P_{mn}} \quad (4.18)$$

Οι δείκτες ευαισθησίας PTDFs, για διμερή συναλλαγή ποσότητας  $P_i$  μεταξύ ζυγού-πωλητή  $m$  και ζυγού-αγοραστή  $n$ , και για πολλαπλές συναλλαγές μεταξύ πολλών ζυγών-πωλητών  $m, l$  και ζυγών-αγοραστών  $n, q$  ορίζονται από τις σχέσεις 4.19 και 4.20, αντίστοιχα:

$$PTDF_{mn,FACTS}^{ij} = \left[ \frac{\theta P_{ij}^{FACTS}}{\theta \delta_2^{FACTS}}, \dots, \frac{\theta P_{ij}^{FACTS}}{\theta \delta_n^{FACTS}}, \frac{\theta P_{ij}^{FACTS}}{\theta V_2^{FACTS}}, \dots, \frac{\theta P_{ij}^{FACTS}}{\theta V_n^{FACTS}} \right] \begin{bmatrix} J_{1,FACTS} & J_{2,FACTS} \\ J_{3,FACTS} & J_{4,FACTS} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ +1 \\ 0 \\ \vdots \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$PTDF_{mn,FACTS}^{ij} = \left[ \frac{\theta P_{ij}^{FACTS}}{\theta \delta_2^{FACTS}}, \dots, \frac{\theta P_{ij}^{FACTS}}{\theta \delta_n^{FACTS}}, \frac{\theta P_{ij}^{FACTS}}{\theta V_2^{FACTS}}, \dots, \frac{\theta P_{ij}^{FACTS}}{\theta V_n^{FACTS}} \right] \begin{bmatrix} J_{1,FACTS} & J_{2,FACTS} \\ J_{3,FACTS} & J_{4,FACTS} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ +1 \\ \vdots \\ -1 \\ 0 \\ +1 \\ \vdots \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Έπειτα στο άρθρο [81] ορίζονται οι δείκτες LODFs (Line Outage Distribution Factors), με την ενσωμάτωση των ΕΣΜ, ως τη μεταβολή στη ροή της γραμμής λόγω της αποκοπής οποιασδήποτε γραμμής μεταξύ των ζυγών  $r$  και  $s$ , σε σχέση με τη ροή της αντίστοιχης γραμμής πριν την αποκοπή, και δίνεται από τη σχέση:

$$LODF_{rs,FACTS}^{ij} = \frac{\Delta P_{rs,FACTS}^{ij}}{P_{rs}^0} \quad (4.21)$$

Στην ουσία η σχέση (4.21) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς στην περίπτωση έκτακτης ανάγκης αποκοπής μίας γραμμής. Ύστερα, από τον καθορισμό των PTDFs και LODFs με τις συσκευές ΕΣΜ, καθορίζεται η διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς του συστήματος για οποιαδήποτε συναλλαγή (ή συναλλαγές) μέσω ενός επαναληπτικού αλγόριθμου. Ο αλγόριθμος αυτός βάση των δεδομένων που του δίνει ο χρήστης, όσον αφορά τις τάσεις των ζυγών (μέτρα και γωνίες) και τις ροές ισχύος των γραμμών πριν την εγκατάσταση του ΕΣΜ, την τοποθεσία εγκατάστασης του ΕΣΜ και το είδος του ΕΣΜ, υπολογίζει τον πίνακα αγωγιμότητας του συστήματος, τις ιακωβιανές μήτρες, τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων των ζυγών και εν τέλει τους δείκτες PTDFs και LODFs, μετά την εγκατάσταση του ΕΣΜ, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ροής φορτίου Newton-Raphson, λαμβάνοντας υπόψη το είδος τους ΕΣΜ καθώς και όλες τις συναλλαγές και τις περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης-αποκοπής γραμμής, που λαμβάνουν χώρα. Η θέση των ΕΣΜ καθορίζεται από τις μεταβολές των δεικτών PTDFs. Οι γραμμές με τις μικρότερες τιμές PTDFs και με την μεγαλύτερη κλίση των καμπυλών ευαισθησίας πρέπει να επιλέγονται για την τοποθέτηση των ΕΣΜ για να ενισχυθεί η διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς του συστήματος. Εν κατακλείδι, οι δείκτες PTDFs περιέχουν σημαντικές πληροφορίες για τη μεταβολή της ροής ισχύος, που

αντιστοιχούν στις διάφορες συναλλαγές ισχύος και παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για γραμμές, στις οποίες ελεγκτές της ροής ισχύος (ΕΣΜ) μπορούν να εγκατασταθούν για ενίσχυση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς. Οι δείκτες PTFDs χρησιμοποιούνται, επίσης, στο άρθρο [95] για τον ίδιο σκοπό.

Στο άρθρο [84] ένας ακόμη δείκτης ευαισθησίας παρουσιάζεται για την βέλτιστη τοποθέτηση των συσκευών ΕΣΜ που βασίζεται στην ευαισθησία της ροής ισχύος (power flow sensitivity) που αντιστοιχεί στην έγχυση ενέργειας σε οποιοδήποτε ζυγό  $i$ . Αυτοί οι δείκτες ευαισθησίας παρέχουν πληροφορίες για τις μεταβολές στις ροές ισχύος, με αυτόν τον τρόπο η φόρτιση του συστήματος μεταφοράς αντιστοιχίζεται στις αλλαγές των εγχύσεων ενέργειας σε οποιοδήποτε ζυγό του συστήματος. Αυτοί οι δείκτες ονομάζονται congestion distribution factors (CDFs) και μαθηματικά ορίζονται από την σχέση:

$$CDF_n^{ij} = \frac{\theta P_{ij}}{\theta P_n} \quad (4.22)$$

όπου  $P_{ij}$  η ροή ενεργού ισχύος μεταξύ των ζυγών  $i$  και  $j$ . Οι δείκτες CDFs είναι μεγαλύτεροι στις γραμμές, που παρατηρείται το φαινόμενο της συμφόρησης. Επομένως, οι καταλληλότερες τοποθεσίες για την τοποθέτηση ΕΣΜ είναι οι γραμμές με τον υψηλότερο δείκτη CDF. Οι γραμμές αυτές είναι πιο ευαίσθητες στην έγχυση ισχύος και οποιαδήποτε μεταβολή στις παραμέτρους τους συνεπάγεται καλύτερο έλεγχο στην ροή ισχύος της καθεμίας.

Επιπροσθέτως και άλλα άρθρα χρησιμοποιούν τρόπους επίλυσης του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ, που εντάσσονται στην ανάλυση ευαισθησίας και αναλύονται παρακάτω.

#### 4.2.1.1 Ευαισθησία δείκτη απόδοσης ενεργού ροής ισχύος (real power flow performance index (PI) sensitivity)

Στα άρθρα [12],[14],[15],[49],[100] χρησιμοποιείται η τεχνική της ανάλυσης ευαισθησίας του δείκτη απόδοσης ενεργού ροής ισχύος για τον προσδιορισμό των γραμμών, που είναι πιο κατάλληλες για την εγκατάσταση των ΕΣΜ. Στα άρθρα αυτά εξετάζονται δύο ΕΣΜ, το TCSC και το TCPAR. Αρχικά αυτή η μέθοδος εκτιμάει τις γραμμές, στις οποίες η εγκατάσταση των ΕΣΜ θα είναι πιο ωφέλιμη για το ΣΗΕ. Στη συνέχεια ανάλογα με την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος επιλέγεται η βέλτιστη τοποθεσία για την εγκατάσταση της συσκευής. Συγκεκριμένα, στα άρθρα [12],[14],[15] προτείνονται οι τοποθεσίες εγκατάστασης των TCSC και TCPAR βάση των δεικτών απόδοσης (PI). Στη συνέχεια στο άρθρο [12] η βέλτιστη επιλογή γίνεται με βάση τη μείωση τους κόστους συμφόρησης, στο άρθρο [14] με βάση τη μείωση του κόστους παραγωγής λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος των συσκευών, ενώ στο άρθρο [15] με βάση την ενίσχυση της συνολικής ικανότητας μεταφοράς του συστήματος. Στο άρθρο [49] δύο μέθοδοι προτείνονται για την εκτίμηση της τοποθεσίας εγκατάστασης του TCSC. Αρχικά, μία μέθοδος βασισμένη στην ευαισθησία των συνολικών αέργων απωλειών του συστήματος και έπειτα, η μέθοδος της ευαισθησίας του δείκτη απόδοσης ενεργού ροής ισχύος. Η βέλτιστη επιλογή της τοποθεσίας γίνεται με βάση τη μείωση του κόστους παραγωγής και του κόστους του TCSC. Τέλος, στο άρθρο [100] εφαρμόζεται, αρχικά, η τεχνική ευαισθησίας του δείκτη απόδοσης για να ερευνηθούν ποιες γραμμές είναι καταλληλότερες για την εγκατάσταση του

TCSC. Στη συνέχεια επιλέγεται η βέλτιστη τοποθεσία του με βάση τη μεγιστοποίηση της ικανότητας φόρτισης του συστήματος και την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης του TCSC με τη μέθοδο MOPSO, η οποία αναλύεται παρακάτω.

Ο δείκτης απόδοσης ενεργού ροής ισχύος εκφράζει την σημαντικότητα της φόρτισης ενός ΣΗΕ υπό φυσιολογικές συνθήκες αλλά και για πιθανές διαταραχές που μπορεί να εμφανιστούν στο σύστημα που εξετάζεται. Ο δείκτης απόδοσης είναι μικρός όταν όλες οι γραμμές είναι εντός των ορίων τους, ενώ παίρνει μεγάλη τιμή όταν υπάρχουν υπερφορτίσεις στις γραμμές μεταφοράς του ΣΗΕ. Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται ένα καλό μέτρο της απεικόνισης της σοβαρότητας υπερφόρτισης μιας γραμμής μεταφοράς για μία δεδομένη κατάσταση του ΣΗΕ. Μαθηματικά ο δείκτης απόδοσης ενεργού ροής ισχύος εκφράζεται με τον ακόλουθο τρόπο:

Οι σχέσεις (4.23) και (4.24) δηλώνουν την έγχυση ενεργού ισχύος στο ζυγό  $i$  και  $j$  μιας γραμμής μεταφοράς  $k$  που τοποθετείται ένα TCSC και ένα TCPAR, αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} P_{ic} &= V_i^2 \Delta G_{ij} - V_i V_j [\Delta G_{ij} \cos \delta_{ij} + \Delta B_{ij} \sin \delta_{ij}] \\ P_{jc} &= V_j^2 \Delta G_{ij} - V_i V_j [\Delta G_{ij} \cos \delta_{ij} - \Delta B_{ij} \sin \delta_{ij}] \end{aligned} \quad (4.23)$$

όπου  $\Delta G_{ij}, \Delta B_{ij}$ : συντελεστές, που προέρχονται από πράξεις αντιδράσεων και αγωγιμοτήτων μεταξύ των παραμέτρων της γραμμής μεταφοράς και των παραμέτρων του TCSC που τοποθετείται σε αυτή τη γραμμή,

$$\begin{aligned} P_{is} &= -V_i^2 \tan^2 \phi G_{ij} - V_i V_j \tan \phi [G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}] \\ P_{js} &= -V_i V_j \tan \phi [G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}] \end{aligned} \quad (4.24)$$

όπου  $G_{ij}, B_{ij}$ : το πραγματικό και φανταστικό μέρος της σύνθετης αγωγιμότητας της γραμμής μεταφοράς, που συνδέει τους ζυγούς  $i$  και  $j$ .

Ο δείκτης απόδοσης ορίζεται από τον τύπο:

$$PI = \sum_{m=1}^{nl} \frac{W_m}{2n} \left( \frac{P_{lm}}{P_{lm}^{\max}} \right)^{2n} \quad (4.25)$$

όπου  $P_{lm}$ : η ενεργός ροή ισχύος,  $P_{lm}^{\max}$ : η ονομαστική χωρητικότητα της γραμμής μεταφοράς  $m$ ,  $n$ : ένας εκθέτης που λαμβάνεται ίσος με 2,  $W_m$ : ένας πραγματικός μη-αρνητικός συντελεστής στάθμισης, που αντιπροσωπεύει τη βαρύτητα κάθε γραμμής μεταφοράς, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 1.0. Οι ευαισθησίες του δείκτη απόδοσης συναρτήσεων του TCSC και του TCPAR, που τοποθετούνται σε μία γραμμή μεταφοράς  $k$  δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$c_k^c = \frac{\theta PI}{\theta X_{ck}} \Big|_{X_{ck}=0} \quad (4.26)$$

$$c_k^s = \frac{\theta PI}{\theta \phi_k} \Big|_{\phi_k=0} \quad (4.27)$$

όπου

$$\frac{\theta P_i}{\theta X_k} = \sum_{m=1}^{nl} w_m P_{lm}^3 \left( \frac{1}{P_{lm}^{\max}} \right)^4 \frac{\theta P_{lm}}{\theta X_k} \quad (4.28)$$

όπου η ενεργός ροή ισχύος  $P_{lm}$  σε μία γραμμή μεταφοράς  $m$  μπορεί να αναπαρασταθεί χρησιμοποιώντας τους όρους της έγχυσης ενεργού ισχύος που προέρχονται από τις DC εξισώσεις ροής ισχύος ως εξής:

$$P_{lm} = \begin{cases} \sum_{n=1, n \neq s}^N S_{mn} P_n, \text{ για } m \neq k \\ \sum_{n=1, n \neq s}^N S_{mn} P_n + P_j, \text{ για } m = k \end{cases} \rightarrow \quad (4.29)$$

$$\frac{\theta P_{lm}}{\theta X_k} = \begin{cases} S_{mi} \frac{\theta P_i}{\theta_{Xk}} + S_{mj} \frac{\theta P_j}{\theta_{Xk}}, \text{ για } m \neq k \\ (S_{mi} \frac{\theta P_i}{\theta_{Xk}} + S_{mj} \frac{\theta P_j}{\theta_{Xk}}) + \frac{\theta P_j}{\theta_{Xk}}, \text{ για } m = k \end{cases}$$

όπου  $s$ : ο ζυγός αναφοράς του συστήματος,  $S_{mn}$ : το  $mn$ -στο στοιχείο του πίνακα  $S$ , ο οποίος αντιστοιχίζει τις ροές των γραμμών με τις εγχύσεις ισχύος των ζυγών χωρίς ΕΣΜ,  $N$ : ο συνολικός αριθμός ζυγών του ΣΗΕ,  $k$ : η γραμμή μεταφοράς που τοποθετείται το ΕΣΜ. Οι δείκτες ευαισθησίας, που δίνονται από τις σχέσεις (4.26), (4.27) μπορούν να υπολογιστούν από την σχέση (4.29) η οποία χρησιμοποιεί τις σχέσεις (4.23), (4.24) για τους υπολογισμούς ευαισθησίας. Τα κριτήρια επιλογής τοποθέτησης των ΕΣΜ είναι: 1) ο TCSC τοποθετείται στη γραμμή  $k$  με τον πιο αρνητικό δείκτη ευαισθησίας  $C_k^c$  και 2) ο TCPAR τοποθετείται στη γραμμή  $k$  με την μεγαλύτερη απόλυτη τιμή του δείκτη ευαισθησίας  $C_k^s$ .

#### 4.2.1.2 Sensitivity factors/indicators

Διάφοροι δείκτες ευαισθησίας εμφανίζονται στα άρθρα [3],[38],[50],[51] και χρησιμοποιούνται ως μέθοδοι επίλυσης στο πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ. Σε αυτήν την κατηγορία μπορούν επίσης να ενταχθούν και τα άρθρα [81],[84],[95] που αναλύθηκαν παραπάνω.

Στο άρθρο [3] προτείνεται μία μέθοδος για την εύρεση της τοποθεσίας εγκατάστασης SVC και άλλων αέργων στοιχείων σε ένα ΣΗΕ με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος. Σκοπός του άρθρου είναι η μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων της χρησιμοποιούμενης μεθόδου βελτιστοποίησης με την εξάλειψη, από την εξέταση, ορισμένων τοποθεσιών στο ΣΗΕ, στις οποίες η εγκατάσταση των SVCs είναι λιγότερο αποτελεσματική στη μείωση των απωλειών ισχύος ( $P_{\text{loss}}$ ). Για αυτό το λόγο, υπολογίζεται η ευαισθησία των απωλειών ισχύος σε έγχυση αέργου ισχύος σε όλους τους ζυγούς του ΣΗΕ, ως δείκτες των τοποθεσιών, οι οποίες

είναι λιγότερο αποτελεσματικές, όσον αφορά τη μείωση της απώλειας ενέργειας στο ΣΗΕ. Η υπόθεση που γίνεται είναι ότι, οι μικρότεροι συντελεστές ευαισθησίας αντιστοιχούν στους ζυγούς, στους οποίους η έγχυση αέργου ισχύος είναι λιγότερο αποτελεσματική στη μείωση των απωλειών ισχύος του συστήματος. Ορίζεται το διάνυσμα ευαισθησίας [SEN] από την ακόλουθη σχέση:

$$[SEN]^T = \left[ \frac{\theta P_1}{\theta P_2}, \dots, \frac{\theta P_1}{\theta P_n}, \frac{\theta P_1}{\theta Q_2}, \dots, \frac{\theta P_1}{\theta Q_{NL+1}} \right] \quad (4.30)$$

όπου η παραγωγή ισχύος στο ζυγό αναφοράς είναι το άθροισμα των εγχεόμενων ισχύων σε όλους τους ζυγούς του ΣΗΕ, συμπεριλαμβανομένων και των απωλειών ισχύος, και δίνεται από τη σχέση:

$$P_1 = - \sum P_i + P_{loss}, \quad (i = 2, \dots, n) \quad (4.31)$$

$P_i, Q_i$  : η ενεργός και άεργος έγχυση ισχύος στο ζυγό  $i$ , ο ζυγός αναφοράς είναι ο 1, ο οποίος πλαισιώνεται από  $NL$  ζυγούς φορτίου και από ζυγούς παραγωγής. Ο συνολικός αριθμός των ζυγών του ΣΗΕ είναι  $n$  και ο τελευταίος ζυγός φορτίου είναι ο  $NL+1$ . Το διάνυσμα ευαισθησίας απεικονίζει τις αλλαγές στο  $P_1$  συναρτήσει της ανά μονάδα έγχυσης ενεργού ισχύος όλων των ζυγών του συστήματος (εκτός του ζυγού αναφοράς), καθώς και συναρτήσει της ανά μονάδα έγχυσης αέργου ισχύος όλων των ζυγών φορτίου του συστήματος. Για τις ανάγκες αυτού του άρθρου, οι πρώτοι  $n-1$  όροι του διανύσματος μπορούν να παραλειφθούν, ώστε το διάνυσμα ευαισθησίας να περιέχει μόνο τους όρους  $\frac{\theta P_1}{\theta Q_i}$ , ( $i = 2, \dots, NL + 1$ ). Τα στοιχεία της σχέσης

(4.30) μπορούν να υπολογιστούν με την βοήθεια του κανόνα της αλυσίδας των παραγώγων.

$$\frac{\theta P_1}{\theta x} = \sum_{k=2}^n \left( \frac{\theta P_1}{\theta P_k} \right) \left( \frac{dP_k}{dx} \right) + \sum_{k=2}^{NL+1} \left( \frac{\theta P_1}{\theta Q_k} \right) \left( \frac{dQ_k}{dx} \right) \quad (4.32)$$

όπου  $x$  αναπαριστά μία μεταβλητή κατάστασης, με  $[\delta_2 \delta_3 \dots \delta_n V_2 V_3 \dots V_{NL+1}]^T$  το διάνυσμα κατάστασης. Χρησιμοποιώντας την ιακωβιανή μήτρα της σχέσης (4.35), οι σχέσεις (4.30) και (4.32) μπορούν να συνδυαστούν στην ακόλουθη εξίσωση πινάκων:

$$[JK]^T [SEN] = [D] \quad (4.33)$$

Ο υπολογισμός του  $[D]$  είναι πολύ απλός, και περιλαμβάνει το πολύ τους διπλάσιους υπολογισμούς από όσοι είναι οι συνδεδεμένοι ζυγοί στο ζυγό αναφοράς.  $[JK]$  είναι η ιακωβιανή μήτρα της τελευταίας επανάληψης της μελέτης ροής φορτίου, η οποία συνήθως βρίσκεται σε παραγοντοποιημένη μορφή στο τέλος της μελέτης. Ως εκ τούτου, οι υπολογιστικές απαιτήσεις για τον πίνακα συντελεστών ευαισθησίας είναι πολύ λιγότερες από τον υπολογισμό μίας επανάληψης της πλήρους μεθόδου Newton-Raphson.

όπου

$$[D]^T = \left[ \frac{\theta P_1}{\theta \delta_2}, \dots, \frac{\theta P_1}{\theta \delta_n}, \frac{\theta P_1}{\theta V_2}, \dots, \frac{\theta P_1}{\theta V_{NL+1}} \right] \quad (4.34)$$

και

$$[\text{JK}] = \begin{bmatrix} \frac{\theta P_2}{\theta \delta_2} & \dots & \frac{\theta P_2}{\theta \delta_n} & \frac{\theta P_2}{\theta V_2} & \dots & \frac{\theta P_2}{\theta V_{NL+1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\theta P_2}{\theta \delta_2} & \dots & \frac{\theta P_n}{\theta \delta_n} & \frac{\theta P_2}{\theta V_2} & \dots & \frac{\theta P_n}{\theta V_{NL+1}} \\ \frac{\theta Q_2}{\theta \delta_2} & \dots & \frac{\theta Q_2}{\theta \delta_n} & \frac{\theta Q_2}{\theta V_2} & \dots & \frac{\theta Q_2}{\theta V_{NL+1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\theta Q_{NL+1}}{\theta \delta_2} & \dots & \frac{\theta Q_{NL+1}}{\theta \delta_n} & \frac{\theta Q_{NL+1}}{\theta V_2} & \dots & \frac{\theta Q_{NL+1}}{\theta V_{NL+1}} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Στο άρθρο [38] προτείνονται δύο μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ. Τρία ΕΣΜ μελετήθηκαν στο άρθρο, το SVC, το TCSC και το UPFC. Η πρώτη μέθοδος εντάσσεται στην κατηγορία της ανάλυσης ρυθμών, που αναλύεται στην επόμενη ενότητα, και ορίζει τρεις δείκτες ελεγχιμότητας, έναν για καθένα από τα τρία ΕΣΜ. Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι η ενίσχυση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων μεταξύ των περιοχών του ΣΗΕ. Οι δείκτες ελεγχιμότητας έχουν υπολογιστεί τόσο για την βασική περίπτωση όσο και για πιθανές διαταραχές που μπορούν να συμβούν στο ΣΗΕ. Η δεύτερη μέθοδος, που εντάσσεται στην κατηγορία της ανάλυσης ευαισθησίας, αποτελείται από ένα στατικό κριτήριο που βασίζεται στους δείκτες ευαισθησίας των απωλειών (loss sensitivity indices), η οποία προσδιορίζει επίσης την βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης των τριών ΕΣΜ. Έτσι ορίζονται τρεις νέοι δείκτες ευαισθησίας. Ο δείκτης ευαισθησίας απωλειών  $a_k$ , για SVC τοποθετημένο στο ζυγό  $i$ , ορίζεται ως η ευαισθησία των συνολικών απωλειών μεταφοράς συναρτήσει της αέργου ισχύος που εγχέεται στο ζυγό  $i$ :

$$a_k = 2 \sum_{j=1}^N \left( \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j) Q_j + \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j) P_j \right) \quad (4.36)$$

όπου  $r_{ij}$ : το πραγματικό μέρος του  $ij$ -στου στοιχείου του πίνακα αντιστάσεων  $Z$  του συστήματος,  $N$ : ο συνολικός αριθμός των ζυγών και  $P_j, Q_j$ : ενεργή και άεργη έγχυση ισχύος στο ζυγό  $j$ . Ο δείκτης ευαισθησίας απωλειών  $b_k$ , για TCSC τοποθετημένο σε γραμμή μεταφοράς  $l$  μεταξύ ζυγών  $i$  και  $j$ , ορίζεται ως η ευαισθησία των συνολικών απωλειών μεταφοράς συναρτήσει της σειριακής αντίδρασης της γραμμής μεταφοράς:

$$b_k = [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \left[ \frac{2R_k X_k}{(R_k^2 + X_k^2)^2} \right] \quad (4.37)$$

όπου  $R_k, X_k$ : η αντίσταση και η αντίδραση της γραμμής μεταφοράς, αντίστοιχα. Ο δείκτης ευαισθησίας απωλειών  $c_k$ , για UPFC τοποθετημένο σε γραμμή μεταφοράς  $l$  μεταξύ ζυγών  $i$  και  $j$ , ορίζεται ως η ευαισθησία των συνολικών απωλειών μεταφοράς συναρτήσει του μιγαδικού μέρους της σειριακής εγχεόμενης τάσης στη γραμμή μεταφοράς  $l$ :



$$c_k = (V_j \sin(\delta_i - \delta_j)) \frac{R_k}{R_k^2 + X_k^2} + (V_i - V_j \cos(\delta_i - \delta_j)) \frac{X_k}{R_k^2 + X_k^2} \quad (4.38)$$

Το SVC τοποθετείται στο ζυγό, ο οποίος έχει τη μεγαλύτερη αρνητική τιμή  $\alpha_k$ . Ενώ στις περιπτώσεις των TCSC και UPFC, το ΕΣΜ τοποθετείται στη γραμμή μεταφοράς, η οποία έχει τη μεγαλύτερη απόλυτη τιμή  $b_k$  και  $c_k$ , αντίστοιχα.

Στο άρθρο [50] προτείνεται μία νέα προσέγγιση για τον προσδιορισμό των μεταβολών στην αντίδραση του TCSC, που απαιτούνται για την επίτευξη μίας επιθυμητής ικανότητας μεταφοράς. Επιθυμητός είναι, επίσης, και ο προσδιορισμός κατάλληλης τοποθεσίας εγκατάσταση του TCSC, ο οποίος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός δείκτη ευαισθησίας (Sensitivity Index, SI):

$$SI_{mn} = \frac{\Delta P_{ij}^0 - \Delta P_{ij}^{xy}}{\Delta P_{ij}^0}, xy \in B \quad (4.39)$$

όπου  $\Delta P_{ij}^0$ : η μεταβολή στη ροή ισχύος της γραμμής μεταξύ των ζυγών i-j, λόγω της συναλλαγής ισχύος μεταξύ ζυγού-πωλητή m και ζυγού-αγοραστή n, όταν καμία αντίδραση του συστήματος δεν μεταβάλλεται,  $\Delta P_{ij}^{xy}$ : η μεταβολή στη ροή ισχύος της γραμμής μεταξύ των ζυγών i-j, όταν η αντίδραση της γραμμής μεταξύ των ζυγών x-y αλλάζει σε  $A_x$ , όπου  $A_x$ : το κλάσμα της συνολικής αντίδρασης της γραμμής. Η γραμμή μεταφοράς με την υψηλότερη τιμή του δείκτη ευαισθησίας, έστω k-l, επιλέγεται για την τοποθέτηση του TCSC. Έτσι η σχέση (4.39) γίνεται:

$$SI_{mn} = \max \left\{ \frac{\Delta P_{ij}^0 - \Delta P_{ij}^{xy}}{\Delta P_{ij}^0} \right\} = \frac{\Delta P_{ij}^0 - \Delta P_{ij}^{kl}}{\Delta P_{ij}^0} \quad (4.40)$$

Όσο ελέγχεται η ροή ισχύος, αποδεικνύεται ότι για ένα πεπερασμένο εύρος, η μεταβολή της αντιστάθμισης σειριακής αντίδρασης της γραμμής μεταφοράς k-l μεταβάλλεται γραμμικά με τη μεταβολή της ροής ισχύος i-j, που βρίσκεται υπό έλεγχο, και μπορεί να ορίσει ένα ευθύγραμμο τμήμα RC. Έτσι, προκύπτει ο τύπος:

$$\Delta P_{ij}^{kl} = M(A_x^{kl}) + C \quad (4.41)$$

όπου  $A_x^{kl}$ : το κλάσμα της συνολικής αντίδρασης της γραμμής μεταξύ των ζυγών k-l, M: η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος RC, C: ο σταθερός όρος της εξίσωσης του ευθυγράμμου τμήματος RS. Η διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς, πλέον, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$ATC_{mn}^{kl} = \frac{P_{mn}(P_{ij}^{\max} - P_{ij}^0)}{\Delta P_{ij}^{kl}} = \frac{P_{mn}(P_{ij}^{\max} - P_{ij}^0)}{M(A_x^{kl}) + C}, i, j \in B \quad (4.42)$$

όπου  $ATC_{mn}^{kl}$ : η επιθυμητή τιμή της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς για συναλλαγή ισχύος μεταξύ ζυγού-πωλητή m και ζυγού-αγοραστή n συναρτήσει της αντίδρασης της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών k-l, η οποία μεταβάλλεται με τη σύνδεση του TCSC σε σειρά με αυτή,  $P_{mn}$ : συναλλαγή ισχύος μεταξύ ζυγού-πωλητή m και ζυγού-αγοραστή n,  $P_{ij}^{\max}$ : όριο

ενεργού ισχύος της γραμμής μεταξύ των ζυγών  $i-j$ ,  $P_{ij}^0$  : η ροή ισχύος βασικής περίπτωσης της γραμμής μεταξύ των ζυγών  $i-j$ . Από τη σχέση (4.42) προσδιορίζεται μία μαθηματική σχέση ανάμεσα στη διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς και στην αντίδραση του TCSC. Από αυτή τη σχέση μπορεί να καθοριστεί η επιθυμητή αντιστάθμιση της γραμμής για την επιθυμητή τιμή της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς:

$$x_c = x_{kl} - Ax^{kl} = x_{kl} - \frac{P_{mn}(P_{ij}^{\max} - P_{ij}^0)}{M(ATC_{mn}^{kl})} + \frac{C}{M} \quad (4.43)$$

όπου  $x_c, x_{kl}$  : η αντίδραση του TCSC και η συνολική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών  $k-l$  μετά την τοποθέτηση του TCSC σε αυτή. Τέλος, παρουσιάζεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος, ο οποίος βάση των παραπάνω προσδιορίζει την καταλληλότερη θέση και το καταλληλότερο μέγεθος της αντίδρασης ενός TCSC για την επίτευξη ενός επιθυμητού επιπέδου ικανότητας μεταφοράς σε ένα ΣΗΕ.

Στο άρθρο [51] προτείνονται νέοι δείκτες ευαισθησίας, οι οποίοι ονομάζονται δείκτες κατανομής της φόρτισης του συστήματος (System Loading Distribution Factors, SLDFs), για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης των UPFC σε ένα ΣΗΕ. Οι προτεινόμενοι δείκτες ευαισθησίας έχουν υπολογιστεί για κάθε γραμμή μεταφοράς, ως η μεταβολή στην ενεργό ροή ισχύος της γραμμής συναρτήσει της μεταβολής της φόρτισης του συστήματος και ορίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$SLDF_m = \frac{\Delta P_m}{\Delta \lambda}, \quad \forall m \in N_l \quad (4.44)$$

όπου  $m$ : μία γραμμή μεταφοράς του ΣΗΕ,  $N_l$  : ο συνολικός αριθμός γραμμών του ΣΗΕ,  $\lambda$ : ο συντελεστής φόρτισης του συστήματος (system loading factor). Οι δείκτες έχουν υπολογιστεί τόσο για τη βασική περίπτωση, που το σύστημα είναι ανέπαφο, όσο και για πιθανές διαταραχές που μπορεί να προκληθούν στο ΣΗΕ λόγω αποκοπής κάποιων γραμμών μεταφοράς, υπό διαφορετικά σενάρια φόρτισης του ΣΗΕ. Έτσι, ο τροποποιημένος δείκτης κατανομής της φόρτισης του συστήματος (Modified SLDF, MSLDF) με την επίδραση των πιθανών διαταραχών (στη συγκεκριμένη περίπτωση αποκοπής γραμμών από το ΣΗΕ) ορίζεται, με τη βοήθεια του δείκτη απόδοσης της σχέσης (4.25), από την ακόλουθη σχέση:

$$MSLDF = SLDF_{base\_case} + \sum_{mc=1}^{N_{cl}} PI_{mc} SLDF_{mc} \quad (4.45)$$

όπου  $PI_{mc}$  : ο δείκτης απόδοσης, ο οποίος υπολογίζεται για την αποκοπή της  $mc$ -στης (πιο κρίσιμης) γραμμής μεταφοράς,  $SLDF_{mc}$  : ο δείκτης κατανομής της φόρτισης της γραμμής, υπολογισμένος για τη περίπτωση της αποκοπής της  $mc$ -στης γραμμής,  $N_{cl}$  : ο αριθμός των πιο κρίσιμων γραμμών μεταφοράς που θεωρούνται υποψήφιες για αποκοπή από το ΣΗΕ. Επιπροσθέτως, προκειμένου να ληφθούν υπόψη διαφορετικές συνθήκες φόρτισης του ΣΗΕ στην τοποθέτηση του UPFC, ορίζεται ο δείκτης  $SLDF^*$  :

$$SLDF^* = \frac{MSLDF^{NL} + MSLDF^{IL} + MSLDF^{DL}}{3} \quad (4.46)$$

όπου  $MSLDF^{NL}$ ,  $MSLDF^{IL}$ ,  $MSLDF^{DL}$  :είναι ο παραπάνω τροποποιημένος δείκτης κατανομής της φόρτισης του συστήματος υπολογισμένος σε φυσιολογικές, αυξημένες και μειωμένες συνθήκες φόρτισης, αντίστοιχα. Ως αυξημένες/μειωμένες συνθήκες φόρτισης, ορίζεται η 5% αύξηση/μείωση σε όλα τα φορτία όλων των ζυγών σε σχέση με την αρχική βασική περίπτωση φόρτισης του ΣΗΕ. Το μέγεθος του  $SLDF^*$  αναπαριστά το πόσο ευαίσθητη είναι η ενεργός ροή ισχύος μιας γραμμής μεταφοράς στη μεταβολή του δείκτη φόρτισης του συστήματος. Η γραμμή μεταφοράς με την υψηλότερη τιμή αυτού του δείκτη θεωρείται ως η βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης για το UPFC.

#### 4.2.1.3 Άλλες μέθοδοι ευαισθησίας

Στα άρθρα [8],[34],[39] χρησιμοποιούνται άλλες μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ που ανήκουν στην ανάλυση ευαισθησίας.

Κύριος στόχος του άρθρου [8] είναι ο προσδιορισμός βέλτιστων νόμων ελέγχου και βέλτιστων τοποθεσιών εγκατάστασης σειριακών συνδεδεμένων ΕΣΜ (όπως TCSC και SSSC) στο ΣΗΕ για απόσβεση των ταλαντώσεων ισχύος. Ένα κύκλωμα ανάλογο του ηλεκτρομηχανικού συστήματος χρησιμοποιείται για να προτείνει τους νόμους ελέγχου και ένας δείκτης τοποθεσίας προτείνεται για την εύρεση των βέλτιστων τοποθεσιών εγκατάστασης των ΕΣΜ.

Στο άρθρο [34] προτείνεται μία μέθοδος ευαισθησίας πρώτης τάξης (first-order sensitivity method) (ή μέθοδος DC ανάλυσης) για τον προσδιορισμό των βέλτιστων τοποθεσιών εγκατάστασης των UPFCs στο ΣΗΕ, με την επίλυση μόνο ενός προβλήματος AC βέλτιστης ροής ισχύος (AC Optimal Power Flow problem) χρησιμοποιώντας το μοντέλο του ιδανικού μετασχηματιστή για το UPFC (UPFC ideal transformer model). Οι περισσότερες τεχνικές για τη βέλτιστη εγκατάσταση συσκευών UPFCs στα δίκτυα απαιτούν την επίλυση πολλών προβλημάτων AC βέλτιστης ροής ισχύος, και πρακτικά δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε περιπτώσεις μακροσκελών ΣΗΕ. Το υπολογιστικό βάρος τέτοιων τεχνικών θα μπορούσε να μειωθεί αν οι λιγότερο αποτελεσματικές τοποθεσίες αποκλείονταν με μία τεχνική διαλογής, όπως αυτή που προτείνεται σε αυτό το άρθρο. Για αυτό το λόγο, αγνοούνται οι γραμμές μεταφοράς με τις χαμηλές οριακές τιμές και επιλύεται ένα πλήρες πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος μόνο για τις γραμμές με υψηλότερες οριακές τιμές, ώστε να υπάρχει πραγματική εξοικονόμηση κόστους. Γίνεται η υπόθεση, ότι το UPFC τοποθετείται στη γραμμή μεταφοράς  $ik$ . Οι οριακές τιμές του UPFC ορίζονται ως τα ποσά, με τα οποία το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος θα μπορούσε να αλλάξει με μία πολύ μικρή μεταβολή στις μεταβλητές ελέγχου του UPFC της γραμμής μεταφοράς  $ik$ . Ως διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου ενός UPFC, που τοποθετείται στη γραμμή μεταφοράς  $ik$  ορίζεται το διάνυσμα  $x_{ik} = [T_{ik}, \phi_{ik}, \rho_{ik}]^T$ . Στη συνέχεια, ορίζεται η συνάρτηση Lagrange του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος από την ακόλουθη σχέση:

$$L_{ik}(y, \lambda, x_{ik}, \lambda_x) = C(y, x_{ik}) + \sum_{j \in A} \lambda_j h_j(y, x_{ik}) + \lambda_x^T (x - x_{ik}) \quad (4.47)$$

όπου  $y$ : το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης,  $\lambda$ : πολλαπλασιαστής Lagrange,  $C(y, x_{ik})$ : συνολικό κόστος παραγωγής, συνάρτηση που ελαχιστοποιείται στο πρόβλημα βέλτιστης ροής

ισχύος λαμβάνοντας υπόψη διάφορους ενεργούς περιορισμούς  $h_j(y, x_{ik})$ , A: το σύνολο των ενεργών περιορισμών και  $\lambda_x = [\lambda_T, \lambda_\varphi, \lambda_\rho]^T$ . Ορίζεται η συνάρτηση  $\lambda_x^*(x)$  ως η βέλτιστη τιμή του πολλαπλασιαστή Lagrange για τον περιορισμό  $x_{ik} = x$ . Η περίπτωση  $\lambda_x^*(x_0)$ , όπου  $T_{ik} = 1, \varphi_{ik} = 0, \rho_{ik} = 0$ , παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, επειδή το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος όταν επιλύεται με τις παραμέτρους ελέγχου του UPFC της περίπτωσης  $x = x_0$  αποδίδει τα ίδια αποτελέσματα για  $y$  και  $\lambda$  με τη βασική περίπτωση, όπου δεν υπάρχει UPFC στη γραμμή  $ik$ . Χρησιμοποιώντας τις πρώτης-τάξης συνθήκες για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος για  $x_{ik} = x_0$  λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\theta L_{ik}}{\theta x_{ik}} = 0 \rightarrow \lambda_x^*(x_0) = \left[ \frac{\theta C(y^*, x_{ik})}{\theta x_{ik}} + \sum_{j \in A} \lambda_j^* \frac{\theta h_j(y^*, x_{ik})}{\theta x_{ik}} \right] \quad (4.48)$$

Η εξίσωση αυτή δείχνει ότι η οριακή τιμή  $\lambda_x^*(x_0)$  μπορεί να προσδιοριστεί από τη στιγμή που είναι γνωστά τα  $y^*$  και  $\lambda^*$ , τα οποία προκύπτουν από τη βασική περίπτωση της επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος δίχως το UPFC. Για αυτό το λόγο, αν τα  $y^*$  και  $\lambda^*$  είναι γνωστά, μπορούν να προκύψουν οι πρώτης-τάξης ευαισθησίες του κόστους συνάρτησης των μεταβλητών ελέγχου του UPFC  $x_{ik}$  για κάθε πιθανή γραμμή μεταφοράς, επιλύοντας μόνο το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος της βασικής περίπτωσης.

Στο άρθρο [39] παρουσιάζεται μία ανάλυση ευαισθησίας τροχιάς (trajectory sensitivity analysis, TSA). Η TSA χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει την κατάσταση της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος, βοηθώντας στο βέλτιστο προσδιορισμό των παραμέτρων,  $K_p$  και  $K_I$ , ενός PI ελεγκτή που τοποθετείται μαζί με ένα TCSC για την βελτίωση της ευστάθειας του συστήματος. Ακόμη, η TSA προσδιορίζει τις βέλτιστες θέσεις του TCSC-ελεγκτή για διαφορετικές συνθήκες σφάλματος. Ορίζεται έτσι η νόρμα ευαισθησίας (sensitivity norm) για ένα σύστημα  $m$  μηχανών από την ακόλουθη σχέση:

$$S_N = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left[ \left( \frac{\theta \delta_{ij}}{\theta \lambda} \right)^2 + \left( \frac{\theta \Delta \omega_{ri}}{\theta \lambda} \right)^2 \right]} \quad (4.49)$$

όπου  $\delta$ : η γωνία του δρομέα της γεννήτριας,  $\Delta \omega_{ri}$ : η ανά μονάδα απόκλιση ταχύτητας και  $\lambda$ :

το διάνυσμα παραμέτρων του συστήματος. Οι ευαισθησίες τροχιάς,  $\frac{\theta \delta_{ij}}{\theta \lambda}$  και  $\frac{\theta \Delta \omega_{ri}}{\theta \lambda}$  δίνουν πληροφορίες για την επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων στις επιμέρους μεταβλητές κατάστασης και ως εκ τούτου στις γεννήτριες του ΣΗΕ. Ακόμη ορίζεται ο όρος  $n$ , που δηλώνει το αντίστροφο του μεγίστου του  $S_N$ , και ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$n = \frac{1}{\max(S_N)} \quad (4.50)$$

Ιδανικά ισχύει  $n=0$  στο σημείο αστάθειας, οπότε οι τιμές του όρου  $n$  δηλώνουν μία ένδειξη της απόστασης του συστήματος από την αστάθεια. Προτιμώνται οι τοποθεσίες για εγκατάσταση του TCSC εκεί, όπου η τιμή του δείκτη  $n$  είναι η υψηλότερη.

### 4.2.2 Ανάλυση Ρυθμών (modal analysis)

Μια νέα κατηγορία αναλυτικής μεθόδου για την επίλυση προβλημάτων ΒΤΔΕΣΜ αποτελεί η ανάλυση ρυθμών (modal analysis) ή ανάλυση ιδιοτιμών (eigenvalue analysis). Τα άρθρα [10],[38],[41],[71] χρησιμοποιούν την ανάλυση ρυθμών, μαζί και με άλλες μεθόδους, για την επίλυση του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ.

Στο άρθρο [38] ορίζονται τρεις δείκτες ελεγχιμότητας, για καθένα από τα ακόλουθα τρία ΕΣΜ, το SVC, το TCSC και το UPFC. Όπως έχει προαναφερθεί, σκοπός της ανάλυσης, που γίνεται στο άρθρο, είναι η απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων μεταξύ των περιοχών του ΣΗΕ. Γενικά, ένα δυναμικό σύστημα περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{X} &= P \Delta X + Q \Delta W, \quad \Delta X = u \Delta Z \rightarrow \\ \Delta \dot{Z}_k &= \lambda_k \Delta Z_k + \sum_{i=1}^m v_k^T Q_i \Delta W_i \end{aligned} \quad (4.51)$$

όπου  $X$ : διάνυσμα κατάστασης,  $W$ : διάνυσμα εισόδου,  $P$ : πίνακας κατάστασης του ΣΗΕ,  $u, v$ : δεξί και αριστερό ιδιοδιάνυσμα του πίνακα  $P$ . Ο δείκτης ελεγχιμότητας  $i$ -στης εισόδου,  $k$ -στης ιδιοτιμής ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$CI_i = v_k^T Q_i \quad (4.52)$$

όπου  $v_k$ : το αριστερό ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην  $k$ -στη ιδιοτιμή,  $Q_i$ :  $i$ -στο διάνυσμα στήλη του πίνακα  $Q$ . Η είσοδος  $i$ , για την οποία η τιμή της σχέσης (4.52) είναι μέγιστη, θεωρείται ως η κατάλληλη παράμετρος που πρέπει να ελέγχεται για να επηρεάζει την  $k$ -στη ιδιοτιμή στο μέγιστο βαθμό. Οι δυναμικές εξισώσεις ενός ΣΗΕ  $n$ -ζυγών, με τους πρώτους  $m$  να θεωρούνται ζυγοί παραγωγής, και οι αλγεβρικές εξισώσεις δικτύου χωρίς ΕΣΜ μπορούν να γραμμικοποιηθούν γύρω από ένα λειτουργικό σημείο ως εξής:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{X} &= A \Delta X + B \Delta U, \\ 0 &= C \Delta X + B \Delta U \end{aligned} \quad (4.53)$$

Οι τρεις δείκτες ελεγχιμότητας των τριών ΕΣΜ (SVC, TCSC, UPFC) ορίζονται βάση των δυναμικών τους μοντέλων. Οι εξισώσεις της σχέσης (4.53), όταν συνδέεται ένα SVC στο ζυγό  $i$  με το φανταστικό μέρος της σύνθετης αγωγιμότητας του  $B_{SVC}$ , παίρνουν τη μορφή:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{X} &= (A - B D^{-1} C) \Delta X + (-B D^{-1} F) \Delta B_{SVC} = \\ \Delta \dot{X} &= A' \Delta X + F' \Delta B_{SVC}, \\ 0 &= C \Delta X + D \Delta U + F \Delta B_{SVC} \end{aligned} \quad (4.54)$$

όπου  $F$ : πίνακας που περιέχει μερικές παραγώγους της εξίσωσης ισορροπίας ισχύος σε όλους τους ζυγούς συναρτήσεως του φανταστικού μέρους της σύνθετης αγωγιμότητας του SVC, το οποίο αρχικά υποτίθεται ότι πρέπει να τοποθετείται σε όλους τους ζυγούς. Ο πίνακας  $F$  είναι της τάξης  $(2m+2n) \times (n)$ . Ο δείκτης ελεγχιμότητας του SVC, που τοποθετείται στο ζυγό  $i$  και αντιστοιχεί στην  $k$ -στη ιδιοτιμή δίνεται από τη σχέση:

$$CI_i = v_k^T F'_i \quad (4.55)$$

όπου  $v$ : το αριστερό ιδιοδιάνυσμα του πίνακα  $A'$ , που αντιστοιχεί στην  $k$ -στη ιδιοτιμή. Οι εξισώσεις της σχέσης (4.53), όταν συνδέεται ένα TCSC στη γραμμή μεταφοράς  $l$  μεταξύ των ζυγών  $i$  και  $j$  με βαθμό αντιστάθμισης  $K_c = \frac{X_c}{X_l}$  με  $X_c, X_l$ : η αντίδραση του TCSC που συνδέεται στη γραμμή  $l$  και η αντίδραση της γραμμής  $l$ , αντίστοιχα, παίρνουν τη μορφή:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{X} &= (A - BD^{-1}C)\Delta X + (-BD^{-1}E)\Delta K_c = \\ \Delta\dot{X} &= A'\Delta X + E'\Delta K_c, \\ 0 &= C\Delta X + D\Delta U + E\Delta K_c\end{aligned}\quad (4.56)$$

όπου  $E$ : πίνακας που περιέχει μερικές παραγώγους της εξίσωσης ισορροπίας ισχύος σε όλους τους ζυγούς συναρτήσει του βαθμού αντιστάθμισης που παρέχεται από το TCSC, το οποίο αρχικά υποτίθεται ότι πρέπει να τοποθετείται σε όλες τις γραμμές μεταφοράς. Ο πίνακας  $E$  είναι της τάξης  $(2m+2n)\times(nl)$ , όπου  $nl$ : ο αριθμός των γραμμών μεταφοράς του ΣΗΕ. Ο δείκτης ελεγχιμότητας ενός TCSC, που συνδέεται στη γραμμή μεταφοράς  $l$  και αντιστοιχεί στην  $k$ -στη ιδιοτιμή δίνεται από τη σχέση:

$$CI_i = v_k^T E'_i \quad (4.57)$$

Οι εξισώσεις της σχέσης (4.53), όταν συνδέεται ένα UPFC στη γραμμή μεταφοράς  $l$  μεταξύ των ζυγών  $i$  και  $j$  με εγγεόμενη σειριακή τάση ως προς τη γραμμή  $l$   $\bar{V}_{se} = V_{seq} + jV_{sep}$ , παίρνουν τη μορφή:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{X} &= (A - BD^{-1}C)\Delta X + (-BD^{-1}G)\Delta V_{sep} = \\ \Delta\dot{X} &= A'\Delta X + G'\Delta V_{sep}, \\ 0 &= C\Delta X + D\Delta U + G\Delta V_{sep}\end{aligned}\quad (4.58)$$

όπου  $G$ : πίνακας που περιέχει μερικές παραγώγους της εξίσωσης ισορροπίας ισχύος σε όλους τους ζυγούς συναρτήσει της εγγεόμενης σειριακής τάσης που παρέχεται από το UPFC, το οποίο αρχικά υποτίθεται ότι έπρεπε να τοποθετείται σε όλες τις γραμμές μεταφοράς. Ο πίνακας  $G$  είναι της τάξης  $(2m+2n)\times(nl)$ . Ο δείκτης ελεγχιμότητας ενός UPFC για τον σειριακό του κλάδο, που συνδέεται στη γραμμή μεταφοράς  $l$  και αντιστοιχεί στην  $k$ -στη ιδιοτιμή δίνεται από τη σχέση:

$$CI_i^{series} = v_k^T G'_i \quad (4.59)$$

Αφού το UPFC είναι μία συσκευή που μπορεί να τοποθετηθεί στο ΣΗΕ τόσο σειριακά όσο και εγκάρσια, είναι σημαντικό να επιλεγεί και ο ζυγός  $i$  όπου συνδέεται ο εγκάρσιος μετατροπέας του UPFC. Αν ο εγκάρσιος κλάδος του UPFC εγγεί αέργο ρεύμα  $I_{qi}$  στο ζυγό  $i$  τότε οι εξισώσεις της σχέσης (4.53) παίρνουν τη μορφή:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{X} &= (A - BD^{-1}C)\Delta X + (-BD^{-1}H)\Delta I_q = \\ \Delta\dot{X} &= A'\Delta X + H'\Delta I_q, \\ 0 &= C\Delta X + D\Delta U + H\Delta I_q\end{aligned}\quad (4.60)$$

όπου  $H_i$ : πίνακας που περιέχει μερικές παραγώγους της εξίσωσης ισορροπίας ισχύος σε όλους τους ζυγούς συναρτήσει του εγγεόμενου αέργου ρεύματος που παρέχεται από τον εγκάρσιο κλάδο του UPFC. Ο πίνακας  $H_i$  είναι της τάξης  $(2m+2n) \times (n)$ . Ο δείκτης ελεγχιμότητας ενός UPFC για τον εγκάρσιο του κλάδο που συνδέεται στο ζυγό  $i$  και αντιστοιχεί στην  $k$ -στη ιδιοτιμή δίνεται από τη σχέση:

$$CI_i^{\text{shunt}} = v_k^T H_i' \quad (4.61)$$

Για εγκατάσταση των ΕΣΜ επιλέγονται οι ζυγοί/γραμμές μεταφοράς με τους δείκτες ελεγχιμότητας με τη μεγαλύτερη τιμή.

Στο άρθρο [41] η ευστάθεια του ΣΗΕ χρησιμοποιείται σαν δείκτης βέλτιστης κατανομής των SVCs. Ορισμένα SVCs τοποθετούνται στο ΣΗΕ βάση της κύριας λειτουργίας τους, που είναι η ευστάθεια τάσης. Για τον σκοπό αυτό, προτείνονται δύο μέθοδοι: η ανάλυση ρυθμών και ο γενετικός αλγόριθμος. Η βέλτιστη τοποθεσία των SVCs προσδιορίζεται και με τις δύο μεθόδους, σε αντίθεση με το βέλτιστο μέγεθός τους, το οποίο μπορεί να το προσδιορίσει μόνο ο γενετικός αλγόριθμος. Η ανάλυση ρυθμών έχει να κάνει με τον υπολογισμό των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων του ΣΗΕ κοντά στο σημείο κατάρρευσης τάσης με σκοπό να προσδιοριστούν οι ιδιοτιμές (τρόποι ταλάντωσης), οι οποίες είναι ικανές να οδηγήσουν το ΣΗΕ σε κατάρρευση τάσης. Η μέθοδος του γενετικού αλγόριθμου αναλύεται σε επόμενο υπό-κεφάλαιο.

Στο άρθρο [71], κάτω υπό οποιαδήποτε διαταραχή με υψηλή τιμή δείκτη κινδύνου (risk index, RI), η ανάλυση ρυθμών χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει ποιοι ζυγοί χρειάζονται εγκατάσταση SVC και μαζί με τη μεγιστοποίηση του περιθωρίου φόρτισης του δικτύου (maximum Loading Margin) και την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης του SVC ορίζουν μία συνάρτηση πολλαπλών στόχων. Έτσι το αρχικό πρόβλημα ενίσχυσης του βέλτιστου περιθωρίου φόρτισης μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων (multi-objected optimization problem, MOP) και επιλύεται με την μέθοδο πολλαπλών στόχων βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (multi-objected particle swarm optimization, MOPSO) για ένα σύνολο Pareto-βέλτιστων λύσεων. Στο σύνολο Pareto-βέλτιστων λύσεων για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή, η λύση με τη μεγαλύτερη τιμή του δείκτη απόδοσης θεωρείται η καταλληλότερη για να εγκατασταθεί το SVC. Προκειμένου να διατηρηθεί το ΣΗΕ σε ευστάθεια στατικής τάσης για οποιαδήποτε διαταραχή (αποκοπή γραμμής από το ΣΗΕ), τα συστήματα μετάδοσης χρειάζονται αρκετό περιθώριο φόρτισης ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα αστάθειας τάσης, όσο αυξάνεται η μεταφερόμενη ισχύς. Δεδομένου ότι οι πιθανές διαταραχές οδηγούν σε μείωση του περιθωρίου φόρτισης, αυτές με τη μεγαλύτερη πιθανότητα αποτυχίας που οδηγούν και σε μεγαλύτερη μείωση του περιθωρίου φόρτισης θα έχουν μεγαλύτερες τιμές του δείκτη κινδύνου, με αποτέλεσμα να απαιτούν αντιστάθμιση αέργου ισχύος. Ορίζεται έτσι ο δείκτης κινδύνου για μία διαταραχή  $E_i$  από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Risk}(E_i) = P_r(E_i) \times \Delta\lambda_{E_i} \quad (4.62)$$

όπου

$$\Delta\lambda_{E_i} = \lambda_{\text{nor}}^* - \lambda_{E_i}^* \quad (4.63)$$

και

$$P_r(E_i) = 1 + \frac{e^{-\alpha_{E_i} T_r} - 1}{\alpha_{E_i} T_r} \quad (4.64)$$

όπου  $\lambda_{\text{por}}^*$  : συμβολίζει το περιθώριο φόρτισης του ΣΗΕ υπό φυσιολογικές συνθήκες και χωρίς εγκατάσταση ΕΣΜ,  $\lambda_{E_i}^*$  : συμβολίζει το περιθώριο φόρτισης του ΣΗΕ όταν συμβαίνει μία διαταραχή  $E_i$ ,  $P_r(E_i)$  : η πιθανότητα αποτυχίας μίας διαταραχής  $E_i$ ,  $\alpha_{E_i}$  : το ποσοστό αποτυχίας της διαταραχής  $E_i$ ,  $T_r$  : ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα για το οποίο ορίζεται η πιθανότητα  $P_r(E_i)$ . Οι διαταραχές με τις υψηλότερες τιμές του RI θεωρούνται υποψήφιες για εγκατάσταση SVC. Έπειτα για κάθε διαταραχή, ορίζεται ο δείκτης συνεισφοράς αστάθειας τάσης (voltage instability contribution factor, CF) ως η ανάλυση ρυθμού της τάσης (modal voltage), που προκαλείται από τη μεταβολή του φορτίου στο ζυγό  $j$  και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$CF_j = \sum_{i=1}^m R_{ij} \quad (4.65)$$

όπου  $R_{ij}$  : δείκτης που συσχετίζει την  $i$ -στη ανάλυση ρυθμού της τάσης με τη μεταβολή της αέργου ισχύος στο ζυγό  $j$  και  $m$ : αριθμός ανάλυσης ρυθμού (modal number). Οι ζυγοί με τον υψηλότερο δείκτη CF επιλέγονται για την εγκατάσταση του SVC, για κάθε υπολογιζόμενη διαταραχή. Η μέθοδος πολλαπλών στόχων βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων αναλύεται σε επόμενο υπό-κεφάλαιο.

Επίσης στην κατηγορία της ανάλυσης ρυθμών ανήκουν και οι τρόποι επίλυσης των άρθρων [2],[6],[9],[65],[91]. Στόχος των άρθρων, που θα παρουσιαστούν παρακάτω, είναι η βελτίωση της ευστάθειας γωνίας του δρομέα και πιο συγκεκριμένα η ενίσχυση της απόσβεσης των τρόπων ταλάντωσης του συστήματος.

Στα άρθρα [2],[6],[9] παρουσιάζονται τρεις μέθοδοι για την επιλογή βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης και βέλτιστων σημάτων ανάδρασης σταθεροποιητών, που βασίζονται σε ΕΣΜ. Όπως έχει προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, οι εξισώσεις κατάστασης ενός ΣΗΕ είναι της μορφής:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu \\ y &= C^T X + Du \end{aligned} \quad (4.66)$$

όπου  $A$ : ο πίνακας κατάστασης  $m$ -τάξης του ΣΗΕ,  $\lambda_i = -\sigma_i + j\omega_i$  η  $i$ -στη ιδιοτιμή του πίνακα  $A$ . Ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} AV_i &= \lambda_i V_i \\ W_i^T A &= \lambda_i W_i^T \\ W_i^T V_j &= 1, \text{ αν } i = j, 0 \text{ αλλιώς} \end{aligned} \quad (4.67)$$



όπου  $V_i = \begin{bmatrix} V_{i1} \\ V_{i2} \\ \vdots \\ V_{im} \end{bmatrix}$ ,  $W_i^T = [w_i^1, w_i^2, \dots, w_i^m]^T$  το δεξί και το αριστερό ιδιοδιάνυσμα m-τάξης

της ιδιοτιμής  $\lambda_i$  του πίνακα A. Ορίζονται οι δείκτες ελεγχιμότητας  $b_i(\lambda_i)$  και παρατηρησιμότητας  $c_i(\lambda_i)$  της ιδιοτιμής  $\lambda_i$  από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} b_i(\lambda_i) &= W_i^T B \\ c_i(\lambda_i) &= C^T V_i \end{aligned} \quad (4.68)$$

Το γινόμενο των δεικτών αυτών, το υπόλοιπο (the residue), μετρά την αποτελεσματικότητα του σταθεροποιητή και έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για τον προσδιορισμό της θέσης εγκατάστασης και των σημάτων ανάδρασης σταθεροποιητών, που βασίζονται σε ΕΣΜ με τον ακόλουθο απλό τρόπο. Αν υπάρχουν δύο υπονήφιες θέσης εγκατάστασης ή σήματα ανάδρασης, A και B, και ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$|b_{iA}(\lambda_i)| |c_{iA}(\lambda_i)| > |b_{iB}(\lambda_i)| |c_{iB}(\lambda_i)| \quad (4.69)$$

τότε το A θεωρείται καλύτερη επιλογή από το B για τοποθεσία εγκατάστασης ή για σήμα ανάδρασης. Επομένως, δεν είναι οι τιμές του υπολοίπου, αλλά ο λόγος της ακόλουθης σχέσης, ο οποίος προσδιορίζει την επιλογή:

$$R_i(\lambda_i) = \frac{|b_{iA}(\lambda_i)| |c_{iA}(\lambda_i)|}{|b_{iB}(\lambda_i)| |c_{iB}(\lambda_i)|} \quad (4.70)$$

Όμως, ο υπολογισμός όλων αυτών των σχέσεων απαιτεί την ιδιολύση (eigensolution) του πίνακα κατάστασης του συστήματος ανοιχτού-βρόχου και εφαρμόζεται δύσκολα σε μεγάλα ΣΗΕ με τεράστιους πίνακες κατάστασης, λόγω της αριθμητικής δυσκολίας της ιδιολύσης τους και της υπολογιστικής επιβάρυνσης. Έτσι στα άρθρα [2],[6],[9] προτείνονται τρεις μέθοδοι για την μείωση της υπολογιστικής επιβάρυνσης.

