

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

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ειρήνη Α. Λεωνιδάκη

Αθήνα, Οκτώβριος 2006



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ειρήνη Α. Λεωνιδάκη

Συμβουλευτική Επιτροπή : Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς Γεώργιος Ν. Κορρές

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 13^η Οκτωβρίου 2006,

Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Νικόλαος Βοβός Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών Κωνσταντίνος Βουρνάς Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ευάγγελος Διαλυνάς Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σταύρος Παπαθανασίου Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2006

.....

Γεώργιος Κορρές Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

..... Στέφανος Μανιάς Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ειρήνη Α. Λεωνιδάκη Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ειρήνη Α. Λεωνιδάκη 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

Το πρώτο μέρος της παρούσας διατριβής επικεντρώνεται σε θέματα ανάλυσης, που αφορούν στη λειτουργία της ελεγχόμενης αντιστάθμισης (Thyristor Controlled Series Compensation –TCSC) καθώς και σε διάφορα φαινόμενα που εμφανίζονται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όπου εγκαθίστανται διατάξεις αντιστάθμισης σειράς. Αναλυτικότερα, προσομοιώνεται η επίδραση των διατάξεων αντιστάθμισης σειράς στο σύστημα κατά την εμφάνιση συμμετρικών και ασύμμετρων σφαλμάτων καθώς και η συμπεριφορά των διατάξεων προστασίας και παράκαμψης των διατάξεων αυτών. Στο πρόγραμμα EMTP (Electromagnetic Transients Program) αναπτύσσεται ψηφιακό μοντέλο TCSC για τον έλεγχο της μεταβλητής σύνθετης αντίστασής του καθώς και μοντέλο ελέγχου του με στόχο την ανίχνευση υποσύγχρονων ταλαντώσεων και απόσβεσής τους. Επίσης, αναπτύσσονται κατάλληλα μοντέλα TCSC και TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator) για τον έλεγχο της ροής ενεργού ισχύος γραμμών μεταφοράς, παρουσιάζεται ο τρόπος ενσωμάτωσής τους σε υπολογιστικό πακέτο ροής φορτίου και εφαρμόζονται σε μεγάλης κλίμακας μοντέλο του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος ισχύος. Επιπρόσθετα, αναπτύσσεται μεθοδολογία προσδιορισμού των βασικών παραμέτρων σχεδίασης μιας διάταξης TCSC, με βάση την οποία, σχεδιάζεται εργαστηριακό μοντέλο TCSC, το οποίο εγκαθίσταται στο εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ. Επίσης, διερευνώνται οι αρμονικές που δημιουργούνται εντός της διάταξης TCSC και στο σύστημα καθώς και η επίδραση παραμέτρων του TCSC στο μέγεθός τους.

Το δεύτερο μέρος της διατριβής εστιάζεται στο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης θέσης εγκατάσταση διατάξεων αντιστάθμισης σειράς με στόχο την ενίσχυση της ευστάθειας τάσης του συστήματος μετά από κρίσιμες (N-1) διαταραχές του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύσσονται οι ακόλουθες μεθοδολογίες:

α) αναπτύσσεται μεθοδολογία εφαρμογής των Δένδρων Απόφασης (ΔΑ) για την εύρεση της βέλτιστης θέσης και ποσοστού αντιστάθμισης σειράς προκειμένου να αυξηθεί το περιθώριο φόρτισης του συστήματος. Πιο λεπτομερώς, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος δημιουργίας των συνόλων μάθησης και ελέγχου, τα κριτήρια ταξινόμησης των σημείων λειτουργίας του συστήματος σε ασφαλή/μη ασφαλή και ο τρόπος επιλογής των τελικών ιδιοτήτων των ΔΑ. Επίσης, διερευνάται η επίδραση του αριθμού των ιδιοτήτων και της προσέγγισης στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος στην ποιότητα των ΔΑ. Από τα αναπτυχθέντα ΔΑ προκύπτουν όχι μόνο οι κρίσιμες γραμμές για αντιστάθμιση σειράς, αλλά και το ελάχιστο απαιτούμενο ποσοστό αντιστάθμισης αυτών με στόχο την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος.

β) εφαρμόζεται η μέθοδος υπολογισμού της ευαισθησίας του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος μέχρι την κατάρρευση ως προς τις παραμέτρους του συστήματος, θεωρώντας ως παραμέτρους του συστήματος την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς. Ο υπολογισμός των ευαισθησιών βασίζεται στην εύρεση της μικρότερης ιδιοτιμής και του αντίστοιχου αριστερού ιδιοδιανύσματος του Ιακωβιανού πίνακα του εξισώσεων ισορροπίας του συστήματος για φορτίσεις οριακά μικρότερες του σημείου μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ταξινόμηση όλων των γραμμών μεταφοράς ως προς την κρισιμότητά τους για την ευστάθειας τάσης του συστήματος.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθοδολογιών από την εφαρμογή τους στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, μετά από κρίσιμες (N-1) διαταραχές, οδηγεί στην επιλογή των ίδιων κρίσιμων γραμμών μεταφοράς. Επιπρόσθετα, χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν και από τη σύγκριση των δύο μεθοδολογιών, από την οποία αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της καθεμιάς.

$\Lambda \to \Xi \to I \Sigma \to \Lambda \to I \Lambda I \Lambda$

Ελεγχόμενη Αντιστάθμιση Σειράς, Γραμμές Μεταφοράς, Υποσύγχρονος Συντονισμός, Ψηφιακό Μοντέλο, Εργαστηριακό Μοντέλο, Αρμονικές, Ευστάθεια Τάσης, Σημείο Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος, Ευαισθησία Περιθωρίου Φόρτισης, Δένδρα Απόφασης.

ABSTRACT

The first part of this thesis is concentrated on analysis topics referred to the operation of Thyristor Controlled Series Compensation –TCSC and also to phenomena appearing in power systems where series compensation devices are installed. More specifically, the impact of series compensation devices and their protection devices during symmetric and asymmetric faults are simulated. A digital TCSC model is developed in EMTP (Electromagnetic Transients Program) for TCSC impedance control and also a control model for subsynchronous resonance detection and mitigation is incorporated. In addition, TCSC and TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator) models for the control of transmission lines active power flows are developed, incorporated in a load flow simulation package and applied to a large scale model of the Hellenic interconnected power system. In addition, a methodology for the estimation of TCSC parameters is developed, which is applied for the design of a laboratory TCSC model, installed at the Power Systems Laboratory of NTUA. Moreover, the harmonics produced inside the TCSC and in the power system and the impact of TCSC parameters on their magnitude are investigated.

The second part of this thesis focuses on the problem of finding the best location for series compensation installation and its proper compensation rate for power system voltage stability enhancement after critical disturbances (N-1). More specifically, the following methodologies are developed:

a) a methodology for application of Decision Trees (DTs) to the determination of best location and rate of series compensation for power system loading margin increase is developed. In more detail, the algorithm for the creation of learning and control sets, the classification criteria of operating points to safe/unsafe and the procedure for the selection of the final attributes are presented. Moreover, the impact of the attributes number and the approach to the available transfer capability point to DTs quality are investigated. The developed DTs give not only the critical transmission lines for series compensation but also their minimum compensation rate for loading margin increase.
b) The sensitivity of power system loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters is applied for the determination of critical transmission lines, by using transmission lines reactance as system parameters. The sensitivities calculation is based on the smallest eigenvalue of the system Jacobian left eigenvector of a power system operating point very close to the available transfer capability point. In this way, all transmission lines are classified according to how critical they are for power system voltage stability.

Comparison of the results from the two methodologies application to the Hellenic interconnected power system after critical (N-1) disturbances shows that the same critical transmission lines are selected. In addition, the comparison between the two methodologies provides interesting conclusions about the advantages and disadvantages of each one.

KEYWORDS:

Thyristor Controlled Series Compensation; Transmission Lines; Subsynchronous Resonance, Digital Model; Laboratory Model; Harmonics; Voltage Stability; Available Transfer Capability Point; Loading Margin Sensitivity; Decision Trees.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ν. Χατζηαργυρίου.

Επιθυμώ να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον Καθηγητή κ. Νίκο Χατζηαργυρίου για τη συνεχή και πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Τόσο η άριστη επιστημονική του κατάρτιση όσο και η υπομονή και ευγένειά του συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση αυτής της ερευνητικής προσπάθειας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, Καθηγητές κ. Κ. Βουρνά και Γ. Κορρέ και επιπρόσθετα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους αείμνηστους Καθηγητές κ. Β. Παπαδιά και Γ. Κονταξή για την υποστήριξή τους τα χρόνια που διετέλεσαν μέλη της τριμελούς επιτροπής της παρούσας διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Δρ. Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς κ. Γ. Γεωργαντζή και Γ. Μάνο, για τις χρήσιμες επιστημονικές υποδείξεις τους σε επιμέρους θέματα της παρούσας διατριβής και τη φιλική τους συμπαράσταση, καθώς και τους προϊσταμένους μου στη Διεύθυνση Διαχείρισης Δικτύου (ΔΔΔ) της ΔΕΗ, κ. Γ. Αντωνόπουλο και Ν. Δρόσο, για τη συμπαράσταση και κατανόηση που επέδειξαν κατά τη διάρκεια της συγγραφής της διατριβής αυτής.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξη και συμπαράστασή της καθ' όλη τη διάρκεια της ερευνητικής αυτής προσπάθειας.

Την παρούσα διατριβή αφιερώνω στον αείμνηστο πατέρα μου, που δεν ευτύχησε να τη δει ολοκληρωμένη.

Αθήνα, Οκτώβριος 2006

Ειρήνη Α. Λεωνιδάκη

<u>HEPIEXOMENA KEIMENOY</u>

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1. ΟΡΙΣΜΟΙ ΤΩΝ FACTS	13
1.2. ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	14
 1.3. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ 1.3.1.Γενικά για τα FACTS 1.3.2. Διατάξεις αντισταθμισης σειράς 1.3.3. Εύρεση βέλτιστης θέσης εγκατάστασης σειριακής και εγκάρσιας αντιστάθμισης 	15 15 16 18
1.4. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ - ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	21
2. ΤΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ	
ΡΕΥΜΑΤΟΣ (FACTS)	24
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	24
 2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ FACTS 2.2.1. Στατικός Αντισταθμιστής VAR (SVC) 2.2.2. Ελεγχόμενη Αντιστάθμιση Σειράς (TCSC) 2.2.3. Διάταξη Απόσβεσης Υποσύγχρονου Συντονισμού (NGH-SSR damper) 2.2.4. Ρυθμιστής Φασικής Γωνίας Ελεγχόμενος με Θυρίστορ (TCPAR) 2.2.5. Στατικός Πυκνωτής (STATCON) 2.2.6. Εξελιγμένη Ελεγχόμενη Αντιστάθμιση Σειράς (ACSC) 2.7. Ενοποιημένη Διάταξη Ελέγχου Ισχύος (UPFC) 2.8. Δυναμική Πέδη Ελεγχόμενη με θυρίστορ 2.9. Διατάξεις ελεγχόμενες με θυρίστορ στα δίκτυα διανομής 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΣΗΕ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ – ANAIITYΞΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤCSC 3.1.1. Επίδραση της αντιστάθμισης σειράς στην αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος Γ.Μ. 	27 27 29 30 31 32 33 34 34 34 35 35
 3.1.2. Κυριότερες διατάξεις αντιστάθμισης σειράς 3.2. ΜΕΛΕΤΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 3.2.1. Γενικά 3.2.2. Περιγραφή προστατευτικών διατάξεων 3.2.2.1. Κλασσικός τρόπος προστασίας 3.2.2.2. Σύγχρονη προστατευτική διάταξη 3.2.3. Μοντελοποίηση αλεξικέραυνου ΖΠΟ στο ΕΜΤΡ 3.2.4.1. Τριφασικό βραχυκύκλωμα 3.2.4.2. Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων a και b 	36 37 37 39 39 40 41 41 44
 3.3. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤCSC 3.3.1. Περιγραφή λειτουργίας TCSC 3.3.2. Εξισώσεις ρεύματος και τάσης TCSC 3.3.3. Σύνθετη αντίσταση του TCSC στη θεμελιώδη συχνότητα 3.3.4. Μεταβατική συμπεριφορά TCSC 3.3.5. Αρμονικές στο TCSC 3.3.6. Τρόποι ελέγχου του TCSC 3.3.7. V-L Χαρακτηριστική ενώς και πολλαπλών TCSC 	46 46 48 50 51 52 53 54

3.4.1. Μοντελοποίηση του κυκλώματος ισχύος του TCSC 3.4.2. Μοντελοποίηση της λογικής ελέγχου του TCSC 3.4.3. Χαρακτηριστικά του κυκλώματος ισχύος του μοντέλου TCSC	55 57 58
3.4.4. Αποτελεσματα προσομοιωσης	39
3.5. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΥΠΟΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΣΕ ΣΗΕ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ	\mathcal{O}
2ΕΠΑΣ 3.5.1. Ανάληση του φαινομένου SSR	63
3.5.2. Τρόπος απόσβεσης του φαινομένου SSR	63
3.5.2.1. Τρόπος λειτουργίας της διάταξης NGH-SSR damper	63
3.5.2.2. Τρόπος απόσβεσης του φαινομένου SSR μέσω του TCSC	64
3.5.3. Ανάπτυξη μοντέλου ελέγχου του TCSC στο EMTP για απόσβεση SSR	64
3.6. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ FACTS ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ 3.6.1. Γενικά	68 68
3.6.2. Μεθοδολογία εισαγωγής ρυθμίσεων στο πρόγραμμα ροής φορτίου.	69
3.6.3. Μοντέλα TCSC και TCPAR στο πρόγραμμα ροής φορτίου	70
3.6.4. Εφαρμογές στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας	72
4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤCSC-ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	
ΕΓΧΥΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	77
4.1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤCSC	77
4.2. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΤCSC ΚΑΙ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	79
4.3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤCSC	84
4.3.1. Προσδιορισμός παραμέτρων εργαστηριακού μοντέλου TCSC	84
4.5.2. Περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του εργαστηριακού μοντελού TCSC 4.3.3. Αποτελέσματα μετοήσεων και σύγκοισή τους με ποοσομοιώσεις στο EMTP	00 88
4.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	89
	07
5. ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΓΙΑ	
ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ	0.5
	95
51 ΟΡΙΣΜΟΙ	95 95
5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισγύος	95 95 95
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 	95 95 95 98
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 	95 95 95 98 99
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο 	95 95 98 99
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 	95 95 95 98 99 100
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 5.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΗΕΝΟΟΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	95 95 95 98 99 100
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 5.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 	 95 95 98 99 100 101
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 5.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 5.3. ΔΕΝΔΡΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑ ΟΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 	 95 95 95 98 99 100 101 102
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 5.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 5.3. ΔΕΝΔΡΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5.3.1. Το ποάβλημα της στομτεριώμενης μάθησης 	 95 95 95 98 99 100 101 102 102
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 5.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 5.3. ΔΕΝΔΡΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5.3.1. Το πρόβλημα της εποπτευόμενης μάθησης 5.3.1.1. Τεγνικές αυτόματης μάθησης 	 95 95 95 98 99 100 101 102 102 102 102
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 5.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 5.3. ΔΕΝΔΡΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5.3.1. Το πρόβλημα της εποπτευόμενης μάθησης 5.3.1.2. Αξιοποίηση της βάσης γνώσης 	 95 95 98 99 100 101 102 102 102 102 103
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 5.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 5.3. ΔΕΝΔΡΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5.3.1. Το πρόβλημα της εποπτευόμενης μάθησης 5.3.1.2. Αξιοποίηση της βάσης γνώσης 5.3.2. Θεωρία των δένδρων απόφασης 	 95 95 98 99 100 101 102 102 102 103 104
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 5.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 5.3. ΔΕΝΔΡΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5.3.1. Το πρόβλημα της εποπτευόμενης μάθησης 5.3.1.2. Αξιοποίηση της βάσης γνώσης 5.3.2. Θεωρία των δένδρων απόφασης 5.3.2.1. Σύνολα μάθησης και ελέγχου 	 95 95 98 99 100 101 102 102 102 103 104 104 104
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 5.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 5.3. ΔΕΝΔΡΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5.3.1. Το πρόβλημα της εποπτευόμενης μάθησης 5.3.1.1. Τεχνικές αυτόματης μάθησης 5.3.2. Θεωρία των δένδρων απόφασης 5.3.2. Είδη κόμβων 5.3.2. Διάσθμους ανάστηδης δάδου απόφασης 	 95 95 98 99 100 101 102 102 102 103 104 106 107
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Οριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 5.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 5.3. ΔΕΝΔΡΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5.3.1. Το πρόβλημα της εποπτευόμενης μάθησης 5.3.1.2. Αξιοποίηση της βάσης γνώσης 5.3.2. Θεωρία των δένδρων απόφασης 5.3.2. Είδη κόμβων 5.3.2. Η συνάρτηση εντορπίας 	95 95 98 99 100 101 102 102 102 103 104 104 106 107 108
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 5.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 5.3. ΔΕΝΔΡΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5.3.1. Το πρόβλημα της εποπτευόμενης μάθησης 5.3.1.1. Τεχνικές αυτόματης μάθησης 5.3.2. Θεωρία των δένδρων απόφασης 5.3.2. Είδη κόμβων 5.3.2.8. Κλιφριθμος ανάπτυξης δένδρου απόφασης 5.3.2.4. Η συνάρτηση εντροπίας 5.3.2.5. Βέλτιστο κριτήριο διαχωρισμού 	95 95 98 99 100 101 102 102 102 102 102 103 104 104 106 107 108 110
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 5.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 5.3. ΔΕΝΔΡΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5.3.1. Το πρόβλημα της εποπτευόμενης μάθησης 5.3.1.1. Τεχνικές αυτόματης μάθησης 5.3.2. Θεωρία των δένδρων απόφασης 5.3.2.2. Είδη κόμβων 5.3.2.3. Αλγόριθμος ανάπτυξης δένδρου απόφασης 5.3.2.4. Η συνάρτηση εντροπίας 5.3.2.6. Κριτήριο διακοπής διαχωρισμού 	95 95 98 99 100 101 102 102 102 102 103 104 104 106 107 108 110 112
 5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ 5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος 5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος 5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης 5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης 5.2. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 5.3. ΔΕΝΔΡΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5.3.1. Το πρόβλημα της εποπτευόμενης μάθησης 5.3.1. Το πρόβλημα της εποπτευόμενης μάθησης 5.3.2. Αξιοποίηση της βάσης γνώσης 5.3.2. Ειδη κόμβων 5.3.2.3. Αλγόριθμος ανάπτυξης δένδρου απόφασης 5.3.2.4. Η συνάρτηση εντροπίας 5.3.2.5. Βέλτιστο κριτήριο διαχωρισμού 5.3.2.7. Παράμετροι 	95 95 98 99 100 101 102 102 102 102 102 103 104 104 106 107 108 110 112

	5.3.3. Προτεινόμενη μεθοδολογία	114
	5.3.3.1. Δημιουργία των συνόλων μάθησης και ελέγχου	115
	5.3.3.2. Εφαρμογή κριτηρίου ταξινόμησης σε κλάσεις	115
	5.3.3.3. Επιλογή αρχικών υποψήφιων ιδιοτήτων	118
	5.3.3.4. Εξετζόμενες (N-1) διαταραχές	118
	5.3.4. Σχολιασμός των δημιουργηθέντων δένδρων απόφασης	118
	5.3.4.1. Απώλεια μονάδας συνδυασμένου κύκλου (CC) ΛΑΥΡΙΟΥ	118
	5.3.4.2. Απώλεια μονάδας ΙΙ ΛΑΥΡΙΟΥ	130
	5.3.4.3. Απώλεια μονάδας ΙΧ (μεγάλης) ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ	132
	5.3.4.4. Απώλεια μονάδας VIII (μικρής) ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ	134
	5.3.4.5. Απώλεια μονάδας ΙΥ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ	136
	5.3.4.6. Απώλεια γραμμής 400kV ΚΥΤ Καρδιάς - ΚΥΤ Τρικάλων	138
	5.3.4.7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από τα δένδρα απόφασης	139
	5.3.4.8. Τελική επιλογή κρίσιμων γραμμών και ποσοστού αντιστάθμισης από τη	
	μεθοδολογία	140
	5.3.5. Υπολογισμός του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος μετά την αντιστάθμιση	
	σειράς των κρίσιμων νραμμών με το προτενόμενο ποσοστό αντιστάθμισης	141
	5.3.6. Συμπεράσματα από την προτεινόμενη μεθοδολογία	142
5.4.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΣΣΝ ΤΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ	1.40
	ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ	143
	5.4.1. Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος ως προς τις παραμέτρους	1.40
	του συστήματος	143
	5.4.2. Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμώ	v 144
	5.4.3. Βήματα μεθοδολογίας υπολογισμού ευαισθησιών και εύρεσης των κρίσιμων γραμμών	146
	5.4.4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων μεθοδολογίας	148
	5.4.5. Σύμπεράσματα από την εφαρμογή των μεθοδολογίας των ευαισθησιών	158
	5.4.6. Σύγκριση με τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας των Δένδρων Απόφασης	159
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	160
DI	Ο Α ΙΩΓΟ Α ΦΙ Α	164
DI	ΔΑΙΟΙ Ι ΑΨΙΑ	104
	ПАРАРТНМА А	178
	ΑΝΑΛΥΣΗ FOURIER ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΘΥΡΙΣΤΟΡ ΣΤΟ TCSC	
	ПАРАРТНМА В	180
	ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΤCSC ΣΤΟΝ Υ/Σ ΚΑΥΕΝΤΑ	100
	ПАРАРТНМА Г	182
	ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ	
	MONTEAOY TCSC	
	ПАРАРТНМА Д	189
	ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΗΕ ΤΟΥ ΕΜΠ	

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

N / 0 1		20
Σ χημα 2.1 :	Σχηματικό διαγραμμα λειτουργίας των FACIS	26
Σχήμα 2.2 :	Διαχωρισμός συσκευών FACTS ανάλογα με την τεχνολογία θυρίστορ	26
Σχήμα 2.3 :	Διάταξη Στατικού Αντισταθμιστή VAR (SVC)	27
Σχήμα 2.4 :	Μοντέλο SVC	28
Σχήμα 2.5 :	Διάταξη Ελεγχόμενης Αντιστάθμισης Σειράς (TCSC)	30
Σ γήμα 2.6 :	Διάταξη Απόσβεσης Υποσύγγρονων Συντονισμού (NGH-SSR damper)	31
Σ_{γ} ήμα 2.7 : Διάταξη Ρυθαιστή Φασικής Γωνίας Ελεγγόμενης με θυρίστορ (TCPAR)		31
2χήμα 2.7 · Διάταξη Γουμιστή Φασικής Γωνίας Ελεγχομενής με συριστορ (ΓΕΓΑΚ) Σνήμα 2.8 · Διάταξη Στατικού Πυκυωτή (STATCON)		32
$\Sigma_{\chi \eta \mu \alpha} 2.0$	$2\chi_{1}$ μμ 2.6. Διαταζη 2τατικού Πυκνωτη (STATCON)	
$\Sigma_{\rm min}$ 2.9	Every $\Delta (ACSC)$	24
$\Sigma_{\rm min} = 2.10$.	Δινομική Πάδη Απόπβοπης Ταλαιπόπουν	24
$\Sigma \chi \eta \mu \alpha 2.11$.	Δυναμική πεσή Αποσρεσής παλαντώσεων	54 25
2χ ημα 3.1 :	Συστημα απειρού ζύγου-γραμμης μεταφοράς-φορτιού	35
Σ χημα 3.2 :	Καμπυλη μεταφερομενής ενεργού ισχυος Ι.Μ. – τασής στο ακρό της	36
Σ χήμα 3.3 :	Διάφορες διατάξεις αντιστάθμισης σειράς	38
Σχήμα 3.4 :	Διατάξεις προστασίας πυκνωτών σειράς	39
Σχήμα 3.5 :	Χαρακτηριστική V-I μη γραμμικής αντίστασης	40
Σχήμα 3.6 :	Υπό μελέτη σύστημα με πυκνωτή σειράς προστατευμένο από αλεξικέραυνο ZnO	41
Σχήμα 3.7 :	Ρεύμα γραμμής και τάση πυκνωτή κατά τη διάρκεια τριφασικού βραχυκυκλώματος	43
Σ χήμα 3.8 :	Ρεύμα γραμμής, τάση πυκνωτή, ρεύμα και ενέργεια MOV κατά τη διάρκεια διφασικού)
<i>7</i> 0 ft	βραγυκυκλώματος	45
Σχήμα 3.9 ·	Μονογραμιικό διάγραμμα TCSC	46
$\Sigma_{\chi \eta \mu \alpha} 3.10^{\circ}$	Λειτουογία του TCSC σε κατάσταση αποκοπής και διέλευσης των θυοίστοο	47
$\Sigma_{\chi \eta \mu \alpha} 3.10$	Α ειτουργία του TCSC κατά την ελεγγάμενη λειτουργία των θυρίστορ	17
$\Sigma_{\rm min} = 2.11$.		4/
Δχημά 5.12.	το σουναμό κυκλώμα για τον υπολογισμό των εξισώσεων ρεσματός και τασής	40
N 4		48
2χ ημα 3.13:	Ασυμμετρο ρευμα θυριστορ πριν την κατασταση μονιμης λειτουργιας	49
Σχημα 3.14:	Τάση πυκνωτή, ρεύμα θυρίστορ και πυκνωτή στο TCSC στη μόνιμη κατάσταση	49
Σχήμα 3.15:	Σύνθετη αντίσταση του TCSC στη θεμελιώδη συχνότητα συναρτήσει της	
	γωνίας έναυσης α	51
Σχήμα 3.16:	Τάση πυκνωτή και ρεύμα θυρίστορ στο TCSC στις μεταβατικές καταστάσεις	52
Σχήμα 3.17:	Γενικό σχήμα ελέγχου του TCSC	54
Σχήμα 3.18:	Χαρακτηριστική V-I ενός TCSC	54
Σχήμα 3.19:	Χαρακτηριστικές V-I πολλαπλών βαθμίδων TCSC	55
Σγήμα 3.20:	Μονογραμμικό διάγραμμα μοντέλου TCSC στο EMTP	55
Σ γήμα 3.21:	Μοντέλο θυρίστορ σε κατάσταση διέλευσης	56
$\Sigma \gamma \eta \mu \alpha 3 22$	Τυπικές κυματομορφές ρεύματος και τάσης επαναφοράς του θυρίστορ	57
$\Sigma_{\chi \eta \mu \alpha} 3.22$	Μοντελοποίηση του οεύματος επαναφοράς του θυοίστοο στο ΕΜΤΡ	57
$\Sigma_{\chi \eta \mu \alpha} 3.25$	Τρόπος η) οποίησης της έναυσης των θυρίστορ	58
Σ_{m}	Προκός ολολοτησής της εναθοής των θυριοτορ	50
$\Sigma_{\rm min}$ $\Sigma_{\rm min}$ $\Sigma_{\rm min}$		50
2χ ημα 5.26:	Ρευμα γραμμης στο υπο εςεταση συστημα.	60
2χ ημα 3.27:	Κυματομορφες ρευματος στα στοιχεία του ΙCSC	60
Σ χημα 3.28:	Κυματομορφες τασης στα στοιχεια του ICSC	61
Σχήμα 3.29:	Ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή κατά τη μεταβατική περίοδο λειτουργίας του TCSC	61
Σχήμα 3.30:	Επίδραση του TCSC στο σύστημα κατά τη μεταβολή της γωνίας έναυσης των	
	θυρίστορ	62
Σχήμα 3.31:	Διάταξη Απόσβεσης Υποσύγχρονων Ταλαντώσεων Συντονισμού (NGH-SSR damper))64
Σχήμα 3.32:	Πρώτο μοντέλο Benchmark της ΙΕΕΕ για τον υποσύγχρονο συντονισμό	65
Σχήμα 3.33:	Τάση στα άκρα συμβατικού πυκνωτή και πυκνωτή με διάταξη NGH	65
Σ γήμα 3.34:	Ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση στη διάταξη NGH	65
$\Sigma \gamma \eta \mu \alpha 3 35$	Ροπή στον άξονα μεταξύ Γεννήτριας-Διενέρτριας	66
$\Sigma_{\chi \eta \mu \alpha} 3.36$	Ηλεκτοική οοπή	67
Σ_{χ} γ_{μ} γ_{μ	Αλγόριθμος ενσωμάτωσης των μοντέλων TCSC και TCPAR στον Ρ-Α κύκλος	07
$\Delta \chi^{1}$ µµ λ^{1} β^{1} β^{1} β^{1} β^{1}	r στίμστης της T Λ P Φ	72
Sumine 2 20.	οπονοσης της τ.π.τ.ν. Βρός παρακού μπαίος περ Ελλημικό δίκειο 400 VV το πρωτογικά	12
$\Delta \chi \eta \mu \alpha 5.58$	τοες ενεργού ιοχύος στο Ελληνικό σικτύο 400 KV με τη γραμμη Δει Δημήτριος Δάρισα "ακτός"	75
S	Αγ. Δημητριος-Λαριοα εκτος	13
2χημα 3.39:	Ροες ενεργου ισχυος στο Ελληνικο οικτυο 400 KV με εγκατασταση ICSC στη	7-
	γραμμη καροια-Ιρικαλα-Διστομο και τη γραμμη Αγ. Δημητριος-Λαρισα "εκτός"	15

Σχήμα 4.1 :	Σύνθετη αντίσταση του σχεδιασμένου TCSC συναρτήσει της γωνίας έναυσης α	79
$\Sigma_{\gamma \eta \mu \alpha} 42$	Μονογοαμμικό διάγοαμμα συστήματος για διερεύνηση αρμονικών	80
$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} $	Αυτοική ποιεχώματα της τάστις στα άνοα του, πρισμοτή σε αυτοίς ποος τη βασική	00
$\Delta \chi \eta \mu u 4.5$.	Αρμονικό περιεχομένο της τασής ότα ακρά του ποκνωτή σε ά.μ. ως προς τη ρασική	0.0
	ταση, για διαφορες γωνιες εναυσης α.	82
Σχήμα 4.4 :	Φάσμα αρμονικών τάσεως και ρεύματος πυκνωτή στο TCSC, για α=155°	83
Σχήμα 4.5 :	Μονογραμμικό διάγραμμα της εργαστηριακής διάταξης	85
$\Sigma_{\rm min} 4.6$	Φαινόμενη σύνθετη αντίσταση του εργαστηριακού μοντέλου TCSC συναρτήσει	
Δλημα 1.0 .		06
5 / / 5		00
Σχημα 4.7 :	Εμπροσθια οψη του εργαστηριακου μοντελου ΙCSC	87
Σχήμα 4.8 :	Τρόπος υλοποίησης της έναυσης των θυρίστορ στο εργαστηριακό μοντέλο TCSC	88
Σχήμα 4.9 :	Διάταξη για δοκιμές του μοντέλου TCSC στο Εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ	90
$\Sigma \gamma \hat{n} \mu \alpha 4 10^{\circ}$	Τάση στα άκοα του πυκνωτή στη χωρητική περιοχή λειτουργίας	91
$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{1}{n}$	Ρεώμα πριέων στη γωρητική περιοχή λειτουργίας	01
Σ_{χ} $\mu \alpha + 11$.		02
$\Sigma\chi\eta\mu\alpha$ 4.12.	Τασή στα ακρά του πυκνωτή στην επαγωγική περιοχή λειτουργίας	92
Σχήμα 4.13:	Ρεύμα πηνίου στην επαγωγική περιοχή λειτουργίας	92
Σχήμα 4.14:	Φασματική ανάλυση της τάσης πυκνωτή στη χωρητική περιοχή λειτουργίας	93
Σχήμα 4.15:	Φασματική ανάλυση του ρεύματος πηνίου στη γωρητική περιογή λειτουργίας	93
$\Sigma \gamma \hat{n} \alpha 4 16^{\circ}$	Φασματική ανάλυση του οεύματος της νοαιμής στη γωρητική περιογή λειτουογίας	94
-λήμαο.	* achannel around so bechard? Ald that half out Vabilitied webre Vil vour obtained	<i>.</i>
$\nabla x = 5 + 1$	Τ. Υ	07
2χ ημα 5.1 :	Ιαζινομήση της ευσταθείας συστημάτων ισχυος	9/
Σχήμα 5.2 :	Καμπύλη P-V συστήματος δύο ζυγών (χαρακτηριστικές φορτίου z1 <z2<zmax)< td=""><td>99</td></z2<zmax)<>	99
Σχήμα 5.3 :	Αποτύπωση σε καμπύλες Ρ-V του ορίου και του περιθωρίου φόρτισης	
	ενός συστήματος (με φορτία σταθερής ισγύος) πριν και μετά τη διαταραγή	100
$\Sigma \gamma \eta \eta \alpha 5.4$ ·	Οι ΡΥ-καμπύλες του συστήματος γωρίς και με αντιστάθιμση σειράς	101
Σ_{χ} $(\mu\alpha 5.1)$	Δομή ενός συνόλου μάθησης	106
Σ_{χ} i µu 5.5 .		100
Σχημα 5.6 :	Αλγοριθμος αναπτυξης δενόρου αποφασης	109
Σχήμα 5 7·	X^2 συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της \hat{A} με ένα βαθμό ελευθερίας	113
Σ_{χ} Σ_{χ	$\Delta \pi$ εικόνιση σε P-V καμπύλη του σημείου δημιουονίας του συνόλου μάθησης	116
Σ_{χ} (µu 5.0 .	Anteresting $C_{1} = C_{1}$ with the first second	110
2χημα 5.9 :	Απλοποιημένο διαγραμμά του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστηματός	
	παραγωγής-μεταφοράς	116
Σχήμα 5.10:	Αλγόριθμος δημιουργίας της βάσης γνώσης για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή	117
Σχήμα 5.11:	Δένδρο απόφασης (1.α). Απώλεια μονάδας CC Λαυρίου. Σημείο δημιουργίας	
<i>7</i> 0 fi	(10332 - 0.30%) MW 44 ιδιότητες (20 γραμμές ενεργός και άεργος ισγύς	
	αυστήματος και περιοχών, τάσεις κοίσιμων (υνών)	121
Serán 5 12.	$\Delta \dot{m} \delta \sigma $	121
Ζχημα 5.12.	$\Delta \varepsilon vopo anoquong (1.p).$ Analisia povada CC Adoptob. $2 \eta \mu \varepsilon vop \eta \alpha \zeta$	
	(10332 - 0,30%) MW. 38 ιδιότητες (20 γραμμές, ενεργός και άεργος ισχύς	
	συστήματος και περιοχών)	123
Σχήμα 5.13:	Δένδρο απόφασης (1.γ). Απώλεια μονάδας CC Λαυρίου. Σημείο δημιουργίας	
<i>,</i> , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	(10332 - 0.30%) MW. 22 ιδιότητες (20 γραμμές, ενεργός και άεργος ισγύς	
		124
$\nabla (x_1, x_2) = 5 + 1 + 1$	$\Delta i v S = i \pi v m r (1 S)$ $\Delta = i \lambda m r (2 S m$	127
Ζχημα 5.14.	$\Delta \varepsilon vopo anoquotis (1.0). Anascela μονασάς CC Λαυρίου. 21μείο σημιουργίας$	
	$(10332 \pm 0.20\%)$ MW. 38 idiothtes (20 grammes, everyos kai aergos iscus	
	συστήματος και περιοχών)	125
Σχήμα 5.15:	Δένδρο απόφασης (1.ε). Απώλεια μονάδας CC Λαυρίου. Σημείο δημιουργίας	
<i>,</i> , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	$(10332 \pm 0.00\%)$ MW 27 ιδιότητες (10 γραμμές άεργος ισχύς συστήματος	
	(10002 - 0,000,0) $(100,000,0)$	126
Surface 5 16.	$E_{\tau}(S_{\tau}) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum$	120
2χημα 5.16.	Entopaol tou aptahou tav tototittav, oto toto ollatio φ options tou obotilitatos,	100
	στην αποδοση των ΔΑ. Συγκριση μεταξυ των ΔΑ (1.α), (1.β), (1.γ)	128
Σχήμα 5.17:	Επίδραση του ποσοστού μεταβολής φορτίου (προσέγγιση στο σημείο MMI),	
	με σταθερό αριθμό ιδιοτήτων, στην απόδοση των ΔΑ. Σύγκριση μεταξύ των	
	$\Delta A (1.\beta), (1.\delta), (1.\varepsilon)$	128
$\Sigma \gamma \mu \mu \alpha 5.18$	Απώλεια μονάδας CC Λαυρίου. Κρίσιμες νραμμές και ελάνιστο ποσρστό	
2χ m μ 0.10 .	Απωκεία μονιώας ΘΕ Απορίου. Κρισιμές γραμμές και εκαζιστο ποσοστο	120
5 / 5 10	αντισταθμίσης τους για διαφορετικό αριθμο ιδιοτητών	129
2χημα 5.19:	Απωλεια μοναδας CC Λαυριου. Κρισιμες γραμμες και ελάχιστο ποσοστό	
	αντιστάθμισής τους για διαφορετικές φορτίσεις του συστήματος	129
Σχήμα 5.20:	Δένδρο απόφασης (2.α). Απώλεια μονάδας ΙΙ Λαυρίου.	
	Σημείο δημιουργίας (10332MW +0.50%) MW 27 ιδιότητες	130
Σχήμα 5.21 \cdot	Λένδρο απόφασης (2 β) Απώλεια μονάδας Π Λαυοίου	- •
-A. 140 2.21.	$\sum_{n=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i$	120
	2 i μειο σημιουργίας (10332 + 0,7070) 1 i i v . 27 ισιστητές	130

Σχήμα 5.2	22: Απώλεια μονάδας ΙΙ Λαυρίου. Κρίσιμες γραμμές και ελάχιστο ποσοστό	
	αντιστάθμισής τους για διαφορετικές φορτίσεις του συστήματος	131
Σχήμα 5.2	23: Δένδρο απόφασης (3.α). Απώλεια μονάδας ΙΧ Αγ. Γεωργίου.	
	Σημείο δημιουργίας (10332 +0,50%) MW. 27 ιδιότητες	132
Σχήμα 5.	24: Δένδρο απόφασης (3.β). Απώλεια μονάδας ΙΧ Αγ. Γεωργίου.	
	Σημείο δημιουργίας (10332 +0,70%) MW. 27 ιδιότητες	133
Σχήμα 5.2	25: Απώλεια μονάδας ΙΧ Αγ. Γεωργίου. Κρίσιμες γραμμές και ελάχιστο	
	ποσοστό αντιστάθμισής τους για διαφορετικές φορτίσεις του συστήματος	133
Σχημα 5.	26: Δενδρο αποφασης (4.α). Απωλεία μοναδας VIII Αγ. Ι εωργίου.	124
N	2ημείο δημιουργίας (10332 +0,80%) MW. 27 ιδιοτητές	134
Σχημα 5	2/2 Δενόρο αποφασης (4.β). Απωλεία μοναδάς VIII Αγ. Ι εωργίου.	125
Section 5	2ημείο σημιουργίας (10332 +1,00%) Μ.W. 27 ιοιοτητές	135
Ζχημά 5	28. Απωλεία μονασίας VIII Αγ. Ι εωργίου. Κρισιμές γραμμές και ελαχιστο	125
Σνήμα 5	ποσοσίο αντιστασμισης τους για σιαφορετικές φορτισεις του συστηματός 00: Δένδρο απόκαστης (5 α). Δπόλεια μονάδας, IV Μεχαλόπολης	155
2χημα 5	29. Δενόρο αποφασης (5.α). Απαλεία μονασας $1 \sqrt{Meyaλonoλης}$. Σημείο δημιουρχίας (10222 ±0.00%) MW 27 ιδιότητες	126
Σνήμα 5	2ημειο σημιουργιας (10552 ±0,0076) Μ.Ψ. 27 ιοιοτητες 20: Δένδρο απόμαστες (5 β). Δπόλεια μονάδας, IV Μεχαλόπολτς	150
2χημα 5	50. $\Delta \epsilon v o \rho o u no \phi u o \eta c (3.p). An unclu \mu o v u o u c 1 V i N \epsilon v u no v o n \eta c.$	127
Σνήμα 5	2ημείο σημιουργίας (10552 $+$ 0,2070) Μ.Ψ. 27 ισιοτητές	137
2χημα 5	1. Απωπεία μονασας Τν Μεγαποπολης. Κριστμές γραμμές και επαχιστο ποσοστό αντιστάθωσής τους για διαφορετικές φορτίσεις του συστήματος	138
Σνήμα 5	32° Aévôoo $\alpha \pi 6 \alpha \alpha \sigma \pi c$ (6) A $\pi 6 \lambda \epsilon \alpha \gamma 0 \alpha \mu \mu \pi c$ KYT K $\alpha 0 \lambda 6 \alpha c$ KYT Torréhov	150
2χημα 5	Σ Σενόρο αλόφασης (0). Η αρχαία γραμμης ΚΤΤ Καρότας - ΚΤΤ Τρικάλων Σημείο δημιουργίας (10332 +0.00%) MW 27 ιδιότητες	138
Σνήμα 5	21μαίο σημιουργιας (10552 + 0,0070) Μ.Υ. 27 ιοιοτητές	150
2χημα 5	ελάνιστο ποσοστό αντιστάθωσής τους	139
Σχήμα 5	33 - Απεικόνιση σε P-V καιπύλη του σημείου υπολογισμού των ευαισθησιών	145
Σ_{χ} $\gamma_{\mu\alpha} 5$	34· Σχηματικό διάνοαμμα εφαρμογής των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης	110
-λ.μα σ	για την επιλονή της βέλτιστης θέσης, αντιστάθωσης σειοάς	147
Σγήμα 5.	35.α: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωνική αντίδραση	11,
-X-11-0-0-0	των νοαμμών μεταφοράς στην κανονική λειτουργία του συστήματος	151
Σγήμα 5	35.8: Αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση σειράς των	-
<i>x</i>	κρίσιμων γραμμών μεταφοράς στην κανονική λειτουργία του συστήματος	151
Σγήμα 5	36.α: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση	
<i>7</i> 0 H	των γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας CC Λαυρίου	152
Σχήμα 5	36.β: Αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση σειράς των	
	κρίσιμων γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας CC Λαυρίου	152
Σχήμα 5.	37.α: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση	
	των γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας ΙΙ Λαυρίου	153
Σχήμα 5.	37.β: Αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση σειράς των	
	κρίσιμων γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας ΙΙ Λαυρίου	153
Σχήμα 5.	88.α: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση	
	των γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας ΙΧ (μεγάλης)	
	Αγ. Γεωργίου	154
Σχήμα 5.	88.β: Αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση σειράς των	
	κρίσιμων γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας ΙΧ (μεγάλης)	
	Αγ. Γεωργίου	154
Σχήμα 5	39.α: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση	
	των γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας VIII (μικρής)	
	Αγ. Γεωργίου	155
Σχήμα 5	39.β: Αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση σειράς των	
	κρίσιμων γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας VIII (μικρής)	
- · ·	Αγ. Γεωργίου	155
Σχημα 5.4	10.α: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση	1.5.6
5 / 5	των γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας ΙV Μεγαλόπολης	156
Σχημα 5.4	υ.β: Αυζηση του περιθωριου φορτισης από την αντιστάθμιση σειράς των	1.5.6
$\nabla x' = c$	κρισιμων γραμμων μεταφορας κατά την απωλειά της μονάδας ΙV Μεγαλόπολης	156
Σχημα 5.4	1.α: Ευαισθησιες του περιθωριου φορτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση	
	των γραμμων μεταφορας κατά την απώλεια της γραμμής 400 kV	1
	ΚΥΙ Καρδιάς - ΚΥΤ Τρικάλων	157

Σχήμα 5.41.β: Αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση σειράς των		
	κρίσιμων γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της γραμμής 400 kV	
	ΚΥΤ Καρδιάς - ΚΥΤ Τρικάλων	157
Σχήμα 5.42:	Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση	
	των γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας V Καρδιάς	158
Σχήμα Γ.1:	Λειτουργικό σχέδιο a-φάσης εργαστηριακού μοντέλου TCSC	183
Σχήμα Γ.2:	Λειτουργικό σχέδιο b-φάσης εργαστηριακού μοντέλου TCSC	184
Σχήμα Γ.3:	Λειτουργικό σχέδιο c-φάσης εργαστηριακού μοντέλου TCSC	185
Σχήμα Γ.4:	Λειτουργικό σχέδιο του κυκλώματος τροφοδοσίας του εργαστηριακού	
	μοντέλου TCSC	186
Σχήμα Γ.5:	Σχέδιο αποτύπωσης του εξοπλισμού στο κύκλωμα κάθε φάσης του εργαστηριακού	
	μοντέλου TCSC	187

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1:	Οι κυριότερες διατάξεις FACTS	25 .
Πίνακας 3.1:	Επίδραση του TCSC και του TCPAR στους δείκτες παραβίασης ορίων τάσης	
	ζυγών και στις απώλειες ενεργού ισχύος στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα	
	σε (Ν-1) διαταραχή	76
Πίνακας 3.2:	Επίδραση του TCSC και του TCPAR στους δείκτες παραβίασης ορίων τάσης	
	ζυγών και στις απώλειες ενεργού ισχύος στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα	
	σε (N-2) διαταραχή	76
Πίνακας 3.3:	Επίδραση του TCSC στους δείκτες παραβίασης ορίων τάσης ζυγών και στις απώλειε	ς
	ενεργού ισχύος στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα, μετά την ενίσχυσή του,	
	σε (N-1) διαταραχή καθώς και ταυτόχρονη εξαγωγή ισχύος προς Ιταλία	76
Πίνακας 4.1:	Τιμές της σύνθετης αντίστασης Ζ του σχεδιασμένου TCSC συναρτήσει της γωνίας	
	έναυσης α	78
Πίνακας 4.2:	Όρια αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης στο ΚΣΣ	81
Πίνακας 4.3:	THD του ρεύματος γραμμής για διάφορες γωνίες έναυσης των θυριστορ	84
Πίνακας 4.4:	THD της τάσης στα άκρα του TCSC ως προς τη βασική για διαφορετικές τιμές	
	της αυτεπαγωγής L και ίδια τιμή της σύνθετης αντίστασης Z	84
Πίνακας 4.5:	Τεχνικά χαρακτηριστικά εργαστηριακού μοντέλου TCSC	86
Πίνακας 5.1:	Υποψήφιες ιδιότητες στην ανάπτυξη των δένδρων απόφασης	119
Πίνακας 5.2:	Εξεταζόμενες διαταραχές	120
Πίνακας 5.3:	Τελικές ιδιότητες στην ανάπτυξη των δένδρων απόφασης	127
Πίνακας 5.4:	Εκτίμηση απόδοσης των δένδρων απόφασης (1.α) έως (1.ε)	127
Πίνακας 5.5:	Εκτίμηση απόδοσης των δένδρων απόφασης (2.α) έως (6)	139
Πίνακας 5.6:	Σειρά κρισιμότητας υποψηφίων γραμμών μεταφοράς για αντιστάθμιση σειράς	
	σε όλες τις εξεταζόμενες διαταραχές	140
Πίνακας 5.7:	Βέλτιστο ποσοστό αντιστάθμισης των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς σε όλες τις	
	εξεταζόμενες διαταραχές	141
Πίνακας 5.8:	Αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος από την	
	προτεινόμενη από τα δένδρα απόφασης αντιστάθμιση σειράς κρίσιμων γραμμών	141
Πίνακας 5.9:	Γραμμές μεταφοράς 400 kV του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος	150
Πίνακας 5.10	: Ποσοστό αντιστάθμισης γραμμών μεταφοράς 400 kV με εγκατάσταση	
	αντιστάθμισης σειράς 0.0075 α.μ.	150
Πίνακας Β.1:	Τεχνικά χαρακτηριστικά του TCSC στον Υ/Σ Kayenta	180
Πίνακας Β.2:	Τιμές της σύνθετης αντίστασης Z του TCSC στον Y/Σ Kayenta συναρτήσει της	
	γωνίας έναυσης α	181
Πίνακας Γ.1:	Τεχνικά χαρακτηριστικά των κυριότερων στοιχείων σε κάθε φάση του	
	εργαστηριακού μοντέλου TCSC	188

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ FACTS

Η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και οι μεγάλες δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι ηλεκτρικές εταιρείες στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς, υποσταθμών και σταθμών παραγωγής λόγω του τεράστιου κόστους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων έχουν εντείνει διεθνώς τις ερευνητικές προσπάθειες για την εξεύρεση τρόπων εντατικότερης εκμετάλλευσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο όρος εντατικότερη εκμετάλλευση ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας σημαίνει τη χρησιμοποίηση του ήδη υπάρχοντος εξοπλισμού και ειδικότερα των γραμμών μεταφοράς με τρόπο ώστε να λειτουργούν με τη μέγιστη απόδοση χωρίς να ξεπερνούν τα λειτουργικά και φυσικά όρια των συνιστωσών του συστήματος [1-4].

Η αναβάθμιση και εντατικότερη εκμετάλλευση των υφιστάμενων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί τα τελευταία χρόνια διεθνή πρακτική. Ως τα βασικότερα προβλήματα, τα οποία παρουσιάζονται κατά την επίτευξη αυτού του στόχου, ενδεικτικά, μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

- η αδυναμία πλήρους χρησιμοποίησης της ικανότητας των στοιχείων μεταφοράς μέχρι τα επιτρεπόμενα όριά τους,
- η πτώση τάσης κατά μήκος μεγάλων γραμμών μεταφοράς και οι απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος,
- η δυσκολία μεταφοράς και ελέγχου της αέργου ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις,
- η ανομοιομορφία φόρτισης των γραμμών μεταφοράς κυρίως στα διασυνδεδεμένα συστήματα,
- προβλήματα μεταβατικής ευστάθειας μετά από κάποια σοβαρή διαταραχή στο σύστημα, π.χ. κάποιο σφάλμα,
- προβλήματα ευστάθειας τάσεως,
- μεγάλη καταπόνηση του εξοπλισμού μετά από χειρισμούς διακοπτών (ζεύξη, απόζευξη) και άλλα ταχέα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα,
- μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης κατά την διάρκεια ταχέων μεταβατικών φαινομένων.

Οι συσκευές με ηλεκτρονικά ισχύος που εφαρμόζονται στα δίκτυα μεταφοράς για την εντατικότερη εκμετάλλευσή τους είναι τα FACTS. FACTS είναι ακρωνύμιο για το Flexible AC Transmission Systems, ενώ στα ελληνικά θα μπορούσε να διατυπωθεί ως Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσομένου Ρεύματος - ΕΣΜΕΡ. Η φιλοσοφία τους έγκειται στη χρησιμοποίηση ελεγχόμενων στοιχείων ηλεκτρονικής ισχύος, για τον έλεγχο διαφόρων χαρακτηριστικών του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της ροής φορτίου σε ένα δίκτυο μεταφοράς, επιτρέποντας σε μια γραμμή μεταφοράς να φορτιστεί μέχρι την πλήρη της ικανότητα, αποφεύγοντας υπερφόρτιση μιας άλλης γραμμής και γενικά ανεξέλεγκτες ροές ισχύος με ανεπιθύμητες απώλειες ή άλλες συνέπειες. Επίσης, παρέχουν τη δυνατότητα ανάκτησης εφεδρειών ενεργού και αέργου ισχύος στο σύστημα, μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, οι οποίες εφεδρείες μπορεί να παίξουν αποφασιστικό ρόλο στη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος σε κάποια σημαντική διαταραχή, να αποσβέσουν ταλαντώσεις ισχύος και φαινόμενα υποσύγχρονου συντονισμού.

Η αλματώδης ανάπτυξη στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος προσφέρει σημαντικές δυνατότητες στην αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων. Οι μεγαλύτερες σήμερα συσκευές ηλεκτρικής ισχύος είναι ικανές να διακόψουν ρεύμα εντάσεως χιλιάδων Amperes υπό τάση χιλιάδων Volts. Οι συσκευές αυτές με ηλεκτρονικά ισχύος έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη μίας ποικιλίας μετατροπέων και ελεγκτών, πολλοί από τους οποίους σήμερα χρησιμοποιούν στη θέση των συμβατικών θυρίστορ πολυπαλμικούς μετατροπείς. Τα πλεονεκτήματά των ελεγκτών αυτών έναντι των παλαιοτέρων ηλεκτρομηχανολογικών διατάξεων (όπως ο μηχανισμός αλλαγής σχέσης υπό φορτίο σε μετασχηματιστές, ο ολισθητής φάσης, οι πυκνωτές και τα πηνία με συμβατικούς διακόπτες, οι στρεφόμενοι σύγχρονοι πυκνωτές) είναι:

- γρήγορη απόκριση ώστε να βελτιωθεί η μεταβατική ευστάθεια του συστήματος και να μειωθούν οι καταπονήσεις του εξοπλισμού,
- ευελιξία,
- σημαντικά μειωμένες ανάγκες συντήρησης,
- αυξανόμενη τάση μείωσης του κόστους τους.

1.2. ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η λειτουργία ενός δικτύου μεταφοράς ΕΡ περιορίζεται πολλές φορές από ορισμένα στοιχεία της εγκατάστασης. Έτσι, παρουσιάζεται το φαινόμενο κάποιες γραμμές να υπερφορτίζονται, ενώ άλλες παράλληλες γραμμές να έχουν περιθώρια για μεταφορά μεγαλύτερων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό είναι συνέπεια του τρόπου λειτουργίας των δικτύων μεταφοράς σήμερα δηλ. με ελεύθερη ροή σε κάθε κύκλωμα γραμμής, η οποία έχει σαν συνέπεια η ροή της ισχύος να καθορίζεται, εν γένει, μόνο από τα χαρακτηριστικά του κάθε κυκλώματος (νόμος του Kirchhoff) χωρίς τη μεσολάβηση άλλων μέσων. Για ασφαλή λειτουργία ανακατανομή των ροών, λόγω κάποιας διαταραχής στη λειτουργία του συστήματος.

Αυτή η μεθοδολογία λειτουργίας της ελεύθερης ροής, μπορεί να αντιπαρατεθεί με τη θεώρηση ενός τρόπου λειτουργίας ελεγχόμενης ροής της ηλεκτρικής ενέργειας, όπου οι ροές σε μία ή περισσότερες γραμμές μεταφοράς του συστήματος ελέγχονται κατά ένα προκαθορισμένο τρόπο. Στη γενικότητά της, αυτή η δυνατότητα μπορεί να επιτευχθεί με την τροποποίηση της φυσικής συμπεριφοράς του δικτύου μέσω ορισμένων συσκευών ή διατάξεων ελέγχου σε στρατηγικά σημεία. Η χρησιμοποίηση τέτοιων μέσων θα μπορούσε να μειώσει τις ανάγκες για νέες γραμμές και δίκτυα, με τη βελτίωση της χρησιμοποίησης και της εκμετάλλευσης των υπαρχουσών εγκαταστάσεων.

Ελεγχόμενα στοιχεία ηλεκτρονικής ισχύος, όπως οι στατικοί αντισταθμιστές αέργου ισχύος χρησιμοποιούνται στα δίκτυα από πολλές δεκαετίες. Εντούτοις, η έννοια των FACTS, σαν καθολική φιλοσοφία ελέγχου εισήχθη το 1988 από τον Dr N.G. Hingorani του EPRI (Ινστιτούτο Έρευνας Ηλεκτρικής Ισχύος) των ΗΠΑ [5-8]. Η σημαντική επίδραση των FACTS στα συστήματα μεταφοράς έγκειται στην ικανότητά τους να εκτελούν ταχύτατο έλεγχου μεγάλης ταχύτητας των σχετικών παραμέτρων, δηλ. τάσης, σύνθετης αντίστασης, φασικής απόκλισης, ενεργού και αέργου ισχύος. Οι κύριες λειτουργίες του ελέγχου, όπως η αλλαγή των λήψεων τάσης (taps) ενός μετασχηματιστή, η πίεση ατμού ενός στροβίλου, η ένταξη συμβατικών πυκνωτών κ.ά. εκτελούνται διαμέσου μηχανικών, ή ηλεκτρομηχανικών στοιχείων και συσκευών, τα οποία έχουν αναγκαστικά περιορισμένες ταχύτητες αντίδρασης. Αντίθετα, ο έλεγχος στα στοιχεία FACTS γίνεται μέσω ημιαγωγών (*thyristors*) και συνεπώς μπορεί να γίνει με μεγάλες ταχύτητες. Οι τρεις παράμετροι που ελέγχουν τη ροή της ενεργού ισχύος σε μια γραμμή είναι η σύνθετη αντίσταση και οι τάσεις κατά μέτρο και γωνία των δύο άκρων, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin \delta_{12} \tag{1.1}$$

όπου

 $V_{L}V_{2}$ τα μέτρα των τάσεων αναχώρησης και άφιξης

 δ_{12} η διαφορά των γωνιών τους

 X_{12} η επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς

Ο συμβατικός έλεγχος των παραμέτρων αυτών, αν και είναι επαρκής για τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, και τις βραδείες μεταβολές φόρτισης, δεν μπορεί γενικά να αντιμετωπίσει τις δυναμικές καταστάσεις του συστήματος, όπως συμβαίνει με τα FACTS.

Η τεχνολογία των FACTS δημιουργεί τις ακόλουθες δυνατότητες για αύξηση της απόδοσης του συστήματος:

- 1. Έλεγχο της ισχύος, ώστε οι ροές να είναι βέλτιστες, να γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των γραμμών και να αποφεύγονται ανεπιθύμητες καταστάσεις.
- 2. Φόρτιση των γραμμών μεταφοράς κοντά στα όρια της μόνιμης κατάστασης και των μεταβατικών και δυναμικών καταστάσεων.
- Συγκράτηση των διαδοχικών διακοπών (γραμμών, κλπ.) και περιορισμός της επέκτασης των συνεπειών από πολλαπλά σφάλματα, που μπορούν να οδηγήσουν σε μείζονες ανωμαλίες (σβέσεις).
- 4. Απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος οι οποίες θα μπορούσαν να βλάψουν το δίκτυο και/ή να περιορίσουν την ικανότητα μεταφοράς ισχύος.

1.3. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

1.3.1. Γενικά για τα FACTS

Το γεγονός ότι οι εξελίξεις στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος είναι ραγδαίες σε συνδυασμό με το ενδιαφέρον για τις διασυνδέσεις συνεχούς ρεύματος (High Voltage DC- HVDC) και την τεχνολογία των FACTS οδήγησε την ΙΕΕΕ στην σύσταση της "DC and FACTS Subcommitee", και αυτή με τη σειρά της την ομάδα εργασίας "FACTS Working Group". Το 1997 η παραπάνω ομάδα εργασίας δημιούργησε την "FACTS Terms & Definitions Task Force", η οποία, σε συμφωνία με τη CIGRE, στην αναφορά [9] ομαδοποίησε τις διάφορες συσκευές FACTS, έδωσε την επίσημη ονομασία των διαφόρων συσκευών (προκειμένου να συμπεριληφθούν και στο λεξικό της ΙΕΕΕ) και ανέφερε τις υπάρχουσες και μελλοντικές εγκαταστάσεις FACTS. Παράλληλα το EPRI, ενεργοποίησε την εκπόνηση διαφόρων μελετών που αφορούσαν τόσο στη μοντελοποίηση και όσο και στις εφαρμογές των FACTS [10-18] και διοργάνωσε σγετικά συνέδρια όπου παρουσιάστηκαν σημαντικές εργασίες [19-21]. Αντίστοιχα, η "Task Force 38-01-06" της CIGRE το 1995 εξέδωσε τεύχος [22] με κατάλληλα μοντέλα FACTS για τον έλεγχο της ροής ισχύος, ενώ η "Task Force 38-01-08" το 1999 εξέδωσε τεύχος [23] με μοντέλα FACTS κατάλληλα τόσο για προγράμματα ροής φορτίου όσο και μελετών ευστάθειας. Οι εξελίξεις από την εφαρμογή συσκευών FACTS οδήγησε μελετητές, οι οποίοι συμμετείχαν στο σχεδιασμό και τις δοκιμές πεδίου τέτοιων εγκαταστάσεων να εκδώσουν εργασίες όπου συνοψίζουν τις νεότερες τάσεις και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της τεχνολογία των FACTS στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας [24,25]. Πρόσφατα, το "Working Group on Dynamic Performance and Modeling of HVDC and Power Electronics for Transmission Systems" Trc IEEE εξέδωσε την αναφορά [26] όπου συνοψίζονται όλα τα μοντέλα συσκευών FACTS (χωρίς Voltage Source Converters - VSC) που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία και είναι κατάλληλα για μελέτες ταχέων μεταβατικών φαινομένων.

Στις εργασίες [27-29] παρουσιάζεται ο ρόλος των FACTS στις νέες συνθήκες που προκύπτουν στην

απελευθερωμένη αγορά ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, στην αναφορά [28] που εκδόθηκε από το "Joint Working Group 14/37/38/39.24" της CIGRE επισημαίνεται ότι τα FACTS μπορούν να συμβάλλουν τοπικά στην επίλυση των προβλημάτων υπερφόρτισης του συστήματος, όταν υπάρχει διαφορά μεταξύ της ζήτησης και της φυσικής ικανότητας μεταφοράς των γραμμών μεταφοράς, όμως δεν ενισχύουν στην πραγματικότητα το δίκτυο και επιπρόσθετα ότι οι αποφάσεις για τέτοιες εγκαταστάσεις πρέπει να παρθούν σε συνδυασμό με το κόστος τους.

Σήμερα, οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού τείνουν να αναγνωρίσουν τις τεχνολογικές δυνατότητες αναβάθμισης των δικτύων μεταφοράς μέσω των FACTS με αποτέλεσμα να εκπονούνται μελέτες σκοπιμότητας και να επαναπροσδιορίζουν τα προγράμματα ανάπτυξης βάσει των νέων αυτών δυνατοτήτων. Η αποτελεσματικότητα των διατάξεων αυτών εξαρτάται από τη διάταξη και τα χαρακτηριστικά του συστήματος, τη συμπεριφορά των γεννητριών, τη δυναμική συμπεριφορά και το σημείο λειτουργίας του συστήματος. Για τους λόγους αυτούς χρειάζεται η κατάλληλη επιλογή συσκευών FACTS για κάθε συγκεκριμένο σύστημα. Μελέτες σκοπιμότητας για τη μελλοντική εγκατάσταση τέτοιων συσκευών στα ηλεκτρικά συστήματα πολλών χωρών έχουν ήδη εκπονηθεί [30-34]. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύσσονται ψηφιακά μοντέλα συσκευών FACTS σειράς σε πρόγραμμα ροής φορτίου και διερευνάται η επίδρασή τους στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

1.3.2. Διατάξεις αντιστάθμισης σειράς

Η εγκατάσταση διατάξεων αντιστάθμισης σειράς έχει αρχίσει από το 1920. Κύριος στόχος ήταν η αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος των μεγάλων γραμμών μεταφοράς. Το 1960 οι διατάξεις αυτές αποκτούν μεγάλη ταχύτητα παράκαμψης ή επανένταξης των πυκνωτών με χρήση διακένων αέρα, οπότε διαπιστώθηκε η συμβολή τους στη βελτίωση της ευστάθειας του συστήματος. Η εργασία του Kimbark [35] στο τελευταίο αυτό θέμα θεωρείται θεμελιώδης και αναφορά σε όλες τις μελλοντικές εργασίες.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στη χρήση των πυκνωτών σειράς συνοψίζονται κύρια στην κατασκευή πυκνωτών νέας τεχνολογίας με περιορισμένες απώλειες, μικρότερο βάρος και μικρότερο απαιτούμενο χώρο εγκατάστασης, στη χρήση αλεξικέραυνων μεταλλικών οξειδίων που παρέχουν επαρκή προστασία από υπερτάσεις στους πυκνωτές με στόχο τη γρήγορη επανένταξή τους στο δίκτυο μετά από εξωτερικά σφάλματα, στην χρήση οπτικών ινών για τον έλεγχο και την προστασία της εγκατάστασης και κυρίως στην ανάπτυξη διατάξεων ελέγχου με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος και συγκεκριμένα διατάξεων θυρίστορ για τον έλεγχο της χωρητικής αντίδρασης των πυκνωτών σειράς.

Αναλυτικότερα, αρχικά οι εγκαταστάσεις αντιστάθμισης σειράς περιελάμβαναν μηχανικά διακοπτόμενους πυκνωτές (Mechanical Switched Series Capacitors-MSSC). Στην εργασία [36] παρουσιάζεται η εμπειρία από την εγκατάσταση τέτοιων διατάξεων στο δίκτυο 400 kV της Σουηδίας έως το 1975, ενώ στην εργασία [37] παρουσιάζονται τέτοιες εγκαταστάσεις στο δίκτυο 500 kV της Καλιφόρνιας, όπου το ποσοστό αντιστάθμισης φτάνει στο 70%. Ένα θέμα που προβλημάτισε από την αρχή και διερευνήθηκε διεξοδικά είναι ο τρόπος παράκαμψης των πυκνωτών σειράς και η προστασία τους από υπερτάσεις. Στην αρχή, παράλληλα με τους πυκνωτές χρησιμοποιήθηκαν διάκενα αέρα συνδεδεμένα σε σειρά με πηνία εκφόρτισης [36,37], ενώ στη συνέχεια προτάθηκε και τελικά επικράτησε η χρήση μη γραμμικών αντιστάσεων, όπως τα οξείδια μετάλλου (Metal-Oxide Varistor-MOV) και συνήθως το οξείδιο του Ψευδαργύρου (Zinc-Oxide Varistor). Η νέα αυτή διάταξη είχε ως αποτέλεσμα ο πυκνωτής να προστατεύεται από υπερτάσεις, να παρακάμπτεται χωρίς να βγαίνει "εκτός" κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων και η επανένταξή του να γίνεται ακαριαία, χωρίς μεταβατικά φαινόμενα και με μεγαλύτερη αξιοπιστία [38-41]. Στην εργασία [42] αναφέρεται η διερεύνηση της εταιρίας BPA, μετά από 40 χρόνια εμπειρίας από διατάξεις αντιστάθμισης σειράς, στον τρόπο σχεδιασμού των διατάξεων προστασίας και παράκαμψης των νέων πυκνωτών σειράς που έχει εγκαταστήσει. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσιάζεται αναλυτικά η συμπεριφορά της διάταξης παράκαμψης με αλεξικέραυνο ZnO των πυκνωτών αντιστάθμισης σειράς κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων με χρήση κατάλληλου ψηφιακού μοντέλου.

Στην εργασία [43] παρουσιάζεται η πρώτη εγκατάσταση αντιστάθμισης σειράς που περιελάμβανε εκτός από μηχανικά διακοπτόμενους πυκνωτές και πυκνωτή σειράς διακοπτόμενο με θυρίστορ (*Thyristor Switched Series Capacitor-TSSC*). Η εγκατάσταση λειτούργησε το 1991 μετά από συνεργασία της ABB και της American Electirc Power Service Corporation (AEP) σε μια γραμμή 345 kV στον Y/Σ Kanawa River. Το βασικό πλεονέκτημά της είναι ότι ο ηλεκτρονικός διακόπτης, συνδεδεμένος παράλληλα με τον πυκνωτή σειράς μπορεί να εκτελέσει έναν μεγάλο αριθμό λειτουργιών σε μικρό χρονικό διάστημα.

Η εισαγωγή της ιδέας της λειτουργίας των δύο αντιπαράλληλων θυρίστορ που είναι συνδεδεμένα παράλληλα με τον πυκνωτή σειράς όχι μόνο σαν διακοπτικό μέσο, αλλά με δυνατότητα αγωγής για μέρος της ημιπεριόδου, οδήγησε στην δημιουργία του ελεγχόμενου με θυρίστορ πυκνωτή σειράς (*Thyristor Controlled Series Compensation–TCSC*) με μεγάλες δυνατότητες ελέγχου και ευελιξίας. Οι πρώτες εγκαταστάσεις TCSC κατασκευάστηκαν στην Αμερική. Η μία από τη SIEMENS σε συνεργασία με την Western Area Power Administration (WAPA) σε μια γραμμή 230 kV στον Y/Σ Kayenta το 1992 [44,45] και η άλλη από την GE Industrial and Power Systems με την υποστήριξη του EPRI σε μια γραμμή 500 kV στον Y/Σ Slatt της Bonnevile Power Administration (BPA) [46,47].

