



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

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασίλειου Χ. Νικολαΐδη

Αθήνα, Απρίλιος 2007



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

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασίλειου Χ. Νικολαΐδη

Συμβουλευτική Επιτροπή : Κ. Δ. Βουρνάς
Ν. Δ. Χατζηαργυρίου
Γ. Ν. Κορρές

Εγκρίθηκε την 24η Απριλίου 2004

Κ. Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ι. Μ. Προυσαλίδης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ν. Δ. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. Δ. Καβατζά
Λέκτωρ Ε.Μ.Π.

Α. Γ. Μπακιρτζής
Καθηγητής Πολυτεχνικής
Σχολής Α.Π.Θ.

Γ. Ν. Κορρές
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ν. Γ. Μαράτος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Βασίλειος Χ. Νικολαΐδης

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

Copyright © Βασίλειος Χ. Νικολαΐδης, 2007

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Στους γονείς μου, στην αδελφή μου και στην οικογένειά της

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η διερεύνηση μέτρων αντιμετώπισης των φαινομένων μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, η διατριβή εστιάζεται στη διερεύνηση των μέτρων προστασίας από αστάθεια τάσης που επιδρούν άμεσα ή έμμεσα στην καταναλισκόμενη ισχύ των φορτίων του συστήματος. Στα πλαίσια αυτά, εξετάζονται ο έλεγχος εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης και η αποκοπή φορτίου, ως μέτρα αντιμετώπισης της αστάθειας τάσης. Επιπροσθέτως, διερευνάται ο έλεγχος εκτάκτου ανάγκης των διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος του συστήματος, ως τέτοιο μέτρο. Αντιστοίχως, γίνεται έρευνα γύρω από τον υλικοτεχνικό εξοπλισμό που απαιτείται για την υλοποίηση σχημάτων προστασίας συστήματος, βασισμένων στα εξεταζόμενα μέτρα.

Όλα τα μέτρα προστασίας από αστάθεια τάσης που πραγματεύεται η διατριβή, μοντελοποιούνται στο πρόγραμμα μακροπρόθεσμης προσομοίωσης WPSTAB του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, επιτρέποντας έτσι την προσομοίωση και ανάλυση της εφαρμογής τους και των αντίστοιχων σχημάτων προστασίας σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, μοντελοποιούνται λειτουργίες της προστασίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη των φαινομένων αστάθειας τάσης.

Ακολουθώντας, με εφαρμογή των εξεταζόμενων μέτρων αντιμετώπισης της αστάθειας τάσης σχεδιάζονται σχήματα προστασίας του Ελληνικού συστήματος. Τα σχήματα που υλοποιούν τον έλεγχο εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ στο Ελληνικό σύστημα ακολουθούν τοπική και αποκεντρωμένη λογική και μπορούν να θεωρηθούν ως συμπληρωματικά των σχημάτων αποκοπής φορτίου, καθώς η σταθεροποίηση του συστήματος δεν εξασφαλίζεται από την εφαρμογή τους, αν υπάρχει περαιτέρω διαδικασία αποκατάστασης του φορτίου.

Αντιθέτως, τα σχήματα αποκοπής φορτίου σχεδιάστηκαν ως το έσχατο μέσο προστασίας για την αποφυγή της κατάρρευσης τάσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολουθώντας την φιλοσοφία αυτή σχεδιάστηκαν για το Ελληνικό σύστημα κεντρικά και αποκεντρωμένα σχήματα αποκοπής φορτίου με κριτήριο εφαρμογής το επίπεδο της τάσης, την ανίχνευση συμβάντος ή την ικανοποίηση προκαθορισμένου κριτηρίου εφαρμογής. Τα σχήματα αυτά προχωρούν στην εφαρμογή της αποκοπής φορτίου, τοπικά ή σε ευρεία περιοχή του συστήματος, από προκαθορισμένους ζυγούς ή από τους πιο αποδοτικούς με βάση την πληροφορία από την ανάλυση ευαισθησίας.

Αρχικά, εξετάστηκαν σχήματα αποκοπής φορτίου με κριτήριο τη μέτρηση της τάσης. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε ένα σχήμα αποκοπής φορτίου για την αποκατάσταση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος όταν αυτό κρίνεται ανεπαρκές από τους χειριστές λειτουργίας του κέντρου ελέγχου, κατάλληλο για εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο. Ακολούθησε η σχεδίαση των σχημάτων αποκοπής φορτίου για την αντιμετώπιση του περιστατικού της σβέσης του νοτίου τμήματος του Ελληνικού συστήματος το καλοκαίρι του 2004, η οποία βασίστηκε στην αναλυτική προσομοίωση του φαινομένου που πέτυχε να αναπαραστήσει με ακρίβεια τα πραγματικά γεγονότα. Προαπαιτήση της προσομοίωσης του περιστατικού της διακοπής αποτέλεσε η ανάγκη για βελτίωση του μοντέλου του Ελληνικού συστήματος, καθώς και η ανάγκη για προσομοίωση λειτουργιών της προστασίας του συστήματος που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη του συμβάντος. Τέλος, σχεδιάστηκαν σχήματα αποκοπής φορτίου για την αντιμετώπιση προβλημάτων αστάθειας τάσης, που ενδεχομένως μπορεί να εμφανιστούν στο Ελληνικό σύστημα σήμερα ή στο μέλλον. Ορισμένα από αυτά τα σχήματα αποκοπής φορτίου έχουν υιοθετηθεί και υλοποιηθεί ήδη από τον Διαχειριστή του Ελληνικού συστήματος.

Λέξεις Κλειδιά

Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ευστάθεια Τάσης, Προστασία Συστήματος, Σχήματα Προστασίας Συστήματος, Αποκοπή Φορτίου, Έλεγχος Εκτάκτου Ανάγκης Συστημάτων Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο, Έλεγχος Εκτάκτου Ανάγκης Διατάξεων Αντιστάθμισης Αέργου Ισχύος, Μοντελοποίηση Προστασίας, Διακοπές Παροχής Ισχύος

Abstract

This thesis deals with power system protection from the viewpoint of stability. The main objective is the design of system protection schemes against long-term voltage instability. In particular, this thesis focuses on the analysis of different emergency controls as means to prevent voltage collapse leading to a power system blackout. The protection measures of concern are Load-Tap-Changer (LTC) emergency controls and, ultimately, direct load shedding. Reactive element switching is also studied as an emergency control against voltage instability. Furthermore, a detailed survey is accomplished in order to investigate the necessary infrastructures needed to implement the aforementioned emergency controls in a real-life power system.

All the protection measures examined in this thesis are modeled and adapted to the framework of the already existing long-term simulation package WPSTAB of National Technical University of Athens for research purposes. Furthermore, protection functions with great impact on voltage stability have been also modeled and included in the software package WPSTAB, which is now suitable for dynamic simulations and stability studies of interconnected power systems taking into account protection controls.

System protection schemes against voltage instability in the Hellenic Interconnected System are designed and evaluated through such dynamic simulations. Local, decentralized system protection schemes based on LTC emergency control are designed, under the consideration of being the first line of defense against long-term voltage instability in the Hellenic Interconnected System.