Στο άρθρο [2] παρουσιάζεται μία μέθοδος μειωμένης τάξης ανάλυσης ρυθμών (reduced-order method of modal analysis) βασισμένη στο διευρυμένο μοντέλο Phillips-Heffron ενός ΣΗΕ με πολλαπλές μηχανές (αριθμού n). Αυτή η μέθοδος εξασφαλίζει, εκτός από την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, ότι η τάξη όλων των πινάκων που εμπεριέχονται στους υπολογισμούς δεν είναι υψηλότερη από τον αριθμό των μηχανών του ΣΗΕ. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγονται επιτυχώς η αριθμητική δυσκολία της ιδιολύσης των μεγάλων διαστάσεων πινάκων και μειώνεται η υπολογιστική επιβάρυνση. Οι δείκτες ελεγχιμότητας και παρατηρησιμότητας δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$b_i(\lambda_i) = -w_b^T \{K_p I_n - K_2 [\lambda_i T_D + K_3 + EX(\lambda_i) K_6]^{-1} \times [K_q + EX(\lambda_i) K_v]\} \quad (4.71)$$

$$c_i(\lambda_i) = \{C_1 + C_2 \frac{\lambda_i}{\omega_0} + C_3 E(\lambda_i) - C_4 EX(\lambda_i) [K_5 + \frac{\lambda_i}{\omega_0} G_{PSS}(\lambda_i) + K_6 E(\lambda_i)] + C_5 \frac{\lambda_i}{\omega_0} G_{PSS}(\lambda_i)\} v_c \quad (4.72)$$

όπου τα διανύσματα  $n$ -τάξης  $w_b^T, v_c$  :αποτελούν τη μη τετριμμένη λύση των ομογενών γραμμικών εξισώσεων της ακόλουθης σχέσης:

$$\begin{aligned} w_b^T A_R(\lambda_i) &= 0 \\ A_R(\lambda_i) v_c &= 0 \end{aligned} \quad (4.73)$$

όπου

$$A_R(\lambda_i) = \lambda_i^2 M + \lambda_i D + \omega_0 K_1 + \omega_0 K_2 E(\lambda_i) \quad (4.74)$$

όπου

$$E(\lambda_i) = -[\lambda_i T_D + K_3 + EX(\lambda_i) K_6]^{-1} \times [K_4 + EX(\lambda_i) K_5 + \frac{\lambda_i}{\omega_0} EX(\lambda_i) G_{PSS}(\lambda_i)] \quad (4.75)$$

όπου  $\lambda_i$  : $i$ -στη ιδιοτιμή του συστήματος  $n$  μηχανών και  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_p, K_q, K_v, T_D, M, D, EX(s), G_{PSS}(s), C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  :

κέρδη, παράμετροι, συναρτήσεις μεταφοράς και στοιχεία πινάκων της εξίσωσης κατάστασης του μοντέλου Phillips-Heffron. Η φόρμουλα μειωμένης τάξης ανάλυση ρυθμών είναι ισοδύναμη με την κλασσική φόρμουλα, της σχέσης (4.67). Όμως, η τάξη των πινάκων που εμπεριέχονται στους υπολογισμούς μειώνονται από  $m$  σε  $n$ . Ο αριθμός  $m$  μπορεί να είναι και 10 φορές μεγαλύτερος από τον αριθμό  $n$ .

Στο άρθρο [6] παρουσιάζεται μία νέα μέθοδος ανάλυσης ρυθμών του ελέγχου συστήματος ανεξάρτητη από την ιδιολύση (new eigensolution free method of modal control analysis) του πίνακα κατάστασης  $A$ . Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση ότι τουλάχιστον μία από τις γεννήτριες του ΣΗΕ, οι οποίες είναι ευαίσθητες για τις ιδιοτιμές που εξετάζονται, είναι γνωστή. Έστω ότι γνωστή είναι η  $j$ -στη γεννήτρια, με τις μεταβλητές κατάστασής της  $\Delta\delta_j$  και  $\Delta\omega_j$ , οι εξισώσεις κατάστασης του ΣΗΕ παίρνουν την μορφή της ακόλουθης σχέσης:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta}_j \\ \Delta\dot{\omega}_j \\ \dot{X} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 \\ -k_j & -d_j & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_j \\ \Delta\omega_j \\ X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} u, \\ y_k &= [C_1, C_2, C_3^T] \begin{bmatrix} \Delta\delta_j \\ \Delta\omega_j \\ X \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.76)$$

Από τις σχέσεις (4.67) και (4.76) προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις για τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα  $A$  της ιδιοτιμής  $\lambda_i$  :

$$\begin{aligned}
w_{i3} &= A_{23}(\lambda_i I - A_{33})^{-1} w_{i2} \\
v_{i1} &= \frac{\omega_0}{\lambda_i} v_{i2} \\
v_{i3} &= (\lambda_i I - A_{33})^{-1} (A_{31} \frac{\omega_0}{\lambda_i} + A_{32}) v_{i2}
\end{aligned} \tag{4.77}$$

Από τις σχέσεις (4.68) και (4.77) ορίζονται οι δείκτες ελεγχιμότητας και παρατηρησιμότητας από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$b_i(\lambda_i) = [B_2 + A_{23}(\lambda_i I - A_{33})^{-1} B_3] w_{i2} = K_{bi}(\lambda_i) w_{i2} \tag{4.78}$$

$$c_i(\lambda_i) = [(\frac{\omega_0}{\lambda_i} C_1 + C_2) + C_3(\lambda_i I - A_{33})^{-1} (A_{31} \frac{\omega_0}{\lambda_i} + A_{32})] v_{i2} = K_{ci}(\lambda_i) v_{i2} \tag{4.79}$$

Στις εξισώσεις κατάστασης της σχέσης (4.76), αν η τοποθεσία εγκατάστασης ή το σήμα ανάδρασης των σταθεροποιητών, που βασίζονται σε ΕΣΜ, είναι διαφορετικά, ο έλεγχος και το διάνυσμα εξόδου, B και C<sup>T</sup>, δεν είναι τα ίδια, όμως ο πίνακας κατάστασης του συστήματος ανοιχτού-βρόχου A παραμένει αμετάβλητος, κάτι που συνεπάγεται ότι το λειτουργικό σημείο του συστήματος παραμένει αμετάβλητο και ισχύει η σχέση:

$$v_{i2A} = v_{i2B}, w_{i2A} = w_{i2B} \tag{4.80}$$

Έτσι, η σχέση (4.70) μπορεί να μετατραπεί στην ακόλουθη σχέση:

$$\frac{|b_{iA}(\lambda_i)| |c_{iA}(\lambda_i)|}{|b_{iB}(\lambda_i)| |c_{iB}(\lambda_i)|} = \frac{|K_{biA}(\lambda_i)| |K_{ciA}(\lambda_i)| |w_{i2A}| |v_{i2A}|}{|K_{biB}(\lambda_i)| |K_{ciB}(\lambda_i)| |w_{i2B}| |v_{i2B}|} = \frac{|K_{biA}(\lambda_i)| |K_{ciA}(\lambda_i)|}{|K_{biB}(\lambda_i)| |K_{ciB}(\lambda_i)|} \tag{4.81}$$

Έτσι φαίνεται ότι το  $|K_{bi}(\lambda_i)| |K_{ci}(\lambda_i)|$  μπορεί να αντικαταστήσει το  $|b_i(\lambda_i)| |c_i(\lambda_i)|$  στο να είναι ο δείκτης μέτρησης της αποτελεσματικότητας των σταθεροποιητών, που βασίζονται σε ΕΣΜ, στην επιλογή της θέσης εγκατάστασης τους και των σημάτων ανάδρασής τους. Ο δείκτης αυτός, πλέον, μπορεί να υπολογιστεί χωρίς την επίγνωση της ιδιολύσης του πίνακα κατάστασης του συστήματος ανοιχτού βρόχου A. Ως εκ τούτου, η ανάλυση ρυθμών του ελέγχου του ΣΗΕ με τη χρήση των  $|K_{bi}(\lambda_i)| |K_{ci}(\lambda_i)|$  είναι ανεξάρτητη από την ιδιολύση του πίνακα A ανοιχτού βρόχου (eigensolution free).

Στο άρθρο [9] παρουσιάζεται μία νέα μέθοδος μειωμένης τάξης της ανάλυσης ρυθμού ανεξάρτητη από την ιδιολύση (new eigensolution free method of reduced-order modal analysis) του πίνακα A, που βασίζεται στο διευρυμένο μοντέλο Phillips-Heffron ενός ΣΗΕ πολλαπλών-μηχανών (αριθμού n). Στην ουσία πρόκειται για έναν συνδυασμό των μεθόδων των άρθρων [2] και [6], στον οποίο ισχύουν οι σχέσεις (4.71)-(4.75) και (4.80)-(4.81) και καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ανάλυση ρυθμών του ΣΗΕ είναι ανεξάρτητη από την ιδιολύση του πίνακα A και ότι οι πίνακες που εμπεριέχονται στους υπολογισμούς είναι μικρότερης ή ίσης τάξης με τον αριθμό των μηχανών του συστήματος. Το πλεονέκτημα των μεθόδων των άρθρων [6], [9]

σε σχέση με αυτή του [2] είναι ότι η επιλογή των θέσεων εγκαταστάσεων και των σημάτων ανάδρασης των σταθεροποιητών, που βασίζονται σε ΕΣΜ, είναι τελείως ανεξάρτητη από την ιδιολύση του πίνακα κατάστασης του συστήματος ανοιχτού-βρόχου.

Στο άρθρο [65] προτείνεται ένας δείκτης υπολοίπου (residue factor) για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης UPFC και χρησιμοποιείται μία ανάλυση ρυθμών για τον προσδιορισμό των πιο κατάλληλων εισερχομένων σημάτων (σήματα σταθεροποίησης) για την ενίσχυση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων μεταξύ των περιοχών του ΣΗΕ. Ο δείκτης υπολοίπου ενός ΣΗΕ, με εξισώσεις κατάστασης που δίνονται από τη σχέση (4.66), ορίζεται ως το γινόμενο του δείκτη ελεγχιμότητας και του δείκτη παρατηρησιμότητας όπως αυτοί ορίζονται από τις εξισώσεις της σχέσης (4.68). Έτσι, το υπόλοιπο συναρτήσει της  $i$ -στης ιδιοτιμής,  $j$ -στης εξόδου και  $k$ -στης εισόδου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_{ijk}(\lambda_i) = c_i(\lambda_i)b_i(\lambda_i) = C_j v_i w_i B_k \quad (4.82)$$

Για την ιδιοτιμή που ενδιαφέρει πρέπει να υπολογιστούν τα υπόλοιπα για όλες τις τοποθεσίες, και η μεγαλύτερη τιμή του υπολοίπου που θα βρεθεί, υποδεικνύει την πιο αποτελεσματική θέση εγκατάστασης των ΕΣΜ στο ΣΗΕ. Οι δείκτες ελεγχιμότητας, λαμβάνοντας υπόψη την τοποθέτηση του UPFC, δίνονται από τους τύπους των σχέσεων (4.59) και (4.61) για το σειριακό και τον εγκάρσιο κλάδο του UPFC, αντίστοιχα, και με πανομοιότυπη ανάλυση υπολογίζονται οι δείκτες παρατηρησιμότητας, λαμβάνοντας υπόψη την εγκατάσταση του UPFC στο δίκτυο.

Στο άρθρο [91] μία νέα μέθοδος προτείνεται για την βέλτιστη τοποθέτηση του PWMSC σε μεγάλα ΣΗΕ, που βασίζεται στην επιλεκτική ανάλυση ρυθμών (Selective Modal Analysis, SMA) και στον δυναμικό δείκτη (dynamics index), για την ενίσχυση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων μεταξύ των περιοχών του ΣΗΕ. Για αυτό το λόγο, πρώτα η SMA χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των χαμηλών συχνοτήτων ιδιοτιμών. Μέσω ενός επαναληπτικού αλγορίθμου υπολογίζεται μία παράσταση από στοιχεία του πίνακα  $A$  του συστήματος, μέσω της οποίας προσδιορίζονται οι χαμηλών συχνοτήτων ιδιοτιμές, που ενδιαφέρουν. Έπειτα παρουσιάζεται ο πίνακας των επικρατέστερων γραμμών μεταφοράς (Most Dominant Lines table, MDLs), ο οποίος βασίζεται στο δυναμικό δείκτη και δείχνει την επιρροή της ενεργού ισχύος των γραμμών μεταφοράς στις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις μεταξύ των περιοχών του ΣΗΕ. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης του PWMSC στο δίκτυο.

Γενικά η ανάλυση ρυθμών είναι εύκολα εφαρμόσιμη. Ωστόσο δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλα ΣΗΕ λόγω της μεγάλης αριθμητικής δυσκολίας στην ιδιολύση (eigensolution) των τεραστίων διαστάσεων πινάκων καταστάσεώς τους και της μεγάλης υπολογιστικής επιβάρυνσης που δημιουργείται.

### 4.2.3 Άλλες αναλυτικές μέθοδοι

Διάφορες άλλες αναλυτικές μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ εμφανίζονται στα άρθρα [1],[5],[11],[16],[17],[20],[23],[26],[27],[28],[29],[31],[38],[43],[45],[72],[93].

#### 4.2.3.1 Δείκτες ευστάθειας τάσης (voltage stability indicators)

Στα άρθρα [11],[23],[27],[72],[93] χρησιμοποιούνται διάφοροι δείκτες ευστάθειας τάσης για την επίλυση του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ.

Στο άρθρο [11] παρουσιάζεται μία μεθοδολογία για την επιλογή του κατάλληλου μεγέθους και της κατάλληλης τοποθεσίας του SVC, που βασίζεται στην ανάλυση της ευστάθειας τάσης του ΣΗΕ, σε ένα δίκτυο υπέρ-υψηλής τάσης για την ενίσχυση της ευστάθειας τάσης του συστήματος. Η ανάλυση, που παρουσιάζεται, χρησιμοποιεί το δείκτη ευστάθειας τάσης-L (voltage stability index-L) των ζυγών φορτίου. Ο δείκτης L είναι ένας βαθμωτός αριθμός, που αντιστοιχεί σε κάθε ζυγό φορτίου και περιλαμβάνει πληροφορίες της ευστάθειας τάσης μίας φυσιολογικής ροής φορτίου και παίρνει τιμές από 0 (καθόλου φορτίο στο ΣΗΕ) μέχρι 1 (κατάρρευση της τάσης). Ο ζυγός, που έχει τη μέγιστη τιμή του δείκτη L ( $L_{max}$ ) υποτίθεται ότι είναι ο πιο κρίσιμο ζυγός και δίνει μία ένδειξη του πόσο κοντά βρίσκεται στο σύστημα στην κατάρρευση της τάσης. Επίσης υπολογίζεται το άθροισμα των τετραγώνων των δεικτών L,  $\sum L^2$ , όλων των ζυγών φορτίου, το οποίο δίνει την ένδειξη της συνολικής ευστάθειας τάσης του ΣΗΕ για διάφορες λειτουργικές συνθήκες. Έστω n ο συνολικός αριθμός των ζυγών του συστήματος με 1,2,...,g τους ζυγούς παραγωγής και g + 1, g + 2,...,n τους ζυγούς φορτίου, ορίζεται ο δείκτης ευστάθειας τάσης L από την ακόλουθη σχέση:

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^g F_{ji} (V_i/V_j) \right| \quad (4.83)$$

όπου  $j = g + 1, \dots, n$  και όλα τα στοιχεία μέσα στο άθροισμα είναι μιγαδικές ποσότητες. Οι τιμές  $F_{ji}$  καθορίζονται από τον πίνακα αγωγιμοτήτων Y ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{LL} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix} \rightarrow \\ \begin{bmatrix} V_L \\ I_G \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Z_{LL} & F_{LG} \\ K_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.84)$$

όπου  $I_G, I_L, V_G, V_L$  : αναπαριστούν τα ρεύματα και τις τάσεις των ζυγών παραγωγής και των ζυγών φορτίων και  $F_{LG} = -[Y_{LL}]^{-1}[Y_{LG}]$  οι απαιτούμενες τιμές. Επιλέγεται η τοποθεσία για την εγκατάσταση του UPFC με τις μικρότερες τιμές  $L_{max}$  και  $\sum L^2$ .

Στο άρθρο [23] παρουσιάζεται μία νέα μέθοδος, που ονομάζεται διευρυμένη προσέγγιση φασιθετών τάσης (extended voltage phasors approach, EVPA), για την βέλτιστη τοποθέτηση των ΕΣΜ στο ΣΗΕ, θέτοντας ως στόχο τη βελτίωση της ευστάθειας τάσης του συστήματος. Στη μέθοδο αυτή, ένας δείκτης ευστάθειας τάσης, που ονομάζεται δείκτης ευστάθειας διαδρομής μεταφοράς (transmission path stability index, TPSI), ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του φασιθέτη της γεννήτριας αναφοράς και της διορθωμένης πτώσης τάσης κατά μήκος της

διαδρομής μεταφοράς. Η διορθωμένη πτώση τάσης ενός τμήματος γραμμής δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta V_{ai}' : (V_i - V_{i+1} \cos \delta_{i,i+1}) \cos \delta_{1,i} \quad (4.85)$$

όπου  $i = 1, \dots, n-1$  οι ζυγοί παραγωγής του ΣΗΕ,  $n$ : οι συνολικοί ζυγοί του ΣΗΕ. Η συνολική διορθωμένη πτώση τάσης  $\Delta V_{\alpha}'$  δίνεται από το άθροισμα των διορθωμένων πτώσεων τάσης  $\Delta V_{ai}'$  κατά μήκος μίας διαδρομής μεταφοράς. Ο TPSI δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{TPSI} = 0.5V_g - \Delta V_{\alpha}' \quad (4.86)$$

όπου  $V_g$ : το μέγεθος του διανύσματος τάσης της γεννήτριας,  $V_{\alpha}'$ : το άθροισμα των διορθωμένων πτώσεως τάσης κατά μήκος μίας διαδρομής μεταφοράς. Όταν η τιμή του δείκτη TPSI τείνει στο μηδέν, η μεταφορά ισχύος σε αυτή τη διαδρομή μεταφοράς γίνεται ασταθής και οδηγεί το σύστημα σε κατάρρευση τάσης. Τέλος, η μέθοδος EVPA συγκρίνεται με τη μέθοδο του δείκτη ροής της γραμμής μεταφοράς (Line Flow Index method, LFI), η οποία αναφέρεται στο άρθρο [23], συμπεραίνοντας ότι η μέθοδος EVPA δεν απαιτεί για τους υπολογισμούς των δεικτών της στοιχεία της ιακωβιανής μήτρας, όπως η μέθοδος LFI.

Στο άρθρο [27] προτείνεται μία μέθοδος για την επιλογή των καταλληλότερης θέσης εγκατάστασης του UPFC σε δίκτυα υπέρ-υψηλής τάσης για την ενίσχυση της ευστάθειας τάσης του ΣΗΕ, λαμβάνοντας υπόψη φυσιολογικές συνθήκες δικτύου αλλά και διάφορες διαταραχές που μπορεί να συμβούν στο δίκτυο. Η μέθοδος βασίζεται στους δείκτες ευστάθειας τάσης  $L$ , όπως αυτοί ορίζονται στις σχέσεις (4.83)-(4.84), άρθρο [11], και στην ελάχιστη μοναδιαία τιμή (most singular value, MSV), αφού έχει αξιολογηθεί ο βαθμός κινδύνου της θεωρούμενης διαταραχής μέσω μίας ασαφούς προσέγγισης (fuzzy approach), που λαμβάνει υπόψη το επίπεδο φόρτισης του συστήματος. Ορίζεται ο δείκτης βελτίωσης ευστάθειας τάσης των ζυγών φορτίου και της ελάχιστης μοναδιαίας τιμής από την ακόλουθη σχέση:

$$L_L = \sum_{j=g+1}^n (L_j^{\text{old}} - L_j^{\text{new}}) \quad (4.87)$$

όπου  $L_j^{\text{old}}$ : ο αρχικός δείκτης ευστάθειας τάσης ζυγού φορτίου  $j$  υπό κάποια διαταραχή,  $L_j^{\text{new}}$ : ο νέος δείκτης ευστάθειας τάσης του ζυγού φορτίου  $j$ . Η πιο κατάλληλη τοποθεσία εγκατάστασης του UPFC είναι αυτή με τη μεγαλύτερη τιμή του δείκτη  $L_L$ .

Στο άρθρο [72] παρουσιάζεται μία μέθοδος με έναν βελτιωμένο δείκτη ευστάθειας τάσης (improved voltage stability index, IVSI), η οποία εφαρμόζεται σε ακτινικά και βροχοειδή δίκτυα. Η μέθοδος είναι ικανή να επιδράσει αποτελεσματικά στην ενίσχυση της ευστάθειας τάσης του ΣΗΕ, καθώς επίσης και στη μείωση των απωλειών των γραμμών μεταφοράς. Το υπό μελέτη πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, στο οποίο η μέθοδος της υβριδικής διαφορικής εξέλιξης (hybrid differential evolution, HDE), η οποία θα αναλυθεί σε επόμενο υπό-κεφάλαιο, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των θέσεων εγκατάστασης και των μεγεθών των SVCs, που τοποθετούνται στο ΣΗΕ. Ο βελτιωμένος δείκτης ευστάθειας ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$IVSI = \frac{-4 \sum_{j=0}^n (G_{ij} - B_{ij})(P_i + Q_i)}{\left[ \sum_{j=1}^n V_j \left| [G_{ij} (\cos\delta_{ij} + \sin\delta_{ij}) - B_{ij} (\cos\delta_{ij} - \sin\delta_{ij})] \right| \right]^2} \leq 1.0 \quad (4.88)$$

όπου n: οι ζυγοί του συστήματος. Όταν ο δείκτης IVSI για κάθε ζυγό τείνει στο μηδέν τότε το σύστημα είναι ευσταθές. Όταν ο δείκτης IVSI για κάθε ζυγό τείνει στο ένα το σύστημα είναι ασταθές και η κατάρρευση τάσης είναι πιθανή.

Στο άρθρο [93] προτείνεται μία νέα μέθοδος για την εύρεση της καλύτερης τοποθεσίας του SVC σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη την ενίσχυση του περιθωρίου ευστάθειας της πρώτης ταλάντωσης (first swing stability margin) και τη μείωση του κόστους επένδυσης του SVC. Για αυτό το λόγο παρουσιάζονται δύο δείκτες, ο δείκτης ευστάθειας (stability index, SI) και ο δείκτης κόστους (cost index, CI). Οι δύο αυτοί δείκτες είναι μέτρα για την αξιολόγηση της ευστάθειας πρώτης ταλάντωσης αλλά και του κόστους επένδυσης του SVC, αντίστοιχα. Αφού υπολογιστούν και συγκριθούν οι δύο δείκτες για όλους τους ζυγούς, επιλέγεται ο ζυγός με τις υψηλότερες τιμές των δύο δεικτών ως η καλύτερη τοποθεσία εγκατάστασης για το SVC. Στην συνέχεια το βέλτιστο μέγεθος του SVC, δηλαδή το βέλτιστο φανταστικό μέρος της σύνθετης αγωγιμότητάς του SVC,  $B_{SVC}^{max}$ , προσδιορίζεται μέσω της μεθόδου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO), που θα αναλυθεί παρακάτω.

Γενικά, οι μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ με τους δείκτες ευστάθειας έχουν τα εξής πλεονεκτήματα: 1) απλότητα αριθμητικών υπολογισμών, 2) ακρίβεια αποτελεσμάτων και 3) υπολογιστική ταχύτητα.

#### 4.2.3.2 Διάφορες άλλες αναλυτικές μέθοδοι

Στα άρθρα [1],[5],[16],[17],[20],[26],[28],[29],[31],[38],[43],[45] προτείνονται διάφορες αναλυτικές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ, που παρουσιάζονται παρακάτω.

Δύο είδη δεικτών παρουσιάζονται στο άρθρο [1], από την ανάλυση υπολοίπων (residue analysis) και από την ανάλυση απόσβεσης ροπής (damping torque analysis, DTA), για την επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης σταθεροποιητών, που βασίζονται σε ΕΣΜ. Αποδεικνύεται ότι οι δύο αυτοί δείκτες σχετίζονται ο ένας με τον άλλον, και υπό ορισμένες συνθήκες, που αναλύονται μέσα στο άρθρο, είναι ισοδύναμοι. Ο δείκτης που βασίζεται στην ανάλυση υπολοίπων ενός συστήματος της μορφής των εξισώσεων της σχέσης (4.66) υπολογίζονται από τη σχέση (4.82) ως το γινόμενο των δεικτών παρατηρησιμότητας και ελεγκσιμότητας του συστήματος. Ο δείκτης που βασίζεται στην ανάλυση απόσβεσης ροπής ενός ίδιου συστήματος ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$DI = \left( \sum_{j=1}^n w_{i(n+j)} \bar{T}_{EKj} \right) C\tilde{V}_i \quad (4.89)$$

όπου  $\bar{T}_{EK}$  : διάνυσμα συντελεστών απόσβεσης ροπής,  $V_i, w_{i(n+j)}$  : το δεξί ιδιοδιάνυσμα και το (n+j)-στο στοιχείο του αριστερού ιδιοδιανύσματος της ιδιοτιμής  $\lambda_i$ , αντίστοιχα.

Στο άρθρο [5] προτείνεται μία ανάλυση ελεγχιμότητας και παρατηρησιμότητας (controllability and observability analysis), που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της επιρροής των υπαρχόντων SVCs στην απόσβεση των ταλαντώσεων του συστήματος, καθώς επίσης και για τον καθορισμό της βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης νέων συσκευών. Στο άρθρο [38] γίνεται επίσης μία ανάλυση ελεγχιμότητας και παρατηρησιμότητας, όπως έχει αναλυθεί παραπάνω.

Με βάση το μοντέλο Phillips-Heffron ενός ΣΗΕ, στο άρθρο [16] προσεγγίζεται το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης ενός ΕΣΜ και του βέλτιστου εισερχομένου σήματος ελέγχου του για την ενίσχυση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων ισχύος σε ένα ΣΗΕ με πολλαπλές μηχανές. Η μέθοδος, που προτείνεται, βασίζεται στην απόκριση συχνότητας των συναρτήσεων μεταφοράς ανοιχτού και κλειστού βρόχου, χρησιμοποιώντας πολικά διαγράμματα για την αναπαράσταση των καμπυλών απόκρισης συχνότητας, προκειμένου να ενισχυθεί η μεταβατική συμπεριφορά των ταλαντώσεων ισχύος.

Όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 2, ένας τρόπος για να μειωθεί το κόστος συμφόρησης είναι ο έλεγχος της ροής ισχύος μέσω της εγκατάστασης του TCSC. Το άρθρο [17] ασχολείται με τη βέλτιστη τοποθέτηση του TCSC για τη μείωση του κόστους συμφόρησης χρησιμοποιώντας σκιαδείς τιμές (shadow prices). Ένας δείκτης απόδοσης ορίζεται για τη βέλτιστη τοποθέτηση του TCSC ως ο συνδυασμός των ευαισθησιών της ροής της γραμμής μεταφοράς και των shadow prices. Ορίζεται η επαυξημένη συνάρτηση Lagrange από την ακόλουθη σχέση:

$$L(P_{Gi}) = F_T(P_{Gi}) + \lambda \left( \sum_{k=1}^n P_{DK} + P_L - \sum_{i=1}^m P_{Gi} \right) + \sum_{l=1}^{N_l} \mu_l (P_l - P_l^{\max}) + \sum_{i=1}^m [\mu_i^{\min} (P_{Gi}^{\min} - P_{Gi}) + \mu_i^{\max} (P_{Gi} - P_{Gi}^{\max})] \quad (4.90)$$

όπου  $\lambda$ : ο πολλαπλασιαστής Lagrange είναι για την εξίσωση ισορροπίας της ισχύος,  $\mu_i^{\min}, \mu_i^{\max}$  : οι πολλαπλασιαστές Lagrange είναι για το κατώτερο και ανώτερο όριο ενεργού ισχύος της μονάδας στο ζυγό i, αντίστοιχα,  $\mu_l$  : ο πολλαπλασιαστής Lagrange είναι για το όριο της ενεργού ισχύος στη γραμμή l,  $N_l$  : ο αριθμός των παραβιάσεων των ροών των γραμμών μεταφοράς. Οι πολλαπλασιαστές Lagrange  $\mu_l$  μπορούν να είναι αποτελεσματικοί στον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθέτησης του TCSC. Η μεταβολή στη συνάρτηση Lagrange, που προέρχεται από μικρές μεταβολές του ορίου της ροής της γραμμής ικανοποιεί την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta L(P_G) = \Delta F_T + \mu_l \Delta P_l \quad (4.91)$$

Αν η μεταβολή του ορίου της ροής της γραμμής είναι ικανοποιητικά μικρή τότε  $\Delta L(P_G) \rightarrow 0$  και επίσης ισχύει η σχέση (shadow price):

$$\mu_l = - \frac{\Delta F_T}{\Delta P_l} \quad (4.92)$$



Η σχέση (4.92) δηλώνει ότι ο πολλαπλασιαστής Lagrange  $\mu_1$  είναι η ευαισθησία του βέλτιστου κόστους συναρτήσει της μικρής μεταβολής στον περιορισμό της ροής της γραμμής. Έτσι, το  $\mu_1$  μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμο με την οριακή τιμή του ελέγχου της ροής ισχύος στη γραμμή μεταφοράς με τη συμφόρηση. Αυτή η σημασία του  $\mu_1$  εφαρμόζεται στο νέο δείκτη απόδοσης για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθέτησης του TCSC. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του  $\mu_1$ , το οποίο δρα ως έλεγχος της ροής ισχύος της γραμμής, τόσο πιο αποτελεσματικά γίνεται η μείωση του κόστους συμφόρησης. Η σχέση μεταξύ των μεταβολών των ροών των γραμμών και των παραμέτρων ελέγχου, με τη μεταβλητή αντίδραση του TCSC να συμβολίζεται σαν διάνυσμα  $u$ , είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{line}} &= \left\{ \frac{\theta G}{\theta u} - \frac{\theta G}{\theta x} \left[ \frac{\theta h}{\theta x} \right]^{-1} \frac{\theta h}{\theta u} \right\} \Delta u \rightarrow \\ \Delta P_{\text{line}} &= [G_u - G_x h_x^{-1} h_u] \Delta u \rightarrow \\ \Delta P_{\text{line}} &= S_{Gu} \Delta u\end{aligned}\quad (4.93)$$

όπου  $\Delta P_{\text{line}}$  : διάνυσμα των μεταβολών στη ροή της γραμμής μεταφοράς,  $G$ : διάνυσμα των συναρτήσεων για ροές ισχύος της γραμμής μεταφοράς,  $S_{Gu}$  : πίνακας των ευαισθησιών των ροών γραμμής συναρτήσει των μεταβλητών ελέγχου  $u$ , που αποτελείται από τις ιακωβιανές μήτρες  $G_u, G_x, h_x, h_u$ . Το  $(i,j)$ -στο στοιχείο του πίνακα ευαισθησίας  $S_{Gu}(i,j)$  δείχνει το βαθμό της μείωσης της ροής ισχύος από την αύξηση του ελέγχου της παραμέτρου  $u$  από μία μονάδα στη γραμμή  $j$ . Έτσι, οι ευαισθησίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση των θέσεων εγκατάστασης του TCSC για αποτελεσματικό έλεγχο της ροής ισχύος σε μία γραμμή. Όμως, η βέλτιστη τοποθέτηση του TCSC, όσον αφορά τον έλεγχο της ροής ισχύος, δεν είναι πάντα βέλτιστη στη μείωση του κόστους συμφόρησης. Οι shadows prices της σχέσης (4.92) δείχνουν την οριακή σχέση μεταξύ του κόστους συμφόρησης και του ελέγχου της ροής ισχύος σε βέλτιστης συνθήκες. Ως εκ τούτου, ένας συνδυασμός των ευαισθησιών της ροής της γραμμής και των shadow prices προτείνεται στο άρθρο [17] ως ένας δείκτης απόδοσης για τη βέλτιστη τοποθέτηση του TCSC. Το κόστος συμφόρησης όλων των μικρών μεταβολών στις εγχύσεις ισχύος προέρχεται από το ακόλουθο άθροισμα που αφορά όλους τους ζυγούς του ΣΗΕ:

$$\Delta CC = \sum_{l=1}^{Nl} \mu_l \left\{ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\theta P_i}{\theta P_i} \Delta P_i \right) \right\} = \sum_{l=1}^{Nl} \mu_l \Delta P_l \quad (4.94)$$

Έπειτα για να συσχετιστεί ο έλεγχος του TCSC με το κόστος συμφόρησης καταγράφεται η ακόλουθη σχέση:

$$\Delta CC = \sum_{l=1}^{Nl} \mu_l (S_{Gu}^l) \Delta u = S_{cu} \Delta u \quad (4.95)$$

όπου  $S_{Gu}^l$  : είναι το διάνυσμα των ευαισθησιών της ροής σε μία γραμμή μεταφοράς με συμφόρηση συναρτήσει των μεταβλητών ελέγχου  $u$ ,  $S_{cu}$  : είναι το διάνυσμα των ευαισθησιών του κόστους συμφόρησης συναρτήσει των μεταβλητών ελέγχου  $u$ . Το διάνυσμα  $\Delta u$  αντιστοιχεί στις υποψήφιες θέσεις εγκατάστασης του UPFC. Έτσι, η γραμμή, που αντιστοιχεί στο στοιχείο

με τη μέγιστη τιμή στο διάνυσμα ευαισθησίας  $S_{cu}$ , μπορεί να επιλεγθεί ως βέλτιστη τοποθέτηση του TCSC για μείωση του κόστους συμφόρησης.

Εφαρμόζοντας τις κανονικές μορφές διαφορομορφισμού (Normal forms of diffeomorphism), το άρθρο [43] προτείνει μία μέθοδο για τον προσδιορισμό της βέλτιστης κατανομής SVC, ακόμα και για περιπτώσεις με ισχυρή μη-γραμμικότητα, για την ενίσχυση της ευστάθειας τάσης του ΣΗΕ. Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί τους μη-γραμμικούς δείκτες συμμετοχής, στους οποίους η μη-γραμμικότητα των ΣΗΕ μπορεί να ληφθεί υπόψη. Το ανάπτυγμα της σειράς Taylor μέχρι τον όρο δεύτερης-τάξης δίνεται από τον τύπο:

$$L_i = J_i x + x^T H^i x / 2 \quad (4.96)$$

όπου  $J_i$ : i-στη σειρά της ιακωβιανής μήτρας  $J$ ,  $H^i$ : i-στος Hessian πίνακας. Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό ομοιότητας  $x = Uy$ , όπου  $U$  ο πίνακας των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων του  $J$ , το αρχικό σύστημα μπορεί να αναπαρασταθεί με το ακόλουθο ανάπτυγμα της σειράς Taylor μέχρι τον όρο δεύτερης-τάξης στις  $y$ -συντεταγμένες με την ακόλουθη σχέση:

$$U_i^{-1} L = \lambda_i y_i + y^T C^i y = \lambda_i y_i + \sum_{j=1}^{n+m-1} \sum_{k=1}^{n+m-1} C_{jk}^i y_j y_k \quad (4.97)$$

όπου  $U_i^{-1} L$ : αναπαριστά την ανάλυση ρυθμών της ενεργού και αέργου ισχύος (modal active and reactive power),  $\lambda_i$ : i-στη ιδιοτιμή του  $J$ ,  $m$ : ο αριθμός των ζυγών φορτίου του ΣΗΕ,  $n$ : ο ολικός αριθμός ζυγών του ΣΗΕ και

$$C^i = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{n+m-1} v_{ip} U^T H^p U = [C_{jk}^i] \quad (4.98)$$

όπου  $v_{ip}$  στοιχείο του πίνακα  $V = U^{-1}$ . Υπό τη συνθήκη:

$$\lambda_i = \lambda_j \lambda_k \quad (4.99)$$

οι όροι δεύτερης τάξης της εξίσωσης (4.97) μπορούν να εκμηδενιστούν με τον ακόλουθο μετασχηματισμό κανονικής μορφής στις  $z$ -συντεταγμένες:

$$y = z + h(z) \quad (4.100)$$

όπου

$$h^i(z) = \sum_{k=1}^{n+m-1} \sum_{l=1}^{n+m-1} h_{kl}^i z_k z_l \quad (4.101)$$

όπου

$$h_{kl}^i = C_{kl}^i / (\lambda_k \lambda_l - \lambda_i) \quad (4.102)$$

Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα της εξίσωσης (4.97) παίρνει στις  $z$ -συντεταγμένες τη μορφή:

$$U_i^{-1} L = \lambda_i z_i \quad (4.103)$$

Ορίζεται ο μη-γραμμικός συντελεστής συμμετοχής, ο οποίος αναπαριστά τη μη-γραμμική συμμετοχή της  $k$ -στης κατάστασης στη  $j$ -στη ιδιοτιμή, από την ακόλουθη σχέση:

$$p_{2jk} = u_{kj}(v_{jk} + v_{jkk}) \quad (4.104)$$

όπου

$$v_{jkk} = - \sum_{p=1}^{n+m-1} \sum_{q=1}^{n+m-1} h_{pq}^j v_{pk} v_{qk} \quad (4.105)$$

Ο μη-γραμμικός συντελεστής συμμετοχής  $p_{2jk}$  χρησιμοποιείται σαν μέτρο για την αποτελεσματικότητα της κατανομής SVC, όσο αφορά την ενίσχυση της ευστάθειας τάσης του δικτύου. Ο μεγαλύτερος μη-γραμμικός συντελεστής συμμετοχής τάσης ενός ζυγού της εξεταζόμενης ιδιοτιμής δείχνει την επιρροή που έχει ο ζυγός αυτός στην ευστάθεια της τάσης. Για αυτό τον λόγο, αυτός ο ζυγός αποτελεί την αποτελεσματικότερη θέση εγκατάστασης του SVC στο ΣΗΕ, για την ενίσχυση της ευστάθειας τάσης.

Στο άρθρο [45] ένας δείκτης οριακού κόστους της αέργου ισχύος ( reactive power spot price index, QSPI) προτείνεται για την βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης του SVC στο ΣΗΕ. Ο QSPI είναι ένα σταθμισμένο άθροισμα από κανονικοποιημένες τιμές οριακού κόστους αέργου ισχύος και υπολογίζεται για κάθε ζυγό, για διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, στην κλασική περίπτωση που το ΣΗΕ είναι ανέπαφο, αλλά και στις περιπτώσεις διαταραχών, που οφείλονται στην αποκοπή κάποιας γραμμής μεταφοράς. Ο QSPI ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$QSPI_i = P_{i,0}^n + \sum_{k=1}^{N_{cl}} \{PI_k^n \times p_{i,k}^n\} \quad (4.106)$$

με το δείκτη  $n$  δηλώνονται οι κανονικοποιημένες τιμές, όπου  $PI$ : ο δείκτης απόδοσης που δίνεται από τη σχέση (4.25),

$$p_{i,0}^n = \left( \frac{p_{i,0}}{p_0^{\max}} \right) \quad (4.107)$$

$$p_{i,k}^n = \left( \frac{p_{i,k}}{p_k^{\max}} \right), \quad k \in N_{cl} \quad (4.108)$$

$$PI_k^n = (PI_k / PI^{\max}), \quad k \in N_1 \quad (4.109)$$

όπου  $p_{i,0}^n$  : κανονικοποιημένο οριακό κόστος σε απόλυτη τιμή της αέργου ισχύος στο ζυγό  $i$  στην περίπτωση όπου το ΣΗΕ είναι ανέπαφο,  $p_{i,k}^n$  : κανονικοποιημένο οριακό κόστος σε απόλυτη τιμή της αέργου ισχύος στο ζυγό  $i$  στην περίπτωση όπου συμβαίνει διαταραχή αποκοπής κρίσιμης γραμμής μεταφοράς  $k$ ,  $PI_k^n$  : οι κανονικοποιημένες τιμές του δείκτη απόδοσης  $PI$  που αντιστοιχούν στην  $k$ -στη διαταραχή,  $N_{cl}$  : ο αριθμός των εξεταζόμενων διαταραχών. Επιπροσθέτως, προκειμένου να ληφθούν υπόψη διαφορετικές συνθήκες φόρτισης του ΣΗΕ στην τοποθέτηση του SVC, ορίζεται ο δείκτης:

$$QSPI_i^* = \left( \frac{QSPI_i^{BL} + QSPI_i^{IL} + QSPI_i^{DL}}{3} \right) \quad (4.110)$$

όπου  $QSPI_i^{BL}, QSPI_i^{IL}, QSPI_i^{DL}$  είναι ο παραπάνω δείκτης QSPI υπολογισμένος σε φυσιολογικές, αυξημένες και μειωμένες συνθήκες φόρτισης, αντίστοιχα. Ως αυξημένες/μειωμένες συνθήκες φόρτισης, ορίζεται η 5% αύξηση/μείωση σε όλα τα φορτία όλων των ζυγών σε σχέση με την αρχική βασική περίπτωση φόρτισης του ΣΗΕ. Ο ζυγός με την υψηλότερη τιμή  $QSPI^*$  θεωρείται ως ο καταλληλότερος για να τοποθετηθεί το SVC. Μόνο ζυγοί φορτίου έχουν ληφθεί υπόψη για την βέλτιστη τοποθέτηση του SVC.

Το άρθρο [20] εξετάζει τη συντονισμένη εφαρμογή των τεχνολογιών των ΕΣΜ με σκοπό τη διεύρυνση του ορίου της ευστάθειας μονίμου καταστάσεως της τάσης. Μία αναλυτική μέθοδος προτείνεται για την τοποθέτηση των ΕΣΜ με σκοπό την ενίσχυση της ευστάθειας τάσης ενώ παρέχεται επαρκής έλεγχος της τάσης και της ροής ισχύος σε κρίσιμα σημεία του συστήματος. Η μέθοδος βασίζεται στην ανάλυση αποσύνθεσης ιδιαζουσών τιμών/ιδιοτιμών των συμβατικών εξισώσεως ροής φορτίου (singular value/eigenvalue decomposition analysis of conventional load-flow equations), τροποποιημένη ώστε να περιλαμβάνει τη ρητή απόκριση των ΕΣΜ-ελεγκτών σε μικρές διαταραχές. Για ένα ΣΗΕ με  $n$  κόμβους και  $ng$  ζυγούς, στους οποίους ελέγχεται η τάση, το ΣΗΕ αναπαρίσταται από τις μονίμου-καταστάσεως εξισώσεις ισορροπίας ισχύος, οι οποίες γραμμικοποιούνται για μία επιλεγμένη βασική συνθήκη λειτουργίας, και περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J(V, \theta) \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J(V, \theta)^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.111)$$

όπου  $\Delta P, \Delta Q$ : η οριακή μεταβολή στην έγχυση ζυγού ενεργού ισχύος τάξης  $n-1$  και αέργου ισχύος τάξης  $n-ng$ , αντίστοιχα,  $\Delta \theta, \Delta V$ : οριακή μεταβολή στη γωνία τάσης ζυγού, τάξης  $n-1$ , και στο μέτρο τάσης ζυγού, τάξης  $n-ng$ , αντίστοιχα,  $J(V, \theta)^{-1}$ : η ιακωβιανή μήτρα ροής φορτίου. Σύμφωνα με την προσέγγιση της αποσύνθεσης των ιδιαζουσών τιμών, η ιακωβιανή μήτρα μπορεί να γραφτεί με τη μορφή  $J = U\Sigma V^T$ , όπου  $U = \text{col}(u_1, u_2, \dots, u_N)$  ένας  $N \times N$  ορθογώνιος πίνακας,  $V = \text{col}(v_1, v_2, \dots, v_N)$  ένας  $N \times N$  ορθογώνιος πίνακας και  $\Sigma(J)$  ένας  $N \times N$  πίνακας, του οποίου όλα τα μη διαγώνια στοιχεία είναι μηδενικά και τα διαγώνια στοιχεία ικανοποιούν τη σχέση  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_N \geq 1$ . Χρησιμοποιώντας την ιδιότητα  $J = V\Sigma^{-1}U^T$  από τη σχέση (4.111) προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = V\Sigma^{-1}U^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^N \frac{v_j u_j^T}{\sigma_j} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \approx \sum_{j=1}^r \frac{v_j s_j}{\sigma_j} \quad (4.112)$$

όπου  $r$ : αναπαριστά τον αριθμό των επικρατουσών ιδιαζουσών τιμών. Στη περιοχή γύρω από το ιδιάζων σημείο ( $\sigma_N \approx 0$ ), μία μικρή μεταβολή στις εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος θα φέρει ως αποτέλεσμα μεγάλη μεταβολή στα μέτρα και στις γωνίες των τάσεων των ζυγών. Το μέτρο της ελάχιστης ιδιάζουσας τιμής (minimum singular value, MSV) της ιακωβιανής μήτρας,  $\sigma_N(J)$  παρέχει ένα μέτρο του πόσο κοντά είναι το σύστημα στην κατάρρευση τάσης. Σε ένα ΣΗΕ με  $m$  ΕΣΜ, η σχέση (4.111) παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J'_{P\theta} & J'_{PV} \\ J'_{Q\theta} & J'_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{P\beta} \\ J_{Q\beta} \end{bmatrix} \Delta \beta_{FACTS} \rightarrow \quad (4.113)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = (J'')^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} - (J'')^{-1} \begin{bmatrix} J_{P\beta} \\ J_{Q\beta} \end{bmatrix} \Delta \beta_{FACTS}$$

όπου

$$J'' = \begin{bmatrix} J_{P\theta} + J'_{P\theta} & J_{PV} + J'_{PV} \\ J_{Q\theta} + J'_{Q\theta} & J_{QV} + J'_{QV} \end{bmatrix} \quad (4.114)$$

όπου  $J'_{P\theta}, J'_{PV}, J'_{Q\theta}, J'_{QV}$ : περιλαμβάνουν την επίδραση των ΕΣΜ, και οι υπό-πίνακες  $J_{P\beta}, J_{Q\beta}$ : αναπαριστούν την ευαισθησία της έγχυσης ενεργού και αέργου ισχύος στις μεταβολές του φανταστικού μέρους της σύνθετης αγωγιμότητας των ΕΣΜ, αντίστοιχα, το διάνυσμα  $\Delta \beta_{FACTS} = [\Delta \beta_{d^1} \Delta \beta_{d^2} \dots \Delta \beta_{d^m}]$  περιέχει τις οριακές μεταβολές των φανταστικών μερών της σύνθετης αγωγιμότητας  $m$  ΕΣΜ. Από το δεύτερο σκέλος της σχέσης (4.113) προκύπτει το μοντέλο μειωμένης τάξης:

$$\Delta V = (J''_R Q)^{-1} \Delta Q - (J''_R Q)^{-1} J''_R \beta \Delta \beta_{FACTS} \quad (4.115)$$

όπου

$$J''_R Q = J''_{QV} - J''_{Q\theta} (J''_{P\theta})^{-1} J''_{PV} = \frac{\theta Q}{\theta V} \quad (4.116)$$

είναι ο μειωμένης τάξης ιακωβιανός πίνακας του συστήματος και

$$J''_R \beta = J_{Q\beta} - J''_{Q\theta} (J''_{P\theta})^{-1} J_{P\beta} = \frac{\theta Q}{\theta \beta_{FACTS}} \quad (4.117)$$

αναπαριστά την ευαισθησία του μέτρου της τάσης των ζυγών στις μεταβολές των εξόδων των ΕΣΜ-ελεγκτών. Από την ανάλυση της χαρακτηριστικής εξίσωσης:

$$|sI + (J''_R Q)| = 0 \quad (4.118)$$

προκύπτει ότι, η ευστάθεια τάσης του ΣΗΕ μπορεί να μελετηθεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη ισοδύναμη αναπαράσταση χώρου κατάστασης (equivalent state-space representation):

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V} &= -(J''_R Q) \Delta V + \Delta Q - J''_R \beta \Delta \beta_{FACTS}, \\ y &= C \Delta V \end{aligned} \quad (4.119)$$

όπου  $y$  αναπαριστά το διάνυσμα εξόδου, που περιλαμβάνει τα μέτρα των τάσεων των επιλεγμένων ζυγών. Στη συνέχεια, δύο συμπληρωματικές αναλυτικές μέθοδοι αναπτύσσονται στο άρθρο [20] για τον προσδιορισμό της καλύτερης τοποθεσίας των ΕΣΜ για την ενίσχυση του συστήματος αλλά και για τη δυνατότητα ανάλυσης των δυσμενών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ελεγκτών. Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στην ανάλυση των συναρτήσεων μεταφοράς

υπολοίπων (transfer function residues) από κάθε τοποθεσία ΕΣΜ-ελεγκτή συναρτήσει ενός συγκεκριμένου μέτρου τάσης ζυγού. Σε αυτή την προσέγγιση, ενδιαφέρον παρουσιάζουν δύο εναλλακτικοί πίνακες συνάρτησης μεταφοράς. Πρώτον, ο πίνακας συνάρτησης μεταφοράς, που συσχετίζει το διάνυσμα εξόδου με τις μεταβολές στη ζήτηση του συστήματος και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$G_L(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta Q(s)} = C[sI + (J''_R Q)]\Delta Q \quad (4.120)$$

Δεύτερον, ο πίνακας συνάρτησης μεταφοράς μεταξύ του φανταστικού μέρους της σύνθετης αγωγιμότητας των ΕΣΜ-ελεγκτών και των ελεγχόμενων αποκλίσεων τάσης των ζυγών και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$G_{FACTS}(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta \beta_{FACTS}(s)} = C[sI + (J''_R Q)]^{-1} J_R^\beta = \left[ \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{(s - \lambda_k)} \right] \quad (4.121)$$

όπου

$$R_k = C p_k q_k^T J_{v\beta} \quad (4.122)$$

πίνακας υπολοίπου (residue matrix),  $p_k, q_k^T$ : δεξί και αριστερό ιδιοδιάνυσμα του πίνακα κατάστασης της ιδιοτιμής  $\lambda_k$ , υπολογισμένα στο σημείο μέγιστης φόρτισης του συστήματος. Η δεύτερη μέθοδος βασίζεται στην ανάλυση των χαρακτηριστικών ελεγκσιμότητας του ισοδύναμου μοντέλου συστήματος των εξισώσεων της σχέσης (4.119). Η απόσταση  $d$  μεταξύ του ζεύγους  $(J''_R Q, J_R^\beta)$  και του πλησιέστερου συνόλου μη ελεγχόμενων συστημάτων (nearest set of uncontrollable systems) δίνεται από τη MSV όπως φαίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$d = \min_{\lambda} \sigma_{\min} [sI + (J''_R Q), J_R^\beta] \quad (4.123)$$

όπου  $J_R^\beta = [J_{R\beta}^1 J_{R\beta}^2 \dots J_{R\beta}^m]$ : ο πίνακας εισόδου των ΕΣΜ-ελεγκτών,  $\sigma_{\min}$ : η MSV του επαυξημένου πίνακα. Έτσι, ένα πρακτικό μέτρο αξιολόγησης του έλεγχου του  $i$ -στου τρόπου ταλάντωσης ευστάθειας τάσης από την  $k$ -στη ΕΣΜ-συσσκευή καθορίζεται από την ανάλυση του επαυξημένου πίνακα:

$$W_k^i = \sigma_{\min} [\lambda_i I + (J''_R Q), J_{R\beta}^k] \quad (4.124)$$

Από τη σχέση (4.123) φαίνεται ότι, ένας τρόπος ταλάντωσης της ευστάθειας τάσης, που σχετίζεται με την ιδιοτιμή  $\lambda_i$ , είναι πιο ελέγξιμος από την  $k$ -στη είσοδο από ότι από τη  $j$ -στη είσοδο αν και μόνο αν  $\sigma_{\min}(W_k^i) > \sigma_{\min}(W_j^i)$ . Η σχέση (4.124) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της βέλτιστης εγκατάστασης των ΕΣΜ, όπως επίσης για την ανάλυση των δυσμενών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ελεγκτών.

Δύο δείκτες ασφάλειας (security indices), χρησιμοποιούνται και ελαχιστοποιούνται ταυτόχρονα στο άρθρο [26], προκειμένου να αυξηθεί το περιθώριο ασφάλειας του ΣΗΕ. Ο δείκτης ασφάλειας  $J_p$  σχετίζεται με τις ροές των γραμμών μεταφοράς και ο δείκτης ασφάλειας

$J_V$  σχετίζεται με τις τάσεις των ζυγών του ΣΗΕ. Οι δύο παραπάνω δείκτες, για ανάλυση διαταραχών (contingency analysis) προκύπτουν από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$J_P = \sum_k \alpha_k \left( \frac{P_k}{P_k^{\max}} \right)^2 \quad (4.125)$$

$$J_V = \sum_m b_m (V_m - V_m^{\text{ref}})^2 \quad (4.126)$$

όπου  $k$ : ο αριθμός των γραμμών μεταφοράς,  $m$ : ο αριθμός των ζυγών φορτίου,  $b_m$  : ο συντελεστής βάρους,  $P_k$  : η μεταφορά ενεργού ισχύος στη  $k$ -στη γραμμή μεταφοράς,  $P_k^{\max}$  : η μέγιστη μεταφορά ενεργού ισχύος στη  $k$ -στη γραμμή μεταφοράς,  $V_m$  : το μέτρο της τάσης στο ζυγό  $m$  και  $V_m^{\text{ref}}$  : το μέτρο της τάσης αναφοράς στο ζυγό  $m$ . Αν ο αριθμός των υπέρφορτισμένων γραμμών μειώνεται τότε και ο δείκτης  $J_P$  θα μειωθεί. Αν η τάση του ζυγού έχει τιμή κοντά στο επιθυμητό επίπεδο, ο δείκτης  $J_V$  θα έχει και αυτός μικρή τιμή. Αυτοί οι δύο δείκτες ελαχιστοποιούνται ταυτόχρονα για την ενίσχυση της ασφάλειας του συστήματος μέσω ενός επαναληπτικού αλγορίθμου.

Στο άρθρο [28] εφαρμόζεται μία ανάλυση διακλάδωσης (bifurcation analysis) προκειμένου να προσδιοριστούν οι βέλτιστες θέσεις εγκατάστασης των ΕΣΜ. Επίσης, χρησιμοποιείται μία μέθοδος συνεχόμενης ροής φορτίου (continuation power flow method) για να προσδιορίσει τις συνέπειες των ΕΣΜ στη φόρτιση του ΣΗΕ. Μία ανάλυση ιδιοτιμών εφαρμόζεται στο μέγιστο σημείο φόρτισης για να αξιολογήσει τις πιο κρίσιμες τάσεις ζυγών. Ύστερα από αυτό, μπορούν να προσδιοριστούν η βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση των ΕΣΜ, προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη ενίσχυση στη φόρτιση του ΣΗΕ. Η μέθοδος διακλάδωσης, που αναφέρεται στο άρθρο [28], είναι η διακλάδωση σαγματικού κόμβου (saddle node bifurcation). Η διακλάδωση σαγματικού κόμβου εμφανίζεται όταν δυο σημεία ισορροπίας συγκρούονται και εξαφανίζονται (ή αναδύονται ταυτόχρονα). Ένα από τα σημεία ισορροπίας έχει ιδιοτιμή με θετικό πραγματικό μέρος και το άλλο, ιδιοτιμή με αρνητικό πραγματικό μέρος και τα δύο μηδενίζονται στο σημείο της διακλάδωσης. Η διακλάδωση σαγματικού κόμβου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της στατικής κατάρρευσης της τάσης και αποτελεί μη-γραμμικό φαινόμενο, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εμφανιστεί σε κάποιο γραμμικό σύστημα. Η μέθοδος διακλάδωσης σαγματικού σημείου ενδιαφέρει περισσότερο τους μηχανικούς όταν ένα ευσταθές σημείο ισορροπίας, στο οποίο το ΣΗΕ λειτουργεί, εξαφανίζεται. Η συνέπεια αυτής της απώλειας του λειτουργικού σημείου ισορροπίας είναι ότι οι καταστάσεις του συστήματος μεταβάλλονται δυναμικά. Η δυναμική μπορεί να είναι τέτοια ώστε η τάση του συστήματος να οδηγηθεί σε κατάρρευση.

Στη συνέχεια αναφέρεται η μέθοδος της συνεχόμενης ροής φορτίου. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη μελέτη του προφίλ της τάσης του συστήματος μεταβάλλοντας αυτόματα την τιμή του  $\lambda$  χωρίς να ενδιαφέρουν οι ιδιόζουσες τιμές των εξισώσεων του συστήματος. Η μέθοδος της συνεχόμενης ροής φορτίου είναι μία μεθοδολογία ανάλυσης ροών φορτίου, η οποία παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού των ορίων φόρτισης ενός συστήματος για μια δεδομένη επιλογή ισχύων παραγωγής, τάσεων γεννητριών και φορτίων. Η μέθοδος αυτή ξεκινάει από μια γνωστή

κατάσταση λειτουργίας, για την οποία όλες οι τιμές έχουν υπολογιστεί με τη συμβατική ροή φορτίου και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας μια τεχνική πρόβλεψης-διόρθωσης υπολογίζεται τα σημεία λειτουργίας για τα υπόλοιπα επίπεδα ισχύος.

Το άρθρο [29] παρουσιάζει μία πιθανολογική προσέγγιση για τη σχεδίαση του ελεγκτή απόσβεσης του SVC. Μία πιθανολογική ανάλυση ιδιοτιμών μαζί με έναν πιθανολογικό δείκτη ευαισθησίας (a probabilistic eigenvalue analysis and probabilistic sensitivity index, PSI), που βασίζονται στις πρώτης και δεύτερης τάξης ευαισθησίες των ιδιοτιμών του ΣΗΕ, προτείνονται για την βέλτιστη τοποθεσία, το σήμα ανάδρασης και την επιλογή των παραμέτρων του ελεγκτή απόσβεσης του SVC. Για μία συγκεκριμένη ιδιοτιμή  $\lambda_k = \alpha_k + j\beta_k$  με μέση τιμή  $\bar{\alpha}_k$  και απόκλιση  $\sigma_{\alpha_k}$  ο πιθανολογικός δείκτης για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων ελέγχου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S_{\alpha'_k, k} = \frac{\theta \alpha'_k}{\theta k} = \frac{\theta \bar{\alpha}_k}{\theta k} + 4 \frac{\theta \sigma_{\alpha_k}}{\theta k} \quad (4.127)$$

Ο αντίστοιχος πιθανολογικός δείκτης του κέρδους  $G$  του ελεγκτή απόσβεσης στο μηδέν, ο οποίος μπορεί να προσδιορίσει τη θέση εγκατάστασης του ελεγκτή αλλά και το σήμα ανάδρασης, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S_{\alpha'_k, G} \Big|_{G=0} = \frac{\theta \alpha'_k}{\theta G} \Big|_{G=0} \quad (4.128)$$

Στο άρθρο [31] προτείνεται μία μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί τον συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου (capital recovery factor, CRF) για να κατανειμί τα ακριβά κόστη των ΕΣΜ σε πολλαπλές χρονιές. Το μοντέλο βελτιστοποίησης πραγματοποιείται για επιλεγμένες χρονικές περιόδους σε ένα χρόνο με τα CRF-σταθμισμένα κόστη επέκτασης (CRF-weighted expansion costs) για το έτος. Αυτό βασίζεται στην υπόθεση ότι οι κρατήσεις κόστους του πρώτου χρόνου επέκτασης των ΕΣΜ θα επαναληφθούν για έναν ορισμένο αριθμό φορών τα επόμενα έτη. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο χρόνος υπολογισμού, αφού αποφεύγεται η συμπερίληψη πολλαπλών ετών επέκτασης. Η δυναμική του συστήματος, που σχετίζεται με την πρόσθεση συσκευών ΕΣΜ, δεν λαμβάνεται υπόψη στο άρθρο λόγω του μεγάλου υπολογιστικού χρόνου.

### 4.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ (Numerical methods)

Οι αριθμητικές μέθοδοι (numerical methods) ή αλλιώς μαθηματικοί μέθοδοι (mathematical methods) ανήκουν στην κατηγορία της ακριβούς βελτιστοποίησης και προέρχονται από επιστημονικές περιοχές των οικονομικών μαθηματικών και της επιχειρησιακής έρευνας και ήταν οι πρώτες που εφαρμόστηκαν σε προβλήματα βέλτιστου προγραμματισμού των έργων. Ο κλάδος της επιστήμης των μαθηματικών, που έχει ως αντικείμενο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός συστήματος, που υπόκειται σε περιορισμούς, ονομάζεται μαθηματικός προγραμματισμός (mathematical programming). Απαραίτητη προϋπόθεση για να λυθεί ένα πρόβλημα με μεθόδους μαθηματικού προγραμματισμού είναι το πρόβλημα αυτό να μπορεί να μετατραπεί σε αυστηρά μαθηματική μορφή.



Οι μέθοδοι αυτοί χαρακτηρίζονται από το μεγάλο υπολογιστικό τους κόστος, που τις καθιστά μη πρακτικές για προβλήματα μεγάλου μεγέθους. Ο όρος μαθηματικός προγραμματισμός, που δεν πρέπει να συγχέεται με την ανάπτυξη προγραμμάτων λογισμικού, χρησιμοποιήθηκε πολύ πριν από την ευρεία εφαρμογή των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ο όρος αυτός αφορά τη μελέτη προβλημάτων βελτιστοποίησης, τις μαθηματικές ιδιότητες και την ανάπτυξη αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Οι βασικότερες τεχνικές βελτιστοποίησης που βασίζονται στις αρχές του μαθηματικού προγραμματισμού είναι: ο γραμμικός προγραμματισμός (Linear Programming, LP), ο μη γραμμικός προγραμματισμός (Non-Linear Programming, NLP), ο ακέραιος προγραμματισμός (Integer Programming, IP), ο γεωμετρικός προγραμματισμός (Geometric Programming, GP) και ο δυναμικός προγραμματισμός (Dynamic Programming, DP). Ο ακέραιος και ο μεικτός ακέραιος προγραμματισμός είναι ειδικές περιπτώσεις του γραμμικού προγραμματισμού, όπου όλες ή μερικές από τις μεταβλητές απόφασης πρέπει να παίρνουν ακέραιες τιμές.