Στις εργασίες που αφορούν αυτά τα έργα στο Kayenta και στο Slatt [44-47], όσο και στις εργασίες [48-50] αναλύονται οι αρχές λειτουργίας του TCSC, η διαστασιολόγηση τέτοιων διατάξεων, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του επιμέρους εξοπλισμού καθώς και η επίδρασή τους στη λειτουργία του συστήματος. Προτάσεις για τη διαστασιολόγηση τέτοιων διατάξεων παρουσιάζονται και στην εργασία [51]. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, αναπτύσσεται ψηφιακό μοντέλο TCSC στο EMTP, ενώ προτείνεται μεθοδολογία προσδιορισμού των παραμέτρων μιας διάταξης TCSC. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται εργαστηριακό μοντέλο TCSC, που κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόσο για την επιβεβαίωση της μεθοδολογία προσδιορισμού των παραμέτρων άποσδιορισμού των παραμέτρων όσο και για τη διερεύνησή της επίδρασης της διάταξης στην έγχυση αρμονικών στο σύστημα. Η κατασκευή τέτοιων εργαστηριακών μοντέλων έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο από ερευνητικές ομάδες εταιριών ηλεκτρισμού όσο και εκπαιδευτικών ιδρυμάτων προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά νέων διατάξεων [52-54], να διερευνηθεί ο τρόπος διαστασιολόγησής τους αλλά και να δοκιμαστούν διάφορες τεχνικές ελέγχου τους [65-57].

Χαρακτηριστικό του ενδιαφέροντος που παρουσιάζει η λειτουργία της ελεγχόμενης αντιστάθμισης σειράς όσο και ο τρόπος ελέγχου της είναι το γεγονός ότι έχουν εκδοθεί μία αναφορά από το EPRI σχετικά με τη λειτουργία και τον έλεγχο του TCSC [58], μια τεχνική έκθεση της CIGRE [59], ενώ το βιβλίο των Anderson και Farmer έχει σαν στόχο την παρουσίαση όλων των στοιχείων που σχετίζονται με την αντιστάθμιση σειράς [60].

Ο έλεγχος του TCSC στην αρχή επικεντρώθηκε στον έλεγχο της ροής ισχύος [61], αλλά σύντομα διαπιστώθηκε η θετική συμβολή στην διατήρηση της μεταβατικής ευστάθειας και στην απόσβεση απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος. Έτσι, προτάθηκαν διάφορα μοντέλα και τρόποι ελέγχου του TCSC [62-65] για το σκοπό αυτό. Η θετική επίδραση του TCSC στην απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος οδήγησε στην εγκατάσταση τέτοιας διάταξης στη Βραζιλία [66] το 1999. Πρόσφατα, εγκαταστάθηκε ένα TCSC στη γραμμή 500 kV Yimin-Fengtun στη Βορειοανατολική Κίνα [67]. Πολλές εργασίες έχουν παρουσιαστεί με θέμα διάφορες μεθοδολογίες ελέγχου του TCSC [68-73], ενώ σε αρκετές από αυτές τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται και τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης [57,74,75]. Επιπρόσθετα, η επίδραση του TCSC στην αξιοπιστίας με τη χρήση τέτοιων διατάξεων.

Ένα άλλο θέμα που προέκυψε από την αρχή της δεκαετίας του 1970 και σχετιζόταν με την αντιστάθμιση σειράς γραμμών μεταφοράς, είναι το φαινόμενο του υποσύγχρονου συντονισμού (Subsynchronous Resonance–SSR), μετά τη ζημιά του άξονα μιας ατμογεννήτριας στο Mohave της Southern California Edison Company [77], ο οποίος οφειλόταν σε μεγάλο ποσοστό στη χωρητική αντιστάθμιση σειράς μιας γραμμής 500 kV. Έκτοτε και μέχρι την ανάπτυξη της ελεγχόμενης αντιστάθμισης σειράς, η αντιστάθμιση ελαττώθηκε και η όλη πρακτική εφαρμογή των πυκνωτών

σειράς αναθεωρήθηκε. Ο όρος SSR περιλαμβάνει τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις μεταξύ των αξόνων μιας πολυβάθμιας στροβιλογεννήτριας και μιας γραμμής μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς, όταν η ανταλλασσόμενη ενέργεια έχει αυξητική τάση. Το μεγάλο ενδιαφέρον που παρουσιάζουν τα θέματα του υποσύγχρονου συντονισμού οδήγησαν την ΙΕΕΕ στη σύσταση της ΙΕΕΕ SSR Task Force, η οποία εξέδωσε δύο μοντέλα benchmark [78,79] για τη μελέτη του φιανομένου αυτού. Επίσης, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εργασιών που αναφέρονται στο πρόβλημα του υποσύγχρονου συντονισμού και τους τρόπους αποφυγής του, οι οποίες συγκεντρώνονται στις βιβλιογραφικές αναφορές της ΙΕΕΕ [80-84] από το 1970 έως το 1996, ενώ το 1992 εκδόθηκε από την ΙΕΕΕ και η οδηγία [85]. Επιπρόσθετα, οι Anderson, Agraval και Wess στο βιβλίο που εξέδωσαν [86], αναλύουν το φαινόμενο και παρουσιάζουν τον τρόπο μελέτης συστήματος όπου υπάρχουν υποσύγχρονες ταλαντώσεις με ανάλυση ιδιοτιμών.

Ο N.G. Hingorani για την αντιμετώπιση του προβλήματος του υποσύγχρονου συντονισμού, πρότεινε κατάλληλη διάταξη, η οποία πήρε το όνομά του, NGH-SSR damper, εγκαταστάθηκε στον Υ/Σ Lugo της Southern California Edison's το 1984 και λειτούργησε με επιτυχία για την απόσβεση του υποσύγχρονου συντονισμού [87,88]. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, αναπτύσσεται ψηφιακό μοντέλο ελέγχου του TCSC με τη λογική απόσβεσης της διάταξης NGH-SSR damper. Ο έλεγχος αυτός λειτουργεί σαν υπερτιθέμενος έλεγχος στους υπόλοιπους ελέγχους της διάταξης ενώ, χρησιμοποιώντας το πρώτο μοντέλο benchmark της ΙΕΕΕ για μελέτη του υποσύγχρονου συντονισμού [78], αποδεικνύεται ότι συμβάλλει θετικά στην απόσβεση πιθανών υποσύγχρονου ταλαντώσεων πολυβάθμιας γεννήτριας και μετά από σύγκριση προκύπτει ότι είναι παρόμοια με αυτή που του NGH-SSR damper. Στην εργασία [89] παρουσιάζεται ένας εναλλακτικός τρόπος ελέγχου της διάταξης NGH-SSR damper για βελτίωση της απόσβεσης των υποσύγχρονων ταλαντώσεων.

Γενικότερα, κατά την εγκατάσταση σύγχρονων διατάξεων αντιστάθμισης σειράς, η εμφάνιση φαινομένων υποσύγχρονου συντονισμού διερευνάται τόσο με προσομοιώσεις κατά τη φάση του σχεδιασμού, όσο και μετά την εγκατάσταση. Στην εργασία [90] παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών στον Υ/Σ Slatt που αφορούν στη διερεύνηση φαινομένων υποσύγχρονου συντονισμού.

Εναλλακτικά, το TCSC μπορεί να συμβάλει αποτελεσματικά στη σταθεροποίηση μιας κατάστασης υποσύγχρονου συντονισμού με έλεγχο της έναυσης των θυρίστορ μέσω ένα πολύ ακριβούς σύστημα συγχρονισμού, έτσι ώστε το TCSC να παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά στις υποσύγχρονες συχνότητες [91-93]. Μία άλλη εναλλακτική λύση είναι ο έλεγχος του TCSC με αλλαγή της αντίδρασης του TCSC, ώστε να αποφευχθεί η τιμή αντιστάθμισης που προκαλεί υποσύγχρονου συντονισμού έγινε το 1998 στο Stöde της Σουηδίας [94].

1.3.3. Εύρεση βέλτιστης θέσης εγκατάστασης σειριακής και εγκάρσιας αντιστάθμισης

Παράλληλα με την ανάλυση και μοντελοποίηση των διαφόρων συσκευών FACTS καθώς και τη μελέτη της επίδρασής τους στη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, τα αναμφισβήτητα οφέλη από την ελεγχόμενη ροή φορτίου την οποία προσφέρουν, η έρευνα έχει προσανατολιστεί τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη μεθοδολογιών για την εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης τέτοιων συσκευών προκειμένου να αντιμετωπιστούν διάφορα προβλήματα, χρησιμοποιώντας διαφορετικά εργαλεία προσέγγισης του θέματος. Αρκετές εργασίες έχουν δημοσιευτεί όπου προτείνονται μεθοδολογίες εύρεσης των κρίσιμων γραμμών για εγκατάσταση διατάξεων αντιστάθμισης σειράς ή των πιο κρίσιμων ζυγών για εγκατάσταση εγκάρσιας αντιστάθμισης.

Στην εργασία [95] προτείνεται μεθοδολογία για την εύρεση της βέλτιστης θέσης και το σχεδιασμό του ελέγχου του TCSC για την απόσβεση ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.

Στην εργασία [96], για την εύρεση της βέλτιστης θέσης SVC και TCSC σε μεγάλα συστήματα με

στόχο την απόσβεση των ταλαντώσεων ισχύος και την ενίσχυση της ευστάθειας του συστήματος, προτείνεται η χρησιμοποίηση του δείκτη LIED (Location Index for Effective Damping).

Στην εργασία [97] προτείνεται μεθοδολογία για την εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης μεταβλητών πυκνωτών σειράς και στατών ολισθητών φάσης καθώς και της βέλτιστης τιμής των παραμέτρων τους με στόχο τη βελτίωση της οικονομικής λειτουργίας του συστήματος και την ενίσχυση της λειτουργίας του συστήματος.

Επιπρόσθετα, τα τελευταία χρόνια έχει επικεντρωθεί το ενδιαφέρον στη συμβολή των συσκευών FACTS και κυρίως του TCSC στην ενίσχυση της ευστάθειας τάσης των συστημάτων και την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης τους, το οποίο στην απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας είναι γνωστό ως Διαθέσιμη Ικανότητα Μεταφοράς (Available Transfer Capability-ATC). Στην εργασία [98] ως ATC ορίζεται η διαφορά ενεργού ισχύος σε μια περιοχή του συστήματος μεταξύ ενός σημείου λειτουργίας και του σημείου κατάρρευσης τάσης (σημείο σαγματικού κόμβου – saddle-node bifurcation point) για ένα συγκεκριμένο σχήμα παραγωγής-κατανάλωσης, όπου τα ρεύματα στο δίκτυο μεταφοράς διατηρούνται κάτω από τα θερμικά όρια και οι τάσεις στους ζυγούς φορτίου είναι σε επιτρεπτά επίπεδα. Οι ίδιοι περιορισμοί αναφέρονται και στην αναφορά της North American Electric Reliability Council (NERC) [99]. Εάν δεν υπάρχει σημείο σαγματικού κόμβου, το ATC ορίζεται ως η μέγιστη αλλαγή της ροής ισχύος στην περιοχή.

Στην εργασία [100] η εύρεση των κρίσιμων γραμμών για εγκατάσταση αντιστάθμισης σειράς και του ποσοστού αντιστάθμισης με στόχο την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος, βασίζεται στη θεώρηση διαδοχικών υπερφορτίσεων γραμμών, όπου η πρώτη γραμμή που υπερφορτίζεται είναι και η καταλληλότερη για αντιστάθμιση σειράς.

Επίσης, στην εργασία [101] προτείνεται ο δείκτης SCS (Single Contingency Sensitivity) για την εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης TCSC με στόχο την εξάλειψη της υπερφόρτισης των γραμμών σε απλές διαταραχές και μείωση των απωλειών του συστήματος, ενώ μέσω βελτιστοποίησης προσδιορίζονται οι ρυθμίσεις των TCSC για συγκεκριμένες διαταραχές.

Στην εργασία [102] προτείνεται μια μεθοδολογία βασισμένη στην ευαισθησία του δείκτη συμπεριφοράς της ροής ισχύος των γραμμών (power line flow performance index-PI) ως προς τις παραμέτρους του TCSC και του TCPAR για την εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης των συσκευών αυτών με στόχο τον έλεγχο των υπερφορτίσεων σε συνθήκες απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην εργασία [103] προτείνεται μεθοδολογία ανάλυσης για την εύρεση των κρίσιμων περιοχών όπου μπορεί να εμφανιστεί αστάθεια τάσης και την επιλογή της βέλτιστης θέσης (κρίσιμων ζυγών και κλάδων) για εγκατάσταση συσκευών FACTS, οι οποίες λειτουργώντας συντονισμένα αυξάνουν τα όρια ευστάθειας τάσης του συστήματος. Η ανάλυση αυτή στηρίζεται στην εύρεση της μικρότερης ιδιάζουσας τιμής του Ιακωβιανού πίνακα ροής φορτίου.

Στην εργασία [104] προτείνονται κατάλληλα μοντέλα SVC και TCSC καθώς και τεχνικές για τη βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγησή τους με βάση τη θεωρία κατάρρευσης τάσης.

Ευαισθησίες δεύτερης τάξης προτείνονται στην εργασία [98] για την εύρεση της βέλτιστης θέσης SVC και TCSC προκειμένου να αυξηθεί το Διαθέσιμη Ικανότητα Μεταφοράς (ATC) του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, ως πιο σημαντικές γραμμές για αντιστάθμισης σειράς προτείνονται οι γραμμές, όπου έχουμε τη μεγαλύτερη διαφορά στη ροή ισχύος μεταξύ του σημείου λειτουργίας του συστήματος και του σημείου κατάρρευσης τάσης.

Κατάλληλα μοντέλα SVC και TCSC αναπτύσσονται στην εργασία [105], όπου με χρήση προγραμματιστικών εργαλείων ανάλυσης φαινομένων κατάρρευσης τάσης και τεχνικών βελτιστοποίησης προσδιορίζονται οι βέλτιστες θέσεις και η διαστασιολόγηση των συσκευών αυτών.

Στην εργασία [106] χρησιμοποιείται ένα μοντέλο υπολογισμού της αύξησης του ATC του συστήματος μέσω βέλτιστης ροής φορτίου όπου οι διάφορες συσκευών FACTS (SVC, TCPS, TCSC, UPFC) ενσωματώνονται μέσω μοντέλου έγχυσης ισχύος και διαπιστώνεται ότι οι συσκευές FACTS και κυρίως η UPFC συμβάλλουν στην αύξηση του ATC και αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση στην απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην εργασία [107] με τη βοήθεια γενετικών αλγορίθμων προσδιορίζονται τόσο η βέλτιστη θέση εγκατάστασης συσκευών FACTS (TCSC, TCPST, TCVR, SVC) όσο και οι παράμετροι αυτών των συσκευών με στόχο την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος, ενώ αποδεικνύεται ότι η ταυτόχρονη χρήση περισσότερων από μία συσκευών είναι η καταλληλότερη μέθοδος για την επίτευξη του μέγιστου περιθωρίου φόρτισης.

Στην εργασία [108] προτείνεται μια μεθοδολογία καλούμενη EVPA (*Extended Voltage Phasors Approach*) με την οποία εντοπίζονται οι κρίσιμοι κλάδοι και ζυγοί για την ευστάθεια τάσης του συστήματος.

Στην εργασία [109], καθώς και στο βιβλίο των Van Cutsem και Βουρνά [110] έχει προταθεί μια τεχνική για την εκτίμηση της ευαισθησίας του περιθωρίου φόρτισης μέχρι την κατάρρευση ως προς τις παραμέτρους του συστήματος. Με βάση αυτή την τεχνική, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής για την εύρεση των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς, των οποίων η αντιστάθμιση σειράς έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος μετά από κρίσιμες διαταραχές, υπολογίζονται οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης, θεωρώντας ως παραμέτρους του συστήματος την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς.

Επίσης, σε πολλές εργασίες εφαρμόζονται τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης κυρίως για τον εντοπισμό της πλέον κατάλληλης θέσης εγκατάστασης των συσκευών FACTS σε εκτεταμένα διασυνδεδεμένα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πρώτες σχετικές εργασίες αφορούσαν το σχεδιασμό και ρύθμιση της αέργου ισχύος (VAR planning) με στόχο κύρια τη διατήρηση της τάσης σε επιτρεπτά επίπεδα.

Στην εργασία [111] προτείνονται τεχνικές επίλυσης με έμπειρα συστήματα για τη λύση του προβλήματος της ρύθμισης αέργου ισχύος.

Στις εργασίες [112,113] παρουσιάζονται εξελιγμένοι γενετικοί αλγόριθμοι για την εύρεση της βέλτιστης θέσης και του μεγέθους των εγκάρσιων συσκευών FACTS παραγωγής αέργου ισχύος.

Στην εργασία [114] το πρόβλημα της βέλτιστης θέσης πυκνωτών στο σύστημα περιγράφεται από μία αντικειμενική συνάρτηση που εκφράζει την ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης επένδυσης προκειμένου να ικανοποιηθούν κατάλληλοι περιορισμοί αέργου ισχύος. Το πρόβλημα ανάγεται σε πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού που μπορεί να λυθεί είτε με ντετερμινιστική μέθοδο είτε με γενετικούς αλγορίθμους.

Παρόμοια με την προηγούμενη εργασία είναι και η προσέγγιση στην εργασία [115] όπου εξετάζεται η βέλτιστη θέση εγκατάστασης συσκευών SVC και TCSC με σκοπό τη ρύθμιση της αέργου ισχύος και αποφυγή της κατάρρευσης τάσης. Η μεθοδολογία που προτείνεται βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος στην κανονική λειτουργία και κατά τη διάρκεια διαταραχών όπου λαμβάνεται υπόψη και το κόστος της κατάρρευσης τάσης, των περικοπών φορτίου και άλλων ελέγχων. Η επίλυση του προβλήματος υλοποιείται με συνδυασμό γενετικών αλγόριθμων και γραμμικού προγραμματισμού. Όμοια και στην εργασία [116] γίνεται χρήση μιας υβριδικής μεθόδου που σε πρώτο επίπεδο χρησιμοποιεί γενετικούς αλγόριθμους και σε δεύτερο επίπεδο διαδοχικό γραμμικό προγραμματισμό.

Στην εργασία [117] αναπτύσσεται μία μέθοδος για την επιλογή της βέλτιστης θέσης συσκευών FACTS και κυρίως του TCSC στις γραμμές μεταφοράς με χρήση της μεθόδου των ασαφών

αποφάσεων (fuzzy decision making method). Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για να παρθεί μία απόφαση είναι αυτοί που επηρεάζονται περισσότερο από τη λειτουργία του TCSC, όπως η αύξηση των ορίων λειτουργίας, τα επίπεδα τάσης και βραχυκύκλωσης, το μέγεθος της αντίδρασης των γραμμών μεταφοράς κλπ. Η αναπτυχθείσα μέθοδος εφαρμόζεται σε γνωστά μοντέλα συστημάτων και προκύπτει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση των θετικών επιδράσεων του TCSC ή άλλων συσκευών FACTS.

Τέλος, η μεθοδολογία των Δένδρων Απόφασης–ΔΑ (Decision Trees-DTs) ανήκει στις τεχνικές εποπτευόμενης μάθησης έχει χρησιμοποιηθεί στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στην εργασία [118] των Wehenkel και Marc, καθώς και στο βιβλίο του Wehenkel [119] παρουσιάζονται τρόποι εφαρμογής της μεθοδολογίας των δένδρων απόφασης στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των συστημάτων ισχύος. Επίσης, ενδεικτικά αναφέρονται οι ακόλουθες εφαρμογές:

Στις εργασίες [120-122] τα ΔΑ χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ασφάλειας συστημάτων, ενώ στις εργασίες [123,124] χρησιμοποιούνται στη μεταβατική ευστάθεια των συστημάτων. Στην εργασία [125] τα ΔΑ χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας των πυρήνων μετασχηματιστών διανομής, ενώ στην εργασία [126] τα ΔΑ εφαρμόζονται στην αποκατάσταση δικτύων διανομής.

Στο βιβλίο του Wehenkel [119] δίνονται κάποια βήματα για τον τρόπο εφαρμογής των ΔΑ στην εύρεση του πιο κατάλληλου υποσταθμού για εγκατάσταση διατάξεων SVC, όμως στη βιβλιογραφία δεν έχει εφαρμοστεί συστηματικά αυτή η μεθοδολογία για την εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης συσκευών FACTS. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύσσεται πρωτότυπη μεθοδολογία, όπου χρησιμοποιούνται τα δένδρα απόφασης για την εύρεση των κρίσιμων γραμμών και του βέλτιστου ποσοστού αντιστάθμισής τους με στόχο την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα παραγωγής-μεταφοράς σε κρίσιμες (N-1) διαταραχές.

1.4. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ - ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το πρώτο τμήμα της παρούσας διατριβής επικεντρώνεται σε θέματα ανάλυσης, που αφορούν τη λειτουργία της ελεγχόμενης αντιστάθμισης καθώς και διαφόρων φαινομένων που εμφανίζονται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όπου εγκαθίστανται διατάξεις αντιστάθμισης σειράς. Πιο συγκεκριμένα:

- Αναλύεται λεπτομερώς η λειτουργία της διάταξης ελεγχόμενης αντιστάθμισης σειράς –TCSC, διατυπώνονται οι αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις και αναπτύσσεται στο πρόγραμμα EMTP κατάλληλο ψηφιακό μοντέλο για τη λειτουργία της στη μόνιμη κατάσταση.
- Αναπτύσσεται μεθοδολογία προσδιορισμού των βασικών παραμέτρων σχεδίασης μιας διάταξης TCSC. Με βάση τη μεθοδολογία αυτή, σχεδιάζεται εργαστηριακό μοντέλο TCSC, εγκαθίσταται στο εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ και λειτουργεί με επιτυχία.
- Διερευνώνται διεξοδικά τόσο οι αρμονικές που αναπτύσσονται εντός του TCSC όσο και αυτές που εγχέονται στο σύστημα. Τα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από τις μετρήσεις στο εργαστηριακό μοντέλο. Επίσης, διερευνάται η επίδραση παραμέτρων (όπως η τιμή της αυτεπαγωγής που συνδέεται παράλληλα προς τον πυκνωτή της διάταξης) στις αναπτυσσόμενες αρμονικές.
- Αναπτύσσεται στο πρόγραμμα EMTP ψηφιακό μοντέλο ελέγχου του TCSC για την απόσβεση του φαινομένου υποσύγχρονου συντονισμού, το οποίο ενσωματώνεται ως υπερτιθέμενος έλεγχος στο ψηφιακό μοντέλο TCSC.

 Αναπτύσσονται ψηφιακά μοντέλα ελεγχόμενης αντιστάθμισης σειράς και ελεγχόμενου ρυθμιστή φασικής γωνίας (TCSC και TCPAR) τα οποία ενσωματώνονται στο πρόγραμμα ροής φορτίου GINA, για τον έλεγχο της ροής ενεργού ισχύος γραμμής μεταφοράς.

Το δεύτερο μέρος της παρούσας διατριβής εστιάζεται στο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης θέσης εγκατάσταση διατάξεων αντιστάθμισης σειράς για ενίσχυση της ευστάθειας τάσης του συστήματος. Το βασικό κριτήριο για το σκοπό αυτό είναι η εύρεση των κρίσιμων γραμμών, των οποίων η αντιστάθμιση σειράς έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος μετά από κρίσιμες διαταραχές. Πιο συγκεκριμένα:

- Αναπτύσσεται μεθοδολογία εφαρμογής της τεχνικής των Δένδρων Απόφασης (ΔΑ) για την εύρεση των κρίσιμων γραμμών για αντιστάθμιση σειράς. Πιο συγκεκριμένα, διερευνώνται τόσο οι παράμετροι του συστήματος που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη δημιουργία της βάσης γνώσης ώστε να δημιουργηθούν ΔΑ με τη μεγαλύτερη δυνατή πληροφορία κα το λιγότερο αριθμό κόμβων, όσο και το καταλληλότερο σημείο λειτουργίας του συστήματος κοντά στο σημείο Μ.Μ.Ι., όπου πρέπει να δημιουργηθεί η βάση αυτή. Από τα αναπτυχθέντα ΔΑ προκύπτουν όχι μόνο οι κρίσιμες γραμμές για αντιστάθμιση σειράς, αλλά και το ελάχιστο απαιτούμενο ποσοστό αντιστάθμισης αυτών.
- Υπολογίζονται οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος, σε ένα σημείο πολύ κοντά στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (σημείο Μ.Μ.Ι.) μετά από κρίσιμες (N-1) διαταραχές, ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς. Για τον υπολογισμό του σημείου Μ.Μ.Ι. χρησιμοποιείται η προσομοίωση ημι-μόνιμης κατάστασης του συστήματος. Ο υπολογισμός των ευαισθησιών βασίζεται στην εύρεση της μικρότερης ιδιοτιμής και του αντίστοιχου αριστερού ιδιοδιανύσματος του τροποποιημένου Ιακωβιανού πίνακα του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ταξινόμηση όλων των γραμμών μεταφοράς ως προς την κρισιμότητά τους. Η αντιστάθμισης σειράς των πιο σημαντικών από αυτές και η εύρεση αυτών που οδηγούν στη μεγαλύτερη αύξηση του περιθωρίου φόρτισης για τις περισσότερες από τις εξεταζόμενες διαταραχές, δίνει την τελική επιλογή της βέλτιστης γραμμής για αντιστάθμιση σειράς.
- Η εφαρμογή των δύο παραπάνω μεθοδολογιών στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς μετά από κρίσιμες (N-1) διαταραχές, οδηγεί στην επιλογή των ίδιων κρίσιμων γραμμών μεταφοράς, ενώ ωφέλιμα συμπεράσματα προκύπτουν ως προς τα πλεονεκτήματα καθεμιάς από τις προτεινόμενες μεθοδολογίες.

Η δομή της παρούσας διατριβής είναι η ακόλουθη:

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότερες συσκευές FACTS και συνοπτικά αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας τους και οι κυριότερες εγκαταστάσεις τέτοιων συσκευών.

Στο **τρίτο** κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διάφορες διατάξεις αντιστάθμισης σειράς και η επίδρασή της στο σύστημα κατά την εμφάνιση συμμετρικών και ασύμμετρων σφαλμάτων καθώς και η συμπεριφορά των διατάξεων προστασίας και παράκαμψης των διατάξεων αυτών. Στη συνέχεια, διατυπώνονται οι αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν το TCSC καθώς και η ανάλυση στο εσωτερικό του. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται ψηφιακό μοντέλο TCSC, που αναπτύσσεται στο πρόγραμμα EMTP, καθώς και μοντέλο ελέγχου του με στόχο την ανίχνευση υποσύγχρονων ταλαντώσεων και απόσβεσής τους. Τέλος, παρουσιάζονται ο τρόπος ενσωμάτωσης ψηφιακών μοντέλων TCSC και TCPAR σε υπολογιστικό πακέτο ροής φορτίου για τον έλεγχο της ροής ενεργού ισχύος γραμμών μεταφοράς και τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους σε μοντέλο του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος παραγωγής-μεταφοράς.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο παρουσιάζεται μεθοδολογία προσδιορισμού των βασικών παραμέτρων ενός TCSC και με βάση αυτή διαστασιολογείται μια διάταξη TCSC 400 kV, 50 Hz, μεταβλητής σύνθετης

αντίστασης 15÷50 Ω. Επίσης, παρουσιάζεται ο τρόπος σχεδιασμού εργαστηριακού μοντέλου TCSC και η συμπεριφορά του σε εργαστηριακό μοντέλο ΣΗΕ. Τέλος, αναλύοντας τόσο τις μετρήσεις στο εργαστηριακό μοντέλο όσο και τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις στο EMTP, διερευνάται το αρμονικό περιεχόμενο στον εσωτερικό βρόχο του TCSC και η έγχυση αρμονικών στο υπόλοιπο σύστημα, ενώ εξετάζεται και η επίδραση παραμέτρων του TCSC στο μέγεθος των αρμονικών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, αρχικά παρουσιάζονται οι ορισμοί που αφορούν την ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και στη συνέχεια:

a) παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμογής των δένδρων απόφασης για την εύρεση της βέλτιστης θέσης και ποσοστού αντιστάθμισης σειράς προκειμένου να αυξηθεί το περιθώριο φόρτισης του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται τα βασικά στοιχεία της θεωρίας των δένδρων απόφασης και παρουσιάζεται ο αλγόριθμος δημιουργίας των συνόλων μάθησης και ελέγχου, τα κριτήρια ταξινόμησης των σημείων λειτουργίας του συστήματος σε ασφαλή/μη ασφαλή, ο τρόπος επιλογής των τελικών ιδιοτήτων των δένδρων απόφασης, η επίδραση του αριθμού των ιδιοτήτων και της προσέγγισης στο σημείο Μ.Μ.Ι. στην ποιότητα και την παρεχόμενη πληροφορία από τα δένδρα απόφασης. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθοδολογίας αυτής στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα για επιλεγμένες διαταραχές παρουσιάζονται και σχολιάζονται.

β) παρουσιάζεται εφαρμογή της μεθόδου υπολογισμού των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος μέχρι την κατάρρευση ως προς παραμέτρους του συστήματος, όπου με χρήση της επαγωγικής αντίδρασης των γραμμών μεταφοράς ως παράμετρο για τον υπολογισμό των ευαισθησιών είναι δυνατός ο καθορισμός της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης διατάξεων αντιστάθμισης σειράς. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα παρατίθενται και σχολιάζονται.

Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο παραπάνω εφαρμογών.

Το έκτο κεφάλαιο αποτελεί μία σύνοψη των θεμάτων που πραγματεύεται η εργασία. Συγκεντρώνονται και παρατίθενται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα προηγούμενα κεφάλαια, περιγράφεται η συμβολή της παρούσας διατριβής και διατυπώνονται συγκεκριμένες προτάσεις αναφορικά με τα σημεία στα οποία προτείνεται να επικεντρωθεί η μελλοντική έρευνα.

Τέλος, παρατίθεται η σχετική βιβλιογραφία καθώς και τέσσερα παραρτήματα.

Το παράτημα Α περιλαμβάνει την ανάλυση Fourier του ρεύματος που διαρρέει τα θυρίστορ του TCSC, από τη οποία προκύπτει το αρμονικό του περιεχόμενο.

Στο παράτημα B αναφέρονται οι βασικές παράμετροι και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης TCSC στον Υ/Σ Kayenta, που χρησιμοποιείται ως αναφορά στην παρούσα διατριβή.

Στο Παράρτημα Γ παρατίθενται τα λεπτομερή τεχνικά χαρακτηριστικά και τα λειτουργικά σχέδια του εργαστηριακού μοντέλου TCSC.

Στο Παράρτημα Δ παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εργαστηριακού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ για τη σύνδεση του εργαστηριακού μοντέλου TCSC και τη λήψη των απαραίτητων κυματομορφών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (FACTS)

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνολογία των FACTS δεν αποτελείται από μία μόνο συσκευή ελέγχου ισχύος, αλλά μάλλον είναι μια σειρά διατάξεων και συσκευών ελέγχου, που μπορούν να εφαρμοσθούν μεμονωμένα, ή συλλογικά κατά συστηματικό τρόπο, για τον έλεγχο των αλληλεπιδρουσών παραμέτρων των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στον ακόλουθο Πίνακα 2.1 αναγράφονται οι κύριες διατάξεις FACTS και οι αντίστοιχες λειτουργίες τους [127,128]. Όπως φαίνεται στον πίνακα αυτό, υπάρχουν επικαλύψεις στην επίδραση των διατάξεων αυτών και πρέπει σε κάθε περίπτωση να γίνεται η καταλληλότερη επιλογή.

Οι διάφορες συσκευές FACTS μπορεί να διαχωριστούν με κριτήριο τον τρόπο σύνδεσής τους στο δίκτυο μεταφοράς. Έτσι έχουμε τους εξής τύπους:

- εγκάρσιες (όπως ο SVC και ο STATCON) ,που παρέχουν κύρια έλεγχο της τάσης και της αέργου ισχύος,
- σειράς (όπως ο TCSC και ο ACSC), που παρέχουν κύρια έλεγχο της ενεργού και μερικώς της αέργου ισχύος.
- συνδυασμός των παραπάνω (όπως ο TCPAR και ο UPFC).

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται σχηματικά οι ρυθμιστικές ικανότητες (α) ενός ρυθμιστή τάσης, (β) μιας ελεγχόμενης χωρητικής αντιστάθμισης σειράς, (γ) ενός ρυθμιστή φάσης και (δ) μιας ενοποιημένης διάταξης ελέγχου ισχύος.

Η πρώτη γενιά ρυθμιστών περιλαμβάνει δύο διατάξεις ρυθμιστών με θυρίστορ, το στατικό αντισταθμιστή VAR και τη διάταξη απόσβεσης υποσύγχρονων ταλαντώσεων, τα οποία χρησιμοποιούνται ήδη αρκετά χρόνια. Στα FACTS αναφέρεται, επίσης, και ο Υπεραγώγιμος Μαγνητικός Συσσωρευτής Ενέργειας (Super conducting Magnetic Energy Storage - SMES), ο οποίος δεν περιλαμβάνεται στον πίνακα 2.1. Σήμερα, πολλοί ρυθμιστές χρησιμοποιούνται ως ευέλικτα συστήματα μεταφοράς, και μερικοί βρίσκονται ακόμη στο στάδιο της ανάπτυξης, ενώ σε πολλές συσκευές χρησιμοποιούνται πλέον θυρίστορ με ελεγχόμενη σβέση (GTO) και η λειτουργία τους υλοποιείται με χρησιμοποιούνται πλέον θυρίστορ με ελεγχόμενη σβέση (GTO) και η λειτουργία τους υλοποιείται με χρησιμοποιόνται πολυπαλμικών αντιστροφέων πηγής τάσης (Voltage source Inverters-VSI). Έτσι, ένας άλλος διαχωρισμός των FACTS είναι με κριτήριο αν περιλαμβάνουν συμβατικά θυρίστορ ή θυρίστορ GTO, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Τα πλεονεκτήματα των συσκευών FACTS με GTO θυρίστορ είναι τα ακόλουθα:

- μικρότερες διαστάσεις,
- περιορισμός παθητικών στοιχείων,
- καλύτερη λειτουργική συμπεριφορά.

Πίνακας 2.1: Οι κυριότερες διατάξεις FACTS.

	Διάταξη Ελέγχου	Λειτουργία
1.	Στατικός Αντισταθμιστής VAR (Static Var Compensator-SVC)	Έλεγχος τάσης Αντιστάθμιση αέργου ισχύος Απόσβεση ταλαντώσεων Μεταβατική ευστάθεια Ευστάθεια τάσης
2.	Αντιστάθμιση Σειράς Ελεγχόμενη από θυρίστορ (Thyristor Controlled Series Compensation–TCSC)	Έλεγχος σύνθετης αντίστασης Έλεγχος μεταφερόμενης ισχύος Απόσβεση ταλαντώσεων Μεταβατική ευστάθεια Μείωση ρεύματος σφάλματος
3.	Διάταξη Απόσβεσης Υποσύγχρονων Ταλαντώσεων (<i>NGH-SSR damper</i>)	Απόσβεση υποσύγχρονων ταλαντώσεων
4.	Ρυθμιστής Φασικής Γωνίας Ελεγχόμενος με θυρίστορ (<i>Thyristor Controlled Phase Angle Regulator -</i> <i>TCPAR</i> ή <i>Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer -</i> <i>TCPST</i>)	Έλεγχος φασικής γωνίας Έλεγχος μεταφερόμενης ισχύος Απόσβεση ταλαντώσεων Μεταβατική ευστάθεια Ευστάθεια τάσης
5.	Στατικός Πυκνωτής (Static Condenser - STATCON ή Static Synchronous Compensator – STATCOM)	Έλεγχος τάσης Αντιστάθμιση αέργου ισχύος Απόσβεση ταλαντώσεων Ευστάθεια τάσης
6.	Εξελιγμένη Ελεγχόμενη Αντιστάθμιση Σειράς (Advanced Controlled Series Compensation- ACSC) ή Στατικός σύγχρονος πυκνωτής σειράς (Static Synchronous Series Compensator – SSSC)	Έλεγχος σύνθετης αντίστασης Έλεγχος μεταφερόμενης ισχύος Απόσβεση ταλαντώσεων Μεταβατική ευστάθεια
7.	Ενοποιημένη Διάταξη Ελέγχου Ισχύος (Unified Power Flow Controller – UPFC)	Έλεγχος μεταφερόμενης ενεργού & αέργου ισχύος Αντιστάθμιση αέργου ισχύος, Έλεγχος τάσης Απόσβεση ταλαντώσεων Μεταβατική ευστάθεια Μείωση ρεύματος σφάλματος
8.	Δυναμική Πέδη Ελεγχόμενη με θυρίστορ (Thyristor Controlled Dynamic Brake)	Απόσβεση ταλαντώσεων Μεταβατική ευστάθεια



Σχήμα 2.1: Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας των FACTS.

ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΘΥΡΙΣΤΟΡ

GTO ΘΥΡΙΣΤΟΡ







 \vec{I}_2



Σχήμα 2.2: Διαχωρισμός συσκευών FACTS ανάλογα με την τεχνολογία θυρίστορ.

2.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ FACTS

2.2.1. Στατικός Αντισταθμιστής VAR (SVC)

Οι γραμμές μεταφοράς των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει, για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους, να λειτουργούν με την υψηλότερη δυνατή τάση που θα πρέπει επίσης να είναι σταθερή, δεδομένου ότι υπό αυτές τις συνθήκες μεγιστοποιείται η ικανότητα μεταφοράς και ελαχιστοποιούνται οι απώλειες.

Ο Στατικός Αντισταθμιστής VAR (Σχήμα 2.3) χρησιμοποιείται κυρίως για ρύθμιση της τάσης και έλεγχο της αέργου ισχύος του δικτύου και τοποθετείται σαν εγκάρσιο κύκλωμα. Αποτελείται από τα ακόλουθα:

- Πηνία Ελεγχόμενα με θυρίστορ (Thyristor Controlled Reactor/ TCR).
- Πυκνωτές Διακοπτόμενους με θυρίστορ (Thyristor Switched Capacitor/ TSC).
- Φίλτρα αρμονικών.
- Μ/Σ υποβιβασμού τάσης, επειδή η τάση των TCR και TSC για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους περιορίζεται σε 50kV και 30kV αντίστοιχα.

Ο SVC έχει κάποια ικανότητα να ελέγχει την ευστάθεια, αλλά καμιά ικανότητα να ελέγχει την ροή ενεργού ισχύος. Σαν ελεγχόμενο εγκάρσιο στοιχείο μπορεί ακόμη να προσφέρει και άλλες υπηρεσίες, όπως σταθεροποίηση λειτουργίας ως αποτέλεσμα βελτίωσης των μεταβατικών χαρακτηριστικών μεταφοράς, αύξηση της ικανότητας μεταφοράς των συνδέσεων του δικτύου, απόσβεση των διακυμάνσεων της ενεργού ισχύος με κατάλληλη ρύθμιση της αέργου ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο και απόσβεση των υποσύγχρονων συντονισμών.



Σχήμα 2.3: Διάταξη Στατικού Αντισταθμιστή VAR (SVC).

Ένα τυπικό μοντέλο SVC με σταθερό στοιχείο αντιστάθμίσης B_o (επαγωγικό ή χωρητικό) και μεταβλητό ελεγχόμενο πυκνωτή B_I (με άνω και κάτω όρια) παριστάνεται στο Σχήμα 2.4.α.



(γ) Χαρακτηριστική V-Ι SVC.

Σχήμα 2.4: Μοντέλο SVC.

Το σύστημα ελέγχου της διάταξης (Σχήμα 2.4.β) έχει μια προκαθορισμένη στάθμη τάσης V_{ref} και μετρούμενη ανάδραση V_{sv} . Το σφάλμα ΔV ενεργοποιεί το σύστημα ελέγχου, το οποίο εισάγει την απαιτούμενη άεργο ισχύ αντιστάθμισης του μεταβλητού πυκνωτή. Ο συνδυασμός σταθερής και μεταβλητής αγωγιμότητας συγκρίνεται με την τάση λειτουργίας και δίνει το άεργο ρεύμα I_{svc} , το οποίο εγχέεται θετικά ή αρνητικά στη γραμμή. Οι σχετικές εξισώσεις λειτουργίας είναι οι ακόλουθες:

$$\widetilde{I}_{_{\mathcal{E}YY}} = -\widetilde{V}\widetilde{Y} \quad \text{órov} \quad \widetilde{Y} = 0 + jB_1 \tag{2.1}$$

$$\widetilde{S} = \widetilde{VI}_{SVC}^* \tag{2.2}$$

$$Q = \left| \tilde{V} \right|^2 (B_1 + B_0)$$
 (2.3)

Στο Σχήμα 2.4.γ παρουσιάζεται η χαρακτηριστική V-I του SVC καθώς και η περιοχή ελέγχου.

Ο Στατικός Αντισταθμιστής VAR (SVC) ήταν ο πρώτος ελεγκτής FACTS, που εγκαταστάθηκε σε σύστημα, έχει μελετηθεί διεξοδικά [129] και σήμερα αποτελεί συμβατική τεχνολογία με πολλές εφαρμογές [130,131]. Επίσης, μελετάται η εγκατάσταση επανατοποθετούμενων SVC (relocatable SVCs) [132].

2.2.2. Ελεγχόμενη Αντιστάθμιση Σειράς (TCSC)

Η αντιστάθμιση σειράς, έχει αποδειχθεί από πολύ νωρίς ότι είναι ένα αποδοτικό μέσο για τη βελτίωση της ευστάθειας του δικτύου [35]. Αυξάνει τη μεταφερόμενη ισχύ της γραμμής, βελτιώνει το προφίλ της τάσης, ενώ με κατάλληλες προστατευτικές διατάξεις μπορεί να συμβάλει στη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Ιστορικά, η κύρια εφαρμογή της αντιστάθμισης σειράς, ήταν στη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ με την πρόσφατη ανάπτυξη των ελεγχόμενων πυκνωτών σειράς, έχουν δημιουργηθεί νέες δυνατότητες εφαρμογών στον έλεγχο της ροής ισχύος σε διασυνδεδεμένα δίκτυα και στην απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος σε διασυνδετικές γραμμές.

Δεδομένου ότι η σύνθετη αντίσταση σειράς μιας τυπικής γραμμής μεταφοράς είναι κυρίως επαγωγική, με μόνο ένα μικρό ποσοστό της ωμικό, εξυπηρετεί ο έλεγχος της σύνθετης αντίστασης στη μόνιμη κατάσταση, με προσθήκη ενός πυκνωτή σειράς. Επειδή ο πυκνωτής εισάγει μια αρνητική σύνθετη αντίδραση, η εισαγωγή του μεταβλητού πυκνωτή σειράς σημαίνει μια μεταβλητή αρνητική σύνθετη αντίδραση εν σειρά με τη φυσική θετική σύνθετη αντίδραση της γραμμής κι επομένως κατά βούληση ενίσχυση της ισχύος και της ευστάθειας, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_{12} - X_C} \sin \delta_{12}$$
(1.3)

όπου

 X_{C} η μεταβλητή χωρητική αντίδραση του TCSC.

Η ελεγχόμενη αντιστάθμιση σειράς (TCSC) αποτελείται από ένα συμβατικό πυκνωτή παράλληλα συνδεδεμένο με ένα πηνίο ελεγχόμενο με αντιπαράλληλα θυρίστορ (Σχήμα 2.5.α). Ανάλογα με τη γωνία έναυσης των θυρίστορ (μεταξύ 90° και 180°), το ρεύμα που κυκλοφορεί στο κλειστό κύκλωμα μπορεί να έχει την ίδια ή αντίθετη φορά με το ρεύμα της γραμμής, με αποτέλεσμα η διάταξη να παρουσιάζει χωρητική ή επαγωγική μεταβλητή σύνθετη αντίσταση (Σχήμα 2.5.β).

Για γωνία έναυσης ίση με 180° η διάταξη συμπεριφέρεται ως συμβατικός πυκνωτής. Στην περίπτωση της χωρητικής συμπεριφοράς (γωνίες μεταξύ 145° και 180°), το ρεύμα που κυκλοφορεί προκαλεί μία αύξηση της τάσης (voltage boost) στα άκρα του πυκνωτή με αποτέλεσμα η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση της συσκευής (δηλ. η σύνθετη αντίσταση με την οποία "βλέπει" τη συσκευή το σύστημα), να αυξάνεται. Στην επαγωγική περιοχή λειτουργίας (γωνίες μεταξύ 90° και 140°) παρουσιάζει μεταβλητή επαγωγική σύνθετη αντίσταση. Για γωνία έναυσης ίση με 90° συμπεριφέρεται ως συμβατικό πηνίο.

Λόγω της δυνατότητας συνεχούς ελέγχου της φαινόμενης αντίδρασης του TCSC, μπορεί να συμβάλει, μέσω της περιγραφείσας λειτουργίας, στον έλεγχο της ροής ισχύος, στην αύξηση της μεταβατικής ευστάθειας, στην προσαρμογή χαρακτηριστικών της προστασίας και στον έλεγχο των υπερφορτίσεων. Με την εισαγωγή ενός πρόσθετου σήματος, όπως είναι η μεταβολή της ενεργού ισχύος μιας γραμμής μεταφοράς, η αντιστάθμιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόσβεση των ταλαντώσεων ισχύος του δικτύου. Ο ιεραρχικός έλεγχος του διασυνδεδεμένου συστήματος παραγωγής-μεταφοράς με TCSC κατανεμημένα στις γραμμές μεταφοράς, επιτρέπει την εφαρμογή σύνθετων και βελτιστοποιημένων καταστάσεων φόρτισης, με διάφορα επιθυμητά χαρακτηριστικά, όπως η διατήρηση επιθυμητού προφίλ τάσης ή ελαχιστοποιημένες συνολικές απώλειες στο σύστημα.

Ο τρόπος λειτουργίας και τα διάφορα φαινόμενα που σχετίζονται με την ελεγχόμενη αντιστάθμιση σειράς αναλύονται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 3.





2.2.3. Διάταξη Απόσβεσης Υποσύγχρονου Συντονισμού (NGH-SSR damper)

Ο υποσύγχρονος συντονισμός (Subsynchronous Resonance-SSR) αποτελεί ένα ανεπιθύμητο αποτέλεσμα της χρησιμοποίησης πυκνωτών σειράς. Σύμφωνα με την IEEE Subsynchronous Resonance Working Group [78-84] οι υποσύγχρονες ταλαντώσεις (Subsynchronous Oscillations -SSO) αποτελούν "μια συνθήκη του συστήματος ισχύος κατά την οποία το ηλεκτρικό σύστημα ανταλλάσσει σημαντικά ποσά ενέργειας μεταξύ μιας στροβιλογεννήτριας σε μία ή περισσότερες φυσικές συχνότητες του συστήματος μετά από μια διαταραχή στις συνθήκες ισορροπίας του συστήματος". Κατά συνέπεια, ο όρος SSR περιλαμβάνει τις ηλεκτρομηγανικές ταλαντώσεις μεταξύ των αξόνων μιας πολυβάθμιας στροβιλογεννήτριας και μιας γραμμής μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς όταν η ανταλλασσόμενη ενέργεια έχει αυξητική τάση. Πιο αναλυτικά, για να συμβεί το φαινόμενο αυτό, πρέπει η διαφορά της ονομαστικής συχνότητας του συστήματος από τη φυσική συγνότητα ταλάντωσης της επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής μεταφοράς με τη γωρητική αντίδραση του πυκνωτή σειράς να γίνει ίση με μία από τις συχνότητες ταλάντωσης μιας πολυβάθμιας γεννήτριας. Στην αρχή της 10-ετίας του 1970, μετά τη ζημιά του άξονα μιας ατμογεννήτριας στο Mohave της Southern California Edison Company [77], από υποσύγχρονο συντονισμό, ο οποίος οφειλόταν σε μεγάλο ποσοστό στη χωρητική αντιστάθμιση σειράς μιας γραμμής 500 kV, η αντιστάθμιση ελαττώθηκε και η όλη πρακτική εφαρμογή των πυκνωτών σειράς αναθεωρήθηκε.

Η διάταξη απόσβεσης υποσύγχρονου συντονισμού, η οποία προτάθηκε από τον N.G. Hingorani και για το λόγο αυτό φέρει τα αρχικά NGH, είναι εγκατεστημένη στον έναν από τους πυκνωτές στον Υ/Σ Lugo στη Νότια Καλιφόρνια από το 1984 [87,88]. Η διάταξη περιλαμβάνει ένα διακόπτη ΕΡ με αντιπαράλληλα θυρίστορ συνδεδεμένο εν σειρά με ένα μικρό επαγωγικό πηνίο και μια αντίσταση και όλα εν παραλλήλω προς τον πυκνωτή (Σχήμα 2.6). Το κύκλωμα πηνίου-αντίστασης, όταν

ανιχνεύονται υποσύγχρονες συχνότητες, παρέχει μέσω των ελεγχόμενων θυρίστορ μια διαδρομή του ρεύματος της γραμμής μεταφοράς, εκτός του πυκνωτή σειράς, δηλαδή ένα κύκλωμα απόσβεσης των υποσύγχρονων ταλαντώσεων. Αναλυτικότερα, ο τρόπος λειτουργίας της συσκευής αυτής περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.



Σχήμα 2.6: Διάταξη Απόσβεσης Υποσύγχρονων Συντονισμού (NGH-SSR damper).

Πρέπει να σημειωθεί ότι σήμερα η ελεγχόμενη αντιστάθμιση σειράς με κατάλληλο έλεγχο μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην απόσβεση του υποσύγχρονου συντονισμού, διατηρώντας τη δυνατότητα υψηλών ποσοστών αντιστάθμισης σειράς.

2.2.4. Ρυθμιστής Φασικής Γωνίας Ελεγχόμενος με Θυρίστορ (TCPAR)

Μια ακόμα διάταξη για τον έλεγχο των ροών φορτίου είναι ο ελεγχόμενος με θυρίστορ ρυθμιστής φασικής γωνίας [133]. Με ταχύ έλεγχο της φασικής τάσης, μπορεί να επηρεαστεί η διαφορά των γωνιών τάσης κατά μήκος μιας γραμμής και με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο έλεγχος της ροής ενεργού ισχύος. Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται η διάταξη αυτή και ο βασικός τρόπος λειτουργίας της στο σύστημα.



Σχήμα 2.7: Διάταξη Ρυθμιστή Φασικής Γωνίας Ελεγχόμενης με θυρίστορ (TCPAR).

Η μεταβολή της γωνίας επιτυγχάνεται με την προσθήκη ή αφαίρεση μιας μεταβλητής συνιστώσας $\pm \Delta \widetilde{V}$ της τάσης, κάθετη προς τη φασική τάση της γραμμής \widetilde{V} . Αυτή η κάθετη συνιστώσα της τάσης παρέχεται από ένα μετασχηματιστή σειράς συνδεδεμένο μεταξύ των δύο άλλων φάσεων της γραμμής, η έξοδος του οποίου παρέχει μια τάση, ρυθμιζόμενη κατά μέγεθος και πολικότητα μέσω διακοπτών θυρίστορ. Η συνισταμένη τάση στην έξοδο της γραμμής είναι ίση με $\widetilde{V}' = \widetilde{V} \pm \Delta \widetilde{V}$. Το μέγεθος και η κατεύθυνση της $\Delta \widetilde{V}$ καθορίζει και τη γωνία α αποκλίσεως της \widetilde{V}' από τη \widetilde{V} .

2.2.5. Στατικός Πυκνωτής (STATCON)

Ο στατικός αντισταθμιστής VAR (SVC), που περιγράφηκε στα προηγούμενα αποτελεί ήδη σήμερα μια καθιερωμένη τεχνική ελέγχου της τάσης. Φαίνεται, εντούτοις, ότι πολύ σύντομα στο μέλλον θα ξεπεραστεί από μια νέα διάταξη, καλούμενη στατικό πυκνωτή (STATCON) [134], η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8. Η διάταξη αυτή στην ουσία είναι ένας τριφασικός μετατροπέας, ενεργοποιούμενος από την τάση κατά μήκος ενός πυκνωτή φόρτισης ΣΡ, του οποίου οι τρεις τάσεις εξόδου είναι σε φάση με τις τάσεις ΕΡ του συστήματος. Όταν οι τάσεις εξόδου είναι υψηλότερες (ή χαμηλότερες) από τις τάσεις ΕΡ του συστήματος, η ροή του ρεύματος προπορεύεται (ή επιπορεύεται) και η διαφορά στα μεγέθη της τάσης καθορίζει το μέγεθος του ρεύματος. Ο πυκνωτής, δηλαδή, μπορεί να φορτιστεί κατά μια πολικότητα, μέσω του μετατροπέα να μείνει φορτισμένος ($V > V_o$) και να εκφορτιστεί μέσω των ελεγχόμενων θυρίστορ GTO, παρέχοντας χωρητική ισχύ στο σύστημα ($V_o > V$).Με τον τρόπο αυτό, η άεργος ισχύς κατά μέγεθος και πολικότητα μπορεί να ελεγχθεί, μέσω ελέγχου της τάσης.

Η υπεροχή του STATCON έναντι της παραδοσιακής και εγκάρσιας αντιστάθμισης με SVC έγκειται στην αποδιδόμενη ισχύ. Η μέγιστη άεργος ισχύς, την οποία μπορεί να αποδώσει στο σύστημα ο STATCON, ισούται με το γινόμενο της τάσης επί το ρεύμα, ενώ στην περίπτωση του SVC είναι $V^2\omega$ C. Συνεπώς, εάν η τάση μειωθεί ο STATCON μπορεί ακόμη να αποδώσει μεγάλες ποσότητες αέργου ισχύος, κάνοντας χρήση της ικανότητας υπερφόρτισής του. Από την άλλη μεριά, με τον SVC η άεργος ισχύς μειώνεται δραστικά, ως συνάρτηση του τετραγώνου της τάσης, ακριβώς τότε που κυρίως χρειάζεται. Επομένως, ανάλογα με την εφαρμογή, η απαιτούμενη ονομαστική ισχύς του στατικός πυκνωτή θα είναι πολύ μικρότερη από την ισχύ ενός αντίστοιχου SVC. Εντούτοις, ο στατικός πυκνωτής απαιτεί τη χρησιμοποίηση θυρίστορ GTO, τα οποία προς το παρόν είναι πολύ δαπανηρά και έχουν περισσότερες απώλειες και μικρότερες ικανότητες τάσης και ρεύματος. Έτσι, ενώ η τρέχουσα τεχνολογία των θυρίστορ έχει φθάσει τα 8 kV, 4000 A η τεχνολογία των GTO βρίσκεται στα 4,5 kV÷6 kV, 4000A÷ 6000A [135,136].



Σχήμα 2.8: Διάταξη Στατικού Πυκνωτή (STATCON).

2.2.6. Εξελιγμένη Ελεγχόμενη Αντιστάθμιση Σειράς (ACSC)

Παραπλήσια με τη δομή του στατικού πυκνωτή (STATCON) είναι και η δομή της εξελιγμένης ελεγχόμενης αντιστάθμισης σειράς (ACSC), η οποία φαίνεται στο Σχ. 2.9 [137]. Η ACSC είναι μια ελεγχόμενη άεργη πηγή τάσης όπου ο μετατροπέας εισάγει ένα ελεγχόμενο διάνυσμα τάσης V_T , μεταβλητού μέτρου και γωνίας, σε σειρά με τη γραμμή μεταφοράς στην οποία συνδέεται. Όταν η τάση αυτή καθυστερεί του ρεύματος της γραμμής κατά 90° τότε ο ACSC παρουσιάζει αντίστοιχη συμπεριφορά με το TCSC. Επιπλέον, η εν σειρά εισαγόμενη τάση μπορεί να προηγείται του

ρεύματος κατά 90° και να απορροφά άεργο ισχύ από τη γραμμή. Στην περίπτωση αυτή η γραμμή γίνεται ηλεκτρικά ισοδύναμη με γραμμή μεγαλυτέρου μήκους. Η δυνατότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξηθεί η ικανότητα απόσβεσης ταλαντώσεων καθώς επίσης και για τον περιορισμό σφαλμάτων ρεύματος στη γραμμή με την προϋπόθεση ότι η ονομαστική ισχύς της συσκευής επιτρέπει κάτι τέτοιο.

Ο ACSC είναι συσκευή αντιστάθμισης σειράς και όπως ακριβώς και ο TCSC μπορεί με κατάλληλο έλεγχο να χρησιμοποιηθεί για να εξισώσει τα ρεύματα σε παράλληλες γραμμές [138], ενώ μπορεί να συμβάλει στη ρύθμιση της ενεργού ισχύος με στόχο τη διατήρηση της ευστάθειας [139]. Πλεονεκτεί, όμως, σε σχέση με τον TCSC στο γεγονός ότι επειδή δεν χρησιμοποιεί παθητικά στοιχεία (πυκνωτές) δεν υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης συντονισμού με την επαγωγική αντίδραση της γραμμής και κατά συνέπεια δεν υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης υποσύγχρονου συντονισμού στο σύστημα μεταφοράς στο οποίο συνδέεται.



Σχήμα 2.9: Διάταξη Εξελιγμένης Ελεγχόμενης Αντιστάθμισης σειράς (ACSC).

2.2.7. Ενοποιημένη Διάταξη Ελέγχου Ισχύος (UPFC)

Η ενοποιημένη διάταξη ελέγχου ισχύος (UPFC) αποτελεί συνδυασμό της ACSC και του STATCON. Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη αποτελείται από δύο μετατροπείς ελεγχόμενους από θυρίστορ και συνδεδεμένους με ένα κοινό σύνδεσμο ΣΡ, ο οποίος περιλαμβάνει ένα πυκνωτή φόρτισης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Ο ένας μετατροπέας είναι συνδεδεμένος εν σειρά στη γραμμή και επιτελεί την κύρια λειτουργία της UPFC, εισάγοντας μια τάση ΕΡ, με ελεγχόμενο μέγεθος και γωνία. Ο δεύτερος μετατροπέας συνδέσται εγκάρσια στη γραμμή και η βασική του λειτουργία είναι να παρέχει, ή να απορροφά την ενεργό ισχύ, η οποία ζητείται από το μετατροπέα σειράς, μέσω του κοινού συνδέσμου ΣΡ. Και οι δύο μετατροπείς έχουν την ικανότητα να ανταλλάσσουν, ανεξάρτητα ο καθένας, άεργο ισχύ με το σύστημα. Η UPFC εγχέει ένα διάνυσμα τάσης ΕΡ, \tilde{V}_{pq} με μεταβλητό μέγεθος και γωνία, εν σειρά προς τη φασική τάση \tilde{V} , παραγόμενο από ένα μετατροπέα θυρίστορ εγχέεται στη γραμμή. Η συνισταμένη τάση, $\tilde{V'} = \tilde{V} + \tilde{V}_{pq}$, συνεπώς μπορεί να ρυθμίζεται ανάλογα και να μεταβάλλεται κατά μέγεθος και γωνία. Η ισχύς των μετατροπέων είναι ανάλογη προς το ποσοστό της τάσης που αντιπροσωπεύει το προστιθέμενο διάνυσμα, σε σχέση με την τάση της γραμμής, δηλ. δεν είναι μεγάλη.

Η UPFC είναι η πρώτη διάταξη FACTS η οποία μπορεί να ρυθμίζει και τις τρεις παραμέτρους ροής της ισχύος, δηλ. την <u>τάση</u>, τη <u>γωνία</u> και τη <u>σύνθετη αντίσταση</u>, ταυτόχρονα. Η UPFC μπορεί να ανταποκριθεί ταχύτατα (σε ένα τέταρτο της περιόδου, περίπου) για να αποσβέσει ταλαντώσεις ισχύος, όπως τις υποσύγχρονες ταλαντώσεις συντονισμού και συνεπώς να ενισχύσει την καθολική ασφάλεια λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα 2.10: Ενοποιημένη Διάταξη Ελέγχου Ισχύος (UPFC).

Η εγκατάσταση του πρώτου UPFC έγινε το 1998 στις ΗΠΑ. Αποτελείται από δύο GTO μετατροπείς ± 160 MVA, συνδεδεμένοι με κοινό σύνδεσμο ΣΡ. Μπορεί αν λειτουργεί σαν ACSC ± 160 kV ή σαν STATCON ± 160 kV ή σαν UPFC ± 320 kV. Είναι μια συνεργασία των American Electric Power (AEP), του Electric Energy Power Institute (EPRI) και της Westinghouse Electric Corporation, και εγκαταστάθηκε σε μια θέση του συστήματος, όπου απαιτείται να ρυθμιστεί ταυτόχρονα η τάση του τερματικού ζυγού και να ελεγχθεί η ροή ισχύος [140].

2.2.8. Δυναμική Πέδη Ελεγχόμενη με Θυρίστορ

Η συσκευή αυτή περιλαμβάνει μια ωμική αντίσταση, ελεγχόμενη με διακόπτη θυρίστορ, συνδεδεμένη εγκάρσια προς τη γραμμή (Σχήμα 2.11). Η διάταξη αυτή κατάλληλα ελεγχόμενη μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την απόσβεση ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων στο σύστημα ή για τη μείωση της επιτάχυνσης μιας γεννήτριας κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής [8].



Σχήμα 2.11: Δυναμική Πέδη Απόσβεσης Ταλαντώσεων.

2.2.9. Διατάξεις ελεγχόμενες με θυρίστορ στα δίκτυα διανομής

Τελευταία, εμφανίζεται μεγάλη τάση για χρήση συσκευών ελεγχόμενων με θυρίστορ στα δίκτυα διανομής για βελτίωση της ποιότητας ισχύος. Οι συσκευές αυτές είναι γνωστές ως Custom Power Devices [141-143]. Ειδικότερα, η ελεγχόμενη αντιστάθμιση σειράς μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της λειτουργίας τους, όπως στη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης [144-147].
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΣΗΕ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ – ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤCSC

3.1. ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

3.1.1. Επίδραση της αντιστάθμισης σειράς στην αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος Γ.Μ.

Όπως είναι γνωστό, η ενεργός ισχύς η οποία μπορεί να μεταφερθεί από μία γραμμή μεταφοράς καθορίζεται από τα μέτρα και την διαφορά φάσεων των τάσεων των ζυγών αναχωρήσεως και αφίξεως και από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γραμμής. Για γραμμές ΥΤ, η ωμική αντίσταση της γραμμής είναι αμελητέα ως προς την επαγωγική αντίδραση της και η μεταφερόμενη ισχύς δίδεται με ικανοποιητική ακρίβεια από την σχέση:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin \delta_{12}$$
(3.1)

Η σχέση (3.1) για γραμμή μεταφοράς 400 kV του Ελληνικού συστήματος, συνδεδεμένη σε φορτίο με σταθερό συντελεστή ισχύος ίσο με 0.75 επαγωγικό και με το ζυγό αναχωρήσεως να είναι άπειρος ζυγός με σταθερή τάση 1 α.μ. (Σχήμα 3.1), παρουσιάζεται γραφικά στο διάγραμμα του Σχήματος 3.2. Στο σχήμα αυτό οι καμπύλες αντιστοιχούν στη μεταφερόμενη ανά μονάδα ενεργό ισχύ *P* από το ένα κύκλωμα της γραμμής μόνο ως συνάρτηση του μέτρου της τάσεως στον ζυγό φορτίου *V* για διάφορα ποσοστά αντιστάθμισης σειράς της γραμμής. Ως βάση ισχύος θεωρούνται τα 100 MVA. Η θεωρητικά μέγιστη ενεργός ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί ισούται με 5.2 αμ ή 520 MW, τιμή η οποία αντιστοιχεί στην κορυφή της καμπύλης (0%).



Σχήμα 3.1: Σύστημα άπειρου ζυγού-γραμμής μεταφοράς-φορτίου.

Από την εξέταση της σχέσης μεταφερόμενης ισχύος (3.1) προκύπτει ότι η εισαγωγή πυκνωτών αντιστάθμισης σειράς με επαγωγική αντίδραση X_c μειώνει την ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση της γραμμής, η οποία γίνεται $X'_{12} = X_{12} - X_c$, με αποτέλεσμα την αύξηση της ικανότητας μεταφερομένης ισχύος και του ορίου ευστάθειας του συστήματος σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_{12} - X_C} \sin \delta_{12}$$
(3.2)

Για την εξεταζόμενη γραμμή, παρατηρούμε ότι με αντιστάθμιση 25% η δυνατότητα μεταφερόμενης



ισχύος από την γραμμή μετατοπίζεται στα 6.9 α.μ ή 690 MW και για αντιστάθμιση 50% στα 10.2 α.μ

Σχήμα 3.2: Καμπύλη μεταφερόμενης ενεργού ισχύος Γ.Μ. – τάσης στο άκρο της.

ή 10200 MW. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι η εφαρμογή αντιστάθμισης σειράς προσφέρει ένα αποδοτικό και εύκολο τρόπο αύξησης της δυνατότητας μεταφερόμενης ισχύος από την γραμμή. Σε πιο εξελιγμένες διατάξεις μάλιστα, η δυνατότητα συνεχούς προσαρμογής της επαγωγικής αντίδρασης της διάταξης αντιστάθμιση σειράς προσφέρει έλεγχο της ροής ισχύος σε μία ευρεία περιοχή δυνατών τιμών. Θα πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι η φορά της ροής καθορίζεται από την σχετική διαφορά των γωνιών μεταξύ των δύο ζυγών. Έτσι, η μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής δεν μπορεί να προσφέρει έλεγχο της ροής ισχύος σε αμφίδρομη διεύθυνση, όπως θα ήταν δυνατόν με την εγκατάσταση συσκευών αλλαγής φάσης (phase shifters).

3.1.2. Κυριότερες διατάξεις αντιστάθμισης σειράς

Με βάση τον εξοπλισμό που συνδέεται παράλληλα με τους σειριακούς πυκνωτές και τον τρόπο ένταξής τους στο σύστημα, οι διατάξεις αντιστάθμισης σειράς διακρίνονται ως εξής:

<u>Ο Πυκνωτής Σειράς Σταθερής Χωρητικότητας (Fixed Series Capacitor-FSC)</u> (Σχήμα 3.3.1) τοποθετείται σε σειρά με τη γραμμή και αναπτύσσει στα άκρα του τάση V_c ίση με το γινόμενο του ρεύματος γραμμής I_l και της χωρητικής αντίδρασης $-jX_c$. Η μεταβολή της πτώσης τάσης στη γραμμή μπορεί να επιτευχθεί προσθέτοντας ένα τμήμα πυκνωτή, έτσι ώστε η νέα τάση να είναι $V'_c = -jI_l (X_c + \Delta X_c)$ (πρώτη τεχνική) ή με έγχυση ενός ρεύματος που προστίθεται στο ρεύμα γραμμής έτσι ώστε η νέα τάση να είναι $V'_c = -jX_c (I_l + \Delta I_l)$ (δεύτερη τεχνική).

Ο Διακοπτόμενος Μηχανικά Πυκνωτής Σειράς (Mechanically Switched Series Capacitor-MSSC) (Σχήμα 3.3.2) και ο Διακοπτόμενος με Θυρίστορ Πυκνωτής Σειράς (Thyristor Switched Series Capacitor-TSSC) (Σχήμα 3.3.3) βασίζονται στην πρώτη τεχνική μεταβολής της τάσης. Αποτελούνται από συστοιχίες πυκνωτών σε σειρά, όπου κάθε πυκνωτής συνδέεται παράλληλα με ένα συμβατικό διακόπτη και αντίστοιχα με ένα ηλεκτρονικό διακόπτη αποτελούμενο από δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ σε σειρά με πηνίο. Με τον τρόπο αυτό η χωρητική αντίδραση του συνολικού συγκροτήματος μεταβάλλεται βηματικά.