On the contrary, load shedding is considered as system's safety net, in case any other emergency control failed to restore voltage stability. Thus, several response and event-based load shedding schemes with a centralized or decentralized architecture are designed, constituting a local or wide-area protection for the Hellenic Interconnected System.

In particular, decentralized undervoltage load shedding schemes are examined at first. Secondly, a centralized load shedding scheme, appropriate to restore system load power margin when the latter is considered insufficient in accordance to the projected load increase, is studied. This scheme is proposed for on-line application from the control center. Next, centralized and decentralized wide-area load shedding schemes are designed to be tested against the voltage instability incident occurred on July 12, 2004 on the Hellenic Interconnected System, leading to the blackout of the southern part. The design is based on the detailed simulation of the event, which is carried out with corrected data, generator adjustments and protection considerations. Although studied for research purposes, the aforementioned schemes provide alternative directives for designing load shedding schemes against voltage collapse in the Hellenic Interconnected System. Finally, event-based wide-area load shedding schemes are designed to cope with potential voltage stability problems in the Hellenic Interconnected System in the future. Two of these schemes are already implemented from the Hellenic Transmission System Operator.

Key Words

Power Systems, Voltage Stability, System Protection, System Protection Schemes, Load Shedding, Load-Tap-Changer Emergency Control, Reactive Element Switching Emergency Control, Protection Modeling, Blackouts

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή άρχισε να εκπονείται επίσημα τον Οκτώβριο του 2002 στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και ολοκληρώθηκε τον Φεβρουάριο του 2007.

Επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της προσπάθειάς μου Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Βουρνά για την αμέριστη βοήθεια και εποικοδομητική καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, η περάτωση της οποίας δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς τη συνεχή και άρτια επιστημονική υποστήριξη που μου παρείχε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους διδάκτορες Ε. Ποταμιανάκη και Β. Νομικό για την πρόθυμη συνεργασία τους από τα πρώτα βήματα της προσπάθειάς μου και ιδιαίτερος το διδάκτορα Μ. Καρυστιανό για τη βοήθειά του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

Επίσης στους υποψήφιους διδάκτορες Μ. Κοτλίδα, Α. Μέτσιου, Ν. Σακελλαρίδη και Γ. Τσουράκη, με τους οποίους μοιράστηκα αρκετό χρόνο συζητήσεων επιστημονικού και άλλου ενδιαφέροντος, εκφράζω την αμέριστη συμπαράστασή μου για την εκπλήρωση του στόχου τους.

Ευχαριστώ επίσης όλους τους ανθρώπους της ΔΕΗ και του ΔΕΣΜΗΕ με τους οποίους κατά καιρούς συνεργάστηκα όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ευχαριστώ την Αικατερίνη Καραγιάννη για την πολύπλευρη στήριξη και συμπαράσταση.

Αθήνα, Απρίλιος 2007

Βασίλειος Χ. Νικολαΐδης

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ	1
1.2 ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ	3
1.3 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ.....	4
1.3.1 Η Έννοια της Ευστάθειας Τάσης.....	4
1.3.2 Διάκριση Φαινομένων Ευστάθειας Τάσης	4
1.3.3 Εισαγωγή στους Μηχανισμούς Αστάθειας Τάσης	5
1.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ	8
1.4.1 Λειτουργικά Όρια Γεννητριών	8
1.4.2 Διατάξεις Προστασίας.....	9
1.4.3 Επίδραση Περιορισμού Υπερδιέγερσης στη Μεταφερόμενη Ισχύ	10
1.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ.....	11
1.5.1 Δυναμική Φορτίων	11
1.5.2 ΣΑΤΥΦ και Αποκατάσταση Φορτίου	12
1.5.3 Συνθήκες Ευστάθειας ΣΑΤΥΦ.....	15
1.5.4 Το ΣΑΤΥΦ ως Μηχανισμός Αστάθειας Τάσης	15
1.6 ΟΙΟΝΕΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	16
1.6.1 Διαχωρισμός Μοντέλου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Χρονικές Κλίμακες.....	16
1.6.2 Οιονεί Στατική Προσομοίωση.....	19
1.7 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	20
1.8 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ	22
1.9 ΣΧΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	24
1.9.1 Περιγραφή Σχημάτων Προστασίας Συστήματος.....	24
1.9.2 Κατηγοριοποίηση Σχημάτων Προστασίας Συστήματος.....	25
1.9.3 Σχεδίαση Σχημάτων Προστασίας Συστήματος.....	28
1.9.4 Σχήματα Προστασίας Συστήματος από Αστάθεια Τάσης.....	31
1.10 ΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	34
1.10.1 Περιγραφή	34
1.10.2 Εφαρμογή Εκτίμησης Ασφάλειας Τάσης σε Πραγματικό Χρόνο	36
1.11 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	38
1.11.1 Αποκοπή Φορτίου λόγω Χαμηλών Τάσεων	38
1.11.2 Έλεγχος Εκτάκτου Ανάγκης Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο	44
1.11.3 Σχήματα Προστασίας Συστήματος από Αστάθεια Τάσης με Αποκοπή Φορτίου ή Έλεγχο Εκτάκτου Ανάγκης Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο	46
1.12 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	51
1.13 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ

2.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	57
2.1.1 Ευστάθεια Σημείων Ισορροπίας.....	57
2.1.2 Διακλαδώσεις.....	59
2.1.3 Διακλάδωση Σαγματικού Κόμβου.....	59
2.1.4 Συστήματα Διαφορικών Εξισώσεων με Αλγεβρικούς Περιορισμούς.....	60
2.1.5 Ανάλυση Διακλαδώσεων Σαγματικού Κόμβου σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	61
2.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ.....	62
2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ.....	65
2.3.1 Εφαρμογή της Ανάλυσης Ευαισθησιών.....	65
2.3.2 Υπολογισμός Ευαισθησιών.....	66
2.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΗ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ.....	68
2.4.1 Παράσταση Διατάξεων.....	68
2.4.2 Μέθοδος Επίλυσης.....	74
2.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ.....	75
2.5.1 Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης.....	75
2.5.2 Αντιμετώπιση Μακροπρόθεσμης Αστάθειας Τάσης.....	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	83
3.2 ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ WPSTAB.....	84
3.2.1 Περιορισμός Ρεύματος Τυμπάνου Γεννητριών.....	84
3.2.2 Εφαρμογή Περιορισμού Ρεύματος Τυμπάνου στο Ελληνικό Σύστημα.....	87
3.2.3 Προστασία Υποτάσεως.....	90
3.2.4 Αυτόματη Ζεύξη-Απόζευξη Εγκάρσιων Πηνίων Αντιστάθμισης.....	91
3.2.5 Δυναμικά Φορτία.....	91
3.3 ΑΝΑΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	95
3.3.1 Σύγχρονες Αντιδράσεις Γεννητριών.....	96
3.3.2 Παράσταση Μαγνητικού Κορεσμού Γεννητριών.....	97
3.3.3 Προσδιορισμός Μέγιστης Τάσης Διέγερσης Γεννητριών.....	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΚΤΑΚΤΟ ΕΛΕΓΧΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΑΣΗΣ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΑΣΗΣ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ.....	105
4.1.1 Διατάξεις Ελέγχου ΣΑΤΥΦ.....	107
4.1.2 Μηχανισμοί Αλλαγής Λήψης ΣΑΤΥΦ.....	109
4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΚΤΑΚΤΟΥ ΑΝΑΓΚΗΣ ΣΑΤΥΦ.....	110
4.2.1 Γενική περιγραφή.....	110
4.2.2 Απενεργοποίηση Μηχανισμού Αλλαγής Λήψης ΣΑΤΥΦ.....	111
4.2.3 Μείωση Τάσης Αναφοράς ΣΑΤΥΦ.....	113
4.2.4 Κλείδωμα Λήψης ΣΑΤΥΦ σε Προκαθορισμένη Θέση.....	115
4.2.5 Αντιστροφή Λογικής Ελέγχου ΣΑΤΥΦ.....	116
4.2.6 Αποτίμηση Μέτρων - Συμπεράσματα.....	119