Οι μέθοδοι ακέραιου προγραμματισμού αντιμετωπίζουν προβλήματα, στα οποία οι παράμετροι προγραμματισμού δεν είναι συνεχείς, αλλά παίρνουν μη κλασματικές ή διακριτές τιμές από κάποιο συγκεκριμένο σύνολο τιμών. Ένα πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού μπορεί να υπόκειται σε περιορισμούς ή όχι. Με αυστηρό κριτήριο ο ακέραιος προγραμματισμός είναι μη γραμμικός διότι οι συναρτήσεις ορίζονται μόνο για διακεκριμένες τιμές των μεταβλητών. Ένα πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού μεταπίπτει σε πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού εάν χαλαρώνοντας τους ακέραιους περιορισμούς των μεταβλητών προκύπτουν γραμμικές συναρτήσεις. Επίσης υπάρχουν και οι περιπτώσεις μεικτού ακέραιου προγραμματισμού (Mixed Integer Programming, MIP) όπου κάποιες από τις παραμέτρους προγραμματισμού είναι διακριτές και άλλες είναι συνεχείς.

Πρακτικά, οι μόνες ακριβείς μέθοδοι για προβλήματα μικτού ακεραίου ή ακεραίου προγραμματισμού είναι ο αλγόριθμος επέκτασης και οριοθέτησης (branch-and-bound) και ο αλγόριθμος επέκτασης και αποκοπής (branch and cut). Τα προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού αποτελούν υποσύνολο της ομάδας των συνδυαστικών (combinatorial) ή διακριτών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα όταν το πεδίο αναζήτησης του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι εκτεταμένο, είναι απαραίτητη η χρήση στοχαστικών ευρετικών ή μεταευρετικών μεθόδων για την εύρεση βέλτιστων ή σχεδόν βέλτιστων λύσεων. Αντίστοιχα, σε προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού και ακέραιου ή μικτού ακέραιου προγραμματισμού μεγάλης κλίμακας με μεγάλο αριθμό μεταβλητών και περιορισμών, χρησιμοποιούνται μέθοδοι αποσύνθεσης (decomposition methods) για την απλοποίηση τους.

### 4.3.1 Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming, LP)

Ένα μοντέλο ονομάζεται γραμμικό όταν οι μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και τις συναρτήσεις περιορισμών είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών σχεδίασης. Σε αυτή την περίπτωση η βέλτιστη λύση βρίσκεται επί του συνόρου μίας ή περισσότερων λύσεων περιορισμού. Σε προβλήματα τέτοιου είδους, κυρτά, ένα τοπικό ελάχιστο είναι οπωσδήποτε και καθολικό ελάχιστο του προβλήματος. Για κάθε πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού ορίζεται και το δυαδικό του ισοδύναμο

πρόβλημα, οπότε μπορεί να γίνει τόσο ελαχιστοποίηση όσο και μεγιστοποίηση. Η γραφή του μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού είναι:

$$\begin{aligned} \min Z &= c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n \\ a_{11} x_1 + \dots + a_{1n} x_n &\geq b_1 \\ &\vdots \\ a_{m1} x_1 + \dots + a_{mn} x_n &\geq b_m \end{aligned} \quad (4.129)$$

ή σε διανυσματική μορφή

$$\begin{aligned} \min Z &= c\bar{x} \\ A\bar{x} &\geq b \\ \bar{x} &\geq 0 \end{aligned} \quad (4.130)$$

Η πολυπλοκότητα διασυνδέσεως των δομικών στοιχείων ενός ενεργειακού συστήματος καθώς και ο αριθμός των χρονικών περιόδων για τον οποίο το σύστημα πρέπει να μελετηθεί δημιουργούν ένα μαθηματικό σύστημα προς επίλυση μεγάλης υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Για αυτό το λόγο, τα μοντέλα μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού αναπτύσσονται ως προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού με δεδομένο ότι οι αλγόριθμοι επίλυσης συστημάτων γραμμικού προγραμματισμού υπερτερούν σε ταχύτητα και ευστάθεια. Προκειμένου να περιγραφεί το ενεργειακό σύστημα με γραμμικές σχέσεις εφαρμόζονται απλουστεύσεις σχετικά με την αναπαράσταση τεχνικών όρων. Παρομοίως, και στο πρόβλημα ΒΤΔΕΣΜ που αποτελεί ένα μικτό ακέραιο μη-γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης εφαρμόζονται απλουστεύσεις για να λυθεί με την μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού.

Η βασική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού ακολουθεί την εξής μεθοδολογία (αλγόριθμος simplex). Εντοπίζεται η περιοχή εφικτών λύσεων για το πρόβλημα (στη γενική περίπτωση πρόκειται για ένα κυρτό κλειστό πολύεδρο  $N$  διαστάσεων, όπου  $N$  το πλήθος των μεταβλητών του προβλήματος). Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος μετακινείται επί των ακμών του πολυέδρου μεταξύ των κορυφών του (κάθε κορυφή αποτελεί πιθανή βέλτιστη λύση), μέχρι να εντοπίσει την ολική βέλτιστη λύση. Η ολική βέλτιστη λύση είναι το σημείο όπου το πολύεδρο του χώρου εφικτών λύσεων θα εφάπτεται με ένα ισοϋψές επίπεδο της αντικειμενικής συνάρτησης. Σε κάθε φάση της αναζήτησης, οι ακμές του πολυέδρου, που πρόσκεινται στην τρέχουσα κορυφή, που εξετάζεται, αντιστοιχούν σε δεσμευτικούς περιορισμούς.

Τα άρθρα [24],[32],[69] κάνουν χρήση του γραμμικού προγραμματισμού για την επίλυση μέρους του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ όπως αναλύεται παρακάτω.

Στο άρθρο [24] γίνεται χρήση των πλεονεκτημάτων του μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (mixed integer linear programming, MILP) για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθεσίας των TCPSTs σε μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος του MILP είναι η εύρεση του βέλτιστου αριθμού, της βέλτιστης τοποθεσίας και των βέλτιστων ρυθμίσεων των TCPSTs για τη μεγιστοποίηση της φόρτισης του ΣΗΕ, ενώ ελαχιστοποιούνται ο αριθμός των συσκευών ελέγχου και το κόστος εγκατάστασης με την ταυτόχρονη τήρηση όλων των περιορισμών του συστήματος. Ο υπολογιστικός χρόνος διεξαγωγής των αποτελεσμάτων της μεθόδου του μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού είναι σημαντικά πιο χαμηλός από άλλες μεθόδους.

Στο άρθρο [32], λόγω των απαιτήσεων για ταχύτητα και ακρίβεια του διορθωτικού ελέγχου της γραμμής μεταφοράς, ένας αλγόριθμος βέλτιστης ροής ισχύος βασισμένος στον γραμμικό προγραμματισμό (a linear programming-based optimal power flow algorithm) προτείνεται για την εύρεση της βέλτιστης ρύθμισης παραμέτρων συσκευών ΕΣΜ με σκοπό την αντιμετώπιση των υπέρ-φορτίσεων και των παραβιάσεων τάσης που προκαλούνται από τις διαταραχές του συστήματος. Ένα νέο σετ από ευαισθησίες παραμέτρων των συσκευών-ΕΣΜ παράγεται, έτσι ώστε οι λειτουργικοί περιορισμοί να μπορούν να συμπεριληφθούν στη βελτιστοποίηση. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η μείωση της μέσης φόρτισης των υψηλά φορτισμένων γραμμών μεταφοράς. Το ΕΣΜ, που μελετάται είναι το UPFC. Το UPFC μπορεί να ελέγξει την ροή ισχύος σε μία γραμμή μεταφοράς σε μεγάλο εύρος. Παρόλα αυτά, οι ευαισθησίες του αρχικού σημείου λειτουργίας ίσως να μην είναι επαρκώς ακριβής κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Για αυτό το λόγο, είναι απαραίτητη η αναβάθμιση των ευαισθησιών κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης για να μειωθεί η επίδραση των σφαλμάτων λόγω γραμμικοποίησης. Σημαντικό ζήτημα, όσο αφορά το χρόνο υπολογισμού, όταν συμβαίνει μία διαταραχή, είναι ότι η εύρεση μίας εφικτής λύσης είναι πιο σημαντική από την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Για αυτό το λόγο, αν μία λύση του γραμμικού προγραμματισμού είναι εφικτή όταν ελέγχεται από AC ροή ισχύος (AC power flow), είναι αποδεκτή για διορθωτικό έλεγχο.

Στο άρθρο [69] μία μέθοδος γενικευμένου γραμμικού προγραμματισμού (generalized linear programming) προτείνεται για τον καθορισμό των βέλτιστων διμερών συναλλαγών ενεργού ισχύος, ενώ τηρούνται οι περιορισμοί ασφάλειας μονίμου καταστάσεως του συστήματος. Σκοπός του άρθρου [69] είναι η εύρεση μίας ασφαλούς λύσης του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος και η ενίσχυση της απόδοσης του συστήματος, χωρίς να παραβιάζεται η ασφάλειά του, με τη βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση του TCSC, τόσο σε φυσιολογικές συνθήκες δικτύου όσο και σε διάφορες διαταραχές που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο. Νέοι δείκτες, ο δείκτης θερμικής ικανότητας (thermal capacity index, TCI) και ο δείκτης ικανότητας διαταραχής (contingency capacity index, CCI), προτείνονται για τη βέλτιστη τοποθέτηση του TCSC, σε φυσιολογικές συνθήκες και σε περιπτώσεις διαταραχών, αντίστοιχα. Το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος (OPF problem) αποτελεί ένα μεγάλο και πολύ δύσκολο πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού. Γενικά, οι αντικειμενικές συναρτήσεις στο πρόβλημα OPF είναι μη-γραμμικές. Η αντικειμενική συνάρτηση στο πρόβλημα είναι συνήθως συνάρτηση ελαχιστοποίησης, που υπόκειται σε περιορισμούς ισότητας και ανισοτικούς περιορισμούς. Το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος σε αυτό το άρθρο έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής με την χρήση της μεθόδου γραμμικού προγραμματισμού με την ενσωμάτωση ενός TCSC. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί, ότι η λύση της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού είναι βέλτιστη αλλά μπορεί να μην είναι ασφαλής λόγω υπερφορτίσεων των γραμμών μεταφοράς. Η υπερφόρτιση αυτή εξαλείφεται με την τοποθέτηση του TCSC στην κατάλληλη θέση. Ο δείκτης TCI χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση του TCSC σε κατάλληλη θέση για την εύρεση μίας ασφαλούς λύσης του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$TCI_i = (LF)_i \left( \frac{S_{i,n} - S_{i,opf}}{S_{i,L}} \right), \quad i = 1, 2, \dots, nbr \quad (4.131)$$

$$(LF)_i = \left( \frac{S_{i,L} - S_{i,n}}{S_{i,L} - S_{i,opf}} \right)$$

όπου  $nbr$ : ο αριθμός των κλάδων που λαμβάνονται υπόψη στη μελέτη, εξαιρούνται οι γραμμές με την υπερφόρτιση,  $S_{i,opf}$ : η φαινόμενη ροή ισχύος στη γραμμή  $i$  στην περίπτωση της βέλτιστης ροής ισχύος,  $S_{i,n}$ : η φαινόμενη ροή ισχύος στη γραμμή  $i$  τη βασική περίπτωση και  $S_{i,L}$ : το όριο MVA της γραμμής  $i$ . Ο δείκτης TCI υπολογίζεται για όλες τις γραμμές, που λαμβάνονται υπόψη στη μελέτη. Οι δείκτες με τις θετικές τιμές κατατάσσονται με βάση την αντίστοιχη TCI τιμή τους. Ο κλάδος με τη μικρότερη θετική τιμή TCI κατατάσσεται πρώτος και θεωρείται ως η βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης του TCSC. Ο δείκτης CCI χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση του TCSC σε κατάλληλη θέση για την εύρεση μίας λύσης του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος στην περίπτωση, που συμβαίνει μία διαταραχή στο σύστημα, και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$CCI_i = S_{i,i-j} - \frac{\sum_{c=1}^{nbr} S_{c,i-j}}{nbr} \quad (4.132)$$

όπου  $nbr$ : ο αριθμός των διαταραχών, αποκοπών γραμμών μεταφοράς, που λαμβάνονται υπόψη στη μελέτη,  $S_{i,i-j}$ : το όριο MVA του κλάδου  $i-j$  και  $S_{c,i-j}$ : η φαινόμενη ροή ισχύος στο ζυγό  $i-j$  κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής. Οι δείκτες CCI υπολογίζονται μόνο για τις γραμμές, οι οποίες δεν είναι ποτέ υπερφορτισμένες για οποιαδήποτε διαταραχή και αν συμβεί στο δίκτυο. Οι κλάδοι κατατάσσονται με βάση την αντίστοιχη CCI τιμή τους. Ο κλάδος με τη μεγαλύτερη τιμή CCI κατατάσσεται πρώτος και θεωρείται ως η βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης του TCSC.

### 4.3.2 Διαδοχικός Τετραγωνικός Προγραμματισμός (Sequential Quadratic Programming, SQP)

Ο αλγόριθμος SQP είναι μία επαναληπτική διαδικασία και σε κάθε επανάληψη εκτελείται μία αλληλουχία βημάτων που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Ο αριθμός της επανάληψης θα συμβολίζεται με τον ακέραιο αριθμό  $k$ . Θεωρείται το γενικό μη γραμμικό πρόβλημα (P):

$$\min\{f(x) : h_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, m, \quad g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, \dots, l\} \quad (4.133)$$

όπου  $i, j$ : οι περιορισμοί ισότητας και οι ανισοτικοί περιορισμοί, αντίστοιχα. Η συνάρτηση Lagrange για το μη γραμμικό πρόβλημα είναι:

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i h_i(x) + \sum_{j=1}^l \mu_j g_j(x) \quad (4.134)$$

Οι συνθήκες Kuhn-Tucker για το μη γραμμικό πρόβλημα είναι:

$$\begin{aligned} \nabla f(x^*) + \sum_{i=1}^m \lambda_i^* \nabla h_i(x^*) + \sum_{j=1}^l \mu_j^* \nabla g_j(x^*) &= 0 \\ h_i(x^*) &= 0, \quad i = 1, \dots, m \\ g_j(x^*) &\leq 0, \quad j = 1, \dots, l \\ \mu_j^* g_j(x^*) &= 0, \quad j = 1, \dots, l \\ \mu_j^* &\geq 0, \quad j = 1, \dots, l \end{aligned} \quad (4.135)$$

Τα βασικά βήματα του επαναληπτικού τετραγωνικού προγραμματισμού είναι τα ακόλουθα: Επιλύεται το βοηθητικό πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού της ακόλουθης μορφής:

$$\begin{aligned} \min \{ \nabla f(x^k)^T d + \frac{1}{2} d^T Q_k d \} \\ \text{έτσι ώστε :} \\ h_i(x_k) + \nabla h_i(x^k)^T d = 0, \quad i = 1, \dots, m \\ g_j(x_k) + \nabla g_j(x^k)^T d \leq 0, \quad j = 1, \dots, l \end{aligned} \quad (4.136)$$

όπου  $Q_k$  : μία θετικά ορισμένη quasi-Newton προσέγγιση προς την μήτρα δεύτερων παραγώγων της συνάρτησης Lagrange ,  $\frac{\theta L^2(x_k, \lambda_k, \mu_k)}{\theta x^2}$ , και  $x_{k+1} = x_k + \beta^{nk} d_k$ . Η λύση  $d_k$  του προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού ορίζεται σαν κατεύθυνση έρευνας στην  $k$ -στη επανάληψη. Οι πολλαπλασιαστές Lagrange  $\lambda_{k+1}, \mu_{k+1}$  που αντιστοιχούν σε αυτή την λύση ορίζονται σαν νέες εκτιμήσεις των βέλτιστων πολλαπλασιαστών Lagrange  $\lambda^*, \mu^*$ . Το μήκος βήματος  $\beta^{nk}$  βρίσκεται με τη χρήση του κανόνα Armijo πάνω στη μη-διαφορίσιμη συνάρτησης ποινής της ακόλουθης μορφής:

$$\gamma(x, c) = f(x) + c \left[ \sum_{i=1}^m |h_i(x)| + \sum_{j=1}^l \max\{0, g_j(x)\} \right] \quad (4.137)$$

Χαρακτηριστικά του Επαναληπτικού Τετραγωνικού Προγραμματισμού είναι:

1. Επιλύει το γενικό μη γραμμικό πρόβλημα (P).
2. Γενικεύει την μέθοδο Newton ή quasi -Newton μεθόδους για το περιορισμένο πρόβλημα.
3. Επιτρέπει τα σημεία  $x_k$  της ακολουθίας που κατασκευάζει να είναι μη -επιτρεπτά.
4. Εξασφαλίζει γενική σύγκλιση χρησιμοποιώντας μια ακριβή συνάρτηση ποινής για τον προσδιορισμό του μήκους βήματος.
5. Η κατεύθυνση έρευνας  $d_k$  στην  $k$  επανάληψη ορίζεται σαν η λύση ενός προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού που αποτελεί τοπική προσέγγιση Taylor γύρω από την τρέχουσα εκτίμηση  $x_k$  του μη γραμμικού προβλήματος.
6. Αποδεικνύεται η γενική σύγκλιση της μεθόδου από οποιοδήποτε αρχικό σημείο  $x_0 \in \mathbb{R}^n$ , αρκεί η παράμετρος ποινής να είναι αρκετά μεγάλη αλλά πεπερασμένη.

Στο άρθρο [68] προτείνεται μία μέθοδος βέλτιστης κατανομής των ΕΣΜ στο ΣΗΕ, λαμβάνοντας υπόψη την αντιμετώπιση της συμφόρησης και την ευστάθεια της τάσης. Η προτεινόμενη μέθοδος αξιολογεί με ακρίβεια το ετήσιο κόστος και τα προνόμια από την εγκατάσταση των ΕΣΜ, διατυπώνοντας ένα μακροσκελές πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο περιέχει την ανάλυση ροής ισχύος για έναν μεγάλο αριθμό καταστάσεων του συστήματος, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις ετήσιες λειτουργίες του ΣΗΕ. Το TCSC και το SVC επιλέχθηκαν για αυτή τη μελέτη, λόγω της γρήγορης απόκρισης ελέγχου, του χαμηλού κόστους επένδυσής τους και της ικανότητάς τους να αυξάνουν επιτυχώς τη φόρτιση του ΣΗΕ. Το πρόβλημα, που παρουσιάζεται στο άρθρο [68], είναι ένα μικτό ακέραιο υψηλά μη-γραμμικό πρόβλημα (mixed integer highly non-linear problem). Το πρόβλημα αποτελείται από το υπό-πρόβλημα της κατανομής των ΕΣΜ (άνωτερο επίπεδο) και από το λειτουργικό υπό-πρόβλημα (χαμηλότερο επίπεδο), το οποίο περιέχει τις καταστάσεις της φυσιολογικής λειτουργίας του δικτύου και της εμφάνισης κάποιας διαταραχής σε αυτό. Αρχικά, σκοπός είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων θέσεων και των ικανοτήτων των εγκατεστημένων ΕΣΜ, ενώ έπειτα το ενδιαφέρον στρέφεται στην επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος για να αποκτηθεί το ελάχιστο λειτουργικό κόστος κάθε κατάστασης του συστήματος χρησιμοποιώντας τα ΕΣΜ, που προσδιορίστηκαν στο ανώτερο επίπεδο. Στη συνέχεια, τα λειτουργικά κόστη, μέρος του συνολικού ετήσιου κόστους, τροφοδοτούνται πίσω στο ανώτερο επίπεδο. Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί ένα κριτήριο τερματισμού. Μία δύο επιπέδων υβριδική μέθοδος PSO/SQP χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος. Το υπό-πρόβλημα του ανωτέρου επιπέδου θεωρείται ως ένα διακριτό και συνεχές πρόβλημα και επιλύεται από μία κλασσική PSO. Διακριτό πρόβλημα αποτελεί η αναζήτηση των τοποθεσιών εγκατάστασης των ΕΣΜ, ενώ συνεχές πρόβλημα αποτελεί ο προσδιορισμός των ικανοτήτων των τοποθετημένων ΕΣΜ. Το αποτέλεσμα του υπό-πρόβληματος του ανωτέρου επιπέδου χρησιμοποιείται στο λειτουργικό υπό-πρόβλημα του χαμηλότερου επιπέδου. Αυτό το υπό-πρόβλημα αποτελείται από πολλαπλές καταστάσεις, που η κάθε κατάσταση ορίζει ένα συνεχές πρόβλημα. Το πρόβλημα κάθε κατάστασης αποτελεί ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος και επιλύεται με τη μέθοδο του διαδοχικού τετραγωνικού προγραμματισμού.

### 4.3.3 Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (Nonlinear Programming, NLP)

Μία βασική υπόθεση στον γραμμικό προγραμματισμό είναι ότι τόσο η αντικειμενική συνάρτηση όσο και οι συναρτήσεις των περιορισμών είναι γραμμικές. Ωστόσο, αυτή η υπόθεση δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις, οπότε εφαρμόζεται μη γραμμικός προγραμματισμός, που είναι ο μαθηματικός προγραμματισμός που ασχολείται με προβλήματα βελτιστοποίησης, όπου οι αντικειμενικές συναρτήσεις ή/και οι περιορισμοί είναι μη γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών του προγραμματισμού. Σε αυτή την περίπτωση (μη κυρτό πρόβλημα) η εύρεση ενός τοπικού ελάχιστου δεν πιστοποιεί την εύρεση ενός καθολικού ελάχιστου. Η γραφή ενός μοντέλου μη γραμμικού προγραμματισμού σε μία γενική μορφή είναι:

$$\begin{aligned}
 & \min F(x_1, x_2, \dots, x_n) \\
 & g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq b_i \text{ για } i = 1, 2, \dots, m \\
 & x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0
 \end{aligned} \tag{4.138}$$

Το άρθρο [70] προτείνει μία μεθοδολογία επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, που μπορεί να ενταχθεί και στις μεθόδους μαθηματικού προγραμματισμού πολλαπλών στόχων (multi-objective mathematical programming methods, MMP). Οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους καυσίμου, των απωλειών ισχύος και του κόστους εγκατάστασης των ΕΣΜ, καθώς και η μεγιστοποίηση της φόρτισης του ΣΗΕ. Η διαδικασία επίλυσης χρησιμοποιεί μη γραμμικό προγραμματισμό (non-linear programming, NLP) και μικτό ακέραιο μη γραμμικό προγραμματισμό (mixed integer nonlinear programming, MINLP) για την εύρεση της βέλτιστης τοποθεσίας και των βέλτιστων ρυθμίσεων, που ενσωματώνονται στο πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη τις αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος και τη βελτίωση της λειτουργίας του ΣΗΕ. Η μέθοδος βελτιστοποίησης επιλύεται αριθμητικά χρησιμοποιώντας τα λογισμικά, Matlab και GAMS. Το γενικό αλγεβρικό σύστημα μοντελοποίησης (General Algebraic Modeling System -GAMS) είναι ένα υψηλού επιπέδου σύστημα μοντελοποίησης για μαθηματικό προγραμματισμό και βελτιστοποίηση. Το GAMS είναι αποκλειστικά σχεδιασμένο για μοντελοποίηση προβλημάτων βελτιστοποίησης γραμμικών, μη γραμμικών και μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Το σύστημα αυτό είναι ιδανικό για περίπλοκες, ευρείας κλίμακας εφαρμογές βελτιστοποίησης και επιτρέπει στο χρήστη να κατασκευάσει μεγάλα, εύχρηστα μοντέλα, με ιδιαίτερα συμπαγή και φυσικό τρόπο, τα οποία μπορούν εύκολα να προσαρμοσθούν σε νέες συνθήκες. Επίσης επιτρέπει στο χρήστη να αφοσιωθεί στη μοντελοποίηση του προβλήματος κάνοντας την οργάνωση εύκολη. Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων χρησιμοποιείται η μέθοδος των ε-περιορισμών για την παραγωγή των Pareto-βέλτιστων λύσεων. Στην μέθοδο των ε-περιορισμών η πυκνότητα των Pareto βέλτιστων λύσεων είναι ελέγξιμη και ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει την πιο κατάλληλη από αυτές χρησιμοποιώντας ένα ασαφές εργαλείο λήψης αποφάσεων (a fuzzy decision-making tool). Αφού τα ΕΣΜ τοποθετηθούν σε κάθε γραμμή μεταφοράς του ΣΗΕ, οι Pareto-βέλτιστες λύσεις καθορίζονται λύνοντας τα υπό-προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως αυτά διαμορφώνονται από τη μέθοδο των ε-περιορισμών. Έπειτα, οι σχεδιαστές πρέπει να επιλέξουν τη βέλτιστη τοποθέτηση των ΕΣΜ, σύμφωνα με τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ των Pareto-βέλτιστων λύσεων. Σε αυτό το σημείο χρησιμεύει το ασαφές εργαλείο λήψης αποφάσεων, που προτείνεται για τη διαδικασία της βέλτιστης τοποθέτησης των ΕΣΜ, σύμφωνα με το οποίο μία γραμμική συνάρτηση συμμετοχής  $\mu_i$  ορίζεται για κάθε αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Ανάλογα με το αν η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιείται ή μεγιστοποιείται διαμορφώνονται οι σχέσεις (4.139) και (4.140), αντίστοιχα. Στην περίπτωση του άρθρου [68] υπάρχουν τέσσερις αντικειμενικές συναρτήσεις ( $i=4$ ), οι τρεις αφορούν τη σχέση (4.139) και η μία τη σχέση (4.140).

$$\mu_{i,k}^n = \begin{cases} 1, & F_{i,k}^n \leq \min(F_i) \\ \frac{\max(F_i) - F_{i,k}^n}{\max(F_i) - \min(F_i)}, & \min(F_i) \leq F_{i,k}^n \leq \max(F_i) \\ 0, & F_{i,k}^n \geq \max(F_i) \end{cases} \quad (4.139)$$

$$\mu_{i,k}^n = \begin{cases} 0, & F_{i,k}^n \leq \min(F_i) \\ \frac{F_{i,k}^n - \min(F_i)}{\max(F_i) - \min(F_i)}, & \min(F_i) \leq F_{i,k}^n \leq \max(F_i) \\ 1, & F_{i,k}^n \geq \max(F_i) \end{cases} \quad (4.140)$$

όπου  $F_{i,k}^n$  : η τιμή της  $i$ -στης αντικειμενικής συνάρτησης της  $n$ -στης βέλτιστης λύσης Pareto της  $k$ -στης γραμμής μεταφοράς που περιέχει ΕΣΜ και  $\mu_{i,k}^n$  : η αντίστοιχη τους συνάρτηση συμμετοχής. Οι συναρτήσεις συμμετοχής χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουν το πόσο βέλτιστη είναι η κάθε ισοδύναμη Pareto-βέλτιστη λύση. Η πιο επιθυμητή λύση μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\mu_{opt} = \max_{k=1}^{Nl} \left\{ \sup_{n \in k} \frac{\sum_{i=1}^P w_i \mu_{i,k}^n}{\sum_{n=1}^M \sum_{i=1}^P w_i \mu_{i,k}^n} \right\} \quad (4.141)$$

όπου  $w_i$  : ο συντελεστής βάρους της  $i$ -στης αντικειμενικής συνάρτησης,  $M$ : ο αριθμός των Pareto-βέλτιστων λύσεων σε κάθε γραμμή μεταφοράς, που περιέχει ΕΣΜ.

Στο άρθρο [87] παρουσιάζεται μία προσέγγιση αναδιάταξης της παραγωγής βασισμένη στην βέλτιστη ροή ισχύος για την ενίσχυση της διαχείριση της συμφόρησης του ΣΗΕ, χρησιμοποιώντας τους ελεγκτές ροής ισχύος, ST και UPFC. Η βέλτιστη θέση των συσκευών ΕΣΜ καθορίζεται με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου του μεικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού (MINLP) με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του κόστους συμφόρησης. Το πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος, το οποίο χρησιμοποιεί την μέθοδο MINLP, λύνεται χρησιμοποιώντας το Matlab και το λογισμικό GAMS, πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ο solver DICOPT του GAMS.

#### 4.3.4 Διατεταγμένη Βελτιστοποίηση (Ordinal Optimization, OO)

Στην μαθηματική βελτιστοποίηση, διατεταγμένη βελτιστοποίηση είναι η μεγιστοποίηση (ή η ελαχιστοποίηση) των τιμών ανάληψης των συναρτήσεων σε ένα μερικώς διατεταγμένο σύνολο (partially ordered set, poset). Η μερική διάταξη (partial order) είναι μία δυαδική σχέση



$\leq$  ενός συνόλου  $P$ , το οποίο είναι αντανακλαστικό (reflexive), αντισυμμετρικό (antisymmetric) και μεταβατικό (transitive), π.χ. αν  $a, b, c \in P$  τότε ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις για καθεμία από τις παραπάνω τρεις ιδιότητες, αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} a &\leq a \\ \text{An } a \leq b \text{ και } b \leq a \text{ τότε } a &= b \\ \text{An } a \leq b \text{ και } b \leq c \text{ τότε } a &\leq c \end{aligned} \tag{4.142}$$

Με άλλα λόγια η μερική διάταξη (partial order) είναι μία αντί-συμμετρική προ-διάταξη (antisymmetric preorder). Ένα σύνολο με μερική διάταξη ονομάζεται μερικώς διατεταγμένο σύνολο (partially ordered set, poset).

Το πρόβλημα της ενίσχυσης του περιθωρίου φόρτισης του ΣΗΕ, ώστε να καθοριστεί ένα βέλτιστο πλάνο εγκατάστασης του STATCOM, αποτελεί ένα μικτό διακριτό-συνεχές μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης (mixed discrete-continuous nonlinear optimization problem, MDCP). Με σκοπό την βελτίωση της αποδοτικότητας της λύσης του MDCP, το άρθρο [97] προτείνει μία στρατηγική εγκατάστασης του STATCOM η οποία βασίζεται στη ΟΟ για την εύρεση μίας αρκετά καλής λύσης αντί για τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Ο τεράστιος χώρος λύσεων των MDCPs δυσκολεύει πολύ την εύρεση μίας βέλτιστης λύσης. Έτσι, η ΟΟ βοηθάει στην επιτάχυνση των υπολογισμών ενός πολύ σύνθετου προβλήματος βελτιστοποίησης με την ταυτόχρονη διατήρηση της ακρίβειας της λύσης του. Με λίγα λόγια, με τη ΟΟ επιτυγχάνεται μείωση του υπολογιστικού χρόνου με ελάχιστη επίπτωση στον εντοπισμό της βέλτιστης ή κάποιας υποβέλτιστης λύσης. Όσον αφορά τη μέθοδο που προτείνει το άρθρο [97], αρχικά, ο δείκτης κινδύνου (risk index), όπως αυτός ορίζεται από τις σχέσεις (4.62)-(4.64), εφαρμόζεται για κάθε διαταραχή που εμφανίζεται στο ΣΗΕ,  $N-1$  διαταραχές, για να προσδιοριστούν ποιες από αυτές τις διαταραχές πρέπει να εξεταστούν όσο αφορά την εγκατάσταση STATCOM. Έπειτα, σύμφωνα με τη βασισμένη στη ΟΟ διαδικασία επίλυσης, ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο από χίλιες υποψήφιες λύσεις, τυχαία επιλεγμένες από τον ολικό χώρο λύσεων, καθορίζεται για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή. Το προσεγγιστικό μοντέλο (crude model) του MDCP εφαρμόζεται, στη συνέχεια, για να εκτιμήσει το αυξημένο περιθώριο φόρτισης, που επιφέρει η εγκατάσταση STATCOM, για κάθε μία από τις χίλιες υποψήφιες λύσεις. Το αυξημένο περιθώριο φόρτισης υπολογίζεται με αναλυτικό τρόπο βάση των ευαισθησιών κάποιων παραμέτρων και της συνάρτησης Lagrange του προβλήματος. Στη συνέχεια, βάση της θεωρίας της ΟΟ, επιλέγεται ένα μικρότερο σύνολο από λύσεις  $S$ . Η επιλογή του συνόλου απαιτεί την ταξινόμηση των χιλίων υποψήφιων λύσεων σε αύξουσα σειρά και τη σύγκρισή τους με τις πέντε διατεταγμένες καμπύλες απόδοσης (ordered performance curves, OPCs), που παρουσιάζονται στο άρθρο [97], ώστε να προσδιοριστεί ο τύπος του προβλήματος, ο οποίος μέσω ενός πίνακα προσδιορίζει το μέγεθος του συνόλου  $S$ . Τέλος, χρησιμοποιώντας την ακριβή μέθοδο (extend method) για καθεμία λύση του συνόλου  $S$  επιλέγονται οι αρκετά καλές λύσεις ως οι πρώτες  $k$  καλύτερες λύσεις του συνόλου  $S$ . Η ακριβής μέθοδος είναι βασισμένη στη μέθοδο PSO, που θα αναλυθεί σε επόμενο υπό-κεφάλαιο.

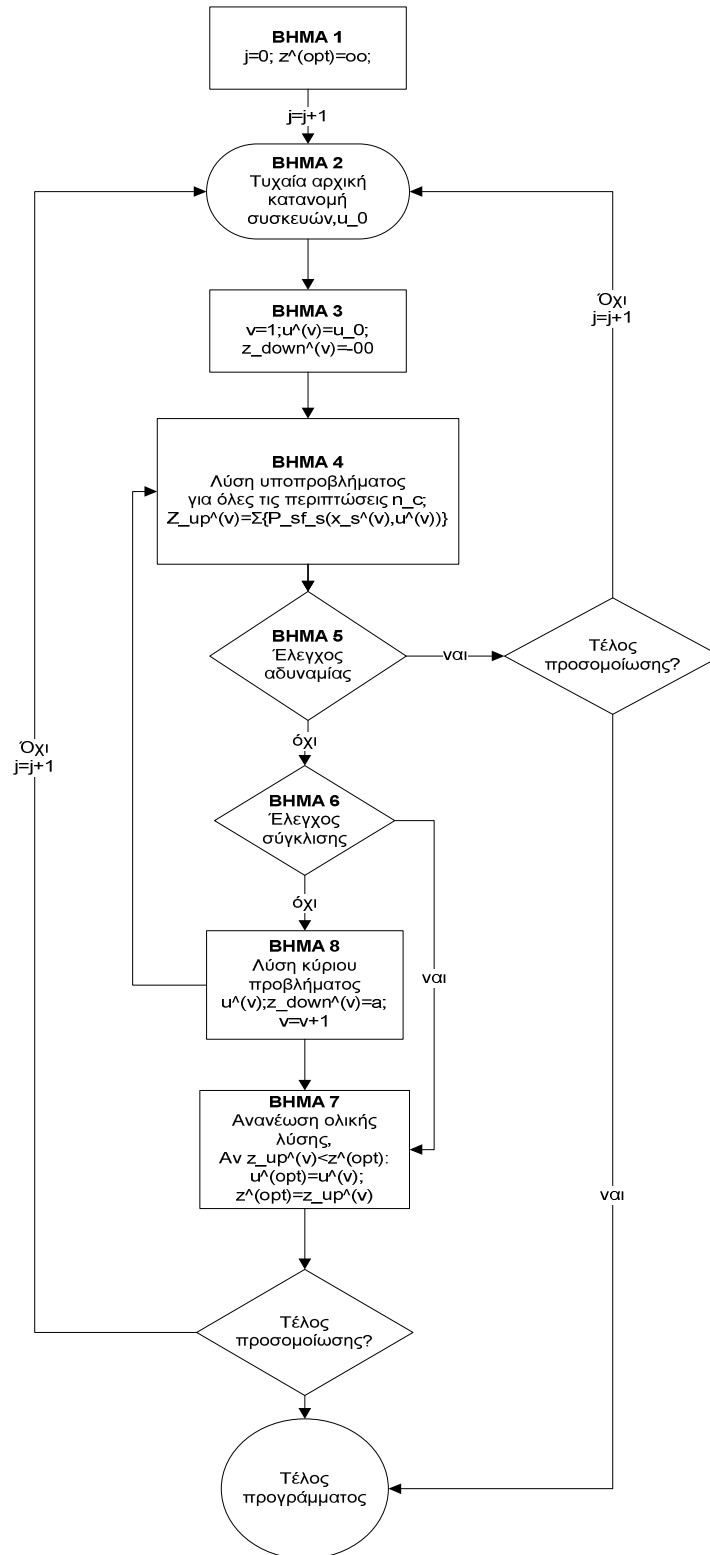
### 4.3.5 Αποσύνθεση Benders (Benders Decomposition)

Ένας άλλος αλγόριθμος για τον ακέραιο προγραμματισμό καλείται αποσύνθεση Benders. Αυτός ο αλγόριθμος λύνει τα μικτά προγράμματα ακέραιων αριθμών μέσω της δομικής εκμετάλλευσης. Οι Benders ανέπτυξαν τη διαδικασία, η οποία αποσυνθέτει ένα μικτό πρόβλημα ακέραιων αριθμών σε δύο προβλήματα που λύνονται επαναληπτικά. Ένα κύριο πρόβλημα ακέραιων αριθμών και ένα γραμμικό υπό-πρόβλημα. Η επιτυχία της μεθόδου περιλαμβάνει τη δομή και την επιλογή του υπό-προβλήματος. Η μέθοδος αποσύνθεσης δεν λειτουργεί καλά όταν οι μεταβλητές που επιλέγονται από τα κύρια προβλήματα δεν παράγουν ένα εφικτό υπό-πρόβλημα. Συνεπώς, όσο ακριβέστερα απεικονίζουν οι περιορισμοί του κύριου προβλήματος τους όρους του υπό-προβλήματος, τόσο γρηγορότερα θα γίνει η σύγκλιση.

Το άρθρο [44] μελετά τη βέλτιστη τοποθέτηση των SVCs στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται το περιθώριο φόρτισης του συστήματος. Εξετάζεται ένα πλαίσιο πολλαπλών σεναρίων, το οποίο περιλαμβάνει διαταραχές. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί ένα μη-γραμμικό πρόβλημα προγραμματισμού, που περιέχει δυαδικές μεταβλητές. Δεδομένης της μικτής ακέραιας μη-κυρτής φύσης του προβλήματος, χρησιμοποιείται η τεχνική της αποσύνθεσης Benders μέσα σε ένα πλαίσιο επανεκκίνησης. Η μέθοδος που προτείνεται επιτρέπει την αποφυγή τοπικών ελαχίστων (local minimum) και φτάνει τελικά στο ολικό ελάχιστο (global minimum). Η μορφή του προβλήματος τοποθέτησης του SVC μπορεί να διατυπωθεί σε συμπαγή μορφή, όπου η αντικειμενική συνάρτηση να παρέχει ένα μέτρο του μέσου περιθωρίου φόρτισης, το οποίο προκύπτει από τη διαθεσιμότητα των SVCs. Αυτή η μέση τιμή υπολογίζεται για όλα τα σεναρία (βασικής περίπτωσης και διαταραχών) με τους κατάλληλους συντελεστές στάθμισης, που αντιστοιχούν στην πιθανότητα κάθε σεναρίου, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} \min_{u,x} z &= \sum_{s=1}^{n_c} p_s f_s(u, x_s) \\ \text{έτσι ώστε } h_s(u, x_s) &\leq 0, \quad s = 1, \dots, n_c \\ g_s(u) &\leq 0, \quad s = 1, \dots, n_c \end{aligned} \quad (4.143)$$

όπου  $u \in \{0,1\}^n$  : δυαδική μεταβλητή, που ορίζει την τοποθεσία των SVCs, αν  $u_i = 1$  το SVC έχει τοποθετηθεί στο ζυγό  $i$ ,  $x_s$  : λειτουργική μεταβλητή,  $s$ : αντιπροσωπεύει τα διαφορετικά σεναρία, που εξετάζονται, συνολικού αριθμού  $n_c$ , τόσο για την βασική περίπτωση όσο και για διάφορες διαταραχές και  $p_s$  : η πιθανότητα που σχετίζεται με το περιστατικό του σεναρίου  $s$ . Σημειώνεται ότι οι μεταβλητές τοποθέτησης  $u$  δεν επηρεάζονται από τα διάφορα σεναρία, σε αντίθεση με τις λειτουργικές μεταβλητές  $x_s$ . Παρακάτω παρατίθεται, μέσω οχτώ βημάτων, το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου, που βασίζεται στην αποσύνθεση Benders (Σχήμα 4.2), όπως αυτό παρουσιάζεται στο άρθρο [44]. Στο πρώτο βήμα γίνεται ολική αρχικοποίηση. Αρχικοποιείται ο μετρητής προσομοίωσης και το ολικό ελάχιστο του προβλήματος (Σχέσεις 4.143), αντίστοιχα:  $j = 0$  και  $z^{\text{opt}} = \infty$ . Στο δεύτερο βήμα τοποθετούνται τυχαία τα διαθέσιμα



**Σχήμα 4.2 :** Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθόδου του άρθρου [44] βασισμένη στην αποσύνθεση Benders.

SVCs στο δίκτυο, δηλαδή αρχικοποιείται το  $u_0$  και ανανεώνεται ο μετρητής προσομοίωσης  $j=j+1$ . Στο τρίτο βήμα αρχικοποιείται ο δείκτης επανάληψης Benders  $v = 1$ , καθώς επίσης

αρχικοποιούνται τα  $u^{(v)} = u_0$  και  $z_{\text{down}}^{(v)} = -\infty$ . Σημειώνεται ότι το κατώτερο όριο της βέλτιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης αρχικοποιείται στο μείον άπειρο. Στο τέταρτο βήμα ορίζεται το υπό-πρόβλημα της μεθόδου αποσύνθεσης Benders και επιλύεται για όλες τις περιπτώσεις  $n_c$ . Επίσης, ανανεώνεται το ανώτερο όριο της αντικειμενικής συνάρτησης,

$$z_{\text{up}}^{(v)} = \sum_{s=1}^{n_c} p_s f_s(u^{(v)}, x_s^{(v)}).$$

(infeasibility check). Αν  $z_{\text{up}}^{(v)} \leq z_{\text{down}}^{(v)}$  ή  $v = v_{\text{max}}$ , τότε μία μη-κυρτή περιοχή έχει ανακατασκευαστεί λάθος και δεν μπορεί να προσδιοριστεί καμία λύση. Αν ο αριθμός των προσομοιώσεων,  $n_s$ , δεν έχει τελειώσει, η ροή του αλγόριθμου μετατίθεται ξανά στο δεύτερο βήμα, αλλιώς ο αλγόριθμος τερματίζεται, σε κάθε άλλη περίπτωση ο αλγόριθμος συνεχίζει παρακάτω. Στο έκτο βήμα γίνεται έλεγχος σύγκλισης (convergence check). Αν  $z_{\text{up}}^{(v)} - z_{\text{down}}^{(v)} / z_{\text{down}}^{(v)} \leq \varepsilon$ , τότε έχει βρεθεί μία λύση με επίπεδο ακρίβειας  $\varepsilon$ , συνεπώς  $u^* = u^{(v)}$  και ο αλγόριθμος συνεχίζει παρακάτω, αλλιώς η ροή του αλγόριθμου μετατίθεται στο όγδοο βήμα. Στο έβδομο βήμα, αν  $z_{\text{up}}^{(v)} < z^{\text{opt}}$ , ανανεώνεται η ολική λύση ως εξής:  $z^{\text{opt}} = z_{\text{up}}^{(v)}$ ,  $u^{\text{opt}} = u^*$ , και η ροή του αλγόριθμου μετατίθεται ξανά στο δεύτερο βήμα αν δεν έχει τελειώσει ο αριθμός των προσομοιώσεων, αλλιώς ο αλγόριθμος τερματίζεται, σε κάθε άλλη περίπτωση ο αλγόριθμος συνεχίζει παρακάτω. Στο όγδοο βήμα επιλύεται το κύριο πρόβλημα της μεθόδου αποσύνθεσης Benders και ανανεώνεται ο δείκτης επανάληψης Benders,  $v = v + 1$ , στη συνέχεια η ροή του αλγορίθμου μετατίθεται ξανά στο τέταρτο βήμα. Συμπερασματικά, το πλεονέκτημα της μεθόδου αποσύνθεσης Benders είναι ότι παρέχει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα από την μέθοδο ευαισθησίας, όμως απαιτεί μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο.

#### 4.3.6 Αλγόριθμος Διακλάδωσης και Φράγματος (Branch and Bound)

Η εξέλιξη των αλγορίθμων για να αντιμετωπιστούν μεγάλης κλίμακας ακεραίου ή μικτού ακεραίου προγραμματισμού προβλήματα εξακολουθεί να είναι ενεργή. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων είναι η τεχνική διακλάδωσης και περιορισμού και ανάλογες παραλλαγές της. Ο αλγόριθμος διακλάδωσης και περιορισμού, που πρωτοεμφανίστηκε από τους Lang και Doig, ακολουθεί μια στρατηγική του διαίρει και βασίλευε. Η τεχνική αυτή απαριθμεί με ένα αποτελεσματικό τρόπο μέρος των εφικτών λύσεων, οι οποίες αποτελούνται από συνδυασμούς ακεραίων τιμών των αγνώστων μεταβλητών. Ξεκινά λύνοντας το ακέραιο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Αν βρει ακέραια λύση, σταματά. Αν η λύση είναι δεκαδική, τότε διαλέγει μία από τις μεταβλητές, για την οποία το αποτέλεσμα είναι δεκαδικό και δημιουργεί δύο νέα υπό-προβλήματα προσθέτοντας περιορισμούς άνω και κάτω ορίου σύμφωνα με τις ακέραίες τιμές της μεταβλητής αυτής κοντά στη λύση του αρχικού ακέραιου προβλήματος. Προχωρά με παρόμοιο τρόπο κατασκευάζοντας έτσι ένα δέντρο από επιμέρους προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού έως ότου εξαντληθούν οι δυνατές περιπτώσεις. Στην κατάληξη κάποια από τις διαδρομές του δέντρου

θα υπάρχει και η λύση του ακέραιου προβλήματος. Το βασικό σημείο της τεχνικής είναι το γεγονός ότι η διακλάδωση στο δέντρο προβλημάτων σταματά σε ένα πρόβλημα, σε μία από τις εξής δύο περιπτώσεις: α) το πρόβλημα είναι ανέφικτο, β) το πρόβλημα έχει ακέραια λύση. Στην τελευταία περίπτωση, αν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μικρότερη (σε προβλήματα μεγιστοποίησης) του τρέχοντος κάτω ορίου της αντικειμενικής συνάρτησης του αρχικού προβλήματος, τότε η λύση αυτή δεν θεωρείται υποψήφια. Αν όμως είναι μεγαλύτερη του τρέχοντος κάτω ορίου, τότε θεωρείται ως νέο τρέχον κάτω όριο και η αντίστοιχη λύση θεωρείται υποψήφια. Τα προβλήματα που παράγονται σε κάθε στάδιο διαφέρουν από το αρχικό πρόβλημα μόνο στα όρια των μεταβλητών των ακεραίων αριθμών. Οι αλγόριθμοι παράγουν ενδιάμεσες λύσεις που είναι εφαρμόσιμες αν και μη βέλτιστες. Συχνά ο αλγόριθμος διακλάδωσης και περιορισμού θα φτάσει πολύ κοντά στις βέλτιστες λύσεις αλλά θα χάσει πολύ χρόνο ελέγχοντας την βελτιστοποίηση.

Στο άρθρο [46] επιλύεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων με σκοπό τον προσδιορισμό των βέλτιστων θέσεων, του βέλτιστου αριθμού και των αρχικών ρυθμίσεων παραμέτρων του TCSC στο ΣΗΕ. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις αυτού του προβλήματος είναι η μεγιστοποίηση της φόρτισης του ΣΗΕ, η βελτιστοποίηση του προφίλ της τάσης του δικτύου και η ελαχιστοποίηση του κόστους επενδύσεως των συσκευών. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται η κλασική μέθοδος του σταθμισμένου αθροίσματος για την βελτιστοποίηση των τριών στόχων, που έχει θέσει το άρθρο. Πιο συγκεκριμένα το άρθρο [46] προτείνει μία νέα μεθοδολογία σχεδίασης του TCSC χρησιμοποιώντας μικτό-ακέραιο προγραμματισμό, η προσέγγιση αυτή βασίζεται στον αλγόριθμο branch and bound, μέσω του οποίου επιτυγχάνονται σημαντικά κέρδη στην υπολογιστική ταχύτητα. Κύριος στόχος του άρθρου είναι η επίλυση ενός μη-γραμμικού και μη-κυρτού προβλήματος.

#### 4.3.7 Εξαντλητική Αναζήτηση (Exhaustive search)

Η εξαντλητική αναζήτηση είναι μία πολύ γενική τεχνική επίλυση προβλημάτων που αποτελείται από συστηματική απαρίθμηση όλων των πιθανών υποψήφιων λύσεων και ελέγχει αν η κάθε υποψήφια λύση ικανοποιεί τις απαιτήσεις του προβλήματος. Ενώ η εξαντλητική αναζήτηση είναι απλή στην εφαρμογή της και βρίσκει πάντα τη λύση αν υπάρχει, το κόστος της είναι ανάλογο με τον αριθμό των υποψηφίων λύσεων, οι οποίες σε πολλά πρακτικά προβλήματα τείνουν να μεγαλώνουν πολύ γρήγορα όσο το μέγεθος του προβλήματος αυξάνεται. Για αυτό το λόγο η εξαντλητική αναζήτηση χρησιμοποιείται όταν το μέγεθος του προβλήματος είναι περιορισμένο. Η μέθοδος χρησιμοποιείται επίσης όταν η απλότητα της υλοποίησης είναι πιο σημαντική από την ταχύτητα. Η εξαντλητική αναζήτηση μπορεί να θεωρηθεί ως η πιο απλή μορφή μιας μεταερευνητικής μεθόδου (metaheuristic method). Το κύριο πλεονέκτημα της εξαντλητικής αναζήτησης είναι ότι εγγυάται την εύρεση της ολικής βέλτιστης λύσης. Αντίθετα, επειδή εξετάζει ολόκληρο τον χώρο λύσεων δεν ενδείκνυται για μεγάλα δίκτυα.

Στο άρθρο [56] προτείνεται μία στρατηγική για την τοποθέτηση των εγκάρσιων ΕΣΜ χρησιμοποιώντας έναν ασαφή δείκτη απόδοσης (fuzzy performance index). Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων με τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις, τη μεγιστοποίηση

του περιθωρίου φόρτισης του ΣΗΕ, την ελαχιστοποίηση των βυθίσεων τάσης που εμφανίζονται στο ΣΗΕ και την ελαχιστοποίηση των απωλειών της αέργου ισχύος του ΣΗΕ, μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μονού στόχου με τη θεωρία των ασαφών συνόλων, μεγιστοποιώντας τον ελάχιστο βαθμό ικανοποίησης μεταξύ των συναρτήσεων συμμετοχής. Συγκεκριμένα, για κάθε υποψήφια λύση υπολογίζονται οι τιμές συμμετοχής για κάθε αντικειμενική συνάρτηση. Κάθε συνάρτηση συμμετοχής δείχνει το βαθμό ικανοποίησης κάθε αντικειμενικής συνάρτησης. Ο συνολικός βαθμός ικανοποίησης μίας υποψήφιας λύσης είναι το ελάχιστο όλων των τιμών συμμετοχής. Η βέλτιστη λύση είναι το μέγιστο όλων των συνολικών βαθμών ικανοποίησης όλων των υποψήφιων λύσεων. Έτσι, η ασαφής απόφαση για μία βέλτιστη λύση δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$OS(x) = \max\{\mu D(x)\} \quad (4.144)$$

$$\text{όπου } \mu D(x) = \min\{\mu_{f1}(x), \mu_{f2}(x), \dots, \mu_{fN}(x), \mu_{c1}(x), \mu_{c2}(x), \dots, \mu_{cM}(x)\}$$

όπου  $\mu_{f1}(x), \mu_{f2}(x), \dots, \mu_{fN}(x)$ : οι  $N$  ασαφείς αντικειμενικές συναρτήσεις και  $\mu_{c1}(x), \mu_{c2}(x), \dots, \mu_{cM}(x)$ : οι  $M$  ασαφείς περιορισμοί αυτών.

Στο άρθρο [90] προτείνεται μία απλή, αποδοτική και αξιόπιστη μέθοδος βελτιστοποίησης για τον ταυτόχρονο καθορισμό της βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης και των παραμέτρων του TCSC στο ΣΗΕ. Σκοποί της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας και η ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης του TCSC. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε διαδοχικές βέλτιστες ροές ισχύος (sequential optimal power flow, SOPF) για κάθε πιθανή θέση και για κάθε πιθανό μέγεθος του TCSC. Η καλύτερη θέση επιλέγεται ως εκείνη, στην οποία η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει τη μέγιστη τιμή.

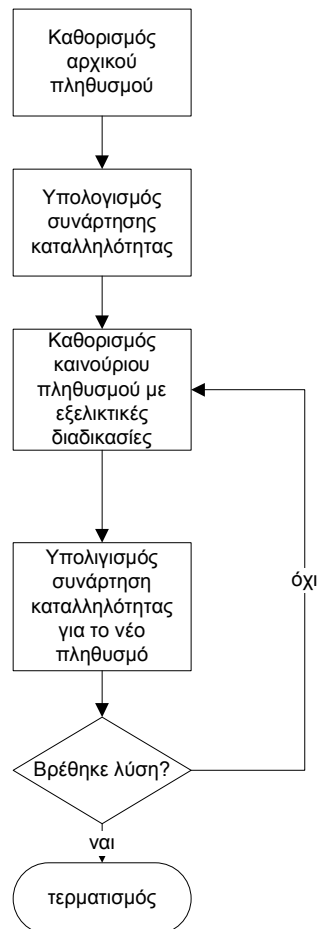
#### 4.4 ΕΥΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ (Heuristic Methods)

Ευρετική ή ευριστική μέθοδος (heuristic method) ονομάζεται κάθε μέθοδος επίλυσης προβλημάτων, στην οποία η πορεία προς ένα τελικό αποδεκτό αποτέλεσμα στηρίζεται σε μία σειρά προσεγγιστικών αποτελεσμάτων. Αν και οι ευρετικές μέθοδοι δίνουν απλές και ικανοποιητικές λύσεις σε κάποια προβλήματα δεν εγγυώνται ότι αυτές οι λύσεις θα είναι οι βέλτιστες. Συνήθως δίνουν προσεγγίσεις των βέλτιστων λύσεων και κάποιες φορές προτιμούνται επειδή δίνουν αποδεκτές απαντήσεις σε μικρό χρόνο.

Μεταευρετική μέθοδος (Metaheuristic method) καλείται μία υπολογιστική μέθοδος βελτιστοποίησης η οποία στην πραγματικότητα δεν γνωρίζει τη φύση του προβλήματος που προσπαθεί να επιλύσει και για αυτό το λόγο μπορεί να προσαρμοστεί σε πολλά και διαφορετικά προβλήματα. Στα θετικά της μεθόδου συγκαταλέγεται το γεγονός ότι δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με μία ευρετική μέθοδο, ενώ στα αρνητικά της ότι χρειάζεται να αξιολογήσει πληθώρα λύσεων, αυξάνοντας τον υπολογιστικό χρόνο. Πολλές μεταευρετικές μέθοδοι εφαρμόζουν κάποια μορφή στοχαστικής βελτιστοποίησης. Κύρια κατηγορία των μεταευρετικών μεθόδων βελτιστοποίησης είναι οι εξελικτικοί μέθοδοι. Ήδη από την δεκαετία του 1960 άρχισαν να εφαρμόζονται τεχνικές βασιζόμενες σε πιθανοκρατικές διαδικασίες δειγματοληψίας που προσομοίαζαν γενετικές διεργασίες και πρότυπα για την επίλυση διαφόρων τύπων προβλημάτων. Οι πιο διαδεδομένες από τις μεθόδους αυτές είναι οι

επονομαζόμενες Δαρβίνειες μέθοδοι οι οποίες οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι μιμούνται τη διαδικασία εξέλιξης των ειδών στη φύση, όπως την παρουσίασε ο Δαρβίνος.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms, EA) (σχήμα 4.3) εντάσσονται στον κλάδο της επιστήμης υπολογιστών και αποτελούν μέρος μιας καινούριας έρευνας που εξερευνά βιολογικά εμπνευσμένες υπολογιστικές προσεγγίσεις. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι μία από τις βάσεις των προγραμμάτων τεχνητής νοημοσύνης. Οι Δαρβίνειες μέθοδοι ή αλλιώς μέθοδοι εξελικτικού αλγορίθμων σε αντίθεση με τις μεθόδους μαθηματικού προγραμματισμού, χρησιμοποιούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων του προβλήματος. Οι λύσεις αυτές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και μπορούν να αντιμετωπιστούν επίσης ανεξάρτητα η μία από την άλλη, πράγμα που καθιστά ιδιαίτερα αποδοτική την εφαρμογή τους σε παράλληλο υπολογιστικό περιβάλλον. Ο αρχικός πληθυσμός επιλέγεται με τυχαίο τρόπο και στη συνέχεια με τη χρήση διαφόρων τελεστών αναζήτησης, όπως η επιλογή (selection), η αναπαραγωγή (reproduction), ο ανασυνδυασμός (recombination), η διασταύρωση (crossover) και η μετάλλαξη (mutation), ο πληθυσμός εξελίσσεται κινούμενος σε όλο και καλύτερες περιοχές του χώρου αναζήτησης. Οι υποψήφιες λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης έχουν τον ρόλο των ατόμων (individuals) ενός πληθυσμού και η συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function) καθορίζει το περιβάλλον μέσα στο οποίο ζουν οι λύσεις. Η εξέλιξη του πληθυσμού λαμβάνει χώρα μετά την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή των τελεστών και μέσω της αρχής της επικράτησης του ισχυρότερου (survival of the fittest) επιτυγχάνεται ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης.

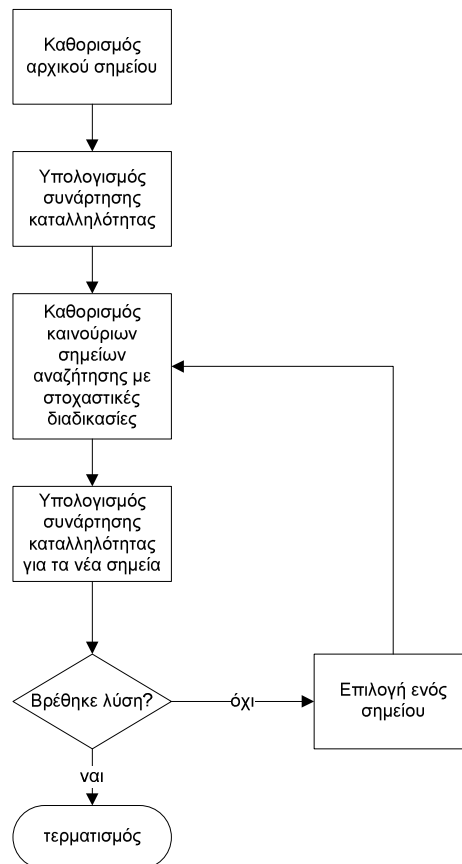


Σχήμα 4.3: Γενικό διάγραμμα ροής εξελικτικού αλγορίθμου.

Οι σημαντικότερες από αυτές τις μεθόδους είναι: ο γενετικός προγραμματισμός (Genetic Programming, GenP), ο γενετικός αλγόριθμος (Genetic Algorithm, GA), ο εξελικτικός προγραμματισμός (Evolutionary Programming, EP), οι στρατηγικές εξέλιξης (evolutionary strategies, ES) και τα συστήματα ταξινόμησης (classifier systems).

Για τα περισσότερα προβλήματα η χρήση αναλυτικών μεθόδων βελτιστοποίησης δεν μπορεί να οδηγήσει σε ικανοποιητικές λύσεις. Στην πλειοψηφία μάλιστα των περιπτώσεων, δεν υπάρχει καν η δυνατότητα να εφαρμοστούν, αφού απαιτείται η γνώση της αντικειμενικής συνάρτησης και της παραγώγου της, καθώς και ο υπολογισμός τους σε διάφορα σημεία του υπολογιστικού χώρου. Για αυτό το λόγο οι στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Οι βασικότεροι στοχαστικοί αλγόριθμοι (σχήμα 4.4) με βάση τις βιβλιογραφικές αναφορές είναι: η τυχαία αναζήτηση (random search), ο αλγόριθμος αναρρίχησης λόφου (Hill Climbing Search, HC), ο αλγόριθμος προσομοιωμένης απόπτωσης (Simulated Annealing, SA), ο αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις (Tabu Search, TS). Άλλες στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης είναι η ακτινωτή αναζήτηση (Beam Search), η μέθοδος πρώτα στο καλύτερο (Best First, BF), η μέθοδος  $A^*$  (εξειδίκευση του αλγορίθμου Best First),  $A^*$  με επαναληπτική εκβάθυνση (Iterative Depending  $A^*$ , IDA).