Οι Διακοπτόμενοι Μηχανικά Πυκνωτής Σειράς (MSSC) έχουν εφαρμοστεί από πολύ νωρίς. Ωστόσο, το 1960 οι διατάξεις αυτές αποκτούν μεγάλη ταχύτητα παράκαμψης ή επανένταξης των πυκνωτών με χρήση διακένων αέρα [37]. Στο τέλος της δεκαετίας του 1970, η ανάπτυξη της τεχνολογίας των μη γραμμικών αντιστάσεων οξειδίου μετάλλου επιτρέπει τη γρήγορη επανένταξη των πυκνωτών στο σύστημα μετά από σφάλματα.

Το βασικό πλεονέκτημα των Διακοπτόμενου με Θυρίστορ Πυκνωτή Σειράς (TSSC) είναι ότι ο ηλεκτρονικός διακόπτης μπορεί να εκτελέσει έναν μεγάλο αριθμό λειτουργιών σε μικρό χρονικό διάστημα, χωρίς φόβο για καταπόνηση μηχανικών μερών και χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις συντήρησης. Επίσης, μπορεί να επιλεγεί με ακρίβεια ο χρόνος λειτουργίας προκειμένου να μειωθούν τα μεταβατικά φαινόμενα. Η πρώτη τέτοια εγκατάσταση έγινε το 1991 μετά από συνεργασία της ABB και της American Electric Power Service Corporation (AEP) του Ohio σε μια γραμμή 345 kV στον Υ/Σ Kanawa River στην Δυτική Virginia και αποτελείτο από δύο MSSC 14 Ω και 21 Ω αντίστοιχα και έναν πυκνωτή 7 Ω με ηλεκτρονικό διακόπτη [43].

Ο <u>Ελεγγόμενος με Θυρίστορ Πυκνωτής Σειράς</u> (*Thyristor* Controlled Series Capacitor-TCSC) (Σχήμα 3.3.4) χρησιμοποιεί τη δεύτερη τεχνική μεταβολής της τάσης. Αποτελείται από συστοιχίες πυκνωτών, όπως προηγουμένως, και επιπλέον από ένα πυκνωτή συνδεδεμένο παράλληλα με θυρίστορ σε αντιπαράλληλη διάταξη και σε σειρά με ένα πηνίο, με δυνατότητα συνεχούς ρύθμισης της γωνίας καθυστέρησης έναυσης των θυρίστορ. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης σε σχέση με τις δύο προηγούμενες είναι το γεγονός ότι η χωρητική αντίδραση του συνολικού συγκροτήματος ρυθμίζεται με συνεγή τρόπο με αποτέλεσμα τη συνεγή ρύθμιση της ροής ισχύος στο σύστημα, την αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος χωρίς αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης και τέλος τη δυνατότητα αποφυγής του υποσύγχρονου συντονισμού. Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα θα αναλυθούν λεπτομερώς στις επόμενες παραγράφους. Οι πρώτες εγκαταστάσεις TCSC κατασκευάστηκαν στην Αμερική. Η μία από τη SIEMENS σε συνεργασία με την WAPA σε μια γραμμή 230 kV στον Y/Σ Kayenta το 1992 [44,45] τα χαρακτηριστικά της οποίας παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Β και η άλλη από την GE Industrial and Power Systems με την υποστήριξη του EPRI σε μια γραμμή 500 kV στον Y/Σ Slatt της Bonnevile Power Administration (BPA) [46,47].

Τέλος, με την <u>Εξελιγμένη Ελεγχόμενη Αντιστάθμιση Σειράς</u> (Advanced Controlled Series <u>Compensation-ACSC</u>) (Σχήμα 3.3.5) είναι μια ελεγχόμενη άεργη πηγή τάσης όπου ο μετατροπέας πηγής τάσης, αποτελούμενος από θυρίστορ GTO, εισάγει ένα ελεγχόμενο διάνυσμα τάσης μεταβλητού μέτρου και γωνίας, σε σειρά με τη γραμμή μεταφοράς. Το διάνυσμα τάσης που εισάγεται είναι μεταβλητού μέτρου και γωνίας με αποτέλεσμα η τάση να προπορεύεται ή να επιπορεύεται του ρεύματος γραμμής, με αποτέλεσμα η γραμμή να γίνεται ηλεκτρικά ισοδύναμη με γραμμή μεγαλύτερου ή μικρότερου μήκους αντίστοιχα. Στη δεύτερη περίπτωση η λειτουργία της διάταξης είναι αντίστοιχη με τη λειτουργία του TCSC.

Τα σχήματα αντιστάθμισης σειράς που εγκαθίστανται σήμερα αποτελούνται συνήθως από συνδυασμό διακοπτόμενων μηχανικά πυκνωτών και μία ή περισσότερες διατάξεις ελεγχόμενης αντιστάθμισης σειράς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.4, ώστε να υπάρχει μεγάλη ευελιξία στην επιλογή του επιθυμητού ποσοστού αντιστάθμισης και η δυνατότητα συνεχούς ελέγχου.

3.2. ΜΕΛΕΤΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ

3.2.1. Γενικά

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η επίδραση της αντιστάθμισης σειράς κατά την εμφάνιση συμμετρικών και ασύμμετρων σφαλμάτων στο σύστημα καθώς και η συμπεριφορά των διατάξεων προστασίας και παράκαμψης των πυκνωτών σειράς. Η προσομοίωση των φαινομένων γίνεται με χρήση του προγράμματος EMTP [148].

3.2.2. Περιγραφή προστατευτικών διατάξεων

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για τη σχεδίαση και λειτουργία των συστοιχιών σειριακών πυκνωτών είναι η προστασία τους έναντι υπερτάσεων. Στην περίπτωση σφάλματος στη Γ.Μ., οι τάσεις που αναπτύσσονται στα άκρα των πυκνωτών σειράς είναι πολύ μεγαλύτερες από τη μέγιστη τιμή λειτουργίας τους. Επειδή, όμως, δεν είναι οικονομικά αποδεκτό να εγκατασταθούν



Σχήμα 3.3.1: Πυκνωτής Σειράς Σταθερής Χωρητικότητας (Fixed Series Capacitor-FSC).



Σχήμα 3.3.2: Διακοπτόμενοι Μηχανικά Πυκνωτές Σειράς (Mechanically Switched Series Capacitors-MSSC).



Σχήμα 3.3.3: Διακοπτόμενοι με Θυρίστορ Πυκνωτές Σειράς (*Thyristor Switched Series Capacitors-TSSC*) σε συνδυασμό με Διακοπτόμενο Μηχανικά Πυκνωτή Σειράς.



Σχήμα 3.3.4: Ελεγχόμενος με Θυρίστορ Πυκνωτής Σειράς (*Thyristor Controlled Series Capacitor-TCSC*) σε συνδυασμό με Διακοπτόμενους Μηχανικά Πυκνωτές Σειράς.



Σχήμα 3.3.5: Εξελιγμένη Ελεγχόμενη Αντιστάθμιση Σειράς (Advanced Controlled Series Compensation-ACSC)

Σχήμα 3.3: Διάφορες διατάξεις αντιστάθμισης σειράς.

πυκνωτές που να αντέχουν τόσο υψηλές υπερτάσεις χρησιμοποιούνται μικρότερες συστοιχίες πυκνωτών με προστατευτικές διατάξεις παράκαμψης σε περίπτωση βραχυκυκλώματος και στις τρεις φάσεις. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει δυνατότητα ακαριαίας επανένταξής τους στο σύστημα αμέσως μετά τη διαταραχή, όπου η διατήρηση της ευστάθειας είναι το κύριο μέλημα και ο πυκνωτής πρέπει να είναι διαθέσιμος. Οι βασικές διατάξεις προστασίας φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα:

3.2.2.1. Κλασσικός τρόπος προστασίας

Ο κλασσικός τρόπος προστασίας φαίνεται στο Σχήμα 3.4.1. Εδώ παρουσιάζεται ο συνδυασμός ενός σπινθηριστή με ένα διακόπτη παράκαμψης και ένα πηνίο εκφόρτισης. Όταν εμφανιστεί ένα βραχυκύκλωμα στο σύστημα, το διάκενο διασπάται τη στιγμή που η τάση στα άκρα του γίνει 2÷3.5 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής τάσης του πυκνωτή. Όταν διασπαστεί το διάκενο ο διακόπτης αρχίζει να κλείνει. Όσο ο διακόπτης παραμένει κλειστός ο πυκνωτής είναι εκτός συστήματος. Στο μεταξύ, το πηνίο είναι απαραίτητο για την εκφόρτιση του πυκνωτή. Ο διακόπτης παράκαμψης ανοίγει 3-5 κύκλους μετά την εξάλειψη του σφάλματος οπότε ο πυκνωτής επανέρχεται στο σύστημα.

3.2.2.2. Σύγχρονη προστατευτική διάταξη

Η σύγχρονη προστατευτική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 3.4.2. Διάφορες παραλλαγές έχουν χρησιμοποιηθεί σε μελέτες, αλλά η βασική λειτουργία είναι η ίδια. Το βασικό στοιχείο της διάταξης αυτής είναι η μη γραμμική αντίσταση (Varistor), που αποτελείται είτε από καρβίδιο του πυριτίου (Silicon Carbide-SiC) ή από οξείδια μετάλλου (Metal-Oxide Varistor-MOV), συνήθως οξείδιο του Ψευδαργύρου (ZnO Arrester).

Η βασική ιδιότητα του MOV είναι ότι η αντίστασή του μειώνεται απότομα καθώς η τάση στα άκρα του αυξάνει και κυρίως όταν ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τιμή αναφοράς (V_{ref}). Η χαρακτηριστική εξίσωσή του είναι της μορφής:

$$I = k V^{\alpha} \tag{3.3}$$

Στην προστατευτική διάταξη του πυκνωτή σειράς, ως τάση αναφοράς του MOV, πάνω από την οποία αρχίζει να άγει, έχει καθοριστεί η τιμή της τάσης προστασίας του πυκνωτή, το επίπεδο της οποίας καθορίζεται μεγαλύτερο από τις αναμενόμενες τιμές κατά την εμφάνιση υπερφορτίσεων ή ταλαντώσεων. Με τον τρόπο αυτό το MOV αρχίζει να λειτουργεί μόνο όταν εμφανιστεί βραχυκύκλωμα. Η μέγιστη τάση στα άκρα του MOV και κατά συνέπεια και στα άκρα του πυκνωτή αποτελεί τη μέγιστη τάση του πυκνωτή στην κανονική λειτουργία, όπως φαίνεται και στη χαρακτηριστική V-I του MOV στο Σχήμα 3.5.





Σχήμα 3.4.2: Σύγχρονη διάταξη προστασίας.





Σχήμα 3.5: Χαρακτηριστική V-I μη γραμμικής αντίστασης.

Όταν εμφανιστεί ένα σφάλμα στη γραμμή μεταφοράς, το MOV που μέχρι εκείνη τη στιγμή διαρρεόταν από ένα πολύ μικρό ρεύμα αρχίζει να άγει, οπότε μειώνεται η τιμή του ρεύματος που διαρρέει τον πυκνωτή και κατά συνέπεια κρατά την τάση στα άκρα του πυκνωτή κάτω από το όριο προστασίας. Κάθε MOV μπορεί να απορροφήσει ενέργεια μέχρι ένα συγκεκριμένο όριο, η οποία καταγράφεται από βοηθητική διάταξη. Όταν το όριο αυτό ξεπεραστεί διασπάται το διάκενο αέρα. Επειδή και το διάκενο έχει περιορισμένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, ο διακόπτης παράκαμψης αρχίζει να κλείνει για να προστατευτεί πλέον το MOV. Το πηνίο εκφόρτισης αποσβένει το ρεύμα του πυκνωτή.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης έναντι της κλασσικής, είναι ότι ο πυκνωτής δεν βγαίνει εντελώς εκτός του συστήματος, αλλά συνεχίζει να διαρρέεται από ένα μικρό ρεύμα με αποτέλεσμα η επανένταξή του να γίνεται ακαριαία, χωρίς μεταβατικά φαινόμενα και με μεγαλύτερη αξιοπιστία. Επίσης, στην περίπτωση συστήματος δύο παράλληλων Γ.Μ., ως όριο απορροφούμενης ενέργειας από τα MOVs της μίας γραμμής καθορίζεται η μέγιστη απορροφούμενη ενέργεια στην περίπτωση σφάλματος στην άλλη. Έτσι, όταν εμφανιστεί σφάλμα στη μία Γ.Μ. τα διάκενα των φάσεών της διασπώνται και οι διακόπτες παράκαμψης κλείνουν, ενώ στην άλλη Γ.Μ. τα varistors των φάσεών της άγουν, αλλά τα διάκενα δεν διασπώνται, οπότε οι σειριακοί πυκνωτές αυτής της γραμμής παραμένουν στο σύστημα για να συμβάλουν στη διατήρηση της ευστάθειας. Παρόμοιο φαινόμενο έχουμε και στην περίπτωση ασύμμετρου βραχυκυκλώματος στη Γ.Μ. Στην περίπτωση αυτή μόνο ο διακόπτης παράκαμψης της φάσης (ή των δύο φάσεων) όπου έχει συμβεί το βραχυκύκλωμα κλείνει [149].

3.2.3. Μοντελοποίηση αλεξικέραυνου ZnO στο EMTP

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της προστατευτικής διάταξης του πυκνωτή σειράς, είναι αναγκαία η γνώση των παραμέτρων σχεδίασής του από τον κατασκευαστή και πιο συγκεκριμένα το ρεύμα λειτουργίας (I_r) του πυκνωτή. Από το ρεύμα λειτουργίας προσδιορίζεται το ρεύμα προστασίας του (I_{pr}) που είναι διπλάσιο του I_r . Η τιμή κορυφής της τάσης προστασίας του πυκνωτή σε αυτή την περίπτωση είναι διπλάσια από την τάση λειτουργίας του πυκνωτή V_r , σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση [150-152]:

$$V_{pk} = \sqrt{2} \cdot I_{pr} \cdot X_C = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot I_r \cdot X_C = 2 \cdot V_r$$
(3.4)

Η παραπάνω τιμή, V_{pk} , αποτελεί την τάσης αναφοράς (V_{ref}) για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του αλεξικέραυνου ZnO. Για τη μοντελοποίηση του αλεξικέραυνου χρησιμοποιείται η υπορουτίνα ARRDAT (ZnO Fitter) του προγράμματος EMTP με χρησιμοποίηση του τύπου 92 εκθετικού στοιχείου. Με την υπορουτίνα αυτή, δίνοντας τη χαρακτηριστική ενός ZnO Arrester 1 kV, γνωστή από τους κατασκευαστές, καθώς επίσης και την τιμή της V_{ref} και τον αριθμό των παραλλήλων δίσκων οξειδίου του Ψευδαργύρου, χωρίς τη χρήση διακένων, προσδιορίζεται η χαρακτηριστική εξίσωση V-I του απαιτούμενου αλεξικέραυνου ZnO. Η χαρακτηριστική αυτή εισάγεται πλέον στο κύριο πρόγραμμα EMTP, σαν μη γραμμικό στοιχείο μεταξύ δύο κόμβων.

Για τις προσομοιώσεις που ακολουθούν, θεωρήθηκε πυκνωτής με $X_C = 40\Omega$, του οποίου το ρεύμα λειτουργίας είναι $I_r=2kA$ (από στοιχεία κατασκευαστών), οπότε η τάση αναφοράς για το αλεξικέραυνο ZnO προκύπτει ίση με:

$$V_{ref} = V_{pk} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 40 = 226.24 \ kV \tag{3.5}$$

Τα παραπάνω δεδομένα εισήχθησαν στην υπορουτίνα ARRDAT (ZnO Fitter), και η χαρακτηριστική εξίσωση που προκύπτει είναι η ακόλουθη:

$$I = 15.076 \left(\frac{V}{V_{ref}}\right)^{26.53}$$
(3.6)

3.2.4. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Το υπό μελέτη σύστημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6 και αποτελείται από άπειρο ζυγό 400 kV με ισχύ βραχυκύκλωσης 35GVA, Γ.Μ. 400 kV μήκους 250 km, στο άκρο της οποίας συνδέεται φορτίο σταθεράς ισχύος 50 MVA με συντελεστή ισχύος 0.8 επαγωγικό. Η αντίδραση θετικής ακολουθίας της γραμμή μεταφοράς είναι ίση με j81.08 Ω. Για την αντιστάθμισή της τοποθετείται συστοιχία πυκνωτών, ενώ παράλληλα στον πυκνωτή κάθε φάσης υπάρχει σύγχρονη προστατευτική διάταξη. Για αντιστάθμιση 50% της επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής τοποθετείται πυκνωτής 40Ω δηλ. 80 μF. Η μοντελοποίηση του συστήματος γίνεται με τα ενσωματωμένα στοιχεία του ΕΜΤΡ, ενώ στους κόμβους σύνδεσης του πυκνωτή σειράς εισάγεται και το αλεξικέραυνο ZnO, ως μη γραμμικό στοιχείο με τα χαρακτηριστικά που προσδιορίστηκαν στην προηγούμενο παράγραφο.



Σχήμα 3.6: Υπό μελέτη σύστημα με πυκνωτή σειράς προστατευμένο από αλεξικέραυνο ZnO.

3.2.4.1. Τριφασικό βραχυκύκλωμα

Το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά την εμφάνιση τριφασικού βραχυκυκλώματος στα 10 msec, χωρίς αντιστάθμιση είναι περίπου 6 kA όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7.1. Όταν υπάρχει ο πυκνωτής αντιστάθμισης στο σύστημα το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνει, αφού μειώνεται η επαγωγική αντίδραση της γραμμής και φτάνει την τιμή των 8 kA (Σχήμα 3.7.2). Η τάση στα άκρα του πυκνωτή, κατά την εμφάνιση του σφάλματος και κατά τη διάρκεια των πρώτων κρίσιμων κύκλων μετά το βραχυκύκλωμα, ξεπερνά τα 300 kV όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7.4.

Εισάγοντας τη μη γραμμική αντίσταση (αλεξικέραυνο ZnO) στο σύστημα και παράλληλα με τον πυκνωτή μειώνεται η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης στα 4.5 kA (Σχήμα 3.7.3) και μετά

από μικρό χρονικό διάστημα επανέρχεται στην τιμή που θα είχε αν δεν υπήρχε πυκνωτής σειράς στο κύκλωμα. Συνεπώς, η αρνητική επίδραση της αντιστάθμισης σειράς στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, διαρκεί μόνο μέχρι να λειτουργήσει η προστατευτική διάταξη, οπότε και εξαλείφεται [153,154].

Επίσης, με την ένταξη της μη γραμμικής αντίστασης η τάση στα άκρα του πυκνωτή περιορίζεται, κατά τη διάρκεια των πρώτων κύκλων μετά το βραχυκύκλωμα, κάτω από την τάση αναφοράς που είναι ίση με 226.24 kV (Σχήμα 3.7.5). Στο ίδιο σχήμα παρατηρείται ότι όταν ο διακόπτης παράκαμψης κλείσει στα 200 ms, διατηρείται μία μικρή τάση στα άκρα του πυκνωτή, γεγονός που καθιστά αυτή τη διάταξη πλεονεκτική έναντι των παλαιοτέρων, αφού ο πυκνωτής μένει εντός του συστήματος και είναι εύκολη η γρήγορη επανένταξή του στο σύστημα.



Σχήμα 3.7.1: Ρεύμα γραμμής χωρίς αντιστάθμιση σειράς.



Σχήμα 3.7.2: Ρεύμα γραμμής με αντιστάθμιση σειράς.



Σχήμα 3.7.3: Ρεύμα γραμμής όταν λειτουργεί το MOV και ο διακόπτης παράκαμψης κλείνει στα 200msec.



Σχήμα 3.7.4: Τάση στα άκρα του πυκνωτή χωρίς την προστασία του MOV.



Σχήμα 3.7.5: Τάση στα άκρα του πυκνωτή όταν λειτουργεί το MOV και ο διακόπτης παράκαμψης κλείνει στα 200msec.

Σχήμα 3.7: Ρεύμα γραμμής και τάση πυκνωτή κατά τη διάρκεια τριφασικού βραχυκυκλώματος.

3.2.4.2. Διφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων a και b

Κατά την εμφάνιση διφασικού βραχυκυκλώματος μεταξύ των φάσεων a και b στα 35 msec, το ρεύμα που διαρρέει τη γραμμή έχει μέγιστη τιμή ίση με 6 kA (Σχήμα 3.8.1). Μόλις εμφανιστεί το σφάλμα, το MOV λειτουργεί αμέσως, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της τάσης στα άκρα των πυκνωτών στις φάσεις a και b στα 226.24 kV (Σχήμα 3.8.2). Στο Σχήμα 3.8.3 παρουσιάζονται τα ρεύματα του πυκνωτή και του MOV της a-φάσης, όπου παρατηρείται η εναλλαγή στην πορεία του ρεύματος μεταξύ πυκνωτή και MOV. Δηλαδή, το MOV άγει για μέρος του μισού του κύκλου και όσο η τάση στα άκρα του πυκνωτή ξεπερνά τα 226.24kV, ενώ για το υπόλοιπο μισό του κύκλου, όπου η τάση στα άκρα του πυκνωτή ξεπερνά τα 226.24kV, ενώ για το υπόλοιπο μισό του κύκλου, όπου η τάση είναι μικρότερη των 70 kV, το ρεύμα διαρρέει τον πυκνωτή. Στο Σχήμα 3.8.5 παρουσιάζονται τα ρεύματα που διαρρέουν τα MOV των τριών φάσεων, ενώ στο Σχήμα 3.8.5 παρουσιάζεται το ποσό της ενέργειας που απορροφάται από τα αλεξικέραυνα ZnO των τριών φάσεων. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι μόνο το MOV των φάσεων a και b έχουν απορροφήσει ένα μεγάλο ποσό ενέργειας (της τάξης των MJ), ενώ της υγιούς φάσης c είναι της τάξης των mJ.



Σχήμα 3.8.1:. Ρεύμα γραμμής α-φάσης όταν λειτουργεί το MOV.



Σχήμα 3.8.2: Τάση στα άκρα του πυκνωτή στις τρεις φάσεις (λειτουργίας των MOV στις φάσεις a και b).







Σχήμα 3.8.5: Ρεύμα ΜΟΥ στις τρεις φάσεις.





Σχήμα 3.8: Ρεύμα γραμμής, τάση πυκνωτή, ρεύμα και ενέργεια MOV κατά τη διάρκεια διφασικού βραχυκυκλώματος.

3.3. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤCSC

3.3.1. Περιγραφή λειτουργίας TCSC

Με τη χρησιμοποίηση των TCSC μπορεί να γίνουν συνεχείς και σε πολύ μικρά βήματα χειρισμοί για τον προσδιορισμό της αντίδρασής του χωρίς περιορισμό στη συχνότητα χειρισμών. Επίσης, αποφεύγονται τα έντονα μεταβατικά φαινόμενα, κατά την ένταξη πυκνωτών με μηχανικό τρόπο. Το βασικό κύκλωμα του TCSCφαίνεται στο μονογραμμικό διάγραμμα του Σχήματος 3.9. Αποτελείται από έναν πυκνωτή συνδεδεμένο παράλληλα με ένα πηνίο ελεγχόμενο από δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ. Το σημείο αναφοράς για τη γωνία έναυσης των θυρίστορ είναι το σημείο μηδενισμού της τάσης του πυκνωτή, με σκοπό την ελαχιστοποίηση εμφάνισης αρμονικών. Παλμοί έναυσης στέλνονται στα θυρίστορ όταν η τάση στα άκρα του πυκνωτή και το ρεύμα που τα διαρρέει είναι αντίθετα σε πολικότητα. Αυτό σημαίνει γωνίες έναυσης μεταξύ 90° και 180° για το θυρίστορ που "κοιτάζει εμπρός" και μεταξύ 270° και 360° για το θυρίστορ που "κοιτάζει πίσω", δηλ. μετά από π ακτίνια. Στη συνέχεια, όπου αναφέρονται γωνίες έναυσης θυρίστορ, αφορούν στο θυρίστορ που "κοιτάζει εμπρός".

Αποτέλεσμα της ενεργοποίησης των δύο θυρίστορ στις προαναφερθείσες χρονικές στιγμές, είναι η ροή ενός ρεύματος μέσα στο βρόχο. Το μέγεθος και η φορά του ρεύματος αυτού εξαρτάται από την τιμή της γωνίας έναυσης. Έτσι, η διάταξη μπορεί να λειτουργήσει με τρεις διαφορετικούς τρόπους :

- τα θυρίστορ μπλοκαρισμένα (σε κατάσταση αποκοπής),
- τα θυρίστορ να άγουν συνέχεια (σε κατάσταση διέλευσης),
- τα θυρίστορ να λειτουργούν με τρόπο ελεγχόμενο.

Οι δύο πρώτοι τρόποι φαίνονται στο Σχήμα 5.9.

Όταν τα θυρίστορ είναι σε κατάσταση αποκοπής (*Thyristor Blocked Mode-TBM*) (α=180°) δεν στέλνονται παλμοί έναυσης και το TCSC λειτουργεί σαν συμβατική συστοιχία πυκνωτών. Το ρεύμα της γραμμής περνά μέσα από τον πυκνωτή και το πηνίο δεν διαρρέεται από ρεύμα (σχήμα 3.10.1).

Όταν τα θυρίστορ είναι σε κατάσταση διέλευσης, δηλαδή άγουν συνέχεια (α=90°), τότε το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος γραμμής περνά από τα θυρίστορ και το πηνίο, οπότε το TCSC παρουσιάζει μία μικρή επαγωγική αντίδραση. Η λειτουργία είναι γνωστή ως *Thyristor Switched Reactor-TSR*. (σχήμα 3.10.2).

Κατά τον τρίτο τρόπο λειτουργίας όπου τα θυρίστορ άγουν κατά μέρος της ημιπεριόδου (*Thyristor* phase controlled mode-TPC ή vernier mode) ελέγχεται η γωνία έναυσης με αποτέλεσμα να ελέγχεται το ρεύμα που ρέει στο βρόχο. Ανάλογα με την τιμή της γωνίας έναυσης των θυρίστορ, το TCSC μπορεί να παρουσιάσει επαγωγική ή χωρητική αντίδραση, ως εξής:



Σχήμα 3.9: Μονογραμμικό διάγραμμα TCSC.



Σχήμα 3.10.1: Τα θυρίστορ σε κατάσταση αποκοπής.



Σχήμα 3.10.2: Τα θυρίστορ σε κατάσταση συνεχούς αγωγής.

Σχήμα 3.10: Λειτουργία του TCSC σε κατάσταση αποκοπής και διέλευσης των θυρίστορ.

<u>Χωρητική περιοχή λειτουργίας του TCSC</u>: Για μικρό χρόνο αγωγής των θυρίστορ, δηλαδή για γωνίες έναυσης κοντά στις 180°, το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα I_t (Σχήμα 3.11.1), το οποίο προστίθεται στο ρεύμα του πυκνωτή I_c, με αποτέλεσμα την ανύψωση της τάσης (voltage boost) στα άκρα του πυκνωτή. Με τον τρόπο αυτό η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση Z^{app}_{TCSC} της διάταξης (δηλ. η σύνθετη αντίσταση με την οποία "βλέπει" τη διάταξη το σύστημα), που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Z_{TCSC}^{app} = \frac{V_c}{I_{line}}$$
(3.7)

να αποκτά μια χωρητική τιμή μεγαλύτερη (και συνεχώς ελεγχόμενη) από αυτή του πυκνωτή.

Επαγωγική περιοχή λειτουργίας του TCSC: Για μεγάλο χρόνο αγωγής των θυρίστορ, δηλαδή για γωνίες έναυσης κοντά στις 90°, εμφανίζεται ένα ανεστραμμένο ρεύμα μέσα στο βρόχο (Σχήμα 3.11.2), με αποτέλεσμα η συνολική σύνθετη αντίσταση της συσκευής να αποκτά μια επαγωγική τιμή μεγαλύτερη (και συνεχώς ελεγχόμενη) από αυτή του πηνίου της διάταξης.



Σχήμα 3.11.1: Ελεγχόμενη λειτουργία του TCSC στη χωρητική περιοχή.



Σχήμα 3.11.2: Ελεγχόμενη λειτουργία του TCSC στην επαγωγική περιοχή.

Σχήμα 3.11: Λειτουργία του TCSC κατά την ελεγχόμενη λειτουργία των θυρίστορ.

3.3.2. Εξισώσεις ρεύματος και τάσης TCSC

Για τον προσδιορισμό των εξισώσεων ρεύματος και τάσης του TCSC στη θεμελιώδη συχνότητα, χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.12, όπου το σύστημα ισχύος θεωρείται ιδανική πηγή ρεύματος, $i_{ac} = 1.0cos\omega t$, με αποτέλεσμα όλο το ρεύμα των θυρίστορ να κυκλοφορεί μεταξύ του πυκνωτή και του πηνίου.



Σχήμα 3.12: Ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό των εξισώσεων ρεύματος και τάσης του TCSC.

Η εξίσωση του ρεύματος των θυρίστορ $i_T(t)$ μπορεί να προκύψει χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Laplace στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.12, οπότε προκύπτει:

$$i_{T}(t) = A\cos\omega t + [-A\cos\sigma\cos k\sigma - B\sin\sigma\sin k\sigma + DV_{c}\sin k\sigma]\cos\omega_{0}t + [A\cos\sigma\sin k\sigma - B\sin\sigma\cos k\sigma + DV_{c}\cos k\sigma]\sin\omega_{0}t$$
(3.8)

όπου

α η γωνία έναυσης (ως προς την τάση του θυρίστορ που "κοιτάζει εμπρός")

$$\sigma = \pi - \alpha,$$

$$\omega = 2\pi f, \ \omega_0^2 = \frac{l}{LC}, \ k = \frac{\omega_0}{\omega},$$

$$A = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2}, \ B = \frac{\omega_0 \omega}{(\omega_0 - \omega)^2}, \ D = \omega_0 C.$$

Τα θυρίστορ αρχίζουν να άγουν στο σημείο $\omega t = -\sigma$ και σταματούν στο σημείο $\omega t = \sigma'$. Στην παραπάνω σχέση (3.8), V_c είναι η τάση στα άκρα του πυκνωτή όταν τα θυρίστορ αρχίζουν να άγουν. Στη σχέση αυτή παρατηρείται ότι υπάρχει ένας όρος συνημίτονου ως συνάρτηση της συχνότητας την πηγής ρεύματος ω και δύο όροι (ημίτονο και συνημίτονο) ως συνάρτηση της συχνότητας συντονισμού ω_0 . Η σχέση αυτή δεν παρουσιάζει συμμετρία ως προς την αρχή $\omega t = 0$, καθώς ο όρος του ημίτονου είναι περιττή συνάρτηση, οπότε το ρεύμα που διαρρέει τα θυρίστορ είναι ασύμμετρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13. Καθώς ο χρόνο περνά, το ρεύμα αυτό γίνεται συμμετρικό, οπότε $\sigma = \sigma'$, για μια δεδομένη γωνία έναυσης, και ο συντελεστής του ημιτονοειδούς όρου μηδενίζεται. Υπ' αυτές τις συνθήκες, η τάση V_c δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{c} = \frac{B}{D}\sin\sigma - \frac{A}{D}\cos\sigma\tan k\sigma$$
(3.9)

Αντικαθιστώντας την (3.9) στην (3.8) προκύπτει συμμετρικό ρεύμα στα θυρίστορ, ίσο με:



Σχήμα 3.13: Ασύμμετρο ρεύμα θυρίστορ πριν την κατάσταση μόνιμης λειτουργίας.

$$i_T(t) = A\cos\omega t - A\left(\frac{\cos\sigma}{\cos k\sigma}\right)\cos\omega_0 t \tag{3.10}$$

Όταν ισχύει η σχέση (3.10), η τάση στα άκρα του πυκνωτή στην αρχή της διέλευσης των θυρίστορ είναι ίδια με αυτή κατά το τέλος της διέλευσης. Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζονται η τάση στα άκρα του πυκνωτή, το ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή και τα θυρίστορ για γωνία έναυσης $\alpha = 155^{\circ}$ ($\sigma = 25^{\circ}$). Όπως προκύπτει από το σχήμα αυτό, στο διάστημα μεταξύ V_A και V_B όπου άγει το θυρίστορ που "κοιτάζει εμπρός", η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι ίση με $v_c(t) = L \frac{di}{dt}$. Μετά, στο διάστημα μεταξύ V_B και V_C τα θυρίστορ σταματούν να άγουν, η τάση στα άκρα του πυκνωτή γίνεται ημιτονοειδής λόγω της κυκλοφορίας του ρεύματος γραμμής μετατοπισμένη κατά V_B και ίση με $v_c(t) = \frac{l}{C} \int i_{ac} dt + V_B$. Τέλος, στο διάστημα μεταξύ V_A και V_B. Σε αυτές τις συνθήκες λειτουργίας, τα μέτρα της τάσης V_A, V_B, V_C και V_D είαι ίσα (V_A=V_B=V_C=V_D) και το ρεύμα που διαρρέει τα θυρίστορ είναι συμμετρικό γύρω από τα σημεία $\omega t = 0, \pi,...$

Με βάση την παραπάνω μαθηματική ανάλυση, το ρεύμα των θυρίστορ $i_T(t)$, για το διάστημα μεταξύ $\omega t = -\sigma$ και $\omega t = \pi + \sigma$ δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:



Σχήμα 3.14: Τάση πυκνωτή, ρεύμα θυρίστορ και πυκνωτή στο TCSC στη μόνιμη κατάσταση.

Όμοια, η τάση του πυκνωτή $v_c(t)$ για το διάστημα μεταξύ $\omega t = -\sigma$ και $\omega t = \pi + \sigma$ δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$v_{c}(t) = -AX_{L}\sin\omega t + \frac{AkX_{L}\cos\sigma}{\cos k\sigma}\sin k\omega t \qquad \qquad \forall ua \qquad -\sigma \le \omega t \le \sigma$$

$$v_{c}(t) = X_{C}(\sin\omega t - \sin\sigma) - AX_{L}(\sin\sigma - k\cos\sigma \tan k\sigma) \quad \forall ua \qquad \sigma \le \omega t \le \pi - \sigma$$

$$v_{c}(t) = AX_{L}\sin(\omega t - \pi) - \frac{AkX_{L}\cos\sigma}{\cos k\sigma}\sin k(\omega t - \pi) \qquad \forall ua \qquad \pi - \sigma \le \omega t \le \pi + \sigma$$
(3.12)

όπου $X_L = \omega L$ και $X_C = \frac{l}{\omega C}$.

3.3.3. Σύνθετη αντίσταση του TCSC στη θεμελιώδη συχνότητα

Εφαρμόζοντας τη ανάλυση Fourier στην εξίσωση (3.10) (Παράρτημα Α), το ρεύμα που διαρρέει τα θυρίστορ στη θεμελιώδη συχνότητα προκύπτει ίσο με:

$$i_{T(I)}(t) = I_{T(I)} \cos \omega t$$

$$\delta \pi \text{ov } I_{T(I)} = A \left[\frac{(2\sigma + \sin 2\sigma)}{\pi} \right] - \frac{4A\cos^2 \sigma}{k^2 - I} \left[\frac{k \tan k\sigma - \tan \sigma}{\pi} \right]$$
(3.13)

Από την ανάλυση στη θεμελιώδη συχνότητα του ισοδύναμου κυκλώματος του Σχήματος 3.12 και λαμβάνοντας υπόψη ότι η πηγή ρεύματος εγχέει στο TCSC ρεύμα ίσο με 1Α, προκύπτει ότι η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι αριθμητικά ίση με την σύνθετη αντίσταση του TCSC, δηλαδή:

$$Z_{TCSC(1)} = \frac{V_{C(1)}}{I_{ac(1)}} = \frac{V_{C(1)}}{1.0} = V_{C(1)}$$
(3.14)

Επιπρόσθετα, το ρεύμα του πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$I_{C(l)} = I_{ac(l)} - I_{T(l)} = 1.0 - I_{T(l)}$$
(3.15)

Συνεπώς, η σύνθετη αντίσταση του TCSC στη θεμελιώδη συχνότητα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$Z_{TCSC(1)} = -X_C I_{C(1)} = -X_C \left(l - I_{T(1)} \right)$$
(3.16)

Αντικαθιστώντας το $I_{T(l)}$ από τη σχέση (3.13) στη σχέση (3.16) προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για τη σύνθετη αντίσταση του TCSC στη θεμελιώδη συχνότητα:

$$Z_{TCSC(I)} = -X_C + \left(X_C + X_{LC}\right) \left[\frac{2\sigma + \sin 2\sigma}{\pi}\right] - \frac{4X_{LC}^2 \cos^2 \sigma}{X_L} \left[\frac{k \tan k\sigma - \tan \sigma}{\pi}\right]$$
(3.17)

όπου $X_{LC} = \frac{X_C X_L}{X_C - X_L}$.

Η γραφική παράσταση της εξίσωσης (3.17) μιας τυπικής διάταξης TCSC φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Οι αρνητικές τιμές αντιστοιχούν στη χωρητική περιοχή λειτουργίας, ενώ οι θετικές στην επαγωγική περιοχή λειτουργίας.

Οι εξισώσεις (3.10) και (3.17) έχουν πόλους στα σημεία:

$$a = \pi - (2n-1)\frac{\pi}{2k} \qquad \gamma \iota \alpha \qquad n = 1, 2, \dots$$
(3.18)

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην επιλογή του κατάλληλου λόγου $k = \frac{\omega_0}{\omega}$, ώστε να υπάρχει μόνο ένα σημείο συντονισμού (που αντιστοιχεί στο σημείο συντονισμού του κυκλώματος LC) στο διάστημα μεταξύ 90° και 180°.



Σχήμα 3.15: Σύνθετη αντίσταση του TCSC στη θεμελιώδη συχνότητα συναρτήσει της γωνίας έναυσης α.

3.3.4. Μεταβατική συμπεριφορά TCSC

Στις μεταβατικές καταστάσεις, η εξίσωση (3.9) δεν ικανοποιείται. Κατά συνέπεια η σχέση (3.10) δεν ισχύει, με αποτέλεσμα να παράγονται ασύμμετρα ρεύματα στα θυρίστορ έως ότου μετά ορισμένο χρονικό διάστημα γίνουν συμμετρικά. Η συμπεριφορά αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16, όπου θεωρείται μετάβαση της γωνίας έναυσης από $\alpha = 180^{\circ}$ σε μία άλλη συγκεκριμένη γωνία έναυσης κοντά στις 180° (μικρός χρόνος αγωγής των θυρίστορ). Επίσης, θεωρείται ότι η τάση V_A είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τάση στη μόνιμη κατάσταση (Σχήμα 3.14). Στις συνθήκες αυτές, το πρώτο ρεύμα που διαρρέει τα θυρίστορ είναι τη χρονική στιγμή $\omega t = -\sigma$. Επειδή η V_A είναι ίση με $L \frac{di}{dt}$, προκύπτει ότι το ρεύμα στο θυρίστορ θα έχει μικρότερη κλίση από αυτό στη μόνιμη κατάσταση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ρεύμα των θυρίστορ να φτάνει στο σημείο μηδέν

γρηγορότερα, δηλ. $\sigma < \sigma'$. Στο σημείο $\omega t = \sigma'$ η τάση V_B είναι μεγαλύτερη κατά μέτρο από τη V_A. Η τάση V_B εκτοπίζει το ημιτονοειδές τμήμα της τάσης, το οποίο είναι μεταξύ των σημείων $\omega t = \sigma'$ και $\omega t = \pi - \sigma$ με συνέπεια η τάση V_C να είναι μεγαλύτερη από την V_B. Από την τάση V_C καθορίζεται η κλίση του ρεύματος στο δεύτερο θυρίστορ, με αποτέλεσμα και αυτό να μηδενίζεται πιο νωρίς, στο σημείο $\omega t = \pi + \sigma'$. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται επαναληπτικά και μετά ένα χρονικό διάστημα συγκλίνει στις συμμετρικές κυματομορφές του Σχήματος 3.14. Το χρονικό διάστημα αυτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, αλλά κυρίως από τη σύνθετη αντίσταση του συστήματος (η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.12).



ωt (ηλεκτρικές μοίρες)

Σχήμα 3.16: Τάση πυκνωτή και ρεύμα θυρίστορ στο TCSC στις μεταβατικές καταστάσεις.

3.3.5. Αρμονικές στο TCSC

Η εξίσωση (3.10) εκφράζει το ρεύμα που διαρρέει τα θυρίστορ στη μόνιμη κατάσταση, θεωρώντας ότι η πηγή ρεύματος *i_{ac}* εγχέει στο TCSC ρεύμα ίσο με 1Α (Σχήμα 3.12). Η ανάλυση Fourier της εξίσωσης αυτής, η οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α, μπορεί να προσδιορίσει το αρμονικό περιεχόμενο ρεύματος των θυριστορ, το οποίο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$I_T(n) = \frac{2A}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\sigma}{n+1} + \frac{\sin(n-1)\sigma}{n-1} \right] - \frac{2A\cos\sigma}{\pi\cos k\sigma} \left[\frac{\sin(k+n)\sigma}{k+n} + \frac{\sin(k-n)\sigma}{k-n} \right]$$
(3.19)

όπου *n*=3,5,7,...

Αυτά τα αρμονικά ρεύματα που εμφανίζονται στο TCSC κυκλοφορούν μέσα στο κύκλωμα LC και ένα μικρό μέρος τους διαφεύγει προς το δίκτυο, διότι η σύνθετη αντίσταση του συστήματος για αρμονικές συχνότητες είναι πολύ μεγαλύτερη από τη σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί θεωρώντας τη σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή και του συστήματος ως ένα διαιρέτη ρεύματος στις αρμονικές συχνότητες. Με τον τρόπο αυτό, το ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή δίνεται από την ακόλουθη σχέση [155]:

$$I_{C}(n) = I_{T}(n) \frac{Z_{syst}(n)}{Z_{syst}(n) + Z_{C}(n)}$$
(3.20)

Θεωρώντας ότι $Z_{syst}(n) >> Z_C(n)$, προκύπτει ότι τα αρμονικά ρεύματα διαρρέουν μόνο τον πυκνωτή, δηλ. $I_C(n) = I_T(n)$, οπότε οι αρμονικές της τάσης στα άκρα του πυκνωτή μπορούν να εκφραστούν με την ακόλουθη σχέση:

$$V_C(n) = i_T(n)X_C(n) = \frac{i_T(n)}{(n \cdot w \cdot C)}$$
(3.21)

Θεωρώντας ως βασική τάση την τάση του TCSC που αντιστοιχεί στη λειτουργία στην κατάσταση αποκοπής (α=180°), δηλαδή $V_C^{base} = IA \cdot X_c$, η εξίσωση (3.21) μπορεί να γραφεί ανά μονάδα (α.μ.) ως προς τη θεμελιώδης τάση, ως εξής [45]:

$$V_C(n) = \frac{2A}{n\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\sigma}{n+1} + \frac{\sin(n-1)\sigma}{n-1} \right] - \frac{2A\cos\sigma}{n\pi\cos k\sigma} \left[\frac{\sin(k+n)\sigma}{k+n} + \frac{\sin(k-n)\sigma}{k-n} \right] \alpha.\mu.$$
(3.22)

όπου *n*=3,5,7,...

Πρέπει να σημειωθεί ότι στο σχεδιασμό διατάξεων TCSC δίνεται προσοχή στην επιλογή του πυκνωτή, έτσι ώστε να μπορεί να αντέχει αυτό το αρμονικό περιεχόμενο χωρίς να υπερθερμαίνεται ή να καίγεται. Ο κανονισμός IEEE Std 18-1992 [156] αναφέρει τους περιορισμούς από τους οποίους μπορούν να καθοριστούν τα μέγιστα επιτρεπτά επίπεδα αρμονικών.

Στο Κεφάλαιο 4 θα διερευνηθεί διεξοδικά το αρμονικό περιεχόμενο του TCSC τόσο στο ψηφιακό μοντέλο TCSC στο EMTP όσο και σε φυσικό εργαστηριακό μοντέλο TCSC, καθώς και η έγχυση αρμονικών στο σύστημα.

3.3.6. Τρόποι ελέγχου του TCSC

Η ελεγχόμενη Αντιστάθμιση Σειράς (TCSC) μπορεί να ελεγχθεί με διαφορετικά συστήματα ελέγχου ώστε να επιτυγχάνονται οι ακόλουθες λειτουργίες:

- Έλεγχος της σύνθετης αντίσταση TCSC ώστε να έχει μια καθορισμένη τιμή. Η λειτουργία αναφέρεται και ως έλεγχος ανοικτού βρόχου (Open Loop Impedance Control-OLIC).
- Διατήρηση του ρεύματος γραμμής σταθερό. Η λειτουργία αναφέρεται και ως έλεγχος κλειστού βρόχου (Close Loop Current Control-CLCC).
 Ο έλεγχος αυτός υλοποιείται μέσω ολοκληρωτικών-αναλογικών ελεγκτών (PI controllers). Εναλλακτικά αντί του ρεύματος μπορεί να ελέγχεται η ισχύς της γραμμής.
- Απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος.
- Απόσβεση υποσύγχρονου συντονισμού.

Στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζεται ένα γενικό σχήμα ελέγχου του TCSC, το οποίο περιλαμβάνει όλους τους προαναφερθέντες ελέγχους. Συνήθως, όμως, η επιλογή εγκατάστασης ενός TCSC σε ένα σύστημα γίνεται για την αντιμετώπιση ενός συγκεκριμένου προβλήματος. Για το λόγο αυτό, μόνο ένας ή δύο από τους ελέγχους αυτούς περιλαμβάνονται σε μια εγκατεστημένη διάταξη TCSC.



Σχήμα 3.17: Γενικό σχήμα ελέγχου του TCSC.

3.3.7. V-Ι Χαρακτηριστική ενός και πολλαπλών TCSC

Τόσο ο τρόπος λειτουργίας του TCSC στη χωρητική και επαγωγική περιοχή εντός συγκεκριμένων ορίων όσο και οι περιορισμοί για ασφαλή λειτουργία του επιμέρους εξοπλισμού της διάταξης, προσδιορίζουν τη χαρακτηριστική της τάσης της διάταξης ως προς το ρεύμα της γραμμής (V-I χαρακτηριστική), η οποία για ένα τυπικό TCSC παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.18 [59].

Πιο συγκεκριμένα, στη χωρητική περιοχή λειτουργίας, η λειτουργία της διάταξης κυμαίνεται μεταξύ των 180° και της ελάχιστης γωνίας αγωγής για χωρητική λειτουργία, ενώ το ρεύμα γραμμής καθορίζεται από τους περιορισμούς τάσης. Οι περιορισμοί αυτοί δίνονται σε τρία επίπεδα: για συνεχή λειτουργία, για λειτουργία 30 λεπτών και για λειτουργία λίγων δευτερολέπτων (1 έως 10) όπου η τάση γίνεται ίση με την τάση λειτουργία του MOV για προστασία της διάταξης. Η επαγωγική περιοχή λειτουργίας, δηλαδή για γωνίες έναυσης των θυρίστορ μεταξύ 90° και της μέγιστης γωνία αγωγής για επαγωγική λειτουργία, σε χαμηλά ρεύματα περιορίζεται από τη μέγιστη γωνία αγωγής και σε υψηλά ρεύματα από το μέγιστο ρεύματα που αντέχουν τα θυρίστορ. Μεταξύ αυτών των δύο περιορισμών τίθεται, επιπρόσθετα, περιορισμός λόγω της θέρμανσης που προκαλείται από τις αρμονικές.



Σχήμα 3.18: Χαρακτηριστική V-I ενός TCSC [59].



Σχήμα 3.19: Χαρακτηριστικές V-Ι πολλαπλών βαθμίδων TCSC [59].

Από το Σχήμα 3.18 προκύπτει ότι υπάρχει μία περιοχή μεταξύ χωρητικής και επαγωγικής περιοχής, το οποίο δεν μπορεί να ελεγχθεί. Σε περιπτώσεις όπως η απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος, όπου είναι κρίσιμο να ελέγχεται ολόκληρη η περιοχή, μπορεί να επιλεγεί η χρήση πολλαπλών βαθμίδων TCSC με ίδια συνολική ισχύ με το αρχικό, αλλά πολύ μεγαλύτερο εύρος ελέγχου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19, αυξάνοντας τον αριθμό βαθμίδων TCSC, η περιοχή χωρητικής λειτουργίας των επιπρόσθετων βαθμίδων τοποθετούνται στην κενή περιοχή μεταξύ επαγωγικής και χωρητικής περιοχής του απλού TCSC, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα ελέγχου όλης της περιοχής. Η τελική επιλογή του αριθμού των βαθμίδων εξαρτάται σημαντικά και από το τελικό κόστος.

3.4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤCSC ΣΤΟ ΕΜΤΡ

3.4.1. Μοντελοποίηση του κυκλώματος ισχύος του TCSC

Το ψηφιακό μοντέλο TCSC που αναπτύσσεται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής στο EMTP χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας της διάταξης, για τη διερεύνηση αρμονικών στη διάταξη και στο σύστημα καθώς επίσης και την ανάπτυξη ελέγχου για την απόσβεση φαινομένων του υποσύγχρονου συντονισμού. Το μοντέλο αυτό αποτελεί, επίσης, αναφορά στην εργασία [26] του Working Group της IEEE.

Το μονογραμμικό διάγραμμα του κυκλώματος ισχύος του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.20. Τα βασικά στοιχεία του συστήματος ισχύος παριστάνονται από τα ενσωματωμένα στοιχεία του EMTP.



Σχήμα 3.20: Μονογραμμικό διάγραμμα μοντέλου TCSC στο EMTP.

Πιο αναλυτικά, ο πυκνωτής και το πηνίο παριστάνονται από τη χωρητικότητα και την αυτεπαγωγή τους αντίστοιχα. Για το πηνίο λαμβάνεται ένας συντελεστής ποιότητας (quality factor) προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι απώλειές του, ενώ ο κορεσμός του αγνοείται. Ο πυκνωτής θεωρείται ιδανικός, χωρίς απώλειες. Παράλληλα με τον πυκνωτή εισάγεται μια διάταξη οξειδίου του Ψευδαργύρου (ZnO). Σημειώνεται ότι η λειτουργία TSR του TCSC μπορεί να μειώσει τις απαιτήσεις σε απορρόφηση ενέργειας από τη διάταξη ZnO.

Τα θυρίστορ μοντελοποιούνται με τον τύπου-11 ελεγχόμενο διακόπτη του EMTP σε σειρά με μικρές αντιστάσεις που αντιστοιχούν σε μέρος των απωλειών κατά τη διάρκεια της διέλευσης. Ένα θυρίστορ σε κατάσταση αποκοπής μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ανοικτοκύκλωμα, ενώ όταν είναι σε κατάσταση διέλευσης με το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.21. Το θυρίστορ αρχίζει να άγει όταν η θετική τάση γίνει μεγαλύτερη από την τιμή V_{FO} (on state voltage drop) και υπάρχει ένας θετικός παλμός στην πύλη του. Η τιμή της V_{FO} είναι συνήθως 1V, αντιπροσωπεύει μέρος των απωλειών του θυρίστορ και στο EMTP αγνοείται. Με τον τρόπο αυτό τα μοντελοποιημένα θυρίστορ στο EMTP παρουσιάζουν λιγότερες απώλειες από τα πραγματικά, αλλά αυτή η απλοποίηση μπορεί να θεωρηθεί σαν λογική προσέγγιση.

Επίσης, η μεταβατική τάση επαναφοράς (recovery voltage transient) που εμφανίζεται στα άκρα του θυρίστορ τη στιγμή της σβέσης του δεν παριστάνεται με ακρίβεια στο EMTP. Το ρεύμα επαναφοράς είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των θυρίστορ και εμφανίζεται κατά το χρονικό διάστημα που το θυρίστορ μεταβαίνει από την κατάσταση διέλευσης στην κατάσταση αποκοπής. Στο Σχήμα 3.22 παρουσιάζονται οι τυπικές κυματομορφές ρεύματος και τάσης του θυρίστορ κατά τη διάρκεια της επαναφοράς του.

Πιο συγκεκριμένα, στο EMTP διαπιστώνεται ένα σημείο μηδενισμού (zero crossing) του ρεύματος στο χρονικό βήμα αμέσως μετά την αλλαγή πολικότητα του ρεύματος ή εναλλακτικά όταν η τιμή του ρεύματος βρίσκεται εντός ενός καθορισμένου "περιθωρίου". Ο τρόπος με τον οποίο αναπαριστάνεται το ρεύμα επαναφοράς των θυρίστορ στο EMTP παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.23. Προκειμένου να γίνει σωστή μοντελοποίηση της επαναφοράς, το "περιθώριο" του ρεύματος επιλέγεται ίσο με μηδέν και ένα κύκλωμα προστασίας (snubber circuit) RC συνδέεται παράλληλα με τα θυρίστορ. Αυτό το κύκλωμα προστασίας, σκοπό έχει ο ρυθμός αύξησης της τάσης dv/dt να μην υπερβεί μια μέγιστη τιμή $(dv/dt)_{max}$, που δίνεται από τους κατασκευαστές. Το κύκλωμα αυτό παρέχει ένα μονοπάτι στο ρεύμα όταν το θυρίστορ παύει να άγει. Κατά τη μοντελοποίηση, προκειμένου να αποφευχθεί η αριθμητική αστάθεια πρέπει να επιλέγεται κατάλληλο βήμα ολοκλήρωσης και κατάλληλες τιμές για το κύκλωμα προστασίας RC [157]. Στο μοντέλο του TCSC, που αναπτύσσεται στην παρούσα διατριβή, δεν παρουσιάζονται αριθμητικές ταλαντώσεις και ο υπολογισμός των τιμών των R και C βασίζεται στη μεθοδολογία του McMurray [158].



Σχήμα 3.21: Μοντέλο θυρίστορ σε κατάσταση διέλευσης.



Σχήμα 3.22: Τυπικές κυματομορφές ρεύματος και τάσης επαναφοράς του θυρίστορ.



Σχήμα 3.23: Μοντελοποίηση του ρεύματος επαναφοράς του θυρίστορ στο ΕΜΤΡ.

3.4.2. Μοντελοποίηση της λογικής ελέγχου του TCSC

Ο έλεγχος που υλοποιείται στο παρόν μοντέλο TCSC, είναι έλεγχος της σύνθετης αντίστασης της διάταξης στη μόνιμη κατάσταση. Κατά συνέπεια, ελέγχεται η γωνία έναυσης των θυρίστορ προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή σύνθετης αντίστασης. Ως αναφορά για τη γωνίες έναυσης λαμβάνονται τα σημεία μηδενισμού της τάσης στα άκρα του πυκνωτή, που αντιστοιχούν σε α=0°.

Η ακρίβεια στην έναυση των θυρίστορ είναι πολύ σημαντική για τη σωστή λειτουργία του TCSC. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται ένα σύστημα συγχρονισμού, το οποίο αποστέλλει ένα σήμα συγχρονισμού στο σύστημα έναυσης. Αυτό το σήμα συγχρονισμού, που λαμβάνεται σαν αναφορά για την έναυση των θυρίστορ, είναι συνήθως η τάση στα άκρα του πυκνωτή. Επειδή, όμως, στην περίπτωση του TCSC, η τάση του πυκνωτή έχει υψηλό περιεχόμενο αρμονικών, το οποίο θα αναλυθεί διεξοδικά στο Κεφάλαιο 4, σαν σήμα συγχρονισμού επιλέγεται το ρεύμα της γραμμής μεταφοράς με καθυστέρηση 90°, ώστε να είναι συμφασικό με την τάση του πυκνωτή. Η επιλογή του ρεύματος της γραμμής ως σήμα συγχρονισμού χρησιμοποιείται ένα σύστημα συγχρονισμού χρησιμοποιείται ένα σύστηματος ελέγχου [159]. Συχνά στα συστήματα συγχρονισμού χρησιμοποιείται ένα σύστημα PLL (*Phase Locked Loop*), προκειμένου να διασφαλιστεί η ακρίβεια στην έναυση των θυρίστορ, όπως στην εργασία [160]. Όμως, το PLL απαιτεί ένα πολύ μικρό βήμα ολοκλήρωσης και κατά συνέπεια μεγάλο χρόνο προσομοίωσης. Σύμφωνα με τις εργασίες [161,162] η προσομοίωση του συστήματος συγχρονισμού με βάση τα σημεία μηδενισμού είναι επαρκές στην ανάπτυξη ψηφιακών μοντέλων. Για τους λόγους αυτούς, στο αναπτυχθέν ψηφιακό μοντέλο TCSC, προτείνεται ένα σύστημα συγχρονισμού του ρεύματος γραμμής του συστήματος.

Ο τρόπος υλοποίησης των σημάτων έναυσης των θυρίστορ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.24. Πιο συγκεκριμένα όταν έχουμε σημείο μηδενισμού του σήματος συγχρονισμού, δημιουργείται ένα πριονωτό σήμα που διαρκεί μέχρι τον επόμενο μηδενισμό. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση του πριονωτού αυτού σήματος με μια τιμή α₁ της γωνίας έναυσης α (που αντιστοιχεί στην επιθυμητή τιμή της σύνθετης αντίστασης του TCSC) και όταν αυτά εξισωθούν, τότε δίνεται παλμός έναυσης στο

θυρίστορ που είναι θετικά πολωμένα εκείνη τη στιγμή. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η επιθυμητή τιμή της σύνθετης αντίστασης του TCSC.

Στο αναπτυχθέν ψηφιακό μοντέλο TCSC, τόσο το σύστημα συγχρονισμού όσο και ο έλεγχος υλοποιούνται με χρήση των MODELS του EMTP/ATP [163]. Τα MODELS παρέχουν τη δυνατότητα δημιουργίας αλγορίθμου με τη μορφή προγραμματιστικής λογικής, ο οποίος έχει σαν εισόδους/εξόδους παραμέτρους του μοντέλου του EMTP, μέσα στο ίδιο αρχείο.



Σχήμα 3.24: Τρόπος υλοποίησης της έναυσης των θυρίστορ.

3.4.3. Χαρακτηριστικά του κυκλώματος ισχύος του μοντέλου TCSC

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του μοντέλου TCSC, χρησιμοποιούνται οι παράμετροι του κυκλώματος ισχύος του TCSC που είναι εγκατεστημένο στον Υποσταθμό Kayenta στις ΗΠΑ, για την αντιστάθμιση σειράς μιας γραμμής 230 kV [44,45]. Το συνολικό σχήμα αντιστάθμισης σειράς στον εν λόγω υποσταθμό παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.25. Πιο συγκεκριμένα, είναι εγκατεστημένα δύο τμήματα τριφασικών πυκνωτών (S1 και S2) το καθένα από τα οποία είναι ισχύος 165Mvar, σύνθετης αντίστασης 55Ω και λειτουργούν με ρεύμα συνεχούς λειτουργίας 1000Α. Επιπλέον, το τμήμα S2 είναι χωρισμένο σε δύο τμήματα των 40Ω και 15Ω, ώστε στο δεύτερο να μπορεί να προστεθεί ένα πηνίο ελεγχόμενο από θυρίστορ παράλληλα με τον πυκνωτή 15Ω, δηλ. να λετουργεί ως TCSC. Επίσης κάθε συστοιχία πυκνωτών είναι εφοδιασμένη με ένα αλεξικέραυνο οξειδίου του μετάλλου (MOV), ενώ υπάρχει ένας διακόπτης παράκαμψης για κάθε MOV.





Το εν λόγω TCSC περιλαμβάνει πυκνωτή 15Ω, πηνίο 6.8 mH (σε δύο τμήματα) με συντελεστή ποιότητας ($\omega L/R$) ίσο με 110 και βαλβίδες θυρίστορ που αντέχουν σε ρεύμα συνεχούς λειτουργίας ίσο με 1000A. Οι τιμές της σύνθετης αντίστασης του TCSC στο Kayenta στη χωρητική περιοχή κυμαίνονται μεταξύ –j15 Ω και –j60 Ω (το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει χωρητική συμπεριφορά), ενώ στην επαγωγική περιοχή λειτουργίας και γωνία έναυσης των θυρίστορ α=90°, η σύνθετη αντίστασή το είναι ίση με +j3.1Ω (το θετικό πρόσημο υποδηλώνει επαγωγική συμπεριφορά). Τα χαρακτηριστικά των επιμέρους στοιχείων του TCSC στον Υποσταθμό Kayenta παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα B.1 του Παραρτήματος B, ενώ στον πίνακα B.2 παρουσιάζονται οι τιμές της σύνθετης αντίστασής του στη θεμελιώδη συχνότητα (60 Hz).

Στο αναπτυχθέν ψηφιακό μοντέλο TCSC περιλαμβάνονται έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Πυκνωτής σειράς χωρητικότητας 177 μF (ανά φάση)
- Πηνίο αυτεπαγωγής 6.8 mH (ανά φάση) διαιρούμενο σε δύο μέρη, σε σειρά με αντίσταση 0.00233 Ω (όπως προκύπτει από το συντελεστής ποιότητας (ωL/R=110).
- Κύκλωμα απόσβεσης με τιμές Rs= 1018.3 Ω, Cs=0.0232 μF
- Ονομαστικό ρεύμα κανονικής λειτουργίας ίσο με 710A (rms τιμή)
- Ονομαστική συχνότητα λειτουργίας 60Hz

3.4.4. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η συμπεριφορά του μοντέλου TCSC στη μόνιμη κατάσταση και για λειτουργία στη χωρητική περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, οι κυματομορφές αντιστοιχούν στη γωνία έναυσης α=150° (χωρητική περιοχή λειτουργίας), ενώ η αντίστοιχη φαινόμενη σύνθετη αντίσταση του TCSC είναι ίση με $-j29\Omega$.

Το ρεύμα που διαρρέει τη γραμμή μεταφοράς παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.26. Το ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή και τα θυρίστορ εμφανίζονται στα Σχήματα 3.27.1 και 3.27.2 αντίστοιχα. Όπως φαίνεται, στην περιοχή χωρητικής συμπεριφοράς του TCSC, τα διαστήματα αγωγής των θυρίστορ είναι πολύ μικρότερα από το χρόνο της ημιπεριόδου και λαμβάνουν χώρα γύρω από τα σημεία κορυφής του ρεύματος γραμμής. Στο σχήμα 3.28.1 φαίνεται η ώθηση στην τάση (voltage boost) του πυκνωτή, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης της διάταξης, σύμφωνα με τη σχέση (3.7). Στο Σχήμα 3.28.2 φαίνεται η τάση στα άκρα των θυρίστορ [164].

Όπως αναλύεται στην παράγραφο 3.3.4, από τη στιγμή που αρχίζει το TCSC να λειτουργεί και μέχρι να φτάσει στη μόνιμη κατάσταση, απαιτείται κάποιος χρόνος. Η μορφή του ρεύματος του πυκνωτή μέχρι να φτάσει στη μόνιμη κατάσταση φαίνεται στο Σχήμα 3.29.

Επιπρόσθετα, διερευνάται η μεταβατική συμπεριφορά του TCSC κατά τη μεταβολή της γωνίας έναυσης των θυρίστορ, δηλαδή κατά τη μεταβολή της επιθυμητής τιμής της σύνθετης αντίστασής του. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η συμπεριφορά του TCSC κατά την αύξηση της σύνθετης αντίστασης από $-j15 \Omega$ σε $-j37 \Omega$ τη χρονική στιγμή t=50 msec και με ρεύμα γραμμής ίσο με 600 A rms. Στο Σχήμα 3.30.1 παρουσιάζεται η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης του TCSC, όπου παρατηρείται ότι, ενώ η μεταβολή της γωνίας έναυσης γίνεται ακαριαία η επίτευξη της τελικής τιμής των $-j37 \Omega$ γίνεται μετά από περίπου 150 msec, εξαιτίας της μεταβατικής συμπεριφοράς της διάταξης. Στο Σχήμα 3.30.2 παρουσιάζεται η επίδραση της αύξησης της σύνθετης αντίστασης του TCSC στο ρεύμα γραμμής, το οποίο αυξάνεται από 600 σε 730 A rms. Από τις κυματομορφές αυτές επιβεβαιώνεται η σωστή μεταβατική συμπεριφορά του μοντέλου. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε άλλους τρόπους ελέγχου, όπως ο έλεγχος ρεύματος κλειστού βρόχου, ο χρόνος αντίδρασης του TCSC είναι μικρότερος της τάξης των 15 έως 30 msec [23].







Σχήμα 3.27.1: Ρεύμα που διαρρέει τα θυρίστορ.



Σχήμα 3.27.2: Ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή.

Σχήμα 3.27: Κυματομορφές ρεύματος στα στοιχεία του TCSC.



Σχήμα 3.28.1: Τάση στα άκρα του πυκνωτή.



Σχήμα 3.28.2: Τάση στα άκρα των θυρίστορ.





Σχήμα 3.29: Ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή κατά τη μεταβατική περίοδο λειτουργίας του TCSC.



Σχήμα 3.30.1: Σύνθετη αντίσταση του TCSC κατά τη μεταβολή της γωνίας έναυσης των θυρίστορ.



Σχήμα 3.30.2: Ρεύμα γραμμής κατά τη μεταβολή της γωνίας έναυσης των θυρίστορ.

Σχήμα 3.30: Επίδραση του TCSC στο σύστημα κατά τη μεταβολή της γωνίας έναυσης των θυρίστορ.

Όλες οι κυματομορφές που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο αυτή είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των εργασιών που αναφέρονται στο TCSC στον Υ/Σ του Kayenta [45,165] και επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία του ψηφιακού μοντέλου που αναπτύχθηκε. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται στο Κεφάλαιο 4 για την προσομοίωση ενός TCSC μεταβλητής σύνθετης αντίστασης 15÷50 Ω και ονομαστική τάση λειτουργίας 400 kV στα 50Hz.

3.5. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΥΠΟΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΣΕ ΣΗΕ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΣΕΙΡΑΣ

3.5.1. Ανάλυση του φαινομένου SSR

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η εγκατάσταση αντιστάθμισης σειράς σε γραμμές μεταφοράς μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υποσύγχρονου συντονισμού (Subsynchronous Resonance-SSR).

Όταν η επαγωγική αντίδραση του συστήματος γίνει ίση με τη χωρητική αντίδραση του πυκνωτή σειράς σε ένα σύστημα, τότε η φυσική ηλεκτρική συχνότητα συντονισμού είναι ίση με:

$$f_e = \frac{l}{2\pi\sqrt{LC}} = f_0 \sqrt{\frac{X_c}{X_l}}$$
(3.23)

όπου f_0 η σύγχρονη συχνότητα του συστήματος,

 X_{c} η χωρητική αντίδραση του πυκνωτή σειράς,

Χ_l η επαγωγική αντίδραση του συστήματος.

Το φαινόμενο του υποσύγχρονου συντονισμού εμφανίζεται όταν ένα ζεύγος γεννήτριας-στροβίλου που συνδέεται στη συγκεκριμένη Γ.Μ. παρουσιάσει μια φυσική συχνότητα λόγω περιστροφικής ταλάντωσης, f_m , η οποία είναι ίση με τη διαφορά της σύγχρονης συχνότητας του συστήματος f_0 και της παραπάνω φυσικής συχνότητας του ηλεκτρικού συστήματος fe [85], δηλαδή όταν ισχύει:

$$f_0 - f_e = f_m \tag{3.24}$$

Στην περίπτωση αυτή, η φυσική συχνότητα της στρεπτικής ταλάντωσης f_m του άξονα του ζεύγους γεννήτριας-στροβίλου προκαλεί εξ επαγωγής τάσεις και ρεύματα στα τριφασικά τυλίγματα του στάτη της γεννήτριας, με συχνότητες ίσες με $f_0 \pm f_m$. Εάν η υποσύγχρονη συχνότητα $f_0 - f_m$ είναι αρκετά κοντά στη συχνότητα ηλεκτρικού συντονισμού f_e του συστήματος, τότε η στρεπτική ταλάντωση του μηχανικού συστήματος και ο ηλεκτρικός συντονισμός του ηλεκτρικού συστήματος μπορούν να διεγερθούν αμοιβαία, προκαλώντας έτσι την καταστροφή του άξονα του ζεύγους γεννήτριας-στροβίλου λόγω στρεπτικών ροπών και ανάπτυξης μεγάλων ρευμάτων. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποφευχθεί, όταν η φυσική συχνότητα του ηλεκτρικού συστήματος f_e είναι αρκετά μικρή. Επειδή αυτό σημαίνει στην πράξη μικρό βαθμό αντιστάθμισης, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι για τη διατήρηση του επιθυμητού ποσοστού αντιστάθμισης.