4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΜΙΚΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	119
4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	122
4.4.1 Δεδομένα και Παραδοχές Προσομοίωσης.....	122
4.4.2 Σενάρια Προσομοίωσης	125
4.4.3 Προσομοίωση Σεναρίου Ι.....	126
4.4.4 Προσομοίωση Σεναρίου ΙΙ	135
4.4.5 Συμπεράσματα.....	142
4.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ	143

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

5.1 ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΩΣ ΜΕΣΟ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	145
5.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	147
5.3 ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΝ ΤΑΣΗ	149
5.3.1 Μοντελοποίηση	152
5.3.2 Εφαρμογή σε Μικρό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	153
5.3.3 Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα.....	157
5.4 ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΠΡΟΣ ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ ΕΠΑΡΚΟΥΣ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	162
5.4.1 Επίδραση Παραμέτρων Φορτίου στο Περιθώριο Φόρτισης.....	162
5.4.2 Αλγόριθμος Αποκοπής Φορτίου με βάση την Ευαισθησία του Περιθωρίου Φόρτισης.....	164
5.4.3 Εφαρμογή στον Προληπτικό Έλεγχο Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	165
5.4.4 Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα.....	167
5.5 ΑΠΟΚΟΠΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΑ ΦΟΡΤΙΑ	173
5.5.1 Επίδραση Παραμέτρων Φορτίου στην Τάση.....	173
5.5.2 Αλγόριθμος Υπολογισμού Ευαισθησιών Τάσης και Αποκοπής Φορτίου	175
5.5.3 Υπολογισμός Ευαισθησιών Τάσης σε ένα Σενάριο Προσομοίωσης του Ελληνικού Συστήματος	176
5.6 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ	179

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΚΟΠΗΣ 12^{ΗΣ} ΙΟΥΛΙΟΥ 2004 ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ

6.1 Η ΔΙΑΚΟΠΗ ΤΗΣ 12 ^{ΗΣ} ΙΟΥΛΙΟΥ 2004	183
6.1.1 Κατάσταση του Ελληνικού Συστήματος πριν τη Διαταραχή	183
6.1.2 Περιγραφή Φαινομένου.....	184
6.1.3 Λεπτομερής Προσομοίωση Διακοπής.....	187
6.1.4 Συμπεράσματα.....	194
6.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΥΝΑΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ	194
6.3 ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΣΧΗΜΑ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	195
6.4 ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΣΧΗΜΑ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	199
6.4.1 Φιλοσοφία.....	199
6.4.2 Προσδιορισμός Ελάχιστης Αποκοπής Φορτίου	200
6.4.3 Διασπορά της Αποκοπής σε Μεγαλύτερο Πλήθος Ζυγών	202
6.4.4 Κεντρικό Σχήμα Αποκοπής Φορτίου με βάση την Αποδοτικότητα Περιοχών	205
6.5 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	209

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑ ΤΟ 2004

7.1 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ ΤΟ ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ ΤΟΥ 2004	211
7.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	212
7.2.1 Αιχμή Φορτίου 2005.....	212
7.2.2 Αιχμή Φορτίου 2006.....	213
7.2.3 Στιγμιότυπο Σεπτεμβρίου 2006	214
7.2.4 Προβλεπόμενο Στιγμιότυπο για το Καλοκαίρι του 2007	214
7.2.5 Συμπεράσματα	216
7.3 ΣΧΗΜΑ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟ	216
7.3.1 Φιλοσοφία Σχεδίασης.....	216
7.3.2 Μεθοδολογία Προσομοίωσης.....	217
7.3.3 Σενάριο Μεγίστου 2005.....	218
7.3.4 Σενάριο Μεγίστου 2006.....	226
7.3.5 Σενάριο Σεπτεμβρίου 2006.....	229
7.3.6 Υλοποίηση	231
7.3.7 Συμπεράσματα	232
7.4 ΣΧΗΜΑ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ.....	233
7.4.1 Φιλοσοφία Σχεδίασης.....	233
7.4.2 Σενάριο Καλοκαιριού 2007	235
7.4.3 Επανεξέταση Διαθέσιμων Εντολών Αποκοπής Φορτίου στην Αττική.....	240
7.4.4 Θεωρητικά Ελάχιστη Αποκοπή Φορτίου από την Αττική.....	242
7.4.5 Υλοποίηση	245
7.4.6 Συμπεράσματα	246
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΥΜΒΟΛΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	247

Συντομογραφίες

αμ	– Ανά μονάδα
ΑΡΤ	– Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης
ΔΕΗ	– Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
ΔΕΣΜΗΕ	– Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΗΕΔ	– Ηλεκτρεγερτική Δύναμη
Η/Ν	– Ηλεκτρονόμος
ΘΗΣ	– Θερμοηλεκτρικός Σταθμός
ΚΔ	– Κέντρο Διανομής
ΚΕΕ	– Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας
ΚΠΣ	– Κέντρο Προστασίας Συστήματος
ΚΥΤ	– Κέντρο Υπερυψηλής Τάσης
Μ/Σ	– Μετασχηματιστής
ΜΤ	– Μέση Τάση
ΠΡΤ	– Περιορισμός Ρεύματος Τυμπάνου
ΣΑΤΥΦ	– Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο
ΣΗΕ	– Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΠΥ	– Σύστημα Προστασίας Υπερδιέγερσης
ΤΚΠ	– Τοπικό Κέντρο Προστασίας
ΥΗΣ	– Υδροηλεκτρικός Σταθμός
ΥΣ	– Υποσταθμός
ΥΤ	– Υψηλή Τάση
ΥΥΤ	– Υπερυψηλή Τάση
ΧΤ	– Χαμηλή Τάση
EMS	– Energy Management System
FACTS	– Flexible Alternative Current Transmission System
FTP	– File Transfer Protocol
GPS	– Global Positioning System
HTTP	– Hypertext Transfer Protocol
HVDC	– High Voltage Direct Current
IRIG	– Inter Range Instrumentation Group
LAN	– Local Area Network
OMASES	– Open Market Access and Security Assessment System
PDC	– Phasor Data Concentrator
PLC	– Programmable Logic Controller
PMU	– Phasor Measurement Unit
RTU	– Remote Terminal Unit
SCADA	– Supervisory Control And Data Acquisition
SPS	– System Protection Schemes
STATCOM	– Static Synchronous Compensator
SVC	– Static VAr Compensator
TCP/IP	– Transmission Control Protocol / Internet Protocol
UCTE	– Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity
UPS	– Uninterruptible Power Service
VSA	– Voltage Security Assessment
WACS	– Wide Area Control System
WECC	– Western Electricity Coordinating Council