Δύο πολύ σημαντικές υποκατηγορίες των στοχαστικών αλγορίθμων αποτελούν οι εξελικτικοί αλγόριθμοι και οι αλγόριθμοι νοημοσύνης σμήνους οι οποίοι εντάσσονται στο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης.



Σχήμα 4.4: Γενικό διάγραμμα ροής στοχαστικού αλγορίθμου.



Η τεχνητή νοημοσύνη ως κλάδος τις τελευταίες τρεις δεκαετίες έχει καταλάβει μεγάλες προσπάθειες για να καλύψει τις αδυναμίες που παρουσιάζουν οι κλασικές μέθοδοι προγραμματισμού στην αντιμετώπιση σύνθετων και περίπλοκων προβλημάτων, τα οποία στη μεγαλύτερη τους πλειοψηφία παρουσιάζουν τα εξής δύο χαρακτηριστικά: είτε περιέχουν αβεβαιότητα μη ελεγχόμενη πιθανοθεωρητικά, είτε παρουσιάζουν το φαινόμενο της συνδυαστικής έκρηξης (combinational explosion phenomenon). Η υπολογιστική τεχνητή νοημοσύνη βασίζεται στη μάθηση μέσω επαναληπτικών διαδικασιών και εκτός από την εξελικτική υπολογιστική και της νοημοσύνης σμήνους περιλαμβάνει, επίσης, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks), και τα συστήματα ασαφούς λογικής (fuzzy logic systems). Η έννοια της ασαφούς λογικής εισήχθη από τον Zadeh στα μέσα της δεκαετίας του 1960, σαν ένα εργαλείο αντιμετώπισης μιας αβέβαιης μοντελοποίησης. Μια ασαφής μεταβλητή μοντελοποιείται από μία συνάρτηση συμμετοχής (membership function), η οποία αποδίδει ένα βαθμό συμμετοχής σε ένα σύνολο και παίρνει τιμές από 0 έως 1.

Η σπουδαιότερη κατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι. Οι σημαντικότερες κατηγορίες αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους (algorithm swarm intelligence) είναι: η βελτιστοποίηση με αποικίες μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization, ACO), η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO) και η βελτιστοποίηση σμήνους γατών (Cat Swarm Optimization, CSO).

Τόσο οι εξελικτικοί αλγόριθμοι όσο και οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης τοπικής αναζήτησης παρουσιάζουν αδυναμίες. Στους εξελικτικούς αλγόριθμους δεν υπάρχει κάποια εγγύηση, ότι θα συγκλίνουν σε κάποια λύση, η οποία θα είναι το ολικό βέλτιστο, ενώ ακόμα και αν υπάρξει μία τέτοια σύγκλιση, πολλές φορές αυτή έρχεται με σημαντικό υπολογιστικό κόστος σε σχέση με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης. Από την άλλη μεριά η ταχύτητα ανήκει στα πλεονεκτήματα των μεθόδων τοπικής αναζήτησης, οι οποίες όμως είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς στον εγκλωβισμό σε κάποιο τοπικό βέλτιστο σε πολυτροπικούς χώρους λύσεων, ενώ συχνά αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην επίλυση προβλημάτων, των οποίων ο χώρος λύσεων δεν είναι ενιαίος. Επίσης, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την επιλογή του αρχικού σημείου βελτιστοποίησης. Επομένως σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει μία ελάχιστη γνώση για το πρόβλημα, η οποία θα βοηθήσει στην επιλογή ενός καλού αρχικού σημείου, μια τυχαία επιλογή θα μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την εξέλιξη του αλγορίθμου. Το πρόβλημα αυτό είναι πιο έντονο σε προβλήματα με πολλούς περιορισμούς διαφορετικής βαρύτητας, στα οποία πολλές φορές δεν είναι προφανής η επιλογή ενός αρχικού σημείου που ικανοποιεί όλους αυτούς τους περιορισμούς.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων έχουν δημιουργηθεί οι ενιαίες υβριδικές προσεγγίσεις (hybrid approaches), που στην ουσία αποτελούν μία σύνθεση δύο οικογενειών μεθόδων επίλυσης, σε μία προσπάθεια να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα της καθεμίας. Ο βασικός άξονάς της είναι η χρησιμοποίηση, αρχικά ενός εξελικτικού αλγορίθμου για την εξερεύνηση όλων των περιοχών του χώρου λύσεων, και στη συνέχεια αφού αυτός τερματιστεί, η αξιοποίηση της καλύτερης ευρεθείσας λύσης ως σημείο εκκίνησης μιας τεχνικής τοπικής αναζήτησης, για τη συνέχιση της διαδικασίας αναζήτησης στη γειτονιά της καλύτερης λύσης που επέλεξε ο εξελικτικός αλγόριθμος.

#### 4.4.1 Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm, GA)

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μέρος της εξελικτικής πληροφορικής η οποία με τη σειρά της είναι ταχέως εξελισσόμενη περιοχή της τεχνητής νοημοσύνης. Η πρώτη εμφάνιση των γενετικών αλγορίθμων χρονολογείται τις δεκαετίες του 1950-1960, όταν διάφοροι επιστήμονες από τον χώρο της βιολογίας στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν την βοήθεια υπολογιστών. Η συστηματική τους ανάπτυξη όμως που τους οδήγησε στην μορφή που είναι γνωστοί ως και σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές τις δεκαετίας του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο πανεπιστήμιο του Michigan.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μία υπολογιστική μέθοδος η οποία αναζητά καλές λύσεις σε ένα πρόβλημα μέσα από ένα μεγάλο αριθμό πιθανών λύσεων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν ένα είδος στοχαστικών μεθόδων, για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης με και χωρίς περιορισμούς, οι οποίοι βασίζονται στον μηχανισμό της φυσικής επιλογής. Οι γενετικοί αλγόριθμοι διατηρούν έναν πληθυσμό (=μία ομάδα πιθανών λύσεων στη μορφή χρωμοσωμάτων ονομάζεται πληθυσμός. Ο πληθυσμός είναι η πηγή μέσα από την οποία ο γενετικός αλγόριθμος προσπαθεί να βρει λύση.), του προβλήματος που ενδιαφέρει, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους αναζήτησης που επεξεργάζονται μόνο ένα σημείο του χώρου αναζήτησης. Ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη. Σε κάθε γενιά (=τα συνεχή βήματα στη λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου ονομάζονται γενιές. Αυτά τα βήματα αποτελούνται από κατάλληλη εφαρμογή τελεστών (επιλογής, συνδυασμού και μετάλλαξης) στον εκάστοτε πληθυσμό μέχρι να παραχθεί ο επόμενος, δηλαδή μία καινούρια γενιά με καλύτερα χαρακτηριστικά από ότι η προηγούμενη.), οι σχετικά "καλές" λύσεις αναπαράγονται, ενώ οι "κακές" απομακρύνονται. Ο διαχωρισμός και η αποτίμηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με την βοήθεια μίας αντικειμενικής συνάρτησης η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο αναπτύσσεται ο πληθυσμός.

Η δομή ενός απλού γενετικού αλγορίθμου (Σχήμα 4.5) είναι η εξής:

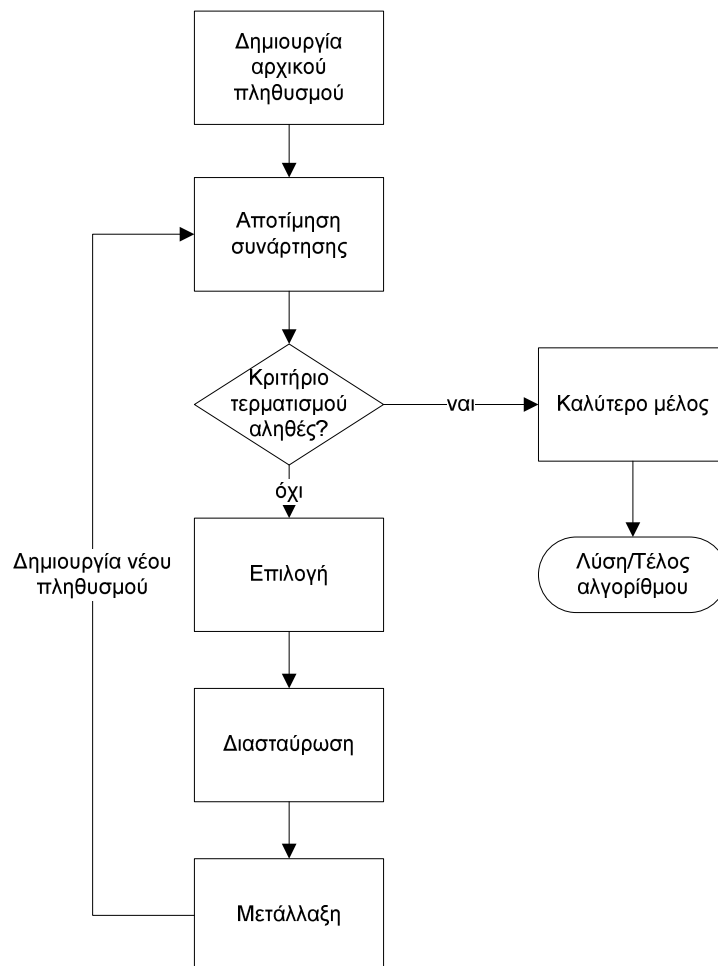
**Βήμα 1, Δημιουργία αρχικού πληθυσμού:** Κατά την διάρκεια της γενιάς  $t$ , ο γενετικός αλγόριθμος διατηρεί έναν πληθυσμό  $P(t)$  από  $n$  πιθανές λύσεις ( $n$  χρωμοσώματα):

$$P(t) = \{x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t\}.$$

**Βήμα 2, Αποτίμηση συνάρτησης και εφαρμογή της διαδικασίας της επιλογής:** Κάθε  $x_i^t$  αποτιμάται και δίνει ένα μέτρο της καταλληλότητας και της ορθότητας του. Αφού ολοκληρωθεί η αποτίμηση όλων των μελών του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός (γενιά  $t+1$ ) που προκύπτει από την επιλογή (= με τον γενετικό τελεστή της επιλογής αποφασίζεται ποια μέλη θα συνεχίσουν να υφίστανται αυτούσια, ώστε να εφαρμοστούν στη συνέχεια σε αυτά οι τελεστές της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Η επιλογή γίνεται με βάση την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας των διαφόρων μελών. Η λειτουργία της συνάρτησης καταλληλότητας είναι η αποκωδικοποίηση κάθε χρωμοσώματος στις πραγματικές παραμέτρους του προβλήματος και η ανάθεση της τιμής της καταλληλότητας για κάθε χρωμόσωμα. Όσο πιο μεγάλη είναι αυτή η τιμή σε σχέση με την τιμή των άλλων μελών, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα να επιλεγεί το συγκεκριμένο μέλος.) των πιο καταλλήλων στοιχείων του πληθυσμού της προηγούμενης γενιάς.

**Βήμα 3 και Βήμα 4. Διαδικασίες διασταύρωσης και μετάλλαξης:** Μερικά μέλη από τον καινούριο πληθυσμό παθαίνουν αλλαγές με την βοήθεια των γενετικών διαδικασιών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, οπότε σχηματίζονται νέες πιθανές λύσεις. Η διασταύρωση συνδυάζει τα στοιχεία των χρωμοσωμάτων (= το χρωμόσωμα αποκωδικοποιείται σε μία ομάδα παραμέτρων που αποτελούν μία δοκιμαστική λύση του προβλήματος) δύο γονέων (= γονείς ονομάζονται τα μέλη της παρούσης γενιάς και παιδιά τα μέλη της επόμενης γενιάς) για να δημιουργήσει δύο νέους απογόνους ανταλλάσσοντας κομμάτια από τους γονείς. Η μετάλλαξη αλλάζει αυθαίρετα ένα ή περισσότερα γονίδια ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή γονιδίων με πιθανότητα ίση με το ρυθμό μετάλλαξης (mutation rate). Η μετάλλαξη εξυπηρετεί την εισαγωγή νέων πιθανών λύσεων, διαφορετικών από τις υπάρχουσες, στον ήδη υπάρχοντα πληθυσμό.

**Βήμα 5, Κριτήριο τερματισμού:** Γίνεται αποτίμηση της συνάρτησης καταλληλότητας για τα καινούρια μέλη του πληθυσμού και ελέγχεται το κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου. Αν αυτό ικανοποιείται, τότε επιστρέφεται σαν λύση η τιμή εκείνου του μέλους του πληθυσμού, που έχει την μεγαλύτερη τιμή για την συνάρτηση καταλληλότητας. Αν δεν ικανοποιείται το κριτήριο τερματισμού τότε επιστρέφουμε στο Βήμα 2 και επαναλαμβάνεται η διαδικασία.



**Σχήμα 4.5:** Διάγραμμα ροής απλού γενετικού αλγορίθμου

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση των γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι τα εξής:

- 1) Μπορούν να επιλύουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των γενετικών αλγορίθμων είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Αποτελεί αξιοσημείωτο γεγονός ότι οι συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακροτάτων τους, για του γενετικούς αλγορίθμους δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.
- 2) Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα και δεν απαιτούν την επανασχεδίαση τους.
- 3) Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι. Όπως γίνεται σαφές και παρακάτω, οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή.
- 4) Μπορούν να συμματάσχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Λόγω της υψηλής ευελιξίας των γενετικών αλγορίθμων υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος γενετικού αλγορίθμου με άλλη μέθοδο.
- 5) Δεν απαιτούν περιορισμούς μέσα στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Οι περιορισμοί είναι ένας λόγος που οι κλασσικές αναλυτικές μέθοδοι κρίνονται πολλές φορές ακατάλληλες και δύσκαμπτες. Τέτοιου είδους προβλήματα δεν αντιμετωπίζουν οι γενετικοί αλγόριθμοι για αυτό χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο φάσμα προβλημάτων.
- 6) Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού. Οι γενετικοί αλγόριθμοι σε κάθε τους βήμα επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Είναι προφανές λοιπόν ότι μπορούν να αναζητήσουν αποδοτικά μεγάλους χώρους υποψήφιων λύσεων σε μικρό χρόνο. Επίσης επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των παραλλήλων μηχανών, αφού λόγω της φύσης τους εύκολα μπορούν να δεχτούν παράλληλη υλοποίηση. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει ακόμα περισσότερο την απόδοση τους ενώ σπάνια συναντάται σε ανταγωνιστικές μεθόδους.
- 7) Είναι μία μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Ο συνδυασμός αυτός σπάνια συναντάται σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο, αφού συνήθως τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι ανταγωνιστικά και το επιθυμητό είναι να συνυπάρχουν και τα δύο προς όφελος όλης της διαδικασίας. Οι γενετικοί αλγόριθμοι πετυχαίνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, πράγμα που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς.

Το κύριο βασικό αρνητικό τους στοιχείο είναι ότι μπορούν να συγκλίνουν πρόωρα σε μία μη βέλτιστη λύση, καθώς επίσης και η υπολογιστική επιβάρυνση, που προκαλούν.

Στα άρθρα [4], [13], [21], [22], [30], [35], [59], [62], [64], [66], [67], [73], [82], [83], [86], [88], [96] χρησιμοποιείται ο GA ως τρόπος επίλυσης του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ.

Στο άρθρο [4] παρουσιάζεται μία μέθοδος, για την βέλτιστη τοποθέτηση ενός δεδομένου αριθμού από Phase Shifters, που βασίζεται στον GA. Στο άρθρο [13] παρουσιάζεται ένας GA

για την εύρεση της βέλτιστη τοποθέτησης εγκατάστασης πολλαπλών τύπων ΕΣΜ στο ΣΗΕ, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος τους δικτύου ελέγχοντας τις ροές ισχύος. Οι βελτιστοποιήσεις εφαρμόζονται σε τρεις παραμέτρους: στην τοποθεσία των συσκευών, στον τύπο τους (4 διαφορετικά είδη, TCSC, TCPST, TCVR, SVC) και στο μέγεθός τους. Η φόρτιση του συστήματος λαμβάνεται ως μέτρο για την απόδοσή του. Προκείμενου να ληφθούν υπόψη οι τρεις προαναφερθείσες παράμετροι στην βελτιστοποίηση αναπτύσσεται ένας ειδικός κώδικας. Ο κώδικας αυτός αναφέρει πως ένα χρωμόσωμα αναπαρίσταται με τρεις γραμμές μήκους, όπου ο αριθμός των συσκευών που τοποθετούνται βέλτιστα. Η πρώτη γραμμή αντιστοιχεί στην τοποθεσία των συσκευών στο δίκτυο, η δεύτερη στον τύπο των συσκευών και η τρίτη στο μέγεθός τους. Πολλά τέτοια χρωμοσώματα αποτελούν τον πληθυσμό του γενετικού αλγορίθμου και η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζεται για κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού ξεχωριστά. Την ίδια τεχνική ακολουθεί και το άρθρο [22], όπου αυτές οι 3 παράμετροι (θέση, τύπος, μέγεθος) τοποθετούνται σαν γραμμές σε έναν σχηματισμό (χρωμόσωμα) και μέσω του GA, του αλγόριθμου αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις (Tabu Search, TS) και του αλγόριθμου προσομοιωμένης απόπτωσης (Simulated annealing, SA) βελτιστοποιούνται. Η ενίσχυση της ασφάλειας του συστήματος είναι η αντικειμενική συνάρτηση της βελτιστοποίησης. Οι τρεις μέθοδοι συγκρίνονται και συμπεραίνεται ότι φτάνουν σε παρόμοια αποτελέσματα. Γενικά, ο αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις και ο γενετικός αλγόριθμος συγκλίνουν πιο γρήγορα από τον αλγόριθμο προσομοιωμένης απόπτωσης σε μία βέλτιστη λύση.

Στο άρθρο [21] προτείνεται μία υβριδική μέθοδος δύο επιπέδων γενετικού αλγορίθμου και διαδοχικού γραμμικού προγραμματισμού (GA/successive linear programming, SLP) για την επίλυση ενός πολλαπλών μεταβατικών καταστάσεων ευστάθειας τάσης προβλήματος κατανομής SVC, το οποίο διαμορφώνεται ως ένα μικτό-ακέραιο μη γραμμικό πρόβλημα προγραμματισμού. Στο πρώτο επίπεδο, ο GA εφαρμόζεται για την επιλογή των υποψηφίων θέσεων εγκατάστασης του SVC στο ΣΗΕ. Αυτές οι υποψήφιες θέσεις μελετώνται σε φυσιολογικές καταστάσεις αλλά και σε καταστάσεις διαταραχών στο δεύτερο επίπεδο, όπου ο SLP χρησιμοποιείται για την επίλυση των μη γραμμικών λειτουργικών προβλημάτων κάθε σταδίου. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του κόστους εγκατάστασης του SVC και του λειτουργικού κόστους σε φυσιολογικές συνθήκες αλλά και σε συνθήκες διαταραχών. Στο άρθρο [30] παρουσιάζεται μία μεθοδολογία, βασισμένη στον GA, για την εύρεση της βέλτιστης θέσης και του βέλτιστου αριθμού ενός συγκεκριμένου τύπου ΕΣΜ (TCPSTs). Το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων αφού, η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, την ελαχιστοποίηση των απωλειών μετάδοσης, την ελαχιστοποίηση των υπερφορτίσεων των γραμμών και την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης των TCPST. Ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για την επιλογή της βέλτιστης θέσης και του βέλτιστου αριθμού των συσκευών TCPST σε ένα ΣΗΕ προκειμένου να ελαχιστοποιήσει μία δοσμένη αντικειμενική συνάρτηση. Ενώ, το πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων αντιμετωπίζεται με την κλασική μέθοδο του σταθμισμένου αθροίσματος. Στο άρθρο [35] ο GA χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης παραλλήλων ΕΣΜ (SVC, STATCOM), λαμβάνοντας υπόψη διάφορες λειτουργικές συνθήκες για την ενίσχυση της μεταβατικής ευστάθειας του ΣΗΕ.

Στο άρθρο [59], μία μέθοδος, βασισμένη στον GA, προτείνεται για την ταυτόχρονη και βέλτιστη εύρεση της τοποθεσίας εγκατάστασης, του λειτουργικού σημείου (MVar) και του αριθμού πολλαπλών-τύπων ΕΣΜ στο ΣΗΕ. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει δύο ξεχωριστούς αλγόριθμους και λαμβάνει τα πλεονεκτήματα ενός προτεινόμενου τρόπου ευρετικής αναζήτησης, ο οποίος μειώνει αποτελεσματικά τον εφικτό χώρο λύσεων, κάνοντας κατάλληλη την προτεινόμενη μέθοδο για εφαρμογή σε μεσαία και μεγάλα ΣΗΕ. Προτείνεται η ταυτόχρονη χρήση παραλλήλων και σειριακών ΕΣΜ, STATCOM και SSSC, για τον καλύτερο έλεγχο της ενεργού και αέργου ροής ισχύος του συστήματος. Ο πρώτος αλγόριθμος προσδιορίζει τον βέλτιστο αριθμό και τη βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης κάθε ΕΣΜ μεμονωμένα, λύνοντας επανειλημμένα ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ο βέλτιστος αριθμός κάθε τύπου ΕΣΜ, ο οποίος καθορίζεται από τον πρώτο αλγόριθμο, θεωρείται ως ο μέγιστος αριθμός του στο δεύτερο αλγόριθμο, στον οποίο ΕΣΜ πολλαπλών τύπων τοποθετούνται ταυτόχρονα και έτσι προσδιορίζονται οι βέλτιστες θέσεις, ο βέλτιστος αριθμός και τα βέλτιστα λειτουργικά σημεία του καλύτερου συνδυασμού ΕΣΜ, που τοποθετούνται στο ΣΗΕ. Με λίγα λόγια, για κάθε τύπο ΕΣΜ, ο βέλτιστος αριθμός του στην περίπτωση, που τα ΕΣΜ τοποθετούνται ταυτόχρονα, είναι μικρότερος ή ίσος από τον βέλτιστο αριθμό του στην περίπτωση, που κάθε ΕΣΜ τοποθετείται μεμονωμένα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, τα ΕΣΜ όταν δρουν ταυτόχρονα είναι πιο δραστικά στη βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης από την περίπτωση που χρησιμοποιούνται μεμονωμένα. Στο δεύτερο αλγόριθμο, μία αλγοριθμική αναζήτηση παρέχει την καλύτερη απόκριση μεταξύ όλων των πιθανών συνδυασμών των πολλαπλών-τύπων ΕΣΜ στο ΣΗΕ.

Στο άρθρο [62] τέσσερα είδη ΕΣΜ (SVC, TCSC, TCVR, TCPST) τοποθετούνται βέλτιστα σε ένα ΣΗΕ πολλών μηχανών με στόχο τη μείωση του ολικού κόστους παραγωγής ενέργειας. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης, που βασίζονται στη βέλτιστη ροή ισχύος και στον GA, αντίστοιχα, εφαρμόζονται για την επίλυση αυτού του προβλήματος κατανομής. Η θέση στο δίκτυο, ο τύπος και το μέγεθος των ΕΣΜ προσδιορίζονται βέλτιστα χρησιμοποιώντας τον GA. Η προτεινόμενη στρατηγική του άρθρου [64] χρησιμοποιεί τον GA για τη βέλτιστη κατανομή των TCPSTs στο ΣΗΕ και τη βέλτιστη ροή ισχύος για τον καθορισμό της λύσης της ροής φορτίου και των βέλτιστων ρυθμίσεων των taps των phase shifters. Η μαθηματική διατύπωση της προτεινόμενης μεθόδου βασίζεται στα κόστη εγκατάστασης του εξοπλισμού και στην ελαχιστοποίηση της συνολικής υπερφόρτισης του ΣΗΕ.

Στο άρθρο [66] ένας γενετικός αλγόριθμος, βασισμένος στην ασαφή λογική (a fuzzy based GA), εφαρμόζεται με σκοπό τη μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας και τη βέλτιστη διαχείριση της συμφόρησης. Ο GA προσδιορίζει τη βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση μίας συσκευής SSSC στο ΣΗΕ, καθώς και την καλύτερη αναδιάταξη των επιπέδων παραγωγής και ζήτησης. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης, που παρουσιάζεται, είναι ένα μιγαδικό, μακροσκελές, μη-γραμμικό πρόβλημα προγραμματισμού, το οποίο δεν μπορεί εύκολα να επιλυθεί από μαθηματικές προγραμματιστικές μεθόδους. Για αυτό το λόγο, προτείνεται ο ασαφής-γενετικός αλγόριθμος. Η απόδοση του γενετικού αλγορίθμου βελτιώνεται με την δυναμική αλλαγή των πιθανοτήτων της διασταύρωσης και της μετάλλαξης με την βοήθεια γνώσεων, που προέρχονται από την ασαφή λογική (fuzzy logic). Η ενσωμάτωση της ασαφούς λογικής στον γενετικό αλγόριθμο βελτιώνει την απόδοση και μειώνει τον χρόνο αναζήτησης. Στο άρθρο [67] παρουσιάζεται μία προσέγγιση, βασισμένη στον GA, για την εύρεση της βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης των TCSCs στο ΣΗΕ, με σκοπό τη βελτίωση της φόρτισης των γραμμών του και την ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών του. Επίσης, η

προτεινόμενη προσέγγιση έχει ως στόχο την εύρεση του βέλτιστου αριθμού των συσκευών, που τοποθετούνται στο δίκτυο, και των βέλτιστων επιπέδων αντιστάθμισής τους, χρησιμοποιώντας ένα γενετικό αλγόριθμο, λαμβάνοντας υπόψη θερμικά όρια και όρια τάσης. Η προτεινόμενη μέθοδος αποτελείται από δύο γενετικούς αλγορίθμους με τριάντα γενιές. Ο πρώτος GA προσδιορίζει τη βέλτιστη θέση και το βέλτιστο αριθμό των TCSCs υπολογίζοντας την ελάχιστη συνολική απώλεια συστήματος ύστερα από την είσοδο ενός TCSC στο ΣΗΕ. Ο δεύτερος GA προσδιορίζει το βέλτιστο βαθμό αντιστάθμισης των TCSCs, λαμβάνοντας υπόψη τις θέσεις και τον αριθμό των TCSCs, όπως αυτά έχουν προσδιοριστεί από τον πρώτο GA.

Στο άρθρο [73] μία βελτιστοποίηση βασισμένη στο GA χρησιμοποιείται για να καθορίσει τον τύπο, το μέγεθος και την τοποθεσία των ΕΣΜ συσκευών (TCSC, SVC) στο δίκτυο με σκοπό τη μεγιστοποίηση της καθαρής παρούσας αξίας της επένδυσης. Στο άρθρο [82] ο GA προτείνεται για τη βέλτιστη τοποθέτηση των SVCs με στόχο την ενίσχυση της ευστάθειας τάσης του ΣΗΕ, λαμβάνοντας υπόψη τις πιο κρίσιμες συνθήκες λειτουργίας. Στο άρθρο [83] προτείνεται μία μέθοδος για τον ταυτόχρονο προσδιορισμό της βέλτιστης κατανομής και των βέλτιστων παραμέτρων ελέγχου ενός σταθεροποιητή βασισμένου σε UPFC με τη βοήθεια του GA, υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, που στόχος του είναι η μεγιστοποίηση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών τρόπων ταλάντωσης με την τοποθέτηση του UPFC-σταθεροποιητή σε διάφορες γραμμές του συστήματος. Στο άρθρο [86] παρουσιάζεται ένα graphical user interface (GUI) στο matlab, το οποίο αποκαλείται εργαλειοθήκη τοποθέτησης των ΕΣΜ (FACTS placement toolbox), το οποίο βασίζεται στον GA, ο οποίος είναι ικανός να βρει τη βέλτιστη τοποθεσία, το βέλτιστο μέγεθος παραμέτρων και τον βέλτιστο τύπο, δεδομένου αριθμού, πολλαπλών-τύπων ΕΣΜ σε μεγάλα ΣΗΕ. Με αυτόν τον τρόπο η τοποθεσία των ΕΣΜ θα βρεθεί πιο εύκολα και με μεγαλύτερη ευελιξία. Η εργαλειοθήκη της τοποθέτησης των ΕΣΜ επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει ένα ΣΗΕ, να καθορίσει τις ρυθμίσεις του γενετικού αλγόριθμου (αριθμός γενιών, μέγεθος αρχικού πληθυσμού κ.α.) και να επιλέξει τον αριθμό και τον τύπο των ΕΣΜ συσκευών που θα κατανεμηθούν στο δίκτυο. Η διαδικασία βελτιστοποίησης που βασίζεται στον GA εφαρμόζεται μετά για να καθορίσει τις βέλτιστες τοποθεσίες και τα βέλτιστα μεγέθη των επιλεγμένων ΕΣΜ για να μεγιστοποιήσει τη φόρτιση του ΣΗΕ.

Η τεχνική που προτείνεται στο άρθρο [88] διαχωρίζει το ΣΗΕ σε μικρότερες περιοχές χρησιμοποιώντας τη μέθοδο fuzzy C-means, FCM, και προσδιορίζει σε ποιους ζυγούς (επιλεγμένες περιοχές) χρειάζεται η εγκατάσταση των STATCOMs. Η μέθοδος FCM είναι μία μέθοδος διαχωρισμού, που διαιρεί το ΣΗΕ σε περιοχές για την αποφυγή της μετάδοσης των διαταραχών μεταξύ των περιοχών χρησιμοποιώντας τοπικούς ελεγκτές. Η FCM είναι μία μέθοδος ομαδοποίησης, η οποία επιτρέπει σε ένα σύνολο δεδομένων να ανήκει σε δύο ή περισσότερες συστοιχίες. Η FCM χρησιμοποιείται σε μηχανολογικές εφαρμογές ομαδοποίησης και βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της εξής αντικειμενικής συνάρτησης:

$$F_m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|x_i - C_j\|^2, \quad 1 \leq m \leq \infty \quad (4.145)$$

όπου  $m$ : πραγματικός αριθμός μεγαλύτερος από τη μονάδα και προσδιορίζει το επίπεδο της συστοιχίας ασάφειας (cluster fuzziness),  $u_{ij}$ : βαθμός συμμετοχής του  $x_i$  στη συστοιχία  $j$ ,  $x_i$ :  $i$ -στο στοιχείο από δεδομένα μετρήσεων  $d$ -διάστασης,  $C_j$ : κέντρο  $d$ -διάστασης της συστοιχίας

και  $\| \cdot \|$  : νόρμα, που εκφράζει την ομοιότητα μεταξύ οποιονδήποτε δεδομένων μετρήσεων και του κέντρου. Η διαδικασία βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης ενός δεδομένου αριθμού STATCOM στις διάφορες επιλεγμένες περιοχές του ΣΗΕ αναπτύσσεται χρησιμοποιώντας μία διαδικασία βελτιστοποίησης, που βασίζεται στον GA. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι να μεγιστοποιηθεί η φόρτιση του ΣΗΕ στις επιλεγμένες περιοχές. Στο άρθρο [96] παρουσιάζεται μία μέθοδος βελτιστοποίησης βασισμένη στον GA, η οποία προσδιορίζει τις βέλτιστες τοποθεσίες εγκατάστασης, τις βέλτιστες τιμές και το βέλτιστο τύπο, δεδομένου αριθμού, πολλαπλών-τύπων ΕΣΜ στο ΣΗΕ. Η απόδοση του ΣΗΕ αναλύεται πριν και μετά την εισαγωγή των ΕΣΜ. Η κύρια αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι η αύξηση της φόρτισης του ΣΗΕ.

Στα άρθρα [47],[58],[61],[74],[79],[80] παρουσιάζονται ορισμένες παραλλαγές του GA και αναλύονται παρακάτω.

Niching Genetic Algorithm (NGA): Καθώς οι GA αποτελούν πληθυσμιακό αλγόριθμο, μπορούν να προσαρμοστούν ικανοποιητικά στην επίλυση προβλημάτων πολλαπλών-στόχων βελτιστοποίησης. Η δυνατότητα των πληθυσμιακών αλγορίθμων να πραγματοποιούν αναζήτηση ταυτόχρονα σε διαφορετικές περιοχές του πεδίου αναζήτησης δίνει τη δυνατότητα εύρεσης λύσεων σε προβλήματα με ασυνεχή πεδία πολλαπλών κορυφών/πολυτροπικών προβλημάτων (multimodal). Τις τελευταίες δεκαετίες, η βελτιστοποίηση πολυτροπικών συναρτήσεων αποτελεί αντικείμενο έντονης μελέτης σε πολλούς τομείς της μηχανικής μάθησης, συμπεριλαμβανομένων της αναγνώρισης προτύπων, της προγνωστικής ανάλυσης και της κατηγοριοποίησης δεδομένων. Οι παραδοσιακοί γενετικοί αλγόριθμοι είναι κατάλληλοι για τον εντοπισμό του βέλτιστου σε μονοτροπικές (unimodal) συναρτήσεις καθώς συγκλίνουν σε μία ενιαία λύση του χώρου αναζήτησης. Στα πραγματικά προβλήματα, όμως, συχνά απαιτείται η αναγνώριση του βέλτιστου μαζί με κάποιων τοπικών βέλτιστων. Σε αυτό έρχεται να βοηθήσει η τεχνική “niching”, η οποία αναφέρεται σε μία σπουδαία κατηγορία μεθόδων που χρησιμοποιείται παραδοσιακά από GA για να εξερευνούν περισσότερο χώρο αναζήτησης, έτσι ώστε να εντοπίζεται ένα σύνολο λύσεων, βέλτιστες και μη, καθώς και για την αποφυγή της σύγκλισής τους σε μία μοναδική λύση του χώρου αναζήτησης. Το πλεονέκτημα του niching γενετικού αλγορίθμου, σε σύγκριση με τον απλό γενετικό αλγόριθμο, είναι ότι ο NGA προσφέρει ακόμα περισσότερες εξίσου αποτελεσματικές λύσεις και προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Στα άρθρα [58] και [61] γίνεται χρήση του NGA.

Στο άρθρο [58] τα τρία πιο διαδεδομένα ΕΣΜ, όσο αφορά τη μείωση των βυθίσεων της τάσης, το SVC, το STATCOM και το DVR, τοποθετούνται βέλτιστα στο δίκτυο με τη βοήθεια του NGA. Στόχος είναι η μείωση των ολικών οικονομικών απωλειών στο ΣΗΕ λόγω των βυθίσεων τάσης. Το κόστος των μεμονωμένων συσκευών μαζί με τα κόστη της εγκατάστασής τους και της ετήσιας συντήρησής τους λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Ο NGA προσδιορίζει τη βέλτιστη θέση, το βέλτιστο μέγεθος και το βέλτιστο τύπο των ΕΣΜ, που τοποθετούνται στο ΣΗΕ, ώστε να ικανοποιούνται οι στόχοι του προβλήματος. Στο άρθρο [61] παρουσιάζεται μία προσέγγιση για τη βέλτιστη επιλογή και κατανομή των ΕΣΜ στο δίκτυο, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των βυθίσεων τάσης στους ζυγούς του ΣΗΕ. Η προτεινόμενη μέθοδος είναι βασισμένη στη βελτιστοποίηση μίας αντικειμενικής συνάρτησης χρησιμοποιώντας NGA και GA, με την ταυτόχρονη εύρεση της βέλτιστης θέσης, του βέλτιστου τύπου και του βέλτιστου μεγέθους έξι, συνολικά, ΕΣΜ που



τοποθετούνται στο ΣΗΕ. Οι ίδιοι τρεις τύποι ΕΣΜ με το άρθρο [58] λαμβάνονται υπόψη και εδώ.

**Real-coded Genetic Algorithm (RGA):** Κάθε χρωμόσωμα θα πρέπει με κάποιο τρόπο να εμπεριέχει πληροφορία για τη λύση που παριστάνει. Το πώς κωδικοποιούνται τα χρωμοσώματα είναι η πρώτη ερώτηση, που γίνεται κατά την επίλυση ενός προβλήματος με GA. Η κωδικοποίηση εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του προβλήματος. Ο GA έχει κυρίως δύο είδη τρόπων κωδικοποίησης. Αρχικά την δυαδική κωδικοποίηση (binary coded GA) και την πραγματική κωδικοποίηση (real coded GA). Ο GA με δυαδική κωδικοποίηση (ο απλός GA) πρέπει να αποκωδικοποιήσει ένα χρωμόσωμα σε μία υποψήφια λύση, να αξιολογήσει την υποψήφια λύση και να επιστρέψει το αποτέλεσμα της αξιολόγησης πίσω στο δυαδικά-κωδικοποιημένο χρωμόσωμα που αντιπροσωπεύει την αξιολογημένη υποψήφια λύση. Η GA με πραγματική κωδικοποίηση (RGA) μπορεί να θεωρηθεί ως ένας GA, που λειτουργεί με βάση την πραγματική υποψήφια λύση (φαινότυπο). Για έναν RGA δεν χρειάζεται η αντιστοίχιση από φαινότυπο σε γενότυπο (no genotype-to-phenotype mapping). Ο RGA μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο και παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια στις μεταβλητές σχεδίασης. Οι γενετικές λειτουργίες, διασταύρωση και μετάλλαξη είναι επίσης διαφορετικές σε αυτή την περίπτωση. Στα άρθρα [47],[74],[80] γίνεται χρήση του RGA.

Το άρθρο [47] παρουσιάζει μία προσέγγιση για το βέλτιστο προσδιορισμό της τοποθεσίας εγκατάστασης και της βέλτιστης ικανότητας αντιστάθμισης των TCSCs στο ΣΗΕ, με στόχο τη μεγιστοποίηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς του ΣΗΕ, τη βελτίωση του προφίλ της τάσης του ΣΗΕ και την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης των TCSCs. Ο RGA μαζί με την AHP και τα ασαφή σύνολα εφαρμόζονται ως μία υβριδική ευρετική τεχνική με σκοπό τη βελτιστοποίηση ενός τέτοιου σύνθετου προβλήματος. Στο άρθρο [74] προτείνεται μία στρατηγική πολλαπλών στόχων για την εύρεση της βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης, βασισμένη στην ασαφή λογική και στον RGA. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται με στόχο την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης και την ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων τάσης των ζυγών του ΣΗΕ. Στο άρθρο [80] ο RGA χρησιμοποιείται ως εργαλείο βελτιστοποίησης για τον βέλτιστο καθορισμό της θέσης και των παραμέτρων ελέγχου του SVC και του TCSC. Η αντικειμενική συνάρτηση της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς του συστήματος, σε φυσιολογικές συνθήκες αλλά και σε διάφορες διαταραχές.

**Immune genetic algorithm (IGA):** Ο ανοσοποιητικός γενετικός αλγόριθμος (IGA) έχει τα δικά του ξέχωρα πλεονεκτήματα, ενώ διατηρεί το παραδοσιακό χαρακτηριστικό των γενετικών αλγορίθμων της ολικής παράλληλης αναζήτησης (global parallel search). Για αυτό το λόγο οι μελέτες με βάση τον ανοσοποιητικό αλγόριθμο έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερα. Ο IGA είναι ένας βελτιωμένος αλγόριθμος που βασίζεται στον βιολογικό ανοσοποιητικό μηχανισμό. Διαθέτει λειτουργίες της αυτό-προσαρμοζόμενης αναγνώρισης (self-adaptive recognition), μαθαίνοντας από το βιολογικό ανοσοποιητικό μηχανισμό και εξαιρώντας τα ξένα σώματα. Στη διαδικασία επίλυσης πρακτικών προβλημάτων, η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί εισάγονται σαν αντιγόνα, έτσι παράγεται ο αρχικός πληθυσμός αντιγόνων. Τελικά ύστερα από μία σειρά γενετικών χειρισμών, αποκτάται το αντίσωμα έναντι του αντιγόνου που αποτελεί και τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Ο ανοσοποιητικός γενετικός αλγόριθμος έχει τα εξής πλεονεκτήματα σε σχέση με τον απλό αλγόριθμο: (1) λειτουργία ανοσοποιητικής μνήμης

(immune memory function) (2) αυτό-ρυθμιζόμενη λειτουργία (self-adjustment function) (3) διατήρηση της ποικιλόμορφης λειτουργίας αντισωμάτων (antibody diversity function).

Στο άρθρο [79] παρουσιάζονται εφαρμογές των υβριδικών ανοσοποιητικών αλγορίθμων (hybrid immune algorithm, HIA), όπως ο IGA και η ανοσοποιητική βελτιστοποίηση με σμήνος σωματιδίων (immune particle swarm optimization, IPSO), έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη θέση και τιμή του UPFC ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη ροή ισχύος στο ΣΗΕ. Η αντικειμενική συνάρτηση στη βέλτιστη ροή ισχύος συμπεριλαμβάνει τα συνολικά κόστη παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος των γεννητριών και τα κόστη εγκατάστασης των UPFCs, τα οποία πρέπει να ελαχιστοποιηθούν. Με την εφαρμογή του ανοσοποιητικού γενετικού αλγόριθμου αποφεύγεται το μειονέκτημα της εύρεσης μιας τοπικής βέλτιστης λύσης.

#### 4.4.2 Αλγόριθμος Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις και Αλγόριθμος Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Tabu Search and Simulated Annealing, TS and SA)

Ο αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις καθώς και ο αλγόριθμος προσομοιωμένης ανόπτησης αποτελούν στοχαστικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι δεν χρειάζονται την αναλυτική περιγραφή του προβλήματος που επιλύεται και εφαρμόζουν κατάλληλες τυχαίες (πιθανολογικές) διαδικασίες για να εντοπίσουν τις βέλτιστες λύσεις. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης είναι τα εξής:

- 1) Η εύρεση ολικού ακρότατου. Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι έχουν τη δυνατότητα να εντοπίζουν τα ολικά ελάχιστα ή μέγιστα με μεγαλύτερα ή μικρότερα ποσοστά επιτυχίας (εξαρτάται από την παραμετροποίηση του μοντέλου, η οποία προκύπτει μετά από πολλές δοκιμές και εφαρμογές). Λόγω του στοχαστικού παράγοντα που εισάγεται διεξάγεται ευρεία αναζήτηση στην επιφάνεια καταλληλότητας και επιπλέον παρέχεται μία εκτίμηση για την επίδραση κάθε παραμέτρου εισόδου. Όμως, αν και συχνά καταφέρνουν να προσεγγίζουν ακρότατα (μέγιστο ή ελάχιστο) δεν μπορούν να εξασφαλίσουν ότι η λύση που θα καταλήξουν είναι το ολικό ακρότατο.
- 2) Δεν απαιτείται μαθηματική διατύπωση του προβλήματος. Η αντικειμενική συνάρτηση αντιμετωπίζεται ως ένα μαύρο κουτί και ο στοχαστικός αλγόριθμος υλοποιείται ανεξάρτητα, αξιοποιώντας την πληροφορία που προκύπτει από την αντιστοίχιση των παραμέτρων εισόδου με τα αποτελέσματα.
- 3) Ευελιξία. Λόγω της εν μέρει τυχαίας εξέλιξης των αλγορίθμων, δεν υπάρχει σημαντική εξάρτηση από το αρχικό σημείο αναζήτησης. Το γεγονός αυτό είναι καθοριστικό αφού δεν χρειάζεται η εκ των προτέρων γνώση της περιοχής όπου βρίσκεται κοντά το ζητούμενο ακρότατο. Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι μπορούν να κινηθούν ευέλικτα στην επιφάνεια καταλληλότητας, δίχως να έχουν καμία απαίτηση για αρχικές συνθήκες και γενικά για το προς αντιμετώπιση πρόβλημα.

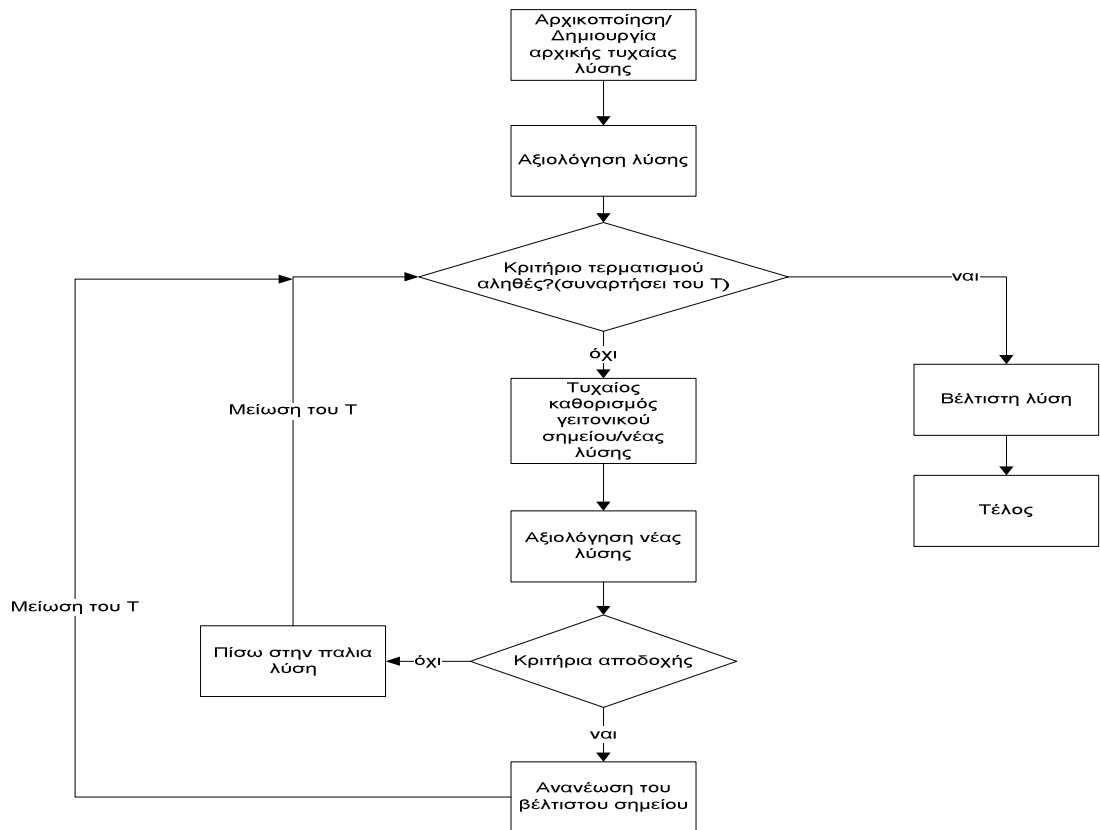
Βέβαια όπως κάθε μέθοδος έτσι και οι στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης έχουν ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία είναι τα εξής:

- 1) Αυξημένος υπολογιστικός χρόνος. Τα πλεονεκτήματα των στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης επιτυγχάνονται εις βάρος του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου.

- 2) Μη προκαθορισμένη συνθήκη τερματισμού. Ο τερματισμός της διαδικασίας βελτιστοποίησης με στοχαστικούς αλγόριθμους είναι ένα σημαντικό ζήτημα, καθώς δεν είναι εξασφαλισμένος ενδογενώς. Δεν υπάρχει η πληροφορία αν η τρέχουσα λύση που έχει βρεθεί είναι η ζητούμενη βέλτιστη οπότε η αναζήτηση συνεχίζεται για να βρεθεί μία ακόμη καλύτερη. Η επιλογή της συνθήκης τερματισμού αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ζήτημα καθώς ουσιαστικά καθορίζει τη λύση που θα προκύψει από την εφαρμογή του αλγορίθμου.
- 3) Αδυναμία επανάληψης μίας συγκεκριμένης εκτέλεσης. Λόγω της εν μέρει τυχαίας εξέλιξης των αλγορίθμων, αν το ίδιο πρόβλημα εκτελεσθεί δύο ή περισσότερες φορές με τις ίδιες αρχικές συνθήκες, δεν θα έχει απαραίτητως το ίδιο αποτέλεσμα. Συνεπώς, δυσχεραίνεται η εποπτεία του αλγορίθμου και ειδικότερα η διαδικασία προσέγγισης στην βέλτιστη λύση.

Ο αλγόριθμος προσομοιωμένης απόπτωσης ή προσομοιωμένης εξέλιξης (Simulated annealing, SA) αποτελεί μία επέκταση του αλγορίθμου αναρρίχησης λόφου (Hill Climbing Search, HC) και έχει χρησιμοποιηθεί για την επίλυση πολλών προβλημάτων με επιτυχία. Η μέθοδος αυτή ουσιαστικά προσομοιώνει τη διαδικασία όπου ένα υλικό θερμαίνεται πάνω από τη θερμοκρασία τήξης του και έπειτα σταδιακά ψύχεται ώσπου να δημιουργηθεί η κρυσταλλική δομή που ελαχιστοποιεί την ενέργεια του. Όμως, αν η ψύξη γίνει απότομα το υλικό γίνεται μία άμορφη μάζα με μεγαλύτερο επίπεδο ενέργειας. Οπότε, το κλειδί για την επίτευξη της κρυσταλλικής μορφής αποτελεί ο έλεγχος του ρυθμού αλλαγής της θερμοκρασίας. Στην περίπτωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, το επίπεδο της ενέργειας αντιστοιχίζεται στην τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας και η κρυσταλλική δομή προφανώς αποτελεί το ολικό ελάχιστο.

Ο αλγόριθμος της προσομοιωμένης απόπτωσης δίνει απάντηση στο κλασσικό δίλημμα ανάμεσα στην εξερεύνηση (exploration) του χώρου αναζήτησης και στην εκμετάλλευση (exploitation) της ατελούς λύσης. Η διαδικασία βελτιστοποίησης όπως και στην αναρρίχηση λόφου αρχίζει με ένα τυχαίο αρχικό σημείο και τον καθορισμό μιας γειτονικής θέσης αναζήτησης. Ωστόσο, το σημαντικό χαρακτηριστικό του αλγορίθμου είναι ότι σε αυτήν την περίπτωση επιτρέπεται η μετάβαση σε θέσεις που οδηγούν σε χειρότερες λύσεις, με σκοπό να αποφευχθεί η σύγκλιση σε ένα τοπικό ελάχιστο. Συγκεκριμένα, αν η γειτονική θέση οδηγεί σε καλύτερη λύση γίνεται αμέσως δεκτή και η αναζήτηση συνεχίζεται από αυτήν. Το ίδιο συμβαίνει και αν οδηγεί σε χειρότερη λύση, όπου με βάση μία πιθανότητα, καθορίζεται αν θα γίνει δεκτή. Η τιμή της πιθανότητας εξαρτάται από το πόσο χειρότερη είναι η λύση από την τρέχουσα βέλτιστη, καθώς και από την τιμή μιας παραμέτρου που μειώνεται σταδιακά με την εξέλιξη του αλγορίθμου και προσομοιάζει τη θερμοκρασία. Όσο μικρότερη η τιμή της θερμοκρασίας, τόσο μικρότερη είναι και η πιθανότητα αποδοχής μιας χειρότερης λύσης. Έτσι ο αλγόριθμος αρχικά έχει μεγάλο πεδίο αναζήτησης και σταδιακά, όπως εξελίσσεται, επικεντρώνεται στην περιοχή όπου πιθανώς να υπάρχει η βέλτιστη λύση. Ο αλγόριθμος της προσομοιωμένης απόπτωσης παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής (Σχήμα 4.6).



**Σχήμα 4.6:** Τυπικό διάγραμμα ροής του αλγορίθμου της προσομοιωμένης απόπτωσης.

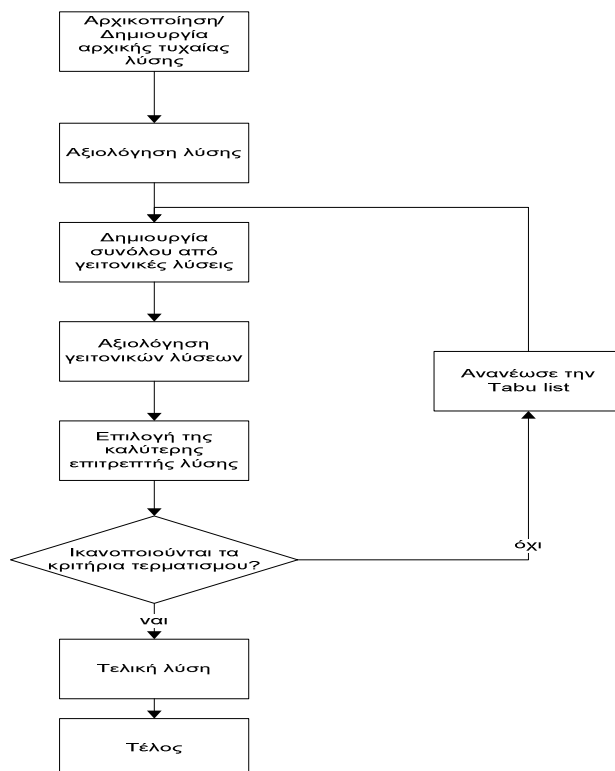
Ο αλγόριθμος της προσομοιωμένης απόπτωσης βρίσκει ένα ολικό μέγιστο με πιθανότητα που τείνει στο 1 αν το χρονοδιάγραμμα (schedule) μειώνει τη θερμοκρασία  $T$  αρκετά αργά. Το ακριβές όριο για την παράμετρο  $T$  και το χρονοδιάγραμμα για το  $T$  εξαρτάται συνήθως από το πρόβλημα.

Η μέθοδος της αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις (Tabu Search, TS) αποτελεί μία ακόμη εξέλιξη του αλγορίθμου αναρρίχησης λόφου. Ο αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις δίνει τη δυνατότητα επίλυσης μίας σειράς προβλημάτων (βελτιστοποίησης) στα πεδία των εφαρμοσμένων επιστημών, της επιχειρησιακής έρευνας και της μηχανικής. Όπως και στην προσομοιωμένη απόπτωση επιτρέπεται η μετάβαση σε χειρότερες λύσεις ώστε να μην εγκλωβίζεται ο αλγόριθμος σε τοπικά ελάχιστα. Βασικό στοιχείο της μεθόδου είναι η δημιουργία μιας λίστα με απαγορευμένες θέσεις (tabu list) στις οποίες δεν επιτρέπεται η μετάβαση. Αυτή η λίστα συνήθως περιέχει τα σημεία που έχουν ήδη εξεταστεί ώστε να επιλέγονται καινούριες διαδρομές αναζήτησης. Η λίστα απαγορευμένων θέσεων έχει συγκεκριμένο μήκος οπότε η εισαγωγή νέων θέσεων οδηγεί σε διαγραφή παλαιότερων. Πιο βολικό είναι η λίστα να περιέχει ολόκληρες οικογένειες σημείων με συγκεκριμένες ιδιότητες. Έτσι όμως, υπάρχει η περίπτωση να απαγορευτεί η μετάβαση σε πολύ καλές θέσεις που δεν έχει επισκεφτεί ακόμη ο αλγόριθμος. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος υπάρχει η δυνατότητα της αναζήτησης σε μία θέση που οδηγεί σε καλύτερη λύση

από την τρέχουσα βέλτιστη, παρόλο που ανήκει στη λίστα με τις απαγορευμένες θέσεις (aspiration criteria).

Αντίθετα με τη μέθοδο της προσομοιωμένης απόπτωσης, η οποία μπορεί να κάνει κινήσεις προς χειρότερες λύσεις ανά πάσα στιγμή, η μέθοδος με απαγορευμένες καταστάσεις κάνει το ίδιο μόνο όταν έχει βρεθεί σε τοπικά ελάχιστα. Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι και οι δύο αλγόριθμοι είναι δυνατόν να τερματίσουν σε μία θέση, ενώ αυτή δεν είναι η καλύτερη θέση που έχουν επισκεφτεί. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα κριτήρια τερματισμού και για αυτό το λόγο συνήθως αποθηκεύεται στη μνήμη το σημείο που βρέθηκε η καλύτερη λύση κατά τη διάρκεια εξέλιξης του αλγορίθμου. Ένα διάγραμμα ροής της αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Τα άρθρα [18] και [22] χρησιμοποιούν τους δύο αυτούς μεθόδους βελτιστοποίησης, το άρθρο [22] έχει αναλυθεί παραπάνω.

Στο άρθρο [18] προτείνεται μία υβριδική προσέγγιση βασισμένη στη μέθοδο της αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις και του αλγορίθμου της προσομοιωμένης απόπτωσης (hybrid TS/SA approach) για την ελαχιστοποίηση του κόστους καυσίμου της παραγωγής στον έλεγχο βέλτιστης ροής ισχύος (OPF) με τη χρήση ΕΣΜ. Το πρόβλημα διαχωρίζεται στο υπό-πρόβλημα του προσδιορισμού των βέλτιστων ρυθμίσεων παραμέτρων των ΕΣΜ το οποίο επιλύεται με την υβριδική προσέγγιση TS/SA με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους καυσίμου της παραγωγής, καθώς και στο υπό-πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος το οποίο επιλύεται με τετραγωνικό προγραμματισμό. Η υβριδική προσέγγιση TS/SA, που προτείνεται επιτυγχάνει καλύτερες λύσεις και απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο από το να εφαρμοζόντουσαν οι μέθοδοι του GA, της TS ή του SA από μόνοι τους στο ΣΗΕ.



Σχήμα 4.7: τυπικό διάγραμμα ροής αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις.

### 4.4.3 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO)

Ο όρος νοημοσύνη σμήνους (swarm intelligence) συμπεριλαμβάνει όλες τις μεθόδους επίλυσης προβλημάτων που βασίζονται στη συλλογική συμπεριφορά και στη νοημοσύνη των ατόμων ενός πληθυσμού. Ο πρώτος αλγόριθμος της νοημοσύνης σμήνους ήταν η βελτιστοποίηση με αποικία μυρμηγκιών (art colony optimization). Ένας άλλος βασικός αντιπρόσωπος της νοημοσύνης σμήνους είναι η βελτιστοποίηση με σμήνος σωματιδίων (particle swarm optimization). Πρόκειται για ένα στοχαστικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί ένα πληθυσμό σημείων βελτιστοποίησης. Αρχικά, προτάθηκε το 1995 από τους Kennedy και Eberhart. 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. Μετέπειτα, ο αλγόριθμος αυτός δέχθηκε διάφορες τροποποιήσεις στην προσπάθεια βελτίωσης της σύγκλισης του και όχι μόνο. Εφαρμογές του βρίσκονται σε προβλήματα βελτιστοποίησης σε διάφορους κλάδους μεταξύ αυτών και στον κλάδο της ηλεκτρολογίας.

Σύμφωνα με την ορολογία που έχει καθιερωθεί, κάθε δυνατό διάνυσμα παραμέτρων εισόδου ονομάζεται σωματίδιο (particle) και αποτελεί μία υποψήφια λύση για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Το σύνολο των σωματιδίων σε ένα επαναληπτικό βήμα του αλγορίθμου αποτελεί το σμήνος (swarm). 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. Όπως σε κάθε εξελικτικό αλγόριθμο, η αρχή γίνεται με μία τυχαία κατανομή των σωματιδίων στο χώρο των λύσεων. Σε αναλογία με τον GA (ο οποίος αποτελεί το δημοφιλέστερο εξελικτικό αλγόριθμο, evolutionary algorithm (EA)), η PSO αντιστοιχεί στον πληθυσμό (population) των GA/EA, ενώ τα σωματίδια αντιστοιχούν στα άτομα (individuals). Αντίθετα όμως με τους GAs, όπου σε κάθε γενιά δημιουργούνται νέες λύσεις, εδώ τα σωματίδια παραμένουν ως υποψήφιες λύσεις, ενώ παράλληλα κινούνται στην επιφάνεια καταλληλότητας. Επίσης άλλη μία διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι πως η PSO δε χρησιμοποιεί εξελικτικούς τελεστές όπως η διασταύρωση και η μετάλλαξη.

Όσο κινείται ένα σωματίδιο στο χώρο αναζήτησης, το σωματίδιο εξετάζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τις διάφορες υποψήφιες λύσεις (κάθε θέση του σωματιδίου είναι μία 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 ή τοπικό βέλτιστο (personal or local best). Αν 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 τη βέλτιστη τιμή αυτής καλείται ολικό βέλτιστο (global best). Η βασική διαδικασία μέσω της οποίας υπολογίζεται η νέα θέση ενός σωματιδίου του σμήνους είναι η ανανέωση της ταχύτητάς του. Η ταχύτητα δείχνει αφενός την κατεύθυνση προς την οποία θα πραγματοποιηθεί η κίνηση και αφετέρου την απόσταση μετακίνησης.