3.5.2. Τρόπος απόσβεσης του φαινομένου SSR

Μεταξύ των τρόπων αντιμετώπισης του φαινομένου SSR συγκαταλέγονται τα τυλίγματα αποσβέσεων στην επιφάνεια των πόλων (*Poleface amortisseurs*), τα στατικά φίλτρα φραγμού (*Static blocking filters*), ο έλεγχος της διέγερσης της γεννήτριας, η απόσβεση του υποσύγχρονου συντονισμού μέσω συνδέσμων συνεχούς ρεύματος (*HVDC link*), η εγκατάσταση διάταξης απόσβεσης των υποσύγχρονων ταλαντώσεων NGH-SSR damper [88], όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, καθώς και ο κατάλληλος έλεγχος της έναυσης των θυρίστορ των ελεγχόμενων πυκνωτών σειράς.

3.5.2.1. Τρόπος λειτουργίας της διάταξης NGH-SSR damper

Η διάταξη NGH-SSR damper (Σχήμα 3.31) αποτελείται από μία γραμμική αντίσταση σε σειρά με δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ και παράλληλα με το πυκνωτή σειράς και μία αντίσταση.



Σχήμα 3.31: Διάταξη Απόσβεσης Υποσύγχρονων Ταλαντώσεων Συντονισμού (NGH-SSR damper).

Η λογική ελέγχου βασίζεται στο γεγονός ότι εάν ένας μηδενισμός της τάσης του πυκνωτή συμβεί σε χρόνο μεγαλύτερο από 8.33 msec (χρόνος ημιπεριόδου στα 60Hz, δηλ. γωνία έναυσης α=180°) από τον προηγούμενο μηδενισμό, τότε έχουμε υποσύγχρονη συχνότητα. Στην περίπτωση αυτή τα θυρίστορ πυροδοτούνται και άγουν μέχρι τον επόμενο μηδενισμό, προκειμένου να εκφορτιστεί ο πυκνωτής και να επιτευχθεί συντομότερα ο επόμενος μηδενισμός. Εάν δεν υπάρχει υποσύγχρονη τάση τότε τα θυρίστορ δεν πυροδοτούνται. Επίσης, εάν το διάστημα μεταξύ δύο μηδενισμών είναι μικρότερο από 8.33 msec, τα θυρίστορ δεν πυροδοτούνται. Εναλλακτικά, μπορεί να πυροδοτούνται λίγο νωρίτερα από τα 8.33 msec προκειμένου να γίνει συντομότερη απόσβεση.

3.5.2.2. Τρόπος απόσβεσης του φαινομένου SSR μέσω του TCSC

Το TCSC μπορεί να συμβάλλει αποτελεσματικά στη σταθεροποίηση μιας κατάστασης υποσύγχρονου συντονισμού με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος περιλαμβάνει τον έλεγχο της έναυσης των θυρίστορ μέσω ένα πολύ ακριβούς σύστημα συγχρονισμού που περιλαμβάνει διάταξη PLL έτσι ώστε το TCSC να παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά στις υποσύγχρονες συχνότητες [91-93]. Ο δεύτερος τρόπος είναι ο ενεργός έλεγχος του TCSC μέσω συστήματος που ανιχνεύει τις υποσύγχρονες ταλαντώσεις και δίνει εντολές στο TCSC για τη μείωση των ταλαντώσεων αυτών. Μία εναλλακτική λύση είναι ο έλεγχος του TCSC με αλλαγή της αντίδρασης του TCSC, ώστε να αποφευχθεί η τιμή αντιστάθμισης που προκαλεί υποσύγχρονο συντονισμό στο σύστημα.

3.5.3. Ανάπτυξη μοντέλου ελέγχου του TCSC στο EMTP για απόσβεση SSR

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, αναπτύσσεται με τη βοήθεια των MODELS του EMTP/ATP [163] ψηφιακό μοντέλο ελέγχου του TCSC, για ανίχνευση υποσύγχρονων ταλαντώσεων και απόσβεσής τους, το οποίο ενσωματώνεται στο υπάρχον ψηφιακό μοντέλο σαν υπερτιθέμενος έλεγχος. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργείται αλγόριθμος μέσω των MODELS, ο οποίος ανιχνεύει τα σημεία μηδενισμού της τάσης στα άκρα του πυκνωτή και μετρά το χρόνο μέχρι τον επόμενο μηδενισμό. Εάν παρέλθει χρόνος μεγαλύτερος από το χρόνο που διαρκεί η ημιπερίοδος του συστήματος και δεν έχει σημειωθεί μηδενισμός, τότε αποστέλλεται παλμός στα θυρίστορ, τα οποία άγουν μέχρι τον επόμενο μηδενισμό της τάσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο EMTP [155,164].

Για τη μελέτη του υποσύγχρονου συντονισμού μοντελοποιείται στο EMTP το πρώτο IEEE μοντέλο Benchmark για υποσύγχρονο συντονισμό [78], το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3.32. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από σύγχρονη γεννήτρια ισχύος 592,5 MVA, 6 μαζών και μια γραμμή μεταφοράς 500 kV με πυκνωτή σειράς για αντιστάθμιση της τάξης του 70% και συνδεόμενη σε άπειρο ζυγό.

Προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ του ανεπτυχθέντος μοντέλου TCSC και της διάταξης NGH-SSR damper, ως προς την απόσβεση των υποσύγχρονων ταλαντώσεων, αρχικά αναπτύσσεται στο EMTP ψηφιακό μοντέλο του NGH-SSR damper (κύκλωμα ισχύος και κύκλωμα ελέγχου). Το εν λόγω μοντέλο, στη συνέχεια, ενσωματώνεται στο πρώτο IEEE μοντέλο Benchmark στη θέση του πυκνωτή σειράς. Εξετάζεται η περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος κοντά στη συστοιχία πυκνωτών τόσο στην περίπτωση συμβατικών πυκνωτών όσο και στην περίπτωση όπου ένας πυκνωτής 15 Ω αντικαθίσταται από τη διάταξη NGH 15 Ω. Στα Σχήματα 3.33.1 και 3.33.2 πα-



Σχήμα 3.32: πρώτο μοντέλο Benchmark της ΙΕΕΕ για τον υποσύγχρονο συντονισμό [79].



Σχήμα 3.33.1: Τάση στα άκρα του συμβατικού πυκνωτή.



Σχήμα 3.33.2: Τάση στα άκρα της αντίστασης στη διάταξη NGH.

Σχήμα 3.33: Τάση στα άκρα συμβατικού πυκνωτή και πυκνωτή με διάταξη NGH.



Σχήμα 3.34: Ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση στη διάταξη NGH.

ρουσιάζεται η τάση στα άκρα του πυκνωτή και στις δύο περιπτώσεις, αντίστοιχα. Από τα σχήματα αυτά, φαίνεται η ευεργετική επίδραση της διάταξης NGH στην απόσβεση των υποσύγχρονων συχνοτήτων και η επαναφορά στη θεμελιώδη συχνότητα μετά λίγους κύκλους. Στο Σχήμα 3.34 παρουσιάζεται το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση της διάταξης, όπου παρατηρείται ότι η αντίσταση διαρρέεται από μεγάλες τιμές ρεύματος και για μεγάλο μέρος της ημιπεριόδου κατά τους πρώτους κύκλους όπου οι υποσύγχρονες ταλαντώσεις είναι έντονες, ενώ καθώς το φαινόμενο αποσβένυται η τιμή του ρεύματος μειώνεται έως το μηδενισμό.

Επιπρόσθετα, στο ψηφιακό μοντέλο της παραγράφου 3.4 ενσωματώνεται, το αναπτυχθέν ψηφιακό μοντέλο ελέγχου, προκειμένου να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα του TCSC στην απόσβεση του υποσύγχρονου συντονισμού. Στη συνέχεια, εξετάζεται και πάλι η περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος κοντά στη συστοιχία πυκνωτών στις εξής περιπτώσεις: a) με συμβατικούς πυκνωτές 15 Ω, β) με τη διάταξη NGH-SSR damper με πυκνωτή 15Ω και γ) με TCSC 15Ω και έλεγχο του χρόνου έναυσης των θυρίστορ για απόσβεση του υποσύγχρονου συντονισμού.

Στο Σχήμα 3.35 παρατηρείται η μείωση της ροπής στον άξονα μεταξύ γεννήτριας-διεγέρτριας από 2 α.μ. σε 0.6 α.μ. στην περίπτωση διάταξης NGH και σε 0.75 α.μ. στην περίπτωση TCSC. Στο Σχήμα 3.36 φαίνεται η θετική απόσβεση των υποσύγχρονων ταλαντώσεων στην ηλεκτρική ροπή μετά τους πρώτους κύκλους, όταν χρησιμοποιούνται διάταξη NGH ή TCSC, ενώ ο χρόνος απόσβεσης είναι ίδιος συγκρίνοντας τις δύο διατάξεις.



Σχήμα 3.35.1: Ροπή στον άξονα μεταξύ Γεννήτριας-Διεγέρτριας με συμβατικά τμήματα πυκνωτών



Σχήμα 3.35.2: Ροπή στον άξονα μεταξύ Γεννήτριας-Διεγέρτριας με διάταξη NGH.



Σχήμα 3.35.3: Ροπή στον άξονα μεταξύ Γεννήτριας-Διεγέρτριας με TCSC.

Σχήμα 3.35: Ροπή στον άξονα μεταξύ Γεννήτριας-Διεγέρτριας.



Σχήμα 3.36.1: Ηλεκτρική ροπή με συμβατικά τμήματα πυκνωτών.







Σχήμα 3.36.3: Ηλεκτρική ροπή με TCSC.

Σχήμα 3.36: Ηλεκτρική ροπή.

Παρόμοια αποτελέσματα απόσβεσης του φαινομένου του υποσύγχρονου συντονισμού παρατηρούνται στη ροπή και των υπολοίπων αξόνων της γεννήτριας.

Συνεπώς, το TCSC εκτός από τις υπόλοιπες ευεργετικές, για το σύστημα, λειτουργίες του, μπορεί με χρήση του ελέγχου που αναπτύσσεται στην παρούσα παράγραφο, να συμβάλει στην απόσβεση πιθαμών υποσύγχρονων ταλαντώσεων που μπορεί να εμφανιστούν στο σύστημα που εγκαθίσταται.

3.6. EISAF Ω FH MONTEA Ω N FACTS SE ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

3.6.1. Γενικά

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της ροής φορτίου οδηγεί σε ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να λυθούν με τη χρήση αλγορίθμων, από τους οποίους εκείνοι πού έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι α) η μέθοδος Gauss / Seidel, β) η μέθοδος Newton/Raphson και γ) η Ταχεία Αποζευγμένη Ροή Φορτίου (Τ.Α.Ρ.Φ.)

Η μέθοδος Gauss/Seidel αν και απλή στην υλοποίησή της παρουσιάζει πολύ αργή σύγκλιση και γι' αυτό δε χρησιμοποιείται πλέον στη βιομηχανία παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος.

Η μέθοδος Newton/Raphson [166,167] είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος ροής φορτίου και παρουσιάζει πολύ γρήγορη σύγκλιση. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την ανάπτυξη και παραγοντοποίηση του Ιακωβιανού πίνακα σε κάθε επανάληψη του κύκλου επίλυσης, δυσκολία η οποία αντιμετωπίζεται με τη χρήση των τεχνικών αραιών πινάκων [168,169] με σκοπό την επιτάχυνση της επίλυσης του προβλήματος.

Η ταχύτερη γνωστή μέθοδος εξαιτίας της απλότητάς της και της ευκολίας που έχει στους υπολογισμούς είναι η Τ.Α.Ρ.Φ.[170,171]. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην μέθοδο Newton/Raphson με κατάλληλο μετασχηματισμό των εξισώσεων έτσι ώστε να χρησιμοποιείται ένας σταθερό, αλλά κατά προσέγγιση Ιακωβιανός πίνακας.

Η Ταχεία Αποζευγμένη Ροή Φορτίου (Τ.Α.Ρ.Φ.) περιλαμβάνει την επίλυση του παρακάτω συστήματος εξισώσεων:

P - θ κύκλος:
$$\frac{\Delta P}{V} = [B'] \cdot \Delta \theta$$
(3.25)

Q - V κύκλος:
$$\frac{\Delta Q}{V} = [B''] \cdot \Delta V$$
(3.26)

όπου

 ΔP , ΔQ τα διανύσματα σφάλματος των εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος

 $\Delta \theta$, ΔV τα διανύσματα διόρθωσης της φάσης και του μέτρου της τάσης στους ζυγούς.

Οι πίνακες [**B**'] και [**B**''] είναι αραιοί και συμμετρικοί. Τα στοιχεία τους είναι τα ακόλουθα:

$$B'_{ij} = \frac{-1}{x_{ij}}, \ B'_{ii} = \sum \frac{1}{x_{ij}}$$
(3.27)

$$B''_{ij} = b_{ij}$$
, $B''_{ii} = -2b_{si} - \sum b_{sij}$ (3.28)

όπου

 x_{ij} , b_{ij} η αντίδραση και η αγωγιμότητα αντίστοιχα της γραμμής μεταφοράς *i-j*,

 b_{si} η συνολική αγωγιμότητα των εγκάρσιων στοιχείων (πηνία, πυκνωτές) στο ζυγό *i*.

Αν υποθέσουμε ένα σύστημα n ζυγών, όπου υπάρχει η αρίθμηση έτσι ώστε 1 είναι ο ζυγός ταλάντωσης, 2 έως (n-m) είναι οι ζυγοί παραγωγής και (n-m+1) έως n είναι οι ζυγοί φορτίου, τότε ο $[\mathbf{B}']$ έχει διαστάσεις (n-1)x(n-1) και ο $[\mathbf{B}'']$ έχει διαστάσεις mxm.

3.6.2. Μεθοδολογία εισαγωγής ρυθμίσεων στο πρόγραμμα ροής φορτίου.

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην ενσωμάτωση στην ανάλυση ροής φορτίου ρυθμίσεων, οι οποίες προσομοιώνουν τη στρατηγική ελέγχου του συστήματος [166,170-172]. Η δυσκολία ενσωμάτωσης των ρυθμίσεων αυτών έγκειται στο γεγονός ότι προκαλούν αύξηση του αριθμού των κύκλων σύγκλισης της μεθόδου ή ακόμα ταλάντωση στη λύση ή και απόκλιση.

Οι συνηθέστερες ρυθμίσεις στον έλεγχο ροής φορτίου είναι οι ακόλουθες:

- o éleggos ths táshs stous zugoús me th bohdeia tou $\Sigma.A.T.Y.\Phi.$ tou $M\!/\!\Sigma,$
- ο έλεγχος των εγκάρσιων στοιχείων στους ζυγούς (πυκνωτές και πηνία),
- ο έλεγχος των άεργων ορίων των ζυγών παραγωγής,
- ο έλεγχος ροής ενεργού ισχύος μεταβάλλοντας τη γωνία του Μ/Σ ρύθμισης συμβατικών ή ελεγχόμενων με θυρίστορ (TCPAR),
- ο έλεγχος ροής ενεργού ισχύος με χρήση πυκνωτών σειράς ελεγχόμενων με θυρίστορ (TCSC ή ACSC),
- ο έλεγχος της τάσης απομακρυσμένων από γεννήτριες ζυγών,
- ο έλεγχος της ανταλλασσόμενης ισχύος μεταξύ διασυνδεδεμένων δικτύων,
- ο έλεγχος των δικτύων συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.).

Συνηθισμένοι τρόποι για την ενσωμάτωση των ρυθμίσεων στη μέθοδο Τ.Α.Ρ.Φ. είναι είτε με ανάδραση σφάλματος είτε αυτόματα [166,171]. Η ανάδραση σφάλματος εισάγει τροποποιήσεις στη μεταβλητή ελέγχου ώστε μια άλλη συναρτησιακά σχετιζόμενη μεταβλητή, να πετύχει μια ορισμένη τιμή ή διάστημα τιμών. Η αυτόματη ρύθμιση εισάγει τις τροποποιήσεις απευθείας στον Ιακωβιανό πίνακα. Οι τροποποιήσεις συμπεριλαμβάνονται με τη μορφή εξισώσεων για άμεση επίλυση της μεταβλητής ελέγχου [178,180,181]. Οι αυτόματες ρυθμίσεις έχουν επιτυχία όταν χρησιμοποιούνται στην επίλυση της ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton/Raphson [167]. Στην Τ.Α.Ρ.Φ., ο τρόπος ενσωμάτωσης με ανάδραση σφάλματος είναι ο πιο κατάλληλος για τις περισσότερες ρυθμίσεις, εκτός από τον έλεγχο των άεργων ορίων των ζυγών παραγωγής, για τον οποίο ο πλέον ενδεικνυόμενος τρόπος ενσωμάτωσης είναι η "αλλαγή του τύπου" του ζυγού [167].

Κατά το παρελθόν, έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι για την υλοποίηση των ρυθμίσεων στην T.A.P.Φ. [171,175-177]. Η εμπειρία σε διάφορα συστήματα έδειξε ότι ο τρόπος υλοποίησης των ρυθμίσεων έχει σημαντική επίδραση στην υπολογιστική απόδοση της Τ.Α.Ρ.Φ. [170,171]. Το σημαντικό με την ενσωμάτωση των ρυθμίσεων είναι η ελαχιστοποίηση των επιδράσεών τους πάνω στην ταχύτητα επίλυσης. Οι παράγοντες που είναι σημαντικοί για την υπολογιστική απόδοση και την ταχύτητα επίλυσης της μεθόδου είναι τόσο τα κριτήρια έναρξης των ρυθμίσεων όσο και η σχετική σειρά των ρυθμίσεων.

Ένα απλό αλλά και αποτελεσματικό κριτήριο έναρξης των ρυθμίσεων είναι η χρησιμοποίηση του διανύσματος σφάλματος ισχύος των ζυγών. Αυτό παρέχει ένα μέτρο για την ακρίβεια της λύσης και επιτρέπει ένα διατεταγμένο έλεγχο των ρυθμίσεων. Για την εφαρμογή του κριτηρίου πρέπει οι ρυθμίσεις να χαρακτηριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες α) ρυθμίσεις βασισμένες σε ευαισθησία και β) ρυθμίσεις βασισμένες σε εγχύσεις [171].

Για τις ρυθμίσεις βασισμένες σε ευαισθησία απαιτείται ένα σύνολο από υπολογισμένες ή εμπειρικές ευαισθησίες, για τον υπολογισμό των μεταβολών των ελεγχόμενων μεταβλητών ως προς τις μεταβολές των παραμέτρων ελέγχου. Οι ρυθμίσεις βασισμένες σε εγχύσεις, εισάγουν τροποποιήσεις στις εγχύσεις ισχύος των ζυγών. Πρέπει να επισημανθεί ότι και οι δυο τύποι ρυθμίσεων εισάγουν

τροποποιήσεις στις εγχύσεις ισχύος των ζυγών. Η βασική διαφορά ανάμεσα στους δυο τύπους των ρυθμίσεων έγκειται στο διαφορετικό τρόπο υπολογισμού των μεταβολών των εγχύσεων στους ζυγούς: α) έμμεσα για τις ρυθμίσεις βασισμένες σε ευαισθησία και β) άμεσα για τις ρυθμίσεις βασισμένες σε ευαισθησία και β)

Οι ρυθμίσεις, λοιπόν, πρέπει να ενεργοποιούνται με κατάλληλο τρόπο ο οποίος πρέπει να εξαρτάται από την ακρίβεια σύγκλισης της λύσης και τον τύπο των ρυθμίσεων. Γενικά, ρυθμίσεις βασισμένες σε ευαισθησία πρέπει να ενεργοποιούνται σε πρώιμα στάδια της λύσης και ρυθμίσεις βασισμένες σε εγχύσεις όταν η λύση έχει συγκλίνει αρκετά. Σε κάθε κύκλο της λύσης το διάνυσμα σφάλματος ισχύων στους ζυγούς δίνει μια ένδειξη ακρίβειας με την οποία μπορεί να υπολογιστεί η έναρξη των ρυθμίσεων. Καθώς η λύση προγωρεί διαφορετικά είδη ρυθμίσεων ενεργοποιούνται εξαρτώμενα από το πιο πρόσφατο μέγιστο του διανύσματος σφαλμάτων ισγύος στους ζυγούς. Όλες οι ρυθμίσεις, όπως είπαμε και στην αρχή εισάγουν διαταραχές στη λύση. Γενικά, μεγάλες διαταραχές εμφανίζονται κατά τη διάρκεια των πρώτων σταδίων της λύσης από τις ρυθμίσεις βασισμένες σε ευαισθησία και τον έλεγχο των άεργων ορίων των ζυγών παραγωγής. Οι διαταραχές αυτές επιβραδύνουν τη σύγκλιση, ή ακόμα χειρότερα προκαλούν ταλάντωση της λύσης ή και απόκλιση [171]. Η επιβράδυνση της σύγκλισης προκαλείται από αυξημένες διορθώσεις του διανύσματος σφάλματος ισχύων στους ζυγούς. Αυτά τα προβλήματα αντιμετωπίζονται με μείωση αυτών των διορθώσεων σε κάθε κύκλο της ρύθμισης. Μια γρήγορη αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, σήμερα, είναι η χρήση βοηθητικών λύσεων μετά από κάθε ρύθμιση. Η βοηθητική λύση, που στηρίζεται στις τεχνικές των αραιών διανυσμάτων [178], ελαττώνει την αύξηση του διανύσματος σφάλματος των ισχύων στους ζυγούς, αλλά δεν μειώνει, στην πράξη, τις διαταραχές στον επόμενο κύκλο της κύριας λύσης.

3.6.3. Μοντέλα TCSC και TCPAR στο πρόγραμμα ροής φορτίου

A) Μοντέλο TCSC

Ο έλεγχος της ροής ενεργού ισχύος μιας γραμμής μεταφοράς μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρησιμοποίηση των συμβατικών M/Σ ρύθμισης φάσης ή των ελεγχόμενων με θυρίστορ ρυθμιστών φασικής γωνίας (*TCPAR*), καθώς επίσης και τη ρύθμιση της αντίδρασης της γραμμής με χρήση πυκνωτών σειράς ελεγχόμενων από θυρίστορ (*TCSC* ή *ACSC*).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα μοντέλα FACTS που αναπτύσσονται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής για τον έλεγχο της ροής ενεργού ισχύος μιας γραμμής μεταφοράς και ο τρόπος ενσωμάτωσής τους στο υπολογιστικό πακέτο ροής φορτίου GINA [179], όπου η επίλυση της ροής φορτίου υλοποιείται με χρήση της Τ.Α.Ρ.Φ. Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται μια επιθυμητή τιμή ενεργού ισχύος στη γραμμή μεταφοράς, όπου εγκαθίσταται η συσκευή TCSC ή TCPAR, και μέσω ανακυκλώσεων εκτελείται διόρθωση της επαγωγικής αντίδρασης κατά Δx ή της φασικής γωνίας κατά Δφ στον TCPAR, αντίστοιχα. Ο τρόπος ενσωμάτωσης των ελεγκτών αυτών στον Ρ-θ κύκλο επίλυσης της Τ.Α.Ρ.Φ. παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.37. Μετά από την ρύθμιση του ελεγκτή (TCSC ή TCPAR) γίνεται υπολογισμός του διανύσματος σφάλματος των ενεργών ισχύων στους ζυγούς και γίνεται επίλυση του συστήματος εξισώσεων (3.25). Η ρύθμιση συνεχίζεται έως ότου η ροή ισχύος της ελεγχόμενης γραμμής πάρει την επιθυμητή τιμή.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, η εγκατάσταση του TCSC σε μια γραμμή μεταφοράς μεταβάλλει την αντίδραση της γραμμής και κατά συνέπεια, την ικανότητα μεταφοράς ενεργού ισχύος της γραμμής, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{ik} = \frac{V_i V_k}{X - X_C} \sin\delta \tag{3.29}$$

Η λειτουργία του TCSC ενσωματώνεται στο πρόβλημα της ροής φορτίου ως μεταβολή της ενεργού ισχύος, σύμφωνα με την εξίσωση:
$$\Delta P = \frac{dP}{dX} \cdot \Delta X \Longrightarrow \Delta P = \left(-\frac{V_i V_k}{\left(X - X_C\right)^2} \sin \delta\right) \Delta X$$
(3.30)

Επειδή υπάρχει έντονη μη γραμμικότητα στις μεταβολές της ροής ισχύος της γραμμής σε σχέση με τις μεταβολές της αντίδρασης της γραμμής, ο τρόπος ενσωμάτωσης του ελέγχου στην Τ.Α.Ρ.Φ. δεν γίνεται με τους συντελεστές ευαισθησίας. Οι μεταβολές της χωρητικής αντίδρασης του TCSC μοντελοποιούνται σαν μεταβολές του διανύσματος σφάλματος ενεργού ισχύος στους ζυγούς. Έτσι, στο πρόγραμμα GINA οι Ιακωβιανές διατηρούνται σταθερές και οι παραπάνω μεταβολές υλοποιούνται με τη μέθοδο της "ανάδρασης σφάλματος". Πιο συγκεκριμένα, το διάνυσμα σφάλματος ενεργού ισχύος του προηγούμενου κύκλου σύγκλισης της Τ.Α.Ρ.Φ. χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της νέας τιμής της αντίδρασης της γραμμής ώσπου να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή ενεργού ισχύος στη γραμμή, όπου έχει εγκατασταθεί το TCSC. Με τον τρόπο αυτό απαιτούνται μερικές επιπλέον ανακυκλώσεις μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή ροή φορτίου.

Β) Μοντέλο TCPAR

Η εγκατάσταση του ελεγχόμενου με θυρίστορ ρυθμιστή φασικής γωνίας (TCPAR), όπως έχει ήδη αναλυθεί στην παράγραφο 2.2.4, προκαλεί προσθήκη ή αφαίρεση μιας μεταβλητής συνιστώσας $\pm \Delta \widetilde{V}$ της τάσης, κάθετη προς τη φασική τάση της γραμμής \widetilde{V} . Το μέγεθος και η κατεύθυνση της $\Delta \widetilde{V}$ καθορίζει και τη γωνία φ . Κατά συνέπεια, μεταβάλλει κατά φ τη γωνία μεταξύ των διανυσμάτων της τάσης των δύο τερματικών ζυγών της γραμμής μεταφοράς στην οποία εγκαθίσταται. Η μαθηματική εξίσωση της ενεργού ισχύος της γραμμής, όπου είναι εγκατεστημένο το TCPAR δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{ik} = \frac{U_i U_k}{X} \sin(\delta + \varphi)$$
(3.31)

Ο ρυθμιστής φασικής γωνίας συνδέεται μεταξύ των κόμβων *i* και *k* με ιδανικό λόγο 1:φ και σε σειρά με την αγωγιμότητα του μετασχηματιστή. Προσεγγιστικά η ευαισθησία μεταξύ της ροής ενεργού ισχύος στη γραμμή και της αντίστοιχης γωνίας του ρυθμιστής φασικής γωνίας μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το γραμμικό μοντέλο του συστήματος των εξισώσεων (3.25). Η αλλαγή της ενεργού ροής ισχύος ΔP_{ik} στη γραμμή *i-k* με την αντίστοιχη μετατόπιση φάσης $\Delta \varphi$ του ρυθμιστή δίνεται από τη σχέση [171]:

$$\Delta P_{ik} = (\Delta \theta_i - \Delta \theta_k + \Delta \varphi) / x_{Tik}$$
(3.32)

όπου

 x_{Tjk} είναι η αντίδραση σκέδασης του Μ/Σ ρύθμισης φάσης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, με τη βοήθεια των μεθόδων αραιών διανυσμάτων η ευαισθησία της ενεργού ισχύος ως προς τη ρύθμιση γωνίας, $S = \frac{dP_{ik}}{d\omega}$, δίνεται από την ακόλουθη σχέση [171]:

$$S = \left(M_{ik} \cdot [B']^{-1} \cdot N_{ik} - I\right) / x_{Tik}$$
(3.33)

όπου

 M_{ik} είναι το αραιό διάνυσμα με +1 και -1 στις θέσεις
ί και k,

 N_{ik} είναι το αραιό διάνυσμα με +1 / x_{Tik} και -1 / x_{Tik} στις θέσεις i και k,

Όταν ελέγχεται η ροή P_{ki} (αντί για P_{ik}) τότε η ευαισθησία αλλάζει πρόσημο.



Σχήμα 3.37: Αλγόριθμος ενσωμάτωσης των μοντέλων TCSC και TCPAR στον Ρ-θ κύκλος επίλυσης της Τ.Α.Ρ.Φ.

Η διόρθωση της γωνίας φ συνεπάγεται τη μεταβολή του διανύσματος σφάλματος ενεργού ισχύος στους ζυγούς, η οποία ρυθμίζεται με τη μέθοδο της "ανάδρασης σφάλματος", όπου το "κέρδος της ανάδρασης" προσεγγίζεται από την ευαισθησία S της ενεργού ισχύος ως προς τη ρύθμιση γωνίας [180]. Μετά τον υπολογισμό του διανύσματος σφάλματος ενεργού ισχύος στους ζυγούς γίνεται γενική επίλυση του συστήματος εξισώσεων (3.25).

3.6.4. Εφαρμογές στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται εγκατάσταση η συσκευών FACTS σειράς (TCSC και TCPAR) στο Ελληνικό σύστημα με στόχο την ελεγχόμενη ροή ισχύος σε γραμμή μεταφοράς τόσο στην κανονική λειτουργία όσο και σε (N-1) διαταραχές του συστήματος [181-184]. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα μοντέλα FACTS που αναπτύχθηκαν αναλυτικά στην προηγούμενη παράγραφο. Τα μοντέλα αυτά εισάγονται κατάλληλα στο υπολογιστικό πακέτο GINA όπου για την επίλυση του προβλήματος των ροών φορτίου χρησιμοποιείται η Ταχεία Αποζευγμένη Ροή Φορτίου (T.A.P.Φ), ενώ υπάρχει ήδη αναπτυγμένο μοντέλο του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος παραγωγής-μεταφοράς.

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των συσκευών αυτών στο σύστημα και να εξαχθούν συγκριτικά αποτελέσματα, χρησιμοποιούνται κατάλληλοι δείκτες της κατάστασης του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση της λειτουργίας των συσκευών FACTS στο προφίλ τάσεων του συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι δείκτες παραβίασης των ορίων τάσης (indices for voltage limits violation) [185]:

$$J_{V} = \sum_{i=1}^{i=NL} W_{i} \left(V_{i} - \hat{V}_{i} \right)^{2m}$$
(3.33)

και

$$J_{VS} = \sum_{i=1}^{i=NS} W_i \left(V_i - \hat{V}_i \right)^{2m}$$
(3.33)

όπου

- J_V δείκτης παραβίασης των ορίων τάσης στους ζυγούς φορτίου,
- J_{VS} δείκτης παραβίασης των ορίων τάσης σε όλους τους ζυγούς,
- V_i το μέτρο της τάσης στο ζυγό i,
- \hat{V}_i το άνω ή το κάτω επιτρεπτό όριο τάσης στο ζυγό i,
- *W_i* συντελεστής βαρύτητας ζυγού *i*,
- NL ο αριθμός των ζυγών φορτίου
- NS ο αριθμός όλων των ζυγών

$$m = 1, 2, 3, \dots$$

Μία μεγάλη τιμή των J_V και J_{VS} υποδηλώνει ότι το μέτρο της τάσης ενός ή περισσότερων ζυγών του συστήματος βρίσκονται έξω από τα επιθυμητά όρια V_i . Ο δείκτης J_V αναμένεται να είναι μεγαλύτερος, καθώς οι αποκλίσεις στους ζυγούς φορτίου είναι μεγαλύτερες. Ο συντελεστής βαρύτητας W_i για κάθε ζυγό εκφράζει τη σπουδαιότητα να αποφευχθούν παραβιάσεις των ορίων τάσης του. Η παράμετρος *m* χρησιμοποιείται προκειμένου μεγάλες παραβιάσεις ορίων τάσης να έχουν μεγάλη συμμετοχή στη διαμόρφωση της τιμής των δεικτών. Στα σενάρια που εξετάζονται στη συνέχεια, ως όριο τάσης των ζυγών χρησιμοποιείται η τιμή 1 α.μ., δεν χρησιμοποιούνται διαφορετικοί συντελεστές βαρύτητας για τους ζυγούς και η παράμετρος *m* λαμβάνεται ίση με τη μονάδα.

Επιπρόσθετα, προκειμένου να υπάρξει μία καλύτερη εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, υπολογίζονται οι απώλειες του συστήματος (ΣP_l), καθώς και οι απώλειες του δικτύου των 400kV (ΣP_l^{400}).

Το μοντέλο του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος παραγωγής-μεταφοράς που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει 243 ζυγούς, 352 κλάδους, 58 μετασχηματιστές και 32 ισοδύναμες γεννήτριες, τα φορτία είναι μοντελοποιημένα σαν μικτού τύπου σταθερής ισχύος/σταθερής αγωγιμότητας και η αιχμή του συστήματος είναι ίση με 7300 MW.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι δείκτες παραβίασης ορίων τάσης ζυγών και οι απώλειες ενεργού ισχύος στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα και η επίδραση του TCSC και του TCPAR κατά την απώλεια μιας γραμμής 400 kV Boppá-Nóτου. Πιο συγκεκριμένα, όταν η αιχμή του συστήματος αυξάνει από 7000 (σενάριο A1) σε 7300 MW (σενάριο A2) παρατηρείται αύξηση στους δείκτες παραβίασης ορίων τάσης ζυγών της τάξης του 47% και των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος κατά 42.3 MW, ενώ υπάρχει περίπου ίδια φόρτιση και των τριών γραμμών Boppá-Nóτου. Όταν η γραμμή Αγ. Δημήτριος-Λάρισα τεθεί "εκτός" (Σενάριο A3) προκύπτει αύξηση των δεικτών παραβίασης ορίων τάσης ζυγών σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο ίση με 30% και των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος κατά 32.7 MW. Η εγκατάσταση ενός TCSC στη γραμμή μεταφοράς Καρδιά-Τρίκαλα-Δίστομο με έλεγχο της μεταβλητής φαινόμενης αντίδρασής του έτσι ώστε να ισοκατανέμεται η ροή ισχύος μεταξύ των δύο εναπομενουσών γραμμών μεταφοράς (Σενάριο A4) οδηγεί σε ποσοστό αντιστάθμισης 30% και βελτίωση των συνολικών απωλειών απωλειών καπωλειών κατωλειών κατώ 11%) και μικρή μείωση των συνολικών απωλειών απωλειών απωλειών απολειών καπολειών κατωλειών καπολειών καπολειών καπολειών κατώ 11%) και μικρή μείωση των συνολικών απωλειών απωλειών καπολειών κατώ των δεικτών παραβίασης ορίων τάσης ζυγών κατά 11%) και μικρή μείωση των συνολικών απωλειών απωλειών καπολειών καπολειών καπολειών κατώ 11%) και μικρή μείωση των συνολικών απωλειών απωλειών καπολειών κατώ το το προηγούμενο παραφία των συνολικών απωλειών καπολειών κατώ τοι προφιά και των διο εναπομενουσών και προφιά και του και των δια φόρι τα το προηγούμενο και του προφίλ της τάσης μεταφοράς (Σενάριο Α4) οδηγεί σε ποσοστό αντιστάθμισης 30% και βελτίωση του προφίλ της τάσης μειώση των δεικτών απολειών απολειών απωλειών απολειών απολ

ενεργού ισχύος. Εναλλακτικά, η εγκατάσταση ενός TCPAR στην ίδια θέση, με την ίδια λογική ελέγχου για ισοκατανομή της ισχύος μεταξύ των δύο γραμμών που παραμένουν σε λειτουργία, οδηγεί στη ρύθμιση της Δφ στις 5°. Η σύγκριση των τιμών των δεικτών παραβίασης των ορίων τάσης και των απωλειών για το σενάριο αυτό (σενάριο A5) με τους αντίστοιχους του σεναρίου A4, δείχνουν ότι το TCSC συμβάλλει περισσότερο στη διατήρηση της τάσης σε επιτρεπτά επίπεδα. Το σημαντικό πλεονέκτημα του TCPAR είναι η δυνατότητα αναστροφής της ροής ισχύος στη γραμμή μεταφοράς όπου εγκαθίσταται, όμως στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτή η δυνατότητα δεν χρησιμοποιείται.

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι δείκτες παραβίασης ορίων τάσης ζυγών και οι απώλειες ενεργού ισχύος στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα στην περίπτωση απώλειας της μονάδας συνδυασμένου κύκλου Λαυρίου (σενάριο B1) καθώς και στην περίπτωση που τεθεί επιπρόσθετα "εκτός" η γραμμή Αγ. Δημήτριος-Λάρισα (Σενάριο B2) (N-2 διαταραχή). Στην τελευταία αυτή περίπτωση το σύστημα παρουσιάζει σημαντική αύξηση της τιμής των δεικτών παραβίασης των ορίων τάσης κατά 49% καθώς και των απωλειών κατά 128 MW ως προς τις τιμές του σεναρίου A2, ενώ εμφανίζονται χαμηλές τάσεις στους ζυγούς φορτίου και τμήματα του δικτύου 150kV υπερφορτίζονται. Η εγκατάσταση ενός TCSC (σενάριο B3) με την ίδια λογική ελέγχου με προηγουμένως, οδηγεί σε απαιτούμενο ποσοστό αντιστάθμισης ίσο με 34% και παρέχει σημαντική συμβολή στη βελτίωση του προφίλ της τάσης (οι δείκτες παραβίασης των ορίων τάσης μειώνονται κατά 38%), ενώ οι συνολικές απώλειες μειώνονται κατά 23 MW. Η εγκατάσταση ενός TCPAR με τον ίδιο τρόπο ελέγχου στην ίδια θέση (σενάριο B4) δείχνει, όπως και προηγουμένως, ότι συμβάλλει λιγότερο στη βελτίωση του προφίλ τάσης και στην μείωση των απωλειών του συστήματος

Στη συνέχεια, το μοντέλο του Ελληνικού συστήματος ενισχύεται με τις γραμμές μεταφοράς τριδύμων Γ.Μ. βαρέως τύπου B'B'B'/400 kV, που αφορούν τη διασύνδεση Ελλάδας –Ιταλίας μεταξύ Αράχθου –Τρικάλων και Αράχθου–Αχελώου καθώς και με το νέο ΑΗΣ Φλώρινας. Ο σύνδεσμος Σ.Ρ. θεωρείται ότι λειτουργεί στις συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας και δεν ενσωματώνεται κάποιο δυναμικό μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα, η εισαγωγή ενέργειας από την Ιταλία μοντελοποιείται ως αρνητικό φορτίο 500 MW, με απορρόφηση αέργου φορτίου 50 MVAr από το σύστημα, ενώ η υπόλοιπη απαιτούμενη άεργος ισχύς παρέχεται από τα φίλτρα AC του σταθμού μετατροπής. Ανάλογα, η εξαγωγή ενέργειας προς την Ιταλία θεωρήθηκε ως φορτίο σταθερής ισχύος.

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος μετά τις προαναφερθείσες ενισχύσεις του Ελληνικού συστήματος [182,183]. Έτσι, στην κανονική λειτουργία (σενάριο Γ1) με μέγιστο φορτίο 7500 MW, τόσο οι δείκτες παραβίασης των ορίων τάσης όσο και οι απώλειες είναι χαμηλότερα σε σχέση με το σενάριο Α2, ενώ μικρή αύξηση παρουσιάζεται στην περίπτωση εξαγωγών 500 MW προς την Ιταλία (σενάριο Γ4). Στο σενάριο Γ2 εξετάζεται περίπτωση απώλειας της γραμμής Αγ. Δημήτριος-Λάρισα, ενώ στο σενάριο Γ3 εγκαθίσταται TCSC στη γραμμή Καρδιά-Τρίκαλα-Δίστομο με έλεγχο της μεταβλητής φαινόμενης αντίδρασής του έτσι ώστε να ισοκατανέμεται η ροή ισχύος μεταξύ των δύο εναπομενουσών γραμμών μεταφοράς. Η επίδραση του TCSC, στην περίπτωση αυτή, βελτιώνει τους δείκτες παραβίασης των ορίων τάσης κατά 14% και μειώνει ελαφρώς τις απώλειες ενεργού ισχύος. Οι ροές ενεργού ισχύος στο δίκτυο 400 kV για τα σενάρια Γ2 και Γ3 παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.38 και 3.39 αντίστοιχα. Τέλος, στην περίπτωση που, κατά τη διάρκεια εξαγωγών 500 MW προς Ιταλία, τεθεί "εκτός" η γραμμή Αγ. Δημήτριος-Λάρισα (σενάριο Γ5) διερευνάται η επίδραση του TCSC, εάν ελέγχεται με τρόπο ώστε να αυξηθεί το δυνατόν η μεταφερόμενη ισχύς της γραμμής Καρδιά-Τρίκαλα-Δίστομο (σενάριο Γ6). Η επίδρασή του σε αυτή την περίπτωση είναι η μείωση των δεικτών παραβίασης των ορίων τάσης κατά 20% και των απωλειών κατά 2.6%.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα από τα εξετασθέντα σενάρια προκύπτει ότι η ελεγχόμενη αντιστάθμιση σειράς όταν λειτουργεί για ελεγχόμενη ροή ισχύος στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα σε καταστάσεις (N-1) μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση του προφίλ των τάσεων σε ποσοστό 11÷14% και ελαφρώς στη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος, ενώ η συμβολή της γίνεται σημαντική σε περιπτώσεις (N-2), όπου αντίστοιχα μπορεί να βελτιώσει το προφίλ της τάσης έως 38% και να μειώσει τις απώλειες ενεργού ισχύος έως 6%.



Σχήμα 3.38: Ροές ενεργού ισχύος στο Ελληνικό δίκτυο 400 KV με τη γραμμή Αγ. Δημήτριος-Λάρισα "εκτός".



Σχήμα 3.39: Ροές ενεργού ισχύος στο Ελληνικό δίκτυο 400 KV με εγκατάσταση TCSC στη γραμμή Καρδιά-Τρίκαλα-Διστομο και τη γραμμή Αγ. Δημήτριος-Λάρισα "εκτός".

Επίσης, θα μπορούσε επιπρόσθετα να εξεταστεί η συμβολή της ελεγχόμενης αντιστάθμισης σειράς της στην αντιμετώπιση ταλαντώσεων ισχύος, που εμφανίζονται στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα σε σενάρια μεγάλης εισαγωγής ισχύος από Βορρά και Ιταλία, κατά το άνοιγμα διακοπτών στις βόρειες διασυνδετικές γραμμές [186].

Εφαρμογές	Κατάσταση συστήματος	T	T	ΣP_l	ΣP_l^{400}
		J_V	J_{VS}	(MW)	(MW)
Σενάοιο Α1	- κανονική λειτουργία	0 5281	0 4023	251.0	21.8
2010010111	- συνολικό φορτίο συστήματος 7000 MW	0.5281	0.4923	231.9	21.0
Σενάοιο Α2	- κανονική λειτουργία	0 0 0 0 7	0.0520	204.2	21.0
2010010	- συνολικό φορτίο συστήματος 7300 MW	0.9887	0.9550	294.2	51.0
Σενάοιο Α3	- απώλεια της γραμμής Αγ. Δημήτριος-Λάρισα	1 4070	1 2710	226.0	267
2010/10/10	- συνολικό φορτίο συστήματος 7300 MW	1.4070	1.5/10	520.9	30.7
Σενάοιο Α4	- απώλεια της Γ.Μ. Αγ. Δημήτριος-Λάρισα				
20/00/10/11	- εγκατάσταση TCSC στη Γ.Μ. Καρδιά-Τρίκαλα-Δίστομο	1.2680	1.2320	322.3	33.7
	- συνολικό φορτίο συστήματος 7300 MW				
Σενάοιο Α5	- απώλεια της Γ.Μ. Αγ. Δημήτριος-Λάρισα				
Levupio 115	- εγκατάσταση TCPAR στη Γ.Μ. Καρδιά-Τρίκαλα-Δίστομο	1.3510	1.3000	325.6	34.0
	- συνολικό φορτίο συστήματος 7300 MW				

Πίνακας 3.1: Επίδραση του TCSC και του TCPAR	στους δείκτες παραβίασης ορίων τάσης ζυγών και στις
απώλειες ενεργού ισχύος στο Ελληνικό δια	ασυνδεδεμένο σύστημα σε (N-1) διαταραχή.

Πίνακας 3.2: Επίδραση του TCSC και του TCPAR στους δείκτες παραβίασης ορίων τάσης ζυγών και στις απώλειες ενεργού ισχύος στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα σε (N-2) διαταραχή.

Εφαρμογές	Κατάσταση συστήματος (συνολικό φορτίο 7300 MW)	J_V	J_{VS}	$\frac{\Sigma P_l}{(MW)}$	$\frac{\Sigma P_l^{400}}{(MW)}$
Σενάριο Β1	 - απώλεια μονάδας συνδυασμένου κύκλου Λαυρίου 		1.890	380.6	52.1
Σενάριο Β2	 - απώλεια μονάδας συνδυασμένου κύκλου Λαυρίου - απώλεια της γραμμής Αγ. Δημήτριος-Λάρισα 		2.217	422.2	58.7
Σενάριο Β3	- απώλεια μονάδας συνδυασμένου κύκλου Λαυρίου - απώλεια της γραμμής Αγ. Δημήτριος-Λάρισα - εγκατάσταση TCSC στη Γ.Μ. Καρδιά-Τρίκαλα-Δίστομο	1.638	1.605	399.0	45.7
σενάριο Β4	 - απώλεια μονάδας συνδυασμένου κύκλου Λαυρίου - απώλεια της γραμμής Αγ. Δημήτριος-Λάρισα - εγκατάσταση TCPAR στη Γ.Μ. Καρδιά-Τρίκαλα-Δίστομο 	1.914	1.872	401.3	48.3

Πίνακας 3.3: Επίδραση του TCSC στους δείκτες παραβίασης ορίων τάσης ζυγών και στις απώλειες ενεργού ισχύος στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα, μετά την ενίσχυσή του, σε (N-1) διαταραχή καθώς και ταυτόχρονη εξαγωγή ισχύος προς Ιταλία.

Εφαρμογές	Κατάσταση συστήματος (συνολικό φορτίο 7500 MW)	J_V	J_{VS}	$\frac{\Sigma P_l}{(MW)}$	$\frac{\Sigma P_l^{400}}{(MW)}$
Σενάριο Γ1	1 κανονική λειτουργία (0.6872	267.7	27.3
Σενάριο Γ2	2 - απώλεια της γραμμής Αγ. Δημήτριος-Λάρισα		0.9749	308.8	36.9
Σενάριο Γ3	 - απώλεια της γραμμής Αγ. Δημήτριος-Λάρισα - εγκατάσταση TCSC στη Γ.Μ. Καρδιά-Τρίκαλα-Δίστομο 		0.8510	301.3	27.4
Σενάριο Γ4	- κανονική λειτουργία - εξαγωγή 500 MW προς Ιταλία	0.7548	0.7406	283.8	27.4
σενάριο Γ5	 - απώλεια της Γ.Μ. Αγ. Δημήτριος-Λάρισα - εξαγωγή 500 MW προς Ιταλία 		1.2172	332.8	36.5
σενάριο Γ6	 - απώλεια της Γ.Μ. Αγ. Δημήτριος-Λάρισα - εξαγωγή 500 MW προς Ιταλία - εγκατάσταση TCSC στη Γ.Μ. Καρδιά-Τρίκαλα-Δίστομο 	1.0499	1.0151	323.4	28.6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤCSC -ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΓΧΥΣΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

4.1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤCSC

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, αναπτύσσεται κατάλληλη μεθοδολογία με την οποία είναι δυνατός ο υπολογισμός των βασικών παραμέτρων ενός TCSC (πυκνωτής, πηνίο, περιοχή συντονισμού, κλπ.) προκειμένου να γίνει η αρχική διαστασιολόγηση μιας τέτοιας διάταξης.

Το TCSC, το οποίο μελετάται στη συνέχεια, έχει μεταβλητή σύνθετη αντίσταση Z ίση με 15÷50 Ω και λειτουργεί σε συχνότητα συστήματος 50 Hz. Οι κύριες παράμετροι της διάταξης, που πρέπει να προσδιοριστούν είναι οι ακόλουθες:

- η χωρητικότητα C του πυκνωτή σειράς,
- η αυτεπαγωγή L του παράλληλου πηνίου
- η γωνία συντονισμού α_{res} του κυκλώματος LC
- η ονομαστική ισχύς της διάταξης S_{nom}

Η χωρητικότητα C προκύπτει από την τιμή της χωρητικής αντίδρασης του πυκνωτή (15 Ω) και ίση με 212 μF.

Η γωνία συντονισμού του κυκλώματος LC προκύπτει από τη σχέση (3.18), που εκφράζει τους πόλους της εξίσωσης σύνθετης αντίστασης Z του TCSC (3.17), για n=1. Δηλαδή, η γωνία συντονισμού α_{res} δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$a_{res} = \pi - \frac{\pi}{2k} = \frac{\pi(2k-1)}{2k}$$
(4.1)

όπου $k = \frac{\omega_0}{\omega}$ και $\omega = 2\pi f$, $\omega_0^2 = \frac{l}{LC}$.

Είναι γνωστό ότι, το TCSC εμφανίζει τη μέγιστη τιμή σύνθετης αντίστασής του (εδώ τα 50 Ω) σε μια γωνία έναυσης λίγο μεγαλύτερη από τη γωνία συντονισμού. Έτσι, επιλέγοντας το TCSC να εμφανίσει τη μέγιστη τιμή της Z σε γωνία έναυσης κατά 3° μεγαλύτερη από τη γωνία συντονισμού α_{res} , προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$a_{max} = a_{re_s} + 3^{\circ} \tag{4.2}$$

Αντικαθιστώντας την (4.1) στην (4.2), προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$a_{max} = \frac{\pi(2k-1)}{2k} + 3^{\circ}$$
(4.3)

Από τη σχέση (3.17) για τη μέγιστη τιμή $Z_{max} = 50 \Omega$, ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:

$$Z_{max} = -X_C + \left(X_C + X_{LC}\right) \left[\frac{2\sigma_{max} + \sin 2\sigma_{max}}{\pi}\right] - \frac{4X_{LC}^2 \cos^2 \sigma_{max}}{X_L} \left[\frac{k \tan k\sigma_{max} - \tan \sigma_{max}}{\pi}\right]$$
(4.4)

όπου $\sigma_{max} = \pi - a_{max}$.

Επίσης, προκειμένου να υπάρχει ένα μόνο σημείο συντονισμού στο διάστημα μεταξύ 90° και 180°, λαμβάνεται υπόψη από τη βιβλιογραφία [49], ο ακόλουθος περιορισμός τιμών για το λόγο k:

$$2.4 < k < 2.75 \tag{4.5}$$

Οι εξισώσεις (4.3) και (4.4) έχουν μοναδικό άγνωστο την αυτεπαγωγή L. Επειδή η μέθοδος της αντικατάστασης και επίλυσης ως προς L δεν είναι εύκολη λόγω της μορφής της (4.4), δημιουργείται πρόγραμμα επίλυσης σε γλώσσα FORTRAN, από το οποίο προκύπτει ότι η κατάλληλη τιμή για το L που ικανοποιεί τις παραπάνω σχέσεις, είναι 6.35 mH, οπότε η γωνία συντονισμού α_{res} είναι ίση με 147.2 ° και ο λόγος k ίσος με 2.743.

Οι τιμές της σύνθετης αντίστασης Z του παραπάνω TCSC στη χωρητική περιοχή λειτουργίας για διάφορες τιμές γωνίας έναυσης α παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1. Η γραφική παράσταση της σύνθετης αντίστασης Z ως προς τη γωνία έναυσης α απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1, ενώ στην επαγωγική περιοχή λειτουργίας και γωνία έναυσης των θυρίστορ α=90°, η σύνθετη αντίσταση του TCSC γίνεται ίση με +j2.3 Ω .

Πίνακας 4.1: Τ	ιμές της σύνθετης	αντίστασης Ζ του	σχεδιασμένου	TCSC συναρτήσει	της γωνίας έναυσης α
-----------------------	-------------------	------------------	--------------	-----------------	----------------------

γωνία έναυσης α	σύνθετης αντίστασης Z
(°)	(Ω)
180	-j15
165	-j16
162	-j17
160	-j18
159	-j19
157	-j21
155	-j24
153	-j30
151.5	-j38
151	-j42
150.2	-j50

Η ονομαστική ισχύς της διάταξης S_{nom} δίνεται από την ακόλουθη σχέση [59]:

$$S_{nom} = 3 \cdot I_{rated} \cdot V_{rated} = 3 \cdot (I_{rated})^2 \cdot X_c$$
(4.6)

όπου

I_{rated} το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας

 V_{rated} η ονομαστική τάση λειτουργίας

Χ_C η χωρητική αντίδραση του πυκνωτή

Εάν θεωρηθεί ως ρεύμα μόνιμης λειτουργίας της διάταξης τα 1000 A, τότε από την (4.6), προκύπτει ότι η ονομαστική ισχύς της διάταξης S_{nom} θα είναι 45 MVA.



Σχήμα 4.1: Σύνθετη αντίσταση του σχεδιασμένου TCSC συναρτήσει της γωνίας έναυσης α.

Συνοψίζοντας, επιλέγονται τα ακόλουθα μεγέθη για το TCSC:

- πυκνωτής με χωρητικότητα C= 212 μ F ανά φάση,
- πηνίο με αυτεπαγωγή L= 6,35 mH ανά φάση (με συντελεστή ποιότητας Q=110 προκύπτει αντίσταση σε σειρά με το πηνίο R= 0,018126Ω),
- συχνότητα συγχρονισμού $ω_0 = 1/\sqrt{LC} = 861.87$ Hz,
- γωνία συντονισμού $a_{res}=147.2^{\circ}$,
- λόγος k=2.743,
- ονομαστική ισχύς της διάταξης S_{nom} =45 MVA.

4.2. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΤCSC ΚΑΙ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του TCSC, που προσδιορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, δημιουργείται στο EMTP το σύστημα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2 και αποτελείται από ισοδύναμη πηγή 400 kV στα 50 Hz, μοντέλο κατανεμημένων παραμέτρων γραμμής μεταφοράς 400 kV με επαγωγική αντίδραση j84Ω, διάταξη TCSC σχεδόν στο κέντρο της γραμμής και φορτίο σταθερής ισχύος στο τέλος της. Η μεταβλητή σύνθετη αντίσταση Z του TCSC έχει τιμές 15÷50 Ω, οι οποίες αντιστοιχούν σε ποσοστό αντιστάθμισης 18÷60 % αντίστοιχα.

Για τη μοντελοποίηση του TCSC χρησιμοποιείται το ψηφιακό μοντέλο TCSC, που αναπτύχθηκε στο ΕΜΤΡ και παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, με παραμέτρους αυτές που προσδιορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Από τις προσομοιώσεις στη μόνιμη κατάσταση επιβεβαιώνεται η σωστή λειτουργία του TCSC, αφού προκύπτουν ανάλογες κυματομορφές με αυτές των Σχημάτων 3.27 έως 3.30. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας τις κυματομορφές από τις προσομοιώσεις στο EMTP, πραγματοποιείται διερεύνηση αρμονικών εφαρμόζεται ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (*Fast Fourier Transform -FFT*) στο μαθηματικό πακέτο MATLAB. Πιο συγκεκριμένα, διερευνούνται τα ακόλουθα:



Σχήμα 4.2: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος για διερεύνηση αρμονικών.

- επικίνδυνες αρμονικές στον εσωτερικό βρόχο του TCSC
- η έγχυση αρμονικών στο σύστημα
- επίδραση των παραμέτρων σχεδίασης του TCSC στο μέγεθος των αρμονικών

Σημειώνεται ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη η επίδραση των αρμονικών στη συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς και των Μ/Σ ισχύος καθώς και η λειτουργία του αλεξικέραυνου ZnO.

Προκειμένου να διερευνηθεί η δυσμενέστερη περίπτωση ανάπτυξης αρμονικών στο εσωτερικό του TCSC, ο ζυγός φορτίου του Σχήματος 4.2 μετατρέπεται σε άπειρος ζυγό. Στα Σχήματα 4.3.α και 4.3.β εμφανίζονται οι αρμονικές της τάσης V_C στα άκρα του πυκνωτή ως προς τη βασική τάση (για α=180°) $V_C^{base} = I_{\gamma \rho \alpha \mu \mu \eta \varsigma} \cdot X_c$, σύμφωνα με τη σχέση (3.22). Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ότι οι δεσπόζουσες αρμονικές είναι η 3η και η 5^η αρμονική, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν θέρμανση έως και καταστροφή του πυκνωτή. Επίσης, παρατηρείται ότι, όσο η γωνία έναυσης απομακρύνεται από την περιοχή συντονισμού, το πλάτος των αρμονικών μειώνεται και ουσιαστικά μηδενίζεται μετά τις 168°.

Στο Σχήμα 4.4.α παρουσιάζεται το φάσμα αρμονικών της τάσης V_C στα άκρα του πυκνωτή ως προς τη βασική τάση V_C^{base} της διάταξης, για γωνία έναυσης α=155°,ενώ το Σχήμα 4.4.β παρουσιάζεται το φάσμα αρμονικών του ρεύματος που διαρρέει τον πυκνωτή ως προς την τιμή της θεμελιώδους αρμονικής του ρεύματος I_{Cl} , για την ίδια γωνία έναυσης.

Ο κανονισμός της IEEE 519 [187], που αφορά στον έλεγχο των αρμονικών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, θέτει όρια στην αρμονική παραμόρφωσης της τάσης που παρέχουν οι ηλεκτρικές εταιρίες στο κοινό σημείο σύνδεσης (ΚΣΣ) με κάθε καταναλωτή. Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται η συνολική αρμονική παραμόρφωση (*Total Harmonic Distortion–THD*) της τάσης στο ΚΣΣ, ως εξής:

$$THD(V_{K\Sigma\Sigma}) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \cdot 100\%$$
(4.7)

όπου

 V_n η *n*-στη αρμονική συνιστώσα της τάσης στο ΚΣΣ,

 V_1 η συνιστώσα της τάσης στο ΚΣΣ στη θεμελιώδη συχνότητα (50Hz).

Τα όρια αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης στο ΚΣΣ, ανάλογα με την τάση όπου συνδέεται το φορτίο, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Οι τιμές αυτές αποτελούν τη "χειρότερη περίπτωση" στην κανονική λειτουργία (συνθήκες που διαρκούν περισσότερο από μία ώρα). Για μικρότερες χρονικές περιόδους, σε μεταβατικές καταστάσεις, τα όρια αυτά μπορούν να ξεπεραστούν κατά 50%.

Τάση ζυγού στο ΚΣΣ	Παραμόρφωση από κάθε αρμονική ξεχωριστά (%)	Συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) (%)
<69 kV	3.0	5.0
Από 69 kV έως 161 kV	1.5	2.5
>161 kV	1.0	1.5

Πίνακας 4.2: Όρια αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης στο ΚΣΣ.

Στον Πίνακα 4.3 αναγράφονται οι τιμές της THD της τάσης στο ΚΣΣ του φορτίου για το σύστημα του Σχήματος 4.2 και για διάφορες γωνίες έναυσης α. Από τις τιμές αυτές διαπιστώνεται, όπως ήταν αναμενόμενο, αύξηση της τιμής της THD όσο η γωνία έναυσης μειώνεται και προσεγγίζει το σημείο συντονισμού του κυκλώματος LC. Όμως, όλες οι τιμές είναι μικρότερες από το όριο του 1.5%. Επίσης, η παραμόρφωση από κάθε αρμονική ξεχωριστά δεν ξεπερνά το 1%. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται ότι το TCSC δεν προκαλεί αρμονική παραμόρφωση πάνω από τα επιτρεπτά όρια, οπότε δεν απαιτούνται επιπρόσθετα μέτρα, όπως φίλτρα απορρόφησης αρμονικών.

Ως προς την επίδραση των παραμέτρων σχεδίασης του TCSC, πρέπει να τονιστεί ο σημαντικός ρόλος της τιμής της αυτεπαγωγής L. Η τιμή αυτή επηρεάζει την τιμή της συχνότητας συντονισμού του κυκλώματος LC και επηρεάζει το εύρος της περιοχής ελέγχου του TCSC [50]. Επιλέγοντας μια μεγάλη τιμή της αυτεπαγωγής L, η περιοχή χωρητικής λειτουργίας του TCSC αυξάνεται, παρέχοντας μεγαλύτερη ευελιξία ελέγχου. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της αυτεπαγωγής L του TCSC στις αρμονικές της τάσης στα άκρα του πυκνωτή, υπολογίζεται η THD της τάσης στα άκρα του πυκνωτή ως προς τη βασική, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$THD(V_C p.u.) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_{Cn}}{V_C^{base}}\right)^2}}{\frac{V_{C1}}{V_C^{base}}} \cdot 100\%$$
(4.8)

όπου

 V_{Cn} η n-στη αρμονική συνιστώσα της τάσης στα άκρα του πυκνωτή, V_{C1} η συνιστώσα της τάσης στα άκρα του πυκνωτή στη θεμελιώδη συχνότητα (50Hz), V_{C}^{base} η τάση της διάταξης για α=180° που λαμβάνεται ως βάση ($V_{C}^{base} = I_{\gamma \rho \alpha \mu \mu j \varsigma} \cdot X_{c}$).

Για να γίνει η σύγκριση, υπολογίζονται στην ίδια διάταξη TCSC διάφορες τιμές της αυτεπαγωγής L, οι οποίες δίνουν την ίδια τιμή της σύνθετης αντίστασης Z με αντίστοιχη αλλαγή της γωνίας έναυσης των θυρίστορ α. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι τιμές της αυτεπαγωγής L, η αντίστοιχη γωνία έναυσης α και η αντίστοιχη τιμή της THD της τάσης στα άκρα του πυκνωτή ως προς τη βασική [155]. Παρατηρώντας τις τιμές αυτές, προκύπτει ότι η αύξηση της τιμής του L όχι μόνο συμβάλλει στην αύξηση της περιοχή χωρητικής λειτουργίας του TCSC, αλλά και στη μείωση του αρμονικού περιεχομένου της τάσης στα άκρα του πυκνωτή, γεγονός που απομακρύνει τη γήρανση ή καταστροφή του. Κατά συνέπεια, κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός TCSC, ο προσδιορισμός της τιμής της αυτεπαγωγής L στο, πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τόσο το εύρος ελέγχου στη χωρητική περιοχή όσο και την αρμονική παραμόρφωση της τάσης στα άκρα του πυκνωτή.



Σχήμα 4.3.α: 3^{η} και 5^{η} αρμονική της τάσης στα άκρα του πυκνωτή σε α.μ. ως προς τη βασική τάση.



Σχήμα 4.3.β: 7^{η} , 9^{η} και 11^{η} αρμονική της τάσης στα άκρα του πυκνωτή σε α.μ. ως προς τη βασική τάση.

Σχήμα 4.3: Αρμονικό περιεχόμενο της τάσης στα άκρα του πυκνωτή σε α.μ. ως προς τη βασική τάση, για διάφορες γωνίες έναυσης α.



Σχήμα 4.4.α: Φάσμα αρμονικών της τάσης του πυκνωτή σε α.μ. ως προς τη βασική τάση, για α=155°.



Σχήμα 4.4.β: Φάσμα αρμονικών του ρεύματος που διαρρέει τον πυκνωτή ως προς τη θεμελιώδη αρμονική I_{CI} , για α=155°. **Σχήμα 4.4:** Φάσμα αρμονικών τάσεως και ρεύματος πυκνωτή στο TCSC, για α=155°.

Γωνία έναυσης α	$\text{THD}(V_{\text{K}\Sigma\Sigma})$
(°)	(%)
157	0.27
155	0.33
151	0.82
150.2	1.23

Πίνακας 4.3: ΤΗD της τάσης στο ΚΣΣ για διάφορες γωνίες έναυσης των θυριστορ.

Πίνακας 4.4: THD της τάσης στα άκρα του TCSC ως προς τη βασική για διαφορετικές τιμές της αυτεπαγωγής L και ίδια τιμή της σύνθετης αντίστασης Z.

Αυτεπαγωγή L	Γωνία έναυσης α	THD (V _C α.μ.)
(mH)	(°)	(%)
15	138	0.393
13	140	0.399
12	142	0.371
10	145	0.395
8	148	0.463
7	150	0.464

4.3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤCSC

4.3.1. Προσδιορισμός παραμέτρων εργαστηριακού μοντέλου TCSC

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθότητα της μεθοδολογίας προσδιορισμού των παραμέτρων μιας διάταξης TCSC καθώς επίσης να υλοποιηθούν εργαστηριακές μετρήσεις των αρμονικών, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα εργαστηριακό μοντέλο TCSC με χρηματοδότηση από το ερευνητικό πρόγραμμα ΠΕΝΕΔ [188]. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνεται στις αναφορές της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, που πραγματοποιήθηκε από την ΙΕΕΕ [26].

Γενικά, προκειμένου να σχεδιαστεί ένα εργαστηριακό μοντέλο πρέπει να βρεθεί ένας διαστατικός συντελεστής υποβιβασμού από τη διαστασιολόγηση του φυσικού συστήματος (δηλ. της πραγματικής εγκατάστασης) σε αυτή του εργαστηριακού μοντέλου. Ο συντελεστής αυτός, ορίζεται ο λόγος της βασικής σύνθετης αντίστασης του εργαστηριακού μοντέλου προς τη βασική σύνθετη αντίσταση του φυσικού συστήματος, στο ίδιο σημείο του κυκλώματος, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\lambda = \frac{Z_{b \, mod}}{Z_{b \, syst}} \tag{4.9}$$

Στη συνέχεια, προκειμένου να προσδιοριστούν οι τιμές των παραμέτρων του εργαστηριακού μοντέλου, οι αντιστάσεις R και οι αυτεπαγωγές L πρέπει να πολλαπλασιαστούν με το συντελεστή λ, ενώ οι χωρητικότητες C να διαιρεθούν με τον ίδιο συντελεστή. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται ένα μοντέλο που ανταποκρίνεται υπό κλίμακα στο πραγματικό σύστημα.

Το μονογραμμικό διάγραμμα της διάταξης που υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) του ΕΜΠ, φαίνεται στο Σχήμα 4.5.