1ο Κεφάλαιο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ανάπτυξη των μεγάλων διασυνδεδεμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε στη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, ακολουθώντας το γενικότερο κλίμα εκβιομηχανισμού και αστικοποίησης της εποχής. Η από τότε ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στις ανεπτυγμένες και ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, θέτει το ζητούμενο της βέλτιστης εκμετάλλευσης των υφιστάμενων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στις μέρες μας η δυσκολία ανάπτυξης νέων έργων υποδομής για την ενίσχυση των ηλεκτρικών δικτύων, οδηγεί σε λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από συνθήκες ιδιαίτερης καταπόνησης. Παράλληλα, η απαίτηση που επιβάλλει ο ανταγωνισμός στις απορυθμισμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας για μείωση του κόστους παραγωγής, ενισχύει ακόμη περισσότερο την ήδη βεβαρυμένη χρήση των ηλεκτρικών δικτύων.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι βλάβες και οι αστοχίες του εξοπλισμού πολλαπλασιάζονται. Σε τέτοιες περιπτώσεις απρόβλεπτης απώλειας διατάξεων η ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, που προσδιορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την επάρκεια των εγκαταστάσεων στο σύστημα, περιορίζεται σημαντικά και είναι δυνατόν να μην επαρκεί για την εξυπηρέτηση της ζήτησης. Σε συνδυασμό και με άλλα προβλήματα που ανακύπτουν από την ίδια την αδυναμία των ηλεκτρικών δικτύων να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ισχύος λόγω φυσικών ή άλλων περιορισμών, μπορούν να προκληθούν σοβαρά φαινόμενα αστάθειας τάσης. Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η εμφάνιση φαινομένων αστάθειας τάσης έχει αναδειχθεί σε έναν από τους πιο σημαντικούς κινδύνους για την πρόκληση τοπικών ή εκτεταμένων διακοπών (blackout) στην τροφοδοσία των καταναλωτών [Tay94,VCV98]. Τα πρόσφατα παραδείγματα στην Ευρώπη και στην Αμερική [ADF05,PB04,VNT06] αναδεικνύουν τα σημαντικά προβλήματα ευστάθειας που υπάρχουν στον κόσμο.

Για τη διασφάλιση της ευστάθειας των τάσεων σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, απαραίτητη θεωρείται η λήψη μέτρων στο επίπεδο του προγραμματισμού, της προστασίας και της λειτουργίας του συστήματος. Εφόσον τα έργα ενίσχυσης είναι περιορισμένα, το ενδιαφέρον των ερευνητών στρέφεται στη βελτίωση των κανόνων λειτουργίας του συστήματος, ενώ το πεδίο έρευνας και ανάπτυξης νέων τεχνολογιών εντοπίζεται κυρίως στην προστασία.

Μακροπρόθεσμα μέτρα λαμβάνονται κυρίως στο στάδιο του προγραμματισμού. Αφορούν ως επί το πλείστον σε έργα ανάπτυξης του συστήματος, όπως είναι η κατασκευή νέων σταθμών παραγωγής και γραμμών μεταφοράς και η εγκατάσταση διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος. Τα μέτρα αυτά είναι τα πιο αποτελεσματικά για την ενίσχυση της ασφάλειας τάσης του συστήματος, αλλά προσκρούουν συνήθως σε διάφορα εμπόδια πολιτικής, οικονομικής ή περιβαλλοντολογικής φύσης.

Μέχρι πρόσφατα η σχεδίαση της προστασίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας περιλάμβανε αποκλειστικά τις αρχές της κλασικής προστασίας του εξοπλισμού. Ο ρόλος της κλασικής προστασίας είναι να προστατέψει κάθε διάταξη που υπόκειται σε σφάλμα απομονώνοντάς την από το δίκτυο. Δεν είναι καθόλου εύκολο να εκτιμήσει επαρκώς ο μελετητής, την επίδραση που θα έχει η ενεργοποίηση κάποιων ηλεκτρονόμων στη λειτουργία του υπόλοιπου συστήματος. Αρκετές φορές οι συνέπειες από την εφαρμογή της κλασικής προστασίας υπήρξαν δυσμενείς για την ευστάθεια τάσης του συνολικού συστήματος. Για παράδειγμα, η επίδραση των συστημάτων προστασίας υπήρξε καθοριστική στην ολική σβέση του δικτύου της Βορειοανατολικής Αμερικής [Fri76], προκαλώντας τη διακοπή της τροφοδοσίας σε 30 εκατομμύρια καταναλωτές.

Στις μέρες μας έγινε ιδιαίτερα επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης και εφαρμογής συστημικών σχημάτων προστασίας [CTF01], συμπληρωματικών της κλασικής προστασίας εξοπλισμού, ως ένα δίχτυ ασφάλειας (safety net) του συστήματος από την εμφάνιση φαινομένων αστάθειας τάσης. Τα σχήματα αυτά αποσκοπούν στην αντιμετώπιση συγκεκριμένων διαταραχών στο σύστημα ή άλλων

προβληματικών καταστάσεων που δεν μπορούν να προβλεφθούν στο στάδιο της σχεδίασης. Πρόκειται για πλήρως αυτοματοποιημένα συστήματα που έχουν ως σκοπό να παρακολουθούν συνεχώς τη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και να επεμβαίνουν μόνο τη στιγμή που χρειάζεται.

Τα αποτελεσματικότερα σχήματα προστασίας για την αντιμετώπιση των φαινομένων αστάθειας τάσης αφορούν στην αποκοπή φορτίου. Η αποκοπή φορτίου μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε έμμεσα, για παράδειγμα με κατάλληλες μεθόδους ελέγχου των Συστημάτων Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης, είτε άμεσα αποσυνδέοντας τροφοδοτικές γραμμές ή μεμονωμένα φορτία (π.χ. κινητήρες επαγωγής). Άλλα μέτρα προστασίας σχετίζονται με τον έλεγχο της αέργου ισχύος στο δίκτυο και αφορούν συνήθως στην ελεγχόμενη σύνδεση ή αποσύνδεση διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος (πυκνωτές, πηνία, ηλεκτρονικά ελεγχόμενες διατάξεις κλπ.).

Στο στάδιο της λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, οι απαιτούμενες ενέργειες για την πρόληψη ή αντιμετώπιση φαινομένων αστάθειας τάσης βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στον περιοδικό έλεγχο της ικανότητας του συστήματος να αντιμετωπίζει πιθανές διαταραχές, όπως για παράδειγμα την απώλεια μίας κρίσιμης διάταξης ή μία σημαντική αύξηση στο φορτίο. Ο έλεγχος αυτός, που καλείται *εκτίμηση ασφάλειας τάσης*, πραγματοποιείται με προσομοιώσεις της συμπεριφοράς του συστήματος, ξεκινώντας από το δεδομένο σημείο λειτουργίας και θεωρώντας ορισμένες κρίσιμες διαταραχές. Τίθεται επομένως το πρόβλημα ανάπτυξης και χρήσης κατάλληλων εργαλείων λογισμικού που θα βοηθούν στην αναγνώριση επικίνδυνων διαταραχών στο σύστημα, θα συμβάλουν στην εκτίμηση των ορίων ασφάλειάς του και θα προτείνουν κατάλληλα διορθωτικά μέτρα [GMK96, Tay00].