Σύμφωνα με την πιο απλοϊκή έκδοση της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, κάθε σωματίδιο  $i$  ανανεώνει την ταχύτητα του  $V$  και τη θέση του  $x$ , ανάλογα με τοπικά βέλτιστα  $lbest$  και τα ολικά βέλτιστα  $gbest$  που έχουν βρεθεί μέχρι την τρέχουσα επανάληψη. Τότε οι

εξισώσεις της θέσης του σωματιδίου και της ταχύτητας, που αθροίζεται στην κίνηση του σωματιδίου, δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

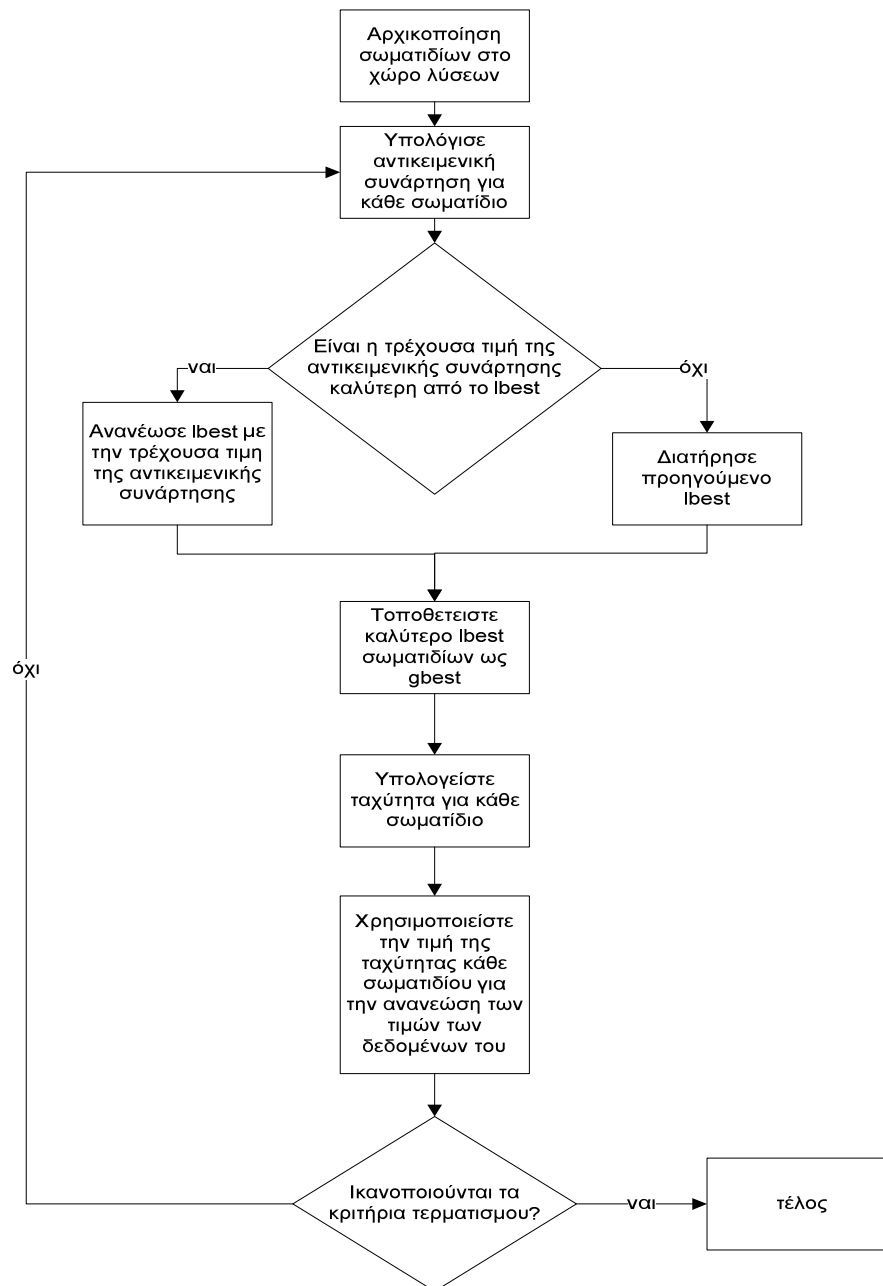
$$x_i(t+1) = x_i(t) + V_i(t+1) \quad (4.146)$$

$$V_i(t+1) = V_i(t) + c_1 r_1 [lbest_i(t) - x_i(t)] + c_2 r_2 [gbest(t) - x_i(t)] \quad (4.147)$$

όπου το  $t$  αναφέρεται σε διακριτά χρονικά βήματα, τα οποία αντιστοιχούν στα βήματα του επαναληπτικού βρόχου του αλγορίθμου της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, τα  $r_1, r_2$  είναι τυχαίες τιμές στο διάστημα  $[0,1]$ . Αυτές οι τυχαίες τιμές εισάγουν στον αλγόριθμο το στοχαστικό στοιχείο. Οι συντελεστές  $c_1, c_2$  ονομάζονται συντελεστές επιτάχυνσης (acceleration coefficients) και είναι στην ουσία οι συντελεστές βαρύτητας για τη γνωστική και την κοινωνική συνιστώσα, αντίστοιχα. Το  $V_i$  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) και εκφράζεται μέσω του όρου  $c_1 r_1 [lbest_i(t) - x_i(t)]$ , ενώ η κοινωνικά ανταλλασσόμενη πληροφορία αποκαλείται κοινωνική συνιστώσα (social component) και εκφράζεται μέσω του όρου  $c_2 r_2 [gbest(t) - x_i(t)]$ . Παρακάτω παρατίθεται ένα διάγραμμα ροής της τυπικής μεθόδου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Σχήμα 4.8).

Ένα από τα πλεονεκτήματα της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων είναι ότι απαιτεί την ρύθμιση ελαχίστων παραμέτρων. Επίσης σημαντική είναι και η ικανότητα των σωματιδίων να μοιράζονται πληροφορίες μεταξύ τους. Κατά την διάρκεια μιας διαδικασίας αναζήτησης τα σωματίδια μπορούν να επωφεληθούν από ανακαλύψεις και προηγούμενες εμπειρίες όλων των άλλων σωματιδίων όσο αφορά πληροφορίες για τη λύση του συστήματος. Κάτι που οδηγεί σε υψηλότερη ταχύτητα στη διαδικασία επίλυσης. Από την άλλη το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η παρεχόμενη λύση είναι στοχαστικού χαρακτήρα, επίσης η εξάρτηση της από το αρχικό σημείο και τις παραμέτρους αποτελεί μία ακόμη αδυναμία της. Τέλος η μέθοδος αποτυγχάνει ορισμένες φορές να βρει το ολικό βέλτιστο λόγω της αργής σύγκλισης και των τοπικών βέλτιστων. Έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι που να βελτιώνουν τη συμπεριφορά σύγκλισης του αλγορίθμου. Ενδεικτικά, συντελεστής αδράνειας (inertial weight), περιορισμός της εξίσωσης ταχύτητας (constriction coefficient), συντελεστής λόγου καταλληλότητας προς απόσταση (fitness distance ration). Ο αλγόριθμος PSO αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στην αντιμετώπιση δύσκολων προβλημάτων. Μαζί με τους γενετικού αλγόριθμους, έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην εύρεση των Pareto-βέλτιστων λύσεων σε προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων.

Στα άρθρα [36],[48],[77] εφαρμόζεται η μέθοδο PSO για την επίλυση του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ, και στα άρθρα [71],[85],[100] εφαρμόζεται η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων πολλαπλών στόχων (multi-objective particle swarm optimization, MOPSO). Στα άρθρα [57],[76],[79],[89] παρουσιάζονται ορισμένες παραλλαγές της κλασσικής μεθόδου PSO. Όλα αυτά τα άρθρα θα αναλυθούν στις επόμενες παραγράφους.



**Σχήμα 4.8:** Διάγραμμα ροής τυπικής μεθόδου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων

Στο άρθρο [36] παρουσιάζεται μία εφαρμογή της τεχνικής PSO για την εύρεση της βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης των ΕΣΜ με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασή τους και τη μεγιστοποίηση της φόρτισης του ΣΗΕ, ενώ ικανοποιούνται οι περιορισμοί του συστήματος. Τρία είδη ΕΣΜ μελετιούνται σε αυτό το άρθρο, συγκεκριμένα το TCSC, το SVC και το UPFC. Εξετάζονται περιπτώσεις εγκατάστασης μονού-τύπου ΕΣΜ και πολλαπλών-τύπου ΕΣΜ στο δίκτυο. Οι μεταβλητές βελτιστοποίησης στην περίπτωση της εγκατάστασης ενός-τύπου ΕΣΜ στο ΣΗΕ είναι η τοποθεσία του στο δίκτυο, οι ρυθμίσεις του και το κόστος εγκατάστασής του. Στην περίπτωση των πολλαπλών-τύπων ΕΣΜ ο τύπος του ΕΣΜ προστίθεται σαν επιπρόσθετη μεταβλητή στην βελτιστοποίηση. Στο άρθρο [48] η PSO



εφαρμόζεται για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση των SSSC-ελεγκτών στο δίκτυο μεταφοράς. Αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών μεταφοράς του δικτύου. Στο άρθρο [77] χρησιμοποιείται η PSO για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθεσίας και των βέλτιστων ρυθμίσεων των παραμέτρων των SVC και TCSC ελεγκτών με σκοπό την ενίσχυση της απόσβεσης των ταλαντώσεων μικρών σημάτων (damp the small signal oscillations).

Στο άρθρο [71] αντιμετωπίζεται ένα πρόβλημα ενίσχυσης του περιθωρίου φόρτισης, ως ένα πρόβλημα πολλαπλών-στόχων, με τη μέθοδο της MOPSO. Αρχικά, ένας δείκτης κινδύνου (risk index, RI) χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει το βαθμό κινδύνου κάθε διαταραχής, και οι διαταραχές με τις υψηλότερες τιμές του RI θεωρούνται κατάλληλες για εγκατάσταση SVC. Έπειτα για κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται η ανάλυση ρυθμών για τον προσδιορισμό των ζυγών, που θα εγκατασταθούν τα SVC. Το πρόβλημα ενίσχυσης του περιθωρίου φόρτισης καθορίζει την ικανότητα του κάθε τοποθετημένου SVC και διαμορφώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, με την μεγιστοποίηση του περιθωρίου φόρτισης και την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης του SVC να ορίζουν την αντικειμενική συνάρτηση πολλαπλών στόχων για ένα σύνολο μετώπου Pareto (Pareto front set). Στο σύνολο του μετώπου Pareto για κάθε διαταραχή, που έχει επιλεγεί, προσδιορίζεται η λύση με τον υψηλότερο δείκτη απόδοσης (performance index) ως η καταλληλότερη για εγκατάσταση SVC.

Στο άρθρο [85] η βέλτιστη τοποθέτηση των TCSCs στο ΣΗΕ διαμορφώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, με στόχους την ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της φόρτισης του ΣΗΕ, την ελαχιστοποίηση των απωλειών μεταφοράς, την ελαχιστοποίηση του κόστους των TCSCs και την ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων της τάσης στους ζυγούς φορτίου. Αυτό το πρόβλημα λύνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, η PSO, η MOCLPSO (multi-objected learning comprehensive PSO), και η μέθοδος σταθμισμένου αθροίσματος εφαρμόζονται για να καθορίσουν τις μη-κυριαρχούμενες λύσεις. Στο δεύτερο στάδιο, εφαρμόζονται δύο διαφορετικά εργαλεία λήψης αποφάσεων, συγκεκριμένα η TOPSIS και η μέθοδος ομαδοποίησης FCM, για τον καθορισμό της καλύτερης λύσης.

Η βέλτιστη στρατηγική τοποθέτησης πολλαπλών στόχων του TCSC στο ΣΗΕ, που προτείνεται στο άρθρο [100], εφαρμόζει αρχικά μία τεχνική ευαισθησίας βασισμένη στο δείκτη απόδοσης (performance index sensitivity method technique) για να προσδιορίζει τις γραμμές μεταφοράς του δικτύου, στις οποίες είναι περισσότερο αναγκαία η εγκατάσταση του TCSC. Οι γραμμές μεταφοράς, που επιλέχτηκαν, μαζί με την αντικειμενική συνάρτηση πολλαπλών στόχων, συγκεκριμένα της μεγιστοποίησης της φόρτισης του ΣΗΕ και της ελαχιστοποίησης του κόστους εγκατάστασης του TCSC, διαμορφώνουν το πρόβλημα καθορισμού της βέλτιστης ικανότητας αντιστάθμισης κάθε τοποθετημένου TCSC ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, το οποίο επιλύεται με τη MOPSO. Τέλος, από το σύνολο λύσεων του μετώπου Pareto που καθορίζεται, επιλέγεται η λύση που παρέχει στο ΣΗΕ την απαιτούμενη φόρτιση με τη μεγαλύτερη τιμή του δείκτη χρησιμότητας (biggest utilisation index value).

Στο άρθρο [57] παρουσιάζεται μία νέα μέθοδος για την βέλτιστη τοποθέτηση πολλαπλών τύπων ΕΣΜ με στόχο τη βελτιστοποίηση ενός προβλήματος ευστάθειας τάσης πολλαπλών στόχων. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται σε μία νέα παραλλαγή της μεθόδου PSO, που ειδικεύεται στην επίλυση προβλημάτων πολλαπλών στόχων γνωστή ως βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων μη κυριαρχούμενης τάξης (non-dominated sorting PSO, NSPSO). Στους

αλγόριθμους δεύτερης και τρίτης γενιάς συμπεριλαμβάνονται οι αλγόριθμοι, όπου πρωτεύον κριτήριο επιλογής αποτελεί η σχέση κυριαρχίας ανάμεσα στις υπό εξέταση λύσεις, αντιστοιχίζοντας σε κάθε μέλος του πληθυσμού ένα βαθμωτό μέτρο κυριαρχίας (τάξη). Ο βαθμός της τάξης είναι ανάλογος του αριθμού των λύσεων οι οποίες κυριαρχούν στο άτομο με μικρές τάξεις να αντιστοιχούν σε λιγότερο κυριαρχούμενες λύσεις. Συνεπώς επιτυγχάνεται ταξινόμηση του πληθυσμού με βάση τη σχετική θέση των διανυσμάτων-λύσεων στο διανυσματικό πεδίο τιμών. Ο Goldberg πρότεινε τη μέθοδο μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης (non – dominated sorting), η οποία επιτρέπει τη διαμόρφωση ενός συνόλου μετώπων Pareto, ανάλογα με την τάξη των ατόμων, με το πρώτο να αποτελείται από ολικά Pareto- βέλτιστες λύσεις. Η μέθοδος NSPSO χρησιμοποιείται για την εύρεση της βέλτιστης λύσης και των βέλτιστων ρυθμίσεων δύο ειδών ΕΣΜ, του TCSC και του SVC, με στόχο τη μεγιστοποίηση του ορίου στατικής ευστάθειας τάσης, την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος και των διακυμάνσεων τάσης στους ζυγούς φορτίων.

Στο άρθρο [76] παρουσιάζεται και επιλύεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων λαμβάνοντας υπόψη τη βέλτιστη τοποθέτηση ΕΣΜ στο ΣΗΕ. Ένα από τα πλεονεκτήματα της PSO είναι η ικανότητα των σωματιδίων να μοιράζονται πληροφορίες μεταξύ τους κάτι που οδηγεί σε υψηλότερη ταχύτητα στη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος. Παρόλα αυτά, λόγω της πολυτροπικότητας (multimodality) της αντικειμενικής συνάρτησης, το προηγούμενο πλεονέκτημα θα μπορούσε να βλάψει σοβαρά την αναζήτηση για μία ολική βέλτιστη λύση. Η αντικειμενική συνάρτηση πολλαπλών στόχων μπορεί επίσης να υποβαθμίσει τα πολλαπλά κριτήρια του αλγορίθμου, με αποτέλεσμα να μειώσει την ικανότητα εύρεσης ολικού βέλτιστου του PSO αλγορίθμου. Με στόχο την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος και για την βελτίωση της συνολικής διαδικασίας εύρεσης λύσης, προτείνεται μία υβριδική μέθοδος μετάλλαξης PSO (hybrid mutation PSO, HMPSO), η οποία συντίθεται από μια τυπική μέθοδο PSO και ένα νέο χειριστή μετάλλαξης. Η προτεινόμενη υβριδική μέθοδος συνδυάζει την ασαφή λογική (fuzzy logic) και τη διαδικασία της αναλυτικής ιεράρχησης (analytical hierarchy process, AHP) για την μοντελοποίηση των προσόντων κάθε στόχου του προβλήματος και την προτεραιότητα των στόχων. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος λαμβάνει υπόψη τη βελτίωση του προφίλ της τάσης, την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος και την ενίσχυση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς του συστήματος.

Στο άρθρο [89] παρουσιάζεται μία βελτιωμένη μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (improved PSO, IPSO) για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Η βελτιωμένη PSO προτείνεται για να αντιμετωπίσει τα μειονεκτήματα της κλασικής μεθόδου PSO που είναι η αργή σύγκλιση και τα τοπικά βέλτιστα που κάνουν τη μέθοδο να αποτυγχάνει να βρίσκει ολική βέλτιστη λύση. Η βελτιωμένη PSO εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης θέσης και διαστασιολόγησης του STATCOM με σκοπό την ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων τάσης σε όλους τους ζυγούς του ΣΗΕ. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βελτιωμένη μέθοδος είναι ικανή να βρει τη βέλτιστη λύση με στατιστική ακρίβεια και υψηλό βαθμό σύγκλισης.

#### 4.4.4 Αναζήτηση Ελαχίστης Τομής (Min Cut Search)

Η κατάλληλη τοποθέτηση του TCSC παίζει ρόλο στην εξασφάλιση της λύσης του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος και στην ενίσχυση της απόδοσης του συστήματος, χωρίς να παραβιάζεται η ασφάλειά του. Στο άρθρο [92] προτείνεται η μέθοδος της αναζήτησης ελάχιστης τομής για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθέτησης του TCSC στο ΣΗΕ, σε φυσιολογικές συνθήκες αλλά και σε συνθήκες διαταραχών. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενεργού ισχύος. Σαν ορισμός στη θεωρία των γράφων, το min cut (ελάχιστη τομή) ενός κατευθυνόμενου γράφου είναι ίσο με την ελάχιστη χωρητικότητα που πρέπει να αφαιρεθεί από αυτόν ώστε να μην υπάρχει κάποιο μονοπάτι από έναν κόμβο-πηγή σε κάποιο κόμβο-προορισμό. Ως χωρητικότητα ορίζεται το άθροισμα των βαρών των ακμών που θα πρέπει να αφαιρεθούν από το γράφο. Εδώ ο αλγόριθμος ελάχιστης τομής θα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ελάχιστης τομής του ΣΗΕ, που αναπαρίσταται σαν ένας γράφος. Έτσι, αν η ελάχιστη τομή προσδιοριστεί, ο κλάδος που έχει την ικανότητα να συνεισφέρει στη ρύθμιση της αντίστασης θα αναγνωριστεί και μόνο αυτός ο κλάδος θα είναι κατάλληλος για τοποθέτηση TCSC ώστε να ενισχυθεί ο κλάδος συμφόρησης. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο ο χώρος αναζήτησης μειώνεται, αφού περιορίζονται πολύ οι κλάδοι, που κρίνονται αναγκαίο να μελετηθούν για τοποθέτηση TCSC.

#### 4.4.5 Εξελικτικός Αλγόριθμος (Evolutionary Algorithm, EA)

Οι στρατηγικές εξέλιξης αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1960. Η ιδέα της χρήσης της εξέλιξης ως κατευθυντήριας αρχής και, επομένως, της ανάπτυξης εξελικτικών στρατηγικών προέκυψε από προβλήματα πειραματικής βελτιστοποίησης. Στις κλασσικές στρατηγικές εξέλιξης ζευγάρια γονέων παράγουν απογόνους βάση της διασταύρωσης (crossover), τα οποία στη συνέχεια αναταράσσονται μέσω της μετάλλαξης (mutation). Ο αριθμός των απογόνων που δημιουργείται είναι μεγαλύτερος του αρχικού πληθυσμού. Η επιβίωση είναι ντετερμινιστική και υλοποιείται με έναν από τους δύο ακόλουθους τρόπους. Ο πρώτος επιτρέπει να επιζήσουν οι καλύτεροι απόγονοι και αντικαθιστά τους γονείς με αυτούς τους απογόνους. Ο δεύτερος τρόπος επιτρέπει να ζήσουν οι καλύτεροι απόγονοι και γονείς. Όμοια με τον εξελικτικό προγραμματισμό, αξιολογούμενες προσπάθειες έχουν εστίαση στην προσαρμοστική μετάλλαξη καθώς τρέχει ο αλγόριθμος, επιτρέποντας σε κάθε μεταβλητή κάθε οντότητας να υποστεί προσαρμοστική μετάλλαξη που προέρχεται από κανονική κατανομή με διασπορά μηδέν. Αντίθετα με τον εξελικτικό προγραμματισμό, η διασταύρωση παίζει σημαντικό ρόλο στις στρατηγικές εξέλιξης.

Στο άρθρο [33] χρησιμοποιείται μία εξελικτική στρατηγική (evolutionary strategy) για τον συντονισμό πολλαπλών-τύπων ΕΣΜ. Η αναζήτηση και η εύρεση των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών ελέγχου για ΕΣΜ-ελεγκτές είναι ένα μιγαδικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, που δεν μπορεί εύκολα να επιλυθεί. Η εξελικτική στρατηγική χρησιμοποιείται για να καθορίσει αυτές τις βέλτιστες τιμές με σκοπό την ενίσχυση της λειτουργίας του ΣΗΕ με την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος.

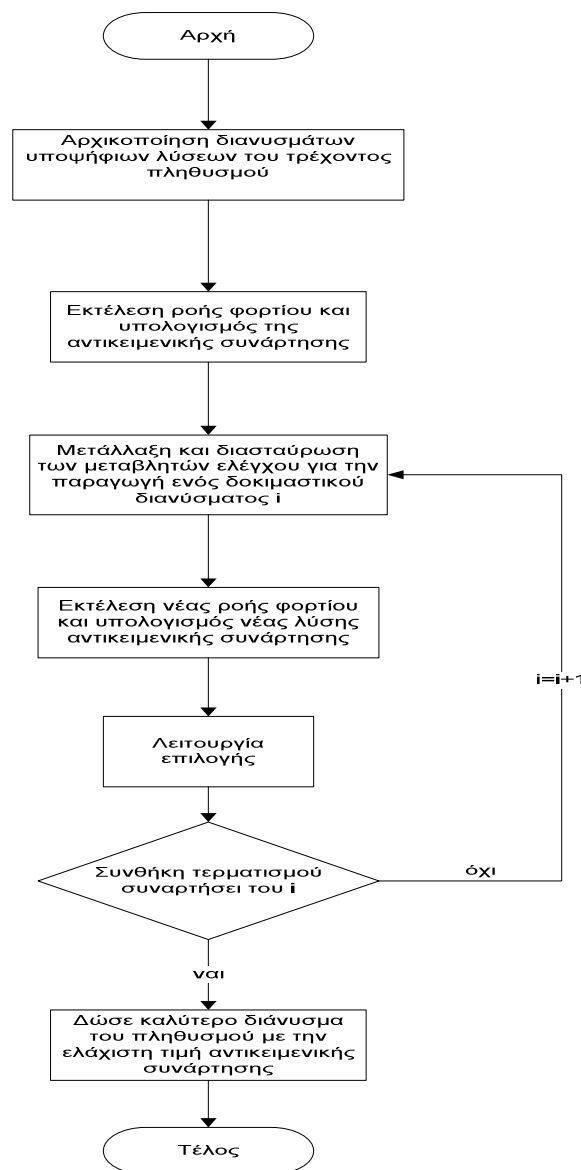
Στο άρθρο [40] ένας νέος υβριδικός εξελικτικός αλγόριθμος (Hybrid Evolutionary Algorithm, HEA) προτείνεται για τον καθορισμό της βέλτιστης τοποθέτησης πολλαπλών-τύπων ΕΣΜ, με σκοπό την ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της συνολικής ικανότητας μεταφοράς και την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος των συναλλαγών ενέργειας μεταξύ δύο διαφορετικών περιοχών ελέγχου χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί του συστήματος. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος συγκρίνεται με τον εξελικτικό προγραμματισμό (Evolutionary Programming, EP), τον αλγόριθμο αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις, τον υβριδικό αλγόριθμο αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις και προσομοιωμένης ανόπτησης, και μεθόδων βελτιωμένου εξελικτικού προγραμματισμού. Ο HEA ενσωματώνει τις μεθόδους του εξελικτικού προγραμματισμού, της μεθόδου αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις και της μεθόδου της προσομοιωμένης ανόπτησης για να βελτιώσει την ευρωστία των τεχνικών του εξελικτικού υπολογισμού. Ειδικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα του HEA είναι τα εξής: (1) Έχει σχεδιαστεί μία αναζήτηση πολλαπλών πληθυσμών με διάφορους τελεστές μετάλλαξης για την ενίσχυση της ποικιλομορφίας της αναζήτησης και την βελτίωση της ανανέωσης του πληθυσμού, παρέχοντας καλύτερη ποιότητα λύσεων από εκείνες που προέρχονται από αναζητήσεις ενιαίων πληθυσμών. (2) Η πρόωρη σύγκλιση που προκαλείται από τη συνοχή των ατόμων σε έναν ενιαίο πληθυσμό μειώνεται με τη συναρμογή και την ανταλλαγή των πληροφοριών αναζήτησης μεταξύ όλων των υπό-πληθυσμών. (3) Η επιλογή (selection), με μία πιθανολογική στρατηγική ανανέωσης βασισμένη στον αλγόριθμο TS και το χρονοδιάγραμμα ανόπτησης της μεθόδου της SA, εφαρμόζεται για να αποφεύγεται η εξάρτηση της λύσης από την αντικειμενική συνάρτηση και για να αποφεύγονται τα τοπικά βέλτιστα. (4) Ο αλγόριθμος επιδέχεται εύκολα παράλληλη υλοποίηση με αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος αναζήτησης χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα της λύσης.

#### 4.4.6 Διαφορική Εξέλιξη (Differential Evolution, DE)

Η διαφορική εξέλιξη αναπτύσσεται από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 και σήμερα ολοένα και περισσότεροι ερευνητές δουλεύουν με και πάνω σε αυτήν. Η διαφορική εξέλιξη αναπτύχθηκε μέσα από τις προσπάθειες του Kenneth Price να επιλύσει το πρόβλημα εφαρμογής των πολυωνύμων Chebyshev το οποίο τέθηκε από τον Rainer Storn. Μία καινοτομία επήλθε όταν ο Price είχε την ιδέα να χρησιμοποιήσει διαφορές διανυσμάτων για τη διαταραχή του διανύσματος πληθυσμού. Μετά από αυτή την ιδέα μία συνεργασία του Price και του Storn η οποία συμπεριλάμβανε ατελείωτες δοκιμές και προσομοιώσεις οδήγησε σε πάρα πολλές σημαντικές βελτιώσεις οι οποίες έκαναν την διαφορική εξέλιξη το πολύπλευρο και εύρωστο εργαλείο που είναι σήμερα. Η διαφορική εξέλιξη είναι μία μέθοδος μαθηματικής βελτιστοποίησης πολυδιάστατων συναρτήσεων και ανήκει στην ομάδα των στρατηγικών βελτιστοποίησης εξέλιξης (evolution strategy). Η διαφορική εξέλιξη βρίσκει το ολικό βέλτιστο (μέγιστο ή ελάχιστο) μιας σύνθετης συνάρτησης με πολύ καλή πιθανότητα. Η κύρια ιδέα πίσω από την διαφορική εξέλιξη είναι μία μέθοδος για την δημιουργία δοκιμαστικών παραμετρικών διανυσμάτων (Σχήμα 4.9). Η διαφορική εξέλιξη προσθέτει μία διαφορά μεταξύ δύο διανυσμάτων του ίδιου πληθυσμού σε ένα τρίτο.

Η διαφορική εξέλιξη αποτελεί μία στοχαστική μέθοδο βελτιστοποίησης για την ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία μπορεί να μοντελοποιήσει τα

αντικείμενα του προβλήματος σεβόμενη τους περιορισμούς. Η κύρια διαφορά μεταξύ της διαφορικής εξέλιξης και του γενετικού αλγορίθμου είναι το στάδιο της μετάλλαξης. Η διαφορική εξέλιξη έχει την εξής διαδικασία επιλογής: η καλύτερη καινούρια λύση και ο γεννήτοράς της κερδίζουν τον συναγωνισμό παρέχοντας ένα σημαντικό πλεονέκτημα συγκλίνουσας επίδοσης σε σχέση με τους γενετικούς αλγόριθμους. Η διαφορική εξέλιξη έχει κυρίως τρία πλεονεκτήματα: (1) Βρίσκει το πραγματικό ελάχιστο ανεξαρτήτως των αρχικών τιμών των παραμέτρων, (2) παρουσιάζει γρήγορη σύγκλιση, (3) κάνει χρήση λίγων παραμέτρων για τον έλεγχο της, (4) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ελαχιστοποίηση μη-συνεχών, μη-γραμμικών, μη-διαφορίσιμων συναρτήσεων, και (5) μπορεί να δουλέψει με θορυβώδεις, επίπεδες, πολυδιάστατες και χρονικά εξαρτημένες αντικειμενικές συναρτήσεις και με περιορισμούς βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με συναρτήσεις ποινής. Η απλότητα της, η ταχύτητα και η ευκολία χρήσης είναι μερικά από τα υπόλοιπα πλεονεκτήματα της διαφορικής εξέλιξης.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου διαφορικής εξέλιξης.

Στα άρθρα [54] και [63] εφαρμόζεται ο αλγόριθμος της DE για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθέτησης και των βέλτιστων ρυθμίσεων παραμέτρων του UPFC, με σκοπό την ενίσχυση της ασφάλειας του συστήματος σε περιπτώσεις διαταραχών αποκοπής γραμμής μέσω της ελαχιστοποίησης των υπερφορτισμένων γραμμών και των παραβιάσεων των ορίων τάσης στους ζυγούς τους ΣΗΕ. Αρχικά, εφαρμόζεται μία ανάλυση διαταραχών και μία διαδικασία κατάταξης για τον προσδιορισμό των πιο σημαντικών περιπτώσεων διαταραχών αποκοπής γραμμής, λαμβάνοντας υπόψη τις υπερφορτίσεις των γραμμών και τις παραβιάσεις της τάσης των ζυγών ως έναν δείκτη απόδοσης. Έπειτα, εφαρμόζεται η DE για την εύρεση της βέλτιστης τοποθεσίας και των βέλτιστων ρυθμίσεων των παραμέτρων του UPFC στις εξεταζόμενες διαταραχές.

Στο άρθρο [60] προτείνονται δύο μέθοδοι για την βέλτιστη τοποθέτηση των ΕΣΜ (εδώ μόνο TCSC) στο ΣΗΕ, που βασίζονται στην προσομοίωση Monte Carlo (Monte Carlo simulation) λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις στη ζήτηση και στην παραγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η βασική τεχνική βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται είναι αυτή της DE και ο σκοπός της είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής. Η πρώτη μέθοδος εκτιμά την κατάσταση του συστήματος, για την οποία η αντίστοιχη βέλτιστη λύση για την τοποθέτηση του TCSC θα δώσει το υψηλότερο ετήσιο όφελος από την άποψη εξοικονόμησης κόστους από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Η δεύτερη μέθοδος εκτιμά τη βέλτιστη τοποθεσία των συσκευών TCSC. Στο άρθρο [72] προτείνεται μία μέθοδος που είναι ικανή να ενισχύσει την ευστάθεια τάσης του συστήματος καθώς και να μειώσει τις απώλειες των γραμμών μεταφοράς. Το πρόβλημα που μελετάται είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων και μία υβριδική διαφορική εξέλιξη (Hybrid Differential Evolution, HDE) χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει μεταξύ άλλων τις θέσεις και τα μεγέθη των SVCs στο σύστημα μεταφοράς για την καλύτερη ρύθμιση της ροής αέργου ισχύος και τη βελτίωση της ευστάθειας τάσης του δικτύου.

#### 4.4.7 Αναζήτηση Αρμονίας (Harmony Search, HS)

Ένας νέος ευρετικός αλγόριθμος έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια που ονομάζεται αναζήτηση αρμονίας (Harmony Search, HS) και βασίζεται στη μουσική διαδικασία αναζήτησης της “τέλειας αρμονίας” όταν υπάρχει μία ομάδα μουσικών οργάνων. Η αρμονία στη μουσική θεωρείται ανάλογη με το βέλτιστο διάνυσμα απόφασης του προβλήματος ενώ οι “αυτοσχεδιασμοί” των μουσικών βελτιστοποίησης, και οι αυτοσχεδιασμοί των οργανοπαικτών θεωρούνται ανάλογες με τις τοπικές τεχνικές αναζήτησης βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος HS δεν απαιτεί αρχικές τιμές για τις μεταβλητές απόφασης (που αποτελούν το διάνυσμα απόφασης). Επιπλέον, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια στοχαστική τυχαία αναζήτηση της βέλτιστης λύσης που βασίζεται στη “μνήμη” της αρμονίας και σε διάφορες μεθόδους προσαρμογής του “μουσικού τόνου” λαμβάνοντας υπόψη είτε τη μνήμη αρμονίας είτε την προσαρμογή σε “γειτονικό” τόνο. Σε σύγκριση με προηγούμενους ευρετικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης, ο αλγόριθμος HS εγείρει λιγότερες μαθηματικές απαιτήσεις και μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί για διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης. Στα πλεονεκτήματά του περιλαμβάνονται πως μπορεί να χειριστεί εξίσου διακριτές και συνεχείς μεταβλητές, δεν

απαιτεί αρχικές τιμές για το διάνυσμα απόφασης, δεν έχει θέματα σύγκλισης και αποφεύγει τα τοπικά ακρότατα (ελάχιστα ή μέγιστα).

Στο άρθρο [78] προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος ολικής αρμονικής αναζήτησης (novel global harmony search algorithm, NGHS algorithm) για τον καθορισμό της βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης διαφόρων παραλλήλων αντισταθμιστών αέργου ισχύος όπως τα SVCs και τα STATCOMs στο δίκτυο μεταφοράς. Το πρόβλημα διασπάται σε δύο υπό-πρόβλημα. Το πρώτο υπό-πρόβλημα ασχολείται με τη βέλτιστη τοποθέτηση των ΕΣΜ χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ανάλυσης ρυθμών. Το δεύτερο υπό-πρόβλημα είναι η βελτιστοποίηση της ροής φορτίου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της αρμονικής αναζήτησης. Μία αντικειμενική συνάρτηση πολλαπλών στόχων ορίζεται για να ενισχύσει την ευστάθεια της τάσης του συστήματος, την ενίσχυση του προφίλ της τάσης, και την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος καθώς ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος. Συγκρινόμενη αυτή η μέθοδος με την μέθοδο της βελτιωμένης αρμονικής αναζήτησης (improved harmony search, IHS) και των μεθόδων βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων έχει μεγαλύτερη ακρίβεια και υψηλότερη ταχύτητα στην εύρεση καλύτερων λύσεων.

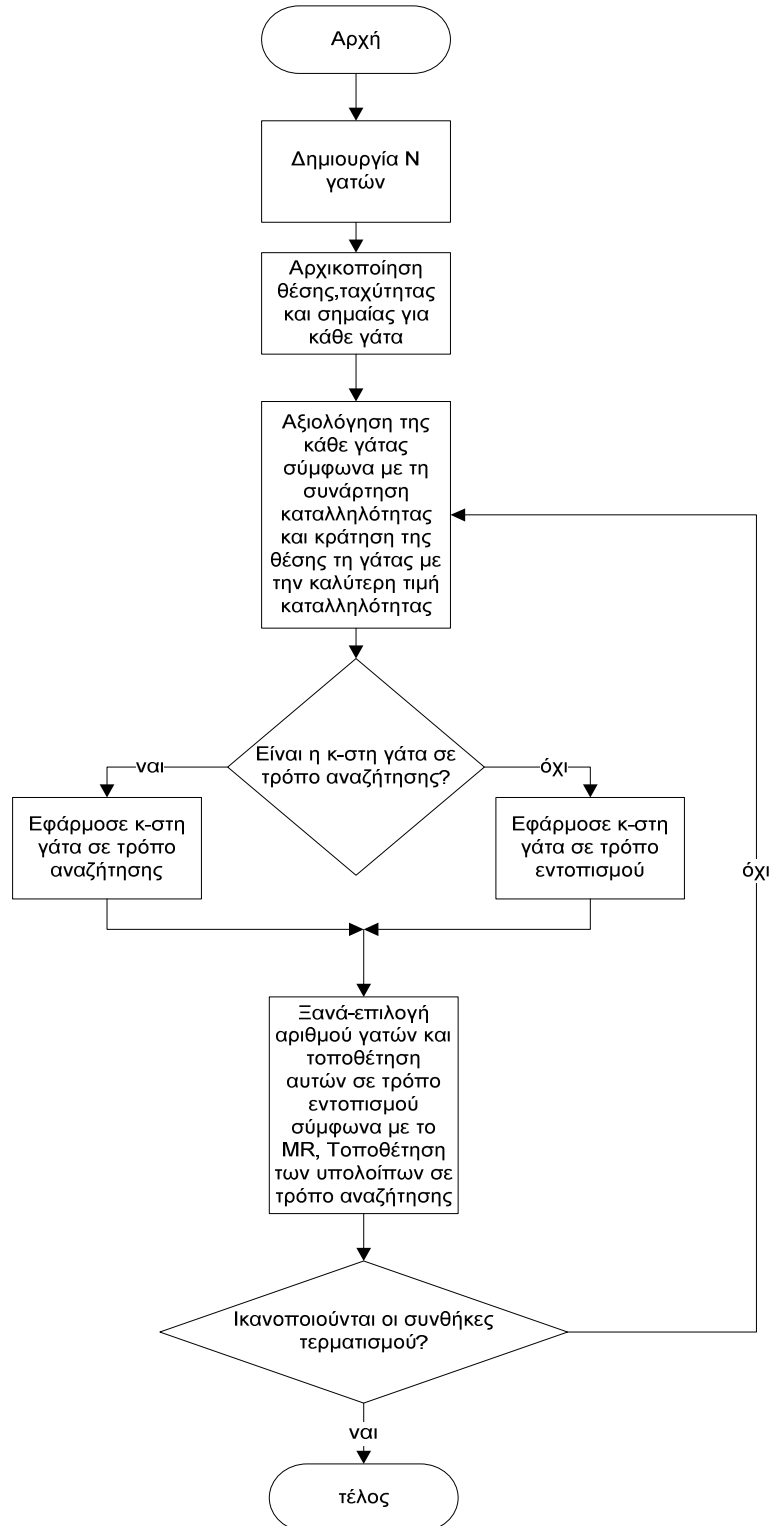
#### 4.4.8 Βελτιστοποίηση Σμήνους Γατών (Cat Swarm Optimization, CSO)

Η μέθοδος βελτιστοποίηση σμήνους γατών παρακινείται από τη PSO και από τη βελτιστοποίηση με αποικίες μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization, ACO). Το σύνολο των λύσεων θα πρέπει να εκπροσωπείται με κάποιο τρόπο, οπότε χρησιμοποιούνται οι γάτες και το μοντέλο συμπεριφοράς των γατών για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στη βελτιστοποίηση σμήνους γατών, αρχικά αποφασίζεται πόσες γάτες είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθούν. Κάθε γάτα έχει τη δικιά της θέση που αποτελείται από  $M$  διαστάσεις, ταχύτητες για κάθε διάσταση και μία σημαία για να διαπιστώνεται αν η γάτα είναι σε κατάσταση αναζήτησης (seeking mode) ή σε κατάσταση εντοπισμού (tracing mode). Η θέση κάποιας γάτας, από αυτές που έχουν χρησιμοποιηθεί, θα είναι η καλύτερη και θα αποτελεί την τελική λύση αφού η CSO κρατά την καλύτερη λύση μέχρι να φτάσει στο τέλος των επαναλήψεων.

Στη μέθοδο βελτιστοποίηση σμήνους γατών μοντελοποιείται η συμπεριφορά των γατών σε δύο υπό-μοντέλα, συγκεκριμένα στην κατάσταση αναζήτησης και στην κατάσταση εντοπισμού. Το υπό-μοντέλο της κατάστασης αναζήτησης χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την κατάσταση της γάτας η οποία είναι ακίνητη, κοιτάει τριγύρω και αναζητά την επόμενη θέση για να μετακινηθεί. Στο υπό-μοντέλο της κατάστασης εντοπισμού μοντελοποιείται η περίπτωση που η γάτα εντοπίζει ορισμένους στόχους. Μόλις η γάτα εισέρχεται σε κατάσταση εντοπισμού, κινείται σύμφωνα με τις δικές της ταχύτητες για κάθε διάσταση. Ορίζεται ο Mixture Ratio (MR) για τον συνδυασμό αυτών των δύο καταστάσεων μέσα στον αλγόριθμο. Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής της μεθόδου βελτιστοποίησης σμήνους γατών.

Στο άρθρο [101] προτείνεται η νέα μέθοδος της CSO για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης των UPFC ελεγκτών σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από κάποιες διαταραχές. Αυτό γίνεται στην προσπάθεια να

βελτιωθεί το προφίλ της τάσης του συστήματος και να μεγιστοποιηθούν οι παράμετροι φόρτισης με τη χρήση των UPFC ελεγκτών. Συμπεραίνεται πως, για μεγαλύτερα συστήματα η CSO έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τη εξαντλητική αναζήτηση και την τεχνική PSO, παρέχοντας καλύτερες λύσεις με μικρότερη υπολογιστική προσπάθεια.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου βελτιστοποίηση σμήνους γατών.



#### 4.4.9 Πρακτικές Ευρετικές Μέθοδοι (Practical Heuristic Methods)

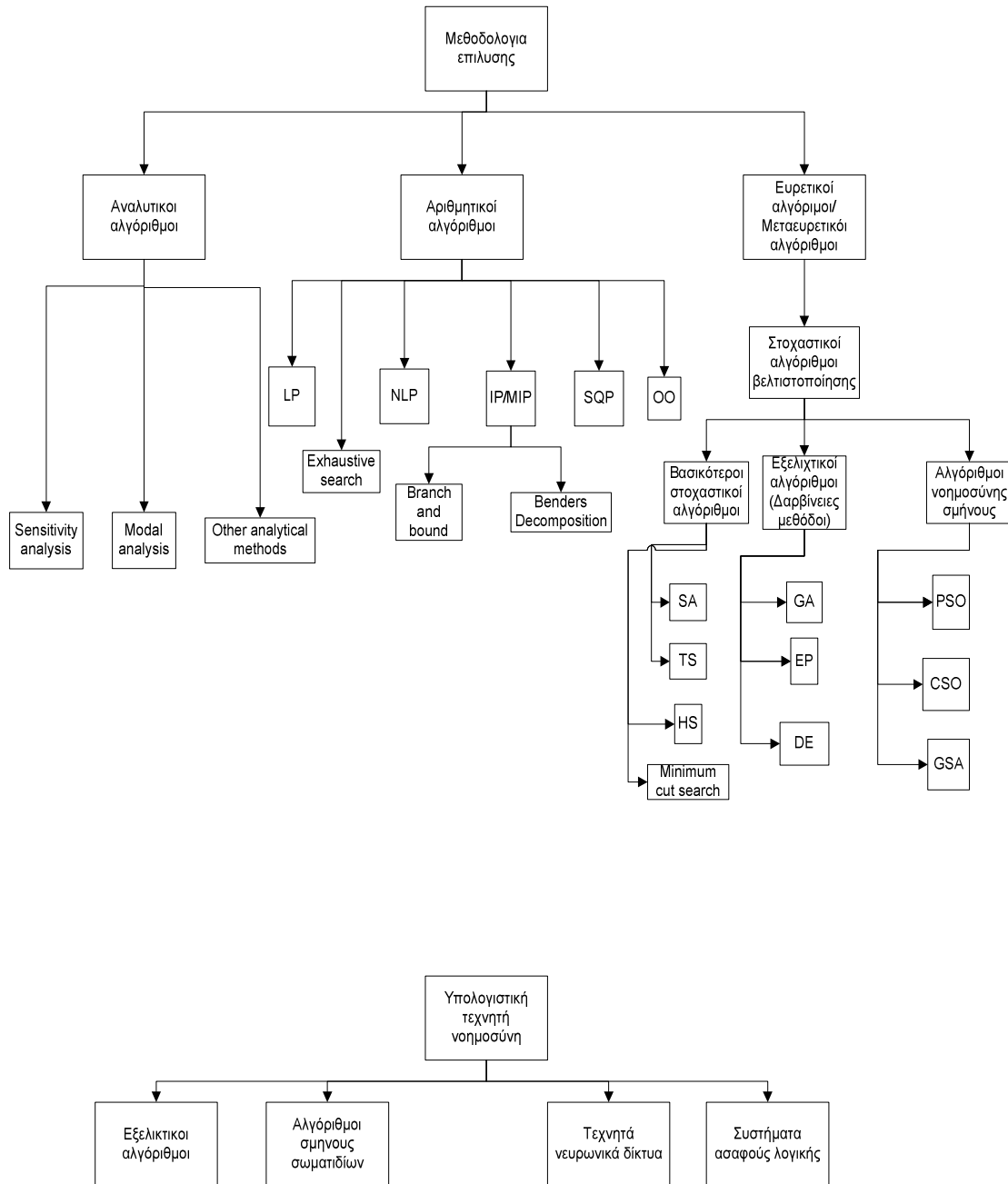
Στα άρθρα [25], [37], [42], [52], [75], [94], [98], [99] χρησιμοποιούνται ορισμένες πρακτικές μη παραδοσιακές ευρετικές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ.

Πιο συγκεκριμένα στα άρθρα [52], [94], [99] χρησιμοποιείται η μέθοδος της προσομοίωσης Μόντε Κάρλο (Monte Carlo simulation method).

Οι μέθοδοι Monte Carlo είναι ένας πολύ γενικός όρος που αναφέρεται σε στοχαστικές τεχνικές, δηλαδή σε αλγορίθμους που βασίζονται σε τυχαίες δειγματοληψίες για να συγκλίνουν σε μία λύση. Έχουν ιδιαίτερα μεγάλο εύρος εφαρμογών και αποτελούν σημαντικό εργαλείο για την Υπολογιστική Φυσική αλλά και για πολλούς άλλους τομείς. Η ιδέα πίσω από αυτές τις τεχνικές γεννήθηκε στο πρώτο μισό του 20ου αιώνα από τους Stanislaw Ulam και Nicolas Metropolis αν και η χρήση αυτών των μεθόδων σε αυτή την περίοδο ήταν πολύ περιορισμένη λόγω της έλλειψης υπολογιστικής ισχύος. Η μέθοδος Monte Carlo αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο στατιστικής δειγματοληψίας, λόγω της αποτελεσματικότητάς της και της γενικής της εφαρμογής. Η μέθοδος Monte Carlo είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην μελέτη συστημάτων με μεγάλο βαθμό ελευθερίας. Η βασική ιδέα πίσω από τις προσομοιώσεις Monte Carlo είναι η προσομοίωση των τυχαίων διακυμάνσεων του συστήματος, από κατάσταση σε κατάσταση κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

Στο άρθρο [52] προτείνεται η προσομοίωση Μόντε Κάρλο ως μία στοχαστική προσέγγιση για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαστασιολόγησης πολλαπλών τύπων ΕΣΜ στο ΣΗΕ για την ενίσχυση του προφίλ της τάσης στην μόνιμη κατάσταση. Στο άρθρο [94] παρουσιάζεται μία μέθοδος βασισμένη στη βέλτιστη ροή ισχύος και στην προσέγγιση cross-entropy (cross-entropy approach, CE approach) για τον προσδιορισμό της θέσης και του μεγέθους των TCPSTs και των SVCs. Η προσέγγιση CE είναι στην πραγματικότητα μία παραλλαγή της μεθόδου Μόντε Κάρλο που χρησιμοποιεί δειγματοληψία σημαντικότητας (importance sampling). Στο άρθρο [99] μελετάται η επιρροή του STATCOM και του SSSC στην προβλεψιμότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η προσομοίωση Μόντε Κάρλο χρησιμοποιείται για την ανάλυση της προβλεψιμότητας του συστήματος.

Στο άρθρο [98] προτείνεται ο αλγόριθμος βαρυτικής αναζήτησης (Gravitational Search Algorithm, GSA), που ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων σμήνους νοημοσύνης, για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης ροής ισχύος με την παρουσία πολλών συσκευών UPFC. Ο GSA βασίζεται στη Νευτώνεια βαρύτητα και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης και του βέλτιστου αριθμού των UPFCs στο δίκτυο, με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής και των απωλειών ισχύος.



Σχήμα 4.11: Γενικό διάγραμμα μεθόδων επίλυσης των προβλημάτων της ΒΤΔΕΣΜ, που παρουσιάζονται στα 101 άρθρα.



## **ΟΦΕΛΗ ΚΑΙ ΑΠΟΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΒΤΔΕΣΜ**

### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στα απελευθερωμένα ΣΗΕ (deregulated power systems), η ραγδαία ανάπτυξη της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος έχει καταστήσει επιτακτική ανάγκη την ανανέωση των υφιστάμενων πόρων και εξοπλισμού των δικτύων μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο στόχος είναι η γρηγορότερη, αποτελεσματικότερη και ομαλότερη λειτουργία των δικτύων, αλλά και η ικανοποίηση των αναγκών των καταναλωτών χωρίς να παραβιάζονται τα όρια ασφαλείας των συστημάτων. Τα ΕΣΜ παρέχουν διάφορα προνόμια στα συστήματα μεταφοράς όπως, ο έλεγχος της ροής ισχύος, η αύξηση της ασφάλειας του συστήματος διαμέσου της διεύρυνσης του περιθωρίου της μεταβατικής ευστάθειας, ο περιορισμός των υπέρ-φορτίσεων των γραμμών μεταφοράς και των ρευμάτων βραχυκύκλωσης, η αύξηση των επιπέδων φόρτισης των γραμμών κοντά στα θερμικά τους όρια, η απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων συστημάτων και μηχανών, η μείωση των αέργων ροών ισχύος και η ανακούφιση των δικτύων από τη συμφόρηση. Τα ΕΣΜ μπορούν να προσφέρουν σπουδαίες υπηρεσίες στα σύγχρονα ΣΗΕ επιτρέποντας την καλύτερη και ασφαλέστερη λειτουργία τους. Κατά τη ΒΤΔΕΣΜ, η εφαρμογή των ΕΣΜ στο δίκτυο γίνεται ακόμη πιο αποδοτική και οι παραπάνω ευεργετικές υπηρεσίες τους πιο εμφανείς. Σε αυτό το κεφάλαιο θα καταγραφτούν τα χαρακτηριστικά του ΣΗΕ, που βελτιώνονται με τη ΒΤΔΕΣΜ, αλλά και τα αριθμητικά αποτελέσματα των μελετών/ερευνών, που διεξήχθησαν στα 101 άρθρα της βιβλιογραφίας αυτής της διπλωματικής και τεκμηριώνουν τα οφέλη της ΒΤΔΕΣΜ.

### **5.2 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΗΕ**

#### **5.2.1 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΗΕ**

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις είναι ταλαντώσεις της γωνίας των δρομέων των σύγχρονων γεννητριών, που βρίσκονται διασυνδεδεμένες σε ένα σύστημα. Το αίτιο αυτών των ταλαντώσεων μπορεί να είναι οποιαδήποτε διαταραχή, που προκαλεί την απόκλιση της ταχύτητας του δρομέα, μίας ή και περισσότερων μηχανών, από τη σύγχρονη ταχύτητα. Στην ευστάθεια μόνιμης κατάστασης, οι

διαταραχές είναι αργές και μικρές. Τέτοιες διαταραχές μπορούν να θεωρηθούν οι φυσιολογικές διακυμάνσεις φορτίου, συμπεριλαμβανομένης της δράσης των ρυθμιστών των στροβίλων και των αυτόματων ρυθμιστών τάσης. Η γωνία φόρτισης μεταβάλλεται συνήθως από  $1^{\circ}$  -  $5^{\circ}$ . Οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις διαχωρίζονται σε διαφορετικές κατηγορίες, κυρίως με κριτήριο τη τοπογραφική θέση στο δίκτυο των γεννητριών, που συμμετέχουν σε αυτές. Η συχνότητα αποτελεί την κυριότερη ένδειξη για την εύρεση του τύπου της ταλάντωσης. Οι κυριότερες από αυτές τις κατηγορίες είναι οι τοπικές ταλαντώσεις (local oscillations), οι ενδοσυστημικές ταλαντώσεις (intra-area oscillations) και οι ταλαντώσεις μεταξύ των περιοχών του ΣΗΕ ή ταλαντώσεις διασύνδεσης (inter-area oscillations). Τοπικές ταλαντώσεις ονομάζονται οι ταλαντώσεις ανάμεσα στους άξονες γεννητριών του ίδιου σταθμού ή γεννητριών κοντινών σταθμών. Το εύρος της συχνότητας των ταλαντώσεων κυμαίνεται συνήθως από τα 1 έως τα 2 Hz. Ταλαντώσεις διασύνδεσης λέγονται οι ταλαντώσεις, που εμφανίζονται ανάμεσα σε μια ομάδα μηχανών ενός συστήματος και σε μηχανές ενός άλλου συστήματος, όταν τα δύο συστήματα συνδέονται με ασθενή διασυνδετική γραμμή (tie-line). Το εύρος της συχνότητας των ταλαντώσεων κυμαίνεται από τα 0.1 έως τα 1 Hz, σε συχνότητες χαμηλότερες από τις συχνότητες των τοπικών ταλαντώσεων. Οι ταλαντώσεις διασύνδεσης, συχνό φαινόμενο στα μεγάλα ΣΗΕ, μπορούν να περιορίσουν κατά πολύ τις λειτουργίες του ΣΗΕ, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, αυτές οι ταλαντώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε διαδοχικές αποκοπές γραμμών μεταφοράς του συστήματος. Έτσι, η απόσβεση αυτών των ταλαντώσεων είναι επιτακτική ανάγκη. Η απόσβεση των ταλαντώσεων διασύνδεσης του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί με τον έλεγχο των γεννητριών με τη βοήθεια σταθεροποιητών ΣΗΕ (PSS) ή με τον έλεγχο της ροής ισχύος του συστήματος. Τα ΕΣΜ μπορούν να μεταβάλλουν τη ροή ισχύος τους συστήματος άμεσα ή έμμεσα μέσα σε ms, δίνοντας τη δυνατότητα να βελτιωθεί η δυναμική και η ευστάθεια του ΣΗΕ και έτσι να γίνει καλύτερη χρήση της εγκατεστημένης ισχύος.

### 5.2.2 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΗΕ

Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, μεταβατική ευστάθεια είναι η ικανότητα του ΣΗΕ να διατηρεί τη σύγχρονη λειτουργία των μηχανών του όταν συμβαίνει σε αυτό μία αργή και απότομη διαταραχή. Τέτοιες διαταραχές είναι τα σφάλματα και οι αποξεύξεις τους, οι απότομες αυξήσεις ισχύος και οι χειρισμοί των διακοπών του συστήματος (switching operations). Η μεταβολή της γωνίας φόρτισης είναι συνήθως μεγαλύτερη των  $5^{\circ}$ . Κατά την εμφάνιση μιας τέτοιας διαταραχής, η απόκριση του συστήματος περιλαμβάνει μεγάλες διακυμάνσεις στη γωνία δρομέα της μηχανής, και όταν οι διορθωτικές κινήσεις αποτύχουν, ο συγχρονισμός χάνεται. Τα ΕΣΜ, όταν τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις, έχουν την ικανότητα γρήγορου ελέγχου της κατάστασης του δικτύου και της ισχύος εξόδου των μηχανών. Αυτό το μοναδικό χαρακτηριστικό των ΕΣΜ μπορεί να αξιοποιηθεί για τη βελτίωση της μεταβατικής ευστάθειας ενός ΣΗΕ ή/και τη βελτίωση του ορίου της ευστάθειας πρώτης ταλάντωσης του ΣΗΕ.

### 5.2.3 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΣΗΕ

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οποιαδήποτε διαταραχή δημιουργεί ανισορροπία μεταξύ της παραγόμενης και της τροφοδοτούμενης πραγματικής ισχύος μπορεί να οδηγήσει στον αποσυγχρονισμό από το δίκτυο μίας ή περισσότερων σύγχρονων γεννητριών. Ομοίως, η αστάθεια τάσης είναι αποτέλεσμα της ανισορροπίας αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου. Το φαινόμενο της αστάθειας τάσης είναι αποτέλεσμα της διαφοροποίησης της φύσης των φορτίων και της έλλειψης αυστηρής πολιτικής για πλήρως ελεγχόμενη τοπική αντιστάθμιση των φορτίων αέργου ισχύος, τόσο από τους καταναλωτές όσο και από τις ηλεκτρικές εταιρείες. Για να αντιμετωπιστεί η αστάθεια τάσης, αφού δεν μπορούν να επηρεαστούν τα χαρακτηριστικά του φορτίου, είναι απαραίτητη η διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών του ΣΗΕ. Αυτό επιτυγχάνεται με ενίσχυση της μεταφορικής ικανότητας του ΣΗΕ σε κρίσιμες θέσεις και εγκατάσταση σύγχρονων συσκευών αντιστάθμισης αέργου ισχύος με στατικούς διακόπτες στερεάς κατάστασης και συνεχή, ηλεκτρονικό και γρήγορο έλεγχο της παραγωγής αέργου ισχύος. Τέτοιες δυνατότητες παρέχουν τα ΕΣΜ, οπότε η χρησιμοποίησή τους στις κατάλληλες θέσεις και με τα κατάλληλα ονομαστικά χαρακτηριστικά μεγέθη βελτιώνουν την συνολική ευστάθεια τάσης του δικτύου.

### 5.3 ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Μεγάλες ικανότητες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να παρέχονται στα δίκτυα για την ικανοποίηση της ζήτησης των αυξημένων συναλλαγών ισχύος, προκειμένου να διευκολυνθεί το εμπόριο και η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα αναδιαρθρωμένο περιβάλλον μίας απελευθερωμένης δομής του ΣΗΕ. Οι περιορισμοί της επέκτασης μεταφοράς στην αναδιαρθρωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας έχει παρακινήσει την ανάπτυξη διαφόρων τεχνολογιών με σκοπό την αύξηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς των υπάρχοντων δικτύων μεταφοράς [55]. Η εισαγωγή των ΕΣΜ στα ΣΗΕ ενισχύει σημαντικά τη διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς τους. Σε μία ανταγωνιστική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, η βέλτιστη εγκατάσταση ΕΣΜ μπορεί να βελτιώσει την ικανότητα μεταφοράς ισχύος και να βοηθήσει τους συμμετέχοντες στην αγορά να υλοποιήσουν το σχεδιασμό τους και ταυτόχρονα να διατηρήσουν την ανταγωνιστική τους συμπεριφορά. Με άλλα λόγια, τα ΕΣΜ παρέχουν τα μέσα στο δίκτυο μεταφοράς, ώστε να είναι ταυτόχρονα ευέλικτο και ανταγωνιστικό [7]. Συμπερασματικά, τα ΕΣΜ ενισχύουν την ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος και την ευστάθεια του δικτύου, αφού έχουν την ικανότητα να ανακατανέμουν τις ροές ισχύος στις γραμμές μεταφοράς και να ρυθμίζουν τις τάσεις των ζυγών του ΣΗΕ.

### 5.4 ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ΣΗΕ

Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, σε ένα ΣΗΕ, συμφόρηση κατά τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, εμφανίζεται όταν, μία γραμμή του δικτύου δεν διαθέτει την ικανότητα μεταφοράς για να ικανοποιεί ταυτόχρονα όλους τους περιορισμούς ασφαλείας, που την διέπουν [12]. Η διαχείριση της συμφόρησης είναι μία από τις τεχνικές προκλήσεις στην προσπάθεια

απελευθέρωσης των ΣΗΕ. Το κόστος συμφόρησης μπορεί να είναι δυσμενέστερο από το κόστος των απωλειών μεταφοράς. Για αυτό το λόγο, η συμφόρηση αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο συνολικό κόστος λειτουργίας ενός ΣΗΕ, και πρέπει να αντιμετωπίζεται. Η αύξηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς μπορεί να βοηθήσει ικανοποιητικά στη διαχείριση της συμφόρησης του δικτύου [80]. Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 5.3, η εγκατάσταση των ΕΣΜ μπορεί να αυξήσει τα όρια μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος με αποτέλεσμα να βελτιώσει τη λειτουργία ενός ΣΗΕ, βοηθώντας μεταξύ άλλων και στην καλύτερη διαχείριση της συμφόρησης. Συγκεκριμένα, τα ΕΣΜ αλλάζουν τις παραμέτρους του ΣΗΕ, όπως οι τάσεις και οι γωνίες των ζυγών, βοηθώντας το έτσι να λειτουργεί εντός των φυσικών του ορίων. Έτσι, μειώνονται οι οικονομικές απώλειες λόγω συμφόρησης μαζί με την αύξηση της αξιοπιστίας και της ευστάθειας του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο, μεταβάλλονται οι ροές ισχύος της γραμμής, ώστε να γίνεται δυνατή η επιλογή της οικονομικά πιο συμφέρουσας διαδρομής, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η χρησιμοποίηση των γραμμών μεταφοράς από τους χρήστες του συστήματος.