Το φυσικό σύστημα που χρησιμοποιείται για τη διαστασιολόγηση του εργαστηριακού μοντέλου είναι το σύστημα του περιγράφεται στην παράγραφο 4.2, θεωρώντας φορτίο στο άκρο της γραμμής ισχύος $S_{load} = (235 + j82) MVA$. Κατά συνέπεια, η βασική σύνθετη αντίσταση του φυσικού συστήματος στο άκρο της γραμμής είναι ίση με:



Σχήμα 4.5: Μονογραμμικό διάγραμμα της εργαστηριακής διάταξης.

$$Z_{bsyst} = \frac{(V_{nom})^2}{|S_{load}|} = \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{248.89 \cdot 10^6} \Omega = 642.85 \Omega$$
(4.10)

Η βασική σύνθετη αντίσταση του εργαστηριακού μοντέλου, στο άκρο της γραμμής, είναι ίση με:

$$Z_{mod \ el} = \frac{(V_{nom})^2}{\sqrt{3} \cdot V_{nom} \cdot I_{load}} = \frac{(380V)^2}{\sqrt{3} \cdot 380V \cdot I_{load}}$$
(4.11)

Λόγω των περιορισμών που υπήρχαν στον εξοπλισμό του εργαστηρίου, το ρεύμα του φορτίου που συνδέεται στο τέλος του μοντέλου της γραμμής μεταφοράς δεν ξεπερνά τα 0.094 Α. Αντικαθιστώντας αυτή την τιμή στη σχέση (4.11), προκύπτει ότι η βασική αντίσταση του μοντέλου είναι ίση με:

$$Z_{mod \ el} = \frac{(380V)^2}{\sqrt{3} \cdot 380V \cdot 0.094A} = 2334\Omega$$
(4.12)

Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην (4.9), ο διαστατικός συντελεστής υποβιβασμού παίρνει την ακόλουθη τιμή:

$$\lambda = 3.63 \tag{4.13}$$

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του TCSC, που προσδιορίστηκαν στην παράγραφο 4.1, το εργαστηριακό TCSC θα έχει τις ακόλουθες παραμέτρους ανά φάση:

- Χωρητικότητα πυκνωτή C=58.5 μF,
- Αυτεπαγωγή πηνίου L = 23.215 mH,
- Ωμική αντίσταση σε σειρά με το πηνίο **R=0.06** Ω .

Βέβαια, οι παραπάνω τιμές προσεγγίστηκαν προκειμένου να βρεθούν στο εμπόριο κατάλληλα υλικά (πυκνωτές, πηνία, κλπ.) για την κατασκευή του εργαστηριακού μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγονται ανά φάση τα ακόλουθα:

- δύο πυκνωτές χωρητικότητας 30 μF συνδεδεμένοι παράλληλα,
- πηνίο αυτεπαγωγής περίπου 27 mH (μικρές αποκλίσεις μεταξύ των φάσεων)
- Ωμική αντίσταση σε σειρά με το πηνίο περίπου 0.075 Ω (μικρές αποκλίσεις μεταξύ των φάσεων)

Το κύκλωμα απόσβεσης (snubber circuit) επιλέχθηκε από τον κατασκευαστή. Τα λεπτομερή τεχνικά χαρακτηριστικά και τα λειτουργικά σχέδια του εργαστηριακού μοντέλου παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.

Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του εργαστηριακού μοντέλου TCSC συνοψίζονται στον Πίνακα 4.5, ενώ η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση Z του εργαστηριακού μοντέλου TCSC συναρτήσει της γωνίας έναυσης των θυρίστορ(α) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.

Τάση λειτουργίας (ανά φάση)	230 V
Συχνότητα συστήματος	50 Hz
Πυκνωτής (ανά φάση)	60 µF
πηνίο (ανά φάση)	27 mH (R=75 mΩ)
Γωνία συντονισμού	$\alpha_{\rm res} = 144^{\circ}$
$z (\alpha = 90^{\circ})$	+j10 Ω
z (α=180°)	-j53 Ω
z (α=147°)	-j180 Ω
Ονομαστική ισχύς	3 kVAr

Πίνακας 4.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά εργαστηριακού μοντέλου TCSC.

Στο Σχήμα 4.7 εμφανίζεται η εμπρόσθια όψη του εργαστηριακού μοντέλου, η οποία περιλαμβάνει τα μιμικό διάγραμμα των τριών φάσεων της διάταξης με τα σημεία σύνδεσης της διάταξης με τον υπόλοιπο εργαστηριακό εξοπλισμό, τα σημεία όπου γίνονται οι μετρήσεις των διαφόρων μεγεθών (τάση στα άκρα του πυκνωτή και των θυρίστορ, ρεύμα στο παράλληλο κύκλωμα πηνίου-θυρίστορ), ο επιλογέας του τρόπου έναυσης των θυρίστορ κλπ. [189].



Σχήμα 4.6: Φαινόμενη σύνθετη αντίσταση του εργαστηριακού μοντέλου TCSC συναρτήσει της γωνίας έναυσης α.



- 1. Κλείστρο πρόσοψης.
- 2. BNC έξοδος για μέτρηση του ρεύματος στο παράλληλο κύκλωμα πηνίου-θυρίστορ.
- 3. Ασφάλεια για την προστασία του παράλληλου κυκλώματος.
- 4. Κύρια σημεία σύνδεσης με τη διάταξη (είσοδος/έξοδος).
- 5. Βοηθητική παροχή 230V.
- 6. Σημεία σύνδεσης για μέτρηση της τάσης στα άκρα του πυκνωτή και των θυρίστορ.
- 7. Είσοδος για έναυση των θυρίστορ από άλλο κύκλωμα (εξωτερική έναυση).
- 8. Επιλογέας τρόπου έναυσης των θυρίστορ (εξωτερική/εσωτερική).
- 9. Ποτενσιόμετρο για ρύθμιση της γωνίας έναυσης χειροκίνητα (εσωτερική έναυση).

Σχήμα 4.7: Εμπρόσθια όψη του εργαστηριακού μοντέλου TCSC.

4.3.2. Περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του εργαστηριακού μοντέλου TCSC

Προκειμένου να τροφοδοτηθούν τα εσωτερικά κυκλώματα του εργαστηριακού μοντέλου TCSC απαιτείται η σύνδεσή του με βοηθητική παροχή 230 V (σημείο 6 στο Σχήμα 4.7). Η συνδεσμολογία του με τα υπόλοιπα στοιχεία της εργαστηριακής διάταξης (δηλ. η είσοδος και η έξοδος από το TCSC) γίνεται μέσω των σημείων σύνδεσης 4. Η έναυση των θυρίστορ μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, μέσω του επιλογικού διακόπτη 7:

- από ποτενσιόμετρο (σημείο 9 στο Σχήμα 4.7) για ρύθμιση της γωνίας έναυσης χειροκίνητα (εσωτερική έναυση)
- από κύκλωμα ελέγχου εξωτερικά του TCSC (μέσω της εισόδου 7 στο Σχήμα 4.7)

Η λογική δημιουργίας του συστήματος συγχρονισμού για την έναυση των θυρίστορ είναι ίδια με αυτή που αναπτύχθηκε στο ψηφιακό μοντέλο TCSC στο πρόγραμμα EMTP. Πιο συγκεκριμένα, στο εργαστηριακό μοντέλο ως σήμα συγχρονισμού επιλέγεται το ρεύμα του μοντέλου γραμμής μεταφοράς με καθυστέρηση 90° και η ανίχνευση σημείου μηδενισμού του ρεύματος γραμμής υλοποιείται μέσω κατάλληλων αντιστάσεων 0.1 Ω. Όταν ανιχνευτεί μηδενισμός του ρεύματος, δημιουργείται μια πριονωτή τάση μέσω ελεγχόμενου ολοκληρωτή, η οποία διαρκεί μέχρι τον επόμενο μηδενισμό. Η τάση αυτή κυμαίνεται μεταξύ 0 και 10 V και αντιστοιχεί σε γωνίες έναυσης μεταξύ 90° και 180° αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, το μοντέλο TCSC δέχεται μία τάση αναφοράς V_a μεταξύ 0 και 10 V, που προέρχεται είτε από το ποτενσιόμετρο είτε από εξωτερικό κύκλωμα ελέγχου και αντιστοιχεί στην επιθυμητή γωνία έναυσης των θυρίστορ. Συγκρίνοντας την τιμή της πριονωτής τάσης με την τιμή της τάσης αναφοράς, δίνεται παλμός έναυσης των θυρίστορ, μικρής διάρκειας με απόκλιση μικρότερη της 1°. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η επιθυμητή τιμή της σύνθετης αντίστασης του ΤCSC. Ο τρόπος υλοποίησης της έναυσης των θυρίστορ στο εργαστηριακό μοντέλο φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 4.8.

Τέλος, στο εργαστηριακό μοντέλο TCSC μπορούν να μετρηθούν το ρεύμα που διαρρέει το παράλληλο κύκλωμα πηνίου-θυρίστορ μέσω της BNC εξόδου (σημείο 2 στο Σχήμα 4.7), η τάση στα άκρα των θυρίστορ (σημεία 6 στο Σχήμα 4.7) καθώς και η τάση στα άκρα του πυκνωτή.

4.3.3. Αποτελέσματα μετρήσεων και σύγκρισή τους με προσομοιώσεις στο ΕΜΤΡ

Η διάταξη που υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ παρουσιάζεται στη φωτογραφία του Σχήματος 4.9. Περιλαμβάνει πηγή τάσης 230 V (φασική), μοντέλο γραμμής μεταφοράς επαγωγικής αντίδρασης j400 Ω και μοντέλο ωμικού φορτίου 2200 Ω σε συνδεσμολογία Υ. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται παρουσιάζονται στο Παράρτημα Δ.



Σχήμα 4.8: Τρόπος υλοποίησης της έναυσης των θυρίστορ στο εργαστηριακό μοντέλο TCSC.

Στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται η ρύθμιση της γωνίας έναυσης γίνεται με εσωτερική έναυση, ενώ οι μετρήσεις των διαφόρων μεγεθών στο εργαστηριακό μοντέλο απεικονίζονται σε παλμογράφο και στη συνέχεια αποθηκεύονται, μέσω κατάλληλης κάρτας επικοινωνίας, σε υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία. Προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση των μετρούμενων μεγεθών στο εργαστηριακό μοντέλο, όλη η εργαστηριακή διάταξη μοντελοποιείται στο EMTP.

Στα Σχήματα 4.10.1 και 4.11.1 εμφανίζονται η τάση στα άκρα του πυκνωτή και η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το παράλληλο κύκλωμα αντίστοιχα, στη χωρητική περιοχή λειτουργίας για διάφορες γωνίες έναυσης των θυρίστορ. Στα Σχήματα 4.10.2 και 4.11.2 εμφανίζονται οι ίδιες κυματομορφές όπως προκύπτουν από τις προσομοιώσεις στο EMTP. Συγκρίνοντας τα παραπάνω σχήματα, διαπιστώνεται ότι υπάρχει συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει τόσο το σωστό προσδιορισμό των παραμέτρων του εργαστηριακού μοντέλου TCSC, όσο και τη σωστή λειτουργία του μοντέλου αυτού. Επίσης, η συσκευή λειτουργεί πολύ καλά και στην περιοχή επαγωγικής συμπεριφοράς, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.12 και 4.13.

Προκειμένου να διερευνηθεί η δημιουργία αρμονικών εντός του TCSC εφαρμόζεται ταχύς μετασχηματισμός Fourier (*FFT*) στην τάση στα άκρα του πυκνωτή τόσο στις κυματομορφές που λαμβάνονται στο εργαστηριακό μοντέλο όσο και στις κυματομορφές που προκύπτουν από την προσομοίωση στο EMTP, για γωνία έναυσης α=146.2°. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.14.1 και 4.14.2 αντίστοιχα [190]. Διαπιστώνεται ότι σημαντικές είναι οι αρμονικές 3ⁿ, 5ⁿ και λιγότερο η 7ⁿ, ενώ η μόνη διαφορά μεταξύ των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του EMTP είναι η DC συνιστώσα, που εμφανίζεται στις μετρήσεις και οφείλεται στη ρύθμιση του παλμογράφου κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Η εφαρμογή του ταχύ μετασχηματισμού Fourier στο ρεύμα που διαρρέει το πηνίο στο εργαστηριακό μοντέλο και στις κυματομορφές του EMTP, παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.15.1 και 4.15.2 αντίστοιχα.

Τέλος, προκειμένου να εξεταστεί η έγχυση αρμονικών από το TCSC στο υπόλοιπο σύστημα, αναλύεται φασματικά το ρεύμα που διαρρέει το μοντέλο της γραμμή μεταφοράς. Η ανάλυση των μετρήσεων στην εργαστηριακή διάταξη παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.16.1, ενώ των αποτελεσμάτων στο EMTP στο Σχήμα 4.16.2. Η συνολική αρμονική παραμόρφωση (*THD*) του ρεύματος που διαρρέει το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς υπολογίζεται ίση με 2.19%, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί αρκετά ικανοποιητικό σε επίπεδο εργαστηριακής διάταξης.

4.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι το εργαστηριακό μοντέλο TCSC, που αναπτύσσεται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, λειτουργεί με ικανοποιητικό και αξιόπιστο τρόπο και επιβεβαιώνει τη μεθοδολογία προσδιορισμού των παραμέτρων που προτείνεται. Επιπρόσθετα, επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις, το γεγονός ότι το TCSC δεν προκαλεί σημαντική αρμονική παραμόρφωση στο υπόλοιπο σύστημα ακόμη και σε επίπεδο εργαστηριακής διάταξης.

Τέλος, το σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του εργαστηριακού μοντέλου είναι η δυνατότητα να δεχτεί σήματα ελέγχου με τη μορφή τάσης 0÷10V από εξωτερικό σύστημα ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για δυναμικό έλεγχο του συστήματος ή ανάπτυξη νέων τεχνικών ελέγχου πιο πολύπλοκων συστημάτων.



Σχήμα 4.9. Διάταξη για δοκιμές του μοντέλου TCSC στο Εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ.



Αποτελέσματα μετρήσεων

Αποτελέσματα ΕΜΤΡ



Σχήμα 4.10.1: Τάση στα άκρα του πυκνωτή στη χωρητική περιοχή λειτουργίας στο εργαστηριακό μοντέλο TCSC.

Σχήμα 4.10.2:. Τάση στα άκρα του πυκνωτή στη χωρητική περιοχή λειτουργίας από την προσομοίωση στο ΕΜΤΡ.

Σχήμα 4.10: Τάση στα άκρα του πυκνωτή στη χωρητική περιοχή λειτουργίας.





Σχήμα 4.11.1: Ρεύμα πηνίου στη χωρητική περιοχή λειτουργίας στο εργαστηριακό μοντέλο TCSC.

Σχήμα 4.11.2: Ρεύμα πηνίου στη χωρητική περιοχή λειτουργίας από την προσομοίωση στο ΕΜΤΡ.

Σχήμα 4.11: Ρεύμα πηνίου στη χωρητική περιοχή λειτουργίας.





Αποτελέσματα ΕΜΤΡ

Σχήμα 4.12.1: Τάση στα άκρα του πυκνωτή στην επαγωγική περιοχή λειτουργίας στο εργαστηριακό μοντέλο TCSC.

Σχήμα 4.12.2: Τάση στα άκρα του πυκνωτή στην επαγωγική περιοχή λειτουργίας από την προσομοίωση στο EMTP.

Σχήμα 4.12: Τάση στα άκρα του πυκνωτή στην επαγωγική περιοχή λειτουργίας.





Σχήμα 4.13.1: Ρεύμα πηνίου στην επαγωγική περιοχή λειτουργίας στο εργαστηριακό μοντέλο TCSC.



Σχήμα 4.13: Ρεύμα πηνίου στην επαγωγική περιοχή λειτουργίας.



Σχήμα 4.14.1: Φασματική ανάλυση της τάσης πυκνωτή στη χωρητική περιοχή λειτουργίας στο εργαστηριακό μοντέλο TCSC.

Σχήμα 4.14.2: Φασματική ανάλυση της τάσης πυκνωτή στη χωρητική περιοχή από την προσομοίωση στο EMTP.

800

Σχήμα 4.14: Φασματική ανάλυση της τάσης πυκνωτή στη χωρητική περιοχή λειτουργίας.



Σχήμα 4.15.1: Φασματική ανάλυση του ρεύματος πηνίου στη χωρητική περιοχή λειτουργίας στο εργαστηριακό μοντέλο TCSC.

Σχήμα 4.15.2: Φασματική ανάλυση του ρεύματος πηνίου στη χωρητική περιοχή λειτουργίας από τη προσομοίωση στο ΕΜΤΡ.

Σχήμα 4.15: Φασματική ανάλυση του ρεύματος πηνίου στη χωρητική περιοχή λειτουργίας.



Σχήμα 4.16.1: Φασματική ανάλυση του ρεύματος γραμμής στη χωρητική περιοχή λειτουργίας στο εργαστηριακό μοντέλο TCSC.

Σχήμα 4.16.2: Φασματική ανάλυση του ρεύματος γραμμής στη χωρητική περιοχή λειτουργίας από τη προσομοίωση στο EMTP.

Σχήμα 4.16: Φασματική ανάλυση του ρεύματος της γραμμής στη χωρητική περιοχή λειτουργίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ

5.1. ΟΡΙΣΜΟΙ

5.1.1. Ευστάθεια συστημάτων ισχύος

Η ευστάθεια των συστημάτων ισχύος (power system stability) είναι προϋπόθεση για την ασφαλή λειτουργία τους. Πολλά συστήματα έχουν οδηγηθεί στην κατάρρευση εξαιτίας αστάθειας του συστήματος, αποδεικνύοντας τη σημασία του φαινομένου. Προκειμένου να αναλυθεί η ευστάθεια των συστημάτων ισχύος απαιτείται ο προσδιορισμός των βασικών παραγόντων που συμβάλλουν στην αστάθεια και η ανάπτυξη κατάλληλων μεθόδων που βελτιώνουν την ασφαλή λειτουργία. Απαραίτητη προϋπόθεση για τα παραπάνω είναι η ταξινόμηση των διαφόρων φαινομένων αστάθειας σε κατηγορίες [191]. Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν γίνει προσπάθειες [192-196]. Σύμφωνα με την αναφορά [196], που είναι και η πιο πρόσφατη με τη συμμετοχή τόσο του ΙΕΕΕ όσο και της CIGRE, δίνεται ο ακόλουθος ορισμός της ευστάθειας:

Ευστάθεια ενός συστήματος ισχύος είναι η ικανότητα του συστήματος, για δεδομένες αρχικές συνθήκες λειτουργίας, να επανέρχεται σε μια κατάσταση ισορροπίας μετά από μια διαταραχή, με τις περισσότερες παραμέτρους του να παίρνουν τέτοιες τιμές ώστε το σύστημα να παραμένει πρακτικά ανεπηρέαστο.

Για την ταξινόμηση της ευστάθειας των συστημάτων ισχύος λαμβάνονται υπόψη τα εξής [191]:

- Η φύση του αποτελέσματος της αστάθειας, όπως υποδεικνύεται από τη βασική μεταβλητή του συστήματος όπου παρατηρείται η αστάθεια.
- Το μέγεθος της θεωρούμενης διαταραχής, το οποίο επηρεάζει τη μέθοδο υπολογισμού και την πρόβλεψη της ευστάθειας.
- Οι συσκευές, διαδικασίες και το χρονικό διάστημα που πρέπει να ληφθούν υπόψη προκειμένου να αναλυθεί η ευστάθεια.

Παρόμοια ταξινόμηση συναντάται και στην αναφορά [110], όπου ο διαχωρισμός γίνεται με βάση τα ακόλουθα κριτήρια: α)το χρονικό ορίζοντα του φαινομένου και β) το αίτιο που προκαλεί το φαινόμενο.

Με βάση τα παραπάνω η ευστάθεια των συστημάτων ισχύος μπορεί να ταξινομηθεί στις εξής κατηγορίες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1:

A) Ευστάθεια γωνίας (rotor angle stability) είναι η ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου συστήματος ισχύος να παραμείνουν σε συγχρονισμό μετά από μία διαταραχή.

Εξαρτάται από την ικανότητα να διατηρηθεί ή να αποκατασταθεί η ισορροπία μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής και της μηχανικής ροπής κάθε σύγχρονης μηχανής του συστήματος. Υπάρχουν δύο υποκατηγορίες ευστάθειας γωνίας:

- Ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών (small-disturbance or small signal rotor angle stability), η οποία αφορά στην ικανότητα του συστήματος ισχύος να διατηρήσει το συγχρονισμό κατά την διάρκεια μικρών διαταραχών, όπου η γραμμικοποίηση των εξισώσεων του συστήματος είναι επιτρεπτή [191,197,198]. Η μελέτη αυτών των φαινομένων γίνεται σε χρονικό ορίζοντα 10 έως 20 sec μετά την διαταραχή.
- Ο Ευστάθεια γωνίας μεγάλων διαταραχών ή μεταβατική ευστάθεια (large-disturbance rotor angle stability or transient stability), η οποία αφορά στην ικανότητα του συστήματος ισχύος να διατηρήσει το συγχρονισμό μετά από μια σημαντική διαταραχή, όπως το βραχυκύκλωμα σε μια γραμμή μεταφοράς. Η απόκριση του συστήματος σε μια τέτοια περίπτωση περιλαμβάνει μεγάλες αποκλίσεις των γωνιών των γεννητριών και επηρεάζεται από τη μη γραμμική σχέση ισχύος-γωνίας. Συνήθως, η αστάθεια εμφανίζεται ως αστάθεια πρώτης ταλάντωσης (first swing instability). Σε μεγάλα συστήματα μπορεί να επηρεαστεί και από αργές ταλαντώσεις ισχύος εντός μιας περιοχής (inter-area swings). Ο χρόνος ενδιαφέροντος στις μελέτες μεταβατικής ευστάθειας είναι συνήθως 3 με 5 sec μετά την διαταραχή. Το χρονικό διάστημα μπορεί να επεκταθεί στα 10 με 20 sec για πολύ μεγάλα συστήματα με ταλαντώσεις ισχύος σε μια περιοχή.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1 η ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών καθώς και η μεταβατική ευστάθεια ταξινομούνται στα βραχυπρόθεσμης κλίμακας φαινόμενα.

B) Ευστάθεια τάσης (voltage stability) είναι η ικανότητα του συστήματος ισχύος να διατηρήσει σταθερές τάσεις σε όλους τους ζυγούς του συστήματος μετά από μια διαταραχή με δεδομένες αρχικές συνθήκες λειτουργίας.

Η αστάθεια μπορεί να έχει την μορφή βαθμιαίας πτώσης ή (πιο σπάνια) ανύψωσης της τάσης κάποιων ζυγών. Ένα πιθανό αποτέλεσμα της αστάθειας τάσης είναι η απόρριψη φορτίου σε μια περιοχή ή το άνοιγμα γραμμών μεταφοράς και άλλων στοιχείων του συστήματος από τα συστήματα προστασίας τους, προκαλώντας έτσι διαδοχικές απώλειες στοιχείων (cascading outages).

Ο όρος κατάρρευση τάσης χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διαδικασίας κατά την οποία η διαδοχή των γεγονότων, που συνοδεύουν την αστάθεια τάσης, οδηγούν σε πλήρη σβέση ή ασυνήθιστα χαμηλές τάσεις σε ένα μεγάλο μέρος του συστήματος [191,199,200]. Στην αναφορά [110] ως κατάρρευση τάσης ορίζεται μια απότομη καταστροφική μετάβαση της κατάστασης ενός συστήματος, η οποία οφείλεται σε αστάθεια που προκαλείται σε μια ταχύτερη από την εξεταζόμενη χρονική κλίμακα.

Η αστάθεια τάσης προκαλείται από την απόπειρα του φορτίου (μέσω της δυναμικής συμπεριφοράς του) να αυξήσει την ισχύ που απορροφά από το σύστημα πέρα από τη φυσική ικανότητα του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς [110,191,199-203]. Τέτοια φορτία είναι, για παράδειγμα, οι κινητήρες επαγωγής και τα θερμοστατικά φορτία, τα οποία έχουν την τάση να ανακτούν την ισχύ που απορροφούν ύστερα από μια διαταραχή στο σύστημα, με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση της τάσης τροφοδοσίας τους. Επίσης, η λειτουργία των Συστημάτων Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) των μετασχηματιστών προκαλεί έμμεσα το ίδιο αποτέλεσμα, αφού επαναφέροντας την τάση στους ζυγούς φορτίου επαναφέρουν και το εξαρτώμενο από αυτήν φορτίο. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ζήτηση αέργου ισχύος και προκαλείται περαιτέρω πτώση τάσης. Επιπρόσθετα, στην αστάθεια τάσης συνεισφέρουν και διάσορες διατάξεις, όπως τα συστήματα ελέγχου και προστασίας των γεννητριών, οι διασυνδετικές γραμμές συνεχούς ρεύματος (HVDC) με ρύθμιση ισχύος κλπ.

Η ευστάθεια τάσης μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο υποκατηγορίες:

Ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών (large-disturbance voltage stability), η οποία αφορά στην ικανότητα του συστήματος ισχύος να διατηρήσει σταθερές τάσεις μετά από μια μεγάλη διαταραχή όπως είναι ένα βραχυκύκλωμα, η απώλεια μιας γεννήτριας κτλ. Η

ικανότητα αυτή καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος και του φορτίου, τις αλληλεπιδράσεις των συνεχών και διακριτών ελέγχων και προστασιών. Η ανάλυση του φαινομένου αυτού απαιτεί την εξέταση της μη γραμμικής απόκρισης του συστήματος για αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να λειτουργήσουν και να αλληλεπιδράσουν διατάξεις, όπως οι κινητήρες, τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών ισχύος και οι περιοριστές ρεύματος πεδίου των γεννητριών. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να μελετηθεί το φαινόμενο από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικές δεκάδες λεπτά.

Ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών (small-disturbance voltage stability), η οποία αφορά στην ικανότητα του συστήματος ισχύος να διατηρήσει σταθερές τάσεις κατά την διάρκεια μικρών διαταραχών, όπως αυξητικές αλλαγές του φορτίου του συστήματος. Αυτή η μορφή ευστάθειας επηρεάζεται από τις χαρακτηριστικές των φορτίων, τους συνεχείς και διακριτούς ελέγχους σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Με κατάλληλες υποθέσεις, οι εξισώσεις του συστήματος μπορούν να γραμμικοποιηθούν επιτρέποντας τον υπολογισμό ευαισθησιών, οι οποίες είναι χρήσιμες στην εύρεση παραγόντων που επηρεάζουν την ευστάθεια. Η γραμμικοποίηση αυτή, όμως, δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μη γραμμικά στοιχεία, όπως ο έλεγχος των ΣΑΤΥΦ (νεκρές ζώνες, διακριτά βήματα και χρονικές καθυστερήσεις). Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται συνδυασμός γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης συμπληρωματικά [204,205].

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, επειδή ο χρονικός ορίζοντας ενδιαφέροντος για τα προβλήματα ευστάθειας τάσης ποικίλει από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι μερικές δεκάδες λεπτά, η ευστάθεια τάσης μπορεί να θεωρηθεί είτε βραχυπρόθεσμο είτε μακροπρόθεσμο φαινόμενο.

Η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης (long-term voltage stability) περιλαμβάνει τη δυναμική συμπεριφορά φορτίων που δρουν γρήγορα, όπως οι κινητήρες επαγωγής, τα ηλεκτρονικά ελεγχόμενα φορτία, οι μετατροπείς διασυνδέσεων υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC). Η ανάλυση αφορά χρονικό διάστημα αρκετών δευτερολέπτων και απαιτείται η επίλυση των κατάλληλων διαφορικών εξισώσεων του συστήματος. Συχνά απαιτούνται και δυναμικά μοντέλα των φορτίων.



Σχήμα 5.1: Ταξινόμηση της ευστάθειας συστημάτων ισχύος [196].

Ο Η μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης (long-term voltage stability) περιλαμβάνει τη συμπεριφορά εξοπλισμού που δρα πιο αργά, όπως τα ΣΑΤΥΦ, τα θερμοστατικά φορτία και οι περιοριστές ρεύματος των γεννητριών. Χρονικός ορίζοντας ενδιαφέροντος για το φαινόμενο αυτό μπορεί να επεκταθεί από μερικά έως πολλά λεπτά και απαιτείται προσομοίωση στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα [201,204]. Σε πολλές περιπτώσεις ανάλυσης χρησιμοποιούνται στατικές μέθοδοι [204-206] προκειμένου να εκτιμηθούν τα όρια ευστάθειας και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια. Στις περιπτώσεις που είναι σημαντικές οι χρονικές στιγμές όπου λειτουργούν οι διάφοροι έλεγχοι απαιτούνται προγράμματα προσομοίωσης ημι-μόνιμης κατάστασης [110,201,203,207].

Γ) Ευστάθεια συχνότητας (frequency stability) είναι η ικανότητα του συστήματος ισχύος να διατηρήσει σταθερή τη συχνότητα μετά από μια σημαντική διαταραχή που οδηγεί σε σημαντική ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και φορτίου.

Η αστάθεια συχνότητας έχει τη μορφή διατηρούμενων ταλαντώσεων συχνότητας, οι οποίες παραμένουν και οδηγούν στην απώλεια γεννητριών και/ή την απόρριψη φορτίων. Σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα η αστάθεια συχνότητας μπορεί να οδηγήσει στη διαίρεση του συστήματος σε νησίδες. Γενικά τα προβλήματα ευστάθειας συχνότητας σχετίζονται με ανεπαρκή αντίδραση του εξοπλισμού, έλλειψη συντονισμού στον έλεγχο και την προστασία του εξοπλισμού ή ανεπαρκή εφεδρεία στην παραγωγή. Τέτοια προβλήματα αναφέρονται στις αναφορές [208-210]. Σε απομονωμένα νησιωτικά συστήματα, η ευστάθεια συχνότητας είναι σημαντική στην περίπτωση διαταραχών που προκαλούν απώλεια σημαντικού μέρους της παραγωγής ή του φορτίου [211].

Κατά τη διάρκεια ταλαντώσεων συχνότητας, οι χρόνοι κατά τους οποίους οι συσκευές και οι προστασίες ενεργοποιούνται κυμαίνονται από κλάσματα του δευτερολέπτου, όπως η προστασία υποσυχνότητας των φορτίων και οι προστασίες των γεννητριών, έως αρκετά λεπτά, όπως η απόκριση των λεβήτων και των ρυθμιστών τάσης των φορτίων. Για το λόγο αυτό, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1, η ευστάθεια συχνότητας μπορεί να είναι ένα βραχυπρόθεσμο ή ένα μακροπρόθεσμο φαινόμενο.

5.1.2. Ασφάλεια συστημάτων ισχύος

Ασφάλεια ενός συστήματος ισχύος (power system security) είναι η ικανότητα του συστήματος να αντέχει επικείμενες διαταραχές (προγραμματισμένες ή όχι) χωρίς να διακόπτεται η τροφοδότηση των καταναλωτών [212]. Το πρόβλημα της ασφάλειας μπορεί να διαχωριστεί σε τρία επίπεδα, που λαμβάνουν χώρα είτε σε πραγματικό χρόνο είτε στο επίπεδο σχεδιασμού λειτουργίας [110]. Τα επίπεδα αυτά είναι:

- Η παρακολούθηση της ασφάλειας (security monitoring) όπου ελέγχεται η μη παραβίαση των λειτουργικών περιορισμών των στοιχείων του συστήματος, όπως μέγιστο ρεύμα γραμμών, τάσεις ζυγών εντός επιτρεπτών ορίων κλπ.
- Η ανάλυση ασφάλειας (security analysis) όπου ελέγχεται η ικανότητα του συστήματος μετά από μία διαταραχή α) να μεταβεί σε ένα νέο σημείο λειτουργίας που δεν παραβιάζονται λειτουργικοί περιορισμοί και β) να αντέξει τη μετάβαση σε αυτό το νέο σημείο λειτουργίας [196]. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζονται μορφές ανάλυσης:

a) Η στατική ανάλυση ασφάλειας (static security analysis) όπου αναλύονται στη μόνιμη κατάσταση οι συνθήκες του συστήματος μετά τη διαταραχή προκειμένου να διαπιστωθεί ότι δεν παραβιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του εξοπλισμού ούτε οι περιορισμοί τάσης.

β) Η δυναμική ανάλυση ευστάθειας (dynamic security analysis) όπου εξετάζονται διάφορες κατηγορίες ευστάθειας, που αναφέρονται στην παράγραφο 5.1.1.

Ο προσδιορισμός του περιθωρίου ασφάλειας (security margin determination) όπου υπολογίζεται πόσο μπορούν να αυξηθούν τα φορτία και να ανακατανεμηθεί η παραγωγή ώστε το σύστημα να παραμείνει ασφαλές. Ο προσδιορισμός αυτός είναι πολύ σημαντικός στα σημερινά συστήματα που λειτουργούν σε απελευθερωμένο περιβάλλον, όπου ο χειριστής χρειάζεται να ξέρει πόσο φορτίο μπορεί να μεταφέρει χωρίς να κινδυνεύει η ασφάλεια του συστήματος [110].

5.1.3. Σημείο μέγιστης μεταφερομένης ισχύος - Όριο φόρτισης

Εάν θεωρηθεί σύστημα δύο ζυγών, αποτελούμενο από ένα ζυγό φορτίου, ο οποίος τροφοδοτείται από έναν άπειρο ζυγό τάσης $E \angle 0^{\circ}$ διαμέσου μιας γραμμής μεταφοράς με σύνθετη αντίσταση Z = R + jX, τότε οι εξισώσεις ροής ισχύος για το σύστημα αυτό είναι οι ακόλουθες:

$$P = -\frac{EV}{X}\sin\theta \tag{5.1}$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X}\cos\theta \tag{5.2}$$

Το **σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος** (maximum power transfer point) είναι το ακρότατο της καμπύλης P-V του συστήματος, δηλαδή το σημείο A του Σχήματος 5.2, και εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους του συστήματος. Το σημείο Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος (M.M.I) αποτελεί το όριο του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής – μεταφοράς σε ένα σημείο λειτουργίας του συστήματος. Μετά το σημείο αυτό, η διαδικασία ανάκτησης του φορτίου γίνεται ασταθής, δηλαδή για παράδειγμα αντί να αυξάνει η απορροφούμενη ισχύς του φορτίου, μετά από μια βύθιση της τάσης του αντίστοιχου ζυγού, αντιθέτως αυτή μειώνεται. Ο μηχανισμός αυτός αστάθειας είναι η κύρια αιτία των προβλημάτων αστάθειας τάσης.

Η μέγιστη τιμή της ζήτησης z_{max} για την οποία υπάρχει σημείο λειτουργίας καλείται όριο φόρτισης (loadability limit) του συστήματος, δηλαδή το σημείο Β του Σχήματος 5.2.

Σημειώνεται ότι, για φορτίο σταθερής ισχύος, το όριο φόρτισης συμπίπτει με το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Στη γενική περίπτωση όμως αυτό δεν ισχύει.



Σχήμα 5.2: α) Καμπύλη P-V συστήματος δύο ζυγών (χαρακτηριστικές φορτίου $z_1 < z_2 < z_{max}$).

5.1.4. Όριο ασφαλούς λειτουργίας - Όριο φόρτισης μετά από διαταραχή - Περιθώριο φόρτισης

Το περιθώριο ασφάλειας που ορίστηκε στην παράγραφο 5.1.2, αποτελεί ένα μέτρο προσέγγισης στα δύο ακόλουθα όρια [110]:

- Οριο ασφαλούς λειτουργίας (secure operation limit), το οποίο προκύπτει αυξάνοντας τη φόρτιση του συστήματος μέχρι εκεί που μπορεί να αντέξει μια δεδομένη διαταραχή (ή γενικότερα τις πιο κρίσιμες διαταραχές του συστήματος).
- Οριο φόρτισης μετά από διαταραχή (post-contingency loadability limit), το οποίο προκύπτει αυξάνοντας τη φόρτιση του συστήματος προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση μετά από μία διαταραχή. Στο Σχήμα 5.3 αποτυπώνονται σε P-V καμπύλες το όριο φόρτισης του συστήματος πριν και μετά τη διαταραχή, θεωρώντας τα φορτία σταθερής ισχύος.

Επίσης, το περιθώριο φόρτισης ενός συστήματος ισχύος ορίζεται ως εξής:

Περιθώριο φόρτισης (loading margin) ονομάζεται η διαφορά φορτίου μεταξύ του ορίου φόρτισης του συστήματος και μιας αρχικής κατάστασης του συστήματος (base case). Στην αναφορά [109] ως περιθώριο φόρτισης για ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας ορίζεται το ποσό του επιπρόσθετου φορτίου που θα οδηγήσει σε κατάρρευση τάσης.

Ένα σύστημα θεωρείται ασφαλές εάν υπάρχει ένα επαρκές περιθώριο φόρτισης μεταξύ ενός αρχικού σημείου λειτουργίας και του σημείου αστάθειας τάσης σε συνθήκες N και (N-1) συνθήκες. Στην ορολογία της αγοράς ενέργειας το περιθώριο φόρτισης είναι επίσης γνωστό ως Available Transfer Capability (ATC) του συστήματος. Στην εργασία [98] ως ATC ορίζεται η διαφορά ενεργού ισχύος σε μια περιοχή του συστήματος μεταξύ μιας αρχικής κατάστασης και του σημείου κατάρρευσης τάσης (σημείο σαγματικού κόμβου – saddle-node bifurcation point) για ένα συγκεκριμένο σχήμα παραγωγής-κατανάλωσης, όπου τα ρεύματα στο δίκτυο μεταφοράς διατηρούνται κάτω από τα θερμικά όρια και οι τάσεις στους ζυγούς φορτίου είναι σε επιτρεπτά επίπεδα. Εάν δεν υπάρχει σημείο σαγματικού κόμβου, το ATC ορίζεται ως η μέγιστη αλλαγή της ροής ισχύος στην περιοχή.

Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζεται το περιθώριο φόρτισης του συστήματος πριν και μετά τη διαταραχή στην καμπύλη P-Vτου συστήματος.



Σχήμα 5.3: Αποτύπωση σε καμπύλες P-V του ορίου και του περιθωρίου φόρτισης ενός συστήματος (με φορτία σταθερής ισχύος) πριν και μετά τη διαταραχή.

5.2. SYMBOAH THE ANTIETAOMIEHE SEIPAE ETHN AYEHEH TOY ΠΕΡΙΟΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΕΗΕ ΤΟΥ ΕΥΣΤΗΜΑΤΟΕ

Η αντιστάθμιση σειράς αντιμετωπίζει ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που οδηγούν σε αστάθεια τάσης, το οποίο είναι η ηλεκτρική απόσταση μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης [110]. Κατά συνέπεια, η εγκατάσταση διατάξεων αντιστάθμισης σειράς σε κρίσιμες γραμμές μεταφοράς αυξάνει τόσο τη μεταφερόμενη ισχύ της συγκεκριμένης γραμμής όσο και το περιθώριο φόρτισης του συστήματος.

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζονται οι PV-καμπύλες 1 και 2, οι οποίες αντιστοιχούν στο συνολικό ενεργό φορτίο του συστήματος χωρίς και με αντιστάθμιση σειράς, αντίστοιχα. Θεωρώντας όλα τα φορτία σταθεράς ισχύος, το όριο φόρτισης του συστήματος συμπίπτει με το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος,. Η αύξηση του περιθωρίου φόρτισης εξαιτίας της αντιστάθμισης σειράς είναι ίση με:

Aύξηση περιθωρίου φόρτισης =
$$P_{max}^{TCSC} - P_{max}$$
 (5.3)

όπου

 P_{max} : είναι το όριο φόρτισης του συστήματος χωρίς αντιστάθμιση σειράς,

 $P_{\textit{max}}^{\textit{TCSC}}$: είναι το όριο φόρτισης του συστήματος με αντιστάθμιση σειράς,

 P_o : είναι το συνολικό ενεργό φορτίο του συστήματος στην αρχική κατάσταση.

Θωρούμε ότι το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας περιγράφεται από την κατάσταση ισορροπίας ενός δυναμικού συστήματος που περιέχει *n* αλγεβρικές εξισώσεις με *n* αλγεβρικές μεταβλητές, που το διάνυσμά τους θα το συμβολίσουμε με *u*. Συνεπώς, περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\varphi(\boldsymbol{u},\boldsymbol{p}) = 0 \tag{5.4}$$

όπου

 φ είναι ένα διάνυσμα ομαλών συναρτήσεων,

pείναι ένα διάνυσμα $n \times 1$ που αντιπροσωπεύει τις ανεξάρτητες παραμέτρους,.

Είναι γνωστό ότι στο όριο φόρτισης του συστήματος ο Ιακωβιανός πίνακας φ_u ως προς τις αλγεβρικές μεταβλητές \boldsymbol{u} , στην κατάσταση ισορροπίας που περιγράφεται από την (5.4), είναι ιδιόμορφος [110]. Οπότε προκύπτει η εξής αναγκαία συνθήκη:

$$\det \varphi_u = 0 \tag{5.5}$$

Κατά συνέπεια, ο πίνακας φ_u έχει μια τουλάχιστον μηδενική ιδιοτιμή. Υπό αυτές τις συνθήκες, κάθε σημείο που ικανοποιεί τη σχέση (5.5) ονομάζεται διακλάδωση σαγματικού κόμβου (saddle node bifurcation).



Σχήμα 5.4: Οι ΡV-καμπύλες του συστήματος χωρίς και με αντιστάθμιση σειράς.

(- A)

Είναι επίσης γνωστό ότι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάζει προβλήματα ευστάθειας τάσης, συνήθως χάνει την ευστάθειά του διαμέσω μιας διακλάδωσης σαγματικού κόμβου. Συνεπώς, η διερεύνηση των κρισιμότερων γραμμών για αντιστάθμιση σειράς, προκειμένου να ενισχυθεί η ευστάθεια τάσης, πρέπει να πραγματοποιηθεί σε σημεία λειτουργίας του συστήματος κοντά στο όριο φόρτισης του συστήματος.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, για την εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης διατάξεων αντιστάθμισης σειράς αναπτύσσονται δύο διαφορετικές τεχνικές από τις οποίες η πρώτη βασίζεται σε τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης με εφαρμογή των Δένδρων Απόφασης (Decision Trees) και η δεύτερη σε αναλυτικές μεθόδους και πιο συγκεκριμένα στον υπολογισμό των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος ως προς τις παραμέτρους του συστήματος [109,110].

5.3. ΔΕΝΔΡΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ

5.3.1. Το πρόβλημα της εποπτευόμενης μάθησης

Το πρόβλημα της **εποπτευόμενης μάθησης** (supervised learning), μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: από ένα δεδομένο σύνολο από αντικείμενα αποτελούμενα από ζευγάρια εισόδου/εξόδου, να εξαχθεί ένα γενικότερο μοντέλο, που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξηγήσει τη σχέση εισόδου/εξόδου και/ή να προβλέπει την έξοδο για κάθε νέα άγνωστη είσοδο.

5.3.1.1. Τεχνικές αυτόματης μάθησης

Οι τεχνικές αυτόματης μάθησης (automatic learning techniques) βοηθούν στην εξαγωγή πληροφορίας από βάσεις δεδομένων (βάσεις γνώσης), σε διάφορες μορφές. Το κύριο χαρακτηριστικό, το οποίο είναι κοινό στις τεχνικές αυτόματης μάθησης, είναι ότι η μάθηση αντιμετωπίζεται σαν μία διαδικασία αναζήτησης σε ένα χώρο υποψήφιων μοντέλων [217]. Η διαδικασία αναζήτησης βοηθάει στον προσδιορισμό (ή κατασκευή) ενός μοντέλου μέγιστης ποιότητας, και καθοδηγείται από την πληροφορία που εμπεριέχεται σε ένα σύνολο μάθησης (ένα υποσύνολο της βάσης δεδομένων) και πιθανόν από κάποια γενική γνώση για το πρόβλημα.

Η εξαγωγή γνώσης από βάσεις δεδομένων είναι μία διαδικασία προσδιορισμού έγκυρων, πρωτότυπων, χρήσιμων, και κατανοητών μοντέλων για τα εξεταζόμενα δεδομένα [218]. Επίσης, συχνά χρησιμοποιείται ο όρος **αναζήτηση δεδομένων** (data mining) για να περιγράψει τη διαδικασία χρησιμοποίησης μίας μεθόδου αυτόματης μάθησης σε ένα καλά ορισμένο πρόβλημα εκπαίδευσης προκειμένου να κατασκευαστούν μοντέλα μίας συγκεκριμένης κατηγορίας.

Η μεθοδολογία των δένδρων απόφασης ανήκει στις τεχνικές εποπτευόμενης μάθησης. Είναι μία μη-παραμετρική μέθοδος μάθησης, ανεξάρτητη από τη στατιστική κατανομή του εξεταζόμενου πληθυσμού. Το δένδρο απόφασης κατασκευάζεται με τη διαδικασία της επαγωγικής εξαγωγής συμπερασμάτων (inductive inference) και έχει την ιεραρχική μορφή ενός δένδρου από κανόνες με δομή από πάνω προς τα κάτω [219]. Χρησιμοποιείται για την εξαγωγή γενικών κανόνων από μία βάση δεδομένων, οι οποίοι θα μπορούν αργότερα να εφαρμοστούν προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για νέα δεδομένα ή να αποκαλύψει τους μηχανισμούς που χαρακτηρίζουν ένα πρόβλημα [220-223].

Στόχος της διαδικασίας επαγωγικής εξαγωγής συμπερασμάτων είναι η δημιουργία ενός όσο το δυνατόν πιο απλού δένδρου, που να έχει τη μέγιστη ποσότητα πληροφορίας για την ταξινόμηση των παραδειγμάτων μάθησης. Για παράδειγμα, ο στόχος της αρχικής έκδοσης της μεθόδου *ID3* (interactive dichotomizer) ήταν να κατασκευάσει τα πιο απλά δένδρα με το ελάχιστο σφάλμα ταξινόμησης στο σύνολο μάθησης [219].

Σε πιο πρόσφατες προσεγγίσεις, η διαδικασία κατασκευής του δένδρου απόφασης στοχεύει στην κατασκευή ενός σχεδόν βέλτιστου δένδρου απόφασης, με την έννοια ότι αυτό επιτυγχάνει μία

καλή ισορροπία μεταξύ πολυπλοκότητας και ακρίβειας, δηλαδή μεταξύ του συνολικού αριθμού των κόμβων και της ικανότητας ταξινόμησης. Έτσι, ο αλγόριθμος ανάπτυξης του δένδρου (tree growing) οδηγεί στην εξαγωγή της δομής του δένδρου και των διχοτομικών του ελέγχων.

Αλλες τεχνικές αυτόματης μάθησης που χρησιμοποιούνται είναι τα νευρωνικά δίκτυα και οι γενετικοί αλγόριθμοι.

Τα **νευρωνικά δίκτυα** είναι ένας μηχανισμός που προσπαθεί να μιμηθεί τον τρόπο με τον οποίο εκτελεί ο εγκέφαλος μία συγκεκριμένη λειτουργία. Αποτελούνται από μαζικά αλληλένδετες μονάδες επεξεργασίας που ονομάζονται νευρώνες. Έτσι, το νευρωνικό δίκτυο είναι ένας μαζικός, παράλληλα κατανεμημένος επεξεργαστής, ο οποίος έχει την τάση αποθήκευσης εμπειρικής γνώσης και διάθεσής της προς χρήση. Μπορούν να μοντελοποιήσουν ένα πρόβλημα με μεγάλη ακρίβεια, αξιοποιώντας τα δεδομένα του συνόλου μάθησης. Το μοντέλο που προκύπτει στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των εξόδων για οποιεσδήποτε τιμές εισόδου.

Η ενασχόληση με τα νευρωνικά δίκτυα ξεκίνησε το 1943 με την πρωτοποριακή εργασία [224], όπου ερμηνεύονται η λειτουργία των νευρωνικών δικτύων. Έκτοτε αρκετοί ασχολήθηκαν, με σημαντικές εργασίες όπως η εργασία [225] και το βιβλίο των Rumelhart και McClelland [226]. Σήμερα, τα νευρωνικά δίκτυα θεωρούνται μία περιοχή έρευνας με ρίζες στις νευροεπιστήμες, την ψυχολογία, τα μαθηματικά και εφαρμογές τις φυσικές και τεχνικές επιστήμες, ενώ οι εφαρμογές τους συνεχώς διευρύνονται.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι τεχνικές αναζήτησης της βέλτιστης λύσης εμπνευσμένες από τις αρχές της φυσικής επιλογής και της γενετικής. Οι αλγόριθμοι αυτοί λειτουργούν πάνω σε ένα πληθυσμό υποψήφιων λύσεων με τη μορφή κωδικοποιημένης πληροφορίας. Ο πληθυσμός εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου, χρησιμοποιώντας τους κανόνες της φυσικής επιλογής (επιβίωση του ισχυρότερου) και του ανασυνδυασμού του γενετικού υλικού μέσα στον πληθυσμό. Στόχος τους είναι, καθώς εξελίσσεται ο πληθυσμός από γενιά σε γενιά, να βελτιώνουν την ποιότητα των λύσεων και τελικά, μετά από έναν αριθμό γενεών, να καταλήξουν σε βέλτιστες λύσεις για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν από τον Holland και τους συνεργάτες του [227,228] και καθώς αποτελούν απλή και ισχυρή μεθοδολογία στην εύρεση της βέλτιστης λύσης, έχουν χρησιμοποιηθεί σε ευρεία κλίμακα σε επιχειρηματικές, επιστημονικές και τεχνικές εφαρμογές.

5.3.1.2. Αξιοποίηση της βάσης γνώσης

Στην αυτόματη μάθηση ως βάση γνώσης (Knowledge Base-KB) ορίζεται μία συλλογή από αντικείμενα (objects) αποτελούμενα από ένα ορισμένο αριθμό ιδιοτήτων (attributes) που περιέχουν κάποια πληροφορία.

Η αξιοποίηση του συνόλου μάθησης περιλαμβάνει την αναπαράσταση του υπό εξέταση προβλήματος, την επιλογή των ιδιοτήτων, την επιλογή του μοντέλου, την ερμηνεία, την αξιολόγηση και τη χρήση του μοντέλου [229].

Η **αναπαράσταση** αποτελείται από (α) την επιλογή των κατάλληλων ιδιοτήτων εισόδου που να αναπαριστούν τις χαρακτηριστικές περιπτώσεις του προβλήματος, (β) τον ορισμό της πληροφορίας εξόδου και (γ) την επιλογή της κατηγορίας των μοντέλων που είναι κατάλληλη να αναπαραστήσει τις σχέσεις εισόδου/εξόδου (π.χ. δένδρα απόφασης ή νευρωνικά δίκτυα).

Η αναπαράσταση ορίζεται από το χρήστη, παρόλο που κάποιες μέθοδοι μπορούν να επιλέξουν αυτόματα νέες ιδιότητες. Έτσι, η επιλογή ενός κατάλληλου συνόλου ιδιοτήτων γίνεται μέσα από μία επαναληπτική διαδικασία κατά τη διάρκεια των πρώτων δοκιμών εφαρμογής ενός αλγόριθμου μάθησης σε ένα καινούριο πρόβλημα. Επίσης, είναι πιθανόν να απαιτηθεί προεπεξεργασία των τιμών των ιδιοτήτων προκειμένου να εφαρμοστεί ένας αλγόριθμος μάθησης, π.χ. κλιμάκωση των τιμών των ιδιοτήτων, αριθμητική κωδικοποίηση συμβολικής πληροφορίας, ή εκτίμηση ελλιπών τιμών.

Η επιλογή των ιδιοτήτων βοηθάει στη μείωση της διάστασης του χώρου εισόδου, αγνοώντας εκείνες, που δεν μεταφέρουν χρήσιμη πληροφορία για την πρόβλεψη της θεωρούμενης εξόδου.

Η επιλογή του μοντέλου θα προσδιορίσει ποιο από τα προκαθορισμένα μοντέλα ταιριάζει καλύτερα στις καταστάσεις εκπαίδευσης. Η διαδικασία αυτή απαιτεί την επιλογή της δομής και των παραμέτρων του μοντέλου, χρησιμοποιώντας μία τεχνική αναζήτησης προσαρμοσμένη στον τύπο του θεωρούμενου μοντέλου.

Η διάκριση μεταξύ επιλογής ιδιοτήτων και επιλογής μοντέλου δεν είναι πάντα απαραίτητη, αφού κάποιες μέθοδοι (όπως τα δένδρα απόφασης) λύνουν ταυτόχρονα και τα δύο αυτά προβλήματα.

Με την ερμηνεία γίνεται κατανοητή η φυσική σημασία του μοντέλου και των συμπερασμάτων που εξάγονται από αυτό.

Με την αξιολόγηση προσδιορίζεται η ακρίβεια του μοντέλου. Το βήμα αυτό περιλαμβάνει σύγκριση της πληροφορίας η οποία μπορεί να εξαχθεί από το μοντέλο με προηγούμενη γνώση και δοκιμή του μοντέλου σε σύνολο παραδειγμάτων ελέγχου.

Η χρήση του μοντέλου περιλαμβάνει εφαρμογή του μοντέλου για πρόβλεψη των εξόδων νέων περιπτώσεων από τις τιμές των παραμέτρων εισόδου και, αν είναι αναγκαίο, "αναστροφή" του μοντέλου προκειμένου να δίνει πληροφορία για το πως μπορούν να τροποποιηθούν οι παράμετροι εισόδου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη μίας επιθυμητής εξόδου.

Ως προς την ταχύτητα των διαφόρων τεχνικών, πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στην ταχύτητα μεταξύ των εναλλακτικών τεχνικών. Αυτό πιθανόν να μειώνει τη χρησιμότητα μερικών μεθόδων σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπου η ταχύτητα είναι κρίσιμη παράμετρος.

5.3.2. Θεωρία των δένδρων απόφασης

5.3.2.1. Σύνολα μάθησης και ελέγχου

Η κατασκευή των δένδρων απόφασης προϋποθέτει την ύπαρξη ενός συνόλου μάθησης (Learning Set) δηλαδή ενός αριθμού, έστω Ν, προταξινομημένων αντικειμένων (objects). Για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αντικείμενα μπορεί να είναι διάφορα σημεία λειτουργίας του συστήματος (Operating Points –OPs).

Για τη δημιουργία του συνόλου μάθησης απαιτούνται: η δημιουργία των κατάλληλων σημείων λειτουργίας, ο προσδιορισμός και η εφαρμογή κριτηρίου για ταξινόμηση σε κλάσεις και η επιλογή των υποψήφιων ιδιοτήτων.

Α. Δημιουργία των κατάλληλων σημείων λειτουργίας

Ο βασικός παράγοντας σε αυτή τη διαδικασία είναι η αντιπροσωπευτικότητα (representativity) του συνόλου μάθησης, δηλαδή ότι είναι ένα αντιπροσωπευτικό στατιστικό δείγμα προερχόμενο από το συνολικό πληθυσμό των πιθανών ΣΛ.

Β. Εφαρμογή κριτηρίου ταξινόμησης σε κλάσεις

Κάθε αντικείμενο, επίσης, χαρακτηρίζεται από την κλάση του (class). Θα πρέπει να καθοριστεί το κριτήριο για την ταξινόμηση των ΣΛ σε κλάσεις, δηλαδή πρέπει να καθοριστούν τα όρια μεταξύ γειτονικών κλάσεων. Η κλάση κάθε ΣΛ δηλώνει εάν είναι αυτή η κατάσταση είναι ασφαλής ή όχι

για τη συγκεκριμένη διαταραχή, το οποίο είναι εκ των προτέρων γνωστό στα στάδια της μάθησης.

Στην περίπτωση δυαδικών δένδρων απόφασης η ταξινόμηση γίνεται σε δύο κλάσεις. Ο όρος δυαδικό δένδρο σημαίνει ότι κάθε κόμβος ελέγχου έχει δύο απογόνους, όπου τα παραδείγματα μάθησης του ενός κόμβου επαληθεύουν τον έλεγχο, ενώ του άλλου τον διαψεύδουν. Για παράδειγμα, τα σημεία λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κλάσεις: ασφαλή/μη ασφαλή (safe/unsafe). Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ταξινόμηση με περισσότερες κλάσεις, οπότε προκύπτουν πιο ακριβή αλλά πολυπλοκότερα δένδρα απόφασης.

Γ. Επιλογή των υποψήφιων ιδιοτήτων

Κάθε αντικείμενο χαρακτηρίζεται από ένα καθορισμένο αριθμό, έστω *n*, ιδιοτήτων (attributes). Οι ιδιότητες αυτές μπορούν να πάρουν διάφορες μορφές τιμών, όπως ακέραιες, πραγματικές, διακριτές, ποιοτικές, κοκ.

Η επιλογή των υποψήφιων ιδιοτήτων είναι ένα από τα πιο σημαντικά στάδια στην ανάπτυξη των δένδρων απόφασης. Σε αυτό το στάδιο θα πρέπει να επιλεγούν οι ιδιότητες που περιέχουν σημαντική πληροφορία για το εξεταζόμενο πρόβλημα. Μπορούν να επιλεγούν κάποιες «υποψήφιες» ιδιότητες, από τις οποίες ο αλγόριθμος ανάπτυξης του δένδρου θα επιλέξει ποιες είναι σημαντικές. Μία πρώτη προσέγγιση είναι η επιλογή όλων των μεταβλητών του συστήματος ως «υποψήφιες» ιδιότητες. Αυτή η προσέγγιση όμως οδηγεί σε μεγάλες και μη αποτελεσματικές λίστες ιδιοτήτων, οδηγώντας σε χρονοβόρες υπολογισμούς και δυσκολία υλοποίησης πολλών δοκιμαστικών δένδρων. Επιπλέον, η χρήση μεταβλητών που δεν σχετίζονται ή σχετίζονται λίγο με το εξεταζόμενο πρόβλημα μπορεί να οδηγήσει σε δένδρα κακής ποιότητας.

Η επιλογή των πιο κατάλληλων μεταβλητών βασίζεται στην εμπειρία των μηχανικών και στην κατανόηση του προβλήματος, ενώ μπορεί να χρειαστεί να δοκιμαστούν διάφορες εναλλακτικές λίστες υποψηφίων ιδιοτήτων, προκειμένου να προσδιοριστεί η πιο κατάλληλη.

Τα παραπάνω παριστάνονται σχηματικά στο Σχήμα 5.5, όπου κάθε ΣΛ ενός συνόλου μάθησης χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό ιδιοτήτων καθώς και από την κλάση του (ασφαλές/μη ασφαλές).

Χωρίς βλάβη της γενικότητας θα υποθέσουμε ότι τα N αντικείμενα είναι ταξινομημένα σε δύο κλάσεις $\{+, -\}$. Το **σύνολο μάθησης** *(learning set)* ορίζεται ως:

$$LS = \{ (\mathbf{v}^{1}, c^{1}), (\mathbf{v}^{2}, c^{2}), ..., (\mathbf{v}^{N}, c^{N}) \}$$
(5.6)

όπου τα στοιχεία του διανύσματος ν έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$\boldsymbol{v}^{k} = \left(v_{1}^{k}, v_{2}^{k}, \dots, v_{n}^{k}\right)^{T} = \boldsymbol{a} \left(o_{k}\right)$$
(5.7)

και αναπαριστούν τις τιμές των ιδιοτήτων του αντικειμένου o_k και $c^k = c(o_k)$ είναι η κλάση του, δηλαδή:

$$\boldsymbol{c}^{k} \in \{+,-\} \tag{5.8}$$

Παρόμοια, το **σύνολο ελέγχου** (test set) είναι ένα υποσύνολο άλλων M αντικειμένων, που χρησιμοποιείται προκειμένου να αξιολογηθεί η ποιότητα του δένδρου απόφασης που προέκυψε από το σύνολο μάθησης.

Θεωρείται πάντοτε ότι το σύνολο μάθησης και το σύνολο ελέγχου είναι διαφορετικά μεταξύ τους και εξάγονται τυχαία από τη βάση γνώσης. Κατά συνέπεια, η βάση γνώσης χωρίζεται σε δύο μέρη, από τα οποία το μεγαλύτερο αποτελεί το σύνολο μάθησης και το μικρότερο το σύνολο ελέγχου.



ΣΥΝΟΛΟ ΜΑΘΗΣΗΣ (Ν ΣΗΜΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ-ΣΛ)

Σχήμα 5.5: Δομή ενός συνόλου μάθησης.

5.3.2.2. Είδη κόμβων

Ο πρώτος κόμβος του δέντρου απόφασης ονομάζεται κόμβος-ρίζα (root node) και ακολουθούν οι λεγόμενοι κόμβοι ελέγχου (test nodes) ή ενδιάμεσοι κόμβοι καθώς και οι τερματικοί κόμβοι (terminal nodes).

Οι κόμβοι ελέγχου περιέχουν έναν έλεγχο και δημιουργούν δύο απογόνους (successors). Ο ένας απόγονος (ο αριστερός), προκύπτει όταν επαληθεύεται ο έλεγχος, ενώ ο άλλος απόγονος (δεξιός) όταν δεν επαληθεύεται. Οι κόμβοι ελέγχου είναι δύο κατηγοριών: α) κόμβοι διαχωρισμού (split nodes) και β) κόμβοι συσχετισμού (correlation nodes).

Οι κόμβοι συσχετισμού δείχνουν ότι ο έλεγχος οδηγεί σε άμεση συσχέτιση (correlation) του υποσυνόλου του συνόλου μάθησης με τον επιθυμητό διαχωρισμό αποτελέσματος. Με άλλα λόγια ο έλεγχος που περιέχει ο κόμβος, διαχωρίζει στη σωστή κατεύθυνση το σύνολο μάθησης, δηλαδή το σύνολο μάθησης που προκύπτει περιέχει περιπτώσεις που κατά το μεγαλύτερο μέρος ανήκουν στη μία από τις δύο κλάσεις. Όταν δεν υπάρχει φανερή συσχέτιση, τότε ο κόμβος είναι κόμβος διαχωρισμού.

Οι τερματικοί κόμβοι είναι αυτοί που οδηγούν στην ταξινόμηση της εξεταζόμενου αντικειμένου ή σημείου λειτουργίας σε μία από τις προεπιλεγμένες κλάσεις. (π.χ ασφαλές ή μη ασφαλές). Οι τερματικοί κόμβοι είναι δύο κατηγοριών: α) φύλλα (leaf) και β) αδιέξοδοι (deadend).

Οι κόμβοι "φύλλα" είναι αυτοί που πραγματικά κατάφεραν να διαχωρίσουν το σύνολο μάθησης με τέτοιο τρόπο, ώστε σχεδόν όλες τα αντικείμενα ή σημεία λειτουργίας να ανήκουν σε μία από τις δύο κλάσεις.

Οι αδιέξοδοι κόμβοι δεν κατάφεραν να διαχωρίσουν ικανοποιητικά το σύνολο μάθησης, οπότε δεν μπορούμε με ασφάλεια να κατατάξουμε την περίπτωση σε μία από τις δύο κλάσεις.

Συνεπώς, όσο μικρότερο είναι το δέντρο, και όσο λιγότερους αδιέξοδους κόμβους περιέχει, τόσο καλύτερης ποιότητας είναι.
5.3.2.3. Αλγόριθμος ανάπτυξης δένδρου απόφασης

Ο αναδρομικός αλγόριθμος ανάπτυξης του δένδρου ξεκινάει με ολόκληρο το σύνολο μάθησης στον κόμβο-ρίζα του δένδρου. Σε κάθε βήμα επιλέγεται ο καταλληλότερος έλεγχος προκειμένου να διαχωρίσει το τρέχον σύνολο αντικειμένων σε δύο υποσύνολα όσο το δυνατόν πιο καθαρά, δηλαδή με τη μικρότερη δυνατή ανάμιξη κλάσεων [230].

Η επιλογή του καταλληλότερου ελέγχου βασίζεται στην αύξηση της πρόσθετης πληροφορίας που προκύπτει από αυτόν τον έλεγχο ή στη μείωση της "μη καθαρότητας" (impurity) της μεταβλητής εξόδου μέσα στο υποσύνολο μάθησης του κόμβου. Η μέτρηση της πληροφορίας που δίνεται από έναν έλεγχο βασίζεται στην εντροπία του εξεταζόμενου υποσυνόλου. Αυτή η διαδικασία, είναι γνωστή ως βέλτιστο κριτήριο διαχωρισμού (optimal splitting criterion).

Προκειμένου να διερευνηθεί εάν ένας κόμβος πρέπει να αναπτυχθεί περαιτέρω, ανάλογα με την πληροφορία που υπάρχει στο τρέχον υποσύνολο μάθησης του κόμβου εφαρμόζεται το κριτήριο διακοπής διαχωρισμού (stop splitting criterion) [230]. Για παράδειγμα, αν το τοπικό υποσύνολο μάθησης είναι επαρκώς καθαρό τότε δεν υπάρχει λόγος για περαιτέρω διαχωρισμό. Άλλος λόγος για το μη διαχωρισμό ενός κόμβου σχετίζεται με το πρόβλημα της υπερπροσαρμογής (over-fitting), το οποίο μπορεί να συμβεί όταν το σύνολο μάθησης του κόμβου γίνεται υπερβολικά μικρό για να επιτρέπει μία αξιόπιστη επιλογή ενός καλού ελέγχου. Ο τρόπος με τον οποίο καθορίζεται εάν ένας κόμβος είναι τερματικός, δηλαδή επαρκώς καθαρός ως προς την κλάση, είναι η σύγκριση της εντροπίας ταξινόμησης του κόμβου με μια ελάχιστη προκαθορισμένη τιμή H_{min} .

Ο αλγόριθμος ανάπτυξης ενός δένδρου απόφασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, για λόγους απλότητας, στη συνέχεια θεωρείται ταξινόμηση των αντικειμένων σε δύο κλάσεις: ασφαλή/μη ασφαλή (safe / unsafe). Τα βήματα που ακολουθούνται για την ανάπτυξη του δένδρου απόφασης είναι τα ακόλουθα:

- 1. Έναρξη της διαδικασίας με τον κόμβο-ρίζα, ο οποίος περιλαμβάνει ολόκληρο το σύνολο μάθησης.
- 2. Εξέταση της περαιτέρω ικανότητας διαχωρισμού του κόμβου με εφαρμογή του κριτηρίου διακοπής διαχωρισμού:
 - Αν το υποσύνολο μάθησης του κόμβου είναι επαρκώς καθαρό, τότε ο κόμβος χαρακτηρίζεται ΦΥΛΛΟ (LEAF).
 - Αν δεν είναι, τότε εκτελείται το βήμα 3.
- 3. Εφαρμογή του βέλτιστου κριτηρίου διαχωρισμού, δηλαδή εύρεση του βέλτιστου ελέγχου *T*, *o* οποίος διαιρεί τα παραδείγματα μάθησης στα δύο πιο καθαρά υποσύνολα.
- 4. Στατιστικός έλεγχος για το βέλτιστο έλεγχο.
 - Αν το κέρδος πληροφορίας είναι στατιστικά σημαντικό, τότε ο κόμβος χαρακτηρίζεται ΚΟΜΒΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ (TEST NODE). Εκτέλεση του βήματος 5.
 - Αν το κέρδος πληροφορίας δεν είναι στατιστικά σημαντικό τότε ο κόμβος χαρακτηρίζεται ΚΟΜΒΟΣ ΑΔΙΕΞΟΔΟΣ (DEADEND).
- 5. Διαχωρισμός των αντικειμένων του κόμβου, δηλαδή δημιουργία δύο απογόνων που αντιστοιχούν στα δύο υποσύνολα μάθησης του βέλτιστου ελέγχου διαχωρισμού.
- 6. Αναδρομική εφαρμογή των βημάτων 2-5 σε όλους απογόνους κόμβους.
- 7. Δημιουργία του δένδρου απόφασης, όταν τελειώσει ο έλεγχος όλων των κόμβων.

Στη συνέχεια αναλύονται λεπτομερώς η έννοια της εντροπίας, το βέλτιστο κριτήριο διαχωρισμού και το κριτήριο διακοπής διαχωρισμού.

5.3.2.4. Η συνάρτηση εντροπίας

Η συνάρτηση εντροπίας είναι γνωστή από τη θερμοδυναμική και από τη θεωρία της πληροφορίας του *Shannon*. Η συνάρτηση εντροπίας είναι το μόνο μέτρο αβεβαιότητας το οποίο είναι προσθετικό [231]: η εντροπία ενός συστήματος που αποτελείται από ανεξάρτητα υποσυστήματα είναι ίση με το άθροισμα των εντροπιών των υποσυστημάτων. Παρόμοια, η αβεβαιότητα του αποτελέσματος ανεξάρτητων γεγονότων είναι ίση με το άθροισμα των αβεβαιοτήτων κάθε γεγονότος ξεχωριστά. Μία άλλη ενδιαφέρουσα ιδιότητα της εντροπίας είναι η πιθανοτική της ερμηνεία, η οποία προτείνει ότι η μείωση της εντροπίας ισοδυναμεί με αύξηση των μεταγενέστερων πιθανοτήτων.