Οι πρώτες συστηματικές μέθοδοι εκτίμησης ασφάλειας τάσης υλοποιήθηκαν σε υπολογιστικό περιβάλλον μελέτης (off-line) και προϋποθέτουν σε μεγάλο βαθμό την επαρκή γνώση και εμπειρία των μηχανικών στα κέντρα ελέγχου ενέργειας. Την τελευταία δεκαετία έγιναν εντατικές προσπάθειες προς την κατεύθυνση ανάπτυξης μεθόδων εκτίμησης ασφάλειας τάσης που να είναι συμβατές με τις απαιτήσεις για εφαρμογές πραγματικού χρόνου (υπολογιστική ταχύτητα, συντήρηση δεδομένων, αξιολόγηση εμφανιζόμενων αποτελεσμάτων κλπ.). Παραδείγματα τέτοιων προσπαθειών παρουσιάζονται στην αναφορά [IPS02], όπου περιγράφεται η γενική πρακτική και παρατίθεται δείγμα υπαρχόντων εργαλείων λογισμικού, ενώ στην αναφορά [ISP00] παρουσιάζονται τεχνικές για τον προσδιορισμό ορίων ευστάθειας σε υπολογιστικό περιβάλλον.

Με βάση την εκτίμηση ασφάλειας τάσης του συστήματος, οι ενέργειες που αποφασίζονται στα κέντρα ελέγχου ενέργειας για την αντιμετώπιση των φαινομένων αστάθειας τάσης συνίστανται πρωταρχικά στην αύξηση των τερματικών τάσεων των γεννητριών, στην ανακατανομή της παραγωγής μεταξύ των γεννητριών, στη ζεύξη - απόζευξη διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος και στην ένταξη μονάδων κατ' εξαίρεση του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού.

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται το αντικείμενο της προστασίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας από φαινόμενα αστάθειας τάσης που μπορεί να οδηγήσουν σε ενδεχόμενη κατάρρευση των τάσεων του συστήματος και πιθανή σβέση του. Συγκεκριμένα η ανάλυση εστιάζεται στη σχεδίαση σχημάτων προστασίας κατάλληλων για την αντιμετώπιση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης. Τα σχήματα αυτά βασίζονται πρωτίστως στην αποκοπή φορτίου, που αποτελεί το πιο αποτελεσματικό (αλλά και επώδυνο) μέτρο σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης του συστήματος, ενώ επιπροσθέτως μελετώνται σχήματα προστασίας βασισμένα στον έλεγχο εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ και στην ελεγχόμενη ζεύξη - απόζευξη διατάξεων αντιστάθμισης.

Ιδιαίτερα μετά την επιτυχή προσομοίωση του φαινομένου της διακοπής παροχής ισχύος στο νότιο τμήμα του Ελληνικού συστήματος στις 12 Ιουλίου 2004 [VNT06], εξήχθησαν επαρκή αποτελέσματα και συμπεράσματα για τη σχεδίαση ενός συνδυασμού σχημάτων αποκοπής φορτίου, που θα μπορούσαν να αποτελέσουν ένα ύστατο πλέγμα ασφάλειας του συστήματος από παρόμοια φαινόμενα αστάθειας τάσης στο μέλλον. Εναλλακτικά σχήματα προστασίας του Ελληνικού συστήματος βασίζονται στην εφαρμογή των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ. Ειδική μέριμνα ελήφθη για τη σημερινή, αλλά και μελλοντική κατάσταση του Ελληνικού συστήματος. Εκτιμήσεις της ασφάλειας τάσης του συστήματος που πραγματοποιήθηκαν υπέδειξαν τις περιοχές της Πελοποννήσου και της Αττικής ως τις πιο επικίνδυνες για την πρόκληση γενικευμένης αστάθειας τάσης του συστήματος στο μέλλον. Για την αντιμετώπιση ενός τέτοιου ενδεχομένου σχεδιάστηκαν κατάλληλα σχήματα αποκοπής φορτίου, τα οποία εγκρίθηκαν από το Διαχειριστή του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ) που έχει προχωρήσει ήδη στην υλοποίησή τους.

1.2 ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

Τα δυναμικά φαινόμενα τα οποία συγκροτούν τη συμπεριφορά ενός φυσικού συστήματος, όπως είναι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, εξελίσσονται σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Αποτελεί συνήθη πρακτική για την απλοποίηση της ανάλυσης, η διάκριση των δυναμικών φαινομένων με βάση τη χρονική κλίμακα στην οποία διαδραματίζονται.

Η χρονική κλίμακα στην οποία εξελίσσονται τα δυναμικά φαινόμενα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τις διατάξεις του συστήματος που εμπλέκονται σε αυτά και κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα ως μερικές δεκάδες λεπτών. Μπορούμε έτσι να τα κατατάξουμε στις ακόλουθες κατηγορίες:

- *Πρακτικά ακαριαία φαινόμενα.* Πρόκειται για τα ηλεκτρομαγνητικά μεταβατικά φαινόμενα των γραμμών μεταφοράς και των γεννητριών. Τα φαινόμενα αυτά διαρκούν χρονικές περιόδους της τάξεως των ms-ms και πρακτικά δεν έχουν καμία συμβολή στα φαινόμενα αστάθειας τάσης, για αυτό και αμελούνται.
- *Βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα.* Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα δυναμικά φαινόμενα των διατάξεων που παρουσιάζουν απόκριση διάρκειας μερικών δευτερολέπτων. Τέτοιες διατάξεις είναι οι σύγχρονες γεννήτριες, οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης, οι ρυθμιστές στροφών, τα ταχέως μεταβαλλόμενα φορτία (κινητήρες), τα ηλεκτρονικά ελεγχόμενα συστήματα αέργου αντιστάθμισης και οι διασυνδετικές γραμμές συνεχούς ρεύματος.
- *Μακροπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα.* Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα δυναμικά φαινόμενα των διατάξεων που παρουσιάζουν απόκριση διάρκειας μερικών λεπτών. Τέτοιες διατάξεις είναι τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των σύγχρονων γεννητριών, τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης, οι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζευξης διατάξεων αντιστάθμισης άεργου ισχύος, ορισμένες διατάξεις προστασίας, τα αυτορρυθμιζόμενα φορτία σταθερής ενέργειας (θερμοστατικά) κλπ. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν επίσης βραδείες διατάξεις ελέγχου, όπως οι ελεγκτές που υλοποιούν την αυτόματη κατανομή παραγωγής και τη δευτερεύουσα ρύθμιση τάσης και συχνότητας.

Στον Πίν. 1.1 φαίνεται η γενική κατάταξη των διατάξεων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στις παραπάνω χρονικές κλίμακες.