## 5.5 ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΗΕ

Η ανεξέλεγκτη αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας έχει κάνει επιτακτική ανάγκη την ενίσχυση της φόρτισης των ήδη υπάρχοντων δικτύων, έτσι ώστε να μπορεί να μεταφερθεί περισσότερη ισχύς με το μικρότερο δυνατό κόστος επέκτασης του δικτύου. Η βελτίωση της φόρτισης του συστήματος είναι πολύπλοκη και πρέπει να αναλύεται σε διάφορα διαδοχικά στάδια [24]. Όρια ευστάθειας, θερμικά όρια και όρια τάσης του δικτύου πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν. Ένα άλλο μειονέκτημα της επέκτασης των δικτύων μεταφοράς είναι οι διάφορες πολιτικές και περιβαλλοντικές θεωρήσεις, που πρέπει να ληφθούν υπόψιν [24]. Έτσι, ενισχύεται η άποψη της βελτίωσης των υπάρχοντων πόρων των δικτύων, με την εγκατάσταση εξοπλισμού ελέγχου ροής ισχύος, για καλύτερο έλεγχο της ροής ισχύος της γραμμής, με σκοπό την αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος από το δίκτυο προς τους καταναλωτές [13]. Η χρησιμοποίηση των ΕΣΜ ως ελεγκτές ροής ισχύος κρίνεται άκρως ικανοποιητική, αφού επιτυγχάνουν υψηλά επίπεδα σειριακής αντιστάθμισης, διάφορους τύπους αντιστάθμισης (ή συνδυασμό αυτών) με μία συσκευή, υψηλή αξιοπιστία, καθώς και ταχύτερο και ομαλότερο έλεγχο.

## 5.6 ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΗΕ

Η ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς ελέγχεται, με σκοπό την ενίσχυση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος και τη δυνατότητα μεταβολής της ροής ισχύος υπό δυναμικές συνθήκες, ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια και η ασφάλεια του δικτύου. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου (OPF) έχει ως σκοπό την ελαχιστοποίηση μίας αντικειμενικής συνάρτησης (συνήθως το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όλων των γεννητριών του δικτύου), μεταβάλλοντας διάφορους ελέγχους

του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται οι περιορισμοί ισοζυγίου ισχύος και όλοι οι υπόλοιποι περιορισμοί λειτουργίας του συστήματος. Με άλλα λόγια, βασικός στόχος της OPF είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους για την ικανοποίηση της ζήτησης σε ένα ΣΗΕ, διατηρώντας ταυτόχρονα την ασφάλεια του συστήματος [69]. Η διατήρηση της ασφάλειας του συστήματος απαιτεί κάθε στοιχείο του συστήματος να λειτουργεί στα επιθυμητά όρια ασφαλείας μόνιμης καταστάσεως. Αυτό περιλαμβάνει το ελάχιστο και μέγιστο όριο εξόδου κάθε γεννήτριας, τη μέγιστη ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς και τους μετασχηματιστές καθώς και τη διατήρηση των τάσεων των ζυγών του συστήματος στα καθορισμένα όρια. Τα ΕΣΜ παρέχουν υψηλό έλεγχο της ροής φορτίου και επιδρούν ευεργετικά σε όλες τις συνιστώσες ασφαλείας του δικτύου, διευρύνοντας τα όρια ασφαλείας του υπάρχοντος εξοπλισμού, κάνοντάς τον πιο λειτουργικό, αποδοτικό, αξιόπιστο και ευέλικτο [14],[49]. Η εγκατάσταση των ΕΣΜ αναγνωρίζεται ως μία από τις πιο οικονομικά αποδοτικές λύσεις [62], παρόλα αυτά, το κόστος εγκατάστασής τους είναι αρκετά υψηλό, όταν αυτά πρέπει να τοποθετούνται βέλτιστα για να ικανοποιούν μία επιθυμητή αντικειμενική συνάρτηση. Με τον όρο κόστος εγκατάστασης ΕΣΜ, εννοείται το συνολικό κόστος της επένδυσης κάθε συσκευής, που περιλαμβάνει το κόστος αγοράς της συσκευής, το κόστος για την τοποθέτηση της συσκευής στον υποσταθμό και το κόστος συντήρησης της συσκευής.

## **5.7 ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΗ, ΜΕΙΩΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΗΕ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΣΗΕ**

Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να είναι διαρθρωμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να αυξάνει τον ανταγωνισμό και να παρακινεί όλους τους συμμετέχοντες να μεγιστοποιούν τα ατομικά τους κέρδη [66]. Ωστόσο, καθώς η απελευθέρωση προχωρά, υπάρχουν προβλήματα και προκλήσεις, καθώς τα ηλεκτρικά φορτία αυξάνονται με ταχείς ρυθμούς, ορισμένες γραμμές μεταφοράς αγγίζουν τα θερμικά τους όρια και δημιουργείται συμφόρηση το δίκτυο. Έτσι δημιουργείται μία αβεβαιότητα για το ποσό και την κατεύθυνση των ροών ισχύος στο δίκτυο. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, ο ανεξάρτητος διαχειριστής του συστήματος επιβάλλεται να μεγιστοποιήσει τη χρησιμότητα του καταναλωτή και να ανακουφίσει το δίκτυο από τη συμφόρηση, ζητήματα σημαντικά για την απελευθέρωση των ΣΗΕ. Αυτό μπορεί να συμβεί με την καλύτερη αξιοποίηση του υπάρχοντος εξοπλισμού στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας τα ΕΣΜ. Όπως έχει γίνει σαφές από τις προηγούμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου, τα ΕΣΜ εφαρμόζουν ένα συνεχή έλεγχο στις ροές ισχύος, παρέχοντας επιδιόρθωση των τάσεων στα επιθυμητά επίπεδα, έλεγχο της ενεργού και αέργου ηλεκτρικής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, αύξηση της ασφαλείας του συστήματος και καλύτερη αξιοποίηση των ΣΗΕ, φτάνοντάς τα σχεδόν στα όρια τους [33]. Άμεση συνέπεια όλων αυτών είναι η βελτίωση της τάσης του δικτύου και η μείωση των απωλειών ισχύος κατά τη μεταφορά, δημιουργώντας ακόμα καλύτερες συνθήκες λειτουργίας για τα ΣΗΕ.



## 5.8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΗΕ ΜΕ ΒΤΔΕΣΜ

### 5.8.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΗΕ ΜΕ ΒΤΔΕΣΜ

Στο άρθρο [1] εξετάζεται η εγκατάσταση ενός SVC σε ένα απλό ΣΗΕ τριών μηχανών. Εξετάζεται η περίπτωση, όπου οι γεννήτριες  $G_1, G_3$  έχουν ίδιες παραμέτρους και σχηματίζουν ένα συμμετρικό σύστημα. Εμφανίζονται δύο ρυθμοί ταλάντωσης στο σύστημα. Αρχικά, εμφανίζεται μία τοπική ταλάντωση και αντιμετωπίζεται με την εγκατάσταση ενός PSS στη μηχανή  $G_2$  και έπειτα, μία χαμηλής συχνότητας διασυνδεδετική ταλάντωση, η οποία αντιμετωπίζεται με την τοποθέτηση ενός σταθεροποιητή, βασισμένου σε SVC. Ο ζυγός 4 και ο ζυγός 5 είναι οι δύο υποψήφιες τοποθεσίες για την εγκατάσταση του SVC. Οι υπολογισμοί των δεικτών (ανάλυση ρυθμών) και τα αποτελέσματα της μη-γραμμικής προσομοίωσης στο πεδίο του χρόνου, ύστερα από 3-φασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη στο ζυγό 2 χρονικής διάρκειας 120 ms, δείχνουν ότι, ο ζυγός 4 δίνει μεγαλύτερες τιμές δεικτών και αποσβένει καλύτερα το ρυθμό ταλάντωσης και έτσι ο ζυγός 4 επιλέγεται για την εγκατάσταση του SVC. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται ύστερα από την ανάλυση των ροών φορτίου, οπότε σημειώνεται πως, με διαφορετικές συνθήκες φορτίου τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να ήταν διαφορετικά.

Στο άρθρο [2] μελετάται, επίσης, η εγκατάσταση ενός SVC στο ΣΗΕ τριών μηχανών, μόνο που αυτή τη φορά οι τρεις μηχανές έχουν διαφορετικές παραμέτρους και δεν σχηματίζουν συμμετρικό σύστημα. Μία τοπική ταλάντωση και μία διασυνδεδετική ταλάντωση χαμηλής συχνότητας των 0.7 Hz παρατηρούνται στο δίκτυο και για την απόσβεση της δεύτερης χρησιμοποιείται ένας σταθεροποιητής βασισμένος σε SVC. Ο ζυγός 4 και ο ζυγός 5 είναι οι δύο υποψήφιες θέσεις για την εγκατάσταση του SVC. Οι ιδιοτιμές των δύο ρυθμών ταλάντωσης είναι  $\lambda_1 = -0.571401 + j4.530837$  και  $\lambda_2 = 0.012280 + j4.469972$ , αντίστοιχα. Όταν το SVC τοποθετείται στον ζυγό 4 ο residue index παίρνει την τιμή  $R = 0.01464$  και η ιδιοτιμή μετακινείται στο αριστερό ημί-επίπεδο  $\lambda_2 = -0.3325 + j4.3759$ , ενώ όταν το SVC τοποθετείται στον ζυγό 5, με το κατάλληλο σήμα ανάδρασης στο σταθεροποιητή, οι τιμές του residue index και της ιδιοτιμής είναι  $R = 0.02928$  και  $\lambda_2 = -0.6527 + j4.41541$ , αντίστοιχα. Οπότε επιλέγεται ο ζυγός 5 για τοποθέτηση του SVC, λόγω μεγαλύτερης τιμής του δείκτη R και επειδή, μετακινεί την ιδιοτιμή πιο αριστερά στο αριστερό ημι-επίπεδο. Τα αποτελέσματα είναι εμφανή και στην μη-γραμμική προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου, όπου παρουσιάζεται μεγαλύτερη απόσβεση του ρυθμού ταλάντωσης όταν το SVC τοποθετείται στον ζυγό 5.

Στα άρθρα [6],[9] (δύο διαφορετικοί τρόποι επίλυσης του ίδιου προβλήματος) εξετάζεται η εισαγωγή ενός TCSC στο ΣΗΕ τριών μηχανών. Όλες οι παράμετροι των μηχανών είναι διαφορετικές και η διασυνδεδετική ταλάντωση που εμφανίζεται είναι συχνότητας 0.65 Hz. Οι γραμμές μεταφοράς που συνδέουν τους ζυγούς 1 και 2, και τους ζυγούς 3 και 2 είναι οι δύο υποψήφιες τοποθεσίες για την εγκατάσταση του σταθεροποιητή, που βασίζεται στο TCSC. Οι δείκτες που προκύπτουν από την ανάλυση ρυθμών είναι μεγαλύτεροι όταν το TCSC

τοποθετείται στη γραμμή μεταφοράς μεταξύ των κόμβων 1 και 2 και έτσι επιλέγεται αυτή η τοποθεσία για την εγκατάσταση του SVC. Με αυτόν τον τρόπο η ιδιοτιμή του ρυθμού ταλάντωσης μετακινείται προς τα αριστερά μεταβάλλοντας την τιμή της από  $\lambda = -0.13 \pm j4.14$  σε  $\lambda = -0.52 \pm j3.88$ , με ταυτόχρονη ενίσχυση της απόσβεσης της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης που δημιουργείται ανάμεσα στις γωνίες των δρομέων των μηχανών του συστήματος.

Στο άρθρο [5] παρουσιάζεται μία έρευνα για την εφαρμογή των SVCs στην απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων μεταξύ των περιοχών του μοντέλου του Μεξικάνικου διασυνδεδεμένου συστήματος (Mexican Interconnected System, MIS), που αποτελείται από 110 γεννήτριες και χωρίζεται σε 5 περιοχές/γεωγραφικά τμήματα. Παρουσιάζονται οι 5 πιο αργές ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις μεταξύ των περιοχών του συστήματος με συχνότητες από 0.409 Hz έως 0.957 Hz. Ο πιο αργός ρυθμός ταλάντωσης (0.409 Hz) και ο τρίτος πιο αργός ρυθμός ταλάντωσης (0.733 Hz), των οποίων οι ιδιοτιμές έχουν τα μεγαλύτερα πραγματικά μέρη,  $\lambda_1 = -0.0860 \pm j2.575$  και  $\lambda_3 = -0.0675 \pm j4.610$ , αντίστοιχα, μεταξύ των πέντε πιο αργών ρυθμών ταλάντωσης, περιγράφονται και αναλύονται μέσω της ανάλυσης ρυθμών. Η ανάλυση ρυθμών προσδιορίζει τις μεγαλύτερες ταλαντώσεις λόγω αυτών των δύο κρίσιμων ρυθμών ταλάντωσης, που γίνονται στην παραγωγή ενέργειας των μηχανών, στη ροή ισχύος των γραμμών μεταφοράς και στην τάση των ζυγών (υποσταθμών του MIS), ανάλογα τη γεωγραφική θέση κάθε μηχανής, κάθε γραμμής μεταφοράς και κάθε ζυγού, αντίστοιχα. Έτσι, τοποθετείται ένα SVC σε κατάλληλη θέση ώστε να επηρεάζει αυτούς τους ρυθμούς ταλάντωσης και να αποσβένει τις ταλαντώσεις. Λόγω του μεγέθους του εξεταζόμενου ΣΗΕ, συμπεραίνεται πως ένα SVC δεν μπορεί να έχει επίδραση σε όλους τους ρυθμούς ταλάντωσης μεταξύ των περιοχών του δικτύου. Έτσι, απαιτείται η περεταίρω ενίσχυση τάσης και τοποθετείται και δεύτερο SVC, σε θέση κοντά στις μηχανές, στις οποίες οφείλεται ο ρυθμός ταλάντωσης που δεν έχει επηρεαστεί από το αρχικό SVC. Τα αποτελέσματα δείξαν ότι τα SVCs μπορούν να συνεισφέρουν δραστικά στην ταυτόχρονη σταθεροποίηση των κρίσιμων ταλαντώσεων του ΣΗΕ, παρέχοντας επαρκή έλεγχο της τάσης και ενίσχυση της μεταβατικής ευστάθειας.

Στο άρθρο [8] εξετάζεται η εισαγωγή TCSC σε ένα σύστημα τριών μηχανών και σε ένα σύστημα δέκα μηχανών. Στο σύστημα των τριών μηχανών παρουσιάζονται δύο ρυθμοί ταλάντωσης με ιδιοτιμές  $\lambda_1 = -0.3629 \pm j13.1099$ ,  $\lambda_2 = -0.0169 \pm j8.5509$ , των οποίων τα πραγματικά μέρη είναι αρκετά κοντά στο μηδέν και σκοπός είναι η αύξηση της απόλυτής τους τιμής, ώστε να ενισχυθεί η απόσβεση των δύο ρυθμών ταλάντωσης. Τα αποτελέσματα από τους δείκτες τοποθεσίας  $F_{k1}^N, F_{k2}^N$ , της προτεινόμενης αναλυτικής μεθόδου, έδειξαν πως η μεγαλύτερη τιμή του δείκτη  $F_{k1}^N$  προσδιορίζει τη γραμμή μεταφοράς, όπου η τοποθέτηση του TCSC θα αποσβέσει μόνο τον πρώτο ρυθμό ταλάντωσης, με αποτέλεσμα τα πραγματικά μέρη της πρώτης ιδιοτιμής να μετακινούνται αριστερότερα όσο αυξάνεται το κέρδος K του αντισταθμιστή, ενώ ο δεύτερος ρυθμός ταλάντωσης θα μείνει ανεπηρέαστος. Αντίστοιχα, η μεγαλύτερη τιμή του δείκτη  $F_{k2}^N$  προσδιορίζει τη γραμμή μεταφοράς, όπου η τοποθέτηση του TCSC θα αποσβέσει μόνο το δεύτερο ρυθμό ταλάντωσης, αφήνοντας τον πρώτο ρυθμό ανέπαφο. Οι δεύτερες μεγαλύτερες τιμές των δεικτών  $F_{k1}^N, F_{k2}^N$  αφορούν τον ίδιο ζυγό, με αποτέλεσμα η τοποθέτηση του TCSC στο ζυγό αυτό να αποσβένει και τους δύο ρυθμούς

ταλάντωσης, με την αντίστοιχη μετακίνηση των πραγματικών μελών των ιδιοτιμών τους αριστερότερα. Στο σύστημα των δέκα μηχανών υπάρχουν 9 ρυθμοί ταλάντωσης, 2 εκ των οποίων, οι κρίσιμοι ρυθμοί ταλάντωσης, έχουν θετικά πραγματικά μέλη  $\lambda_1' = 0.2041 \pm j5.8835$ ,  $\lambda_2' = 0.0619 \pm j3.9157$ , και σκοπός είναι η μετακίνησή τους στο αριστερό ημι-επίπεδο. Τα αποτελέσματα δείξαν ότι η μεγαλύτερη τιμή των δύο δεικτών  $F_{k1}^N, F_{k2}^N$  προσδιορίζουν τις δύο γραμμές μεταφοράς, όπου μόνο ο ένας από τους δύο ρυθμούς ταλάντωσης αποσβένεται με την τοποθέτηση TCSC, ενώ ο άλλος παραμένει αμετάβλητος. Για την ταυτόχρονη απόσβεση των δύο ρυθμών ταλάντωσης πρέπει να τοποθετηθούν 2 TCSC στις καθορισμένες γραμμές μεταφοράς. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνονται και από τη μη-γραμμική προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου για 3φασικό σφάλμα σε ζυγό του δικτύου.

Στο άρθρο [10] εξετάζεται ένα διασυνδεδεμένο σύστημα 7 μηχανών, το οποίο διαχωρίζεται σε δύο περιοχές. Λόγω της ύπαρξης των 7 μηχανών θα υπάρχουν 6 ρυθμοί ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης στο δίκτυο. Υπολογίζονται οι 6 ρυθμοί ταλάντωσης και φαίνεται ότι μόνο ένας από αυτούς είναι ασταθής με ιδιοτιμή  $\lambda = 0.04 \pm j3.42$ , κρίσιμος ρυθμός ταλάντωσης. Έτσι, γίνεται τοποθέτηση ενός SVC με ελεγκτή απόσβεσης για την ενίσχυση της απόσβεσης αυτού του ρυθμού ταλάντωσης με αρχικό στόχο την μετακίνηση του πραγματικού μέρους της ιδιοτιμής στο αριστερό ημι-επίπεδο. Επιλέγεται ο ζυγός στον οποίο μεγιστοποιείται ο δείκτης ελεγχιμότητας αυτής της ιδιοτιμής της ανάλυσης ρυθμών, που αναπτύσσεται στο άρθρο, ως βέλτιστη τοποθεσία του SVC.

Στο άρθρο [38] μελετάται η εισαγωγή τριών ειδών ΕΣΜ, του UPFC, του SVC και του TCSC, σε δύο διαφορετικά δίκτυα, σε ένα σύστημα 10 μηχανών και 39 ζυγών και σε ένα σύστημα 16 μηχανών και 68 ζυγών, αντίστοιχα. Στο σύστημα των 10 μηχανών, η ανάλυση ρυθμών δείχνει, στη βασική περίπτωση χωρίς διαταραχές, ότι υπάρχει ένας κρίσιμος ρυθμός ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης μεταξύ των περιοχών του ΣΗΕ με ιδιοτιμή  $\lambda_{10\_machine} = -0.0723 \pm j2.4491$  και με συντελεστή απόσβεσης (damping ratio) 0.0299, σχετικά χαμηλό. Οι δείκτες ελεγχιμότητας, για αυτόν το ρυθμό ταλάντωσης, υπολογίζονται για την βασική περίπτωση χωρίς διαταραχές και για ορισμένες περιπτώσεις διαταραχών (αποκοπή κάποιας γραμμής μεταφοράς), οι οποίες διαταραχές προσδιορίζονται ως οι περιπτώσεις με τους υψηλότερους δείκτες απόδοσης. Ο μέσος όρος των δεικτών ελεγχιμότητας, όλων των εξεταζόμενων περιπτώσεων, κάθε υποψήφιας τοποθεσίας υπολογίζεται, και ο υψηλότερος μέσος όρος των υποψήφιας τοποθεσιών, για κάθε ΕΣΜ, προσδιορίζει την βέλτιστη θέση του εκάστοτε ΕΣΜ. Έτσι, επιλέγεται ο ζυγός 27 του συστήματος για εγκατάσταση SVC, η γραμμή μεταφοράς 21-22 για εγκατάσταση TCSC, η γραμμή μεταφοράς 36-37 για εγκατάσταση του σειριακού μετατροπέα του UPFC και ο ζυγός 36 για εγκατάσταση του εγκάρσιου μετατροπέα του UPFC. Με την ίδια ανάλυση στο σύστημα των 16 μηχανών βρίσκεται ότι, επίσης, υπάρχει ένας κρίσιμος ρυθμός ηλεκτρομηχανικής

**Πίνακας 5.1:** Μεταβολή ιδιοτιμών με την προσθήκη τριών διαφορετικών ΕΣΜ στη βέλτιστη τοποθεσία τους, άρθρο [38].

Περίπτωση	Ιδιοτιμή	Damping ratio	Απόσβεση Ταλαντώσεων
<b>Σύστημα 10 μηχανών</b>			
Χωρίς ΕΣΜ	-0.0723+j2.4491	0.0299	>20 sec
Με SVC στο ζυγό 24	-0.153+j2.011	0.0759	16 sec
Με TCSC στη γ.μ. 21-22	-0.200+j1.89	0.105	12 sec
Με UPFC στη γ.μ. 36-37	-0.389+j2.10	0.182	6 sec
<b>Σύστημα 16 μηχανών</b>			
Χωρίς ΕΣΜ	-0.0944+j2.63	0.0378	>20 sec
Με SVC στο ζυγό 24	-0.373+j2.631	0.154	13 sec
Με TCSC στη γ.μ. 50-52	-0.349+j1.98	0.173	13 sec
Με UPFC στη γ.μ. 21-22	-0.5211+j2.77	0.185	9 sec

ταλάντωσης μεταξύ των περιοχών του ΣΗΕ με ιδιοτιμή  $\lambda_{16\_machine} = -0.0944 \pm j2.63$  και με συντελεστή απόσβεσης 0.0378. Σε αυτήν την περίπτωση επιλέγεται ο ζυγός 24 του συστήματος για εγκατάσταση SVC, η γραμμή μεταφοράς 50-52 για εγκατάσταση TCSC, η γραμμή μεταφοράς 21-22 για εγκατάσταση του σειριακού μετατροπέα του UPFC και ο ζυγός 21 για εγκατάσταση του εγκάρσιου μετατροπέα του UPFC. Ο Πίνακας 5.1 υποδεικνύει την επιρροή κάθε διαφορετικού τύπου ΕΣΜ στην ιδιοτιμή του κρίσιμου ρυθμού ταλάντωσης, όταν αυτά τοποθετούνται βέλτιστα στο σύστημα. Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 γίνεται φανερό ότι σε κάθε περίπτωση, το UPFC έχει μεγαλύτερη επιρροή στον κρίσιμο ρυθμό ταλάντωσης, αφού δίνει τα πιο αρνητικά πραγματικά μέρη κάθε ιδιοτιμής και το μεγαλύτερο συντελεστή απόσβεσης κάθε φορά. Άρα, γίνεται αντιληπτό ότι το UPFC είναι πιο δραστικό στην απόσβεση των ταλαντώσεων του συστήματος από ότι το SVC και το TCSC. Αυτό φαίνεται και από την τελευταία στήλη του Πίνακα 5.1, όπου μία βηματική είσοδος 1.0 α.μ επιβάλλεται στη γεννήτρια που δημιουργεί τον κρίσιμο ρυθμό ταλάντωσης στα δύο συστήματα, γεννήτρια 2 και γεννήτρια 15 για το σύστημα 10 μηχανών και για το σύστημα 16 μηχανών, αντίστοιχα. Στην περίπτωση του συστήματος των 10 μηχανών, οι ταλαντώσεις συνεχίζουν να υφίστανται και μέχρι μετά από τα 20 sec στη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας 2, όταν δεν τοποθετείται κάποιο ΕΣΜ. Αντίθετα, με την τοποθέτηση του SVC και του TCSC οι ταλαντώσεις αποσβένονται μέσα σε 16 και 12 sec, αντίστοιχα. Όταν τοποθετείται το UPFC, οι ταλαντώσεις αποσβένονται μόνο μέσα σε 6 sec, αλλά υπάρχει μεγαλύτερο μέγιστο (peak) των ταλαντώσεων σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Επίσης, το σύστημα υποβάλλεται σε 3-φασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό 17 για 50 ms για να προσδιοριστεί η επιρροή των ΕΣΜ στη μεταβατική ευστάθεια του συστήματος. Τα αποτελέσματα στη διαφορά της γωνίας δρομέα μεταξύ των γεννητριών 2 και 4 δείχνουν ότι το TCSC υπερέχει του SVC στη βελτίωση της

μεταβατικής απόδοσης του συστήματος. Αντίστοιχα συμπεράσματα βγαίνουν και για το σύστημα των 16 μηχανών.

Στο άρθρο [65] εξετάζεται η εισαγωγή του UPFC στο δίκτυο της νότιας Μαλαισίας, το οποίο αποτελείται από 12 γεννήτριες, 25 ζυγούς και 37 κλάδους και στο δίκτυο της νέας Αγγλίας, το οποίο αποτελείται από 10 μηχανές και 39 ζυγούς. Γίνεται η ίδια ανάλυση με το άρθρο [38] για την εύρεση της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης του UPFC στα δύο δίκτυα, υπολογίζοντας το μέσο όρο των δεικτών κάθε περίπτωσης (βασική περίπτωση και επιλεγμένων περιπτώσεων διαταραχών αποκοπής γραμμής), κάθε υποψήφιας θέσης εγκατάστασης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ρυθμών έδειξαν ότι για το σύστημα της Μαλαισίας ο κρίσιμος ρυθμός ταλάντωσης του συστήματος, με την εισαγωγή του UPFC στη γραμμή μεταφοράς 9-10 (στο ζυγό 9 ο εγκάρσιος μετατροπέας του UPFC), μεταβάλλεται από  $\lambda_1 = -0.34325 \pm j5.5454$  σε  $\lambda_1' = -0.35751 \pm j5.5608$  και ο συντελεστής απόσβεσης από  $d_1 = 0.06178$  σε  $d_1' = 0.0642$ . Αντίστοιχα, για το σύστημα της νέας Αγγλίας, με την εισαγωγή του UPFC στη βέλτιστη τοποθεσία μετακινείται η ιδιοτιμή του κρίσιμου ρυθμού ταλάντωσης πιο αριστερά και μεγαλώνει ο συντελεστής απόσβεσης. Στο σύστημα της νότιας Μαλαισίας, ένα 3-φασικό σφάλμα στο ζυγό 8 του δικτύου, που διαρκεί 80 ms, δείχνει την επιρροή του UPFC στην απόσβεση του κρίσιμου ρυθμού ταλάντωσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μεταβολές της ταχύτητας της γεννήτριας 21 του δικτύου ταλαντώνονται ασταμάτητα χωρίς την τοποθέτηση του UPFC, ενώ όταν αυτό τοποθετείται βέλτιστα στο δίκτυο οι ταλαντώσεις σταθεροποιούνται μετά από 15 sec. Επίσης, σημαντική απόσβεση παρατηρείται και στις ταλαντώσεις των αποκρίσεων της ενεργού και αέργου ισχύος της ελεγχόμενης γραμμής μεταφοράς 8-13 του συστήματος. Παρόμοιες δοκιμές διεξάγονται και για το σύστημα της νέας Αγγλίας. Οι μεταβολές στην ταχύτητα της γεννήτριας 31 του δικτύου μειώνονται με την βέλτιστη τοποθέτηση του UPFC στο σύστημα, όπως επίσης και οι υψηλές διακυμάνσεις (high overshoot) που παρατηρούνται όταν δεν τοποθετείται το UPFC στο σύστημα. Τέλος, βελτίωση υπάρχει και στην απόσβεση των ταλαντώσεων στην απόκριση τάσης του ζυγού 4 και στην απόκριση αέργου ισχύος στην ελεγχόμενη γραμμή μεταφοράς 3-4. Να σημειωθεί ότι η γεννήτρια 21 και η γεννήτρια 31 δημιουργούν τις ταλαντώσεις άλλων μηχανών, για τον κρίσιμο ρυθμό ταλάντωσης, στα ΣΗΕ της Μαλαισίας και της νέας Αγγλίας, αντίστοιχα, όπως αυτό προκύπτει από την ανάλυση της φασικής γωνίας των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων κάθε συστήματος.

Στο άρθρο [77] εξετάζεται η βέλτιστη τοποθεσία του SVC και του TCSC χρησιμοποιώντας τη μέθοδο PSO στο ΣΗΕ IEEE 14 ζυγών. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις μικρών διαταραχών, η πρώτη περίπτωση είναι η αύξηση κατά 15% της ενεργού και αέργου ισχύος του φορτίου στο ζυγό 9 του δικτύου και η δεύτερη περίπτωση είναι η αποκοπή της γραμμής μεταφοράς 4-13 του δικτύου. Ο κρίσιμος ρυθμός ταλάντωσης επιλέγεται ως ο ρυθμός ταλάντωσης με το μεγαλύτερο πραγματικό μέρος από τους 4 ρυθμούς ταλάντωσης που έχει το σύστημα: στην περίπτωση αύξησης του φορτίου είναι  $\lambda_1 = -0.8831 \pm j5.8324$  με συντελεστή απόσβεσης 0.14972 και στην περίπτωση αποκοπής της γραμμής μεταφοράς είναι  $\lambda_2 = -0.8845 \pm j5.8336$  με συντελεστή απόσβεσης 0.14992. Σκοπός είναι να αποσβεστούν αυτοί οι ρυθμοί ταλάντωσης ώστε να ενισχυθεί η απόσβεση του συστήματος. Η μέθοδος PSO δίνει τη βέλτιστη τοποθεσία του SVC και του TCSC στο δίκτυο καθώς και τις βέλτιστες παραμέτρους τους. Τα αποτελέσματα είναι πως η βέλτιστη τοποθέτηση του SVC είναι στο ζυγό

10 του συστήματος και του TCSC στη γραμμή μεταφοράς 16. Οι βέλτιστοι παράμετροι είναι  $K_{SVC} = 20.0, T_1 = 1.0, T_2 = 0.15$  και  $K_{TCSC} = 16.809, T_1 = 1.0, T_2 = 0.2264$  για το SVC και το TCSC, αντίστοιχα. Στην περίπτωση της αύξησης του φορτίου, η ιδιοτιμή του κρίσιμου ρυθμού ταλάντωσης παίρνει την τιμή  $\lambda_1' = -0.98121 \pm j6.0070$  με αντίστοιχο συντελεστή απόσβεσης 0.16121 και  $\lambda_1'' = -1.0611 \pm j5.7341$  με αντίστοιχο συντελεστή απόσβεσης 0.18196 όταν στο σύστημα τοποθετείται το SVC και όταν στο σύστημα τοποθετείται το TCSC, αντίστοιχα. Στην περίπτωση της αποκοπής της γραμμής μεταφοράς, η ιδιοτιμή του κρίσιμου ρυθμού ταλάντωσης παίρνει την τιμή  $\lambda_2' = -0.98224 \pm j6.0568$  με αντίστοιχο συντελεστή απόσβεσης 0.16008 και  $\lambda_2'' = -1.0602 \pm j5.7519$  με αντίστοιχο συντελεστή απόσβεσης 0.18127 όταν στο σύστημα τοποθετείται το SVC και όταν στο σύστημα τοποθετείται το TCSC, αντίστοιχα. Έτσι, διαπιστώνεται πως το TCSC προσδίδει περισσότερη ενίσχυση στην απόσβεση του κρίσιμου ρυθμού ταλάντωσης και κατά συνέπεια στις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις μεταξύ των ταχυτήτων των δρομέων των γεννητριών του ΣΗΕ, σε σχέση με το SVC.

Στο άρθρο [83] εξετάζεται η εισαγωγή του UPFC σε δύο δίκτυα, στο διασυνδεδεμένο σύστημα Νέας Αγγλίας-Νέας Υόρκης με τις 16 μηχανές και τους 68 ζυγούς και στο εθνικό ιρακινό δίκτυο, το οποίο αποτελείται από 22 ζυγούς, 35 γραμμές μεταφοράς των 400 kV και δέκα σταθμούς παραγωγής ενέργειας διαφορετικών ειδών. Εξετάζονται 5 λειτουργικές συνθήκες σε κάθε σύστημα, η βασική περίπτωση χωρίς διαταραχές και άλλες 4 περιπτώσεις που οι διαταραχές αφορούν την αποκοπή κάποιας γραμμής μεταφοράς στο εκάστοτε δίκτυο. Στο σύστημα με τις 16 μηχανές, υπολογίζονται όλοι οι ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί ταλάντωσης όλων των εξεταζόμενων περιπτώσεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχουν αρκετοί κρίσιμοι ρυθμοί ταλάντωσης, σε κάθε περίπτωση, οι οποίοι δεν αποσβένονται χωρίς την τοποθέτηση του UPFC στο ΣΗΕ, με αποτέλεσμα το σύστημα να καθίσταται ασταθές. Η μέθοδος βελτιστοποίησης που βασίζεται στον GA προσδιορίζει τη βέλτιστη τοποθεσία του UPFC στη γραμμή μεταφοράς 46-49 του δικτύου, στην οποία λαμβάνεται ο μεγαλύτερος συντελεστής απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων 0.0392, και οι βέλτιστες παράμετροι του UPFC σε αυτήν την περίπτωση, για τη βασική περίπτωση λειτουργίας του δικτύου, χωρίς διαταραχές. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως με την τοποθέτηση του UPFC στη γραμμή μεταφοράς 46-49 του δικτύου μετακινούνται όλες οι ιδιοτιμές των ηλεκτρομηχανικών ρυθμών ταλάντωσης προς τα αριστερά με αποτέλεσμα το σύστημα να γίνεται ευσταθές. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις εξεταζόμενες διαταραχές. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η τοποθέτηση ενός UPFC είναι ανεπαρκής ώστε να κάνει το σύστημα ευσταθές. Στο ίδιο μήκος κύματος κινούνται και τα αποτελέσματα στο ιρακινό δίκτυο, όπου οι ιδιοτιμές των ηλεκτρομηχανικών ρυθμών ταλάντωσης μετακινούνται αριστερά με την εισαγωγή ενός UPFC στο δίκτυο, του οποίου η βέλτιστη θέση και οι βέλτιστες παράμετροι προσδιορίζονται από την βελτιστοποίηση που βασίζεται στον GA, βελτιώνοντας κατά πολύ την απόσβεση των κρίσιμων ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων του συστήματος. Σε αυτό το σύστημα, με το εγκατεστημένο UPFC στη βέλτιστη θέση και με τις βέλτιστες παραμέτρους, εφαρμόζεται 3-φασικό σφάλμα διάρκειας 100 ms σε 4 διαφορετικούς ζυγούς. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως υπάρχει καλή απόσβεση στο σύστημα και στις τέσσερις περιπτώσεις σφαλμάτων, οπότε η τοποθέτηση του UPFC ενισχύει και τη μεταβατική απόκριση του συστήματος.

Στο άρθρο [91] εξετάζεται η εισαγωγή δύο PWMSCs με ίδιες παραμέτρους στο διασυνδεδεμένο σύστημα Νέας Αγγλίας-Νέας Υόρκης, που αποτελείται από 16 μηχανές και 68 ζυγούς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχουν 15 κρίσιμοι ρυθμοί ταλάντωσης στο δίκτυο, και η επιλεγμένη τεχνική προσδιορίζει τις βέλτιστες θέσεις και τις βέλτιστες παραμέτρους των δύο PWMSCs. Εκτελείται ένα 3-φασικό σφάλμα στη γραμμή μεταφοράς 9-30 στο ζυγό 9 διάρκειας 50 ms και εξετάζονται τρεις περιπτώσεις, η βασική περίπτωση χωρίς καμία γραμμή μεταφοράς να μένει εκτός λειτουργίας και δύο άλλες περιπτώσεις που κάποια ή κάποιες γραμμές μεταφοράς μένουν εκτός λειτουργίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με τους προτεινόμενους ελεγκτές, η ευστάθεια του δικτύου διατηρείται με τον ελάχιστο έλεγχο, που απαιτείται, και οι ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας αποσβένονται γρήγορα.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα των άρθρων, που μελετήθηκαν προκύπτουν τα ακόλουθα περιληπτικά συμπεράσματα. Τα ΣΗΕ χαρακτηρίζονται από κάποιες ιδιοτιμές, κάποιους ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς ταλάντωσης, οι οποίοι δημιουργούνται από τις εκάστοτε μηχανές του συστήματος, οι οποίες ταλαντώνονται σε σχέση με τις άλλες μηχανές του ΣΗΕ, όταν υπόκεινται σε μικρές διαταραχές. Ορισμένες από τις ιδιοτιμές έχουν τα πραγματικά τους μέρη πολύ κοντά στο μηδέν ή ακόμα και στον άξονα των θετικών αριθμών, πράγμα που σημαίνει ότι θα υπάρχει ελάχιστη ή ακόμη και αρνητική απόσβεση των ταλαντώσεων που τις αφορούν, με αποτέλεσμα να οδηγούν το σύστημα σε αστάθεια. Τα ΕΣΜ με την τοποθέτησή τους στο δίκτυο μετακινούν τις ιδιοτιμές όσο πιο αριστερά γίνεται στον άξονα των αρνητικών αριθμών, με την ταυτόχρονη αύξηση του συντελεστή απόσβεσης. Τα μεγαλύτερα ΣΗΕ, ωστόσο, θα χρειαστούν τον συντονισμό περισσότερων από ένα ΕΣΜ, επειδή λόγω του μεγέθους τους, ένα ΕΣΜ δεν θα μπορέσει να έχει επίδραση σε όλους τους κρίσιμους ρυθμούς ταλάντωσης. Επίσης, εξετάζεται η επίδραση διαφόρων τύπων ΕΣΜ στους ηλεκτρομηχανικούς ρυθμούς ταλάντωσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το UPFC είναι το πιο αποτελεσματικό ΕΣΜ στην ενίσχυση της απόσβεσης του συστήματος σε σχέση με το TCSC και το SVC. Τέλος, προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου δείχνουν ότι εκτός από την ενίσχυση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων του συστήματος βελτιώνεται και η μεταβατική ευστάθειά του.

### **5.8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΗΕ ΜΕ ΒΤΔΕΣΜ**

Στο άρθρο [16] εξετάζεται η εισαγωγή του UPFC σε ένα σύστημα τριών μηχανών, με σκοπό την απόσβεση των κρίσιμων ηλεκτρομηχανικών ρυθμών ταλάντωσης και τη βελτίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς του ΣΗΕ. Η ανάλυση ρυθμών δείχνει ότι υπάρχουν δύο κρίσιμοι ρυθμοί ταλάντωσης στο σύστημα, οι οποίοι επηρεάζονται από την τοποθέτηση του UPFC στο δίκτυο. Αναλύονται δύο λειτουργικές συνθήκες δικτύου, η βασική περίπτωση και η περίπτωση όπου υπάρχει αύξηση 35% στη ζήτηση ισχύος, αύξηση 25% της σειριακής αντίστασης των γραμμών μεταφοράς 4-5 και 8-9 του ΣΗΕ και εισαγωγή νέου φορτίου στο ζυγό 8 του δικτύου. Κατόπιν αυτής της ανάλυσης, ορίζονται οι βέλτιστες θέσεις για την απόσβεση αυτών των κρίσιμων ηλεκτρομηχανικών ρυθμών ταλάντωσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με την κατάλληλη τοποθέτηση των UPFC, αλλά και τη συντονισμένη συνεργασία τους με τα PSSs στο δίκτυο, επιτυγχάνεται απόσβεση των κρίσιμων ηλεκτρομηχανικών ρυθμών ταλάντωσης και βελτίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς του ΣΗΕ.

Στο άρθρο [35] εξετάζεται η βέλτιστη τοποθέτηση του SVC και του STATCOM για τη βελτίωση της μεταβατικής ευστάθειας ενός ΣΗΕ. Το εξεταζόμενο ΣΗΕ είναι ένα σύστημα 2 περιοχών, που αποτελείται από δύο υδρογεννήτριες των 1400 MVA και των 700 MVA, αντίστοιχα σε κάθε περιοχή. Στη θεωρία της μεταβατικής ευστάθειας δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον οι γρήγοροι ρυθμοί ταλάντωσης από την αλληλεπίδραση των γραμμικών R, L, C στοιχείων και των διανεμημένων παραμέτρων των γραμμών μεταφοράς. Αυτοί οι ρυθμοί ταλάντωσης, που συνήθως έχουν τη θεμελιώδη συχνότητα των 50 ή 60 Hz, δεν έρχονται σε αντίθεση με τους αργούς ρυθμούς ταλάντωσης των μηχανών. Για την εξέταση της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος ένα 3-φασικό σφάλμα εφαρμόζεται στο ζυγό αναχώρησης του συστήματος  $B_1$  τη στιγμή  $t = 0.1 \text{ sec}$ . Η τάση αναφοράς προ-σφάλματος είναι 1 α.μ. και για το SVC και για το STATCOM. Για να βελτιωθεί η μεταβατική ευστάθεια, η τάση αναφοράς των ΕΣΜ αυξάνεται σε 1.2 α.μ., αμέσως μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Με την αύξηση της τάσης αναφοράς, η ικανότητα μεταφοράς ισχύος της γραμμής μεταφοράς αυξάνεται με σκοπό την ελαχιστοποίηση της ανισορροπίας μεταξύ της ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος, έτσι ώστε η ταλάντωση της γωνίας του δρομέα να επιβραδύνεται. Τα ΕΣΜ τοποθετούνται αρχικά στο μέσον της γραμμής μεταφοράς. Τα αποτελέσματα των μεταβολών της διαφοράς της γωνίας και της ταχύτητας του δρομέα των δύο μηχανών του δικτύου συναρτήσει του χρόνου, για χρόνο εκκαθάρισεως του σφάλματος 0.215 sec, δείχνουν ότι τα ΕΣΜ βελτιώνουν την ευστάθεια του συστήματος. Χωρίς αυτά το σύστημα είναι ασταθές. Επίσης, είναι φανερό από τα αποτελέσματα ότι όταν αυξάνεται η τάση αναφοράς των ΕΣΜ, αμέσως μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, αυξάνεται και η ισχύς στους ζυγούς αναχώρησης και άφιξης, το οποίο βοηθάει στη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος. Αν αυξηθεί ο χρόνος εκκαθάρισεως του σφάλματος σε 0.22 sec τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σύστημα είναι ασταθές με το SVC και ευσταθές με το STATCOM. Αυτό επιβεβαιώνει ότι το STATCOM είναι πιο αποτελεσματικό στη διατήρηση της ευστάθειας του δικτύου σε σχέση με το SVC για τον ίδιο χρόνο εκκαθάρισεως του σφάλματος. Αν αυξηθεί και άλλο ο χρόνος εκκαθάρισεως του σφάλματος και πάρει την τιμή 0.2239 sec το σύστημα θα είναι ασταθές και με το STATCOM. Για αυτό το λόγο μετακινούνται τα ΕΣΜ από το κέντρο της γραμμής μεταφοράς, που ενώνει τις δύο μηχανές, σε άλλο σημείο κατά μήκος της. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βέλτιστη τοποθεσία των ΕΣΜ από άποψη ενίσχυσης ευστάθειας είναι το σημείο όπου αντλείται η μέγιστη αρχική ισχύς από την κρίσιμη μηχανή κατά τη διάρκεια της πρώτης περιόδου ταλάντωσης. Έτσι, ακόμα και όταν ο χρόνος εκκαθάρισεως του σφάλματος αυξάνεται, η ευστάθεια του συστήματος διατηρείται. Μέγιστη αρχική ισχύς αντλούν τα σημεία εκτός του κέντρου της γραμμής μεταφοράς, τα οποία προσδιορίζονται για το STATCOM με την εφαρμογή του GA.

Στο άρθρο [39] εξετάζεται η επίδραση του TCSC στη μεταβατική ευστάθεια ενός ΣΗΕ. Το TCSC εκτός από την βοήθεια στον έλεγχο και στην αύξηση της ροής ισχύος μίας γραμμής μεταφοράς, έχει την ικανότητα να ενισχύει το περιθώριο μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος. Το εξεταζόμενο σύστημα, είναι ένα ΣΗΕ τριών μηχανών και εννέα ζυγών. Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, η τιμή του  $n$ , όπως αυτό ορίζεται στο άρθρο [39], δίνει μία ένδειξη της απόστασης του συστήματος από την αστάθεια. Γίνεται προσομοίωση ενός 3-φασικού σφάλματος διάρκειας 0.15 sec στη γραμμή μεταφοράς 6-9 και λαμβάνονται τα αποτελέσματα της απόκρισης των σχετικών γωνιών των μηχανών 1 και 3,  $(\delta_3 - \delta_1)$ . Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η τοποθέτηση του TCSC στη γραμμή μεταφοράς με την



υψηλότερη τιμή του κανονικοποιημένου  $n$  αποφέρει χαμηλότερη μέγιστη τιμή στην ταλάντωση της απόκρισης του συστήματος, κάτι το οποίο υποδεικνύει μεγαλύτερο όριο μεταβατικής ευστάθειας. Σε αυτή την περίπτωση το TCSC εισάγεται στο δίκτυο μόνο του. Εξετάζεται στη συνέχεια η εισαγωγή του TCSC στο δίκτυο μαζί με έναν ελεγκτή PI. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως το TCSC μαζί με τον ελεγκτή αποφέρουν μεγαλύτερη ενίσχυση στο περιθώριο μεταβατικής ευστάθειας από ότι το TCSC μόνο του. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων  $K_p, K_I$  του ελεγκτή θα δώσουν ακόμη μεγαλύτερη ενίσχυση στην μεταβατική ευστάθεια του συστήματος.

Στο άρθρο [42] μελετάται η εισαγωγή του SVC σε ΣΗΕ πολλών μηχανών με στόχο τη βελτίωση του ορίου της ευστάθειας πρώτης ταλάντωσης του συστήματος. Αρχικά, εξετάζεται η εισαγωγή ενός SVC με  $B_{SVC}^{max} = 2.0$  p.u. στο σύστημα της Νέας Αγγλίας, το οποίο αποτελείται από 10 μηχανές και 39 ζυγούς. Ένα 3-φασικό σφάλμα εφαρμόζεται κοντά στο ζυγό 26, το οποίο εκκαθαρίζεται με την αποκοπή της γραμμής μεταξύ των ζυγών 26 και 27. Υπολογίζονται όλοι οι δείκτες τοποθεσίας, με την προτεινόμενη μέθοδο του άρθρου, και εκτιμάται ότι ο ζυγός 29 λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του δείκτη τοποθεσίας, με αποτέλεσμα να αποτελεί τη βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης του SVC. Όταν τοποθετείται σε αυτόν το ζυγό το SVC, τότε παρατηρείται και ο μεγαλύτερος κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος  $t_{cl} = 169$  ms, οπότε βελτιώνεται το όριο της ευστάθειας πρώτης ταλάντωσης του συστήματος. Στη συνέχεια, εξετάζονται διάφορες περιπτώσεις  $B_{SVC}^{max}$  του SVC. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όσο αυξάνεται το  $B_{SVC}^{max}$  ενός SVC τόσο αυξάνεται και ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος, οπότε και το όριο της ευστάθειας πρώτης ταλάντωσης του συστήματος. Για παράδειγμα για εισαγωγή SVC με  $B_{SVC}^{max} = 3.0$  p.u. είναι  $t_{cl} = 181-182$  ms. Έπειτα εξετάζεται ένα δεύτερο σφάλμα κοντά στο ζυγό 16 του συστήματος της Νέας Αγγλίας, το οποίο εκκαθαρίζεται με αποκοπή της γραμμής μεταξύ των ζυγών 16 και 17. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τη μεγαλύτερη τιμή του δείκτη τοποθεσίας την έχει ο ζυγός 20. Όμως, και ορισμένοι άλλοι ζυγοί έχουν την τιμή τους κοντά σε αυτή τη μέγιστη τιμή του δείκτη. Διαπιστώνεται ότι σε οποιονδήποτε από αυτούς τους ζυγούς και αν εγκατασταθεί το SVC, θα υπάρξει αύξηση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης του σφάλματος από  $t_{cl} = 138-139$  ms σε  $t_{cl} = 158-160$  ms, οπότε και βελτίωση του ορίου της ευστάθειας πρώτης ταλάντωσης του συστήματος. Ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και από τη μελέτη του συστήματος IEEE-20 μηχανών, που αποτελείται από 118 ζυγούς. Αν ένα SVC συγκεκριμένης ονομαστικής ισχύος τοποθετηθεί σε σημείο που δίνει μικρότερο κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος, από τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος, που πραγματοποιείται σε κάποια γραμμή μεταφοράς του συστήματος, τότε το σύστημα είναι ασταθές από την πρώτη κιάλας ταλάντωση (της γωνίας του δρομέα της κρίσιμης μηχανής τους συστήματος).

### 5.8.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΣΗΕ ΜΕ ΒΤΔΕΣΜ

Στο άρθρο [11] μελετάται η βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση του SVC σε ένα ακτινικό δίκτυο υπέρ-υψηλής τάσης και σε ένα σύστημα 24-ζυγών υπέρ-υψηλής τάσης, με σκοπό την ανάλυση της στατικής ευστάθειας τάσης του δικτύου. Αρχικά εξετάζεται το ακτινικό δίκτυο υπέρ-υψηλής τάσης (EHV radial network), το οποίο αποτελείται από μία γραμμή μεταφοράς τάσης 400 kV και μήκους 400 km. Ο ζυγός 6 είναι στη μέση του δικτύου, ο ζυγός 2 είναι ο ζυγός αναχώρησης και ο ζυγός 3 είναι ο ζυγός άφιξης του δικτύου. Συνδέεται ένα SVC των 33 kV μέσω ενός Μ/Σ σε διάφορους ζυγούς φορτίου για να βελτιώσει το προφίλ της τάσης του συστήματος. Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις στο ακτινικό δίκτυο μεταφοράς. Στην πρώτη περίπτωση ( $A_1$ ), συνδέεται ένα εγκάρσιο πηνίο (shunt reactor) των 50 MVAR στο ζυγό 3 των 400 kV του συστήματος. Στα δίκτυα υπέρ-υψηλής τάσης τα εγκάρσια πηνία συνδέονται στο σύστημα για να το προστατέψουν από τις μεταβατικές υπέρ-τάσεις που προκαλούνται από τους χειρισμούς των διακοπών του συστήματος. Ένα σταθερό φορτίο των 400 MW συνδέεται στο ζυγό 4 του δικτύου. Χωρίς αντιστάθμιση SVC, ο δείκτης ευστάθειας τάσης στο ζυγό 4 παίρνει την τιμή  $L_{\max} = 0.910$  (κοντά στο 1, όριο ευστάθειας τάσης) και κάθε αύξηση του φορτίου θα οδηγήσει σε συνθήκη κατάρρευσης τάσης. Η ελάχιστη τάση στο ζυγό 4 έχει την τιμή  $V_4 = 0.793$  α.μ., οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος του συστήματος είναι 21.18 MW (5.17%) και ο συνολικός δείκτης του συστήματος παίρνει την τιμή  $\sum L^2 = 2.1125$ . Το SVC λειτουργεί σαν μεταβλητή χωρητική αντιστάθμιση, ώστε να διατηρεί την τάση των ζυγών των 400 kV στην ονομαστική τους τιμή 1.0 α.μ.. Η βέλτιστη θέση του SVC είναι κοντά στο ζυγό άφιξης 3, αφού παρουσιάζεται το πιο βελτιωμένο προφίλ τάσης, όπου ο δείκτης ευστάθειας τάσης παίρνει τη μικρότερη τιμή  $L_{\max} = 0.581$  και η ελάχιστη τάση στο ζυγό 4 παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή  $V_4 = 0.991$  α.μ. σε σχέση με τις υπόλοιπες υποψήφιες τοποθεσίες εγκατάστασης του SVC (υπόλοιποι ζυγοί). Οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος πέφτουν στα 15.42 MW (3.71%) και ο συνολικός δείκτης συστήματος παίρνει την τιμή  $\sum L^2 = 1.0851$ , που δείχνει τη σημαντική βελτίωση στην ευστάθεια τάσης του συστήματος. Στη δεύτερη περίπτωση ( $A_2$ ), το φορτίο που τοποθετείται στο ζυγό 4 του δικτύου μειώνεται στα 180 MW με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Ο ζυγός άφιξης 3 είναι και σε αυτήν την περίπτωση η βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης του SVC, αφού απαιτεί τη χαμηλότερη επαγωγική άεργη αντιστάθμιση,  $Q_{\text{svc}} = -53$  MVAR, από το SVC για τη διατήρηση των υπέρ-τάσεων κάτω από το ανεκτό όριο τάσης του συστήματος, 1.05 α.μ., όταν τοποθετείται στο ζυγό 4 το μειωμένο φορτίο των 180 MW. Στην τρίτη περίπτωση ( $A_3$ ), το ίδιο φορτίο των 180 MW με τον μοναδιαίο συντελεστή ισχύος με σταθερή, όμως αυτήν την φορά, άεργη επαγωγική αντιστάθμιση  $Q_{\text{svc}} = -50$  MVAR, τοποθετείται στους ζυγούς του δικτύου. Η βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης βρίσκεται ότι είναι, για άλλη μία φορά, ο ζυγός άφιξης 3 του συστήματος, αφού παρουσιάζει το πιο βελτιωμένο προφίλ τάσης, όπου η ελάχιστη τάση στο ζυγό 4 παίρνει τη μικρότερη τιμή  $V_4 = 1.002$  α.μ., ο δείκτης ευστάθειας τάσης και ο

συνολικός δείκτης συστήματος παίρνουν τις μεγαλύτερες τιμές  $L_{\max} = L_4 = 0.266$  και  $\sum L^2 = 0.2426$ , αντίστοιχα, και η άεργη ισχύς που απορροφούν οι γεννήτριες παίρνει τη μικρότερη τιμή  $Q_{\text{GEN}} = -81.80 \text{ MVAR}$  σε σχέση με τις υπόλοιπες υποψήφιες τοποθεσίες εγκατάστασης του SVC (υπόλοιποι ζυγοί). Δεύτερο εξετάζεται το δίκτυο υπέρ-υψηλής τάσης 24 ζυγών με συνολικό φορτίο αιχμής 2620 MW, 980 MVAR. Υπάρχουν εγκάρσια πηνία συνδεδεμένα σε διάφορους ζυγούς των 400 kV για την προστασία του δικτύου από μεταβατικές υπέρ-τάσεις. Η αρχική ανάλυση ροής ισχύος δείχνει ότι η ελάχιστη τάση στο δίκτυο παρουσιάζεται στο ζυγό 13,  $V_{13} = 0.847$  α.μ., με συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος 69.94 MW (2.42%). Οι δείκτες ευστάθειας τάσης υπολογίζονται για όλο το σύστημα και βρίσκεται ότι υψηλότερος είναι ο δείκτης στο ζυγό 8,  $L_{\max} = L_8 = 0.542$  και ο συνολικός δείκτης συστήματος παίρνει την τιμή  $\sum L^2 = 2.5509$ . Οι κρίσιμοι ζυγοί, που θεωρούνται υποψήφιοι για εγκατάσταση SVC είναι οι ζυγοί (220 kV) 8, 13, 7, 6, 9 και 10. Εξετάζονται πέντε λειτουργικές συνθήκες συστήματος. Στην πρώτη περίπτωση ( $B_1$ ), για φορτίο αιχμής, το SVC λειτουργεί σαν μεταβλητή χωρητική αντιστάθμιση, που συνδέεται στους επιλεγμένους ζυγούς των 220 kV, ώστε να διατηρεί την υψηλή τάση των ζυγών στα 0.95 α.μ.. Η βέλτιστη θέση υπολογίζεται ότι είναι ο ζυγός 13, αφού παρουσιάζει το πιο βελτιωμένο προφίλ τάσης με την απαιτούμενη χωρητική αντιστάθμιση του SVC στα 210 MVAR, η ελάχιστη τάση εμφανίζεται στο ζυγό 5 και παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή  $V_5 = 0.885$  α.μ., ο δείκτης ευστάθειας τάσης παίρνει την ελάχιστη τιμή  $L_{\max} = L_8 = 0.426$ , ο συνολικός δείκτης συστήματος παίρνει την ελάχιστη τιμή  $\sum L^2 = 1.8919$ , οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος είναι οι μικρότερες (59.36 MW) και παράγεται η μικρότερη συνολική άεργη ισχύς από τις γεννήτριες της τάξης των 695.92 MVAR, σε σχέση με τις υπόλοιπες υποψήφιες τοποθεσίες εγκατάστασης του SVC (υπόλοιποι ζυγοί). Η δεύτερη περίπτωση ( $B_2$ ) είναι η ίδια με την πρώτη μόνο που τώρα υπάρχει σταθερή χωρητική αντιστάθμιση του SVC στα 210 MVAR με ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα με την περίπτωση  $B_1$ . Στην τρίτη περίπτωση ( $B_3$ ), για φορτίο αιχμής και σταθερή χωρητική αντιστάθμιση του SVC στα 150 MVAR υπολογίζεται πως η βέλτιστη τοποθέτηση του SVC είναι πάλι ο ζυγός 13, επειδή σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται το πιο βελτιωμένο προφίλ τάσης του δικτύου με την ελάχιστη τάση να εμφανίζεται στο ζυγό 5 και παίρνει την τιμή  $V_5 = 0.881$  α.μ., ο δείκτης ευστάθειας παίρνει την ελάχιστη τιμή  $L_{\max} = L_8 = 0.450$ , οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος είναι οι μικρότερες (60.01 MW) και παράγεται η μικρότερη συνολική άεργη ισχύς από τις γεννήτριες της τάξης των 779.6 MVAR, σε σχέση με τις υπόλοιπες υποψήφιες τοποθεσίες εγκατάστασης του SVC (υπόλοιποι ζυγοί). Ο συνολικός δείκτης συστήματος παίρνει την τιμή  $\sum L^2 = 2.0441$  σε αυτήν την περίπτωση. Στην τέταρτη περίπτωση ( $B_4$ ), για φορτίο ίσο με το 60% της αιχμής φορτίου, το SVC λειτουργεί σαν μεταβλητή επαγωγική αντιστάθμιση, που συνδέεται στους επιλεγμένους ζυγούς, ώστε να περιορίσει τις υπερτάσεις στους ζυγούς των 400 kV και να διατηρήσει την τάση στους ζυγούς των 220 kV στα 0.97 α.μ.. Η βέλτιστη θέση υπολογίζεται ότι είναι ο ζυγός 13, αφού παρουσιάζει το πιο βελτιωμένο προφίλ τάσης με την απαιτούμενη επαγωγική αντιστάθμιση του SVC στα -75 MVAR, η μέγιστη τάση εμφανίζεται στο ζυγό 5 και παίρνει τη

μικρότερη τιμή  $V_5 = 1.050$  α.μ., ο δείκτης ευστάθειας τάσης παίρνει την υψηλότερη τιμή  $L_{\max} = L_{13} = 0.263$  και απορροφάται η μικρότερη συνολική άεργη ισχύς από τις γεννήτριες της τάξης των 29.7 MVAR, σε σχέση με τις υπόλοιπες υποψήφιες τοποθεσίες εγκατάστασης του SVC (υπόλοιποι ζυγοί). Ο συνολικός δείκτης συστήματος παίρνει την τιμή  $\sum L^2 = 0.6720$ . Τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα λαμβάνονται και για την πέμπτη περίπτωση ( $B_5$ ), που είναι ίδια με την τέταρτη περίπτωση, μόνο που υπάρχει σε αυτήν την περίπτωση σταθερή επαγωγική αντιστάθμιση από το SVC στα -75 MVAR. Παρατηρείται ότι όταν το SVC λειτουργεί σαν χωρητική αντιστάθμιση μειώνει τους δείκτες ευστάθειας τάσης και τον ολικό δείκτη του συστήματος, αυξάνει τις ελάχιστες τάσεις των ζυγών, μειώνει την συνολική απώλεια της ενεργού ισχύος του συστήματος και μειώνει την παραγωγή της αέργου ισχύος από τις γεννήτριες του συστήματος. Ενώ, όταν λειτουργεί σαν επαγωγική αντιστάθμιση αυξάνει τους δείκτες ευστάθειας τάσης και τον ολικό δείκτη του συστήματος, μειώνει τις ελάχιστες τάσεις των ζυγών και μειώνει την απορρόφηση αέργου ισχύος από τις γεννήτριες. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την βελτίωση του προφίλ της τάσης του δικτύου.