Έστω ένας κόμβος n, ο οποίος αποτελεί ένα υποσύνολο μάθησης E_n με N αντικείμενα, από τα οποία τα n_s είναι ασφαλή και τα n_u είναι μη ασφαλή. Οι σχετικές συχνότητες των ασφαλών και μη ασφαλών αντικειμένων του κόμβου n θα είναι:

$$f_s = \frac{n_s}{n_s + n_u} = \frac{n_s}{N} \quad \kappa \alpha i \quad f_u = \frac{n_u}{n_s + n_u} = \frac{n_u}{N}$$
(5.9)

Η εντροπία του υποσυνόλου μάθησης E_n ως προς την ταξινόμηση των αντικειμένων του σε κλάσεις ορίζεται ως:

$$H_{c}(E_{n}) = -(f_{s} \log_{2} f_{s} + f_{u} \log_{2} f_{u})$$
(5.10)

όπου $H_c(E_n)$ είναι ένα μέτρο της καθαρότητας του υποσυνόλου E_n ως προς την ταξινόμηση σε κλάσεις και, κατά συνέπεια της αβεβαιότητας της ταξινόμησης ενός αντικειμένου από αυτό τον κόμβο. Για την εντροπία $H_c(E_n)$ ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$0 \le H_c(E_n) \le I$$

$$H_c(E_n) = 0 \Leftrightarrow (f_s = I \text{ or } f_u = I)$$

$$H_c(E_n) = I \Leftrightarrow f_s = f_u = 0.5$$
(5.11)

Ένας έλεγχος Τ στον κόμβο n ορίζεται ως:

$$T: A_i \le t \tag{5.12}$$

όπου Ai είναι η τιμή της ιδιότητας i ενός συγκεκριμένου αντικειμένου και t είναι η τιμή κατωφλίου.

Εφαρμόζοντας τον έλεγχος T σε όλα τα αντικείμενα του κόμβου n, το E_n χωρίζεται σε δύο υποσύνολα E_{n1} και E_{n2} , ως εξής :

$$E_{nl} = \{ av\tau i \kappa \varepsilon i \mu \varepsilon v \alpha \in E_n : A_i \le t \}$$

$$E_{n2} = \{ av\tau i \kappa \varepsilon i \mu \varepsilon v \alpha \in E_n : A_i > t \}$$
(5.13)

Εάν n_i είναι ο αριθμός των αντικειμένων στο E_{ni} (i=1,2), n_{si} ο αριθμός των ασφαλών αντικειμένων στο E_{ni} και n_{ui} ο αριθμός των μη ασφαλών αντικειμένων στο E_{ni} , τότε οι αντίστοιχες συχνότητες είναι:



Σχήμα 5.6: Αλγόριθμος ανάπτυξης δένδρου απόφασης.

$$f_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2} = \frac{n_1}{N}$$
 and $f_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2} = \frac{n_2}{N}$ (5.14)

$$f_{sl} = \frac{n_{sl}}{n_{sl} + n_{ul}} = \frac{n_{sl}}{n_l} \quad and \quad f_{ul} = \frac{n_{ul}}{n_{sl} + n_{ul}} = \frac{n_{ul}}{n_l}$$
(5.15)

$$f_{s2} = \frac{n_{s2}}{n_{s2} + n_{u2}} = \frac{n_{s2}}{n_2}$$
 and $f_{u2} = \frac{n_{u2}}{n_{s2} + n_{u2}} = \frac{n_{u2}}{n_2}$ (5.16)

Η εντροπία του E_n ως προς την ταξινόμηση που προκύπτει από τον έλεγχο T είναι ίση με:

$$H_T(E_n) = -(f_1 \log_2 f_1 + f_2 \log_2 f_2)$$
(5.17)

Η συνάρτηση $H_T(E_n)$ είναι ένα μέτρο της αβεβαιότητας του αποτελέσματος του ελέγχου T και έχει παρόμοιες ιδιότητες με τη συνάρτηση $H_c(E_n)$.

Η μέση υπό συνθήκες εντροπία (mean conditional entropy) του E_n , έχοντας ως δεδομένο το αποτέλεσμα του ελέγχου T, αντιστοιχεί στην εντροπία της περιοχής μετά την εφαρμογή του T και ορίζεται ως εξής:

$$H_{c}(E_{n}|T) = f_{1}H_{c}(E_{n1}) + f_{2}H_{c}(E_{n2})$$
(5.18)

Η $H_c(E_n)$ συμβολίζει ουσιαστικά την προγενέστερη εντροπία ταξινόμησης που εκτιμάται στο υποσύνολο μάθησης του κόμβου, ενώ η $H_c(E_n|T)$ συμβολίζει τη μεταγενέστερη εντροπία ταξινόμησης που εκτιμάται στο υποσύνολο μάθησης του κόμβου, με δεδομένη την πληροφορία που παρέχεται από τον έλεγχο.

5.3.2.5. Βέλτιστο κριτήριο διαχωρισμού

Με το βέλτιστο κριτήριο διαχωρισμού αναζητείται ένα τοπικά βέλτιστος ελέγχου που να μειώνει τη "μη καθαρότητα" (impurity) της μεταβλητής εξόδου μέσα στο υποσύνολο μάθησης του κόμβου. Αυτό συνεπάγεται την ανεύρεση για κάθε υποψήφια ιδιότητα του δικού της βέλτιστου ελέγχου και τον προσδιορισμό της ιδιότητας, η οποία είναι η συνολικά βέλτιστη. Συνεπώς, δημιουργείται η ανάγκη ορισμού μίας συνάρτησης βαθμολογίας (score function) και υλοποίησης κατάλληλων αλγορίθμων αναζήτησης της βέλτιστης τιμής κατωφλίου για κάθε τύπο υποψήφιων ιδιοτήτων.

Σε πρακτικές εφαρμογές οι ποιοτικές ιδιότητες είναι γενικά δυαδικοί δείκτες, οπότε οι ιδιότητες αυτές επιτρέπουν μόνο ένα απλό διαχωρισμό και επομένως υπολογίζεται μία φορά η συνάρτηση βαθμολογίας του μοναδικού διαχωρισμού. Όμως, στην περίπτωση των αριθμητικών ιδιοτήτων που λαμβάνουν πραγματικές τιμές απαιτείται μια διαδικασία υπολογισμού της βέλτιστης τιμής κατωφλίου.

Έτσι, για κάθε αριθμητική ιδιότητα σε κάθε κόμβο ακολουθείται η διαδικασία υπολογισμού της βέλτιστης τιμής κατωφλίου, προκειμένου να παραχθεί ο αντίστοιχος βέλτιστος διαχωρισμός, σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία [119]:

1. Για μία ιδιότητα α και μία τιμή κατωφλίου u, ορίζεται το αριστερό υποσύνολο του κόμβου ως το σύνολο των αντικειμένων μάθησης έτσι ώστε a < u, και το δεξιό υποσύνολο ως το συμπληρωματικό του.

2. Ταξινόμηση του υποσυνόλου μάθησης στον τρέχοντα κόμβο, κατά αύξουσα τάξη της θεωρούμενης υποψήφιας ιδιότητας.

3. Εκκίνηση με ένα άδειο αριστερό υποσύνολο και ένα δεξιό υποσύνολο ίσο με το πλήρες υποσύνολο μάθησης του κόμβου.

4. Σάρωση της ταξινομημένης λίστας των αντικειμένων, απομακρύνοντας σε κάθε βήμα ένα παράδειγμα από το δεξιό υποσύνολο και προσθήκη αυτού στο αριστερό υποσύνολο.

5. Σε κάθε βήμα, ενημέρωση του αριθμού των αντικειμένων κάθε κλάσης στο αριστερό και δεξιό υποσύνολο.

6. Έστω u_i η τιμή της ιδιότητας του τελευταίου αντικείμενου που μετακινήθηκε στο αριστερό υποσύνολο, δηλαδή τα αντικείμενα του αριστερού υποσυνόλου ικανοποιούν τη σχέση $\alpha \le u_i$.

7. Παρόμοια, έστω u_{i+1} η τιμή της ιδιότητας του επόμενου αντικείμενου που πρόκειται να μετακινηθεί, αλλά παραμένει ακόμα στο δεξιό υποσύνολο. Έτσι για τα αντικείμενα του δεξιού υποσυνόλου ισχύει ότι $\alpha \ge u_{i+1}$ και $u_i \le u_{i+1}$.

8. Μόνο αν ισχύει $u_i < u_{i+1}$, ορίζεται μία νέα υποψήφια τιμή κατωφλίου $u_{th} = \frac{u_i + u_{i+1}}{2}$, και υπολογίζεται η βαθμολογία του υποψήφιου ελέγχου $\alpha(o) < u_{th}$ στη βάση του αριθμού των αντικειμένων κάθε κλάσης στο αριστερό και στο δεξιό υποσύνολο.

9. Αν η βαθμολογία του νέο ελέγχου πουν δημιουργείται είναι καλύτερη από την προηγούμενη βέλτιστη τιμή, ενημερώνεται η *u*_{th} μαζί με τη βαθμολογία του, ως ο τρέχον καλύτερος έλεγχος.

Αυτή η διαδικασία αναζήτησης απαιτεί περίπου N υπολογισμούς της συνάρτησης βαθμολογίας καθώς και ταξινόμηση του υποσυνόλου μάθησης. Αν και είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, με τα σημερινά υπολογιστικά συστήματα γίνεται με τρόπο αποδοτικό.

Η συνάρτηση βαθμολογίας, που απαιτείται, προκύπτει από το μέτρο καθαρότητας (ή αβεβαιότητας) [232] το οποίο μπορεί να μετρηθεί με χρήση της συνάρτησης εντροπίας. Μία απλή λύση είναι η χρησιμοποίηση της συνολικής ποσότητας της πληροφορίας που παρέχεται από ένα υποψήφιο διαχωρισμό σε ένα κόμβο, ως το κριτήριο για την επιλογή του πλέον κατάλληλου διαχωρισμού.

Έτσι, το κέρδος πληροφορίας που παρέχεται από έναν έλεγχο T σε ένα κόμβο που αποτελείται από N παραδείγματα μάθησης, επιτυγχάνεται με τη μείωση της εντροπίας του υποσυνόλου μάθησης, σύμφωνα με τη σχέση:

$$I(E_n; T) = H_c(E_n) - H_c(E_n | T)$$
(5.19)

Ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$0 \le H_c(E_n | T) \le H_c(E_n) \Leftrightarrow 0 \le I(E_n; T) \le H_c(E_n)$$
(5.20)

Στην πράξη, αντί της απευθείας χρησιμοποίησης της ποσότητας πληροφορίας, προτιμάται η κανονικοποίησή της, προκειμένου να προκύψουν τιμές που να ανήκουν στο διάστημα [0,1]. Με τον τρόπο αυτό, ποσότητες πληροφορίας που αποκτώνται σε διαφορετικούς κόμβους ενός δένδρου, ή με διάφορες ταξινομήσεις, μπορούν να συγκριθούν. Το κανονικοποιημένο κέρδος πληροφορίας ορίζεται ως εξής:

$$C(E_n;T) = \frac{2I(E_n;T)}{H_c(E_n) + H_T(E_n)} \in [0,1]$$
(5.21)

5.3.2.6. Κριτήριο διακοπής διαχωρισμού

Ο ορισμός ενός κατάλληλου κριτηρίου διακοπής διαχωρισμού είναι πολύ σημαντικός διότι το κριτήριο αυτό είναι υπεύθυνο για τη διατήρηση μίας ισορροπίας ανάμεσα στην αξιοπιστία (ικανότητα ταξινόμησης άγνωστων αντικειμένων) και στην πολυπλοκότητα (αριθμός κόμβων) του δένδρου απόφασης. Προκειμένου τα δένδρα να έχουν καλή αξιοπιστία πρέπει να αναπτυχθούν με ένα μεγάλο αριθμό κόμβων. Όμως η στρατηγική αυτή οδηγεί στη δημιουργία πολύπλοκων δένδρων, όπου οι περισσότεροι κόμβοι αποτελούνται από τυχαίους διαχωρισμούς οι οποίοι είναι πολύ δύσκολο να ερμηνευθούν. Έτσι είναι επιτακτική η ανάγκη για μία διαδικασία ικανή να διακρίνει τους τυχαίους διαχωρισμούς από τους διαχωρισμούς που συνδέονται στενά με την ταξινόμηση. Για το λόγο αυτό έχει προταθεί η μέθοδος του ελέγχου υπόθεσης (hypothesis testing), με σκοπό την αναγνώριση των περιπτώσεων όπου η μείωση της εντροπίας λόγω ενός ελέγχου είναι πράγματι σημαντική [233]. Η διαδικασία του ελέγχου υπόθεσης έχει επίσης προταθεί για το χειρισμό των ιδιοτήτων με θόρυβο και των ταξινομήσεων με θόρυβο [234].

Η διαδικασία διακοπής διαχωρισμού αποφασίζει αν ένας κόμβος πρέπει να διαχωριστεί περαιτέρω ή αν είναι τερματικός κόμβος. Αν τα παραδείγματα του υποσυνόλου μάθησης ανήκουν σχεδόν ολοκληρωτικά σε μία από τις κλάσεις, τότε ο κόμβος είναι φύλλο (LEAF). Ο έλεγχος αν τα παραδείγματα ανήκουν σχεδόν αποκλειστικά σε μία κλάση γίνεται με τη βοήθεια της προγενέστερης εντροπίας ταξινόμησης $H_c(E_n)$ καθώς και μίας προκαθορισμένης τιμής κατωφλίου, έστω H_{min} , για την εντροπία. Έτσι, λοιπόν, σε κάθε κόμβο εφαρμόζεται ο ακόλουθος έλεγχος :

$$H_c(E_n) < H_{min} \tag{5.22}$$

Εάν η σχέση (5.22) επαληθεύεται, τότε ο κόμβος χαρακτηρίζεται ΦΥΛΛΟ (LEAF). Αλλιώς, εφαρμόζεται ο έλεγχος υπόθεσης για να διαπιστωθεί αν ο κόμβος πρέπει να διαχωριστεί ή αν είναι αδιέξοδος.

Για τον προσδιορισμό του βέλτιστου κριτηρίου διαχωρισμού, χρησιμοποιείται ως κριτήριο διακοπής διαχωρισμού το αποκαλούμενο στατιστικό μέτρο G [235]. Αποδεικνύεται ότι κάτω από την υπόθεση της στατιστικής ανεξαρτησίας του ελέγχου και της επιθυμητής ταξινόμησης, η κατανομή του δείγματος της ακόλουθης ποσότητας:

$$G^{2} = \hat{A} = 2N \ln 2I(E_{n};T)$$
 (5.23)

η οποία είναι ευθέως ανάλογη με τη συνολική πληροφορία που παρέχεται από τον έλεγχο, ακολουθεί κατανομή X^2 με (m-l)(p-l) βαθμούς ελευθερίας, όπου το m συμβολίζει τον αριθμό των κλάσεων και το p τον αριθμό των απογόνων κόμβων κάθε κόμβου ελέγχου. Έτσι, αν εκ των προτέρων καθοριστεί μία τιμή a για το ρίσκο της μη ανίχνευσης της υπόθεσης ανεξαρτησίας, υπολογίζεται, με χρήση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της \hat{A} , η τιμή κατωφλίου \hat{A}_{cr} έτσι ώστε $\operatorname{Prob}(A > \hat{A}_{cr}) = a$. Αν ισχύει $A > \hat{A}_{cr}$, απορρίπτεται η υπόθεση της στατιστικής ανεξαρτησίας και διαχωριζεται ο κόμβος, ενώ διαφορετικά ($A \leq \hat{A}_{cr}$) σταματάει ο διαχωρισμός και ο κόμβος είναι αδιέξοδος (deadend). Κατά συνέπεια, το κριτήριο διακοπής διαχωρισμού διατυπώνεται ως εξής:

$$G^{2} = \hat{A} = 2N \ln 2I(E_{n};T) \le \hat{A}_{cr}$$
 (5.24)

Εάν η σχέση (5.24) επαληθεύεται τότε ο κόμβος χαρακτηρίζεται ως ΑΔΙΕΞΟΔΟΣ (DEADEND).

Θεωρώντας m=2 κλάσεις και p=2 απογόνους κόμβους, τότε η κατανομή X^2 έχει ένα βαθμό ελευθερίας. Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται η X^2 συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της \hat{A} με ένα βαθμό ελευθερίας και υπολογίζεται γραφικά η τιμή κατωφλίου \hat{A}_{cr} για μία δοσμένη τιμή ρίσκου α. Οι

τιμές που μπορεί να πάρει το α είναι μεταξύ 0 και 1.

Η επιλογή μιας μεγάλης τιμής ρίσκου, όπως a = 1.0, θα οδηγεί στη συστηματική απόρριψη της υπόθεσης ανεξαρτησίας, και τη θεώρηση ως σημαντική ακόμα και της πιο μικρής αύξησης της πληροφορίας. Αυτό θα οδηγήσει στην πλήρη ανάπτυξη των δένδρων, διαχωρίζοντας πλήρως τα παραδείγματα μάθησης των διαφορετικών κλάσεων. Από την άλλη μεριά, η χρήση μίας υπερβολικά μικρής τιμής για το a θα οδηγήσει στην ανάπτυξη μόνο των κόμβων που δίνουν μία πολύ μεγάλη αύξηση στη πληροφορία, και έτσι θα δημιουργήσει υπερβολικά απλά δένδρα με πιθανόν μεγάλο βαθμό αστοχίας σε νέα παραδείγματα.

Η τιμή της παραμέτρου α επιδρά δραστικά στην ανάπτυξη του δένδρου. Απαιτούνται αρκετές δοκιμές για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τιμής του α , η οποία οδηγεί σε κατασκευή δένδρων με μικρή πολυπλοκότητα και μεγάλη ακρίβεια.

Συνοψίζοντας, το κριτήριο διακοπής διαχωρισμού αποφασίζει για το διαχωρισμό ή όχι ενός κόμβου με την παρακάτω λογική:

- Αν τα παραδείγματα του υποσυνόλου μάθησης ενός κόμβου ανήκουν σχεδόν αποκλειστικά σε μία κλάση, δηλ. επαληθεύεται η σχέση (5.22), τότε ο κόμβος είναι ΦΥΛΛΟ (LEAF).
- Αλλιώς,
 - αν ο κόμβος δεν μπορεί να διαχωριστεί με ένα στατιστικά σημαντικό τρόπο δηλ. επαληθεύεται η σχέση (5.24), τότε ο κόμβος είναι αδιέξοδος (DEADEND).
 - Αν δεν επαληθεύεται η σχέση (5.24), δηλ. ισχύει $A > \hat{A}_{cr}$, τότε ο κόμβος διαχωρίζεται σε *p* απογόνους.

5.3.2.7. Παράμετροι

Οι παράμετροι, οι οποίες εμπλέκονται στην κατασκευή των δένδρων απόφασης, είναι οι εξής:

- Το επίπεδο ρίσκου, α, και
- η ελάχιστη τιμή της εντροπίας, H_{min}, κάτω από την οποία ένας κόμβος είναι ΦΥΛΛΟ (LEAF).

Οι τιμές των παραμέτρων αυτών ορίζονται πριν από την έναρξη της διαδικασίας κατασκευής του δένδρου απόφασης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.7: X^2 συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της \hat{A} με ένα βαθμό ελευθερίας.

Η επιλογή του επιπέδου ρίσκου επηρεάζει πολύ περισσότερο τη μορφή του δένδρου, από ότι η ελάχιστη τιμή της εντροπίας.

5.3.2.8. Εκτίμηση απόδοσης δένδρου απόφασης

Η ακρίβεια και η αξιοπιστία ενός δένδρου απόφασης ελέγχεται χρησιμοποιώντας το ανεξάρτητο σύνολο ελέγχου, το οποίο αποτελείται από προταξινομημένα αντικείμενα, διαφορετικά από εκείνα του συνόλου μάθησης.

Η διαδικασία εκτίμησης της απόδοσης του δένδρου απόφασης γίνεται ως εξής: τα αντικείμενα του συνόλου ελέγχου ταξινομούνται ξανά σε κλάσεις από το δένδρο απόφασης και τα εκ των υστέρων (*a posteriori*) αποτελέσματα της ταξινόμησης συγκρίνονται με την εκ των προτέρων (*a priori*) ταξινόμηση των αντικειμένων, προκειμένου να υπολογιστούν τα ποσοστά επιτυχίας και λάθους.

Το πιο σημαντικό μέτρο της αξιοπιστίας και της απόδοσης ενός δένδρου απόφασης είναι το ποσοστό επιτυχίας (success rate), το οποίο ορίζεται ως ο λόγος των επιτυχώς ταξινομημένων αντικειμένων προς το συνολικό αριθμό των αντικειμένων που εξετάστηκαν:

Ποσοστό επιτυχίας =
$$\frac{a \rho. αντικειμένων που ταζινομήθηκαν επιτυχώς}{Συνολικός αριθμός αντικειμένων στο σύνολο ελέγχου}$$
(5.25)

Για ταξινόμηση δύο κλάσεων (ασφαλή/μη ασφαλή) μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ δύο τύπων λαθών (errors) και να οριστούν το ποσοστό εσφαλμένων προειδοποιήσεων (false alarm rate) και το ποσοστό αποτυχημένων προειδοποιήσεων (missed alarm rate), ως εξής:

Ποσοστό εσφαλμένων προειδοποιήσεων =
$$\frac{a \rho. a σφαλών αντικειμένων που ταζινομήθηκαν ως μη ασφαλή}{Συνολικός αριθμός ασφαλών αντικειμένων στο σύνολο ελέγχου}$$
(5.26)

 $Ποσοστό αποτυχημένων προειδοποιήσεων = \frac{αρ. μη αυφωλών αντικειμένων που τωζινομησηπάν ως αυφωλη (5.27)$

Ορίζεται, επίσης, το ποσοστό συνολικού λάθους (global error) ως εξής:

Ποσοστό συνολικού λάθους =
$$1$$
 - ποσοστό επιτυχίας (5.28)

5.3.3. Προτεινόμενη μεθοδολογία και εφαρμογή της στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα

Η βασική ιδέα για την εφαρμογή των δένδρων απόφασης στην εύρεση των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς είναι να βρεθεί ένα σύνολο ελέγχων (κανόνων) σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, με το οποίο να αναδεικνύονται οι πιο κρίσιμες γραμμές για αντιστάθμιση σειράς και το βέλτιστο ποσοστό αντιστάθμισής τους βελτιώνοντας την ευστάθεια τάσης του συστήματος.

Πιο συγκεκριμένα, προσαρμόζοντας το παραπάνω πρόβλημα στον τρόπο ανάπτυξης των δένδρων απόφασης (ΔΑ), ο στόχος είναι η εύρεση των κρίσιμων γραμμών και του βέλτιστου ποσοστού αντιστάθμισής τους σε συνθήκες οριακής φόρτισης του συστήματος, έτσι ώστε ένας αριθμός μη ασφαλών σημείων λειτουργίας (ΣΛ) να γίνουν ασφαλή.

Για τη δημιουργία των βέλτιστων δένδρων, επιλέγεται, η διερεύνηση αυτή να γίνει σε σημείο κοντά στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος (σημεία Β και Α αντίστοιχα στο Σχήμα 5.8) και να εξεταστούν κρίσιμες (*N-1*) διαταραχές του συστήματος.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα με στοιχεία που

δόθηκαν από το ΔΕΣΜΗΕ για την τοπολογία του συστήματος με χρονικό ορίζοντα το 2004 [236]. Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος παραγωγής-μεταφοράς.

Στο μοντέλο του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος δεν περιλαμβάνονται οι πυκνωτές 150 kV που είχε προβλεφθεί να εγκατασταθούν στα KYT Αχαρνών, Αγ. Στεφάνου, Παλλήνης και Αργυρούπολης συνολικής αέργου ισχύος 150 MVAr. Επίσης, δεν περιλαμβάνονται τα έργα επέκτασης του δικτύου 400 kV στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη (KYT Νέας Σάντας και αντίστοιχες γραμμές) καθώς και οι δύο γραμμές 400 kV που θα συνδέονταν στο KYT Αργυρούπολης. Προκειμένου να επιτευχθεί οριακή φόρτιση του συστήματος, για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή, πραγματοποιήθηκαν επαναληπτικά ροές φορτίου με σταδιακή αύξηση του φορτίου σε όλους τους ζυγούς (εκτός από τους μεγάλους βιομηχανικούς πελάτες) στο πρόγραμμα EUROSTAG [237].

5.3.3.1. Δημιουργία των συνόλων μάθησης και ελέγχου

Για κάθε διαταραχή που εξετάζεται δημιουργείται και μια διαφορετική βάση γνώσης ως εξής:

- Αύξηση του φορτίου όλων των ζυγών (εκτός των μεγάλων βιομηχανικών πελατών) σε οριακές τιμές κοντά στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.
- Αντιστάθμιση σειράς διαδοχικά όλων των γραμμές 400 και 150 kV (έστω N) με βήμα αντιστάθμισης α% έως ένα μέγιστο ποσοστό αντιστάθμισης π%.
- Για κάθε γραμμή μεταφοράς και κάθε βήμα αντιστάθμισής της, μεταβάλλεται το φορτίο όλων των ζυγών (εκτός των βιομηχανικών) τυχαία, μέσω γεννήτριας τυχαίων αριθμών, κατά ±3% για n_{max} φορές. Σε καθεμιά μεταβολή εκτελείται υπολογισμός της ροής φορτίου, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα σημείο λειτουργίας (ΣΛ).

Με την παραπάνω διαδικασία δημιουργείται μια βάση γνώσης, της οποίας ο συνολικός αριθμός ΣΛ είναι ίσος με $N \times \frac{\Pi}{\alpha} \times n_{max}$. Από αυτά το 70% περίπου χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του συνόλου μάθησης και το 30% για τη δημιουργία του συνόλου ελέγχου.

Ο αλγόριθμος δημιουργίας της βάσης γνώσης για κάθε διαταραχή παριστάνεται σχηματικά στο Σχήμα 5.10 [238].

5.3.3.2. Εφαρμογή κριτηρίου ταξινόμησης σε κλάσεις

Τα σημεία λειτουργίας ταξινομούνται σε δύο κλάσεις (ασφαλή / μη ασφαλή) με κριτήριο τη σύγκλιση ή όχι της ροής φορτίου και την ικανοποίηση όλων των τεχνικών περιορισμών (τάσεις ζυγών εντός επιτρεπτών ορίων, διατήρηση του ρεύματος γραμμών κάτω από το θερμικό τους όριο κλπ). Πιο συγκεκριμένα, ένα σημείο λειτουργίας χαρακτηρίζεται ως ασφαλές (safe) εάν έχει συγκλίνει η ροή φορτίου και ικανοποιούνται όλοι οι τεχνικοί περιορισμοί για τη συγκεκριμένη τοπολογία δικτύου (δηλ. δεν εμφανίζονται υπερφορτίσεις γραμμών, οι τάσεις βρίσκονται σε επιτρεπτά επίπεδα κλπ), αλλιώς χαρακτηρίζεται ως μη ασφαλές (unsafe). Προκειμένου να έχουμε έναν καλό διαχωρισμό, τα δένδρα αποφάσεων υλοποιήθηκαν γύρω από ένα οριακό σημείο φόρτισης του δικτύου με συνολικό ενεργό φορτίο ίσο με 10332 MW.



Σχήμα 5.8: Απεικόνιση σε *P-V* καμπύλη του σημείου δημιουργίας του συνόλου μάθησης.



- Υποσταθμός
- 📼 Θερμικός Σταθμός παραγωγής
- Υδροηλεκτρικός Σταθμός παραγωγής
- 150 kV γραμμή απλού κυκλώματος με έναν αγωγό ανά φάση
- 150 kV γραμμή διπλού κυκλώματος με έναν αγωγό ανά φάση
- 400 kV γραμμή διπλού κυκλώματος με δύο αγωγούς ανά φάση
- 400 kV γραμμή απλού κυκλώματος με τρεις αγωγούς ανά φάση
- ---- Γραμμή διασύνδεσης

Σχήμα 5.9: Απλοποιημένο διάγραμμα του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος παραγωγής-μεταφοράς.



Σχήμα 5.10: Αλγόριθμος δημιουργίας της βάσης γνώσης για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή.

5.3.3.3. Επιλογή αρχικών υποψήφιων ιδιοτήτων

Οι υποψήφιες γραμμές που επιλέγονται αρχικά είναι η επαγωγική αντίδραση όλων των γραμμών μεταφοράς 150 και 400 kV, η συνολική ενεργός και άεργος ισχύς του συστήματος, η ενεργός και άεργος ισχύς των οκτώ γεωγραφικών περιοχών της χώρας (Ανατ. Μακεδονία-Θράκη, Δυτ. Μακεδονία, Θεσσαλία, Αν. Στερεά Ελλάδα-Εύβοια, Αττική, Πελοπόννησος, Δυτ. Στερεά Ελλάδα και Ηπειρος-Επτάνησα) καθώς και η τάση σε κρίσιμους ζυγούς του συστήματος, οι οποίοι είτε βρίσκονται σε απομακρυσμένα και ακτινικά σημεία του δικτύου (όπως Υ/Σ Κασσάνδρας, Μολάων, Αστρους), σε κρίσιμες περιοχές, όπως η Αττική (Υ/Σ Ρούφ, Ψυχικού) ή βιομηχανικά φορτία (Υ/Σ Sovel-Τσιγγέλι).

Μετά τη δημιουργία πολλών δένδρων αποφάσεως, παρατηρείται ότι μόνο οι γραμμές 400 kV εμφανίζονται στους κόμβους ελέγχου των δένδρων αποφάσεως, οπότε και επιλέγονται ως υποψήφιες ιδιότητες. Όπως ήδη αναφέρθηκε, δεν συμπεριλαμβάνονται οι δύο γραμμές 400 kV που προβλεπόταν να συνδεθούν στο ΚΥΤ Αργυρούπολης, οι γραμμές που θα συνδεθούν στο μελλοντικό ΚΥΤ Ν. Σάντα καθώς και οι γραμμές ΚΥΤ Θεσ/κης – ΚΥΤ Λαγκαδά και ΚΥΤ Αμυνταίου – ΚΥΤ Φλώρινας λόγω του μικρού μήκους τους. Δηλαδή, οι υποψήφιες γραμμές μεταφοράς είναι είκοσι (20).

Συνολικά, λοιπόν, οι αρχικές ιδιότητες που χρησιμοποιούνται αρχικά στην ανάπτυξη των δένδρων απόφασης είναι συνολικά 44 και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Στο επόμενο κεφάλαιο, κατά την παρουσίαση των δένδρων απόφασης που αναπτύχθηκαν, προκύπτουν οι τελικές ιδιότητες, οι οποίες επιλέγονται τελικά από την παρούσα μεθοδολογία. Σημειώνεται ότι η αρίθμηση των γραμμών ΙΙ-ΙΙΟ στον Πίνακα 5.1 απεικονίζεται με την ίδια αντιστοιχία και στο Σχήμα 5.9, προκειμένου να είναι εύκολα αντιληπτά τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

5.3.3.4. Εξεταζόμενες (N-1) διαταραχές

Οι διαταραχές που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή είναι οι (N-1) διαταραχές του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Στις διαταραχές αυτές περιλαμβάνονται η απώλεια κρίσιμων για την ευστάθεια του συστήματος μονάδων που βρίσκονται στο νότιο σύστημα (μονάδες στην περιοχή της Αθήνας, μονάδα στον ΑΗΣ Μεγαλόπολης), καθώς και η απώλεια μιας από τις τρεις γραμμές 400 kV μεταξύ Βορρά-Νότου και συγκεκριμένα της γραμμής KYT Καρδιάς – KYT Τρικάλων.

5.3.4. Σχολιασμός των δημιουργηθέντων δένδρων απόφασης

5.3.4.1. Απώλεια μονάδας συνδυασμένου κύκλου (CC) ΛΑΥΡΙΟΥ

Με βάση τον αλγόριθμο, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10, για είκοσι (N=20) γραμμές μεταφοράς με αντιστάθμιση σε βήματα των a=5% έως $\pi=50\%$ και με μεταβολή του φορτίου κατά $\pm 3\%$ για n_{max} =14 φορές, προκύπτει ένα σύνολο 2800 σημείων λειτουργίας. Από αυτά τα 2000 χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του συνόλου μάθησης (ποσοστό περίπου 70%), ενώ με τα υπόλοιπα κατασκευάζεται το σύνολο ελέγχου.

Χρησιμοποιώντας το κριτήριο ταξινόμησης σε κλάσεις που αναφέρεται στην προηγούμενη παράγραφο και τις υποψήφιες 44 ιδιότητες του Πίνακα 5.1, προκύπτει το δένδρο απόφασης (1.α) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.11. Το δένδρο αυτό κατασκευάστηκε με συνολικό φορτίο συστήματος 10300 MW, δηλ. με μείωση της τάξης του 0,30% ως προς το σημείο των 10332 MW.

Είδος	A/A Istórnago	Συμβολισμός	Περιγραφόμενο στοιχείο δικτύου
τοιστητάς	101011110S		ΚΥΤ Δάρισας - ΚΥΤ Δάρουνας (διπλή γραμμή)
	11	X1 X2	ΚΥΤ Αγ Δημητοίου - ΚΥΤ Δάρισας
	12	X2 X3	ΚΥΤ Καοδιάς - ΚΥΤ Λάρισας
>	13	XA XA	ΚΥΤ Καρδιάς - ΚΥΤ Τοικάλων
) k	14	X4 X5	ΚΥΤ Καρυανδούρου ΚΥΤ Διστόμου
40(15	X6	ΚΥΤ Δάσμυνας - ΚΥΤ Διστομού
ΰv	10	X0 X7	KVT Topkálov - KVT Algatóuon
ntn	17	X7 X8	$KVT \Delta 1076 \mu cm - KVT \Delta 1010 \mu cm$
ba	10	X0 X0	ΚΥΤ Διοτομού - ΚΥΤ Αχελώου
μλ	I 10	X10	$KVT A \gamma \alpha \alpha \nu \omega \nu = KVT K \alpha \nu \alpha \nu \omega \nu \delta \alpha \omega \alpha \nu$
000	I 10	X10 X11	ΚΥΤ Αμινταίου - ΚΥΤ Καοδιάς
ίδρ	I 12	X11 X12	$KVT \Delta \alpha muvac - KVT \Delta \alpha \tau \delta m m$
UVT	I 12 I 13	X12 X13	ΚΥΤ Παλλήνης - ΚΥΤ Δαυσίου
ર્વા વ	I 13	X13 X14	$KVT \Theta s \sigma \sigma \alpha \lambda o v i \kappa n c - KVT A v Anuntoi o v$
nha	I 14	X14 X15	ΚΥΤ Αγελώου - ΚΥΤ Αράγθου
ιλα	I 15	X15	ΚΥΤ Αγαργών - ΚΥΤ Αγ Στεφάνου
Ξπο	I 10	X10 X17	ΚΥΤ Λανκαδά - ΚΥΤ Διυνταίου
	I 18	X17	ΚΥΤ Αν Δημητοίου - ΚΥΤ Καοδιάς
	I 10	X10	ΚΥΤ Φιλίππων - ΚΥΤ Λαγκαδά
	1 20	X1) X20	ΚΥΤ Δάσυμνας - ΚΥΤ Αγ Στεφάνου
	I 20	Psyst	Συστήματος
	121	P1	Ανατ Μακεδονίας-Θοάκης
ý	I 23	P2	Δυτ. Μακεδονίας
ولا	I 24	P3	Θεσσαλίας
ύ ς]	I 25	P4	Ανατ. Στερεάς-Εύβοιας
ργα	I 26	P5	Αττικής
Eve	I 27	P6	Πελοποννήσου
	I 28	P7	Δυτ. Ελλάδας
	I 29	P8	Ηπείρου-Επτανήσων
	I 30	Qsyst	Συστήματος
	I 31	Q1	Ανατ. Μακεδονίας-Θράκης
Ûζ	I 32	Q2	Δυτ. Μακεδονίας
ولا	I 33	Q3	Θεσσαλίας
ος I	I 34	Q4	Ανατ. Στερεάς-Εύβοιας
bγq	I 35	Q5	Αττικής
Ч£	I 36	Q6	Πελοποννήσου
	I 37	Q7	Δυτ. Ελλάδας
	I 38	Q8	Ηπείρου-Επτανήσων
ζÓ	I 39	V1	Υ/Σ Κασσάνδρας
ζoγ	I 40	V2	Υ/Σ Sovel (Τσιγγέλι)
k k	I 41	V3	Υ/Σ Ρούφ
1 a 150	I 42	V4	Υ/Σ Ψυχικού
ູ້ແດ	I 43	V5	Υ/Σ Άστρους
E	I 44	V6	Υ/Σ Μολάων

Πίνακας 5.1:	Υποψήφιες ιδιότητες	στην ανάπτυξη τ	ων δένδρων	απόφασης.
			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	

A/A å	διαταραχής	Είδος διαταραχής
	1	Απώλεια μονάδας συνδυασμένου κύκλου ΛΑΥΡΙΟΥ (470 MW)
	2	Απώλεια μονάδας ΙΙ ΛΑΥΡΙΟΥ (290 MW)
	3	Απώλεια μονάδας ΙΧ (μεγάλης) ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ (200 MW)
	4	Απώλεια μονάδας VIII (μικρής) ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ(160 MW)
	5	Απώλεια μονάδας ΙV ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ (290 MW)
	6	Απώλεια γραμμής 400kV ΚΥΤ Καρδιάς - ΚΥΤ Τρικάλων

Πίνακας 5.2: Εξεταζόμενες διαταραχές.

Σε όλους τους κόμβους του δένδρου εμφανίζονται ο αριθμός του κόμβου, ο αριθμός των σημείων λειτουργίας που ανήκουν στον κόμβο και ο δείκτης ασφάλειας του κόμβου (*safety index*), ο οποίος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

δείκτης ασφαλείας =
$$\frac{a \rho. a σφαλών αντικειμένων στο σύνολο μάθησης}{\Sigma υνολικός αριθμός αντικειμένων στο σύνολο μάθησης}$$
 (5.29)

Στους τερματικούς κόμβους δίνεται ο τύπος του κόμβου (φύλλο ή αδιέξοδος), ενώ στους ενδιάμεσους δίνεται ο βέλτιστος έλεγχος διαχωρισμού που εφαρμόζεται.

Παρατηρείται ότι στον κύριο κορμό του δένδρου (δηλαδή στους κόμβους με τον κύριο όγκο των ΣΛ), ως βέλτιστος έλεγχος διαχωρισμού επιλέγεται ένας έλεγχος που αφορά στην επαγωγική αντίδραση μιας γραμμής μεταφοράς. Ο έλεγχος αυτός έχει την ακόλουθη μορφή:

$$X_i < k_i \tag{5.30}$$

όπου $k_i = 1$ α.μ. εάν η γραμμή *i* δεν είναι αντισταθμισμένη σειριακά και $k_i < 1$ εάν εγκατασταθεί αντιστάθμιση σειράς ίση με $(1-k_i)$ α.μ.

Κατά συνέπεια, η ερμηνεία του παραπάνω ελέγχου είναι η εξής:

Eάν το ποσοστό αντιστάθμισης της γραμμής $i \ge (1-k_i) \cdot 100\%$ (5.31)

Εάν η σχέση (5.30) είναι αληθής (κλάδος Ύ) τότε σχηματίζεται είτε ΦΥΛΛΟ (LEAF) είτε ΑΔΙΕΞΟΔΟ (DEADEND) (φύλλο σχηματίζεται εάν ο δείκτης ασφάλειας του κόμβου είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 0.95). Εάν η σχέση (5.30) δεν είναι αληθής (κλάδος 'N') τότε εφαρμόζεται ένας νέος έλεγχος διαχωρισμού, ο οποίος σχετίζεται με τις άλλες υποψήφιες ιδιότητες (όπως η επαγωγική αντίδραση άλλης γραμμής, η τάση κρίσιμων ζυγών, η άεργος ισχύς περιοχής).

Στην περίπτωση ελέγχου διαχωρισμού ως προς την επαγωγική αντίδραση γραμμής (κόμβοι 1,3,5,7,11,15,19,21,23,25), ο σχηματισμός ΦΥΛΛΟΥ (κόμβοι 2,4,14) από τον έλεγχο με δείκτη ασφάλειας τουλάχιστον 0.95, σημαίνει ότι τα ΣΛ των κόμβων αυτών γίνονται ασφαλή εάν υλοποιηθεί το ποσοστό αντιστάθμισης που προτείνει ο έλεγχος. Με τον τρόπο αυτό **έχει βρεθεί το ελάχιστο** ποσοστό αντιστάθμισης της γραμμής το οποίο οδηγεί στο μέγιστο αριθμό ασφαλών ΣΛ. Στην περίπτωση σχηματισμού ΑΔΙΕΞΟΔΟΥ (κόμβοι 18,20,22,24), τότε το ποσοστό αντιστάθμισης που προτείνει α διαχωρίσει με έναν ξεκάθαρο τρόπο το υποσύνολο ΣΛ του κόμβου αυτού. Με ένα μικρότερο βήμα αντιστάθμισης αυτό πιθανότατα να ήταν εφικτό για κόμβους με σχετικά μεγάλο δείκτη ασφάλειας (π.χ. 0.90).

Από τη βασική θεωρία του βέλτιστου κριτηρίου διαχωρισμού προκύπτει ότι όσο πιο κοντά προς τον κόμβο-ρίζα ένας έλεγχος βρίσκεται τόσο καλύτερα μπορεί να διαχωρίσει το σύνολο μάθησης. Κατά συνέπεια, με τη μεθοδολογία αυτή βρίσκονται οι πιο κρίσιμες γραμμές για αντιστάθμιση σειράς και είναι αυτές που εμφανίζονται σε κόμβους ελέγχου κοντά στη ρίζα του δένδρου και δίνουν ΦΥΛΛΑ. Όσο πιο κοντά είναι ο κόμβος ελέγχου που τις αναφέρει στον κόμβο-ρίζα τόσο πιο πολλά

ασφαλή ΣΛ δίνει η αντιστάθμισή τους.

Στην περίπτωση ελέγχου διαχωρισμού ως προς τις άλλες υποψήφιες ιδιότητες (κόμβοι 6,10,12), αυτός μπορεί να δώσει ΦΥΛΛΑ (κόμβοι 9,13,17), ΑΔΙΕΞΟΔΑ (κόμβος 8,16) ή νέους ελέγχους διαχωρισμού (κόμβος 12). Τα αποτελέσματα των ελέγχων αυτών στο Σχήμα 5.11 είναι σκιαγραφημένα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, με τον τρόπο που έχει δημιουργηθεί το σύνολο μάθησης, το δένδρο απόφασης ελέγχει την αντιστάθμιση σειράς μόνο μίας γραμμής κι όχι το συνδυασμό δύο ή περισσοτέρων αντισταθμίσεων. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να υλοποιηθεί, όμως θεωρήθηκε εξωπραγματικό για το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα.

Από το δένδρο απόφασης (1.α) του Σχήματος 5.11 μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:



Σχήμα 5.11: Δένδρο απόφασης **(1.α)**. Απώλεια μονάδας CC Λαυρίου. Σημείο δημιουργίας (10332 – 0,30%) MW. 44 ιδιότητες (20 γραμμές, ενεργός και άεργος ισχύς συστήματος και περιοχών, τάσεις κρίσιμων ζυγών).

α) Εάν η γραμμή 3 (ΚΥΤ Καρδιάς-ΚΥΤ Λάρισας) αντισταθμιστεί σε ποσοστό τουλάχιστον 20%, τότε διαχωρίζονται 70 ΣΛ με δείκτη ασφάλειας 0.9571. Ακριβέστερα, προκύπτουν 67 ασφαλή ΣΛ (ποσοστό 3.35% του συνόλου των ΣΛ).

β) Εάν η γραμμή 2 (ΚΥΤ Αγ. Δημητρίου-ΚΥΤ Λάρισας) αντισταθμιστεί σε ποσοστό τουλάχιστον 25%, τότε διαχωρίζονται 60 ΣΛ με δείκτη ασφάλειας 0.9833. Ακριβέστερα, προκύπτουν 59 ασφαλή ΣΛ (ποσοστό 2.95% του συνόλου των ΣΛ).

γ) Αν αντισταθμιστεί η γραμμή 4 (ΚΥΤ Καρδιάς-ΚΥΤ Τρικάλων) σε ποσοστό τουλάχιστον 30% και η τάση στο ζυγό 150kV του Υ/Σ Κασσάνδρας είναι μεγαλύτερη από 140.18kV, τότε διαχωρίζονται 45 ΣΛ με δείκτη ασφάλειας 0.9778. Ακριβέστερα, προκύπτουν 44 ασφαλή ΣΛ (ποσοστό 2.2% του συνόλου των ΣΛ).

δ)Αν αντισταθμιστεί η γραμμή 7 (ΚΥΤ Τρικάλων-ΚΥΤ Διστόμου) σε ποσοστό τουλάχιστον 30%, η άεργος ισχύς της Πελοποννήσου είναι μικρότερη από 653.66 MVAr και η τάση στο ζυγό 150 kV του Υ/Σ Κασσάνδρας είναι μεγαλύτερη από 140.65 kV, τότε διαχωρίζονται 42 ΣΛ με δείκτη ασφάλειας 1.00 (ποσοστό 2.1% του συνόλου των ΣΛ).

ε) Αν αντισταθμιστεί η γραμμή 1 (ΚΥΤ Λάρισας-ΚΥΤ Λάρυμνας) σε ποσοστό τουλάχιστον 40%, τότε διαχωρίζονται 30 ΣΛ με δείκτη ασφάλειας 1.00 (ποσοστό 1.5% του συνόλου των ΣΛ).

στ) Οι υπόλοιποι κόμβοι ελέγχου (15,19,21 και 23) δεν μπορούν να δώσουν καλούς διαχωρισμούς. Αυτό ίσως να ήταν εφικτό εάν λαμβανόταν μικρότερο βήμα αντιστάθμισης των υποψηφίων γραμμών (π.χ. 1%), οπότε θα μπορούσαν να προκύψουν ΦΥΛΛΑ.

ζ) Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο έλεγχος του κόμβου 23 σε σχέση με τον κόμβο 11, γιατί δείχνει τον τρόπο με τον οποίο προκύπτει το βέλτιστο ποσοστό αντιστάθμισης. Πιο συγκεκριμένα, αφού έχει γίνει ο έλεγχος του κόμβου 11 που αφορά αντιστάθμιση της γραμμής 1 σε ποσοστό τουλάχιστον 40%, επανέρχεται στον κόμβο 23 ο έλεγχος της ίδιας γραμμής με μικρότερο ποσοστό αντιστάθμισης προκειμένου να ελεγχθεί εάν αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ένα σαφή διαχωρισμό. Με παρόμοιο τρόπο ελέγχονται όλα τα ποσοστά αντιστάθμισης των γραμμών.

η) Από τον τελευταίο κόμβο 25 προκύπτει ότι αν δεν αντισταθμιστεί καμιά από τις γραμμές που εμφανίζονται στους κόμβους ελέγχου του δέντρου με το προτεινόμενο ποσοστό αντιστάθμιση σειράς, τότε απομένουν 1650 ΣΛ με δείκτη ασφάλειας 0.0303 και πιο συγκεκριμένα 50 ΣΛ είναι ασφαλή, ενώ τα υπόλοιπα 1600 ΣΛ είναι μη ασφαλή.

θ) Συμπερασματικά, από το αναπτυχθέν δένδρο απόφασης (1.α) προκύπτει ότι οι κρίσιμες γραμμές για την εξεταζόμενη διαταραχή στα 10330 MW είναι οι γραμμές 3,2,4,7 και 1 (κατά φθίνουσα σειρά κρισιμότητας) με ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισης σειράς 20%, 25%, 30%, 30% και 30% αντίστοιχα.

Όπως σημειώθηκε και πιο πριν, τα κριτήρια διαχωρισμού, που αναφέρονται σε άλλες ιδιότητες εκτός των επαγωγικών αντιδράσεων των γραμμών, εφαρμόζονται σε κόμβους με μικρό αριθμό ΣΛ, χωρίς να προκαλούν κάποιο σημαντικό διαχωρισμό στο σύνολο μάθησης. Οι έλεγχοι αυτοί είναι μεν σημαντικοί για την εύρεση των κρίσιμων παραμέτρων του συστήματος σε τέτοιες οριακές συνθήκες καθώς και για τον καθορισμό των τιμών κατωφλίου αυτών των παραμέτρων, όμως δεν συμβάλλουν σημαντικά στο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης θέσης και ποσοστού αντιστάθμισης των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των ιδιοτήτων αυτών στην ποιότητα των δένδρων και στην πληροφορία που παρέχουν, δημιουργούνται τα δένδρα απόφασης (1.β)(Σχήμα 5.12) όπου αγνοούνται οι τάσεις των κρίσιμων ζυγών, δηλ. λαμβάνονται υπόψη 38 ιδιότητες (I1-I38 του Πίνακα 5.1) και το δένδρο (1.γ) (Σχήμα 5.13) όπου επιπρόσθετα αγνοούνται και η ενεργός και άεργος ισχύς των περιοχών, δηλαδή λαμβάνονται υπόψη μόνο 22 ιδιότητες (ιδιότητες I1-I21 και I30 του Πίνακα 5.1) [238].

Παρατηρώντας τα δένδρα απόφασης (1.β) και (1.γ) και συγκρίνοντάς τα με το δένδρο απόφασης (1.α) προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:



Σχήμα 5.12: Δένδρο απόφασης **(1.β)**. Απώλεια μονάδας CC Λαυρίου. Σημείο δημιουργίας (10332 – 0,30%) MW. 38 ιδιότητες (20 γραμμές, ενεργός και άεργος ισχύς συστήματος και περιοχών).

α) Και τα δύο δένδρα επιλέγουν τις ίδιες γραμμές μεταφοράς, με την ίδια σειρά κρισιμότητας και το ίδιο ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισης με το δένδρο (1.α), ενώ ταυτόχρονα είναι λιγότερο πολύπλοκα.

β) Το δένδρο (1.β) δεν περιλαμβάνει τους κόμβους 8,9 και 16,17 του δένδρου (1.α), αφού η τάση κρίσιμων ζυγών δεν περιλαμβάνεται στις ιδιότητες.

γ) Το δένδρο (1.γ) για τον ίδιο λόγο δεν περιλαμβάνει επιπλέον των κόμβων 8,9 και 16,17 τους κόμβους 12,13 του δένδρου (1.α).



Σχήμα 5.13: Δένδρο απόφασης **(1.γ)**. Απώλεια μονάδας CC Λαυρίου. Σημείο δημιουργίας (10332 – 0,30%) MW. 22 ιδιότητες (20 γραμμές, ενεργός και άεργος ισχύς συστήματος).

Στη συνέχεια διερευνάται η επίδραση του σημείου λειτουργίας του συστήματος όπου αναπτύσσονται τα δένδρα απόφασης στην ανάδειξη των κρίσιμων γραμμών και του βέλτιστου ποσοστού αντιστάθμισής τους. Για το λόγο αυτό κατασκευάζεται το δένδρο απόφασης (1.δ), που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.14. Το σύνολο μάθησης για το δένδρο αυτό δημιουργείται στο σημείο λειτουργίας του συστήματος με συνολικό ενεργό φορτίο αυξημένο κατά 0,20%, δηλ. ίσο με 10352,66 MW. Οι ιδιότητες που χρησιμοποιούνται είναι 38 (ιδιότητες ΙΙ-Ι38 Πίνακα 5.1).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του δένδρου (1.δ) με εκείνα του δένδρου (1.β) που έχει δημιουργηθεί στα 10300 MW, με τον ίδιο αριθμό ιδιοτήτων, προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:



Σχήμα 5.14: Δένδρο απόφασης **(1.δ)**. Απώλεια μονάδας CC Λαυρίου. Σημείο δημιουργίας (10332 + 0,20%) MW. 38 ιδιότητες (20 γραμμές, ενεργός και άεργος ισχύς συστήματος και περιοχών).

α) Κρίσιμες γραμμές είναι μόνο οι γραμμές 2 και 3.

β) Το ποσοστό αντιστάθμισης των γραμμών αυτών αυξάνει σε σύγκριση με αυτό που προτείνεται από το δένδρο (1.β). Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται αντιστάθμιση τουλάχιστον 35% για καθεμιά από τις δύο γραμμές έναντι 25% και 20% αντίστοιχα, που προκύπτουν από το δένδρο (1.β). Το αποτέλεσμα αυτό είναι απόλυτα λογικό, αφού το σύστημα λειτουργεί με μεγαλύτερη φόρτιση.

γ) Η σειρά κρισιμότητας των δύο γραμμών αντιστρέφεται ως προς την προτεραιότητα εμφάνισης στο δένδρο, ουσιαστικά, όμως, γίνονται το ίδιο κρίσιμες αφού διαχωρίζουν το ίδιο αριθμό ΣΛ με τον ίδιο δείκτη ασφάλειας.

δ) Ο αριθμός των ΣΛ που γίνονται ασφαλή λόγω της αντιστάθμισης καθεμιάς από τις δύο γραμμές μειώνεται. Πιο συγκεκριμένα, διαχωρίζονται 40 ΣΛ για καθεμιά από τις δύο περιπτώσεις με δείκτη ασφάλειας 0.95. Και αυτό το αποτέλεσμα αυτό είναι απόλυτα λογικό, αφού το σύστημα λειτουργεί με μεγαλύτερη φόρτιση οπότε έχει περισσότερες πιθανότητες να καταρρεύσει.

ε) Το δένδρο (1.δ) έχει πολύ λιγότερους κόμβους από το δένδρο (1.β).

Σε όλα τα προηγούμενα δένδρα καθώς και στις υπόλοιπες διαταραχές που εξετάζονται διαπιστώνεται ότι στους κόμβους ελέγχου, εμφανίζονται μόνο οι δέκα πρώτες γραμμές του Πίνακα 5.1 (ιδιότητες ΙΙ-ΙΙΟ), ενώ οι υπόλοιπες υποψήφιες ιδιότητες και κυρίως οι τάσεις κρίσιμων ζυγών εμφανίζονται σε κριτήρια διαχωρισμού σε κόμβους ήσσονος σημασίας ως προς τη διερεύνηση για την κρίσιμη θέση και το βέλτιστο ποσοστό αντιστάθμισης των γραμμών. Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκε ο τελικός αριθμός ιδιοτήτων που θα χρησιμοποιηθεί σε όλα τα δένδρα στο εξής να είναι 27 και πιο συγκεκριμένα η επαγωγική αντίδραση των δέκα πρώτων γραμμών, η συνολική άεργος ισχύς του συστήματος και η ενεργός και άεργος ισχύς των περιοχών. Κατά συνέπεια ο αριθμός των ΣΛ του κόμβου-ρίζα μειώνεται στους 1000. Οι τελικές ιδιότητες που επιλέχθηκαν εμφανίζονται στον Πίνακα 5.3.

Τέλος, με βάση το παραπάνω συμπέρασμα ως προς τις τελικές ιδιότητες, κατασκευάζεται το δένδρο απόφασης (1.ε) το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.15. Το δένδρο αυτό δημιουργείται στο σημείο λειτουργίας με συνολικό ενεργό φορτίο 10332 MW (δηλ. μεταβολή 0,00%). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του δένδρου αυτού με εκείνα των δένδρων (1.β) και (1.δ), σύγκριση η οποία μπορεί να γίνει, αφού μόνο οι δέκα γραμμές μεταφοράς εμφανίζονται στα δένδρα αυτά, προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

α) Κρισιμότερες γραμμές είναι οι γραμμές 2 και 3 (όπως και στο δένδρο (1.δ)).

β) Το ποσοστό αντιστάθμισης των γραμμών αυτών είναι ίδιο με αυτό που προτείνεται στο δένδρο (1.δ) και αυξάνει σε σύγκριση με αυτό που προτείνεται από το δένδρο (1.β).

γ) Η σειρά κρισιμότητας των δύο γραμμών είναι ίδια με αυτή του δένδρου (1.δ) και αντίστροφη με αυτή του δένδρο (1.β).



Σχήμα 5.15: Δένδρο απόφασης **(1.ε)**. Απώλεια μονάδας CC Λαυρίου. Σημείο δημιουργίας (10332 +0,00%) MW. 27 ιδιότητες. (10 γραμμές, άεργος ισχύς συστήματος, ενεργός και άεργος ισχύς και περιοχών).

δ) Ο αριθμός των ΣΛ που γίνονται ασφαλή λόγω της αντιστάθμισης καθεμιάς από τις δύο γραμμές είναι ίδιος με αυτόν του δένδρο (1.δ) και μειωμένος σε σχέση με αυτόν του δένδρο (1.β).

ε) Το δένδρο (1.δ) έχει έναν ενδιάμεσο αριθμό κόμβων (11 κόμβοι) σε σχέση τα δένδρα (1.β) και (1.δ) με αριθμό κόμβων 21 και 5 αντίστοιχα.

στ) Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα των δένδρων (1.δ) και (1.ε) είναι παρόμοια και επομένως όταν το σύστημα λειτουργεί με φορτίο μεγαλύτερο των 10332 MW τα αποτελέσματα ως προς την αντιστάθμιση σειράς κρισίμων γραμμών είναι ουσιαστικά τα ίδια.

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα στοιχεία των δένδρων απόφασης (1.α) έως (1.ε) καθώς και οι ποσοστιαίοι δείκτες εκτίμησης της απόδοσής τους. Στο Σχήμα 5.16 γίνεται σύγκριση μεταξύ των ΔΑ (1.α), (1.β) κα (1.γ) προκειμένου να φανεί η επίδραση του αριθμού των ιδιοτήτων στην απόδοση των ΔΑ. Επίσης, στο Σχήμα 5.17 γίνεται σύγκριση μεταξύ των ΔΑ (1.β), (1.δ) κα (1.ε) προκειμένου να φανεί η επίδραση της προσέγγισης στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος στην απόδοση των ΔΑ. Τέλος, στα Σχήμα 5.18 και 5.19 παρουσιάζονται η επίδραση του αριθμού των ιδιοτήτων και της προσέγγισης στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος, αντίστοιχα, στην επιλογή των κρίσιμων γραμμών και τον προσδιορισμό του ελάχιστου ποσοστού αντιστάθμισής τους. Στα δύο τελευταία σχήματα περιλαμβάνονται όλες οι γραμμές που εμφανίζονται στα δένδρα απόφασης, ανεξάρτητα εάν ο αντίστοιχος κόμβος οδηγεί σε ΦΥΛΛΟ ή ΑΔΙΕΞΟΔΟ.

Παρατηρώντας τα Σχήματα 5.16 και 5.18 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Ο αριθμός των ιδιοτήτων δεν επηρεάζει καθόλου το ποσοστό ασφαλών ΣΛ, την επιλογή των κρίσιμων γραμμών και τον προσδιορισμό του ελάχιστου ποσοστού αντιστάθμισής τους. Συνεπώς, η παράλειψη ιδιοτήτων ήσσονος σημασία δεν επηρεάζει καθόλου τα αποτελέσματα των δένδρων.
- Μεγάλος αριθμός ιδιοτήτων συμβάλλει θετικά στην απόδοση των δένδρων απόφασης (αύξηση του

ποσοστού επιτυχίας, μείωση του ποσοστού αποτυχημένων προειδοποιήσεων), γεγονός αναμενόμενο αφού γίνεται καλύτερος διαχωρισμός. Όμως αυξάνει τον αριθμό κόμβων και κατά συνέπεια την πολυπλοκότητά τους.

Είδος	A/A	Συμβολισμός	Περιγραφόμενο στοιχείο δικτύου
Ιδιότητας	Ιδιότητας	στα ΔΑ	
	I 1	X1	ΚΥΤ Λάρισας - ΚΥΤ Λάρυμνας (διπλή γραμμή)
F	I 2	X2	ΚΥΤ Αγ. Δημητρίου - ΚΥΤ Λάρισας
σασ	I 3	X3	ΚΥΤ Καρδιάς - ΚΥΤ Λάρισας
τίδן 00 k	I 4	X4	ΚΥΤ Καρδιάς - ΚΥΤ Τρικάλων
αν v 4(I 5	X5	ΚΥΤ Κουμουνδούρου - ΚΥΤ Διστόμου
τική ψιώ	I 6	X6	ΚΥΤ Λάρυμνας - ΚΥΤ Αχαρνών
γωγ ραμ	Ι7	X7	ΚΥΤ Τρικάλων - ΚΥΤ Διστόμου
ίπα γ	I 8	X8	ΚΥΤ Διστόμου - ΚΥΤ Αχελώου
E	I 9	X9	ΚΥΤ Αγ. Στεφάνου - ΚΥΤ Παλλήνης (διπλή γραμμή)
	I 10	X10	ΚΥΤ Αχαρνών - ΚΥΤ Κουμουνδούρου
	I 11	P1	Ανατ. Μακεδονίας-Θράκης
	I12	P2	Δυτ. Μακεδονίας
χύς	I13	P3	Θεσσαλίας
ς Iσ	I14	P4	Ανατ. Στερεάς-Εύβοιας
ργό	I15	Р5	Αττικής
Eve	I16	P6	Πελοποννήσου
	I17	P7	Δυτ. Ελλάδας
	I18	P8	Ηπείρου-Επτανήσων
	I19	Qsyst	Συστήματος
	I20	Q1	Ανατ. Μακεδονίας-Θράκης
رب س	I21	Q2	Δυτ. Μακεδονίας
σχύ	I22	Q3	Θεσσαλίας
05 I	I23	Q4	Ανατ. Στερεάς-Εύβοιας
εργ	I24	Q5	Αττικής
A	I25	Q6	Πελοποννήσου
	I26	Q7	Δυτ. Ελλάδας
	I27	Q8	Ηπείρου-Επτανήσων

Πίνακας 5.3: Τελικές ιδιότητες στην ανάπτυξη των δένδρων απόφασης.

Πίνακας 5.4: Εκτίμηση απόδοσης των δένδρων απόφασης (1.α) έως (1.ε).

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΝΔΡΟΥ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	ΑΥΞΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΛ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΣΦΑΛΩΝ ΣΛ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙΤΥΧΙΑΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΟΤΥΧΗΜΕΝΩΝ ΠΡΟΕΙΔ/ΣΕΩΝ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΣΦΑΛΜΕΝΩΝ ΠΡΟΕΙΔ/ΣΕΩΝ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΩΝ
1.α	44	-0,30%	2000	17,95%	95,90%	1,83%	14,48%	25
1.β	38	-0,30%	2000	17,95%	95,65%	2,25%	13,93%	21
1.γ	22	-0,30%	2000	17,95%	95,45%	2,50%	13,93%	19
1.δ	38	0,20%	2000	13,30%	96,70%	2,19%	10,53%	5
1.ε	27	0,00%	1000	13,40%	95,80%	2,77%	13,43%	11





Σχήμα 5.18: Απώλεια μονάδας CC Λαυρίου. Κρίσιμες γραμμές και ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισής τους για διαφορετικό αριθμό ιδιοτήτων.



Σχήμα 5.19: Απώλεια μονάδας CC Λαυρίου. Κρίσιμες γραμμές και ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισής τους για διαφορετικές φορτίσεις του συστήματος.

Επίσης, από τα Σχήματα 5.17 και 5.19 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η προσέγγιση στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος μειώνει το ποσοστό ασφαλών ΣΛ, μειώνει των αριθμό των κρίσιμων γραμμών ενώ αυξάνει το απαιτούμενο ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισης των κρισίμων γραμμών. Συνεπώς, σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή της παρούσας μεθοδολογίας είναι η επιλογή του σημείου λειτουργίας που θεωρείται κρίσιμο και η δημιουργία των δένδρων σε αυτό ακριβώς το σημείο.
- Η προσέγγιση στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος συμβάλλει θετικά στην απόδοση των δένδρων απόφασης (αύξηση του ποσοστού επιτυχίας, μείωση του ποσοστού εσφαλμένων προειδοποιήσεων), ενώ μειώνει τον αριθμό των κόμβων και κατά συνέπεια την πολυπλοκότητα του δένδρου.
- Για τη συγκεκριμένη διαταραχή κρίσιμες είναι οι γραμμές 2 και 3 με ποσοστό αντιστάθμισης σειράς τουλάχιστον 35%.

Χρησιμοποιώντας όλες τις παρατηρήσεις και συμπεράσματα από τα δένδρα απόφασης που δημιουργήθηκαν για τη διαταραχή της απώλειας της μονάδας συνδυασμένου κύκλου του Λαυρίου, στη συνέχεια διερευνούνται όλες οι υπόλοιπες διαταραχές. Κατά συνέπεια, για όλα τα δένδρα αποφάσεων που δημιουργούνται στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται οι 27 ιδιότητες του Πίνακα 5.3. Επίσης, για κάθε διαταραχή δημιουργούνται δύο δένδρα απόφασης σε δύο διαφορετικά σημεία φόρτισης του συστήματος. Για τη δημιουργία της βάσης γνώσης για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή και σημείο λειτουργίας του συστήματος ακολουθείται η διαδικασία της παραγράφου 5.3.3.1, δηλαδή οι 10 υποψήφιες γραμμές αντισταθμίζονται έως 50% σε βήματα των 5%. Σε κάθε βήμα αντιστάθμισης κάθε γραμμής τα φορτία όλων των ζυγών (εκτός βιομηχανικών) μεταβάλλονται κατά ±3% τυχαία για 14 φορές. Με τον τρόπο δημιουργείται μία βάση γνώσης 1400 ΣΛ, εκ των οποίων 1000 ΣΛ συγκροτούν το σύνολο μάθησης κάθε δένδρου και 400 ΣΛ το σύνολο ελέγχου.

5.3.4.2. Απώλεια μονάδας ΙΙ ΛΑΥΡΙΟΥ

Για τη διερεύνηση των κρισίμων γραμμών και του ελάχιστου ποσοστού αντιστάθμισής τους στην περίπτωση της απώλειας της μονάδας ΙΙ του Λαυρίου δημιουργούνται δύο δένδρα απόφασης. Το πρώτο δημιουργείται με μέγιστο φορτίο συστήματος 10383,66 MW (δηλαδή με αύξηση 0,50% ως προς τα 10332 MW) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.20. Το δεύτερο δένδρο απόφασης δημιουργείται με μέγιστο φορτίο συστήματος 10404,32 MW (δηλαδή με αύξηση 0,70% ως προς τα 10332 MW) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.21.



Σχήμα 5.20: Δένδρο απόφασης (2.α). Απώλεια μονάδας ΙΙ Λαυρίου. Σημείο δημιουργίας 10332MW +0,50%. 27 ιδιότητες.



Σχήμα 5.21: Δένδρο απόφασης (2.β). Απώλεια μονάδας ΙΙ Λαυρίου. Σημείο δημιουργίας (10332 +0,70%) MW. 27 ιδιότητες.

Παρατηρείται ότι στο δένδρο (2.α) ουσιαστική πληροφορία μπορεί να εξαχθεί έως τον κόμβο 12, αφού μέχρι εκεί προκύπτουν απόγονοι με μεγάλο δείκτη ασφάλειας. Αντίστοιχα, στο δένδρο (2.β) κόμβοι με μεγάλο δείκτη ασφάλειας προκύπτουν μέχρι τον κόμβο 8. Παρατηρείται, επίσης, ότι ορισμένες γραμμές επανεμφανίζονται σε κόμβους ελέγχου του δένδρου με μικρότερο ποσοστό αντιστάθμισης. Επιπρόσθετα, επιβεβαιώνεται ότι όσο αυξάνεται η φόρτιση του συστήματος τόσο αυξάνεται το ποσοστό αντιστάθμισης των γραμμών μεταφοράς, μειώνεται ο αριθμός των κόμβων και κατά συνέπεια και ο αριθμός των κρίσιμων γραμμών.

Από τη μεθοδολογία προκύπτει ότι οι κρισιμότερες γραμμές για την εν λόγω διαταραχή είναι οι γραμμές 2 και 3 και μάλιστα είναι ισοδύναμες αφού δίνουν τον ίδιο αριθμό ασφαλών ΣΛ. Στο Σχήμα 5.22 δίνεται το ποσοστό αντιστάθμισης όλων των γραμμών που εμφανίζονται στα δένδρα (2.α) και (2.β).