Πίν. 1.1 Χρονικές κλίμακες διατάξεων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Συστήματα Προστασίας Υπερδιέγερσης Γεννητριών Συστήματα Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο Αυτόματοι Μηχανισμοί Ζεύξης-Απόζευξης Διατάξεων Αντιστάθμισης Διατάξεις Προστασίας Αυτορρυθμιζόμενα Φορτία Σταθερής Ενέργειας Αυτόματη Κατανομή Παραγωγής Δευτερεύουσα Ρύθμιση Τάσης και Συχνότητας	ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ
Σύγχρονες Γεννήτριες Αυτόματοι Ρυθμιστές Τάσης και Ρυθμιστές Στροφών Ταχέως Μεταβαλλόμενα Φορτία <ul style="list-style-type: none"> • Κινητήρες Επαγωγής • Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενα Φορτία Ηλεκτρονικά Συστήματα Αέργου Αντιστάθμισης (SVC, STATCOM) Σύνδεσμοι Συνεχούς Ρεύματος (HVDC links)	ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ
Δίκτυο	ΑΚΑΡΙΑΙΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

1.3 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ

1.3.1 Η Έννοια της Ευστάθειας Τάσης

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να διατηρεί αποδεκτά επίπεδα τάσεων (εντός προδιαγεγραμμένων ορίων) τόσο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας όσο και μετά την εμφάνιση μιας διαταραχής [CTF01]. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετοί ορισμοί που αναφέρονται στην ευστάθεια τάσης. Ο ακόλουθος ορισμός για την αστάθεια τάσης [VCV98] περιγράφει τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου:

Η αστάθεια τάσης προκαλείται από την απόπειρα των φορτίων (μέσω της δυναμικής συμπεριφοράς τους) να απορροφήσουν ισχύ μεγαλύτερη από το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς.

Η ευστάθεια τάσης σχετίζεται άμεσα με το όριο της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος μεταξύ δύο σημείων του ηλεκτρικού δικτύου, που σε μεγάλο βαθμό καθορίζεται από τις ηλεκτρικές αποστάσεις μεταξύ του κέντρου παραγωγής και της περιοχής φορτίου καθώς και από τα αποθέματα αέργου ισχύος στο σύστημα. Έχοντας υπερβεί το όριο αυτό, η διαδικασία μεταφοράς της ισχύος προς τα φορτία γίνεται ασταθής προκαλώντας μείωση αντί για αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος. Η διαδικασία αυτή αποτελεί την κύρια αιτία των προβλημάτων αστάθειας τάσης.

Ανάλογα με τη φύση των φορτίων η δυναμική συμπεριφορά τους εκδηλώνεται με διαφορετικό τρόπο. Συνήθως μετά από την εμφάνιση μιας διαταραχής στο σύστημα, τα φορτία τείνουν να αποκαταστήσουν την καταναλισκόμενη ισχύ είτε άμεσα, με αύξηση της αγωγιμότητάς τους, είτε έμμεσα, μέσω διατάξεων του συστήματος (π.χ. ΣΑΤΥΦ, κινητήρες επαγωγής, θερμοστατικά φορτία). Αυτή η δυναμική συμπεριφορά των φορτίων αποτελεί την κινητήρια δύναμη για την πρόκληση ενός φαινομένου αστάθειας τάσης. Ωστόσο άλλες δυναμικές, σχετικές με διατάξεις ελέγχου όπως τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των σύγχρονων γεννητριών, έχουν επίσης σημαντική επίδραση στην εξέλιξη ενός φαινομένου αστάθειας τάσης.

Είναι φανερό λοιπόν ότι τα φαινόμενα αστάθειας τάσης εμπλέκουν το σύνολο των συνιστωσών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ προκαλούνται από τη συμπεριφορά των φορτίων του. Η διαφοροποίηση αυτή, της ανάγκης για συνολική αποτίμηση του δικτύου και των διατάξεών του κατά τη μελέτη των δυναμικών φαινομένων, διακρίνει την ευστάθεια τάσης από την ευστάθεια συχνότητας.

Ένα φαινόμενο αστάθειας τάσης εκδηλώνεται συνήθως με μία συνεχή πτώση των τάσεων σε ορισμένους ζυγούς του συστήματος. Η πτώση αυτή είναι ιδιαίτερα έκδηλη στις τάσεις του συστήματος μεταφοράς. Μια επιτάχυνση του φαινομένου, η οποία οδηγεί στην απότομη βύθιση των τάσεων στην περιοχή εμφάνισης του προβλήματος είναι συνήθως η αναμενόμενη εξέλιξη και οδηγεί τις περισσότερες φορές στον αποσυγχρονισμό γεννητριών ή στην επιβράδυνση κινητήρων επαγωγής. Η κατάληξη αυτή της απότομης βύθισης των τάσεων ονομάζεται κατάρρευση τάσης. Η έννοια της κατάρρευσης έχει αποδοθεί συνοπτικά ως εξής [VCV98]:

Με τον όρο κατάρρευση εννοούμε μια απότομη (πρακτικά ακαριαία) καταστροφική μετάβαση της κατάστασης ενός συστήματος, η οποία οφείλεται σε αστάθεια που εξελίσσεται σε ταχύτερη χρονική κλίμακα από την αρχικά θεωρούμενη.

Μία πιθανή κατάληξη ενός σεναρίου αστάθειας τάσης μπορεί να είναι είτε η αδυναμία εξυπηρέτησης της ζήτησης σε μία περιοχή του συστήματος με εμφάνιση χαμηλών τάσεων σε αυτή ή κατάρρευσή τους (τοπικό φαινόμενο) είτε η πρόκληση διαδοχικών συμβάντων στο σύστημα που οδηγούν στην κατάρρευση των τάσεων στο μεγαλύτερο μέρος του και τελικά σε σβέση (γενικευμένο φαινόμενο).

1.3.2 Διάκριση Φαινομένων Ευστάθειας Τάσης

Τα φαινόμενα αστάθειας τάσης εξελίσσονται σε έναν χρονικό ορίζοντα που κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα έως μερικές δεκάδες λεπτών. Επομένως, μπορούν να ενταχθούν στην κατηγορία των βραχυπρόθεσμων ή μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης αναφέρεται στη δυναμική συμπεριφορά διατάξεων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, που έχουν την τάση να αποκαθιστούν την καταναλισκόμενη ισχύ σε χρονικό ορίζοντα της τάξης λίγων δευτερολέπτων. Τέτοιες είναι οι σύγχρονες γεννήτριες και οι διατάξεις ελέγχου τους, οι μηχανές επαγωγής, τα ηλεκτρονικά ελεγχόμενα φορτία και οι μετατροπείς ισχύος

στους συνδέσμους συνεχούς ρεύματος. Είναι προφανές ότι η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης εξελίσσεται στην ίδια χρονική κλίμακα με την αστάθεια γωνίας, με αποτέλεσμα κατά την εμφάνιση ενός φαινομένου αστάθειας να μη μπορεί να γίνει εύκολα η διάκριση μεταξύ των δύο αυτών γενεσιουργών αιτιών [PV06,Poi06].

Η *μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης* αναφέρεται στη δυναμική συμπεριφορά διατάξεων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, που δραστηριοποιούνται εντός χρονικού διαστήματος αρκετών λεπτών. Τέτοιες είναι τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των σύγχρονων γεννητριών, τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής, οι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζευξης διατάξεων αντιστάθμισης και τα θερμοστατικά φορτία. Η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης εξελίσσεται στην ίδια χρονική κλίμακα με την ευστάθεια συχνότητας, αλλά υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ τους, όπως προαναφέρθηκε.