Στο άρθρο [20] εξετάζεται η συντονισμένη εφαρμογή των ΕΣΜ με σκοπό την διεύρυνση του περιθωρίου ευστάθειας τάσης του συστήματος. Το υπό μελέτη σύστημα αναπαριστά μέρη των δικτύων μεταφοράς των 230,138 και 69 kV του διασυνδεδεμένου συστήματος της Γουατεμάλας και της διασύνδεσής του με άλλα τοπικά συστήματα. Το εξεταζόμενο μοντέλο αποτελείται από 116 ζυγούς, 98 γραμμές μεταφοράς και 33 γεννήτριες που εξυπηρετούν φορτίο της τάξης των 705 MW για τη βασική συνθήκη λειτουργίας του ΣΗΕ. Υπολογίζονται οι πέντε μικρότερες ιδιάζουσες τιμές του συστήματος για τη βασική περίπτωση λειτουργίας, αλλά και για την κρίσιμη συνθήκη λειτουργίας χωρίς αντιστάθμιση ΕΣΜ, και προσδιορίζονται τα μέρη του δικτύου, που αντιστοιχούν σε αυτές τις τιμές, μέσω της ανάλυσης του δεξιού ιδιάζοντος διανύσματος. Το κρίσιμο σημείο λειτουργίας καθορίζεται με την αύξηση του φορτίου του συστήματος, ώστε το δίκτυο να φτάσει στη μέγιστη συνθήκη φόρτισής του. Οι πέντε αυτές ιδιάζουσες τιμές στην κρίσιμη λειτουργία του συστήματος ορίζουν τους κρίσιμους ρυθμούς ταλάντωσης για την ευστάθεια της τάσης του δικτύου. Σημειώνεται πως στη συνθήκη μέγιστης φόρτισης το σύστημα παρουσιάζει αστάθεια τάσης ( $\lambda_1 \approx -0.0031$ ). Εξετάζονται οι περιπτώσεις (α) εισαγωγής ενός SVC στους κρίσιμους ζυγούς του συστήματος, (β) εισαγωγής ενός UPFC/TCSC στις αδύναμες γραμμές μεταφοράς του συστήματος και (γ) η συντονισμένη εφαρμογή όλων αυτών των τεχνολογιών για την βελτίωση του περιθωρίου ευστάθειας τάσης του συστήματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η εφαρμογή του SVC ή/και του UPFC είναι περισσότερο αποτελεσματική από την εφαρμογή του TCSC. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή δύο συσκευών (δύο SVCs ή SVC και UPFC) επιτρέπει τη διεύρυνση της βελτίωσης της ευστάθειας της τάσης των κρίσιμων ρυθμών ταλάντωσης, χωρίς να προκαλείται δυσμενής επίδραση μεταξύ των ελεγκτών.

Το άρθρο [23] μελετά την τοποθέτηση των ΕΣΜ στο ΣΗΕ, με στόχο τη βελτίωση της ευστάθειας τάσης του συστήματος. Τα εξεταζόμενα συστήματα είναι συστήματα των 9, 39 και 68 ζυγών. Στα συστήματα των 9 και των 39 ζυγών προσδιορίζονται οι ζυγοί και οι γραμμές μεταφοράς, μέσω των προτεινόμενων μεθόδων του άρθρου, που είναι κατάλληλοι/κατάλληλες για τοποθέτηση εγκάρσιου και σειριακού ΕΣΜ, αντίστοιχα. Με την εγκατάσταση των ΕΣΜ βελτιώνεται η ευστάθεια τάσης του συστήματος. Στο σύστημα των 68 ζυγών γίνεται διάκριση

**Πίνακας 5.2:** Επίδραση διαφόρων ΕΣΜ σε ιδιοτιμή του συστήματος 68-ζυγών σε συνθήκες μέγιστης φόρτισης.

Χωρίς ΕΣΜ	SVC	STATCOM	TCSC	SVC & TCSC
$0.0855 \pm j0.9411$	$-0.0416 \pm j1.4673$	$-0.045001 \pm j1.5849$	$-0.1985 \pm j1.4865$	$-0.2038 \pm j1.5002$

μελέτης μεταξύ βασικής συνθήκης φόρτισης του ΣΗΕ και συνθήκης μέγιστης φόρτισης. Στην περίπτωση της μέγιστης φόρτισης το φορτίο αυξάνεται κατά 14% από το φορτίο στη βασική περίπτωση. Τέλος, υπολογίζονται οι ιδιοτιμές του ΣΗΕ των 68 ζυγών, στην περίπτωση της μέγιστης φόρτισης. Τα ΕΣΜ σταθεροποιούν τον ασταθή ρυθμό ταλάντωσης μετακινώντας την ιδιοτιμή του από το δεξί ημί-επίπεδο στο αριστερό. Τα αποτελέσματα στο συγκεκριμένο ΣΗΕ φαίνονται στον Πίνακα 5.2 για μία ιδιοτιμή με θετικό πραγματικό μέρος. Η συντονισμένη λειτουργία των ΕΣΜ για άλλη μία φορά επιτυγχάνει τα καλύτερα αποτελέσματα στη βελτίωση της ευστάθειας τάσης του συστήματος.

Το άρθρο [41] εξετάζεται η εισαγωγή ορισμένων SVCs σε ένα ΣΗΕ βάση της κύριας τους λειτουργίας, η οποία είναι η βελτίωση της ευστάθειας τάσης του δικτύου. Εξετάζονται δύο συστήματα. Ένα σύστημα 2 περιοχών και 4 μηχανών, όπου δύο σταθεροποιητές τοποθετούνται στις μηχανές 2 και 3 και ένα SVC τοποθετείται στο ζυγό, που παρουσιάζει τις μεγαλύτερες ταλαντώσεις τάσης χωρίς το SVC. Καθώς και ένα σύστημα 5 περιοχών, 16 μηχανών και 68 ζυγών. Σε αυτό το σύστημα χρησιμοποιούνται ο γενετικός αλγόριθμος και η ανάλυση ρυθμών για να καθορίσουν τη βέλτιστη θέση και το βέλτιστο ονομαστικό μέγεθος αρκετών SVCs στο ΣΗΕ. Τελικά τοποθετούνται 3 SVCs στο σύστημα με συγκεκριμένα βέλτιστα μεγέθη με συνέπεια την ενίσχυση της τάσης του συστήματος.

Στο άρθρο [43] ένα SVC τοποθετείται βέλτιστα στο δίκτυο ώστε να ενισχύεται η ευστάθεια τάσης, σε διάφορες συνθήκες φόρτισής του. Εξετάζεται το σύστημα της Νέας Αγγλίας των 36 ζυγών. Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση το ΣΗΕ λειτουργεί σε συνθήκη χαμηλής φόρτισης, η οποία αναπαριστά τη βασική συνθήκη λειτουργίας του ΣΗΕ. Ο ρυθμός ταλάντωσης που αντιστοιχεί στη μικρότερη ιδιοτιμή θεωρείται ως ο κρίσιμος ρυθμός ταλάντωσης για την ευστάθεια τάσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως ο ζυγός 8 είναι ο καταλληλότερος για εγκατάσταση SVC. Οι άλλες δύο περιπτώσεις εξετάζουν τα αποτελέσματα για αύξηση των συνθηκών φόρτισης. Το ΣΗΕ σε αυτές τις περιπτώσεις φτάνει πιο εύκολα σε κρίσιμα σημεία, στα οποία χάνει την ευστάθεια τάσης του. Εξετάζονται προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου από 3-φασικά σφάλματα σε ζυγό του δικτύου και προσδιορίζονται οι καταλληλότεροι ζυγοί για εγκατάσταση SVC, όπου η τάση δεν παρουσιάζει αστάθεια από το σφάλμα.

Τα ΕΣΜ με την σωστή τοποθέτησή τους βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά του προφίλ της τάσης των ΣΗΕ. Εξετάζονται, συνήθως, περιπτώσεις βασικής φόρτισης και αυξημένης φόρτισης δικτύου. Σκοπός της ΒΤΔΕΣΜ είναι να διατηρεί την ευστάθεια τάσης σε όλους τους ζυγούς του συστήματος, να αποφεύγονται φαινόμενα όπως η κατάρρευση τάσης ή η αστάθεια της τάσης σε όλα τα σημεία του δικτύου, όσο αυξάνεται το φορτίο του ΣΗΕ. Τέλος, εξετάζεται η επίδραση διαφόρων τύπων ΕΣΜ, όσο αφορά το ποια είναι πιο αποτελεσματικά, στην ενίσχυση του περιθωρίου ευστάθειας τάσης του δικτύου.

## 5.9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΒΤΔΕΣΜ

Το άρθρο [7] επικεντρώνεται στη βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση του SVC στο δίκτυο για την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος. Εξετάζεται ένα τροποποιημένο σύστημα IEEE-24 ζυγών και 10 γεννητριών. Η βασική ισχύς στο σύστημα είναι 100 MVA και η κανονική φόρτιση ανέρχεται στα 28.5 α.μ.. Όπως το φορτίο αυξάνεται, οι ζυγοί 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10 και 24 θα παρουσιάζουν μεγάλες πτώσεις τάσης, αφού ορισμένες γεννήτριες φτάνουν στα όρια παραγωγής άεργης ισχύος τους. Η παραγωγή από τις γεννήτριες αυξάνεται συνεχώς μέχρι να φτάσει το σύστημα στο κάτω όριο της τάσης (low voltage boundary). Η τιμή των 0.9 α.μ. επιλέγεται εδώ ως το κάτω όριο της τάσης σε όλους τους ζυγούς και ο ζυγός 3 φτάνει πιο κοντά σε αυτό. Στο κάτω όριο της τάσης η συνολική διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς (ATC) ανέρχεται στα 3977 MW. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η βέλτιστη τοποθεσία εγκατάστασης για ένα SVC των 351 MVAR είναι ο ζυγός 9, που επιφέρει αύξηση 20% (796 MW) στη συνολική διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς στο κάτω όριο της τάσης. Αναφέρεται πως η βέλτιστη θέση εγκατάστασης του SVC δεν είναι ο ζυγός 3, ο οποίος φτάνει πιο κοντά από όλους τους ζυγούς στο κάτω όριο της τάσης, που έχει οριστεί. Εξετάζεται, επίσης, η εισαγωγή δύο SVCs στο δίκτυο. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως, ο βέλτιστος συνδυασμός εγκατάστασης των δύο συσκευών SVCs των 179 MVAR και 358 MVAR είναι ο ζυγός 6 και ο ζυγός 9, αντίστοιχα, που επιφέρει αύξηση 37% (1471 MW) στην αρχική συνολική διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς στο κάτω όριο της τάσης.

Στο άρθρο [15] προσδιορίζονται οι βέλτιστες τοποθεσίες και μεγέθη των TCSC και TCPAR σε ένα ΣΗΕ 5 περιοχών με σκοπό την ενίσχυση της συνολικής ικανότητας μεταφοράς του δικτύου (TTC). Για τη βασική βέλτιστη ροή ισχύος η TTC από την περιοχή 1 στην περιοχή 5,  $TTC_{1-5}$  υπολογίζεται ότι είναι 71.2 MW. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η βέλτιστη τοποθεσία ενός TCSC είναι η γραμμή μεταφοράς 3 του συστήματος όπου επιτυγχάνεται συνολική ικανότητα μεταφοράς  $TTC_{1-5} = 78.3$  MW όταν το TCSC έχει επαγωγική αντίδραση  $x_c = 0.05$ , ενώ η βέλτιστη τοποθεσία ενός TCPAR είναι η γραμμή μεταφοράς 6 του συστήματος με  $TTC_{1-5} = 100$  MW όταν το TCPAR λειτουργεί με γωνία  $\varphi = 8.57^\circ$ . Αξίζει να σημειωθεί πως η συνολική ικανότητα μεταφοράς μεταξύ δύο περιοχών  $\alpha$  και  $\beta$  θα είναι ίση με τη συνολική ικανότητα μεταφοράς μεταξύ της αντίθετης διαδρομής των περιοχών  $\beta$  και  $\alpha$ , αν και μόνο αν η διαδρομή μεταφοράς μεταξύ των δύο περιοχών αποτελείται από δύο μόνο συνεχόμενους ζυγούς. Έτσι, για τη βασική βέλτιστη ροή ισχύος, η συνολική ικανότητα μεταφοράς από την περιοχή 5 στην περιοχή 1 υπολογίζεται  $TTC_{5-1} = 111.1$  MW. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η βέλτιστη τοποθεσία ενός TCSC είναι η γραμμή μεταφοράς 1 του συστήματος με την αυξημένη συνολική ικανότητα μεταφοράς  $TTC_{5-1} = 174.9$  MW και  $x_c = 0.074$ , ενώ η βέλτιστη τοποθεσία ενός TCPAR είναι η γραμμή μεταφοράς 4 του συστήματος με  $TTC_{5-1} = 161.6$  MW και  $\varphi = 4.54^\circ$ .

Στο άρθρο [50] εξετάζεται η εισαγωγή του TCSC σε ένα σύστημα 6 ζυγών και 3 γεννητριών για την αύξηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς του δικτύου. Το ζητούμενο στο άρθρο [50] είναι να καθοριστούν η επαγωγική αντίδραση του TCSC, που απαιτείται για την αύξηση

της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς (ATC) του δικτύου σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, και η εύρεση της κατάλληλης γραμμής μεταφοράς για την τοποθεσία του. Για μία διμερή συναλλαγή μεταξύ των ζυγών 2 και 5, υπολογίζονται οι ικανότητες μεταφοράς για όλες τις γραμμές του συστήματος καθώς και η συνολική ATC του δικτύου. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η γραμμή μεταφοράς 2-4 μπορεί να προκαλέσει συμφόρηση με ATC στα 619.59 MW για διμερή συναλλαγή μεταξύ των ζυγών 2 και 5, με άλλα λόγια η γραμμή μεταφοράς 2-4 περιορίζει την ATC του συστήματος. Για την ενίσχυση της ATC σε επιθυμητό επίπεδο εφαρμόζεται σειριακή αντιστάθμιση χρησιμοποιώντας TCSC. Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις για αντισταθμίσεις γραμμής 10%, 20% και 30%, αντίστοιχα. Οι γραμμές με τους υψηλότερους δείκτες ευαισθησίας θεωρούνται ως οι καταλληλότερες για εγκατάσταση TCSC. Έτσι, για 10% σειριακή αντιστάθμιση η γραμμή μεταφοράς 2-5 έχει μέγιστο δείκτη ευαισθησίας για τον οποίο η ATC μπορεί να βελτιωθεί, με εγκατάσταση TCSC στη γραμμή μεταφοράς 2-5, μέχρι 639.38 MW, για 20% σειριακή αντιστάθμιση η γραμμή μεταφοράς 2-5 έχει, επίσης, μέγιστο δείκτη ευαισθησίας για τον οποίο η ATC μπορεί να βελτιωθεί μέχρι 662.96 MW, ενώ για 30% αντιστάθμιση η γραμμή μεταφοράς 3-5 έχει μέγιστο δείκτη ευαισθησίας για τον οποίο η ATC μπορεί να βελτιωθεί μέχρι 642.145 MW. Στη συνέχεια για τα δεδομένα επίπεδα ATC προσδιορίζεται η επαγωγική αντίδραση του TCSC σε κάθε περίπτωση. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως, όσο πιο υψηλή είναι η επιθυμητή τιμή της ATC, τόσο μεγαλύτερη επαγωγική αντίδραση χρειάζεται το TCSC, που αντισταθμίζει την εκάστοτε γραμμή μεταφοράς.

Στο άρθρο [55] αναλύεται η επίδραση του STATCOM και του UPFC στη δυναμική διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς (dynamic ATC). Τα εξεταζόμενα συστήματα είναι το σύστημα των 39 ζυγών και των 10 μηχανών της Νέας Αγγλίας και ένα πρακτικό ινδικό σύστημα με 246 ζυγούς και 60 μηχανές. Τα φορτία αέργου ισχύος θεωρούνται τύπου σταθερής σύνθετης αντίστασης, ενώ τα φορτία ενεργού ισχύος χωρίζονται σε δύο μοντέλα, στο μοντέλο της σταθερής συνολικής αντίστασης (μοντέλο σταθερού φορτίου) και στο μοντέλο σύνθετου φορτίου (ZIP load model), το οποίο αποτελείται κατά 60% από φορτία σταθερής ισχύος, 20% από φορτία σταθερού ρεύματος και 20% από φορτία σταθερής σύνθετης αντίστασης. Εξετάζονται διμερείς και πολυμερείς συναλλαγές στα δίκτυα. Ένα 3-φασικό σφάλμα εφαρμόζεται σε έναν από τους ζυγούς κάθε εξεταζόμενου συστήματος και υποτίθεται ότι εκκαθαρίζεται σε 5 κύκλους για τον προσδιορισμό της δυναμικής ATC. Οι βέλτιστες θέσεις των ΕΣΜ καθορίζονται από τους υψηλότερους δείκτες ευαισθησίας, που υπολογίζονται για τα συστήματα. Στο σύστημα της Νέας Αγγλίας η βέλτιστη τοποθεσία του STATCOM είναι ο ζυγός 28 και η βέλτιστη τοποθεσία του UPFC είναι η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 25-26, με τον εγκάρσιο μετατροπέα του UPFC να τοποθετείται στο ζυγό 25. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βέλτιστη τοποθέτηση του STATCOM επιφέρει ελάχιστη βελτίωση στην στατική ATC του συστήματος, ενώ ενισχύει σημαντικά τη δυναμική ATC. Πιο συγκεκριμένα, με το STATCOM ενισχύεται περισσότερο η δυναμική ATC για το μοντέλο του συνθέτου φορτίου από ότι για το μοντέλο του σταθερού φορτίου. Με το UPFC η βελτίωση της στατικής ATC είναι μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση του STATCOM, ενώ επιφέρει σημαντικές αυξήσεις στη δυναμική ATC, και για τα δύο μοντέλα φορτίου. Τα ίδια αποτελέσματα διεξάγονται και για τη βέλτιστη τοποθέτηση των STATCOM και UPFC στο ινδικό σύστημα, με ελάχιστη ενίσχυση της στατικής ATC και σημαντική βελτίωση της δυναμικής ATC του δικτύου. Τέλος, παρατηρείται ότι το UPFC, το οποίο είναι ικανό να ελέγχει την ενεργό και άεργο ισχύ της γραμμής μεταφοράς και την τάση των ζυγών ταυτόχρονα, ενισχύει τη δυναμική ATC περισσότερο συγκριτικά με το STATCOM.

Στο άρθρο [80] διερευνάται η χρήση των ΕΣΜ, όπως το SVC και το TCSC, για την μεγιστοποίηση των συναλλαγών μεταφοράς ισχύος (αύξηση της ATC) κατά τη διάρκεια φυσιολογικών συνθηκών ή διάφορων διαταραχών του ΣΗΕ. Τα εξεταζόμενα συστήματα είναι το σύστημα IEEE-14 ζυγών και το σύστημα αξιοπιστίας IEEE-24 ζυγών. Για το SVC υπάρχουν 13 πιθανές τοποθεσίες στο σύστημα των 14 ζυγών και 23 πιθανές τοποθεσίες στο σύστημα των 24 ζυγών. Ενώ, για το TCSC υπάρχουν 19 πιθανές τοποθεσίες στο σύστημα των 14 ζυγών και 38 πιθανές τοποθεσίες στο σύστημα των 24 ζυγών. Οι επιλογές αυτές κωδικοποιούνται στον RGA και η βέλτιστη τοποθέτηση και ικανότητα αντιστάθμισης κάθε συσκευής υπολογίζεται μαζί με την ενισχυμένη τιμή της ATC. Σε κάθε περίπτωση οι τιμές ATC των συστημάτων βελτιώνονται σημαντικά, όπως και τα μεγέθη τάσης στους ζυγούς, που το SVC τοποθετείται. Ίδιοι υπολογισμοί γίνονται και για διάφορες διαταραχές του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η περίπτωση αποκοπής της γραμμής μεταφοράς 16 στο σύστημα των 14 ζυγών και της γραμμής μεταφοράς 8 στο σύστημα των 24 ζυγών. Οι τιμές ATC βελτιώνονται και σε αυτή την περίπτωση. Τέλος, τα αποτελέσματα δείχνουν καθαρά πως το TCSC είναι πιο αποτελεσματικό στη βελτίωση της ATC σε φυσιολογικές συνθήκες και σε συνθήκες διαταραχών συγκριτικά με το SVC.

Η ενίσχυση της ATC με τα ΕΣΜ παίζει σημαντικό ρόλο στην αποδοτική και ασφαλή λειτουργία των ανταγωνιστικών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, στα άρθρα [81], [95] εξετάζεται η εισαγωγή των STATCOM, SSSC και UPFC στο σύστημα αξιοπιστίας IEEE-24 ζυγών για την βελτίωση της ATC του ΣΗΕ. Εξετάζονται διμερείς και πολυμερείς συναλλαγές ισχύος, καθώς και φυσιολογικές συνθήκες και συνθήκες διαταραχών δικτύου. Ορίζονται οι συναλλαγές  $T_1$  : διμερής συναλλαγή μεταξύ του ζυγού πωλητή 23 και του ζυγού αγοραστή 15,  $T_2$  : διμερής συναλλαγή μεταξύ του ζυγού πωλητή 10 και του ζυγού αγοραστή 3,  $T_3$  : πολυμερής συναλλαγή μεταξύ ζυγών πωλητών 23 και 10 και ζυγών αγοραστών 15 και 3 και  $T_4$  : πολυμερής συναλλαγή μεταξύ ζυγών πωλητών 23,10 και 21 και ζυγών αγοραστών 15,3 και 6. Τα αποτελέσματα της έρευνας φαίνονται στον Πίνακα 5.3.

**Πίνακας 5.3:** ATC (α.μ.) με και χωρίς ΕΣΜ

Συναλλαγές	ATC χωρίς ΕΣΜ (α.μ.)	ATC με STATCOM (α.μ.)	ATC με SSSC (α.μ.)	ATC με UPFC (α.μ.)
$T_1$	7.5785	7.7968	7.8183	7.8276
$T_2$	2.8342	3.1800	3.2331	3.2903
$T_3$	2.7629	2.9368	3.0036	3.2449
$T_4$	1.1183	1.1886	1.1920	1.2006



Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η ATC ενισχύεται με όλα τα ΕΣΜ για όλους τους τύπους των συναλλαγών. Ακόμη, παρατηρείται ότι η ATC ενισχύεται περισσότερο με το UPFC συγκριτικά με το SSSC και το UPFC. Επίσης, διαπιστώνεται πως η ATC είναι μικρότερη για πολυμερείς συναλλαγές συγκριτικά με διμερείς συναλλαγές. Ακριβώς τα ίδια συμπεράσματα διεξάγονται σε συνθήκες αποκοπής διαφόρων γραμμών μεταφοράς του ΣΗΕ. Στο άρθρο [95] εξετάζεται, επίσης, η επιρροή του μοντέλου φορτίου ZIP. Διάφοροι συνδυασμοί συντελεστών του μοντέλου φορτίου ZIP έχουν καθοριστεί για τους υπολογισμούς της ATC. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με τα μοντέλα φορτίου ZIP μειώνεται η ATC συγκριτικά με τα μοντέλα φορτίου σταθερής ενεργού και αέργου ισχύος.

### 5.10 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ΣΗΕ ΜΕ ΒΤΔΕΣΜ

Στο άρθρο [12] εξετάζεται η διαχείριση της συμφόρησης σε ένα σύστημα 5 ζυγών με τη βέλτιστη τοποθέτηση των TCSC και TCPAR. Το σύστημα των 5 ζυγών αποτελείται από 3 ζυγούς παραγωγής και 2 ζυγούς φορτίου, ενώ η βασική ισχύς λαμβάνεται ίση με 100 MVA. Η παραγωγή στους ζυγούς 1 και 2 προσφέρεται στη κοινοπραξία και το φορτίο στο ζυγό 4 διαιρείται σε δύο ισοδύναμα μέρη, όπου το ένα μέρος παίρνει ενέργεια από την κοινοπραξία και το άλλο μέρος εξυπηρετείται από διμερή σύμβαση με την ανεξάρτητη παραγωγή στο ζυγό 3. Χωρίς την τοποθέτηση των ΕΣΜ τα φορτία του μοντέλου κοινοπραξίας περιορίζονται στα 0.94 α.μ. και 0.75 α.μ., ενώ η διμερής συναλλαγή ισχύος στο μοντέλο διμερούς σύμβασης περιορίζεται στα 0.92 α.μ. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης προς ελαχιστοποίηση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, που μελετάται, δηλαδή το βέλτιστο κόστος κατανομής ισχύος (optimal dispatch cost), παίρνει την τιμή 3716.68 \$. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η γραμμή μεταφοράς 3 του συστήματος είναι η βέλτιστη τοποθέτηση και στην περίπτωση του TCSC και στην περίπτωση του TCPAR. Τα φορτία του μοντέλου κοινοπραξίας και η διμερής συναλλαγή ισχύος στο μοντέλο διμερούς σύμβασης αυξάνονται στα 1.0 α.μ., 0.80 α.μ., και 1.0 α.μ., αντίστοιχα, και για τα δύο είδη ΕΣΜ. Ενώ, η αντικειμενική συνάρτηση μειώνεται αισθητά και παίρνει τις τιμές 133.39 \$ και 133.92 \$ για TCPAR και TCSC, αντίστοιχα.

Στο άρθρο [17] εξετάζεται η βέλτιστη τοποθέτηση του TCSC στο απλό σύστημα των 5 ζυγών, που μελετάται και στο άρθρο [12]. Το TCSC ρυθμίζει τη ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, στις οποίες προκαλείται συμφόρηση, με σκοπό τη μείωση του κόστους συμφόρησης στο δίκτυο. Εξετάζονται δύο τύποι συναρτήσεων κόστους και τέσσερις περιπτώσεις βελτιστοποίησης. Στην περίπτωση της τετραγωνικής συνάρτησης κόστους παραγωγής,  $f_i = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2$ , όπου οι συντελεστές και η μέγιστη και ελάχιστη παραγωγή κάθε γεννήτριας προσδιορίζονται, στην περίπτωση της οικονομικής κατανομής φορτίου το συνολικό κόστος παραγωγής ανέρχεται στα 1579.7 \$. Αυτό είναι το χαμηλότερο κόστος παραγωγής από τις περιπτώσεις που εξετάζονται, όμως στην περίπτωση αυτή παρουσιάζονται υπερφορτίσεις στις γραμμές μεταφοράς 1 και 4 του συστήματος κατά 21.5 MW και 14.7 MW πάνω από τα μέγιστα όρια, αντίστοιχα. Στην περίπτωση της βέλτιστης ροής ισχύος, στην οποία ικανοποιούνται οι περιορισμοί ροής ισχύος των γραμμών μεταφοράς, χωρίς TCSC, το συνολικό κόστος παραγωγής ανέρχεται στα 1583.9 \$, δηλαδή 4.2 \$ περισσότερα από

**Πίνακας 5.4:** Σύγκριση κόστους συμφόρησης στα συστήματα για τα 3 είδη των ΕΣΜ του άρθρου [84].

<b>IEEE-24 ζυγών</b>				
Κόστος συμφόρησης /ημέρα	<b>Χωρίς ΕΣΜ</b>	<b>Με STATCOM</b>	<b>Με SSSC</b>	<b>Με UPFC</b>
Κόστος (\$/day)	46429.38	46150.42	33124.92	27078.6
Δείκτης φόρτισης	1.042765	1.052606	1.137438	1.178804
<b>IEEE-57 ζυγών</b>				
Κόστος συμφόρησης /ημέρα	<b>Χωρίς ΕΣΜ</b>	<b>Με STATCOM</b>	<b>Με SSSC</b>	<b>Με UPFC</b>
Κόστος (\$/h)	41428.7697	38420.9410	36095.997	15621.4467

ότι στην πρώτη περίπτωση και αυτό οφείλεται στη συμφόρηση που παρουσιάζουν οι γραμμές μεταφοράς 1 και 4 του συστήματος. Για τη μείωση του κόστους συμφόρησης τοποθετείται ένα TCSC σε βέλτιστη θέση. Έτσι οι επόμενες δύο περιπτώσεις ασχολούνται με την περίπτωση της μέγιστης ροής ισχύος με TCSC, με το συνολικό κόστος παραγωγής να μειώνεται και να φτάνει μέχρι τα 1582.2 \$. Στην περίπτωση των τμηματικά γραμμικοποιημένων συναρτήσεων κόστους εκφρασμένων με τη μορφή καμπυλών προσφοράς, υπάρχει, επίσης, μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής, που οφείλεται στο κόστος συμφόρησης ορισμένων γραμμών μεταφοράς τους δικτύου, με τη βέλτιστη τοποθέτηση ενός TCSC.

Στο άρθρο [84] εξετάζεται η επιρροή των STATCOM, SSSC και UPFC στη διαχείριση της συμφόρησης, αναπρογραμματίζοντας την παραγωγή των γεννητριών. Δοκιμές έχουν γίνει για το σύστημα αξιοπιστίας IEEE-24 ζυγών και για το σύστημα IEEE-57 ζυγών. Προσδιορίζονται οι βέλτιστες θέσεις των ΕΣΜ στα δύο συστήματα και ύστερα από υπολογισμούς λαμβάνονται τα αποτελέσματα, που φαίνονται στον Πίνακα 5.4. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως για το σύστημα των 24 ζυγών, η παρουσία του STATCOM μειώνει το κόστος συμφόρησης, αλλά η μείωση είναι οριακή. Ενώ, με την παρουσία του SSSC και του UPFC η μείωση είναι αισθητή. Επίσης φαίνεται ότι με το UPFC η μείωση του κόστους συμφόρησης είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τα άλλα δύο ΕΣΜ. Επίσης η φόρτιση του συστήματος IEEE-24 ζυγών είναι υψηλότερη με το UPFC συγκριτικά με το SSSC και το STATCOM, με αποτέλεσμα να υπάρχει με το UPFC μεγαλύτερο περιθώριο ευστάθειας τάσης συγκριτικά με τα άλλα ΕΣΜ. Γενικά, με τα ΕΣΜ είναι εμφανής η μείωση του κόστους συμφόρησης, καθώς οι γεννήτριες αναπρογραμματίζουν την παραγωγή ισχύος τους.

Στο άρθρο [87] παρουσιάζεται μία προσέγγιση της βέλτιστης ροής ισχύος βασισμένη στον αναπρογραμματισμό της παραγωγής για τη καλύτερη διαχείριση της συμφόρησης στο σύστημα αξιοπιστίας IEEE-24 ζυγών, χρησιμοποιώντας τους ελεγκτές ισχύος, ST και UPFC. Εξετάζονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συμφόρησης των γραμμών μεταφοράς του

**Πίνακας 5.5:** Κόστος συμφόρησης σε διάφορες περιπτώσεις.

<b>Κόστος συμφόρησης</b>	<b>SL</b>	<b>2L</b>	<b>3L</b>
Κόστος (\$/H) υβριδικού μοντέλου αγοράς	348.4286	594.7092	1561.034
Κόστος (\$/h) μοντέλου κοινοπραξίας αγοράς	349.3939	722.8416	1619.565
Κόστος (\$/h) Με UPFC	321.9994	536.2756	873.9588
Κόστος (\$/h) Με ST	339.6648	536.8184	881.0214

δικτύου, η συμφόρηση μίας γραμμής μεταφοράς (SL), η συμφόρηση δύο γραμμών μεταφοράς (2L) και η συμφόρηση τριών γραμμών μεταφοράς (3L). Επίσης, εξετάζεται η επιρροή στο κόστος συμφόρησης των περιπτώσεων του υβριδικού μοντέλου αγοράς και του μοντέλου κοινοπραξίας αγοράς. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.5. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως στο υβριδικό μοντέλο αγοράς το κόστος συμφόρησης είναι χαμηλότερο συγκριτικά με το μοντέλο κοινοπραξίας αγοράς. Τέλος, ακόμα μεγαλύτερη μείωση του κόστους συμφόρησης γίνεται με τη βέλτιστη εγκατάσταση του UPFC και του ST, με το UPFC να δίνει οριακά χαμηλότερες τιμές κόστους συμφόρησης συγκριτικά με το ST.

### 5.11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΗΕ ΜΕ ΒΤΔΕΣΜ

Στο άρθρο [13] εξετάζεται η εισαγωγή των TCSC, TCPST, TCVR και SVC σε ένα ΣΗΕ 118-ζυγών, με σκοπό την καλύτερη χρησιμοποίηση των υπάρχοντων γραμμών μεταφοράς. Ως εκ τούτου, τα ΕΣΜ τοποθετούνται βέλτιστα με τη βοήθεια του GA, ώστε να μεγιστοποιηθεί η φόρτιση του συστήματος, ενώ ικανοποιούνται οι διάφοροι περιορισμοί του δικτύου. Με άλλα λόγια, αναζητείται η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος από το δίκτυο στους καταναλωτές, ελέγχοντας τις ροές ισχύος των γραμμών μεταφοράς. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως οποιοσδήποτε τύπος ΕΣΜ και αν τοποθετηθεί στο ΣΗΕ, θα υπάρχει αύξηση της φόρτισης του συστήματος. Όσο αυξάνονται οι αριθμοί των συσκευών (ίδιων τύπων) ΕΣΜ που τοποθετούνται στο δίκτυο, τόσο πιο πολύ ενισχύεται η φόρτιση του συστήματος. Όμως, υπάρχει ένα όριο συσκευών, που αν ξεπεραστεί σταματάει η ενίσχυση της φόρτισης του συστήματος. Αυτό το όριο συσκευών για το εξεταζόμενο σύστημα, είναι των 30 συσκευών. Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι στην περίπτωση που στο σύστημα τοποθετείται ένας τύπος ΕΣΜ, τα TCSCs είναι πιο αποδοτικά στην ενίσχυση της φόρτισης του συστήματος συγκριτικά με τα υπόλοιπα ΕΣΜ. Μετά ακολουθούν τα TCPSTs, μετά τα TCVRs και τέλος τα SVCs. Όμως, η ταυτόχρονη χρήση όλων των τύπων των ΕΣΜ είναι πιο αποδοτική στην ενίσχυση της φόρτισης του συστήματος συγκριτικά με την περίπτωση που μόνο ένας, οποιοσδήποτε, τύπος ΕΣΜ τοποθετείται βέλτιστα στο δίκτυο. Ανάλογα με τον τύπο τους, τα ΕΣΜ τοποθετούνται στο δίκτυο για να ικανοποιήσουν συγκεκριμένους ρόλους. Τα TCSCs

**Πίνακας 5.6:** Αριθμός βέλτιστων TCPSTs και ο αντίστοιχος δείκτης φόρτισης στα διάφορα ΣΗΕ

Βέλτιστος αριθμός συσκευών	IEEE-24 ζυγών	IEEE-118 ζυγών	IEEE-300 ζυγών	ΣΗΕ 908 ζυγών
Ίδιο $\tau_j$	3	13	1	2
Διαφορετικό $\tau_j$	3	18	3	2
Δείκτης φόρτισης $p$	1.12	1.76	1.07	1.08

τοποθετούνται με σκοπό να μειώσουν τη φόρτιση της ενεργού και αέργου ισχύος στο δίκτυο, αναγκάζοντας την ισχύ να κατευθυνθεί προς την ανάποδη κατεύθυνση στο βρόχο του συστήματος. Τα TCPSTs και τα TCVRs επιτρέπουν τη μείωση της φόρτισης των υπέρφορτισμένων γραμμών μεταφοράς ελέγχοντας την ροή ενεργού και αέργου ισχύος στο δίκτυο, αντίστοιχα. Ενώ τέλος, τα SVC τοποθετούνται για τον έλεγχο των ζυγών των τάσεων του ΣΗΕ.

Στο άρθρο [24] εξετάζεται η βέλτιστη τοποθέτηση των TCPSTs σε μεγάλα ΣΗΕ, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της φόρτισής τους. Σκοπός του άρθρου είναι η μεγιστοποίηση της φόρτισης των δικτύων με όσο το δυνατόν λιγότερες συσκευές TCPSTs, λόγω του κόστους εγκατάστασής τους, τηρουμένων των περιορισμών των ΣΗΕ. Τα εξεταζόμενα ΣΗΕ είναι το σύστημα IEEE-24 ζυγών, το σύστημα IEEE-118 ζυγών, το σύστημα IEEE-300 ζυγών και ένα σύστημα 904 ζυγών, με το τελευταίο ΣΗΕ να έχει πάνω από 1000 γραμμές μεταφοράς. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις. Αρχικά, εξετάζεται η περίπτωση όπου, ο συνολικός αριθμός των τοποθετημένων συσκευών υποτίθεται ότι έχει τον ίδιο συντελεστή εγκατάστασης κόστους  $\tau_j = 1$ . Σε αυτήν την περίπτωση, η μέγιστη φόρτιση επιτυγχάνεται με μοναδικό συνολικό αριθμό συσκευών, όμως η τοποθέτησή τους δεν είναι μοναδική. Έτσι, εξετάζεται και η περίπτωση όπου οι συντελεστές κόστους εγκατάστασης είναι όλοι διαφορετικοί και ανάλογοι με τα μεγέθη των ροών ισχύος των γραμμών μεταφοράς, με αποτέλεσμα να παράγεται μοναδική λύση. Υπολογίζονται, για κάθε ΣΗΕ, ο βέλτιστος αριθμός των συσκευών TCPSTs, που τοποθετούνται, ο οποίος αν ξεπεραστεί δεν θα υπάρχει περαιτέρω αύξηση της φόρτισης του συστήματος, η μέγιστη φόρτιση συστήματος, που επιτυγχάνεται με αυτόν τον αριθμό συσκευών, η τοποθεσία τους καθώς και η παράμετρός τους. Στον Πίνακα 5.6 φαίνονται μερικά από αυτά τα αποτελέσματα. Ο βέλτιστος αριθμός των συσκευών είναι ασυσχέτιστος με το μέγεθος του ΣΗΕ και συνδέεται μόνο με την αύξηση της φόρτισης του δικτύου. Για αυτό το λόγο, τα συστήματα που είναι κοντά στη μέγιστη φόρτισή τους, απαιτούν λίγες συσκευές για να φτάσουν στα όριά τους ανεξάρτητα από το μέγεθός τους. Τέλος, να σημειωθεί πως όσο αυξάνεται ο αριθμός των τοποθετημένων TCPSTs, τόσο αυξάνεται και ο δείκτης φόρτισης του συστήματος, μέχρι να ξεπεραστεί το όριο του μέγιστου αριθμού συσκευών κάθε περίπτωσης. Στο σύστημα των IEEE-24 ζυγών, για παράδειγμα, οι τιμές του δείκτη φόρτισης για 0, 1, 2, 3, και 4 συσκευές είναι 1.03, 1.08, 1.1, 1.12 και 1.12, αντίστοιχα, αφού ο βέλτιστος αριθμός εγκατεστημένων συσκευών σε αυτήν την περίπτωση είναι τρεις.

Στο άρθρο [28] εξετάζεται η εισαγωγή των SVCs και των TCSCs σε ένα μεγάλο AC/DC σύστημα 173 ζυγών, με τρόπο τέτοιο ώστε, να αυξάνεται το όριο φόρτισής του με τον πιο αποδοτικό τρόπο. Η συνολική ενεργός ισχύς του εξυπηρετούμενου φορτίου της βασικής περίπτωσης είναι 56216.91 MW. Με ανάλυση ιδιοδιανυσμάτων προσδιορίζεται ότι οι ζυγοί 114, 101 και 75 είναι οι πιο κρίσιμοι ζυγοί, όσο αφορά την υποστήριξη τάσης, στο σημείο διακλάδωσης, στο οποίο εμφανίζονται υψηλές τιμές τάσεων (κοντά στο 1.0) και είναι πιθανή η κατάρρευση της τάσης. Με τοποθέτηση ενός SVC στο ζυγό 114 η συνολική ενεργός ισχύς του εξυπηρετούμενου φορτίου αυξάνεται στα 58431.86 MW, δηλαδή σημειώνεται αύξηση 3.94 % σε σχέση με τη βασική περίπτωση. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως μεταφέρονται παραπάνω 2214.95 MW με την τοποθέτηση ενός SVC 200 MVAR στο ζυγό 114 συγκριτικά με τη βασική περίπτωση. Αν το SVC των 200 MVAR τοποθετηθεί στους ζυγούς 101 και 75 τότε παρατηρούνται αυξήσεις 3.09% και 2.82% στη φόρτιση του δικτύου συγκριτικά με τη βασική περίπτωση, αντίστοιχα. Αν αυξηθεί στα 300 MVAR η ονομαστική ισχύς του SVC που τοποθετείται στο ζυγό 114, τότε η συνολική ενεργός ισχύς του εξυπηρετούμενου φορτίου αυξάνεται στα 58856.29 MW, δηλαδή σημειώνεται αύξηση 4.66% σε σχέση με τη βασική περίπτωση. Επίσης υπολογίζεται πως αν ένα SVC 200 MVAR τοποθετηθεί στο ζυγό 114 και ένα SVC 100 MVAR τοποθετηθεί στο ζυγό 60, τότε η συνολική ενεργός ισχύς του εξυπηρετούμενου φορτίου αυξάνεται στα 58437.47 MW, δηλαδή σημειώνεται αύξηση 3.95% σε σχέση με τη βασική περίπτωση. Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η τοποθέτηση ενός SVC στον πιο κρίσιμο ζυγό είναι πιο αποδοτική από την τοποθέτηση επιπλέον SVCs σε άλλους κρίσιμους ζυγούς. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η ονομαστική ισχύς του SVC τόσο πιο αποδοτικό είναι. Στη συνέχεια, αναλύεται η εισαγωγή ενός TCSC στη γραμμή μεταφοράς 114-110 (ζυγός 114) με 90 % αντιστάθμιση και η αύξηση που επιφέρει στη φόρτιση του συστήματος. Εξετάζονται οι στρατηγικές ελέγχου του TCSC, στρατηγική ελέγχου της αντίδρασής του, στρατηγική ελέγχου της ροής ισχύος, στρατηγική ελέγχου του ρεύματος και στρατηγική ελέγχου της γωνίας μεταφοράς, και η επίδρασή τους στη φόρτιση του συστήματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως, ένα TCSC με 90% αντιστάθμιση τοποθετημένο στη γραμμή μεταφοράς 114-110, με έλεγχο της αντίδρασής του, αυξάνει η συνολική ενεργός ισχύς του εξυπηρετούμενου φορτίου στα 58744.42 MW, δηλαδή σημειώνεται αύξηση 4.5% σε σχέση με τη βασική περίπτωση. Αυτός ο τρόπος ελέγχου αυξάνει τη φόρτιση του δικτύου περισσότερο από κάθε άλλο τρόπο ελέγχου. Όσο μειώνεται η αντιστάθμιση του TCSC, τόσο μειώνεται και η αύξηση της φόρτισης του συστήματος.

Στο άρθρο [32] εξετάζεται η εισαγωγή του UPFC στα συστήματα των 39-ζυγών της Νέας Αγγλίας και σε ένα σύστημα 179 ζυγών, με σκοπό τη μείωση της μέσης φόρτισης στις υπερφορτισμένες γραμμές μεταφοράς των δικτύων. Στο σύστημα των 39-ζυγών της Νέας Αγγλίας, εξετάζεται η περίπτωση διαταραχής-αποκοπής της γραμμής μεταφοράς 4-5, η οποία προκαλεί υπέρ-φόρτιση στις γραμμές μεταφοράς 10-13 και 13-14 και παραβίαση της τάσης στο ζυγό 4. Εξετάζονται 3 περιπτώσεις εγκατάστασης μίας συσκευής UPFC με τις βέλτιστες παραμέτρους κάθε φορά, ώστε να αντιμετωπιστούν τα άνωθεν προβλήματα. Στην πρώτη περίπτωση (case I) το UPFC τοποθετείται στο ζυγό 16 για να ελέγχει τη ροή ισχύος στη γραμμή μεταφοράς 16-17, στη δεύτερη περίπτωση (case II) τοποθετείται στο ζυγό 15 για να ελέγχει τη ροή ισχύος στη γραμμή μεταφοράς 15-16 και στην τρίτη περίπτωση (case III) τοποθετείται στο ζυγό 4 για να ελέγχει τη ροή ισχύος στη γραμμή μεταφοράς 4-14. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες 5.7 και 5.8.

**Πίνακας 5.7:** Έλεγχος ροής ισχύος στις τρεις περιπτώσεις εγκατάστασης UPFC, στην περίπτωση διαταραχής-αποκοπής της γραμμής μεταφοράς 4-5

<b><u>Υπέρ-φορτίσεις</u></b>	<b>Ροή ισχύος στη γ.μ.</b>	<b>Όριο γ.μ.</b>	<b>Ποσό της υπέρ-φόρτισης</b>
<b>Υπέρ-φόρτιση στη γ.μ. 10-13</b>	<b>568.55 MVA</b>	<b>550 MVA</b>	<b>18.55 MVA</b>
	Ροή ισχύος στη γ.μ.	Όριο γ.μ.	Περιθώριο ασφαλείας
Case I	528.03 MVA	550 MVA	21.97 MVA
Case II	518.73 MVA	550 MVA	31.27 MVA
Case III	532.28 MVA	550 MVA	17.72 MVA
<b>Υπέρ-φόρτιση στη γ.μ. 13-14</b>	<b>574.90 MVA</b>	<b>550 MVA</b>	<b>24.90 MVA</b>
	Ροή ισχύος στη γ.μ.	Όριο γ.μ.	Περιθώριο ασφαλείας
Case I	532.53 MVA	550 MVA	17.47 MVA
Case II	528.56 MVA	550 MVA	21.44 MVA
Case III	548.20 MVA	550 MVA	1.80 MVA
<b><u>Παραβίαση τάσης</u></b>	<b>Τάση ζυγού</b>	<b>Όριο τάσης ζυγού</b>	<b>Ποσό παραβίασης τάσης</b>
<b>Στο ζυγό 4</b>	<b>0.94878 α.μ.</b>	<b>0.95 α.μ.</b>	<b>-0.00122 α.μ.</b>
	Τάση ζυγού	Όριο τάσης ζυγού	Περιθώριο ασφαλείας
Case I	0.95672 α.μ.	0.95 α.μ.	0.00672 α.μ.
Case II	0.96757 α.μ.	0.95 α.μ.	0.01757 α.μ.
Case III	0.95368 α.μ.	0.95 α.μ.	0.00369 α.μ.

**Πίνακας 5.8:** Μέση φόρτιση των υπέρ-φορτισμένων γραμμών στις τρεις περιπτώσεις εγκατάστασης του UPFC.

Μέση φόρτιση	Case I	Case II	Case III
Πριν την εγκατάσταση	0.6618	0.6618	0.6618
Μετά την εγκατάσταση	0.6478	0.6457	0.6629

Παρατηρείται ότι, οι περιπτώσεις I και II δεν ανακουφίζουν μόνο από υπέρ-φορτίσεις και παραβιάσεις τάσεων αλλά επιτυγχάνουν και μεγάλα περιθώρια ασφάλειας. Ενώ, η περίπτωση III ανακουφίζει από υπέρ-φορτίσεις και παραβιάσεις τάσεων, αλλά τα περιθώρια ασφάλειας είναι μικρά και η μέση φόρτιση των γραμμών αντί να αυξάνεται, μειώνεται, οπότε δεν κρίνεται κατάλληλη η θέση για εγκατάσταση UPFC. Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και για το σύστημα των 179 ζυγών, όταν σε αυτό συμβαίνει κάποια άλλη διαταραχή-αποκοπή γραμμής μεταφοράς.

Στο άρθρο [44] εξετάζεται η βέλτιστη τοποθέτηση SVCs σε ένα δίκτυο μεταφοράς, με σκοπό την αύξηση του περιθωρίου φόρτισής του. Τα εξεταζόμενα δίκτυα είναι ένα σύστημα 40 ζυγών της νότιας Αγγλίας, το σύστημα IEEE-300 ζυγών και ένα ιταλικό δίκτυο 1228 ζυγών. Στο σύστημα των 40 ζυγών εξετάζονται οι περιπτώσεις της βασικής περίπτωσης χωρίς διαταραχές, τέσσερις περιπτώσεις διαταραχών-αποκοπών γραμμών μεταφοράς, γραμμή μεταφοράς 29-1, 26-39, 17-18 και 5-6, αντίστοιχα, και μία περίπτωση πολλαπλών σεναρίων-αποκοπών γραμμών μεταφοράς. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η φόρτιση του συστήματος στη βασική περίπτωση λειτουργίας χωρίς διαταραχές παρουσιάζει τη μεγαλύτερη φόρτιση. Όσο αυξάνονται οι συσκευές που εισάγονται στο σύστημα, τόσο περισσότερο αυξάνεται η φόρτιση του δικτύου. Το ίδιο ισχύει και στις υπόλοιπες περιπτώσεις διαταραχών-αποκοπής κάποιας γραμμής μεταφοράς, με τη μόνη διαφορά ότι η αρχική φόρτιση είναι μικρότερη συγκριτικά με τη φόρτιση της βασικής περίπτωσης. Βέβαια, υπάρχει ένας οριακός αριθμός εγκατεστημένων συσκευών, ο οποίος προσδιορίζεται σε κάθε περίπτωση, ο οποίος αν ξεπεραστεί, η φόρτιση του συστήματος σταματάει να αυξάνεται. Ίδια αποτελέσματα διεξάγονται και στα άλλα δύο συστήματα, στα οποία, όμως, εξετάζεται μόνο η βασική περίπτωση λειτουργίας.

Στο άρθρο [86] εξετάζεται ο βέλτιστος τύπος, η βέλτιστη τοποθεσία, ο βέλτιστος αριθμός και η βέλτιστη διαστασιολόγηση διαφόρων ΕΣΜ σε συστήματα, τα οποία περιέχουν μέχρι και 300 ζυγούς, με στόχο τη μεγιστοποίηση της φόρτισης των συστημάτων. Τα εξεταζόμενα ΕΣΜ είναι το SVC, το TCSC, το TCPST, το TCVR και το UPFC. Αρχικά, μέσω της εργαλειοθήκης GUI του matlab αρκετοί συνδυασμοί ΕΣΜ τοποθετούνται βέλτιστα σε διαφορετικά IEEE συστήματα. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για ένα σύστημα IEEE-57 ζυγών τοποθετούνται βέλτιστα 1 SVC, 2 TCSCs, 1 TCPST και 1 UPFC και η αύξηση στη φόρτιση του συστήματος είναι 21%, ενώ η μείωση στις απώλειες στις γραμμές μεταφοράς είναι 10 MW (0.71%). Για ένα σύστημα IEEE-300 ζυγών τοποθετούνται βέλτιστα 2 SVCs, 2 TCSCs, 1 TCVR, 1 TCPST και 1 UPFC και η αύξηση στη φόρτιση του συστήματος είναι 13 %, ενώ η μείωση στις απώλειες

στις γραμμές μεταφοράς είναι 7 MW (0.035%). Στη συνέχεια, εξετάζεται η επιρροή διαφορετικών συνδυασμών ΕΣΜ, ίδιου ή διαφορετικού τύπου, διαφόρων αριθμών στο σύστημα της Νέας Αγγλίας των 39 ζυγών. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως 2 SVCs (4% αύξηση της φόρτισης) δεν μπορούν να βελτιώσουν τη φόρτιση του συστήματος σημαντικά σε σύγκριση με το 1 SVC (3.5% αύξηση της φόρτισης), όταν αυτά τοποθετούνται μεμονωμένα στο σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι, ακόμη και αν αυξηθεί ο αριθμός (ή το μέγεθος) των SVCs, είναι τεχνικά αδύνατο να βελτιωθεί η φόρτιση του συστήματος, όταν αυτά τοποθετούνται μεμονωμένα. Το ίδιο ισχύει και για τα TCVRs και τα TCPSTs. Το TCVR είναι πιο αποδοτικό (4% αύξηση της φόρτισης), όσο αφορά την ενίσχυση της φόρτισης του ΣΗΕ, συγκριτικά με το TCPST (2% αύξηση της φόρτισης). Όμως, όσο και αν αυξηθεί ο αριθμός των TCVRs και των TCPSTs δεν αυξάνεται η φόρτιση του συστήματος, όταν αυτά τοποθετούνται μεμονωμένα στο δίκτυο. Η επιρροή TCVR και TCPST στη μείωση των απωλειών μεταφοράς είναι η μικρότερη συγκριτικά με τα υπόλοιπα ΕΣΜ. Ακόμη παρατηρείται πως δεν υπάρχει αύξηση στη φόρτιση του συστήματος με την τοποθέτηση δύο αντί ενός μεμονωμένου UPFC (4% αύξηση της φόρτισης). Σημειώνεται πως το UPFC είναι το πιο αποδοτικό ΕΣΜ, βάση της μείωσης των απωλειών μεταφοράς, σε σύγκριση με τα υπόλοιπα ΕΣΜ. Η μέγιστη ενίσχυση της φόρτισης του συστήματος επιτυγχάνεται όταν ένα από κάθε είδος ΕΣΜ (5 συνολικά εγκατεστημένα ΕΣΜ) τοποθετηθεί βέλτιστα στο δίκτυο και ανέρχεται σε 8% αύξηση της φόρτισης του συστήματος. Στη συνέχεια, εξετάζεται η επιρροή όταν ένα από κάθε είδος ΕΣΜ (5 στο σύνολο: 1 SVC, 1 TCSC, 1 TCVR, 1 TCPST και 1 UPFC) τοποθετείται βέλτιστα σε ένα IEEE σύστημα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για ένα IEEE-300 ζυγών με 5 τοποθετημένες συσκευές η αύξηση της φόρτισης του συστήματος ανέρχεται στα 9%, ενώ με 7 τοποθετημένες συσκευές, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, ανέρχεται στα 13%. Τέλος, διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα ότι το UPFC είναι το πιο αποδοτικό από όλα τα ΕΣΜ, αν το ζητούμενο είναι η αύξηση της φόρτισης του συστήματος με την ταυτόχρονη μείωση των απωλειών μεταφοράς.

Στο άρθρο [88] εξετάζεται βέλτιστη τοποθέτηση του STATCOM σε ένα σύστημα IEEE-118 ζυγών, με σκοπό την αύξηση της φόρτισης του δικτύου. Το σύστημα χωρίζεται σε 3 περιοχές. Σε κάθε περιοχή τοποθετούνται ένα ή δύο μεμονωμένα STATCOMs τη φορά. Τα αποτελέσματα που διεξάγονται για την τοποθέτηση ενός STATCOM στις περιοχές 1, 2 και 3 είναι αύξηση της φόρτισης του συστήματος 2% σε κάθε περίπτωση, ενώ όταν τοποθετούνται δύο STATCOMs στις περιοχές 1, 2, και 3, η αύξηση της φόρτισης του συστήματος είναι 5%, 5% και 4%, αντίστοιχα.

Το άρθρο [96], παρόμοια με το άρθρο [86], εξετάζει την εισαγωγή διάφορων τύπων ΕΣΜ στο δίκτυο της Hydro-Quebec, το οποίο αποτελείται από 884 ζυγούς και έχει συνολικό αρχικό φορτίο 33654 MW, ενώ παράγει συνολικά 35474 MW, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της φόρτισης του συστήματος. Αρχικά, εξετάζεται η εισαγωγή ενός SVC στο σύστημα, στη συνέχεια η εισαγωγή δύο SVCs στο σύστημα και έπειτα η εισαγωγή διάφορων SVCs στο σύστημα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με την εισαγωγή ενός SVC, ονομαστικής ισχύος -592.248 MVAR, υπάρχει αύξηση 2.4% στην αρχική φόρτιση του συστήματος (807.69 MW) και μείωση 0.071% στις ενεργές απώλειες μεταφοράς. Ενώ, η εισαγωγή δύο SVCs, ονομαστικής ισχύος -581.530 MVAR και -538.075 MVAR, επιφέρει αύξηση 3.3% στην αρχική φόρτιση του συστήματος (1110 MW) και μείωση 0.15% στις απώλειες μεταφοράς. Όταν τοποθετούνται περισσότερες συσκευές SVCs στο δίκτυο, η φόρτιση του συστήματος δεν διαφέρει πολύ από την περίπτωση των δύο SVCs, έτσι διαπιστώνεται ότι ο βέλτιστος αριθμός εγκατάστασης συσκευών SVC στο σύστημα αυτό είναι δύο. Τέλος, μελετάται η επίδραση



διαφόρων τύπων ΕΣΜ (μεμονωμένα εγκατεστημένων) στο δίκτυο. Την μεγαλύτερη αύξηση στη φόρτιση του συστήματος αλλά και στη μείωση των απωλειών μεταφοράς την παρουσιάζει το UPFC, ενώ το TCPST παρουσιάζει τη μικρότερη αύξηση στη φόρτιση του συστήματος και το TCSC τη μικρότερη μείωση των απωλειών μεταφοράς. Για το TCPST παρατηρείται πως όταν τοποθετείται και δεύτερη συσκευή στο σύστημα δεν υπάρχει αύξηση στη φόρτιση του δικτύου σε αντίθεση με τα άλλα ΕΣΜ. Τέλος, προκύπτει το ίδιο συμπέρασμα με το άρθρο [86], ότι δηλαδή το UPFC είναι το πιο αποδοτικό από όλα τα ΕΣΜ, αν το ζητούμενο είναι η αύξηση της φόρτισης τους συστήματος με την ταυτόχρονη μείωση των απωλειών μεταφοράς.

Το άρθρο [97] εξετάζει το πρόβλημα της ενίσχυσης του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος με τη βέλτιστη εγκατάσταση του STATCOM. Το εξεταζόμενο σύστημα είναι το σύστημα αξιοπιστίας των 24 ζυγών. Με την εγκατάσταση του STATCOM στις βέλτιστες θέσεις, όπως αυτές προσδιορίζονται από τη μέθοδο του άρθρου, ενισχύεται το περιθώριο φόρτισης του συστήματος, σε φυσιολογικές συνθήκες αλλά και σε συνθήκες διαταραχών του συστήματος.

Με λίγα λόγια, τα ΕΣΜ ενισχύουν τη φόρτιση των ΣΗΕ, βοηθώντας στην καλύτερη λειτουργία του. Όσες περισσότερες συσκευές τοποθετούνται βέλτιστα σε ένα δίκτυο, τόσο αυξάνεται η φόρτιση του δικτύου. Υπάρχει σε κάθε δίκτυο ένας αριθμός για κάθε είδος ΕΣΜ, ο οποίος αν ξεπεραστεί δεν προκαλείται περαιτέρω αύξηση της φόρτισης του συστήματος, ο οποίος είναι και ο βέλτιστος αριθμός αυτού του είδους ΕΣΜ, που πρέπει να τοποθετείται στο σύστημα. Η συντονισμένη λειτουργία των ΕΣΜ, και σε αυτήν την περίπτωση, δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τη μεμονωμένη χρήση τους. Τέλος, το UPFC αποτελεί το πιο αποδοτικό ΕΣΜ για την ενίσχυση του περιθωρίου φόρτισης ενός δικτύου.