5.3.4.3. Απώλεια μονάδας ΙΧ (μεγάλης) ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Για την εύρεση των κρισίμων γραμμών και του ποσοστού αντιστάθμισής τους στην περίπτωση της απώλειας της μονάδας ΙΧ του Αγ. Γεωργίου δημιουργούνται τα δένδρα απόφασης. (3.α) και (3.β) που παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.23 και 5.24 αντίστοιχα. Το πρώτο δένδρο δημιουργείται με μέγιστο φορτίο συστήματος 10383,66 MW (δηλαδή με αύξηση 0,50% ως προς τα 10332 MW), ενώ το δεύτερο δένδρο δημιουργείται με μέγιστο φορτίο συστήματος 10404,32 MW (δηλαδή με αύξηση 0,70% ως προς τα 10332 MW).



Σχήμα 5.23: Δένδρο απόφασης (3.α). Απώλεια μονάδας ΙΧ Αγ. Γεωργίου. Σημείο δημιουργίας (10332 +0,50%) MW. 27 ιδιότητες.



Σχήμα 5.24: Δένδρο απόφασης (3.β). Απώλεια μονάδας ΙΧ Αγ. Γεωργίου. Σημείο δημιουργίας (10332 +0,70%) MW. 27 ιδιότητες.

Παρατηρώντας το δένδρο απόφασης (3.α) προκύπτει ότι οι κρισιμότερες γραμμές είναι οι γραμμές 2 και 3 και στη συνέχεια οι γραμμές 4,7,1 και 5, ενώ από το δένδρο (3.β) προκύπτει ότι η κρισιμότερη γραμμή είναι η γραμμή 3 με τη γραμμή 2 να είναι λιγότερο σημαντική. Επίσης, σε έναν από τους τελευταίους (και όχι σημαντικούς) κόμβους ελέγχου του δένδρου (3.α) εμφανίζεται η τιμή της άεργου ισχύος της Θεσσαλίας (Q3<664.27 MVAr).

Στο Σχήμα 5.25 δίνεται το ποσοστό αντιστάθμισης όλων των γραμμών που εμφανίζονται στα δένδρα (3.α) και (3.β).



Σχήμα 5.25: Απώλεια μονάδας ΙΧ Αγ. Γεωργίου. Κρίσιμες γραμμές και ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισής τους για διαφορετικές φορτίσεις του συστήματος.

5.3.4.4. Απώλεια μονάδας VIII (μικρής) ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Για την απώλεια της μονάδας VIII του Αγ. Γεωργίου δημιουργούνται τα δένδρα απόφασης. (4.α) με αύξηση φορτίου 0,80% (συνολικό φορτίο συστήματος ίσο με 10414,66 MW) και (4.β) με αύξηση φορτίου 1,00% (συνολικό φορτίο συστήματος ίσο με 10435,32 MW), τα οποία παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.26 και 5.27 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.26: Δένδρο απόφασης (4.α). Απώλεια μονάδας VIII Αγ. Γεωργίου. Σημείο δημιουργίας (10332 +0,80%) MW. 27 ιδιότητες.



Σχήμα 5.27: Δένδρο απόφασης (4.β). Απώλεια μονάδας VIII Αγ. Γεωργίου. Σημείο δημιουργίας (10332 +1,00%) MW. 27 ιδιότητες.



Σχήμα 5.28: Απώλεια μονάδας VIII Αγ. Γεωργίου. Κρίσιμες γραμμές και ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισής τους για διαφορετικές φορτίσεις του συστήματος.

Από τα δένδρα απόφασης (4.α) και (4.β) προκύπτει ότι οι κρισιμότερες γραμμές για την εν λόγω διαταραχή είναι και πάλι οι γραμμές 2 και 3 με μια μικρή υπεροχή της γραμμής 2 στο δένδρο (4.α) ως προς τον αριθμό των ασφαλών ΣΛ που δημιουργούνται. Στο Σχήμα 5.28 δίνεται το ποσοστό αντιστάθμισης όλων των γραμμών που εμφανίζονται στα παραπάνω δένδρα.

5.3.4.5. Απώλεια μονάδας ΙV ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ

Για τα διερεύνηση της απώλειας της μονάδας ΙV Μεγαλόπολης δημιουργούνται τα δένδρα απόφασης (5.α) με συνολικό φορτίο 10332 MW και (5.β) με συνολικό φορτίο 10352,66 MW (δηλαδή αύξηση φορτίου 0,20%), τα οποία παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.29 και 5.30 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.29: Δένδρο απόφασης (5.α). Απώλεια μονάδας ΙV Μεγαλόπολης. Σημείο δημιουργίας (10332 +0,00%) MW. 27 ιδιότητες.



Σχήμα 5.30: Δένδρο απόφασης (5.β). Απώλεια μονάδας ΙV Μεγαλόπολης. Σημείο δημιουργίας (10332 +0,20%) MW. 27 ιδιότητες.

Στο δένδρο (5.α) επιλέχθηκαν κατ΄ εξαίρεση ως ιδιότητες δύο γραμμές 150 kV που ξεκινούν από την Αττική και καταλήγουν στην Πελοπόννησο προκειμένου να διερευνηθεί η επίδρασή τους στην ασφάλεια του συστήματος στη συγκεκριμένη διαταραχή. Πιο συγκεκριμένα ως ιδιότητες I9 και I10 επιλέχθηκαν οι γραμμές KYT Κουμουνδούρου–Ασπρόπυργος-Κόρινθος και Κόρινθος-ΑΗΣ Μεγαλόπολης. Από τους κόμβους 1 και 3 του δένδρου προκύπτει ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα: εάν μία από αυτές τις γραμμές αντισταθμιστεί έστω κατά 5% τότε 100 ΣΛ γίνονται μη ασφαλή, δηλαδή αυξάνει η πιθανότητα το σύστημα να καταρρεύσει. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η αντιστάθμιση σειράς μιας από αυτές τις γραμμές θα αυξήσει τη ροή ισχύος προς την Αττική, μειώνοντας τη διαθέσιμη ισχύ στην Πελοπόννησο με αποτέλεσμα την εμφάνιση χαμηλών τάσεων.

Επίσης, από τα δένδρα απόφασης διαπιστώνεται ότι **η αντιστάθμιση των περισσοτέρων γραμμών** (γραμμές 1 έως 8), ακόμη και της γραμμής 8 στο δένδρο (5.α), η οποία δεν είχε εμφανιστεί σε καμία από τις προηγούμενες διαταραχές, μπορεί να συμβάλλει στη δημιουργία ασφαλών ΣΛ. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την κρισιμότητα της διαταραχής αυτής για το σύστημα. Στο Σχήμα 5.31 δίνεται το ποσοστό αντιστάθμισης όλων των γραμμών, που εμφανίζονται στα δένδρα (5.α) και (5.β).



Σχήμα 5.31: Απώλεια μονάδας ΙV Μεγαλόπολης. Κρίσιμες γραμμές και ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισής τους για διαφορετικές φορτίσεις του συστήματος.

5.3.4.6. Απώλεια γραμμής 400kV ΚΥΤ Καρδιάς - ΚΥΤ Τρικάλων

Τέλος, διερευνάται η εφαρμογή της μεθοδολογίας όταν τεθεί εκτός λειτουργίας μία από τις τρεις γραμμές 400 kV Βορρά-Νότου και συγκεκριμένα η γραμμή KYT Καρδιάς-KYT Τρικάλων. Για τη διαταραχή αυτή παρουσιάζεται ένα μόνο δένδρο με συνολικό φορτίο συστήματος ίσο με 10332 MW, καθώς για όλα τα κοντινά σημεία φόρτισης του συστήματος τα αποτελέσματα είναι ίδια. Το εν λόγω δένδρο (6) παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.32. Επιπρόσθετα, σημειώνεται ότι το ποσοστό αντιστάθμισης σειράς των υποψηφίων γραμμών χρειάστηκε να αυξηθεί έως και 55%, προκειμένου να προκύψουν ασφαλή ΣΛ, καθώς μικρότερα ποσοστά αντιστάθμισης δεν οδηγούν σε ασφαλή σημεία λειτουργίας. Κατά συνέπεια, η βάση γνώσης που δημιουργείται περιέχει 1540 ΣΛ, εκ των οποίων τα 1200 αποτελούν το σύνολο μάθησης και τα υπόλοιπα το σύνολο ελέγχου.

Από τα αποτελέσματα του δένδρου αυτού προκύπτει ότι κρίσιμες γραμμές είναι μόνο οι δύο άλλες γραμμές 400 kV Βορρά-Νότου (γραμμές 2 και 3) με ποσοστό τουλάχιστον 55%. Όμως, η αντιστάθμιση καθεμιάς από αυτές μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμένο αριθμό ασφαλών ΣΛ, (20 ασφαλή ΣΛ για καθεμιά περίπτωση). Στο Σχήμα 5.33 εμφανίζεται γραφικά το προτεινόμενο από το δένδρο απόφασης ποσοστό αντιστάθμισης των γραμμών 2 και 3.



Σχήμα 5.32: Δένδρο απόφασης (6). Απώλεια γραμμής ΚΥΤ Καρδιάς - ΚΥΤ Τρικάλων. Σημείο δημιουργίας (10332 +0,00%) MW. 27 ιδιότητες.



Σχήμα 5.33: Απώλεια γραμμής ΚΥΤ Καρδιάς-ΚΥΤ Τρικάλων. Κρίσιμες γραμμές και ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισής τους.

5.3.4.7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από τα δένδρα απόφασης

Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα στοιχεία των δένδρων απόφασης (2.α) έως (6) καθώς και οι ποσοστιαίοι δείκτες εκτίμησης της απόδοσής τους. Παρατηρείται κι εδώ ότι η προσέγγιση στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος συμβάλλει θετικά στην απόδοση των δένδρων απόφασης (αύξηση του ποσοστού επιτυχίας), μειώνει τον αριθμό των ασφαλών ΣΛ καθώς και τον αριθμό των κόμβων, οπότε προκύπτουν λιγότερο πολύπλοκα και περισσότερο αποτελεσματικά, ως προς τις κρίσιμες γραμμές, δένδρα.

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΝΔΡΟΥ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	ΑΥΞΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΛ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΣΦΑΛΩΝ ΣΛ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙΤΥΧΙΑΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΟΤΥΧΗΜΕΝΩΝ ΠΡΟΕΙΔ/ΣΕΩΝ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΣΦΑΛΜΕΝΩΝ ΠΡΟΕΙΑ/ΣΕΩΝ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΜΒΩΝ
2.α	27	0,50%	1000	31,30%	94,90%	1,31%	13,42%	17
2.β	27	0,70%	1000	17,40%	97,20%	1,45%	9,20%	11
3.α	27	0,50%	1000	23,80%	95,60%	1,83%	12,66%	21
3.β	27	0,70%	1000	10,60%	97,70%	1,56%	8,57%	9
4.α	27	0,80%	1000	33,30%	93,70%	3,75%	11,41%	21
4.β	27	1,00%	1000	16,00%	96,60%	1,43%	13,75%	13
5.α	27	0,00%	1000	49,90%	93,10%	2,00%	11,82%	23
5.β	27	0,20%	1000	26,60%	96,20%	1,87%	14,22%	17
6	27	0,00%	1200	3,42%	99,58%	0,17%	7,30%	5

Πίνακας 5.5: Εκτίμηση απόδοσης των δένδρων απόφασης (2.α) έως (6).

Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζεται η σειρά εμφάνισης των γραμμών μεταφοράς στους κόμβους ελέγχου των δημιουργηθέντων δένδρων απόφασης. Με έντονη γραμμοσκίαση εμφανίζονται οι γραμμές των οποίων το προτεινόμενο ποσοστό αντιστάθμισης οδηγεί σε κόμβους ΦΥΛΛΑ. Όπως έχει εξηγηθεί παραπάνω, η σειρά αυτή είναι ουσιαστικά και η σειρά κρισιμότητας των γραμμών για αντιστάθμιση σειράς προκειμένου να δημιουργηθούν όσο το δυνατό περισσότερα ΣΛ.

Στον Πίνακα 5.7 εμφανίζονται τα προτεινόμενα από τα δένδρα απόφασης ποσοστά αντιστάθμισης των κρίσιμων γραμμών, ενώ με έντονη γραμμοσκίαση εμφανίζονται τα ποσοστά αντιστάθμισης των γραμμών που οδηγούν σε κόμβους ΦΥΛΛΑ.

Α/Α Αριθμός		Αύξηση	Σειρά κρισιμότητας γραμμών μεταφοράς								
διατα- ραχής	δένδρου	φορτίου	1η	2η	3η	4η	5ղ	6η	7ղ	8η	
	1.β	-0,30%	3	2	4	7	1	5	6	8	
1	1.ε	0,00%	_2	3	4	7	1				
	1.δ	0,20%	2	3							
2	2.α	0,50%	2	3	4	7	1	5	6		
2	2.β	0,70%	2	3	4	1	7				
2	3.α	0,50%	2	3	4	7	1	5			
3	3.β	0,70%	3	2	4	7					
4	4.α	0,80%	2	3	4	7	1	5	6		
4	4.β	1,00%	2	3	1	7	4				
5	5.α	0,00%	2	3	4	7	1	5	6	8	
5	5.β	0,20%	2	3	4	1	7	5	6		
6	6	0,80%	2	3							

Πίνακας 5.6: Σειρά κρισιμότητας υποψηφίων γραμμών μεταφοράς για αντιστάθμιση σειράς σε όλες τις εξεταζόμενες διαταραχές.

Πίνακας 5.7: Βέλτιστο ποσοστό αντιστάθμισης των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς σε όλες τις εξεταζόμενες διαταραχές.

A/A	Α/Α Αοιθμός		Ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισης (%)								
διατα- ραχής	δένδρου	φορτίου	Γραμμή 1	Γραμμή 2	Γραμμή 3	Γραμμή 4	Γραμμή 5	Γραμμή 6	Γραμμή 7	Γραμμή 8	
	1.β	-0,30%	40%	25%	20%	30%	40%	45%	30%	45%	
1	1.ε	0,00%	45%	35%	35%	45%	-	-	45%	-	
	1.δ	0,20%	-	35%	35%	-	_	-	-	-	
2	2.α	0,50%	40%	25%	25%	30%	40%	50%	35%	-	
2	2.β	0,70%	45%	30%	30%	40%	-	-	45%	-	
3	3.α	0,50%	45%	30%	30%	35%	50%	-	40%	-	
3	3.β	0,70%	-	35%	35%	45%	-	-	50%	-	
4	4.α	0,80%	35%	25%	25%	35%	40%	45%	35%	-	
4	4.β	1,00%	45%	35%	35%	45%	-	-	45%	-	
5	5.α	0,00%	30%	20%	20%	25%	30%	35%	25%	40%	
5	5.β	0,20%	40%	35%	35%	40%	40%	45%	35%	-	
6	6	0,00%	_	55%	55%	_	-	-	_	-	

5.3.4.8. Τελική επιλογή κρίσιμων γραμμών και ποσοστού αντιστάθμισης από τη μεθοδολογία

Ως οι πλέον κρίσιμες γραμμές του συστήματος επιλέγονται οι γραμμές που εμφανίζονται στις περισσότερες διαταραχές και μάλιστα πρώτες. Κατά συνέπεια, για όλες τις εξεταζόμενες διαταραχές οι πλέον κρίσιμες γραμμές είναι οι γραμμές 2 και 3 και στη συνέχεια οι γραμμές 4 και 7.

Ως βέλτιστο ποσοστού αντιστάθμισης καθεμιάς κρίσιμης γραμμής στην παρούσα μεθοδολογία επιλέγεται το μέγιστο ποσοστό που προτείνεται για τη γραμμή αυτή μεταξύ των εξεταζόμενων διαταραχών, προκειμένου να καλύπτονται όλες οι διαταραχές. Έτσι, το βέλτιστο ποσοστό αντιστάθμισης για καθεμιά από τις κρίσιμες γραμμές 2 και 3 είναι τουλάχιστον 55%.

5.3.5. Υπολογισμός του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος μετά την αντιστάθμιση σειράς των κρίσιμων γραμμών με το προτεινόμενο ποσοστό αντιστάθμισης.

Προκειμένου να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας των δένδρων απόφασης ακολουθείται η εξής διαδικασία: για κάθε διαταραχή, στο σημείο λειτουργίας του συστήματος όπου δημιουργήθηκε το δένδρο απόφασης, αντισταθμίζεται σειριακά κάθε κρίσιμη γραμμή (γραμμές 2,3,4 και 7 που είναι οι πλέον κρίσιμες για όλες σχεδόν τις διαταραχές) με το ποσοστό που προτείνεται από το δένδρο απόφασης και εκτελείται η ροή φορτίου μέχρι το σημείο απόκλισης, προκειμένου να υπολογιστεί η αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.8. Πιο αναλυτικά, στον πίνακα αυτό, για κάθε διαταραχή, περιλαμβάνονται τα ακόλουθα: στην πρώτη στήλη η αρίθμηση του αντίστοιχου δένδρο απόφασης, στη δεύτερη στήλη οι γραμμές κατά φθίνουσα σειρά κρισιμότητας σύμφωνα με το δένδρο απόφασης, στην τρίτη το προτεινόμενο από το δένδρο απόφασης ποσοστό αντιστάθμιση σειράς, ενώ στην τέταρτη καταγράφεται η αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος μετά την εφαρμογή της αντιστάθμισης σειράς. Παρατηρώντας την τελευταία αυτή στήλη του πίνακα, διαπιστώνεται ότι προχωρώντας από πάνω προς τα κάτω (δηλαδή προχωρώντας από τους κόμβους ελέγχου στην αρχή του αντίστοιχου δένδρου προς τα κάτω) η αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος μειώνεται. Κατά συνέπεια η σειρά κρισιμότητας και το προτεινόμενο ποσοστό αντιστάθμισης σειράς

Α/Α διαταραχής	Αριθμός δένδρου απόφασης	Γραμμή κατά σειρά κρισιμότητας	Προτεινόμενο ποσοστό αντιστάθμισης	Αύξηση μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (MW)
		Γραμμή 2	35%	11,92
1	1.0	Γραμμή 3	35%	11,92
1	1.6	Γραμμή 4	45%	11,92
		Γραμμή 7	45%	11,92
		Γραμμή 2	30%	49,67
2	2.6	Γραμμή 3	30%	47,69
	2.p	Γραμμή 4	40%	47,69
		Γραμμή 7	45%	45,70
	3.β	Γραμμή 2	30%	73,50
3		Γραμμή 3	30%	69,53
5		Γραμμή 4	35%	69,53
		Γραμμή 7	40%	65,56
		Γραμμή 2	35%	71,51
4	4 B	Γραμμή 3	35%	67,54
-	4.p	Γραμμή 4	45%	67,54
		Γραμμή 7	45%	63,57
5		Γραμμή 2	20%	69,53
	5 B	Γραμμή 3	20%	65,61
	J.P	Γραμμή 4	25%	57,61
		Γραμμή 7	25%	47,68
		Γραμμή 2	55%	97,34

Γραμμή 3

Γραμμή 4

Γραμμή 7

6

6

55%

_

_

93,37

_

Πίνακας 5.8: Αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος από την προτεινόμενη από τα δένδρα απόφασης αντιστάθμιση σειράς κρίσιμων γραμμών. από τη μεθοδολογία των δένδρων απόφασης είναι η σωστή ως προς την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος. Εξαίρεση αποτελεί η απώλεια της μονάδας συνδυασμένου κύκλου του Λαυρίου (διαταραχή 1), όπου διαπιστώνεται ότι η αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος είναι ίδια για όλες τις κρίσιμες γραμμές, οπότε το κριτήριο κατάταξης των γραμμών από το δένδρο απόφασης έγινε βάση του αριθμού των ασφαλών ΣΛ που δίνει η αντιστάθμιση καθεμιάς από τις γραμμές.

Η μεγαλύτερη αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος από την αντιστάθμιση κρίσιμων γραμμών σημειώνεται κατά την απώλεια της γραμμής ΚΥΤ Καρδιάς-ΚΥΤ Τρικάλων (διαταραχή 6) κατά 97 MW με αντιστάθμιση των γραμμών 2 ή 3 κατά 55%. Στην περίπτωση των διαταραχών 3,4 και 5, η αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση της πλέον κρίσιμης γραμμής είναι της τάξης των 70 MW. Τέλος, κατά την απώλεια της μονάδας συνδυασμένου κύκλου του Λαυρίου (διαταραχή 1) η αύξηση του περιθωρίου φόρτισης είναι μικρή, της τάξης των 12 MW, γεγονός που υποδηλώνει και την κρισιμότητα της διαταραχής αυτής για το σύστημα.

5.3.6. Συμπεράσματα από την προτεινόμενη μεθοδολογία

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την προτεινόμενη μεθοδολογία:

- Τα δένδρα απόφασης για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή δημιουργούνται σε ένα οριακό σημείο λειτουργίας του συστήματος. Η επαγωγική αντίδραση των κύριων γραμμών μεταφοράς 400kV κατέχουν κυρίαρχο ρόλο στο διαχωρισμό του συνόλου μάθησης. Τα κριτήρια διαχωρισμού που αφορούν σε παραμέτρους του δικτύου, όπως η τάση κρίσιμων ζυγών η συνολική ενεργός και άεργος ισχύς των περιοχών, εφαρμόζονται σε κόμβους ελέγχου με μικρό αριθμό ΣΛ, χωρίς να προκαλούν κάποιο σημαντικό διαχωρισμό στο σύνολο μάθησης. Οι έλεγχοι αυτοί είναι μεν σημαντικοί για την εύρεση των κρίσιμων παραμέτρων του συστήματος σε τέτοιες οριακές συνθήκες καθώς και για τον καθορισμό των τιμών κατωφλίου αυτών των παραμέτρων, όμως δεν συμβάλλουν σημαντικά στο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης θέσης και ποσοστού αντιστάθμισης των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς. Κατά συνέπεια, στη δημιουργία των δένδρων απόφασης οι σημαντικές ιδιότητες για την ανάπτυξη των δένδρων απόφασης είναι οι δέκα (10) γραμμές μεταφοράς 400 kV.
- Η προσέγγιση στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος κατά τη δημιουργία των δένδρων απόφασης μειώνει το ποσοστό ασφαλών ΣΛ, μειώνει των αριθμό των κρίσιμων γραμμών ενώ αυξάνει το απαιτούμενο ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισης των κρισίμων γραμμών. Συνεπώς, σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή της παρούσας μεθοδολογίας είναι η επιλογή του σημείου λειτουργίας που θεωρείται κρίσιμο και η δημιουργία των δένδρων σε αυτό ακριβώς το σημείο.
- Με την προτεινόμενη μεθοδολογία προκύπτει η σειρά κρισιμότητας των υποψήφιων γραμμών μεταφοράς για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο κοντά είναι ο κόμβος ελέγχου, που αφορά μια γραμμή, στον κόμβο-ρίζα του αντίστοιχου δένδρου απόφασης, τόσο περισσότερα ασφαλή ΣΛ δίνει η αντιστάθμισή της.
- Με την προτεινόμενη μεθοδολογία προκύπτει επιπρόσθετα και το βέλτιστο ποσοστό αντιστάθμισης όλων των κρίσιμων γραμμών ως εξής: Από τον πρώτο κόμβο ελέγχου που αφορά στην επαγωγική αντίδραση μιας γραμμής μεταφοράς και οδηγεί σε ΦΥΛΛΟ, προκύπτει το ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισης της γραμμής αυτής, που οδηγεί στο μέγιστο αριθμό ασφαλών ΣΛ.
- Οι προτεινόμενες από τη μεθοδολογία των δένδρων απόφασης πλέον κρίσιμες γραμμές και το προκύπτον ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισης οδηγεί σε όλες τις εξεταζόμενες διαταραχές στη μεγαλύτερη αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος.
- Ως οι πλέον κρίσιμες γραμμές του συστήματος για αντιστάθμισης σειράς επιλέγονται οι γραμμές που εμφανίζονται στα δένδρα απόφασης των περισσότερων εξεταζόμενων διαταραχών στις πρώτες θέσεις.
- Ως βέλτιστο ποσοστό αντιστάθμισης καθεμιάς κρίσιμης γραμμής επιλέγεται το μέγιστο ποσοστό που προτείνεται για τη γραμμή αυτή μεταξύ των εξεταζόμενων διαταραχών, προκειμένου να καλύπτονται όλες οι εξεταζόμενες διαταραχές.

5.4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙ-ΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ

5.4.1. Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος ως προς τις παραμέτρους του συστήματος

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας περιγράφεται από την κατάσταση ισορροπίας ενός δυναμικού συστήματος που περιέχει n αλγεβρικές εξισώσεις με n αλγεβρικές μεταβλητές, έστω u το διάνυσμά τους και p το διάνυσμα που αντιπροσωπεύει τις ανεξάρτητες παραμέτρους, Για το σύστημα αυτό ισχύει η σχέση (5.4), ενώ στις διακλαδώσεις σαγματικού κόμβου ισχύει η σχέση (5.5).

Έστω ένα αρχικό σημείο λειτουργίας p_o και μια κατεύθυνση d, κατά την οποία μεταβάλλεται το διάνυσμα p, έτσι ώστε να ισχύει:

$$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{p}^o + \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{d} \tag{5.32}$$

και ότι στο σημείο διακλάδωσης σαγματικού κόμβου ισχύει:

$$\boldsymbol{p}^* = \boldsymbol{p}^o + \boldsymbol{\mu}^* \boldsymbol{d} \tag{5.33}$$

όπου μ^* η μέγιστη τιμή του μ ώστε η (5.4) να έχει λύση. Το μ^* αποτελεί το περιθώριο φόρτισης του σημείου p_o κατά την κατεύθυνση του d.

Στις αναφορές [109,110] προτείνεται μία τεχνική για την εκτίμηση της ευαισθησίας του περιθωρίου φόρτισης μέχρι την κατάρρευση ως προς τις παραμέτρους του συστήματος. Ο υπολογισμός της ευαισθησιών αυτών βασίζεται στο αριστερό ιδιοδιάνυσμα της μηδενικής ιδιοτιμής του Ιακωβιανού πίνακα του συστήματος.

Πιο συγκεκριμένα, για μια μικρή μεταβολή των αρχικών παραμέτρων p_o κατά d p_o , οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης μ^* ως προς τις παραμέτρους p του συστήματος, δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$\boldsymbol{S}_{\mu^* p^o} = -\frac{\varphi_p^T \boldsymbol{w}}{\boldsymbol{w}^T \varphi_p \boldsymbol{d}}$$
(5.34)

όπου

 φ_{p} είναι ο πίνακας ευαισθησιών των εγχύσεων ισχύος ως προς τις παραμέτρους p,

wείναι το αριστερό ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στη μηδενική ιδιοτιμή του Ιακωβιανού πίνακα φ_u ,

dείναι το διάνυσμα που αντιστοιχεί σε μια κατεύθυνση μεταβολής των παραμέτρων p.

Στις περιπτώσεις όπου απαιτείται διαχωρισμός των παραμέτρων ώστε να είναι δυνατή η διερεύνηση της επίδρασης τόσο των παραμέτρων που συμμετέχουν στον υπολογισμό του περιθωρίου φόρτισης (όπως τα φορτία και η παραγωγή των γεννητριών), έστω p_1 , όσο και των παραμέτρων οι οποίες διατηρούνται σταθερές κατά τον υπολογισμό αυτό (όπως η επαγωγική αντίδραση των γραμμών, η εγκάρσια αγωγιμότητα των ζυγών κλπ.), έστω p_2 , τα διανύσματα p, p_o και d διαχωρίζονται ως εξής:

$$\boldsymbol{p} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{p}_1 \\ \boldsymbol{p}_2 \end{bmatrix} \quad , \quad \boldsymbol{p}^0 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{p}_1^0 \\ \boldsymbol{p}_2^0 \end{bmatrix} \quad , \quad \boldsymbol{d} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{d}_1 \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix}$$
(5.35)

όπου

 p_1 είναι το διάνυσμα των παραμέτρων που συμμετέχουν στον υπολογισμό του περιθωρίου φόρτισης,

*p*₂ είναι το διάνυσμα των παραμέτρων που παραμέτρων οι οποίες διατηρούνται σταθερές κατά τον υπολογισμό του περιθωρίου φόρτισης.

Με τον παραπάνω διαχωρισμό προκύπτει ότι οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης μ^* ως προς τις παραμέτρους του συστήματος p_1 δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$\boldsymbol{S}_{\mu^* p_I^o} = -\frac{\varphi_{p_I}^T \boldsymbol{w}}{\boldsymbol{w}^T \varphi_{p_I} \boldsymbol{d}_I}$$
(5.36)

και οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης μ^* ως προς τις παραμέτρους του συστήματος p_2 δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$\boldsymbol{S}_{\mu^{*}p_{2}^{o}} = -\frac{\varphi_{p_{2}}^{T}\boldsymbol{w}}{\boldsymbol{w}^{T}\varphi_{p_{1}}\boldsymbol{d}_{1}}$$
(5.37)

5.4.2. Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών

Στην παρούσα διατριβή εφαρμόζεται ο υπολογισμός των ευαισθησιών για την εύρεση των κρίσιμων γραμμών, η αντιστάθμιση των οποίων επιφέρει τη μεγαλύτερη επίδραση στην αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος μετά από κρίσιμες διαταραχές, θεωρώντας ως παραμέτρους του συστήματος την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς και υπολογίζοντας τις αντίστοιχες ευαισθησίες. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται τόσο στο σύστημα 33 ζυγών της CIGRE [213] όσο και στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα [214,215] προκειμένου να βρεθούν οι κρίσιμες γραμμές, των οποίων η αντιστάθμιση σειράς αυξάνει το περιθώριο φόρτισης του συστήματος μετά από κρίσιμες διαταραχές σε συνθήκες μεγίστου.

Για την προσομοίωση του συστήματος και τον υπολογισμό του ορίου φόρτισής του μετά από κρίσιμες διαταραχές χρησιμοποιείται το αλληλοδραστικό πακέτο προσομοίωσης GINA [179], στο οποίο ο υπολογισμός των μακροπρόθεσμων δυναμικών γίνεται με προσομοίωση ημι-μόνιμης κατάστασης [207], καθώς η τεχνική αυτή αποτελεί μια ενδιάμεση καλή προσέγγιση των φαινομένων αστάθειας τάσης μεταξύ των στατικών μεθόδων (προγράμματα ροής φορτίου) και των προγραμμάτων πλήρους προσομοίωσης, όπου προσομοιώνονται όλα τα δυναμικά φαινόμενα. Σημειώνεται ότι στις προσομοιώσεις τα φορτία του συστήματος θεωρούνται ως σταθεράς ισχύος (δηλ. ανεξάρτητα της τάσης) με αποτέλεσμα το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (σημείο Μ.Μ.Ι.) να συμπίπτει με το όριο φόρτισης του συστήματος.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο παρουσιάζει προβλήματα ευστάθειας τάσεως, συνήθως χάνει την ευστάθειά του διαμέσου μιας διακλάδωσης σαγματικού κόμβου. Στη διακλάδωση αυτή ο Ιακωβιανός Πίνακας των εξισώσεων του συστήματος παρουσιάζει μια μηδενική πραγματική ιδιοτιμή. Τα ιδιοδιανύσματα (δεξί και αριστερό) της μηδενικής αυτής

ιδιοτιμής μας πληροφορούν για τις διατάξεις (γεννήτριες, κινητήρες κτλ.) του συστήματος, οι οποίες κυριαρχούν στο μηχανισμό αστάθειας καθώς και για τα πιο κρίσιμα διορθωτικά μέτρα τα οποία πρέπει να ληφθούν για την αποφυγή ενδεχομένου κατάρρευσης. Συνεπώς, όταν ένα σύστημα βρίσκεται κοντά σε μια διακλάδωση σαγματικού κόμβου, καθοριστική σημασία για τη μελέτη του συστήματος παίζει ο υπολογισμός της μικρότερης κατά απόλυτη τιμή πραγματικής ιδιοτιμής και των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων του Ιακωβιανού πίνακα του συστήματος [110,203].

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ο υπολογισμός των ευαισθησιών υλοποιείται λαμβάνοντας τη μικρότερη ιδιοτιμή και το αντίστοιχο αριστερό ιδιοδιάνυσμα του Ιακωβιανού πίνακα J_s του τελευταίου συνεκλιμένου συστήματος εξισώσεων του συστήματος, δηλαδή για φορτίσεις οριακά μικρότερες του σημείου Μ.Μ.Ι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.33. Ο υπολογισμός της μικρότερης ιδιοτιμής λ_{cr} και του αντίστοιχου αριστερού ιδιοδιανύσματος w του Ιακωβιανού πίνακα J_s , υλοποιείται με εφαρμογή της μεθόδου των αντιστρόφων επαναλήψεων (Inverse Iteration Method) [216].

Με βάση τη σχέση (5.37), στην παρούσα διατριβή για τον υπολογισμό των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση:

$$\boldsymbol{S}_{\mu^* x} = -\frac{\boldsymbol{f}_x^T \boldsymbol{W}}{\boldsymbol{W}^T \boldsymbol{f}_p \boldsymbol{d}}$$
(5.38)

όπου

- f_x είναι ο πίνακας ευαισθησιών των εγχύσεων ισχύος ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς διαστάσεων ($2NxN_L$) (N_L ο αριθμός των γραμμών του συστήματος)
- f_p είναι ο πίνακας ευαισθησιών των εγχύσεων ισχύος ως προς τα φορτία του συστήματος διαστάσεων (2Nx2N),
- **w** είναι το αριστερό ιδιοδιάνυσμα της μικρότερης ιδιοτιμής λ_{cr} του Ιακωβιανού πίνακα J_s των εξισώσεων του συστήματος διαστάσεων (2Nx1),
- *d* είναι το μοναδιαίο διάνυσμα που αντιστοιχεί σε μια κατεύθυνση αύξησης του φορτίου διαστάσεων (2*N*x1).



Σχήμα 5.33: Απεικόνιση σε *P-V* καμπύλη του σημείου υπολογισμού των ευαισθησιών.

5.4.3. Βήματα μεθοδολογίας υπολογισμού ευαισθησιών και εύρεσης των κρίσιμων γραμμών

Προκειμένου να βρεθούν οι υποψήφιες γραμμές, οι οποίες είναι οι πιο κατάλληλες για αντιστάθμιση σειράς, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

- Για ένα συγκεκριμένο σχήμα παραγωγής-φορτίου και τοπολογίας συστήματος, υπολογίζεται το σημείο Μ.Μ.Ι. του συστήματος, εφαρμόζοντας αύξηση του φορτίου (εκτός των βιομηχανικών) μέχρι την απώλεια του σημείου ισορροπίας.
- Στο σημείο Μ.Μ.Ι. (τελευταίο συνεκλιμένο σημείο της προσομοίωσης του συστήματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.33), υπολογίζονται η μικρότερη ιδιοτιμή λ_{cr} και το αντίστοιχο αριστερό ιδιοδιάνυσμα w του Ιακωβιανού πίνακα J_s.
- Υπολογίζονται οι ευαισθησίες S_μ*_x του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση όλων των γραμμών μεταφοράς, σύμφωνα με τη σχέση (5.38) και κανονικοποιούνται.
- 4. Οι γραμμές μεταφοράς ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά σύμφωνα με την τιμή του δείκτη ευαισθησίας $S_{\mu x}^{*}$ και επιλέγονται ως υποψήφιες για αντιστάθμιση σειράς οι γραμμές με τη μεγαλύτερη τιμή του $S_{\mu x}^{*}$.
- 5. Εφαρμόζεται αντιστάθμιση σειράς στις επιλεγμένες γραμμές και επαναλαμβάνεται ο υπολογισμός του σημείου Μ.Μ.Ι. Στη συνέχεια υπολογίζεται το περιθώριο φόρτισης σύμφωνα με τη σχέση (5.3), ώστε να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα της αντιστάθμισης.
- 6. Επιλέγονται ως καταλληλότερες για αντιστάθμιση σειράς οι γραμμές, οι οποίες επιφέρουν τη μεγαλύτερη αύξηση του περιθωρίου φόρτισης.
- Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1-6 και για καταστάσεις του συστήματος ύστερα από επιλεγμένες διαταραχές.
- 8. Τελικά επιλέγονται ως καταλληλότερες θέσεις για αντιστάθμιση σειράς οι γραμμές μεταφοράς, οι οποίες παρουσιάζουν το μεγαλύτερο δείκτη ευαισθησίας $S_{\mu}*_{x}$ και η αντιστάθμισή τους με πυκνωτή σειράς επιφέρει τη μεγαλύτερη αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος για τις περισσότερες κρίσιμες διαταραχές του συστήματος.

Το σχηματικό διάγραμμα υλοποίησης της παραπάνω μεθοδολογίας υπολογισμού των ευαισθησιών και εφαρμογής της στην επιλογή των κρίσιμων για αντιστάθμιση σειράς γραμμών μεταφοράς σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.34.



Σχήμα 5.34: Σχηματικό διάγραμμα εφαρμογής των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης για την επιλογή της βέλτιστης θέσης αντιστάθμισης σειράς.

5.4.4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων μεθοδολογίας

Σε όλες τις εξεταζόμενες διαταραχές υπολογίζονται οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση όλων των γραμμών μεταφοράς 400 kV και 150 kV του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος, σύμφωνα με τη σχέση (5.38). Οι γραμμές μεταφοράς 400 kV που περιλαμβάνονται στο μοντέλο του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος, που χρησιμοποιείται, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3, όπου συμπεριλαμβάνονται και οι δύο γραμμές που θα συνδέονταν στον ΚΥΤ Αργυρούπολης.

Από τους υπολογισμούς των ευαισθησιών προκύπτει ότι κυρίαρχο ρόλο παίζουν οι γραμμές μεταφοράς 400 kV. Για το λόγο αυτό και προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι ευανάγνωστα, οι γραμμές αυτές εμφανίζονται πάνω στα διαγράμματα ευαισθησιών με την αρίθμηση που έχουν στον Πίνακα 5.3 (η ίδια αρίθμηση για τις γραμμές με αύξοντα αριθμό 1-10 περιλαμβάνεται και στο απλοποιημένο διάγραμμα του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος στο Σχήμα 5.9). Η αρίθμηση αυτή χρησιμοποιείται και σε όλες τις αναφορές του κειμένου στη συνέχεια. Επιπρόσθετα, σε ορισμένα διαγράμματα ευαισθησιών εμφανίζονται οι διασυνδετικές γραμμές με τη Βουλγαρία και τη Γιουγκοσλαβία με συμβολισμό «Β» και «Γ» αντίστοιχα, καθώς και η γραμμή 150 kV Ίασμος_- ΚΥΤ Λαγκαδά με συμβολισμό «Θ».

Εξετάζονται οι ίδιες κρίσιμες (N-1) διαταραχές που διερευνήθηκαν και με τη μεθοδολογία των Δένδρων Απόφασης και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2 κι επιπρόσθετα η απώλεια της μονάδας Καρδιάς IV ισχύος 290 MW, κυρίως για λόγους επιβεβαίωσης της ορθότητας της μεθοδολογίας.

Για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή οι τιμές των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς 400 kV και 150 kV παρουσιάζονται σε διάγραμμα κανονικοποιημένες ως προς τη μέγιστη τιμή.

Για την τελική επιλογή των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή εφαρμόζεται αντιστάθμιση σειράς στις γραμμές, που εμφανίζονται κρισιμότερες από τον υπολογισμό ευαισθησιών. Πιο συγκεκριμένα, εγκαθίσταται πυκνωτής σειράς χωρητικής αντίδρασης 0.0075 α.μ. ή ισοδύναμα 24 Ω στις γραμμές 400 kV που μπορούν να αντισταθμιστούν σειριακά, δηλαδή έχουν μεγάλη επαγωγική αντίδραση και συνεπώς μεγάλο μήκος. Στον Πίνακα 5.10 εμφανίζονται οι γραμμές 400 kV καθώς και το αντίστοιχο ποσοστό αντιστάθμισής τους (η γραμμή 6, για την οποία το ποσοστό αντιστάθμισης είναι εξαιρετικά μεγάλο περιλαμβάνεται στον πίνακα για λόγους πληρότητας και σύγκρισης). Στη συνέχεια, υπολογίζεται η αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος που προκύπτει από την αντιστάθμιση των γραμμών αυτών, σύμφωνα με τη σχέση (5.3), και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή ραβδογράμματος, όπου οι γραμμές μεταφοράς εμφανίζονται με την ίδια σειρά με αυτήν που προκύπτει από τον υπολογισμό των ευαισθησιών. Η γραμμή 14, αν και ήσσονος σημασίας ως προς την τιμή της ευαισθησίας της, συμπεριλαμβάνεται για λόγους σύγκρισης.

Οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς στην κανονική κατάσταση λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.35.α. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι οι κρισιμότερες γραμμές είναι οι 2,3 και 4 με τιμή ευαισθησίας μεταξύ 0.8 και 1 και στη συνέχεια οι γραμμές 5,6,7 και 1 με τιμές μεταξύ 0.5 και 0.6. Αμέσως μετά, εμφανίζονται οι διασυνδετικές γραμμές «Β» και «Γ» με τη Βουλγαρία και τη Γιουγκοσλαβία αντίστοιχα καθώς και οι γραμμές 8 και 11 με τιμές μεταξύ 0.3 και 0.5. Μεταξύ των τιμών ευαισθησίας 0.1 και 0.2 εμφανίζονται οι γραμμές 9,10,12,13,14,22 και 16, ενώ όλες οι υπόλοιπες γραμμές παρουσιάζουν τιμή ευαισθησίας μικρότερη του 0.1. Από το διάγραμμα 5.35.β διαπιστώνεται ότι η αντιστάθμιση σειράς των γραμμών 2 και 3 επιφέρει τη μεγαλύτερη αύξηση του περιθωρίου φόρτισης της τάξης των 42 MW.

Στην περίπτωση της απώλειας της μονάδας συνδυασμένου κύκλου του ΑΗΣ Λαυρίου, από το Σχήμα 5.36.α προκύπτει ότι οι κρισιμότερες γραμμές με τιμή ευαισθησίας μεταξύ 0.8 και 1 είναι πάλι οι γραμμές 2,3 και 4. Στη συνέχεια εμφανίζονται οι γραμμές 6,5,7 και 1 με τιμές ευαισθησίας μεταξύ 0.4

και 0.6 και οι γραμμές 8 και «Θ» (γραμμή 150 kV Ίασμος-ΚΥΤ Λαγκαδά) με τιμή μεταξύ 0.3 και 0.4. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχετικά μεγάλη τιμή ευαισθησίας της γραμμής «Θ», γεγονός που επιβεβαιώνει την κρισιμότητά της γραμμής αυτής καθώς και του Υ/Σ Ιάσμου, ο οποίος σύμφωνα με τη ΜΑΣΜ έκδοσης ΔΕΣΜΗΕ [186] είναι κομβικό σημείο στο σύστημα ανατολικά των Φιλίππων, μέσω του οποίου διακινείται όλη η ισχύς προς την περιοχή της Ανατολικής Θράκης. Όλες οι υπόλοιπες γραμμές παρουσιάζουν τιμή ευαισθησίας μικρότερη ή ίση του 0.2. Επιπρόσθετα, από το Σχήμα 5.36.β διαπιστώνεται ότι η αντιστάθμιση σειράς των γραμμών 2 και 3 επιφέρει τη μεγαλύτερη αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος κατά 20 MW και κατά συνέπεια οι γραμμές αυτές είναι οι κρισιμότερες γραμμές για την εξεταζόμενη διαταραχή.

Οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών κατά την απώλεια της μονάδας ΙΙ του ΑΗΣ Λαυρίου και των μονάδας ΙΧ (μεγάλης) και VIII (μικρής) του ΑΗΣ Αγ. Γεωργίου, παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.37.α, 5.38.α και 5.39.α. Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι και σε αυτές τις διαταραχές οι γραμμές 2,3 και 4 είναι οι κρισιμότερες με αυτή τη σειρά κρισιμότητας και τιμές ευαισθησίας μεταξύ 0.8 και 1. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραμμές 5,6,7, και 1 με τιμές μεταξύ 0.5 και 0.7, κατόπιν οι γραμμές 8,9 και 10 με τιμές ευαισθησίας μεταξύ 0.2 και 0.4, ενώ όλες οι υπόλοιπες γραμμές 400 και 150 kV παρουσιάζουν ευαισθησία μικρότερη του 0.2. Από την αντιστάθμιση των κρίσιμων γραμμών και τον υπολογισμό της αύξησης του περιθωρίου φόρτισης, προκύπτει ότι η κρισιμότερη γραμμή του συστήματος είναι η γραμμή 2 η αντιστάθμιση της οποίας επιφέρει αύξηση του περιθωρίου φόρτισης κατά 80 MW στην περίπτωση απώλειας της μονάδας ΙΙ του Λαυρίου και 130 MW στην περίπτωση απώλειας της ΙΧ (μεγάλης) και της VIII (μικρής) μονάδας του ΑΗΣΑΓ και αμέσως μετά η γραμμή 3, που επιφέρει αύξηση του περιθωρίου φόρτισης κατά 79 και 125 MW αντίστοιχα.

Η ίδια σειρά κρισιμότητας των γραμμών προκύπτει και κατά την απώλεια της μονάδας IV της Μεγαλόπολης, όπως φαίνεται από το διάγραμμα του Σχήματος 5.40.α, ενώ από το ραβδόγραμμα του Σχήματος 5.40.β ως κρισιμότερη επιλέγεται πάλι η γραμμή 2, η αντιστάθμιση της οποίας επιφέρει αύξηση του περιθωρίου φόρτισης κατά 122 MW και στη συνέχεια η γραμμή 3 με αντίστοιχη αύξηση κατά 118 MW.

Στην περίπτωση απώλειας της γραμμής 400 kV γραμμής KYT Καρδιάς - KYT Τρικάλων από το διάγραμμα του Σχήματος 5.41.α προκύπτει ότι οι γραμμές 2 και 3 είναι οι κρισιμότερες, αρκετά χαμηλότερα εμφανίζονται οι γραμμές 1 και 6, ενώ όλες οι υπόλοιπες παρουσιάζουν τιμή ευαισθησίας μικρότερη του 0.2. Από το Σχήμα 5.41.β προκύπτει ότι η αντιστάθμιση σειράς αυτών των γραμμών προκαλεί τη μεγαλύτερη αύξηση του περιθωρίου φόρτισης κατά 110 MW.

Τέλος, στην περίπτωση απώλειας μιας μονάδας του ΑΗΣ Καρδιάς από το διάγραμμα του Σχήματος 5.42 διαπιστώνεται ότι το σύστημα θα στηριχτεί σε εισαγωγές ισχύος από τις βόρειες διασυνδέσεις, αφού οι γραμμές «Β» και «Γ» παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές ευαισθησίας ίσες με 1 και 0.8 αντίστοιχα, καθώς επίσης κι ότι αρκετές γραμμές 150 kV στην περιοχή της Βορείου Ελλάδας αποκτούν σημαντική τιμή ευαισθησίας.

A/A	Ονομασία Γραμμής Μεταφοράς 400 kV
1	ΚΥΤ Λάρισας – ΚΥΤ Λάρυμνας (διπλή γραμμή)
2	ΚΥΤ Αγ. Δημητρίου - ΚΥΤ Λάρισας
3	ΚΥΤ Καρδιάς – ΚΥΤ Λάρισας
4	ΚΥΤ Καρδιάς - ΚΥΤ Τρικάλων
5	ΚΥΤ Κουμουνδούρου - ΚΥΤ Διστόμου
6	ΚΥΤ Λάρυμνας - ΚΥΤ Αχαρνών
7	ΚΥΤ Τρικάλων - ΚΥΤ Διστόμου
8	ΚΥΤ Διστόμου - ΚΥΤ Αχελώου
9	ΚΥΤ Αγ. Στεφάνου - ΚΥΤ Παλλήνης (διπλή γραμμή)
10	ΚΥΤ Αχαρνών - ΚΥΤ Κουμουνδούρου
11	ΚΥΤ Αμυνταίου - ΚΥΤ Καρδιάς
12	ΚΥΤ Λάρυμνας - ΚΥΤ Διστόμου
13	ΚΥΤ Παλλήνης - ΚΥΤ Λαυρίου
14	ΚΥΤ Θεσσαλονίκης - ΚΥΤ Αγ. Δημητρίου
15	ΚΥΤ Παλλήνης - ΚΥΤ Αργυρούπολης
16	ΚΥΤ Αχελώου - ΚΥΤ Αράχθου
17	ΚΥΤ Αργυρούπολης- ΚΥΤ Λαυρίου
18	ΚΥΤ Αχαρνών - ΚΥΤ Αγ. Στεφάνου
19	ΚΥΤ Λαγκαδά - ΚΥΤ Αμυνταίου
20	ΚΥΤ Αγ. Δημητρίου - ΚΥΤ Καρδιάς
21	ΚΥΤ Φιλίππων - ΚΥΤ Λαγκαδά
22	ΚΥΤ Λάρυμνας - ΚΥΤ Αγ. Στεφάνου
23	ΚΥΤ Λαγκαδά -ΚΥΤ Θεσσαλονίκης
24	ΚΥΤ Αμυνταίου - ΚΥΤ Φλώρινας

Πίνακας 5.9: Γραμμές μεταφοράς 400 kV του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος.

Πίνακας 5.10: Ποσοστό αντιστάθμισης γραμμών μεταφοράς 400 kV με εγκατάσταση αντιστάθμισης σειράς 0.0075 α.μ.

A/A	Ονομασία Γραμμής Μεταφοράς 400 kV	ποσοστό αντιστάθμισης (%)
1	ΚΥΤ Λάρισας - ΚΥΤ Λάρυμνας (μία από τις δύο γραμμές)	47,2
2	ΚΥΤ Αγ. Δημητρίου - ΚΥΤ Λάρισας	59,1
3	ΚΥΤ Καρδιάς - ΚΥΤ Λάρισας	57,6
4	ΚΥΤ Καρδιάς - ΚΥΤ Τρικάλων	67,1
5	ΚΥΤ Κουμουνδούρου - ΚΥΤ Διστόμου	70,6
6	ΚΥΤ Λάρυμνας - ΚΥΤ Αχαρνών	97,7
7	ΚΥΤ Τρικάλων - ΚΥΤ Διστόμου	49,7
8	ΚΥΤ Διστόμου - ΚΥΤ Αχελώου	52,4
14	ΚΥΤ Θεσσαλονίκης - ΚΥΤ Αγ. Δημητρίου	68,6
19	ΚΥΤ Λαγκαδά - ΚΥΤ Αμυνταίου	57,5



Κανονική κατάσταση λειτουργίας του συστήματος

Σχήμα 5.35.α: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς στην κανονική λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 5.35.β: Αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση σειράς των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς στην κανονική λειτουργία του συστήματος.



Απώλεια μονάδας συνδυασμένου κύκλου (CC) ΛΑΥΡΙΟΥ

Σχήμα 5.36.α: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας CC Λαυρίου.



Σχήμα 5.36.β: Αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση σειράς των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας CC Λαυρίου.



Απώλεια μονάδας ΙΙ ΛΑΥΡΙΟΥ

Σχήμα 5.37.α: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας ΙΙ Λαυρίου.



Σχήμα 5.37.β: Αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση σειράς των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας ΙΙ Λαυρίου.



Απώλεια μονάδας ΙΧ (μεγάλης) ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Σχήμα 5.38.α: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας ΙΧ (μεγάλης) Αγ. Γεωργίου.



Σχήμα 5.38.β: Αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση σειράς των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας ΙΧ (μεγάλης) Αγ. Γεωργίου.



Απώλεια μονάδας VIII (μικρής) ΑΓ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Σχήμα 5.39.α: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας VIII (μικρής) Αγ. Γεωργίου.



Σχήμα 5.39.β: Αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση σειράς των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας VIII (μικρής) Αγ. Γεωργίου.



Απώλεια μονάδας ΙV ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ

Σχήμα 5.40.α: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας ΙV Μεγαλόπολης.



Σχήμα 5.40.β: Αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση σειράς των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας ΙV Μεγαλόπολης..



Απώλεια γραμμής 400kV ΚΥΤ Καρδιάς - ΚΥΤ Τρικάλων

Σχήμα 5.41.α: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της γραμμής 400 kV KYT Καρδιάς - KYT Τρικάλων.



Σχήμα 5.41.β: Αύξηση του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση σειράς των κρίσιμων γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της γραμμής 400 kV KYT Καρδιάς - KYT Τρικάλων.



Απώλεια μονάδας ΙV Καρδιάς

Σχήμα 5.42: Ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς κατά την απώλεια της μονάδας IV Καρδιάς.

5.4.5. Συμπεράσματα από την εφαρμογή των μεθοδολογίας των ευαισθησιών

- Από την εφαρμογή των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης στην εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης αντιστάθμισης σειράς, που αναπτύσσεται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, επιλέγονται με επιτυχία οι κρίσιμες γραμμές των οποίων η αντιστάθμιση σειράς επιφέρει τη μεγαλύτερη αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος. Από όλες τις εξεταζόμενες διαταραχές προκύπτει ότι οι γραμμές αυτές παρουσιάζουν κανονικοποιημένη τιμή ευαισθησίας μεγαλύτερη του 0.5.
- Η σειρά κρισιμότητας των γραμμών μεταφοράς που προκύπτει από τις κανονικοποιημένες τιμές των ευαισθησιών είναι, σε μεγάλο βαθμό, σε συμφωνία με τη σειρά εμφάνισης κατά φθίνουσα κλίμακα των γραμμών μεταφοράς ως προς την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος μετά την αντιστάθμιση σειράς αυτών.
- Από τα διαγράμματα των ευαισθησιών προκύπτει μια πλήρης εικόνα για την κρισιμότητα όλων των γραμμών μεταφοράς 400 και 150 kV. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η εύρεση των κρίσιμων γραμμών καθώς και τοπικών προβλημάτων του συστήματος. Έτσι, για παράδειγμα, στην περίπτωση απώλειας της μονάδας συνδυασμένου κύκλου του ΑΗΣ Λαυρίου καθώς και της μονάδας του ΑΗΣ Καρδιά, η γραμμή "Θ" (γραμμή 150 kV Ίασμος-ΚΥΤ Λαγκαδά) παρουσιάζει μεγάλο δείκτη ευαισθησίας. Αυτή η διαπίστωση είναι σε συμφωνία με το γεγονός ότι ο Υ/Σ Ιάσμου, αυτή τη στιγμή, είναι κομβικό σημείο στο σύστημα ανατολικά των Φιλίππων, μέσω του οποίου διακινείται όλη η ισχύς προς την περιοχή της Ανατολικής Θράκης [186].
- Από την άποψη της συμβολής της αντιστάθμισης σειράς των προτεινόμενων από τη μεθοδολογία κρίσιμων γραμμών μεταφοράς στην αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος, προκύπτει

ότι στην κανονική λειτουργία και στην περίπτωση απώλειας της μονάδας συνδυασμένου κύκλου του ΑΗΣ Λαυρίου η αύξηση του περιθωρίου φόρτισης δεν είναι σημαντική. Αντίθετα, στις υπόλοιπες εξεταζόμενες διαταραχές το περιθώριο φόρτισης του συστήματος αυξάνει από 80 έως 130 MW.

5.4.6. Σύγκριση με τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας των Δένδρων Απόφασης

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας υπολογισμού των ευαισθησιών με την προτεινόμενη μεθοδολογία χρήσης των δένδρων απόφασης, που παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.3, προκύπτει ότι οι δύο μεθοδολογίες αναδεικνύουν τις ίδιες κρίσιμες γραμμές μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα, για τις εξεταζόμενες διαταραχές 1 έως και 5 του Πίνακα 5.2 (απώλεια μονάδων CC και ΙΙ Λαυρίου, ΧΙ και VII Αγ. Γεωργίου και V Μεγαλόπολης) και οι δύο μεθοδολογίες επιλέγουν ως σημαντικότερες τις γραμμές 2,3 και 4 με αυτή τη σειρά κρισιμότητας. Στη συνέχεια επιλέγονται οι γραμμές 5,6,7 και 1 από τη μεθοδολογία των ΔΑ και 7,1,5 και 6 από τη μεθοδολογία των ευαισθησιών. Τέλος, για τη διαταραχή 6 (απώλεια της γραμμής 400 kV KYT Καρδιάς - KYT Τρικάλων) και οι δύο μεθοδολογίες επιλέγουν ως σημαντικότερες τις γραμμές 2 και 3.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι, συγκρίνοντας τις τιμές αύξησης του περιθωρίου φόρτισης από την αντιστάθμιση των προτεινόμενων από τις δύο μεθοδολογίες κρίσιμων γραμμών μεταφοράς (δηλ. τις τιμές στον Πίνακα 5.8 με τις αντίστοιχες τιμές στα Σχήματα 5.36.β έως και 5.41.β, η διαφορά που προκύπτει οφείλεται στο γεγονός ότι στη μεθοδολογία ευαισθησιών χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος πυκνωτής σειράς για όλες τις γραμμές μεταφοράς (τα αντίστοιχα ποσοστά αντιστάθμισης των γραμμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10), ενώ στη μεθοδολογία των ΔΑ χρησιμοποιήθηκε το ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισης που προέκυψε από τα αναπτυχθέντα δένδρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και οι μεγάλες δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι ηλεκτρικές εταιρείες στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς, υποσταθμών και σταθμών παραγωγής λόγω του τεράστιου κόστους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων έχουν εντείνει διεθνώς τις ερευνητικές προσπάθειες για την εξεύρεση τρόπων εντατικότερης εκμετάλλευσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, έχει δημιουργηθεί η τάση για ολοένα και περισσότερο ελεγχόμενη λειτουργία του συστήματος. Σε αυτές τις νέες απαιτήσεις μπορούν να συμβάλουν αποτελεσματικά οι συσκευές FACTS. Η ελεγχόμενη αντιστάθμιση σειράς (Thyristor Controlled Series Compensation–TCSC) συγκαταλέγεται σε αυτές τις συσκευές.

Στόχος της παρούσας διατριβής είναι μία λεπτομερής και σε βάθος προσέγγιση θεμάτων που σχετίζονται με την αντιστάθμιση σειράς και κυρίως με την ελεγχόμενη αντιστάθμιση σειράς

Στα πλαίσια αυτά, το πρώτο μέρος της παρούσας διατριβής επικεντρώνεται σε θέματα ανάλυσης, που αφορούν τη λειτουργία της ελεγχόμενης αντιστάθμισης καθώς και διαφόρων φαινομένων που εμφανίζονται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όπου εγκαθίστανται οι διατάξεις αυτές. Πιο συγκεκριμένα:

Αναλύεται λεπτομερώς η λειτουργία της διάταξης ελεγχόμενης αντιστάθμισης σειράς και διατυπώνονται οι αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις που την περιγράφουν.

Προσομοιώνεται η συμπεριφορά των διατάξεων προστασίας και παράκαμψης των πυκνωτών σειράς κατά την εμφάνιση συμμετρικών και ασύμμετρων σφαλμάτων στο σύστημα και επιβεβαιώνεται ότι οι σύγχρονες αυτές διατάξεις έχουν τη δυνατότητα γρήγορης παράκαμψης και επανένταξης των πυκνωτών στο σύστημα χωρίς την εμφάνιση μεταβατικών φαινομένων, ενώ μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα σε κάθε φάση στην περίπτωση ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων.

Στο πρόγραμμα EMTP/ATP αναπτύσσεται κατάλληλο ψηφιακό μοντέλο TCSC, το οποίο περιλαμβάνει τόσο το κύκλωμα ισχύος όσο και τον έλεγχο της διάταξης με χρήση των MODELS. Η ορθότητα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης επιβεβαιώνεται μετά από σύγκριση με τις αντίστοιχες κυματομορφές που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία. Το εν λόγω μοντέλο έχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης επιπρόσθετων μοντέλων ελέγχου της διάταξης. Έτσι, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, ενσωματώνεται σε αυτό, ως υπερτιθέμενος έλεγχος, μοντέλο ελέγχου για την ανίχνευση και απόσβεση του φαινομένου υποσύγχρονου συντονισμού. Με τον έλεγχο αυτό, διαπιστώνεται ότι το TCSC μπορεί να συμβάλει στην απόσβεση πιθανών υποσύγχρονων ταλαντώσεων, που μπορεί να εμφανιστούν στο σύστημα που εγκαθίσταται.

Αναπτύσσονται κατάλληλα ψηφιακά μοντέλα ελεγχόμενης αντιστάθμισης σειράς (TCSC) και ελεγχόμενου ρυθμιστή φασικής γωνίας (TCPAR) για τον έλεγχο της ροής ενεργού ισχύος γραμμής μεταφοράς, τα οποία ενσωματώνονται στο πρόγραμμα ροής φορτίου GINA και διερευνάται η επίδρασή τους σε μοντέλο του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς. Από τα εξετασθέντα σενάρια προκύπτει ότι το TCSC έχει ελαφρώς μεγαλύτερη επίδραση στη βελτίωση του προφίλ τάσεων και τη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος από τον TCPAR. Συγκεκριμένα, όταν η ελεγχόμενη αντιστάθμιση σειρά λειτουργεί σε καταστάσεις (N-1) μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση του προφίλ των τάσεων σε ποσοστό 11÷14% και ελαφρώς στη μείωση των απωλειών ενεργού

ισχύος, ενώ η συμβολή της γίνεται σημαντική σε περιπτώσεις (N-2), όπου αντίστοιχα μπορεί να βελτιώσει το προφίλ της τάσης έως 38% και να μειώσει τις απώλειες ενεργού ισχύος έως 6%.

Αναπτύσσεται μεθοδολογία προσδιορισμού των βασικών παραμέτρων σχεδίασης μιας διάταξης TCSC. Με βάση τη μεθοδολογία αυτή, σχεδιάζεται εργαστηριακό μοντέλο TCSC, το οποίο εγκαθίσταται στο εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ. Η σύγκριση των κυματομορφών που λαμβάνονται από την εργαστηριακή διάταξη με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο ΕΜΤΡ επιβεβαιώνει τόσο την ορθότητα της παραπάνω μεθοδολογίας όσο και τη σωστή λειτουργία του εργαστηριακού μοντέλου.

Τέλος, διερευνώνται διεξοδικά τόσο οι αρμονικές που αναπτύσσονται εντός του TCSC όσο και αυτές που εγχέονται στο σύστημα. Τα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από τις μετρήσεις στο εργαστηριακό μοντέλο TCSC. Έτσι, επιβεβαιώνεται ότι το TCSC δεν προκαλεί έγχυση αρμονικών στο σύστημα πάνω από τα επιτρεπτά, από τους κανονισμούς, όρια και συνεπώς δεν απαιτούνται επιπρόσθετα μέτρα, όπως φίλτρα απορρόφησης αρμονικών. Επίσης, διερευνάται η επίδραση παραμέτρων (όπως η τιμή της αυτεπαγωγής L που συνδέεται παράλληλα προς τον πυκνωτή της διάταξης) στις αναπτυσσόμενες αρμονικές εντός της διάταξης. Από τη διερεύνηση προκύπτει ότι η αύξηση της τιμής του L, όχι μόνο συμβάλλει στην αύξηση της περιοχή χωρητικής λειτουργίας του TCSC, αλλά και στη μείωση του αρμονικού περιεχομένου της τάσης στα άκρα του πυκνωτή με αποτέλεσμα την αποφυγή της γήρανσης ή καταστροφής του.

Τα τελευταία χρόνια η έρευνα έχει προσανατολιστεί στην ανάπτυξη μεθοδολογιών για την εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης συσκευών FACTS, δηλαδή την εύρεση των κρίσιμων γραμμών για εγκατάσταση διατάξεων αντιστάθμισης σειράς ή των πιο κρίσιμων ζυγών για εγκατάσταση εγκάρσιας αντιστάθμισης με στόχο την αντιμετώπιση διαφόρων προβλημάτων ή τη βελτίωση της λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό, το δεύτερο μέρος της παρούσας διατριβής εστιάζεται στο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης θέσης εγκατάσταση διατάξεων αντιστάθμιση της ευρεσης βέλτιστης σειράς των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό, το δεύτερο μέρος της παρούσας διατριβής εστιάζεται στο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης θέσης εγκατάσταση διατάξεων αντιστάθμισης σειράς με στόχο την ενίσχυση της ευστάθειας τάσης του συστήματος. Το βασικό κριτήριο για το σκοπό αυτό είναι η εύρεση των κρίσιμων γραμμών, των οποίων η αντιστάθμιση σειράς έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος μετά από κρίσιμες διαταραχές. Πιο συγκεκριμένα:

Τα Δένδρα Απόφασης (ΔΑ), όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία, έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα προβλήματα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά όχι συστηματικά για την εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης συσκευών FACTS σε αυτά. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, αναπτύσσεται μεθοδολογία εφαρμογής της τεχνικής των ΔΑ για την εύρεση των κρίσιμών γραμμών για εγκατάσταση διατάξεων αντιστάθμισης σειράς. Πιο συγκεκριμένα, διερευνώνται τόσο οι παράμετροι του συστήματος που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη δημιουργία της βάσης γνώσης ώστε να δημιουργηθούν ΔΑ με τη μεγαλύτερη δυνατή πληροφορία και το μικρότερο αριθμό κόμβων, όσο και το καταλληλότερο σημείο λειτουργίας του συστήματος όπου πρέπει να δημιουργηθεί η βάση αυτή. Από τα αναπτυχθέντα ΔΑ προκύπτουν όχι μόνο οι κρίσιμες γραμμές για αντιστάθμιση σειράς, αλλά και το ελάχιστο απαιτούμενο ποσοστό αντιστάθμισης αυτών με στόχο την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης τιυ συστήματος.

Επίσης, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, η γενική ιδέα της ευαισθησίας του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος μέχρι την κατάρρευση ως προς τις παραμέτρους του συστήματος [109,110] εφαρμόζεται για την εύρεση των κρίσιμων γραμμών, μετά από επιλεγμένες διαταραχές, θεωρώντας ως παραμέτρους του συστήματος την επαγωγική αντίδραση των γραμμών μεταφοράς. Ο υπολογισμός των ευαισθησιών βασίζεται στην εύρεση της μικρότερης ιδιοτιμής και του αντίστοιχου αριστερού ιδιοδιανύσματος του Ιακωβιανού πίνακα του εξισώσεων ισορροπίας του συστήματος για φορτίσεις οριακά μικρότερες του σημείου μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ταξινόμηση όλων των γραμμών μεταφοράς ως προς την κρισιμότητά τους. Η αντιστάθμισης σειράς των πιο σημαντικών από αυτές δίνει την τελική επιλογή της βέλτιστης γραμμής, όπου θα εγκατασταθεί πυκνωτής σειράς με στόχο την ενίσχυση της ευστάθειας τάσης του συστήματος.

Η εφαρμογή των δύο παραπάνω μεθοδολογιών στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς μετά από κρίσιμες (N-1) διαταραχές, οδηγεί στην επιλογή των ίδιων κρίσιμων γραμμών μεταφοράς και πιο συγκεκριμένα των γραμμών 400 kV "KYT Aγ. Δημητρίου – KYT Λάρισας" και "KYT Καρδιάς – KYT Λάρισας". Η αντιστάθμιση σειράς των γραμμών αυτών στη μόνιμη λειτουργία του συστήματος καθώς και κατά την απώλεια της μονάδας συνδυασμένου κύκλου του Λαυρίου δεν επιφέρει σημαντική αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος. Αντίθετα, στην περίπτωση απώλειας άλλων κρίσιμων μονάδων (μονάδα ΙΙ Λαυρίου, μονάδες VII και ΙΧ του Αγ. Γεωργίου, μονάδα ΙV της Μεγαλόπολης) καθώς και μιας γραμμής 400 kV Βορρά-Νότου, η αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του δυστήματος.