Για την ανάλυση της ευστάθειας τάσης κατάλληλο εργαλείο αποτελεί η δυναμική προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η μελέτη των φαινομένων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης πραγματοποιείται συνήθως με προσομοιώσεις μεταβλητού βήματος ολοκλήρωσης [DS93]. Η τεχνική αυτή, που είναι κατάλληλη και για προσομοιώσεις στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, επιτρέπει την ακριβή προσομοίωση των ταχέως εξελισσόμενων δυναμικών φαινομένων του συστήματος. Για τη μελέτη των φαινομένων μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης κατάλληλη είναι η μέθοδος προσομοίωσης με χρήση της τεχνικής των οιονει στατικών μεταβολών [VCV98]. Η μέθοδος αυτή παρέχει το πλεονέκτημα της γρήγορης προσομοίωσης με θεώρηση παραδοχών, οι οποίες δεν αλλοιώνουν την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

Ειδικά για την ανάλυση της μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στατικές μέθοδοι [MGK93], όπως οι διάφορες παραλλαγές της ροής φορτίου (πολλαπλές ροές φορτίου, ροή φορτίου μετά από διαταραχή, ροή φορτίου για μη επιλύσιμες περιπτώσεις κλπ.), η μέθοδος της συνέχειας, η μέθοδος του σημείου κατάρρευσης, καθώς και μέθοδοι βελτιστοποίησης. Οι στατικές μέθοδοι είναι κατάλληλες για τον προσδιορισμό των ορίων ευστάθειας και τη στατική εκτίμηση της ασφάλειας τάσης, όμως σε σχέση με τις μεθόδους προσομοίωσης παρουσιάζουν το μειονέκτημα ότι δεν μπορούν να λάβουν υπόψη την επίδραση διαφόρων μέτρων ελέγχου που εφαρμόζονται μετά την εμφάνιση της διαταραχής. Επιπροσθέτως, απλώς η ύπαρξη σημείου ισορροπίας μετά τη διαταραχή δεν εγγυάται την ευστάθεια του συστήματος, αν δεν υπάρχει έλξη προς το ευσταθές σημείο ισορροπίας του.

1.3.3 Εισαγωγή στους Μηχανισμούς Αστάθειας Τάσης

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα η αστάθεια τάσης σχετίζεται με το όριο της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος μεταξύ δύο σημείων ενός ηλεκτρικού δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην παράγραφο αυτή θα δοθεί συνοπτική εικόνα του πώς η ύπαρξη αυτού του ορίου προκαλεί την εμφάνιση φαινομένων αστάθειας τάσης. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να εισαχθούν αρχικά οι έννοιες των χαρακτηριστικών φορτίου και δικτύου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Με τον όρο *χαρακτηριστική φορτίου* εννοούμε μία έκφραση της καταναλισκόμενης ενεργού και αέργου ισχύος στο φορτίο συναρτήσει της τάσης V και μίας ανεξάρτητης μεταβλητής z , που ονομάζεται ζήτηση και σχετίζεται με το πλήθος των συνδεδεμένων συσκευών κατανάλωσης στο ζυγό του φορτίου. Οι χαρακτηριστικές φορτίου δίνονται από τις παρακάτω γενικές σχέσεις:

$$P = P(V, z) \quad (1.1)$$

$$Q = Q(V, z) \quad (1.2)$$

Για δεδομένη ζήτηση z , οι (1.1)-(1.2) ορίζουν μία καμπύλη στο χώρο (P, Q, V) . Η καμπύλη αυτή τέμνει την επιφάνεια $V(P, Q)$, η οποία ορίζεται από τους περιορισμούς των εξισώσεων του δικτύου, σε ένα ή περισσότερα σημεία, που αντιστοιχούν στα εφικτά σημεία λειτουργίας του συστήματος για τη συγκεκριμένη ζήτηση. Σε περίπτωση μεταβολής της ζήτησης προκύπτουν νέα σημεία τομής στην επιφάνεια $V(P, Q)$. Αν τα σημεία τομής που αντιστοιχούν σε όλες τις τιμές ζήτησης προβληθούν στην επιφάνεια (P, V) προκύπτει η λεγόμενη *χαρακτηριστική δικτύου*, γνωστή και ως καμπύλη PV .

Πρέπει να σημειωθεί ότι η χαρακτηριστική δικτύου δεν μπορεί να εξαχθεί, εάν προηγουμένως δεν οριστεί η ακριβής σχέση εξάρτησης της καταναλισκόμενης ενεργού και αέργου ισχύος στο φορτίο από την τάση. Ένα τυπικό μοντέλο φορτίου που χρησιμοποιείται στις μελέτες ευστάθειας είναι το εκθετικό μοντέλο, που ονομάζεται έτσι επειδή η καταναλισκόμενη ισχύς αποτελεί εκθετική συνάρτηση της τάσης. Οι χαρακτηριστικές φορτίου του εκθετικού μοντέλου περιγράφονται από τις παρακάτω σχέσεις:

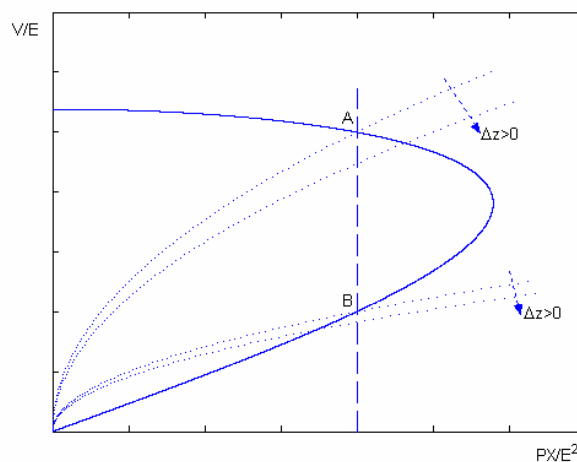
$$P = zP_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (1.3)$$

$$Q = zQ_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (1.4)$$

όπου P_0, Q_0 είναι η καταναλισκόμενη ενεργός και άεργος ισχύς αντίστοιχα για ονομαστική ζήτηση ($z = 1$) και τάση V ίση με την τάση αναφοράς V_0 , και α, β είναι εκθέτες που περιγράφουν τον τύπο του φορτίου. Έτσι αν θεωρήσουμε ένα εκθετικό φορτίο με $\alpha = \beta = 2$, οι εστιγμένες καμπύλες του Σχ. 1.1 αντιστοιχούν στις χαρακτηριστικές του φορτίου για διάφορες τιμές της ονομαστικής ισχύος P_0 , ενώ η συνεχής καμπύλη αποτελεί τη χαρακτηριστική του δικτύου. Τα σημεία A και B αντιστοιχούν σε δύο σημεία λειτουργίας που χαρακτηρίζονται από την ίδια καταναλισκόμενη ισχύ P , αλλά διαφορετικές τιμές ζήτησης z .