## 5.12 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΗΕ ΜΕ ΒΤΔΕΣΜ

Στο άρθρο [14] εξετάζεται η βέλτιστη τοποθέτηση των ΕΣΜ σε ένα σύστημα IEEE-14 ζυγών, με σκοπό τη μείωση του κόστους παραγωγής με την ταυτόχρονη μείωση του κόστους εγκατάστασης των ΕΣΜ. Τα εξεταζόμενα ΕΣΜ είναι το TCSC και το TCPAR. Το σύστημα IEEE-14 ζυγών έχει 4 γεννήτριες κατανεμημένες στους ζυγούς 1, 2, 3 και 4, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως, χωρίς την εγκατάσταση κάποιου ΕΣΜ το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 1948.68 (\$/h). Οι βέλτιστες τοποθεσίες, που προσδιορίζονται για το TCSC και το TCPAR είναι η γραμμή μεταφοράς 4 και οι γραμμές μεταφοράς 4 ή 8, αντίστοιχα. Με την τοποθέτηση του TCSC στη γραμμή μεταφοράς 4 το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 1948.18 \$/h, με την τοποθέτηση του TCPAR στη γραμμή μεταφοράς 4 το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 1943.1 \$/h και με την τοποθέτηση του TCPAR στη γραμμή μεταφοράς 8 το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 1945.1 \$/h, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως το TCPAR είναι πιο αποδοτικό στη μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος συγκριτικά με το TCSC και πως η τοποθέτηση ενός TCPAR στη γραμμή μεταφοράς 4 δίνει το ελάχιστο κόστος από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Στο άρθρο [18] προτείνεται μία υβριδική μέθοδος TS/SA για την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής με ΕΣΜ. Τα ΕΣΜ που εξετάζονται είναι το

**Πίνακας 5.9:** Αποτελέσματα μείωσης λειτουργικού κόστους με τη χρήση ΕΣΜ και χρόνος εκτέλεσης διαφόρων μεθόδων.

Περίπτωση	Συνολικό κόστος (\$/h)	Χρόνος CPU (min)
Case I	804.7837	-
Case II	804.1072	10:24
Case III	804.1072	6:40
Case IV	804.1072	6:24
Case V	804.1072	4:43
Case VI	804.6497	3:21
Case VII	804.1072	4:43
Case VIII	804.1041	7.23
Case IX	803.8459	11.12

TCSC και το TCPS. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται στο σύστημα IEEE-30 ζυγών. Εξετάζονται 9 περιπτώσεις. Η περίπτωση I (case I), στην οποία επιλύεται ένα πρόβλημα OPF χωρίς ΕΣΜ. Οι περιπτώσεις II-V (case II-V), στις οποίες επιλύεται ένα πρόβλημα OPF, με TCSC και TCPS τοποθετημένα στη γραμμή μεταφοράς 3-4, με διαφορετικές μεθόδους επίλυσης, GA, SA, TS, και hybrid TS/SA, αντίστοιχα. Η περίπτωση VI (case VI), στην οποία επιλύεται ένα πρόβλημα OPF με TCSC τοποθετημένο στη γραμμή 3-4. Η περίπτωση VII (case VII), στην οποία επιλύεται ένα πρόβλημα OPF με TCSC και TCPS τοποθετημένα στη γραμμή μεταφοράς 3-4, ίδια με case V. Η περίπτωση VIII (case VIII), στην οποία επιλύεται ένα πρόβλημα OPF με δύο TCSCs τοποθετημένα στις γραμμές μεταφοράς 3-4 και 19-20 και ένα TCPS στη γραμμή μεταφοράς 3-4 και η περίπτωση IX (case IX), στην οποία επιλύεται ένα πρόβλημα OPF με δύο TCSCs τοποθετημένα στις γραμμές μεταφοράς 3-4 και 19-20 και δύο TCPSs τοποθετημένα στις γραμμές μεταφοράς 3-4 και 5-7. Στις περιπτώσεις VI-IX εφαρμόζεται η υβριδική TS/SA μέθοδος. Στον Πίνακα 5.9 φαίνονται τα αποτελέσματα, που διεξάγονται. Αυτά δείχνουν ότι, όσα περισσότερα TCSCs και TCPSs τοποθετούνται στο δίκτυο, τόσο περισσότερο μειώνεται το συνολικό κόστος παραγωγής, συγκεκριμένα από 804.7837 \$/h σε 803.8459 \$/h. Επίσης φαίνεται πως η υβριδική μέθοδος, που προτείνεται στο άρθρο είναι η ταχύτερη συγκριτικά με τις μεθόδους GA, TS και SA.

Στο άρθρο [21] παρουσιάζεται μία υβριδική GA/SLP μέθοδος με σκοπό την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του κόστους εγκατάστασης των ΕΣΜ και του λειτουργικού κόστους του δικτύου σε φυσιολογικές συνθήκες αλλά και σε συνθήκες διαταραχών. Η υβριδική μέθοδος εφαρμόζεται σε ένα σύστημα AEP-14 ζυγών καθώς και σε ένα σύστημα IEEE-54 ζυγών. Το ΕΣΜ που εξετάζεται είναι το SVC. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με την αντιστάθμιση SVC αυξάνεται το περιθώριο φόρτισης του συστήματος, βελτιώνεται το προφίλ των τάσεων του δικτύου, καθώς επίσης μειώνεται το συνολικό κόστος διαταραχών σε μεγάλο βαθμό.

Στο άρθρο [34] εξετάζεται η βέλτιστη τοποθέτηση του UPFC σε ένα δίκτυο, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής του. Τα εξεταζόμενα συστήματα είναι τα συστήματα IEEE-5 ζυγών, 14 ζυγών και 30 ζυγών. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως στο σύστημα IEEE-5 ζυγών το συνολικό κόστος παραγωγής χωρίς UPFC ανέρχεται στα 4460.1 \$/h, ενώ με την τοποθέτηση UPFC μπορεί να μειωθεί στα 4452.0 \$/h. Τέλος, οι γραμμές μεταφοράς με τις υψηλές οριακές τιμές είναι αυτές, που παρουσιάζουν σημαντική εξοικονόμηση κόστους παραγωγής.

Στο άρθρο [49] εξετάζεται η βέλτιστη τοποθέτηση του TCSC σε δύο συστήματα με 5 ζυγούς, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής και του κόστους εγκατάστασης του TCSC (συνολικό κόστος) στο σύστημα. Δύο μέθοδοι προτείνονται για τη βέλτιστη τοποθέτηση του TCSC στα συστήματα και κάθε φορά εξετάζεται ποια από τις δύο δίνει το μικρότερο συνολικό κόστος. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως με την βέλτιστη τοποθέτηση του TCSC προκαλείται ανακούφιση στη συμφόρηση των γραμμών μεταφοράς και μείωση του συνολικού κόστους.

Στο άρθρο [60] εξετάζεται η βέλτιστη τοποθέτηση του TCSC σε ένα ΣΗΕ για εκπαιδευτικές μελέτες αξιοπιστίας, σε ένα σύστημα IEEE-14 ζυγών και σε ένα ΣΗΕ του IEEE για μελέτες αξιοπιστίας. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης εφαρμόζεται για να επιτευχθεί το ελάχιστο κόστος παραγωγής ή διαφορετικά η μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης κόστους. Εξοικονόμηση κόστους ή ετήσιο όφελος είναι η διαφορά του κόστους παραγωγής πριν και μετά την εγκατάσταση των ΕΣΜ στο δίκτυο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για το ΣΗΕ για εκπαιδευτικές μελέτες αξιοπιστίας η βέλτιστη θέση του TCSC είναι ο κλάδος 7, ενώ παρέχεται ετήσια εξοικονόμηση κόστους 0.7m £. Για το σύστημα IEEE-14 ζυγών η βέλτιστη θέση του TCSC είναι ο κλάδος 10, ενώ παρέχεται ετήσια εξοικονόμηση κόστους 1.8m £. Για το ΣΗΕ του IEEE για μελέτες αξιοπιστίας η βέλτιστη θέση του TCSC είναι ο κλάδος 16, ενώ παρέχεται ετήσια εξοικονόμηση κόστους 66538.81 £.

Στο άρθρο [62] εξετάζεται η βέλτιστη εισαγωγή 4 ειδών ΕΣΜ, του SVC, του TCSC, του TCVR και του TCPST, στο σύστημα της Νέας Αγγλίας των 39-ζυγών. Σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος και του κόστους των ΕΣΜ στο δίκτυο, και του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης, για έναν αριθμό λειτουργικών συνθηκών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η εξοικονόμηση κόστους για 10 και 20 χρόνια είναι 254k \$/χρόνο (29 \$/h) και 280k \$/χρόνο (32 \$/h), αντίστοιχα. Ενώ, το συνολικό κόστος συντήρησης και εγκατάστασης των τοποθετημένων TCSCs ανέρχεται στα 1.78m (20.3 \$/h) και 2.51m (14.3 \$/h), για διάρκειας ζωής των TCSCs 10 και 20 ετών, αντίστοιχα.

Στο άρθρο [64] μελετάται η βέλτιστη κατανομή των TCPSTs σε ένα δίκτυο 291 ζυγών, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους υπερφόρτισης στις γραμμές μεταφοράς και του κόστους των TCPSTs. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως με την εγκατάσταση των ΕΣΜ υπάρχει σημαντική βελτίωση στις υπερφορτίσεις των γραμμών μεταφοράς και κατά συνέπεια μείωση του κόστους τους. Πιο συγκεκριμένα, χωρίς κάποιο εγκατεστημένο ΕΣΜ το επίπεδο υπερφορτίσεων στο δίκτυο ανέρχεται στα 9.5121 α.μ. με κόστος  $4.756 \cdot 10^8 \$$ , ενώ με την εγκατάσταση ενός, δύο και τριών TCPSTs οι υπερφορτίσεις μειώνονται σε 8.8741, 8.5042 και 8.2313 α.μ., αντίστοιχα, με αντίστοιχα κόστη  $4.437 \cdot 10^8 \$$ ,  $4.2521 \cdot 10^8 \$$  και  $4.115 \cdot 10^8 \$$ . Με λίγα λόγια, με την εγκατάσταση των TCPSTs παρατηρείται μείωση της συμφόρησης του δικτύου και αυτό έχει αντίκτυπο στο κόστος των υπερφορτίσεων των γραμμών μεταφοράς.

Στο άρθρο [68] εξετάζεται η εισαγωγή των TCSCs και των SVCs σε ένα ΣΗΕ με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού ετήσιου κόστους, δηλαδή την ελαχιστοποίηση του κόστους των συσκευών και τη μεγιστοποίηση του κοινωνικού οφέλους από την εγκατάσταση των συσκευών. Τα εξεταζόμενα συστήματα είναι τα συστήματα IEEE 14 και 30 ζυγών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα στο σύστημα IEEE-14 ζυγών, η συντονισμένη λειτουργία TCSC και SVC εξοικονομεί λίγα περισσότερα από 5.000.000\$ το χρόνο, ενώ η μεμονωμένη τοποθέτηση του SVC εξοικονομεί λίγα λιγότερα από 5.000.000\$ το χρόνο και η μεμονωμένη τοποθέτηση του TCSC εξοικονομεί περίπου 2.000.000\$ το χρόνο. Τα αποτελέσματα αυτά υπολογίζονται για συγκεκριμένα επίπεδα περιθωρίου φόρτισης του δικτύου. Η παράλληλη λειτουργία των δύο ΕΣΜ είναι πιο αποδοτική στη μείωση του ετήσιου κόστους συγκριτικά με την μεμονωμένη λειτουργία τους, ενώ το SVC είναι πιο αποδοτικό συγκριτικά με το TCSC.

Στο άρθρο [69] εξετάζεται η βέλτιστη τοποθέτηση του TCSC στα συστήματα IEEE 6, 14 και 118 ζυγών. Σκοπός του άρθρου είναι η λύση του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου υπό φυσιολογικές συνθήκες αλλά και σε συνθήκες διαταραχών μέσω της βέλτιστης χρησιμοποίησης του TCSC, αποσκοπώντας στην ενίσχυση της στατικής ασφάλειας του συστήματος. Το πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου, που διατυπώνεται εδώ, στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής ενεργού ισχύος με την ενσωμάτωση του TCSC στο δίκτυο. Είναι φανερό από τα αποτελέσματα ότι η βέλτιστη τοποθέτηση του TCSC μειώνει το κόστος παραγωγής όταν το σύστημα λειτουργεί σε φυσιολογικές συνθήκες αλλά και όταν υπόκειται σε διαταραχές αποκοπής κάποιας γραμμής μεταφοράς του δικτύου. Επίσης, η ενσωμάτωση του TCSC στο δίκτυο μειώνει σε σημαντικό βαθμό τις υπερφορτίσεις των γραμμών μεταφοράς υπό οποιεσδήποτε λειτουργικές συνθήκες.

Στο άρθρο [79] αναζητείται η εύρεση της βέλτιστης τοποθεσίας του UPFC στα συστήματα IEEE-14 και 30 ζυγών, με σκοπό να επιτευχθεί OPF. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος της OPF είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους δικτύου, που περιλαμβάνει το κόστος παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος των γεννητριών και το κόστος εγκατάστασης των UPFCs. Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις. Αρχικά επιλύεται η OPF χωρίς UPFC και αγνοώντας τα όρια των γραμμών μεταφοράς, στη συνέχεια τα όρια των γραμμών λαμβάνονται υπόψη και τέλος, εξετάζεται η εισαγωγή ενός UPFC στο σύστημα. Για το σύστημα IEEE-14 ζυγών το συνολικό κόστος για τις δύο πρώτες περιπτώσεις είναι 8972.2 \$/h και 10333.7 \$/h, αντίστοιχα, ενώ με την τοποθέτηση του UPFC μπορεί να μειωθεί μέχρι και στα 7122 \$/h, χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη υβριδική μέθοδο του άρθρου. Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται και από το σύστημα IEEE-30 ζυγών. Ίδια μελέτη πραγματοποιείται και στο άρθρο [92], με τις διαφορές ότι σε αυτό το άρθρο εξετάζεται η εισαγωγή του TCSC στο δίκτυο και ότι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος της OPF είναι μόνο η μείωση του κόστους παραγωγής ενεργού ισχύος.

### **5.13 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΗ, ΜΕΙΩΣΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΗΕ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΣΗΕ ΜΕ ΒΤΔΕΣΜ**

Στο άρθρο [31] εξετάζεται η τοποθέτηση των ΕΣΜ με στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του ΣΗΕ με βάση τη χρησιμότητα του καταναλωτή. Εξετάζεται η διαφορά μεταξύ

του μοντέλου μίας περιόδου (στιγμιαίο μοντέλο) και του μοντέλου πολλαπλών περιόδων. Το μοντέλο μίας περιόδου (ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος) μπορεί να δίνει μία λύση που όμως δεν είναι βέλτιστη σε μία άλλη περίοδο με διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες. Αυτό θα μπορεί να επιφέρει μέχρι και οικονομικές επιβαρύνσεις στις άλλες περιόδους. Ο αριθμός περιόδων του μοντέλου των πολλαπλών περιόδων θα πρέπει να είναι ικανός να δικαιολογεί την επένδυση και να βελτιστοποιεί την τοποθεσία εγκατάστασης των ΕΣΜ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το κόστος εισαγωγής ΕΣΜ του μοντέλου μίας περιόδου είναι 0.32m \$, ενώ το κόστος εισαγωγής ΕΣΜ του μοντέλου πολλών περιόδων είναι 1.462m \$. Έτσι, η διαφορά ανέρχεται στα  $1.462-0.32=1.142$ m \$. Όμως, η χρησιμότητα του καταναλωτή στο μοντέλο πολλών περιόδων είναι 121.24m \$, εν αντιθέσει με το μοντέλο μίας περιόδου, που είναι 116.86m \$. Έτσι, η διαφορά ανέρχεται στα  $121.24-116.86=4.38$ m \$, με το καθαρό κέρδος χρησιμότητας του καταναλωτή να είναι  $4.38-1.142=3.568$ m \$. Είναι φανερό πως, το μοντέλο πολλαπλών περιόδων δίνει περισσότερο όφελος στον καταναλωτή συγκριτικά με το μοντέλο μίας περιόδου.

Στο άρθρο [66] εξετάζεται η εισαγωγή ενός SSSC στα συστήματα IEEE 14 και 30 ζυγών, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της χρησιμότητας του καταναλωτή. Στο σύστημα του IEEE-14 ζυγών εξετάζεται μόνο η βασική περίπτωση λειτουργίας του, ενώ στο σύστημα του IEEE-30 ζυγών εξετάζονται εκτός από τη βασική περίπτωση και περιπτώσεις διαταραχών (αποκοπής γραμμής μεταφοράς), είτε αύξηση φορτίου σε ζυγό του δικτύου. Για κάθε περίπτωση εξετάζονται έξι υπό-περιπτώσεις, περίπτωση χωρίς περιορισμούς ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς και χωρίς SSSC, με περιορισμούς ροής ισχύος στις γραμμές αλλά χωρίς SSSC και με περιορισμούς στις γραμμές και SSSC, χρησιμοποιώντας κάθε φορά ομαλή και μη-ομαλή συνάρτηση κόστους παραγωγής. Παρουσιάζονται ορισμένα από τα αποτελέσματα. Στο σύστημα IEEE-14 ζυγών, η επιβολή περιορισμών ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς μειώνει το κοινωνικό όφελος από 1972.36 \$/h σε 1523.92 \$/h και από 1956.66 \$/h σε 1529.67 \$/h, αν χρησιμοποιείται ομαλή ή μη-ομαλή συνάρτηση κόστους παραγωγής, αντίστοιχα. Επίσης αυξάνει το κόστος παραγωγής. Με την τοποθέτηση όμως του SSSC στην κατάλληλη τοποθεσία και με το κατάλληλο μέγεθος μειώνεται το κόστος παραγωγής και αυξάνει το κοινωνικό όφελος από 1523.92 \$/h σε 1652.69 \$/h και από 1529.67 \$/h σε 1634.46 \$/h, για ομαλή και μη-ομαλή συνάρτηση κόστους παραγωγής, αντίστοιχα. Η επιρροή των συναρτήσεων/καμπυλών κόστους παραγωγής είναι εμφανής στα αποτελέσματα, με τις μη-ομαλές καμπύλες να προκαλούν αύξηση του κόστους παραγωγής και μείωσης του κοινωνικού οφέλους. Και στα δύο συστήματα με την εισαγωγή του SSSC παρέχεται σημαντική βελτίωση στη συνολική χρησιμότητα του καταναλωτή, 136.399 \$/h και 118.97 \$/h για ομαλή και μη-ομαλή συνάρτηση κόστους παραγωγής, αντίστοιχα, στο σύστημα IEEE-14 ζυγών και 256.78 \$/h και 251.28 \$/h, αντίστοιχα, στο σύστημα IEEE-30 ζυγών. Επιπροσθέτως, το κόστος επένδυσης του SSSC είναι της τάξης των 7.6399 \$/h, πολύ μικρότερο από τη βελτίωση του ποσού της χρησιμότητας του καταναλωτή που επιφέρει η εγκατάσταση SSSC.

Στο άρθρο [75] εξετάζεται η βέλτιστη κατανομή των UPFCs στο σύστημα της Νέας Αγγλίας των 39 ζυγών μελετώντας την επιρροή τους στην αύξηση της χρησιμότητας του καταναλωτή και στη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος του συστήματος. Έτσι, οι απώλειες ενεργού ισχύος είναι 42.27 MW, 39.37 MW και 38.21 MW και η χρησιμότητα του καταναλωτή 42252.898 \$/h, 42409.387 \$/h και 42446.907 \$/h όταν στο σύστημα δεν τοποθετείται καμία συσκευή UPFC, όταν τοποθετείται μία συσκευή και όταν τοποθετούνται δύο συσκευές,

αντίστοιχα. Είναι εμφανές ότι με την χρησιμοποίηση δύο συσκευών επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μείωση των απωλειών και μεγαλύτερη αύξηση του κοινωνικού οφέλους.

Στο άρθρο [90] εξετάζεται η εισαγωγή του TCSC σε διάφορα ΣΗΕ. Τα εξεταζόμενα ΣΗΕ είναι ένα σύστημα 5 ζυγών, ένα σύστημα IEEE-14 ζυγών και ένα ινδικό δίκτυο αποτελούμενο από 246 ζυγούς. Στο σύστημα των 5 ζυγών, η χρησιμότητα του καταναλωτή πριν την εγκατάσταση του TCSC ανερχόταν στα 2397 \$/h, μετά την εγκατάσταση του TCSC αυξάνεται στα 5544.361 \$/h, ενώ το κόστος επένδυσης του TCSC ανέρχεται στα 45.401 \$/h. Έτσι η επιπρόσθετη χρησιμότητα του καταναλωτή, που οφείλεται στην εισαγωγή του TCSC, υπολογίζεται στα  $5544.361 - 2397 - 45.401 = 3101.96$  \$/h. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι αυξήσεις στη χρησιμότητα του καταναλωτή στα άλλα δύο συστήματα, οι οποίες ανέρχονται στα 1768.04 \$/h και 811.6736 \$/h για το σύστημα IEEE-14 ζυγών και το ινδικό σύστημα, αντίστοιχα.

Στο άρθρο [33] μελετάται η εισαγωγή των SVC, STATCOM, SSSC και UPFC σε ένα ΣΗΕ 13 ζυγών για καλύτερο έλεγχο της ροής ισχύος, με σκοπό τη μείωση των απωλειών του συστήματος καθώς και τη βελτίωση του προφίλ της τάσης του δικτύου. Δύο περιπτώσεις εισαγωγής ΕΣΜ εξετάζονται, στις οποίες βελτιστοποιούνται οι ρυθμίσεις παραμέτρων των συσκευών. Στην πρώτη περίπτωση, λόγω του χαμηλού προφίλ τάσης του αρχικού δικτύου (χωρίς ΕΣΜ), εισάγονται στο σύστημα δύο SVCs και ένα STATCOM. Τα αποτελέσματα είναι η αύξηση της τάσης των ζυγών, η μείωση των υπερφορτίσεων και η μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος του συστήματος σε ποσοστό 8.8 %. Στη δεύτερη περίπτωση, εισάγονται στο σύστημα δύο UPFCs και ένα SSSC και καταφέρνουν να μειώσουν τις απώλειες του συστήματος σε ποσοστό περίπου 10.2 %.

Στο άρθρο [48] εξετάζεται η εισαγωγή των SSSCs στο σύστημα IEEE-14 ζυγών και στο σύστημα Νέας Αγγλίας 39 ζυγών, με σκοπό τη μείωση των απωλειών μεταφοράς των δικτύων. Στο σύστημα IEEE-14 ζυγών τοποθετούνται τρία SSSCs στις γραμμές μεταφοράς 2-4, 10-11 και 12-13 και εξετάζονται δύο περιπτώσεις. Στην αρχική περίπτωση το σύστημα έχει μία αρχική ζήτηση της τάξης των 258.8 MW, οι απώλειες μεταφοράς του συστήματος με τα SSSCs μειώνονται από τα 22.926 MW στα 13.75 MW (μείωση 40%). Στην δεύτερη περίπτωση αυξάνεται η ζήτηση του συστήματος κατά 40 %, αυτή τη φορά, οι απώλειες μεταφοράς του συστήματος με τα SSSCs μειώνονται από τα 49.185 MW στα 34.43 MW (μείωση 30%). Στο σύστημα Νέας Αγγλίας τοποθετούνται τέσσερα SSSCs στις γραμμές μεταφοράς 4-14, 7-8, 8-9 και 13-14. Η εισαγωγή των SSSCs επιφέρει 64% μείωση στις απώλειες του συστήματος, από 331.6 MW σε 117.98 MW, για συνολική ζήτηση συστήματος 17346 MW. Σε όλες τις περιπτώσεις η άεργη ισχύος, που εισάγεται από τα SSSCs προκαλεί βελτίωση στις τάσεις ορισμένων ζυγών. Αυτή η βελτίωση έχει ως αποτέλεσμα τη χαμηλότερη ροή αέργου ισχύος στις γραμμές μεταφοράς και ως εκ τούτου μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος.

Στα άρθρα [52],[61] εξετάζεται η εισαγωγή των ΕΣΜ στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό να βελτιώσουν τα προφίλ της τάσης τους. Στο άρθρο [52] μελετάται η βέλτιστη διάσταση των TCSCs, STATCOMs και UPFCs σε ένα σύστημα αξιοπιστίας 24 ζυγών με σκοπό την ενίσχυση του προφίλ τάσης του συστήματος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Στο άρθρο [61] εξετάζεται η εισαγωγή των SVC, STATCOM και DVR σε ένα σύστημα 295 ζυγών με σκοπό τη βελτίωση των συνολικών βυθίσεων τάσης του δικτύου. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση αυτών των ΕΣΜ βελτιώνουν το

προφίλ της τάσης των δικτύων, αυξάνοντας τις τάσεις στους ζυγούς, παρέχοντας καλύτερη λειτουργία στα συστήματα.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

### 6.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης και διαστασιολόγησης των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (ΒΤΔΕΣΜ). Αναλύθηκαν οι μεταβλητές σχεδίασής του, οι διάφορες αντικειμενικές συναρτήσεις του καθώς και οι μέθοδοι αντιμετώπισής του. Καταγράφηκαν όλα τα σημαντικά στοιχεία του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ, όπως αυτά αντλήθηκαν από 101 άρθρα δημοσιευμένα σε κορυφαία διεθνή επιστημονικά περιοδικά, καθώς και τα αριθμητικά αποτελέσματα, που προκύπτουν από τα 101 άρθρα και τεκμηριώνουν τα οφέλη της ΒΤΔΕΣΜ στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Αρχικά, μελετήθηκε η δομή, η σύνδεση στο δίκτυο και η λειτουργία των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (ΕΣΜ). Διαχωρίστηκαν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα ΕΣΜ που ελέγχονται από θυρίστορ και τα ΕΣΜ που ελέγχονται από μετατροπείς ισχύος. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν το SVC, το TCSC, το TCPST (ή TCPST) και το TCVR, ενώ στη δεύτερη ανήκουν το STATCOM, το SSSC και το UPFC. Επίσης, μελετήθηκαν και ορισμένα άλλα ΕΣΜ, όπως το DVR και το PWMSC.

Οι στόχοι, που τα άρθρα θέτουν ως αντικειμενικές συναρτήσεις στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της ΒΤΔΕΣΜ καταγράφονται αναλυτικά. Τα προβλήματα της ΒΤΔΕΣΜ, όπως και όλα τα προβλήματα βελτιστοποίησης, διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με το πλήθος των αντικειμενικών τους συναρτήσεων: στα προβλήματα μονού στόχου και στα προβλήματα πολλαπλών στόχων. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ, που εμφανίστηκαν στα 101 άρθρα, αφορούν διάφορες λειτουργίες του δικτύου. Συγκεκριμένα, η βελτίωση της ευστάθειας των ΣΗΕ, που μπορεί να διαχωριστεί ανάλογα με τα είδη της ευστάθειας, σε βελτίωση ευστάθειας γωνίας δρομέα και σε βελτίωση ευστάθειας τάσης ΣΗΕ, εμφανίζεται σαν αντικειμενική συνάρτηση σε αρκετά από τα άρθρα. Πιο αναλυτικά, η βελτίωση ευστάθειας γωνίας δρομέα μπορεί να διαχωριστεί στην ενίσχυση της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, στη μεγιστοποίηση της παρατηρησιμότητας και ελεγκσιμότητας των ΣΗΕ και στην αύξηση του ορίου μεταβατικής ευστάθειας του δικτύου.

Η μεγιστοποίηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς των δικτύων, η μεγιστοποίηση της φόρτισης και η ελαχιστοποίηση του κόστους συμφόρησης των ΣΗΕ, είναι άλλες τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις που εμφανίζονται συχνά στα προβλήματα βελτιστοποίησης, που εξετάζονται. Ακόμη, η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους ΣΗΕ και του κόστους επένδυσης των ΕΣΜ είναι συνηθισμένη αντικειμενική συνάρτηση σε πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου με την ενσωμάτωση ΕΣΜ. Τέλος, λιγότερο συχνές αντικειμενικές συναρτήσεις



αποτελούν η μεγιστοποίηση της χρησιμότητας του καταναλωτή, η ελαχιστοποίηση των απωλειών μεταφοράς και η βελτίωση του προφίλ της τάσης του δικτύου.

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως ο προσδιορισμός της βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης, του βέλτιστου μεγέθους, του βέλτιστου αριθμού και των βέλτιστων ρυθμίσεων παραμέτρων των ΕΣΜ εκπληρώνουν τους στόχους των προβλημάτων και βελτιστοποιούν τα διάφορα χαρακτηριστικά των ΣΗΕ. Βέβαια, τα ΕΣΜ έχουν κάποιο κόστος επένδυσης, αλλά διάφορες μελέτες που διεξήχθησαν έδειξαν ότι το κόστος των ΕΣΜ είναι μικρότερο από το οικονομικό όφελος που επιφέρουν και η επένδυσή τους κρίνεται βιώσιμη και επικερδής. Επίσης, εξετάζεται η επίδραση διαφόρων τύπων ΕΣΜ και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι συνήθως τα UPFC είναι τα πιο αποδοτικά από όλα τα ΕΣΜ, ενώ συνήθως τα ΕΣΜ που ελέγχονται από μετατροπείς ισχύος είναι πιο αποδοτικά από τα ΕΣΜ που ελέγχονται από θυρίστορ. Τέλος, όπως φάνηκε, η συντονισμένη λειτουργία των ΕΣΜ επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα στα δίκτυα συγκριτικά με τη μεμονωμένη λειτουργία τους.

Οι μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: στις αναλυτικές μεθόδους, στις αριθμητικές μεθόδους και στις ευρετικές μεθόδους. Κύριες μέθοδοι των αναλυτικών μεθόδων είναι η ανάλυση ευαισθησίας και η ανάλυση ρυθμών (ή ανάλυση ιδιοτιμών). Κύριες μέθοδοι των αριθμητικών μεθόδων είναι ο γραμμικός προγραμματισμός, ο διαδοχικός προγραμματισμός, ο μη γραμμικός προγραμματισμός και ο μικτός ακέραιος προγραμματισμός με βασικές εφαρμογές του την αποσύνθεση benders και τον αλγόριθμο διακλάδωσης και φράγματος. Κύριες μέθοδοι των ευρετικών μεθόδων είναι ο γενετικός αλγόριθμος, η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων, η προσομοιωμένη απόπτηση και η αναζήτηση με απαγορευμένες καταστάσεις. Όλες οι μέθοδοι περιγράφονται αναλυτικά, ενώ καταγράφονται πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα της καθεμιάς και παρουσιάζονται διαγράμματα ροής τους. Είναι προφανές ότι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι και οι αλγόριθμοι νοημοσύνης σμήνους, που εξελίχτηκαν τα τελευταία χρόνια με την τεράστια ανάπτυξη της επιστήμης των υπολογιστών και του προγραμματισμού είναι πιο αποδοτικοί συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους και εφαρμόζονται συνήθως μέσω προγραμμάτων όπως το matlab.

## 6.2 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Πολλές μελέτες έχουν ήδη πραγματοποιηθεί στο χώρο του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ. Οι περιοχές για μελλοντική έρευνα πάνω στη ΒΤΔΕΣΜ καθώς και οι περιοχές, που μπορούν να μελετηθούν περισσότερο κατηγοριοποιούνται ως εξής:

**1. Συντονισμένος σχεδιασμός.** Οι μελλοντικές εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς θα πρέπει να λειτουργούν σε ένα όλο και πιο ανταγωνιστικό περιβάλλον, θα πρέπει να φροντίσουν για το συντονισμένο σχεδιασμό για να επιτύχουν τον καλύτερο δυνατό έλεγχο και λειτουργία των ΣΗΕ. Η βέλτιστη κατανομή των ΕΣΜ θα πρέπει να διερευνηθεί περισσότερο σε συνδυασμό με άλλες εναλλακτικές λύσεις του σχεδιασμού του συστήματος μεταφοράς, που συμπεριλαμβάνουν την ενίσχυση και την επέκταση του δικτύου. Ο συντονισμένος σχεδιασμός μπορεί να επιφέρει μέγιστα οφέλη για το δίκτυο αλλά και για τους καταναλωτές του.

**2. Κόστος συσκευών ΕΣΜ.** Το κόστος επένδυσης των ΕΣΜ θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στα μοντέλα της ΒΤΔΕΣΜ. Προς το παρόν, μόνο ένας περιορισμένος αριθμός μοντέλων λαμβάνει υπόψη αυτό το κόστος. Η μελλοντική αξιολόγηση της ΒΤΔΕΣΜ πρέπει να βασίζεται στους καθιερωμένους δείκτες των οικονομικών για μηχανικούς, οι οποίοι περιλαμβάνουν τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης και την καθαρά παρούσα αξία. Επιπλέον, δεδομένου ότι υπάρχει μία τάση μείωσης του κόστους των ΕΣΜ, θα ήταν ενδιαφέρον να επαναξιολογηθούν οι εναλλακτικές λύσεις της ΒΤΔΕΣΜ, σε τεχνική και οικονομική βάση, χρησιμοποιώντας τις τρέχουσες τιμές κόστους των ΕΣΜ, δεδομένου ότι αυτή η επαναξιολόγηση θα μπορούσε να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα και συμπεράσματα συγκριτικά με αυτά που λαμβάνονταν ορισμένα χρόνια πριν.

**3. Ευελιξία στις μεταβλητές σχεδίασης.** Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 3.1, τα περισσότερα μοντέλα της ΒΤΔΕΣΜ έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: 1) κατανομή ενός τύπου ΕΣΜ, 2) τα πιο χρησιμοποιημένα ΕΣΜ είναι το TCSC και το SVC και 3) η τοποθεσία των ΕΣΜ είναι η πιο συχνή μεταβλητή σχεδίασης του προβλήματος. Στο μέλλον, οι ερευνητές θα πρέπει να αναπτύξουν μοντέλα με μεγαλύτερη ευελιξία στις μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος βελτιστοποίησης της ΒΤΔΕΣΜ. Παρόλο που τέτοια μοντέλα μπορεί να είναι πιο σύνθετα, θα φέρουν προφανή οφέλη στο δίκτυο και στους καταναλωτές του, αφού όσο υψηλότερη είναι η ευελιξία, τόσο καλύτερα πληρούνται οι στόχοι. Για παράδειγμα, μελλοντικά μοντέλα της ΒΤΔΕΣΜ θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την ταυτόχρονη κατανομή πολλαπλών τύπων ΕΣΜ (π.χ. SVC, TCSC, UPFC, STATCOM, κλπ) και οι μεταβλητές σχεδίασης να είναι ο αριθμός, ο τύπος, η τοποθεσία και το μέγεθος των ΕΣΜ. Προς το παρόν, τέτοια ευελιξία μπορεί να βρεθεί σε ένα πολύ περιορισμένο αριθμό μοντέλων, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.1.

**4. Βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων.** Προς το παρόν, όπως παρατηρείται στον Πίνακα 3.1 μόνο λίγα μοντέλα διατυπώνουν τη ΒΤΔΕΣΜ σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων. Η διαμόρφωση πολλαπλών στόχων είναι ο ιδανικός τρόπος να βελτιστοποιηθούν μαθηματικά συχνά αντικρουόμενοι μονοί στόχοι του δικτύου και των καταναλωτών. Προτείνεται οι μελλοντικές διατυπώσεις του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ να είναι πολλαπλών στόχων.

**5. Πολλαπλές χρονικές περιόδους.** Προς το παρόν, μόνο κάποιες έρευνες πάνω στη ΒΤΔΕΣΜ λαμβάνουν υπόψη πολλαπλές χρονικές περιόδους, ενώ οι περισσότερες μελέτες λαμβάνουν υπόψη μία χρονική περίοδο. Ωστόσο, η λύση, που λαμβάνεται, μέσα σε μία χρονική περίοδο μπορεί να μην είναι βέλτιστη για μία άλλη χρονική περίοδο με διαφορετικές συνθήκες φόρτισης του δικτύου.

**6. Μοντελοποίηση των αβεβαιοτήτων.** Προς το παρόν, λίγα μοντέλα ΒΤΔΕΣΜ λαμβάνουν υπόψη τις αβεβαιότητες. Προτείνεται οι μελλοντικές διατυπώσεις πάνω στη ΒΤΔΕΣΜ να λαμβάνουν υπόψη αβεβαιότητες σχετικά με το φορτίο, την παραγωγή της αιολικής ισχύς και άλλων μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, το κόστος κεφαλαίου και τις τιμές της αγοράς.

**7. Λειτουργικότητα και μοντέλα ΕΣΜ.** Η πρόοδος της τεχνολογίας και του λειτουργικού ελέγχου των ΕΣΜ, καθώς και η ανάπτυξη νέων μοντέλων ΕΣΜ (π.χ. δυναμικά μοντέλα) πρέπει ληφθούν υπόψη στο μέλλον.

**8. Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.** Προς το παρόν, μόνο ορισμένες έρευνες λαμβάνουν υπόψη στο πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ την επιρροή του απελευθερωμένου

περιβάλλοντος της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στο μέλλον, αναμένεται όλο και περισσότερες διατυπώσεις της ΒΤΔΕΣΜ να λαμβάνουν υπόψη διάφορες δομές της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

**9. Βελτιώσεις των μεθόδων βελτιστοποίησης.** Το πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ είναι ένα σύνθετο μικτό ακέραιο μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Βελτιώσεις στην περιοχή των μεθόδων βελτιστοποίησης θα ήταν πολύτιμες για την απόκτηση ακόμα καλύτερων λύσεων στο πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ. Προς το παρόν, οι βέλτιστες ρυθμίσεις των παραμέτρων της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, του γενετικού αλγόριθμου και άλλων ευρετικών μεθόδων βελτιστοποίησης υπολογίζονται με δοκιμή και λάθος. Σαν μελλοντική έρευνα προτείνεται αυτές οι παράμετροι να υπολογίζονται με πιο αυτοματοποιημένο τρόπο, ώστε να βελτιωθεί η απόδοση των ευρετικών μεθόδων.

**10. Εφαρμογές ηλεκτρικών εταιρειών.** Προηγμένα μοντέλα και μέθοδοι υπάρχουν ήδη για το πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ. Παρόλα αυτά, οι περισσότερες εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας είτε δεν χρησιμοποιούν ΕΣΜ στα δίκτυά τους, είτε χρησιμοποιούν ευρετικές διαδικασίες ή εμπειρικούς κανόνες μέσω της κρίσης εμπειρογνομόνων και πρακτική ανάλυση για το πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ. Θα ήταν ωφέλιμο οι ηλεκτρικές εταιρείες να εφαρμόσουν τις μεθόδους και τα μοντέλα της ΒΤΔΕΣΜ για να επιτύχουν το βέλτιστο.

### 6.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μία ταξινομημένη και περιεκτική περιγραφή των μοντέλων και των μεθόδων που εφαρμόζονται στο πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ, αναλύοντας και ταξινομώντας τωρινές και μελλοντικές ερευνητικές τάσεις αυτού του πεδίου. Τα πιο κοινά μοντέλα ΒΤΔΕΣΜ έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: 1) κατανομή ενός τύπου ΕΣΜ, 2) τα πιο συνηθισμένα ΕΣΜ, που εξετάζονται στο πρόβλημα της ΒΤΔΕΣΜ είναι το SVC και το TCSC, 3) η πιο συνηθισμένη μεταβλητή σχεδίασης είναι η τοποθεσία εγκατάστασης των ΕΣΜ και 4) η πιο συνηθισμένη αντικειμενική συνάρτηση είναι η βελτίωση της ευστάθειας γωνίας του δρομέα. Οι μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: στις αναλυτικές μεθόδους, στις αριθμητικές μεθόδους και στις ευρετικές μεθόδους. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές επίλυσης του προβλήματος της ΒΤΔΕΣΜ είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι και οι αναλυτικές μέθοδοι, που βασίζονται στην ανάλυση ευαισθησίας. Οι περιοχές μελλοντικής έρευνας περιλαμβάνουν συντονισμένο σχεδιασμό, κόστος ΕΣΜ, ευελιξία στις μεταβλητές σχεδίασης, βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων και λειτουργικότητα και μοντέλα ΕΣΜ.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] H. F. Wang, F. J. Shift, and M. Li, "Indices for selecting the best location of PSSs or FACTS-based stabilisers in multimachine power systems: A comparative study," *IEE Proc. Generation Transmission and Distribution*, Vol. 144, No. 2, pp. 155–159, Mar. 1997.
- [2] H. F. Wang, F. J. Shift, and M. Li, "Selection of installing locations and feedback signals of FACTS-based stabilisers in multimachine power systems by reduced-order modal analysis," *IEE Proc. Generation Transmission and Distribution*, Vol. 144, No. 3, pp. 263-269, May 1997.
- [3] W. Hubbi, and T. Hiyama, "Placement of static VAR compensators to minimize power system losses," *Electric Power Systems Research*, Vol. 47, No. 2, pp. 95-99, Oct. 1998.
- [4] P. Paterni, S. Vitet, M. Bena, and A. Yokoyama, "Optimal location of phase shifters in the French network by genetic algorithm." *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 37-42, Feb. 1999.
- [5] A. R. Messina, M. O. Begovich, and M. Nayebzadeh, "Analytical investigation of the use of static VAR compensators to aid damping of inter-area oscillations," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 21, No. 3, pp. 199-210, Mar. 1999.
- [6] H. F. Wang, "Selection of robust installing locations and feedback signals of FACTS-based stabilizers in multi-machine power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 2, pp. 569-574, May 1999.
- [7] R. H. Lasseter, and R. Wang, "The impact of generation mix on placement of static VAR compensators," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, pp. 1018-1023, Jul. 1999.
- [8] A. M. Kulkarni, and K. R. Padiyar, "Damping of power swings using series facts controllers," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 21, No. 7, pp. 475-495, Oct. 1999.
- [9] H. F. Wang, "An eigensolution free method of reduced-order modal analysis to select the installing locations and feedback signals of FACTS-based stabilizers," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 21, No. 8, pp. 547-554, Nov. 1999.
- [10] C. Y. Chung, K. W. Wang, and C. T. Tse, "Selection of the location and damping signal for static var compensator based on a versatile modeling," *Electric Power Systems Research*, Vol. 53, No. 1, pp. 7-14, Jan. 2000.
- [11] D. Thukaram, and A. Lomi, "Selection of static VAR compensator location and size for system voltage stability improvement," *Electric Power Systems Research*, Vol. 54, No. 2, pp. 139-150, May 2000.

- [12] S. N. Singh, and A. K. David, "Optimal location of FACTS devices for congestion management," *Electric Power Systems Research*, Vol. 58, No. 2, pp. 71-79, Jun. 2001.
- [13] S. Gerbex, R. Cherkaoui, and A. J. Germond, "Optimal location of multi-type FACTS devices in a power system by means of genetic algorithms," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 3, pp. 537-544, Aug. 2001.
- [14] S. N. Singh, and A. K. David, "A new approach for placement of FACTS devices in open power markets," *IEEE Power Engineering Review*, Vol. 21, No. 9, pp. 58-60, Sep. 2001.
- [15] K. S. Verma, S. N. Singh, and H. O. Gupta, "FACTS devices location for enhancement of total transfer capability," in *Proc. IEEE PES Winter Meeting*, pp. 522-527, Oct. 2001.
- [16] J. M. Ramirez, and I. Coronado, "Allocation of the UPFC to enhance the damping of power oscillations," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 24, No. 2, pp. 355-362, Jun. 2002.
- [17] K. H. Lee, "Optimal siting of TCSC for reducing congestion cost by using shadow prices," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 24, No. 8, pp. 647-653, Oct. 2002.
- [18] W. Ongsakul, and P. Bhasaputra, "Optimal power flow with FACTS devices by hybrid TS/SA approach," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 24, No. 10, pp. 851-857, Dec. 2002.
- [19] T. Orfanogianni, and R. Bacher, "Steady-state optimization in power systems with series FACTS devices," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No.1, pp. 19-26, Feb. 2003.
- [20] A. R. Messina, M. A. Perez, and E. Hernandez, "Co-ordinated application of FACTS devices to enhance steady-state voltage stability," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 25, No.4, pp. 259-267, May 2003.
- [21] E. E. El-Araby, N. Yorino, and H. Sasaki, "A two level hybrid GA/SLP for FACTS allocation problem considering voltage security," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 25, No. 4, pp. 327-335, May 2003.
- [22] S. Gerbex, R. Cherkaoui, and A. J. Germond, "Optimal location of FACTS devices to enhance power system security," *Proc. IEEE Bologna PowerTech Conference*, pp. 61-68, Jun. 2003.
- [23] N. K. Sharma, A. Ghosh, and R. K. Varma, "A novel placement strategy for FACTS controllers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No.3, pp. 982-987, Jul. 2003.
- [24] F. G. M. Lima, F. D. Galiana, I. Kockar, and J. Munoz, "Phase shifter placement in large-scale systems via mixed integer linear programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No.3, pp. 1029-1034, Aug. 2003.
- [25] S. A. Al-Mawsawi, and M. R. Qader, "Optimal location of UPFC applied to nonlinear load model," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 32, No. 1, pp. 1-12, Jan. 2004.
- [26] S. H. Song, J. U. Lim, and S. Moon, "Installation and operation of FACTS devices for enhancing steady-state security," *Electric Power Systems Research*, Vol. 70, No. 1, pp. 7-15, Jun. 2004.

- [27] K. Visakha, D. Thukaram, and L. Jenkins, "Application of UPFC for system security improvement under normal and network contingencies," *Electric Power Systems Research*, Vol. 70, No. 1, pp. 46-55, Jun. 2004.
- [28] A. Kazemi, and B. Badrzadeh, "Modeling and simulation of SVC and TCSC to study their limits on maximum loadability point," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 26, No. 5, pp. 619-626, Jun. 2004.
- [29] X. Y. Bian, C. Y. Chung, K. W. Wang, and C. T. Tse, "Choice of SVC location/signal and its controller design by probabilistic method," *Electric Power Systems Research*, Vol. 71, No. 1, pp. 35-40, Sep. 2004.
- [30] L. Ippolito, and P. Siano, "Selection of optimal number and location of thyristor-controlled phase shifters using genetic based algorithms," *IEE Proc. Generation Transmission and Distribution*, Vol. 151, No. 5, pp. 630-637, Sep. 2004.
- [31] Z. Yu, and D. Lusan, "Optimal placement of FACTS devices in deregulated systems considering line losses," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 26, No. 10, pp. 813-819, Dec. 2004.
- [32] W. Shao, and V. Vittal, "LP-based OPF for corrective FACTS control to relieve overloads and voltage violations," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21, No. 4, pp. 1832-1839, Nov. 2006.
- [33] J. A. Dominguez-Navarro, J. L. Bernal-Agustin, A. Diaz, D. Requena, and E. P. Vargas, "Optimal parameters of FACTS devices in electric power systems applying evolutionary strategies," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 29, No. 1, pp. 83-90, Jan. 2007.
- [34] S. An, J. Condren, and T. W. Gedra, "An ideal transformer UPFC model, OPF first-order sensitivities, and application to screening for optimal UPFC locations," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 1, pp. 68-75, Feb. 2007.
- [35] S. Panda, and R. N. Patel, "Optimal location of shunt FACTS controllers for transient stability improvement employing genetic algorithm," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 35, No. 2, pp. 189-203, Feb. 2007.
- [36] M. Saravanan, S. M. R. Slochanal, P. Venkatesh, and J. P. S. 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.
- [37] N. Acharya, and N. Mithulananthan, "Locating series FACTS devices for congestion management in deregulated electricity markets," *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, No. 3-4, pp. 352-360, Mar. 2007.
- [38] B. K. Kumar, S. N. Singh, and S. C. Srivastava, "Placement of FACTS controllers using modal controllability indices to damp out power system oscillations," *IET Generation Transmission and Distribution*, Vol. 1, No. 2, pp. 209-217, Mar. 2007.
- [39] D. Chatterjee, and A. Ghosh, "TCSC control design for transient stability improvement of a multi-machine power system using trajectory sensitivity," *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, No. 5-6, pp. 470-483, Apr. 2007.
- [40] P. Jirapong, and W. Ongsakul, "Optimal placement of multi-type FACTS devices for total transfer capability enhancement using hybrid evolutionary algorithm," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 35, No. 9, pp. 981-1005, Jun. 2007.
- [41] M. M. Farsangi, H. Nezamabadi-pour, Y. Song, and K. Y. Lee, "Placement of SVCs and selection of stabilizing signals in power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 3, pp. 1061-1071, Aug. 2007.

- [42] M. H. Haque, "Best location of SVC to improve first swing stability limit of a power system," *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, No. 10, pp. 1402-1409, Aug. 2007.
- [43] J. Zhang, J. Y. Wen, S. J. Cheng, and J. Ma, "A novel SVC allocation method for power system voltage stability enhancement by normal forms of diffeomorphism," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 4, pp. 1819-1825, Nov. 2007.
- [44] R. Minguez, F. Milano, R. Zarate-Minano, and A. J. Conejo, "Optimal network placement of SVC devices," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 4, pp. 1851-1860, Nov. 2007.
- [45] J. G. Singh, S. N. Singh, and S. C. Srivastava, "An approach for optimal placement of static var compensators based on reactive power spot price," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 4, pp. 2021-2029, Nov. 2007.
- [46] G. Y. Yang, G. Hovland, R. Majumder, and Z. Y. Dong, "TCSC allocation based on line flow based equations via mixed-integer programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 4, pp. 2262-2269, Nov. 2007.
- [47] M. Rashidinejad, H. Farahmand, M. Fotuhi-Firuzabad, and A. A. Gharaveisi, "ATC enhancement using TCSC via artificial intelligent techniques," *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 1, pp. 11-20, Jan. 2008.
- [48] A. El-Zonkoly, "Optimal sizing of SSSC controllers to minimize transmission loss and a novel model of SSSC to study transient response," *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 11, pp. 1856-1864, Nov. 2008.
- [49] H. Besharat, and S. A. Taher, "Congestion management by determining optimal location of TCSC in deregulated power systems," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 30, No. 10, pp. 563-568, Dec. 2008.
- [50] N. D. Ghawghawe, and K. L. Thakre, "Computation of TCSC reactance and suggesting criterion of its location for ATC improvement," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 31, No. 2-3, pp. 86-93, Feb.-Mar. 2009.
- [51] J. G. Singh, S. N. Singh, and S. C. Srivastava, "Optimal placement of unified power flow controller based on system loading distribution factors," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 37, No. 4, pp. 441-463, Mar. 2009.
- [52] S. O. Faried, R. Billinton, and S. Aboreshaid, "Probabilistic technique for sizing FACTS devices for steady-state voltage profile enhancement," *IET Generation Transmission and Distribution*, Vol. 3, No. 4, pp. 385-392, Apr. 2009.
- [53] X. Fang, J. H. Chow, X. Jiang, B. Fardanesh, E. Uzunovic, and A. Edris, "Sensitivity methods in the dispatch and siting of FACTS controllers," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No. 2, pp. 713-720, May 2009.
- [54] H. I. Shaheen, G. I. Rashed, and S. J. Cheng, "Application of differential evolution algorithm for optimal location and parameters setting of UPFC considering power system security," *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 19, No. 7, pp. 911-932, Oct. 2009.
- [55] T. Jain, S. N. Singh, and S. C. Srivastava, "Dynamic ATC enhancement through optimal placement of FACTS controllers," *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, No. 11, pp. 1473-1482, Nov. 2009.
- [56] A. R. Phadke, M. Fozdar, and K. R. Niazi, "A new multi-objective formulation for optimal placement of shunt flexible AC transmission systems controller," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 37, No. 12, pp. 1386-1402, Nov. 2009.

- [57] R. Benabid, M. Boudour, and M. A. Abido, "Optimal location and setting of SVC and TCSC devices using non-dominated sorting particle swarm optimization," *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, No. 12, pp. 1668-1677, Dec. 2009.
- [58] J. V. Milanovic, and Y. Zhang, "Global minimization of financial losses due to voltage sags with FACTS based devices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 1, pp. 298-306, Jan. 2010.
- [59] S. Rahimzadeh, M. Tavakoli Bina, and A. H. Viki, "Simultaneous application of multi-type FACTS devices to the restructured environment: achieving both optimal number and location," *IET Generation Transmission and Distribution*, Vol. 4, No. 3, pp. 349-362, Mar. 2010.
- [60] S. J. Galloway, I. M. Elders, G. M. Burt, and B. Sookananta, "Optimal flexible alternative current transmission system device allocation under system fluctuations due to demand and renewable generation," *IET Generation Transmission and Distribution*, Vol. 4, No. 6, pp. 725-735, Jun. 2010.
- [61] Y. Zhang, and J. V. Milanovic, "Global voltage sag mitigation with FACTS-based devices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 4, pp. 2842-2850, Oct. 2010.
- [62] A. A. Alabduljabbar, and J. V. Milanovic, "Assessment of techno-economic contribution of FACTS devices to power system operation," *Electric Power Systems Research*, Vol. 80, No. 10, pp. 1247-1255, Oct. 2010.
- [63] H. I. Shaheen, G. I. Rashed, and S. J. Cheng, "Optimal location and parameter setting of UPFC for enhancing power system security based on differential evolution algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 33, No. 1, pp. 94-105, Jan. 2011.
- [64] V. E. Wirmond, T. S. P. Fernandes, and O. L. Tortelli, "TCPST allocation using optimal power flow and genetic algorithms," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 33, No. 4, pp. 880-886, May 2011.
- [65] N. Magaji, and M. W. Mustafa, "Optimal location and signal selection of UPFC device for damping oscillation," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 33, No. 4, pp. 1031-1042, May 2011.
- [66] S. M. H. Nabavi, M. A. S. Masoum, and A. Kazemi, "A fuzzy-based genetic algorithm for social welfare maximization by placement and sizing of static synchronous series compensator," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 39, No. 13, pp. 1329-1352, Sep. 2011.
- [67] A. Y. Abdelaziz, M. A. El-Sharkawy, and M. A. Attia, "Optimal location of thyristor-controlled series compensators in power systems for increasing loadability by genetic algorithm," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 39, No. 13, pp. 1373-1387, Sep. 2011.
- [68] R. S. Wibowo, N. Yorino, M. Eghbal, Y. Zoka, and Y. Sasaki, "FACTS devices allocation with control coordination considering congestion relief and voltage stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 4, pp. 2302-2310, Nov. 2011.
- [69] K. S. Sundar, and H. M. Ravikumar, "Selection of TCSC location for secured optimal power flow under normal and network contingencies," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 34, No. 1, pp. 29-37, Jan. 2012.



- [70] A. L. Ara, A. Kazemi, and S. A. Nabavi Niaki, "Multiobjective optimal location of FACTS shunt-series controllers for power system operation planning," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 2, pp. 481-490, Apr. 2012.
- [71] Y. C. Chang, "Multi-objected optimal SVC installation for power system loading margin improvement," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, No. 2, pp. 984-992, May 2012.
- [72] C. F. Yang, G. G. Lai, C. H. Lee, C. T. Su, and G. W. Chang, "Optimal setting of reactive compensation devices with an improved voltage stability index for voltage stability enhancement," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 37, No. 1, pp. 50-57, May 2012.
- [73] F. B. Alhasawi, and J. V. Milanovic, "Techno-economic contribution of FACTS devices to the operation of power systems with high level of wind power integration," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, No. 3, pp. 1414-1421, Aug. 2012.
- [74] A. R. Phadke, M. Fozdar, and K. R. Niazi, "A new multi-objective fuzzy-GA formulation for optimal placement and sizing of shunt FACTS controller," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 40, No. 1, pp. 46-53, Sep. 2012.
- [75] P. K. Tiwari, and Y. R. Sood, "Efficient and optimal approach for location and parameter setting of multiple unified power flow controllers for a deregulated power sector," *IET Generation Transmission and Distribution*, Vol. 6, No. 10, pp. 958-967, Oct. 2012.
- [76] H. Farahmand, M. Rashidinejad, A. Mousavi, A. A. Gharaveisi, M. R. Irving, and G. A. Taylor, "Hybrid mutation particle swarm optimization method for available transfer capability enhancement," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 42, No. 1, pp. 240-249, Nov. 2012.
- [77] D. Mondal, A. Chakrabarti, and A. Sengupta, "Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 42, No. 1, pp. 334-340, Nov. 2012.
- [78] R. Sirjani, A. Mohamed, and H. Shareef, "Optimal allocation of shunt Var compensators in power systems using a novel global harmony search algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 43, No. 1, pp. 562-572, Dec. 2012.
- [79] S. A. Taher, and M. K. Amooshahi, "New approach for optimal UPFC placement using hybrid immune algorithm in electric power systems," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 43, No. 1, pp. 899-909, Dec. 2012.
- [80] T. Nireekshana, G. K. Rao, and S. S. N. Raju, "Enhancement of ATC with FACTS devices using real-code genetic algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 43, No. 1, pp. 1276-1284, Dec. 2012.
- [81] A. Kumar, and J. Kumar, "ATC determination with FACTS devices using PTDFs approach for multi-transactions in competitive electricity markets," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 44, No. 1, pp. 308-317, Jan. 2013.
- [82] J. S. Huang, Z. H. Jiang, and M. Negnevitsky, "Loadability of power systems and optimal SVC placement," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 45, No. 1, pp. 167-174, Feb. 2013.
- [83] L. H. Hassan, M. Moghavvemi, H. A. F. Almurib, and O. Steinmayer, "Application of genetic algorithm in optimization of unified power flow controller parameters and its

- location in the power system network,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 46, No. 1, pp. 89-97, Mar. 2013.
- [84] A. Kumar, and C. Sekhar, “Congestion management with FACTS devices in deregulated electricity markets ensuring loadability limit,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 46, No. 1, pp. 258-273, Mar. 2013.
- [85] S. T. J. Christa, and P. Venkatesh, “Multi-objective optimization problem for the thyristor controlled series compensators placement with multiple decision-making approaches,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 249-269, Mar. 2013.
- [86] E. Ghahremani, and I. Kamwa, “Optimal placement of multi-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 2, pp. 764-778, May 2013.
- [87] A. Kumar, and C. Sekhar, “Comparison of Sen transformer and UPFC for congestion management in hybrid electricity markets,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 47, pp. 295-304, May 2013.
- [88] H. Mehrjerdi, E. Ghahremani, S. Lefebvre, M. Saad, and D. Asber, “Authenticated voltage control of partitioned power networks with optimal allocation of STATCOM using heuristic algorithm,” *IET Generation Transmission and Distribution*, Vol. 7, No. 9, pp. 1037-1045, May 2013.
- [89] K. Ravi, and M. Rajaram, “Optimal location of FACTS devices using improved particle swarm optimization,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 49, No. 1, pp. 333-338, Jul. 2013.
- [90] P. K. Tiwari, and Y. R. Sood, “An efficient approach for optimal allocation and parameter determination of TCSC with investment cost recovery under competitive power market,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 3, pp. 2475-2484, Aug. 2013.
- [91] A. Safari, H. A. Shayanfar, and A. Kazemi, “Optimal location of PWM based series compensator in a power system,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 51, pp. 127-133, Oct. 2013.
- [92] T. Duong, Y. Jiangang, and V. Truong, “A new method for secured optimal power flow under normal and network contingencies via optimal location of TCSC,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 52, No. 1, pp. 68-80, Nov. 2013.
- [93] M. Gitizadeh, M. S. Pilehvar, and M. Mardaneh, “A new method for SVC placement considering FSS limit and SVC investment cost,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 53, pp. 900-908, Dec. 2013.
- [94] K. Sebaa, M. Bouhedda, A. Tlemcani, and N. Henini, “Location and tuning of TCPSTs and SVCs based on optimal power flow and an improved cross-entropy approach,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 54, pp. 536-545, Jan. 2014.
- [95] A. Kumar, and J. Kumar, “ATC with ZIP load model-A comprehensive evaluation model with third generation FACTS in restructured electricity markets,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 54, pp. 546-558, Jan. 2014.
- [96] E. Ghahremani, and I. Kamwa, “Analysing the effects of different types of FACTS devices on the steady-state performance of the Hydro-Quebec network,” *IET Generation Transmission and Distribution*, Vol. 8, No. 2, pp. 233-249, Jan. 2014.

- [97] Y. C. Chang, "Transmission system loading margin enhancement with ordinal optimization based STATCOM installation strategy," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 55, pp. 503-510, Feb. 2014.
- [98] J. Sarker, and S. K. Goswami, "Solution of multiple UPFC placement problems using gravitational search algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 55, pp. 531-541, Feb. 2014.
- [99] M. T. Hagh, M. M. B. Sharifian, and S. Galvani, "Impact of SSSC and STATCOM on power system predictability," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 56, pp. 159-167, Mar. 2014.
- [100] Y. C. Chang, "Multi-objective optimal thyristor controlled series compensator installation strategy for transmission system loadability enhancement," *IET Generation Transmission and Distribution*, Vol. 8, No. 3, pp. 552-562, Mar. 2014.
- [101] G. N. Kumar, M. S. Kalavathi, "Cat swarm optimization for optimal placement of multiple UPFC's in voltage stability enhancement under contingency," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 57, pp. 97-104, 2014.
- [102] P. S. Georgilakis, N. Koumiotis, "Optimal Allocation of FACTS Devices in Power Systems: Models, Methods, and Future Research", submitted for publication.
- [103] Γ. Κορρές, *Σημειώσεις Ενέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς*. Αθήνα: ΕΜΠ, 2007.
- [104] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. Wiley-IEEE Press, Dec. 1999.
- [105] R. M. Mathur, and R. K. Varma, *Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems*. Wiley-IEEE Press, Mar. 2002.
- [106] E. Acha, C. R. Fuerte-Asquível, H. Ambriz-Perez, and C. Angeles-Camacho, *FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks*. Wiley-IEEE Press, Feb. 2004.
- [107] X. P. Zhang, C. Rehtanz, and B. Pal, *Flexible AC transmission systems: modeling and control*. Springer, Mar. 2006.
- [108] K. R. Padiyar, *FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution*. New Age International (P) Limited, Publishers, Jan. 2009.
- [109] Α. Η. Λαμπρίδης, *Ανάλυση προσομοίωσης εγκάρσιου στατικού αντισταθμιστή στο πρόγραμμα Matlab*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούνιος 2009.
- [110] Σ. Καφούρος, *Διερεύνηση της λειτουργίας και σχεδιασμός συστήματος ελέγχου του δυναμικού αποκαταστάτη τάσης (DVR) που χρησιμοποιείται στα δίκτυα διανομής*. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Οκτώβριος 2010.
- [111] Κ. Βουρνάς, Β. Κ. Παπαδιάς, και Κ. Ντελκίς, *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας: Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος*. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2011.
- [112] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziaargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definition," *IEEE Power Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 3, pp. 1387-1401, Aug. 2004.