Από τη σύγκριση των δύο μεθοδολογιών προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα ως προς τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθεμιάς από τις προτεινόμενες μεθοδολογίες:

Ανάπτυξη κατάλληλων ΔΑ για την εύρεση βέλτιστης θέσης αντιστάθμισης σειράς

- Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας δεν απαιτούνται σύνθετες αναλυτικές μέθοδοι ανάλυσης. Είναι αρκετή η κλασική προσομοίωση ροής φορτίου.
- Μολονότι είναι απαραίτητη η προσομοίωση ενός μεγάλου αριθμού σημείων λειτουργίας του συστήματος για τη δημιουργία της βάσης γνώσης, με τα σημερινά υπολογιστικά συστήματα ο χρόνος που απαιτείται είναι σχετικά μικρός. Έτσι, για παράδειγμα, ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία μιας βάσης γνώσης 1000 ΣΛ για μια διαταραχή, είναι της τάξης της μιάμισης ώρας στο υπολογιστικό σύστημα Sun-Ultra 5 με επεξεργαστή Sparc 350 MHz και μνήμη 128 MB.
- Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου σε σχέση με αυτή του υπολογισμού των ευαισθησιών είναι ότι από τα δένδρα απόφασης προκύπτει, εκτός από τη σειρά κρισιμότητας των γραμμών και το ελάχιστο ποσοστό αντιστάθμισης των γραμμών αυτών.
- Σημαντικό, επίσης, είναι ότι η μεθοδολογία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε σημεία πολύ κοντά στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (χωρίς να είναι απαραίτητο η ακριβής προσέγγιση σε σημείο σαγματικού κόμβου) ή σε οποιοδήποτε άλλο σημείο λειτουργίας, όπου το σύστημα παρουσιάζει πρόβλημα.
- Ως μειονέκτημα της μεθοδολογίας θα μπορούσε να αποτελέσει το γεγονός ότι, η επιλογή των υποψήφιων ιδιοτήτων (δηλαδή των υποψήφιων παραμέτρων του συστήματος των οποίων η επίδραση διερευνάται στο εξεταζόμενο πρόβλημα), είναι απαραίτητη μεν προκειμένου να μειωθεί η πολυπλοκότητα και το μέγεθος των δένδρων απόφασης, μπορεί όμως να μην καλύπτει όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις και κατά συνέπεια υπάρχει πιθανότητα να διαφύγουν κάποιες πληροφορίες ως προς τις κρίσιμες παραμέτρους του συστήματος.

Υπολογισμός των ευαισθησιών για την εύρεσης βέλτιστης θέσης αντιστάθμισης σειράς

- Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας των ευαισθησιών απαιτείται η λεπτομερής προσομοίωση του συστήματος με κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα, ώστε να είναι δυνατή η προσέγγιση στο σημείο όπου ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος γίνεται ιδιόμορφος.
- Με την επιλογή της επαγωγικής αντίδρασης των γραμμών μεταφοράς ως παραμέτρους για τον υπολογισμό της ευαισθησίας του περιθωρίου φόρτισης ως προς αυτές, προκύπτει η σειρά κρισιμότητας όλων των γραμμών μεταφοράς του συστήματος για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή, με αποτέλεσμα να υπάρχει μία πλήρης εικόνα για το σύστημα. Έτσι, είναι δυνατόν να εντοπιστούν περιπτώσεις γραμμών που είναι κρίσιμες μόνο σε συγκεκριμένες διαταραχές. Σε σύγκριση, όμως με τη μεθοδολογία των ΔΑ, δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί το βέλτιστο ποσοστό αντιστάθμισης σειράς τρων κρίσιμων γραμμών.

- Η μεθοδολογία αυτή ουσιαστικά αναδεικνύει τις κρίσιμες διαδρομές, χωρίς να περιορίζει το μελετητή ως προς τη μέθοδο ενίσχυσης της διαδρομής αυτής. Είναι, κατά συνέπεια, στην κρίση του, με βάση τεχνοοικονομικά κριτήρια, να επιλέξει την αντιστάθμιση σειράς της γραμμής αυτής ή την αναβάθμισή της ή την κατασκευή επιπλέον παράλληλης γραμμής.
- Η μεθοδολογία αυτή ουσιαστικά αναδεικνύει τους κρίσιμους κλάδους και συνεπώς είναι δυνατή η εφαρμογή της, με μικρές τροποποιήσεις, για τον υπολογισμό της ευαισθησίας του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος και ως προς άλλα στοιχεία του συστήματος, όπως η επαγωγική αντίδραση των αυτομετασχηματιστών στα Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (KYT) και των μετασχηματιστών στους υποσταθμούς, προκειμένου να αναδειχθούν σημεία που απαιτείται επαύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των στοιχείων αυτών.

Μελλοντικές προοπτικές επέκτασης της παρούσας διατριβής μπορούν να αποτελέσουν τα ακόλουθα:

- Ενσωμάτωση στο ψηφιακό μοντέλο TCSC, που αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα EMTP/ATP, ελέγχου του ρεύματος ή της ισχύος της γραμμής μεταφοράς όπου εγκαθίσταται, με στόχο την ενίσχυση της μεταβατικής ευστάθειας ή την απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος ή και άλλων νέων τεχνικών ελέγχου.
- Διερεύνηση της συμπεριφοράς των διατάξεων TCSC και TCPAR στην αντιμετώπιση ταλαντώσεων ισχύος στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα σε σενάρια μεγάλης εισαγωγής ισχύος από Βορρά και Ιταλία, κατά το άνοιγμα διακοπτών στις βόρειες διασυνδετικές γραμμές [186].
- Περαιτέρω αξιοποίηση του εργαστηριακού μοντέλου TCSC, για δυναμικό έλεγχο ή για δοκιμή νέων τεχνικών ελέγχου όπως, για παράδειγμα, σε ακτινικά δίκτυα διανομής, καθώς έχει τη δυνατότητα να δεχτεί σήματα από εξωτερικό σύστημα ελέγχου.

Όσον αφορά στις δύο προτεινόμενες μεθοδολογίες προσδιορισμού της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης αντιστάθμισης σειράς, αυτές μπορούν μελλοντικά να επεκταθούν ως εξής:

- Η μεθοδολογία των Δένδρων Απόφασης μπορεί, με μικρές τροποποιήσεις, να εφαρμοστεί στην εύρεση των κρίσιμων ζυγών για εγκάρσια αντιστάθμιση και τον προσδιορισμό της βέλτιστης τιμής επαγωγικής ή χωρητικής αέργου ισχύος που απαιτείται να εγκατασταθεί εκεί. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ίδιος αλγόριθμος δημιουργίας του συνόλου μάθησης και το ίδιο κριτήριο ταξινόμησης σε κλάσεις, όπως χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή. Η διαφορά σε σχέση με τα αναπτυχθέντα ΔΑ θα έγκειται στο γεγονός ότι σε κάθε ζυγό θα αυξάνεται κατά ένα σταθερό γνωστό ποσό η άεργος (επαγωγική ή χωρητική) ισχύς μέσω ενός εγκάρσιου πηνίου ή πυκνωτή αντίστοιχα, οπότε ως ιδιότητες στα ΔΑ θα χρησιμοποιηθούν η άεργος ισχύς συνδεδεμένη εγκάρσια στους ζυγούς αυτούς. Με τον τρόπο αυτό, από τα αναπτυχθέντα δένδρα απόφασης θα γίνεται η επιλογή των πλέον κρίσιμων ζυγών καθώς και της τιμής της απαιτούμενης αέργου ισχύος, που καλύπτει όλες τις εξεταζόμενες διαταραχές.
- Ο υπολογισμός των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος μπορεί να επεκταθεί ώστε να υπολογίζονται και οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς την επαγωγική αντίδραση των αυτομετασχηματιστών στα ΚΥΤ και των μετασχηματιστών στους υποσταθμούς, έτσι ώστε να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς. Ενδιαφέρον, επίσης παρουσιάζει η διερεύνηση του υπολογισμού των ευαισθησιών και στην περίπτωση όπου τα φορτία του συστήματος δεν είναι μοντελοποιημένα ως φορτία σταθερής ισχύος, αλλά εξαρτώνται και από την τάση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Y. Sekine, "Pressure to increase utilization of existing transmission systems, opposition to system expansion plans", Electra No 152, February 1994.
- [2] Β.Κ. Παπαδιάς, "Ανάγκη & Δυνατότητες Αναβάθμισης των Δικτύων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας", Δελτίο Π.Σ.Δ.Μ.-Η., Νοέμβριος 1995.
- [3] B.C. Papadias, "Use of FACTS Technology in obtaining more Effective Networks", ELMEKSEM '97, Conference, Bursa, Turkey, 14-17 Dec. 1997.
- [4] J.F. Christensen, "New control strategies for utilizing power system network more effectively", Electra, No 173, April 1997.
- [5] N.G. Hingorani, "High Power Electronics and Flexible AC Transmission Systems", IEEE Power Engineering Review, July 1988.
- [6] N.G. Hingorani: "Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems", Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 4, pp. 481-482, Apr. 1988.
- [7] N.G. Hingorani, "Flexible ac Transmission", IEEE Spectrum, April 1993.
- [8] N.G. Hingorani, L Gyugyi, "Understanding FACTS-Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", New York IEEE Press, 2000.
- [9] IEEE Task force, "Proposed terms and definitions for flexible AC transmission System (FACTS)", IEEE Trans. actions on Power Delivery, Vol.12, No.4, October 1997.
- [10] "FACTS device applications and modelling", EPRI, Palo Alto. CA, Rep- TR-103906, Jun. 1994.
- [11] "FACTS: Scoping study", vol. 1, pan I, EPRI, Rep. EL-6943, Aug. 1990.
- [12] "FACTS: Scoping study", vol. 2, part 1, EPRI, Rep. EL-6943, Sep. 1991.
- [13] "FACTS: System studies to assess FACTS device requirements on the Southern Electric System", EPRI, Rep. TR-103168, Dec. 1993.
- [14] "FACTS: System studies to assess FACTS device requirements on the Florida Power & Light Co. System", EPRI, Rep. TR-103167, Dec. 1993.
- [15] "FACTS: Application of thyristor controlled series capacitors in New York State", EPRI, Rep. TR-103641, Dec. 1993.
- [16] "An evaluation of a thyristor controlled phase angle regulator application in the Minnesota Power Transmission System," EPRI, Rep. TR-101932, May 1993.
- [17] "FACTS device benefit assessment studies on Commonwealth Edison's Power System," vols. 1 and 2, EPRI, Rep. TR-101933, Apr. 1993.
- [18] "Evaluation of FACTS technology to improve first-swing stability: TVA's Cumberland Plant", EPRI, Rep. TR-103164, Dec. 1993.
- [19] D.N. Ewart, RJ. Koessler, J.D. Mountford. D. Maratukulam, "Investigation of FACTS Options to Utilize the Full Thermal Capacity of AC Transmission", a paper presented at an EPRI Workshop, The Future in High-Voltage Transmission; Flexible AC Transmission System (FACTS). 14-16 November, 1990, Cincinnati, Ohio.

- [20] G.D. Breuer, "Flexible AC Transmission Scoping Studies", a paper presented at an EPRI Workshop, The Future, in High-Voltage Transmission - Flexible AC Transmission System (FACTS), November 14.16,1990 Cincinnati,Ohio.
- [21] J. Paserba and E. Larsen, "A Stability Model for Thyristor -Controlled Series Compensation (TCSC)", Presented at the EPRI Flexible AC Transmission Systems Conference, Boston, Mass. 18 – 20 May, 1992.
- [22] CIGRE TF 38-01-06, "Load Flow Control in High Voltage Systems Using FACTS Controllers", October 1995.
- [23] CIGRE TF 38-01-08, "Modelling of Power Electronics Equipment (FACTS) in Load Flow and Stability Programs", August 1999.
- [24] A. Edris, "FACTS Technology Development: An Update", IEEE Power Engineering Review, March 2000.
- [25] R. Adapa, "FACTS System studies", IEEE Power Engineering Review, December 2002.
- [26] IEEE WG on Dynamic Performance and Modeling of HVDC and Power Electronics for Transmission Systems, "Review of Electromagnetic Transient Models for Non-VSC FACTS", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No.2, April 2005.
- [27] N. G. Hingorani, "Role of FACTS in a Deregulated Market", IEEE WM 2000.
- [28] CIGRE Joint Working Group 14/37/38/39.24 "FACTS Technology for Open Access", Electra, No 195, April 2001.
- [29] CIGRE Joint Working Group 14/37/38/39.24 "FACTS Technology For Open Access", Technical Report 183, April 2001.
- [30] G. Gampenrieder, B.Gick, T. Weβ, M. Hausler, J. Rittiger, W. Glaunsinger, U. Zimmermann, "Load-flow Control in EHV Networks. Feasibility Study on the Possibilities of Application of FACTS Elements in the German Power System", CIGRE paper 14-110, 1998 Session.
- [31] R. Adapa, K. Madajewski, R. Jankowski, M. Kula, Z. Maciejewski, "Application of FACTS Technology for Power Flow Control in the Polish Power Grid", presented at IEEE WM2000, Singapore.
- [32] A. Davriu, P. Mallet, P. Pramayon, "Evaluation of FACTS Functionalalities within the Planning of the Very High Voltage Transmission Network; the EDF Approach", IEEE/KTH Stockholm Power Tech. Conference, June 18-22, 1995.
- [33] R. Criado, L. Rouco, J.M. Rodriguez, M. Noroozian, "Improvement of the Dynamic Performance of the Spanish Power System with FACTS Devices", CIGRE paper 14-109, 1998 Session.
- [34] Y. Sekine, T. Hayashi, K. Abe, Y. Inoue, S. Horiuchi, "Application of power electronics technologies to future interconnected power system in Japan", CIGRE Tokyo Symposium 210-03, May 1995.
- [35] E.W. Kimbark, "Improvement of System Stability by Switched Series Capacitors" IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-85, February 1966, pp. 180-188.
- [36] G. Jancke, N. Fahlen and O. Nerf, "Series capacitors in Power Systems" IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, No.3, May/June 1975, pp.915-925.
- [37] J. A. Maneatis, E. J. Hubacher, W. N.Rothenbuhler and J. Sabath, "500KV Series Capacitor Installation in California", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, pp. 1138-1149.

- [38] A.L.Courts, N.G.Hingorani, G.E. Stemler, "A New Series Capacitor Protection Scheme using Nonlinear Resistors", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No 4, July/Aug 1978, pp. 1042-1052.
- [39] A.L. Courts and E.C. Starr, "Experience with 500 KV Series Capacitor Installations and New Protection Schemes on BPA System", CIGRE paper 31-09, 1980 Session.
- [40] R. Allustiarti, H.Hoexter, P. Lai, J Samuelsson, P. Lindberg, R. G. Rocamora, "Design and Operating Performance of 500-kV Metal-Oxide-Protected Series-Capacitor Banks on the Table Mountain-Tesla Line", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, pp. 1951-1957, October 1988.
- [41] J.M Barcus, S.A. Jr. Miske, A.P. Vitols, H.M. Maynard, W.G. Peterson, "The varistor protected series capacitors at the 500 kV Broadview substation", Trans. on Power Delivery, IEEE Volume 3, No 4, October 1988, pp. 1976 – 1985.
- [42] G.E. Lee, D.L. Goldsworthy, "BPA's pacific AC Intertie series capacitors: Experience, Equipment & Protection", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No 1, January 1996.
- [43] A.J.F. Keri, R.A. Byron, B.J. Ware, A.S. Mehraban, M.Chamia, P. Halvarsson, L. Angquist, "Improving Transmission System performance Using Controlled Series Capacitors", CIGRE paper 14/37/38-07, 1992 Session.
- [44] P.E. Krause, R. Johnson, A. Montoya, R. Hedin, N. Christl, "Power System Studies and Modelling for the Kayenta 230 kV Substation Advanced Series Compensation", IEE 5th International Conference on AC and DC Power Transmission, pp.33-37, London 1991.
- [45] N. Christl, R. Hedin, P.E. Krause, S.M. McKenna, "Advanced Series Compensation (ASC) with Thyristor Controlled Impedance", CIGRE paper, 14/37/38-05, Session 1992.
- [46] J.Urbanek, R.J. Piwko, E.V. Larsen, B.L. Damsky, B.C. Furumasu, W. Mittlestadt, J.D. Edan, "Thyristor Controlled Series Compensation - Prototype Installation at the Slatt 500 kV Substation, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No3, July 1993.
- [47] S.J. Kinney, M.A. Reynolds, J.F. Hauer, R.J. Piwko, B.L. Damsky, J.D. Eden, "SLATT Thyristor Controlled Series Capacitor System Test Results", CIGRE Symposium Tokyo 1995.
- [48] E. Larsen, C. Bowler, B. Damsky, S. Nilsson, "Benefits of Thyristor-Controlled Series Compensation", CIGRE paper 14/37/38-04, Session 1992.
- [49] E.V. Larsen, K. Clark, S.A. Miske, J. Urbanek, "Characteristics an Rating Considerations of Thyristor Controlled Series Compensation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp. 992-1000, April 1994.
- [50] S.G. Helbing, G.G. Karady, "Investigations of an Advanced Form of Series Compensation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994, pp. 939-947.
- [51] D.N. Kosterev, W.A. Mittelstadt, R.R. Mohler, W.J. Kolodziej, "An Application Study for Sizing and Rating Controlled and Conventional Series Compensation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.11, No.2, April 1996.
- [52] J. Matsuki, K. Ikeda, M. Abe, " A Laboratory Scale Thyristor Controlled Series Capacitor", T. IEE Japan, Vol.. 116-B, No 11, 1996.
- [53] Y. Tang, H. F. Wang, A. T. Johns, H. Chen, N. H. Li, " Dynamic Simulator of Thyristor Controlled Series Capacitor in a UHV Transmission System", IEEE Power Tech' 99 Conference, Budapest, Hungary, Aug 29 - Sep 2, 1999.
- [54] K. Matsuno et al., "Analogue Simulation Studies with Actual Controllers for FACTS Equipment", CIGRE paper 14-104, Session 1998.

- [55] S. Nyati, C.A. Wegner, R.W. Delmerico, R.J. Piwko, D.H. Baker, A. Edris, "Effectiveness of thyristor controlled series capacitor in enhancing power system dynamics: an analog simulator study", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, Issue 2, April 1994, pp. 1018 – 1027.
- [56] Y. Tanaka, H. Taniguchi, M. Egawa, H. Fujita, M. Watanabe, H. Konishi, "Using a miniature model and EMTP simulations to evaluate new methods to control and protect a thyristor-controlled series compensator", IEEE PES 1999 Winter Meeting, pp.1196-1201.
- [57] Y. Tang, H. Chen, H. F. Wang, R. Aggarwal, A. T. Johns, X. Z. Dai, N. H. Li, "Implementation and Test of a TCSC ANN-based αth Order Inverse Control System", Electric Power Systems Research 25 (2003), pp. 309 -317.
- [58] S. Jalali, R. Rajaramam. Aj. Agronquist, R. Lasseter, I. Dobson, W. Sethares, "Analysis of TCSC Controllers" EPRI, Final Report on projects RP 8030-02, 8030-03, 8030-04, June 1996.
- [59] CIGRE Working Group 14.18 "Thyristor Controlled Series Compensation", Technical Report 123, December 1997.
- [60] P.M. Anderson, R.G. Farmer, "Series Compensation of Power Systems", PBLSH!Inc., 1996.
- [61] N. Noroozian, G. Andersson, "Power Flow Control by Use of Controllable Series Components", IEEE Trans, on Power Systems, Vol. 8, No.3, July 1993, pp. 1420-1429.
- [62] J.J. Paserba, N. W. Miller, E.V. Larsen, R.J. Piwko, "A Thyristor Controlled Series Compensation Model for Power System Stability Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No 3, July 1995.
- [63] S.G. Jalali, R.A. Hedin, M. Pereira, K. Sadek, "A Stability Model for the Advanced Series Compensator (ASC)", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No, April 1996.
- [64] P.S. Dolan, J.R. Smith, W.A. Mittelstadt, "A Study of TCSC Optimal Damping Control Parameter for Different Operating Conditions", IEEE Power Delivery Vol.10, No.4, Nov. 1995.
- [65] N. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, G. Andersson, "Improving Power System Dynamics by Series-Connected FACTS devices", IEEE Trans, on Power Delivery, Vol. 12, No. 12, October 1997, pp. 1635-1641.
- [66] C. Gama, R. Leoni, J. Griber, R. Fraga, M. Eiras, W. Ping, A. Ricardo, J. Cavalcanti, R. Tenorio, "Brazilian North-South Interconnection-Application of Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC) to Damp Inter-area Oscillation mode", CIGRE, paper 14-101, 1998 Session.
- [67] J. Liang, J.B. Guo, X.X. Zhou, "Analysis of the Yimin-Fengtun 500 kV TCSC on the northeast China power system", IFAC/CIGRE Symposium on Control of Power Systems and Power Plants, CPSPP'97, Beijing, China, 1997.
- [68] YU Chi-Shan, Liu Chih Wen, "A practical design of TCSC controllers for the inter-area transient stability control using real-time measurements", IEEE PES Winter Meeting, 1999, Vol.1, pp. 661 - 666, 31 Jan.-4 Feb. 1999.
- [69] K.M.Son, J.K.Park, "On the robust LQG control of TCSC for damping power system oscillations", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.15, No.4, pp. 1306-1312, November 2000.
- [70] A.D. Del Rosso, C.A. Canizares, V.M. Dona, "A study of TCSC controller design for power system stability improvement", IEEE Trans. on Power Systems Volume: 18, Issue: 4, Nov. 2003, pp. 1487-1496.
- [71] Fan Lingling, A. Feliachi, "Robust TCSC control design for damping inter-area oscillations", IEEE PES 2001 Summer Meeting, Vol.2, pp.784 789.
- [72] Lingling Fan, Ali Feliachi and Karl Schoder, "Selection and design of a TCSC control signal in damping power system inter-area oscillations for multiple operating conditions", Electric Power Systems Research, Volume 62, Issue 2, 28 June 2002, pp. 127-137.

- [73] Yu Chi-Shan, Yang Jun-Zhe, "A new optimal aim scheme for TCSC contingency control", IEEE PES 2005 General Meeting. pp. 1130-1134.
- [74] T. Senjyu, S. Yamane, K. Uezato, "Improvement of Multi-Machine Power System Stability by Variable Series Capacitor (VSrC) Using Neural Network", Proceedings of the IEEE PES 1998 Winter Meeting, pp. 628-633.
- [75] P.K. Dash, S. Mishra, G. Panda, "Damping multimodal power system oscillation using a hybrid fuzzy controller for series connected FACTS devices", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No 4, Nov 2000, pp. 1360-1366.
- [76] R. Billinton, M.Fotuhi-Firyzabad, S.Q. Faried, "Power System Reliability Enhancement Using a Thyristor Controlled series Capacitor", IEEE Trans. on Power Systems, February 1999, pp. 369-374.
- [77] J.W. Balance, S.Goldberg, "Subsynchronous Resonance in Series Compensated Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-92, pp. 1949-1658, September/October 1973.
- [78] IEEE SSR Task Force, "First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-96, No. 5, September/October 1977.
- [79] IEEE SSR Task Force, "Second Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-104, 1985, pp.1057-1066.
- [80] IEEE Committee Report, "A Bibliography for the Study Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No. 1, pp. 216-218, Jan.-Feb. 1976.
- [81] IEEE Committee Report, "First Supplement to a Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 6, pp. 1872-1875, Nov.-Dec. 1979.
- [82] IEEE Committee Report, "The Second Supplement to a Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 2, pp. 321-327, Feb. 1985.
- [83] IEEE Committee Report, "Third Supplement to a Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS- 6, No. 2, pp. 830-834, May 1991.
- [84] IEEE Committee Report, "Fourth Supplement to a Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 3, pp. 1276-1282, August 1997.
- [85] IEEE SSR Task Force, "Reader's Guide to Subsynchronous Resonance", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 1, 150-157, February 1992.
- [86] P.M. Anderson, B.L. Agraval, J.E. Van Ness, "Subsynchronous Resonance in Power Systems", IEEE Press, New York, 1990.
- [87] N.G. Hingorani, "A New Scheme for Subsynchronous Resonance Damping of Tortional Oscillations and Transient Torque, Part I", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, No. 4, pp.1852-1855, April 1981.
- [88] R.A. Hedin, K.B.Stump, N.G. Hingorani, "A New Scheme for Subsynchronous Resonance Damping of Tortional Oscillations and Transient Torque, Part II", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, No. 4, April 1981, pp.1856-1863.
- [89] Li Wang, "Simulations of prefiring NGH damping scheme on suppressing torsional oscillations using EMTP", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 882-888, May 1997.

- [90] R.J. Piwko, C.A. Wegner, S.J. Kinney, J.D. Eden, "Subsynchronous Resonance Performance Tests of the Slatt Thyristor-Controlled Series Capacitor", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996.
- [91] R.A. Hedin, S. Weiss, D. Torgerson, L.E. Eilts, "SSR Characteristics of Alternative Types of Series Compensation Schemes", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 2, May 1995.
- [92] W.Zhu, R.Spee, R.R. Mohler, G.C. Alexander, W.A. Mittelstadt, D. Maratukulam, "An EMTP Study of SSR Mitigation Using the Thyristor Controlled Series Capacitor", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, 1479-1485, July 1995.
- [93] N. Kakimoto, A. Phongphanphanee, "Subsynchronous resonance damping control of thyristorcontrolled series capacitor", IEEE Trans. on Volume Power Delivery, Vol. 18, No. 3, pp. 1051-1059, July 2003.
- [94] D. Holmberg et al., "The Stöde Thyristor Controlled Series Capacitor", CIGRE paper 14-105, Session 1998.
- [95] L. Rouco, F.L. Pagola, "An Eigenvalue Sensitivity Approach to Location and Controller Design of Controllable Series Capacitors for Damping Power System Oscillations", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 4, November 1997, pp. 1660-1666.
- [96] H. Okamoto, A. Kurita, Y. Sekine, "A Method for Identification of Effective Locations of Variable Impedance Apparatus on enhancement of Steady-state Stability in Large scale Power systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995, pp. 1401-1407.
- [97] Tjing T. Lie and Wanhong Deng, "Optimal flexible AC transmission systems (FACTS) devices allocation", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 19, Issue 2, February 1997, pp. 125-134.
- [98] C.A. Canizares, A. Berizzi, P. Marannino, "Using FACTS Controllers to Maximize Available Transfer Capability", Proc. Bulk Power Systems Dynamics and Control IV-Restructuring Conference, Santorini, Greece, 1998.
- [99] North American Electric Reliability Council (NERC). "Available transfer capability definition and determination", Rep., June 1996.
- [100] R. Rajaraman, F. Alvarado, A. Maniaci, R. Camfield, S. Jalali, "Determination of Locations and Amount of Series Compensation to Increase Power Transfer Capability", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 2, May 1998, pp. 294-300.
- [101] Lu Yunqiang, A. Abur, "Static Security Enhancement via Optimal Utilization of Thyristor-Controlled Series Capacitors", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 2, May 2002, pp. 324-329.
- [102] S. N. Singh and A. K. David, "Optimal location of FACTS devices for congestion management", Electric Power Systems Research, Volume 58, Issue 2, June 2001, pp. 71-79.
- [103] A.R. Messina, M.A. Pérez, E. Hernádez, "Co-ordinated application of FACTS devices to enhance steady-state voltage stability", Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems 25, Issue 2003, pp 259-267.
- [104] C.A. Canizares, Z.T. Faur, "Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 1, February 1999, pp. 158-165.
- [105] L. Pilotto, W. Ping, A. Carvalho, A. Wey, W. Long, F. Alvarado, A. Edris, "Determination of Needed FACTS Controllers that Increase Asset Utilization of Power Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No.1, January 1997, pp. 364-371.
- [106] Ying Xiao, Y.H. Song, Chen-Ching Liu, Y.Z. Sun, "Available Transfer Capability Enhancement Using FACTS Devices" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, Feb. 2003, pp. 305-312.

- [107] S. Gerbex, R. Cherkaoui, 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, Aug. 2001, pp. 537-544.
- [108] N.K. Sharma, A. Ghosh, R.K. Varma, "A Novel Placement Strategy for FACTS Controllers" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, July 2003, pp. 982- 987.
- [109] S. Greene, I. Dobson, F. Alvarado," Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 1, February 1997, pp262-272.
- [110] T. Van Cutsem, C. Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Press, 1998.
- [111] W.S. Jwo, C. W. Liu, C.C. Liu and Y. T. Hsiao, "Hybrid expert system and simulated annealing approach to optimal reactive power planning", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 142, No 4, July 1995, pp. 381-385.
- [112] J. T. Ma and L. L. Lai, "Improved Genetic Algorithm for Reactive Power Planning", Proc. 12th Power Systems Computation Conference, Dresden, Sweden, August 19-23, 1996, pp. 499-505.
- [113] Z.Y. Dong, Y. Wang, D.J. Hill, Y.V. Makarov, "A New Approach to Power System VAR Planning Aimed at Voltage Stability Enhancement with Feedback Control", IEEE Power Tech '99 Conference, Budapest, Hungary, 1999.
- [114] M. Delfanti, G.P. Granelli, P. Marannino, M. Montagna, "Optimal Capacitor Placement Using Deterministic and Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No 3,Aug. 2000, pp.1041-1046.
- [115] N. Yorino, E.E, El-Araby, H. Sasaki, S. Harada, "A New Formulation for FACTS Allocation for Security Enhancement Against Voltage Collapse" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, Feb. 2003, pp. 3- 10.
- [116] El-said El-sayed El-Araby, Naoto Yorino and Hiroshi Sasaki, "A two level hybrid GA/SLP for FACTS allocation problem considering voltage security", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 25, Issue 4, May 2003, pp. 327-335.
- [117] M. Bagriyanik, H. Dag, "Determination of Location of FACTS Devices Using Fuzzy Decision Making", International Conference on Power System Transients-IPST '99, Budapest, Hungary, 1999.
- [118] L. Wehenkel, P. Mack, "Artificial Intelligence Toolbox for Planning and Operation of Power Systems", IEEE PES 2000 Winter Meeting.
- [119] L. Wehenkel, "Automatic Learning Techniques in Power Systems", Kluwer Academic, Boston, 1998.
- [120] L. Wehenkel and M. Pavella, "Decision tree approach to power system security assessment", Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 15, No. 1, February 1993.
- [121] N. Hatziargyriou, S. Papathanassiou, and M. Papadopoulos, "Decision trees for fast security assessment of autonomous power systems with large penetration from renewables," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 10, June 1995.
- [122] E.S. Karapidakis, N.D. Hatziargyriou, "Online Preventive Dynamic Security of Isolated Power Systems Using Decision Trees", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, No 2, May 2002.
- [123] L. Wehenkel, M. Pavella, E. Euxibie, B. Heilbronn, "Decision Tree Based Transient Stability Method A Case Study", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994.
- [124] S. Rovnyak, S. Kretsinger, J. Thorp, D. Brown, "Decision Trees for Real-time Transient Stability Prediction", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No 3, Aug. 1994, pp. 1417 – 1426.

- [125] N. D. Hatziargyriou, P. S. Georgilakis, D. S. Spiliopoulos, and J. A. Bakopoulos, "Quality Improvement of Individual Cores of Distribution Transformers Using Decision Trees," Int. Journal of Engineering Intelligent Systems, vol. 6, no. 3, September 1998, pp. 141-146.
- [126] D.S. Popovic, R. Ciric, "A multi-objective algorithm for distribution networks restoration", IEEE PES 1999 Winter Meeting, Vol. 2, pp. 1163 vol.2.
- [127] Επίδραση των Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (FACTS) στη Λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ ΙΙΙ, Ιανουάριος Δεκέμβριος 2002, τεύχος 1-2.
- [128] Γ.Ι. Γεωργαντζής, "Τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ενέργειας (FACTS) στα Ηλεκτρικά Δίκτυα", Δελτίο Π.Σ.Δ.Μ.-Η, Φεβρουάριος 1995.
- [129] I.A. Erinmez, editor, "Static Var Compensators", technical report of task force 2, CIGRE, 1986.
- [130] B.Endres et al., "Design and Operational Tests on Thyristor Modules for the SVC Kemps Creek", 90 WM 041-4 PWRD.
- [131] Dickmander, B. Thorvaldsson, et al: "Control System Design and Performance Verification for the Chester, Maine Static Var Compensator", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, pp. 1492-1504, July 1992.
- [132] R.C. Knight et al., "Relocatable GTO-based Static Var Compensation for NGC Substations", CIGRE paper 14-106, 1998 Session.
- [133] S. Nyati, M. Eitzmann, J. Kappenman, D. VanHouse, N. Mohan, A Edris, "Design issues for a single core transformer thyristor controlled phase-angle regulator", , IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No 4, October 1995, pp. 2013 – 2019.
- [134] C. Schauder et al., "Development of a ±100 MVAR Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems', IEEE Trans. on Power Delivery, vol.10, No. 3, July 1995.
- [135] J.P. Ballad, R.J. Basset, "Power electronic devices and their impact for power transmission", IEE 6th International Conference on AC and DC Power Transmission, London, Conference Publ., No 423, 1996, pp. 245-251.
- [136] A.M.Gole, A. Keri, C. Nwankpa, E.W. Gunther, H.W. Dommel, I. Hassan, J.R. Marti, J.A. Martinez, K.G. Fehrle, L.Tang, M.F. McGranagham, O.B. Nayak, P.F. Ribeiro, R. Iravani, R. Lasseter, "Guidelines for modelling power electronics in electric power engineering applications", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.12, No. 1, January 1995, pp.505-513.
- [137] K.K. Sen, SSSC-Static Synchronous Series Capacitor: Theory, Modeling and Applications, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No 1, January 1998, pp. 241-246.
- [138] R. Mihalic, I. Papic, "Mathematic models and simulation of a Static Synchonous Series Compensator, paper BPT99-315-42, Proceedings of the IEEE Power Tech '99 Conference, Budapest, Hungary, Aug 29 - Sept 2, 1999.
- [139] D.A. Pastos, N.A. Vovos, G.B. Giannakopoulos, "Comparison of Compensators Capability to Module the Real Power Flow in Integrated AC/DC systems", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, No.3, pp. 932-937, July 1998.
- [140] B.A. Renz, A.J.F. Keri, A.S. Mehraban, J.P. Kessinger, C.D. Schauder, L. Gyugyi, L.J. Kovalsky, A. Edris "World's First Unified Power Flow Controller on the AEP System", CIGRE paper 14-107, 1998 Session.
- [141] N.G. Hingorani, "Introducing Custom Power", IEEE Spectrum, vol. 32, no. 6, June 1995, pp. 41-47.
- [142] N.G. Hingorani, R.G. Stephen, N. Sudja, C. Nietsch, M.Weinhold, "Use of Power Electronics for Rural Electrification", CIGRE paper 14-202, 1998 Session.

- [143] D. Povh, M. Weinhold, "Improvement of Power Quality by power Electronic Equipment", CIGRE paper 13/14/36-06, 2000 Session.
- [144] S. Miske, "Considerations for the Application of Series Capacitors to Radial Power Distribution Circuits", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 16, No.2, pp. 306-318, April 2001.
- [145] L. Souza, E. Watanabe, M. Aredes, "A GTO Controlled Series Capacitor for Distribution Lines", CIGRE paper 14-201, 1998 Session.
- [146] T. Godart, A. Imece, J. McIver, E. Chebli, "Feasibility of Thyristor Controlled Series Capacitor for Distribution Substation Enhancements", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, No.1, pp. 203-209, January 1995.
- [147] M. N. Moschakis, E. A. Leonidaki, N. D. Hatziargyriou, "Considerations for the Application of Thyristor Controlled Series Capacitors to Radial Power Distribution Circuits", IEEE Bologna Power Tech Conference, Italy, March 2003.
- [148] H.M. Dommel : "EMTP Theory Book", Portian(Oregon), August 1986.
- [149] M. Saha, E. Rosolowski, "EMTP/ATP Study of the Phenomena for Series Compensated Line Protection", EEUG News February 1997.
- [150] Q.Y. Xuan, A.T. Johns, "Digital Simulation of Series-compensated EHV (Extra High Voltage) Transmission Systems", IEE Colloquium on Simulation of Power System, 1992, pp.3/1-3/4.
- [151] D. L. Goldsworthy, "A Linearized Model for MOV-Protected Series Capacitors" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-2, No 4, November 1987, pp. 953-958.
- [152] M. Coursol & C.T. Nguyen, R. Lord, X.-D. Do, "Modeling MOV-Protected Series Capacitors for Short-circuit Studies", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, pp. 448-453, January 1993.
- [153] G.J. Georgantzis, N.D. Hatziargyriou, E.A. Leonidaki, "Transient Simulation of Series Compensated EHV Transmission Lines for Short-circuit Studies", IEEE MELECON '96, Vol. III, 1584-1587, Bari, Italy, 1996.
- [154] Ε.Α. Λεωνιδάκη, Ν.Δ. Χατζηαργυρίου, Γ.Ι. Γεωργαντζής, "Επιδράσεις Σειριακής Αντιστάθμισης στη Λειτουργία Γραμμών Μεταφοράς", Ελληνική Επιτροπή CIGRE, Σύνοδος Αθήνα '95.
- [155] E.A. Leonidaki, N.D. Hatziargyriou, B.C.Papadias, G.J. Georgantzis, "Investigation of Power System Harmonics and SSR Phenomena Related to Thyristor Controlled Series Capacitors", Proc. 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP '98), Athens, Greece, 1998.
- [156] IEEE Std 18-1992, IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.
- [157] S. Lefebvre, L. Gérin-Lajoie, "A Static Compensation Model for the EMTP", IEEE PES 1991 Summer Meeting.
- [158] W. McMurray, "Optimal Snubbers for Power Semiconductors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-8, No. 5, September/October 1972.
- [159] L. Angquist, G. Ingeströn, G. Othman, "Synchronous Voltage Renersal (SVR) scheme-A new control method for Thyristor Controlled Series Capacitors", FACTS 3: the Future in High-Voltage Transmission, October 5-7, Baltimore, 1994.
- [160] B. K. Johnson, "Benchmark system for the simulation of TCSC and SVC", IEEE PES 2002 Winter Meeting,, pp. 484–487.
- [161] A.N. Vasconcelos, A.J.P. Ramos, J.S. Monteiro, M.V. Lima, H.D. Silva, R.L. Lins, "Detailed modeling of an actual static VAT compensator for electromagnetic transient studies", IEEE PES Winter Meeting, paper 91 WM 211-3 PWRS.

- [162] C. Gama and R. Tenorio, "Improvements for power system performance: modeling, analysis and benefits of TCSCs", IEEE RES 2000 Winter Meeting, vol. 2, pp. 1462–1467.
- [163] L. Dubé, "MODELS rule book".
- [164] E.A. Leonidaki, N.D. Hatziargyriou, G.J. Georgantzis, "Simulation of Thyristor Controlled Series Capacitor and Subsynchronous studies", 32nd Universities Power Engineering Conference UPEC'97, pp. 883-886, Manchester, UK, 1997.
- [165] A.R.M. Tenorio, "A Thyristor Controlled Series Capacitor Model for Electromagnetic transients Studies" MSc Thesis, Manchester, UK, 1995.
- [166] B. Stott, "Review of Load-Flow Calculation Methods", IEEE Proceedings, vol. 62, pp. 916-929, July 1974.
- [167] W. F. Tinney and C. E. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE Trans. o on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-86, pp. 1449-H56, Nov. 1967.
- [168] W.F. Tinney and V.Brandwajn, "Partial Matrix Refactorization", IEEE Trans, on Power Systems, vol. PWRS-1, No. 1, Feb. 1986
- [169] W.F. Tinney, W.S. Mayer, "Solution of Large Sparce Systems by Ordered Triangular Factorization", IEEE Trans. on PAS, pp. 1050-1060, May 1983.
- [170] B. Stott and O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, pp. 859-869, May/June 1974.
- [171] Show-Kang Chang and V. Brandwajn, "Adjusted Solutions in Fast Decoupled Load Flow", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, pp. 726-733, May 1988.
- [172] Robert A.M. van Amerongenm, "A General-Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 4, No. 2, pp. 760-770, May 1989.
- [173] N.M. Peterson and W.S. Meyer, "Automatic Adjustment of Transformer and Phase-Shifter Taps in the Newton Power Flow", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-90,pp. 103-108, Jan/Feb 1971.
- [174] J.P. Britton, "Improved Load Flow Performance Through a More General Equation Form", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-90 pp. 109-116, Jan/Feb 1971.
- [175] G.A. Maria, A.H. Yuen and J.A. Findlay, "Control Variable Adjustment in Load Flows", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 858-864, August 1988.
- [176] R.N. Allan and C. Arruda, "LTC Transformers and MVAR Violations in the Fast Decoupled Load Flow", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, pp.3328-3332, Sep. 1982.
- [177] Z.X. Han, "Phase Shifter and Power Flow Control", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, pp. 3790-3795, Oct 1982.
- [178] W.F. Tinney, V.Brandwajn, and S.M. Chan, "Sparse Vector Methods", IEEE Trans, on Power Apparatus and Systems t., vol. PAS-104, pp. 295-301, Feb. 1985.
- [179] C.D. Vournas, N.D. Hatziargyriou, B.C. Papadias, "Interactive Power System Simulation Program - Application to the Hellenic System", paper No 38-206, CIGRE 1990 Session, Paris, 1990.
- [180] J.G. Vlachogiannis, "Control Adjustments in Fast Decoupled Load Flow", Electric Power Systems Research 31, 1994.
- [181] G.J. Georgantzis, E.A. Leonidaki, N.D. Hatziargyriou, J.G. Vlachogiannis, "Investigation of the Effect of FACTS Devices on the Steady-State Operation of the Hellenic Transmission System", CIGRE Symposium "Working Plant and Systems harder", 7-9 June 1999, London, UK.

- [182] E.A. Leonidaki, B.C. Papadias, N.D. Hatziargyriou, G.J. Georgantzis, "Investigation of FACTS Applications in the Hellenic Transmission System Considering Power Flow Variations due to the Greece-Italy HVDC Link", CIGRE paper 14-106, 2000 Session.
- [183] E.A. Leonidaki, B.C. Papadias, N.D. Hatziargyriou, J.G. Vlachogiannis, G.J. Georgantzis, "Application of Thyristor Controlled Series Capacitor to Load-Flow Redistribution in the Hellenic Transmission System", Paper BPT99-149-44, Proceedings of the IEEE Power Tech '99 Conference, Budapest, Hungary, Aug 29 - Sept 2, 1999.
- [184] E.A. Leonidaki, N.D. Hatziargyriou, B.C. Papadias, G.J. Georgantzis "Evaluation of TCSC Effect on Voltage Profile and Power Losses Reduction in The Hellenic Interconnected Transmission System", CIGRE Black Sea EL-NET2001 Regional Meeting, Suceava, Romania, 10-14 June 2001.
- [185] B. Scott, O. Alsac, A.J. Monticelli, "Security Analysis and Optimization", Proc. of IEEE, Vol. 75, No 12, Dec. 1987.
- [186] ΔΕΣΜΗΕ, "Μελέτη Ανάπτυξη Συστήματος Μεταφοράς Περίοδος 2006-2010".
- [187] IEEE Standard, "Recommended Practices and Requirements for harmonic Control in Electrical Power systems", IEEE Std 519-1992, 1992.
- [188] "Αναβάθμιση και εντατικότερη εκμετάλλευση των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας", Πρόγραμμα ΠΕΝΕΔ, χρηματοδότηση ΓΓΕΤ, 1995 1997.
- [189] E.A. Leonidaki, B.C. Papadias, N.D. Hatziargyriou, S. Giorgas, G.J. Georgantzis, "A Physical Laboratory Model of a Thyristor Controlled Series Capacitor", Proceedings of the 33nd Universities Power Engineering Conference (UPEC'98), pp. 138-141, Edinburgh, UK, 8-10 Sept. 1998.
- [190] N.D. Hatziargyriou, E.A. Leonidaki, "A Physical Laboratory Model of TCSC and Comparison of the Produced Power System Harmonics Using EMTP Simulations", Workshop on Custom Power Technologies, Barcelona, Spain, 22-23 March 1999.
- [191] P. Kundur, "Power System Stability and Control", New York: McGraw-Hill, 1994.
- [192] S. B. Crary, I. Herlitz, and B. Favez, CIGRE SC32 Report: "System stability and voltage, power and frequency control", CIGRE, Appendix 1, Rep. 347, 1948.
- [193] CIGRE Report: "Definitions of general terms relating to the stability of interconnected synchronous machine", CIGRE, paper no. 334a, 1966.
- [194] C. Barbier, L. Carpentier, and F. Saccomanno, CIGRE SC32 Report: "Tentative classification and terminologies relating to stability problems of power systems", ELECTRA, no. 56, 1978.
- [195] IEEE TF Report, "Proposed terms and definitions for power system stability", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, pp. 1894-1897, July 1982.
- [196] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, V. Vittal, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions", IEEE Trans. on Power Systems, pp. 1387-1401, Volume: 19, Issue: 3, Year: Aug. 2004.
- [197] CIGRE Task Force 38.01.07 on Power System Oscillations, "Analysis and control of power system oscillations", CIGRE Technical Brochure, no. Ill, Dec. 1996.
- [198] IEEE PES Working Group on System Oscillations, "Power System Oscillations", IEEE Special Publication 95-TP-101, 1995.
- [199] C. W. Taylor, "Power System Voltage Stability", New York: McGraw-Hill, 1994.
- [200] IEEE Special Publication 90TH0358-2-PWR, "Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools and Industry Experience", 1990.

- [201] T. Van Cutsem, "Voltage instability: Phenomenon, countermeasures and analysis methods", Proc. IEEE, vol. 88, pp. 208-227, 2000.
- [202] D. J. Hill, "Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies", IEEE Trans. Power Systems, vol. 8, pp. 166-176, Feb. 1993.
- [203] Γ. Μάνος, "Ανάλυση φαινομένων κατάρρευσης τάσεως σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 1998.
- [204] G. K. Morison, B. Gao, and P. Kundur, "Voltage stability analysis using static and dynamic approaches", IEEE Trans. Power Systems, vol. 8, pp. 1159-1171, Aug. 1993.
- [205] B. Gao, G. K. Morison, and P. Kundur, "Toward the development of a systematic approach for voltage stability assessment of large-scale power systems", IEEE Trans. Power Systems, vol. 11, pp. 1314-1324, Aug. 1996.
- [206] P. A. Lof, T. Smed, G. Andersson, and D. J. Hill, "Fast calculation of a voltage stability index", IEEE Trans. Power Systems, vol. 7, pp. 54-64, Feb. 1992.
- [207] Ν. Φούντας, "Περιβάλλον υποστήριξης για την αποκατάσταση ηλεκτρικού συστήματος μετά από διακοπή ισχύος", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 1997.
- [208] CIGRE Task Force 38.02.14 Rep., "Analysis and Modeling Needs of Power Systems Under Major Frequency Disturbances", Jan. 1999.
- [209] P. Kundur, D. C. Lee, J. P. Bayne, and P. L. Dandeno, "Impact of turbine generator controls on unit performance under system disturbance conditions", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, pp. 1262-1267, June 1985.
- [210] P. Kundur, "A survey of utility experiences with power plant response during partial load rejections and system disturbances", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, pp. 2471-2475, May 1981.
- [211] N. Hatziargyriou, E. Karapidakis, and D. Hatzifotis, "Frequency stability of power system in large islands with high wind power penetration", Bulk Power Syst. Dynamics Control Symp.— IV Restructuring, vol. PAS-102, Aug. 24-28, 1998, Santorini, Greece.
- [212] CIGRE TF 38.03.12 Report, "Power system security assessment: A position paper", ELECTRA, no. 175, Dec. 1997.
- [213] E.A. Leonidaki, N.D. Hatziargyriou, G.A. Manos, "A Systematic Approach for Effective Location of Series Compensation to Increase Available Transfer Capability", IEEE Porto Power Tech Conference, Portugal, Sept. 2001.
- [214] Ε.Α. Λεωνιδάκη, Γ.Α. Μάνος, Ν.Δ. Χατζηαργυρίου, "Μεθοδολογία εύρεσης βέλτιστης θέσης αντιστάθμισης σειράς για ενίσχυση της ευστάθειας τάσης", Ελληνική Επιτροπή CIGRE, Σύνοδος Αθήνα 2003.
- [215] E.A. Leonidaki, G.A. Manos, N.D. Hatziargyriou, "An effective method to locate series compensation for voltage stability enhancement", Int. Journal of Electric Power System Research, Volume 74, Issue 1, April 2005, pages 73-81.
- [216] A. Jennings, "Matrix Computation for Engineers and Scientists", John Wiley & Sons, 1977.
- [217] L. Wehenkel and Y. Jacquemart, "Automatic Learning Methods to Dynamic Security Assessment", PICA '97 Tutorial course notes.
- [218] U. M. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, P. Smyth, and R. Uthurusamy, "Advances in knowledge discovery and data mining", AAAI Press/MIT Press, 1996.
- [219] J. R. Quinlan, "Learning efficient classification procedures and their application to chess endgames", Machine Learning: An artificial intelligence approach. (R. S. Michalski, J. Carbonell, and T. Mitchell, eds.), Morgan Kaufman, 1983, pp. 463-482.

- [220] L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen, and C. J. Stone, "Classification and regression trees", Wadsworth International, California, 1984.
- [221] J. H. Friedman, "A recursive partitioning decision rule for nonparametric classification", IEEE Trans, on Computers, C-26, pp. 404-408, 1977.
- [222] I. Kononenko, I. Bratko, and E. Roskar, "Experiments in automatic learning of medical diagnosis rules", Tech. report, Jozef Stefan Institute, 1984.
- [223] J. R. Quinlan, "Induction of decision trees", Machine Learning, vol. 1, pp. 81-106, 1986.
- [224] W.S. McCulloch, W. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", Bulletin of Mathematical Biophysics, Vol. 5, 1943, pp. 115-133.
- [225] J.J. Hopfield, "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities", Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A., Vol. 79, 1982, pp. 2554-2558.
- [226] D.E. Rumelhart, G.E. Hinton, R.J. Williams, "Learning internal representations by error propagation" .In: Parallel Distributed Processing:Explorations in the Microstructure of Cognition (D.E. Rumelhalt, J.L. McClelland,eds.), Vol. 1, Chapter 8, Cambridge, MA:MIT Press, 1986.
- [227] J.H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1975.
- [228] M.M. Syslo, N. Deo, J.S. Kowalik, "Discrete optimization algorithms with Pascal programs", Englewood Cliffs, Prentice-Hall, NJ, 1983.
- [229] D. Michie, D.J. Spiegelhalter, and C.C. Taylor (eds.), "Machine learning, neural and statistical classification", Ellis Horwood, 1994, Final report of ESPRIT project 5170-StatLog.
- [230] L. Wehenkel, and M. Pavella, "Decision trees and transient stability of electric power systems", Automatica, vol. 27, no. 1, pp. 115-134, 1991.
- [231] Z. Daroczy, "Generalized information functions", Information and Control, vol. 16, pp. 36-51, 1970.
- [232] L. Wehenkel, "On uncertainty measures used for decision tree induction", Proc. of IPMU '96, Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems (Granada), July 1996, pp. 413-418.
- [233] L. Wehenkel, T. Van Cutsem, and M. Ribbens-Pavella, "An artificial intelligence framework for on-line transient stability assessment of power systems", IEEE Trans.on Power Systems, PWRS-4, pp. 789-800, 1989.
- [234] J. R. Quinlan, "The effect of noise on concept learning", Machine Learning II. (R. S. Michalski, J. Carbonell, and T. Mitchell, eds.), Morgan Kaufman, 1986, pp. 149-166.
- [235] T. O. Kvalseth, "Entropy and correlation: some comments", IEEE Trans, on Systems, Man and Cybernetics, SMC-17, no. 3, 517-519, 1987.
- [236] Μοντέλο Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος Παραγωγής-Μεταφοράς με χρονικό ορίζοντα το 2004, Διεύθυνση Σχεδιασμού Συστήματος ΔΕΣΜΗΕ, Νοέμβριος 2001.
- [237] Eurostag 3.2 Package user's guide
- [238] E.A. Leonidaki, D.P. Georgiadis, N.D. Hatziargyriou, "Decision Trees for Determination of Optimal Location and Rate of Series Compensation to Increase Power System Loading Margin", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No 3, August 2006.
- [239] E.A. Leonidaki, N.D. Hatziargyriou, "Investigation of Decision Trees (DTs) parameters for Power System Voltage Stability Enhancement", proceedings of the 4th Hellenic Conference on

AI, SETN 2006, Heraklion, Crete, Greece, May 18-20, 2006, published in Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3955, 2006, pp.181-191.

ПАРАРТНМА А

ΑΝΑΛΥΣΗ FOURIER ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΘΥΡΙΣΤΟΡ ΣΤΟ TCSC

Όπως προκύπτει από την εξίσωση (3-10), το i_T είναι μια άρτια και περιοδική συνάρτηση περιόδου 2π και κατά συνέπεια μπορεί να αναλυθεί σε σειρά Fourier.

Είναι:

$$i_T = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos k\omega t$$
 (A.1)

όπου, λόγω της συμμετρίας είναι: $a_0 = 0$ και

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^n i_T(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \qquad \gamma i \alpha \qquad n = 1, 2, \dots$$

Για την θεμελιώδη συχνότητα (n = 1), ο συντελεστές a_1 μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$a_{I} = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\pi} i_{T}(\omega t) \cos(\omega t) d(\omega t)$$
(A.2)

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (3.10) στη εξίσωση (Α.2), προκύπτει:

$$a_{I} = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\sigma} \left(A\cos\omega t - \frac{A\cos\sigma}{\cos k\sigma} \cos k\omega t \right) \cos(\omega t) d(\omega t) + \frac{2}{\pi} \int_{\pi-\sigma}^{\pi} \left(-A\cos(\omega t - \pi) + \frac{A\cos\sigma}{\cos k\sigma} \cos(\omega t - \pi) \right) \cos(\omega t) d(\omega t)$$
(A.3)

Αφού το i_T είναι συμμετρικό γύρω από τα σημεία $\omega t = 0, \pi, ...$, το πρώτο ολοκλήρωμα της σχέσης (A.3) είναι το ίδιο με το δεύτερο ολοκλήρωμα της ίδιας σχέσης. Μετά από απλή άλγεβρα, το a_1 παίρνει την μορφή:

$$a_{1} = \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{A}{4} \left(2\sigma + \sin 2\sigma \right) - \frac{a \cos \sigma}{\cos k\sigma} \left[\frac{k \sin k\sigma \cos \sigma - \sin \sigma \cos k\sigma}{k^{2} - 1} \right] \right\}$$

και τότε,

$$a_{l} = A \left[\frac{2\sigma + \sin 2\sigma}{\pi} \right] - \frac{4A}{k^{2} - l} \left[\frac{k \tan k\sigma \cos^{2} \sigma - \cos \sigma \sin \sigma}{\pi} \right]$$
(A.4)

Επειδή ισχύει η ταυτότητα $\cos \sigma \sin \sigma = \cos^2 \sigma \frac{\sin \sigma}{\cos \sigma} = \cos^2 \sigma \tan \sigma$, αντικαθιστώντας στην σχέση (A.4) την ταυτότητα αυτή, τότε προκύπτει:
$$a_{1} = A \left[\frac{2\sigma + \sin 2\sigma}{\pi} \right] - \frac{4A\cos^{2}\sigma}{k^{2} - l} \left[\frac{k\tan k\sigma - \tan \sigma}{\pi} \right]$$
(A.5)

Επειδή είναι $i_{T(n=1)} = a_1 \cos \omega t$, το πλάτος του ρεύματος του θυρίστορ για την θεμελιώδη συχνότητα δίνεται από την σχέση:

$$I_{T(I)} = A \left[\frac{2\sigma + \sin 2\sigma}{\pi} \right] - \frac{4A\cos^2 \sigma}{k^2 - I} \left[\frac{k \tan k\sigma - \tan \sigma}{\pi} \right]$$
(A.6)

Οι συντελεστές a_n , ως προς τις ανώτερες αρμονικές n = 2,3,..., μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i_T(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t)$$
(A.7)

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (3.10) στην εξίσωση (Α.7), προκύπτει:

$$a_{n} = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\sigma} \left(A\cos\omega t - \frac{A\cos\sigma}{\cos k\sigma} \cos k\omega t \right) \cos(n\omega t) d(\omega t) + \frac{2}{\pi} \int_{\pi-\sigma}^{\pi} \left(-A\cos(\omega t - \pi) + \frac{A\cos\sigma}{\cos k\sigma} \cos(\omega t - \pi) \right) \cos(n\omega t) d(\omega t) = E + F$$
(A.8)

Μετά από υπολογισμούς, τα ολοκληρώματα Ε και F μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$E = \frac{A}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\sigma}{n+1} + \frac{\sin(n-1)\sigma}{n-1} \right] - \frac{A\cos\sigma}{\pi\cos k\sigma} \left[\frac{\sin(k+n)\sigma}{k+n} + \frac{\sin(k-n)\sigma}{k-n} \right]$$
(A.9)

$$F = -\frac{A}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\sigma}{n+1} (-1)^n + \frac{\sin(n-1)\sigma}{n-1} (-1)^n \right] + \frac{A\cos\sigma}{\pi\cos k\sigma} \left[\frac{\sin(k+n)\sigma}{k+n} (-1)^n + \frac{\sin(k-n)\sigma}{k-n} (-1)^n \right]$$
(A.10)

Από τις σχέσεις (A.9) και (A.10), προκύπτει ότι για τις άρτιες αρμονικές n = 2,4,6,... ισχύει $a_n = 0$, δηλαδή οι άρτιες αρμονικές δεν είναι χαρακτηριστικές. Αντιθέτως, για τις περιττές αρμονικές n = 3,5,7,... έχουμε:

$$a_n = E + F = \frac{2A}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\sigma}{n+1} + \frac{\sin(n-1)\sigma}{n-1} \right] - \frac{2A\cos\sigma}{\pi\cos k\sigma} \left[\frac{\sin(k+n)\sigma}{k+n} + \frac{\sin(k-n)\sigma}{k-n} \right]$$
(A.11)

Οπότε,

$$I_{T(n)} = a_n = \frac{2A}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\sigma}{n+1} + \frac{\sin(n-1)\sigma}{n-1} \right] - \frac{2A\cos\sigma}{\pi\cos k\sigma} \left[\frac{\sin(k+n)\sigma}{k+n} + \frac{\sin(k-n)\sigma}{k-n} \right]$$
(A.12)

ПАРАРТНМА В

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΤCSC ΣΤΟΝ Υ/Σ ΚΑΥΕΝΤΑ

Τα χαρακτηριστικά των κυριοτέρων στοιχείων του TCSC στον Υ/Σ Kayenta φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Βαλβίδες θυρίστορ		
Ρεύμα (Α) συνεχές	1000	
για 30 min. (A)	1350	
για 10 min. (A)	1500	
για 1 min. (A)	1890	
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (kA, crest)	12	
Τάση (kV, crest) συνεχής	23.3	
για 30 min. (kV)	28.7	
για 10 min. (kV)	31.7	
για 1 min. (kV)	36.0	
Πυκνωτής σειράς		
Αντίδραση (Ω)	15	
Χωρητικότητα (μF)	177	
Ρεύμα ονομαστικό (Α)	1000	
για 30 min. (A)	1350	
για 10 min. (A)	1500	
για 1 min. (A)	1700	
Τάση προστασίας (k V_{crest})	46	
Πηνίο ελεγχόμενο από θυρίστορ		
ποσότητα/φάση	2	
ονομαστική αυτεπαγωγή (mH)	3.4	
αντίδραση	1.28	
συντελεστής ποιότητας (ωL/R)	110	
συχνότητα (Hz)	60	
Ρεύμα (A, rms) συνεχές	1000	
για 30 min.	1350	
για 10 min.	1500	
για 1 min.	1890	

Πίνακας B.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του TCSC στον Υ/Σ Kayenta.

Οι τιμές της σύνθετης αντίστασης του TCSC στο Kayenta στη θεμελιώδη συχνότητα Z_1 (60 Hz) του TCSC στον Y/Σ Kayenta, για διάφορες τιμές γωνίας έναυσης α δίνονται στον ακόλουθο πίνακα B.2:

γωνία έναυσης α	σύνθετης αντίστασης Z
(°)	(Ω)
100	
180	-j15
162	-j16
159	-j17
155	-j20
151	-j25
149	-j30
148	-j35
146	-j50
145	-j60

Πίνακας B.2: Τιμές της σύνθετης αντίστασης Z του TCSC στον Y/ Σ Kayenta συναρτήσει της γωνίας έναυσης α.

Στην επαγωγική περιοχή λειτουργίας και για γωνία έναυσης των θυρίστορ α=90°, η σύνθετη αντίσταση του TCSC γίνεται ίση με +j3.1 Ω.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤCSC

Τα λεπτομερή τεχνικά χαρακτηριστικά των κύριων στοιχείων του εργαστηριακού TCSC είναι τα ακόλουθα:

Αυτεπαγωγή ανά φάση:

Φάση 1: L=27 mH,	απώλειες χαλκού	$R_{CU}=75 \text{ m}\Omega$
Φάση 2: L=25.7 mH,	απώλειες χαλκού	$R_{CU}=73 \text{ m}\Omega$
Φάση 3: L=28 mH,	απώλειες χαλκού	$R_{CU}=77 \text{ m}\Omega$

Πυκνωτής ανά φάση:

Δύο πυκνωτές χωρητικότητας 30 μF συνδεδεμένοι παράλληλα, $R_s=30$ mΩ (tanδ= 5 · 10⁻⁴)

<u> Ουρίστορ</u>

BT152-600R, 600V, 20 A Holding Current: 30mA On-state voltage as a function of on-state current: $V_{AK} = 0.75V + I_{AK} * 20m\Omega$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα λειτουργικά σχέδια του εργαστηριακού μοντέλου και πιο συγκεκριμένα τα εξής:

- α) τα κυκλώματα των τριών φάσεων, (Σχήματα Γ.1, Γ.2 και Γ.3),
- β) το κύκλωμα τροφοδοσίας (Σχήμα Γ.4),
- γ) σχέδιο όπου παρουσιάζεται η κατασκευή του κυκλώματος κάθε φάσης και αποτυπώνεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν (Σχήμα Γ.5),
- δ) πίνακας με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κυριότερων υλικών (Πίνακας Γ.1).



Σχήμα Γ.1: Λειτουργικό σχέδιο a-φάσης εργαστηριακού μοντέλου TCSC.



Σχήμα Γ.2: Λειτουργικό σχέδιο b-φάσης εργαστηριακού μοντέλου TCSC.



Σχήμα Γ.3: Λειτουργικό σχέδιο c-φάσης εργαστηριακού μοντέλου TCSC.



Σχήμα Γ.4: Λειτουργικό σχέδιο του κυκλώματος τροφοδοσίας του εργαστηριακού μοντέλου TCSC.



Σχήμα Γ.5: Σχέδιο αποτύπωσης του εξοπλισμού στο κύκλωμα κάθε φάσης του εργαστηριακού μοντέλου TCSC.

	╞					Vultage	
Item	Qty 1	Reference	Description	Part Number	Case	Rating	Manufacturer
	m	R1-3	MULTI-TURN TRIM POTI SERIE 3296W	20k	1206		BOURNS
2	1	C8	PIN PROGRAMMABLE, PRECISION VOLTAGE REF.	AD584N	DIL8		ANALOG DEVICES
m	-	IC1	OUAD SPST SWITCH (NO)	ADG211N	DIL16		ANALOG DEVICES
4	6	V1-6	THYRISTOR 600V, 20A	BT152-600R	TO-220AB		PHILIPS
<u>د</u>	=	10	ZENER VOLTAGE REGULATOR DIODE, VZ=12V	BZV55C12	MLL34		MOTOROLA
		C3 C6-7 C9-11					
6	18 (C16-21 C34-39	SURFACE MOUNT CAPACITOR 0.062 X 0.126 INCHES	100nF	1206		
~	19	C40-45	SURFACE MOUNT CAPACITOR 0.062 X 0.126 INCHES	laF	1206		
~	<u>5</u>	C13-15	SURFACE MOUNT CAPACITOR 0.062 X 0.126 INCHES	220nF	1206		
6	<u> </u>	C31-33	SURFACE MOUNT TANT. CAPACITOR	luF	3216 - EIA 'A'	٨91	
		C4 C8 C12 C22					
01	0	24	SURFACE MOUNT TANT. CAPACITOR	10uF	6032 - EIA 'C'	20V	
=	<u> </u>	C46-48	CAPACITOR, MOLDED CASE, WIDTH=275; CENTERS=600	100nF			SIEMENS
12	3	CI-2 C5	POLYSTYROL CAPACITOR	IOnF	1206	63V	-
51	5	C25-30	ELECTROLYTIC CAPACITOR; DIAM=200; CENTERS=80	100uF		16V	
-		IC16 IC18 IC20	QUAD 2-INPUT NAND SCHMITT TRIGGER	CD4093BM	SO14		NS
12	m	X7-9	RIGHT ANGLE 10-PIN M/F HORIZONTAL PCB CONNECTOR	ST 04.10			HARTMANN
16	Ê	X10	RIGHT ANGLE 2-PIN M/F HORIZONTAL PCB CONNECTOR	ST 04.02			HARTMANN
=		01	POWER SUPPLY (VAC=210-250V) OUTPU: +5V; +/- 15V; 5W	EPSTIS		-	BULGIN
18		×1	14-PIN HEADER; SIDE LATCH	636-1424ES			THOMAS & BETTS
61	21	C3-4	DUAL JK FLIP FLOP	HEF4027B	SO16		Philips
50	m	<u>[1-3</u>	CURRENT SENSOR HY-SERIES 5A	HY 05-P	3		LEM
5	2	02-16	UNIVERSAL DIODE	LL4148	MLL34		NSC
	-	CS-7 IC15 IC17					
22	6	IC19	DUAL, LOW POWER LOW OFFSET COMPARATOR	LM393D	SO8		I EXAS INSTRUMENTS
23	5	62-4	DC/DC CONVERTER SERIE NMV	NMV0505S			NEWPORT
24	n N	IC10 IC12 IC14	LOW-NOISE PRECISION OPERATIONAL AMPLIFIER	OP-27GS	S08		PMI
25	Ē	IC9 IC11 IC13	ULTRA PRECISION OPERATIONAL AMPLIFIER	OP-177GS	SO8		PMI
26	=	IC2	QUAD LOW-VOLTAGE MICROPOWER OPERATIONAL AMPLIFIER	OP-490	DIL 14		PMI
27	1	RI7 R19 R21	SURFACE MOUNT RESISTOR, 1/8W	47R	1206		
28	Ē	R70-72	SURFACE MOUNT RESISTOR, 1/8 W	100R	1206		

Πίνακας Γ.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά των κυριότερων στοιχείων σε κάθε φάση του εργαστηριακού μοντέλου TCSC.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΗΕ ΤΟΥ ΕΜΠ

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στο Εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ προκειμένου να υλοποιηθεί η διάταξη του Σχήματος 4.9 είναι τα ακόλουθα:

• Μοντέλο γραμμής μεταφοράς

Lab-Volt, EMS 8329-05,

Επαγωγική αντίδραση:	j400 Ω,
Ονομαστική τάση:	230/400 V,
Ονομαστικό ρεύμα:	0.17 A
Συχνότητα:	50 Hz

• Μοντέλο φορτίου

Lab-Volt, EMS 8311-05

Καθαρά ωμικό φορτίο:	4400 Ω, 0.05 Α // 2200 Ω, 0.1Α //1100 Ω, 0.2Α.
Ονομαστικά μεγέθη:	231 W -230 V AC/DC.
Ακρίβεια:	$\pm 5\%$
Συχνότητα:	50 Hz

• Πηγή τροφοδοσίας

TERCO - POWERPACK MV1300, 0-230 V AC, 50 Hz

• Πολύμετρο

Fluke 77 Series Multimeter, 750 V AC

• Βολτόμετρο

Circuitmate DM 27xl, 750 V AC.

• Παλμογράφος

Hitachi

• Διαφορικός πολλαπλασιαστής

Chauvin Arnoux DP25

• Ηλεκτρονικός υπολογιστής με κατάλληλη κάρτα συλλογής δεδομένων

• Εργαστηριακό μοντέλο TCSC