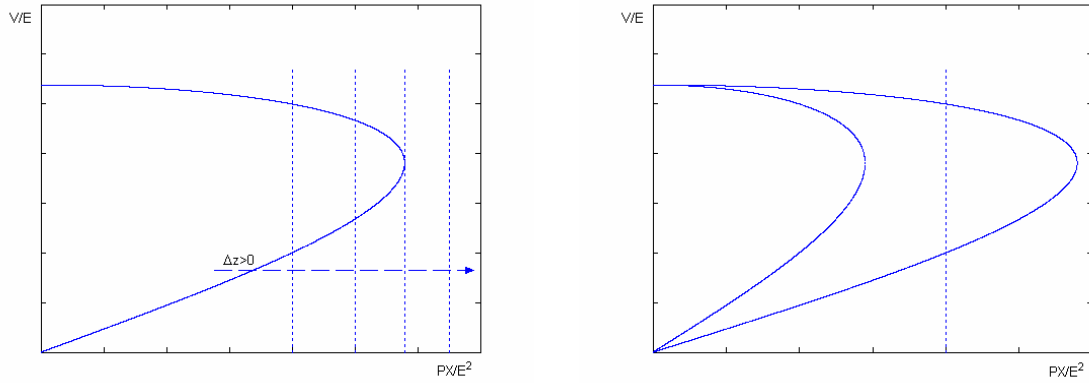
Ας θεωρήσουμε μία μικρή αύξηση Δz στη ζήτηση, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1 από τα βέλη. Στο σημείο A η αύξηση της ζήτησης προκαλεί μείωση της τάσης και συνακόλουθη αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος. Το γεγονός αυτό χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του συστήματος στο σημείο A ως ευσταθή. Στο σημείο B όμως, η αύξηση της ζήτησης συνοδεύεται από ταυτόχρονη μείωση της τάσης και της ισχύος. Αν το φορτίο του συστήματος θεωρείτο στατικό, το σημείο B θα μπορούσε να αποτελεί σημείο λειτουργίας αν και πιθανότατα μη βιώσιμο λόγω των χαμηλών τάσεων και αντίστοιχα των υψηλών ρευμάτων που θα εμφανίζονταν. Στην περίπτωση όμως που το φορτίο διαθέτει κάποιο μηχανισμό που θα αύξανε τη ζήτηση με σκοπό να πετύχει μία συγκεκριμένη κατανάλωση ισχύος, το σημείο B θα χαρακτηριζόταν ως ασταθές. Οι κινητήρες επαγωγής, τα ΣΑΤΥΦ και τα θερμοστατικά φορτία αποτελούν τυπικά παραδείγματα φορτίων που διαθέτουν τέτοιους άμεσους ή έμμεσους μηχανισμούς αποκατάστασης της καταναλισκόμενης ισχύος.

Ας θεωρήσουμε τώρα έναν άλλο τύπο φορτίου, του οποίου η συμπεριφορά μετά από μία διαταραχή περιγράφεται βραχυπρόθεσμα από την εστιγμένη καμπύλη του Σχ. 1.1, ενώ μακροπρόθεσμα από την κατακόρυφη διακεκομμένη καμπύλη που διέρχεται από τα σημεία A και B και αντιστοιχεί σε σταθερή ισχύ. Τέτοια φορτία μπορεί να είναι φορτία που διαθέτουν κάποιο μηχανισμό αποκατάστασης, όπως αυτά που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Στην περίπτωση αυτή η κατακόρυφη ευθεία αποτελεί τη μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου, ενώ οι εστιγμένες καμπύλες τις βραχυπρόθεσμες χαρακτηριστικές φορτίου. Η χαρακτηριστική δικτύου αντιστοιχεί πάλι σε συνθήκες ισορροπίας του συστήματος παραγωγής – μεταφοράς.

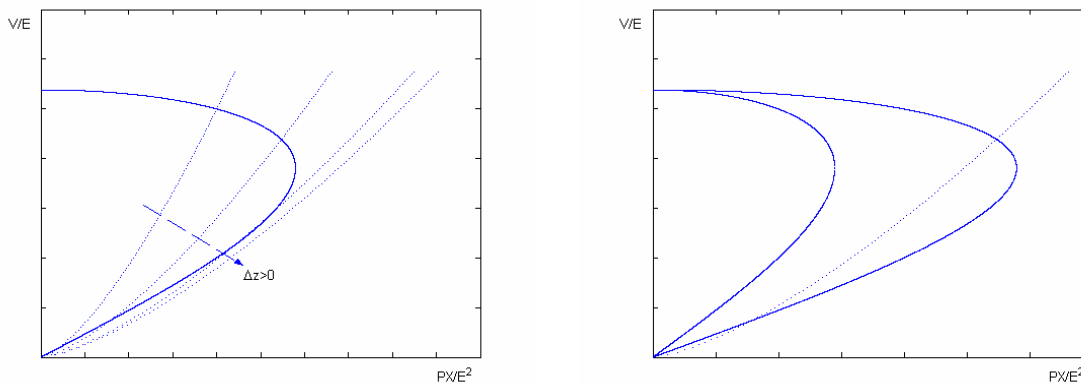


Σχ. 1.1 Χαρακτηριστικές δικτύου και φορτίου

Μία προφανής προϋπόθεση ευσταθούς λειτουργίας του συστήματος είναι η ύπαρξη ενός σημείου ισορροπίας που θα προκύπτει από την τομή της χαρακτηριστικής δικτύου και της μακροπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου. Μία συνήθης κατηγορία σεναρίων αστάθειας τάσης αντιστοιχεί στην περίπτωση, που μεταβολές στο σύστημα προκαλούν απώλεια του σημείου ισορροπίας.



α) αύξηση ζήτησης
β) εμφάνιση διαταραχής
Σχ. 1.2 Τυπικοί μηχανισμοί αστάθειας για εκθετικό φορτίο με εκθέτες $\alpha=\beta=0$



α) αύξηση ζήτησης
β) εμφάνιση διαταραχής
Σχ. 1.3 Τυπικοί μηχανισμοί αστάθειας για εκθετικό φορτίο με εκθέτες $\alpha=\beta=0,7$

Ένας τέτοιος μηχανισμός αστάθειας παρουσιάζεται στο Σχ. 1.2α. Η συνεχής αύξηση της ζήτησης z προκαλεί τη μετατόπιση της μακροπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου μέχρι τελικά να χαθεί το σημείο τομής με τη χαρακτηριστική δικτύου. Ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο αντιστοιχεί στην περίπτωση εμφάνισης μίας μεγάλης διαταραχής στο σύστημα (Σχ. 1.2β), όπως για παράδειγμα απώλεια μιας γεννήτριας ή μιας γραμμής μεταφοράς. Λόγω της διαταραχής, η χαρακτηριστική δικτύου συρρικνώνεται κατά τέτοιον τρόπο που δεν υπάρχει πια σημείο τομής με τη μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου. Και στα δύο παραδείγματα η κατάρρευση των τάσεων επέρχεται λόγω της απώλειας του σημείου ισορροπίας. Στο Σχ. 1.3 παρουσιάζονται οι δύο προαναφερθέντες μηχανισμοί αστάθειας για την περίπτωση ενός φορτίου με διαφορετικές τιμές εκθετών α και β .

Εξετάζοντας από τα παραπάνω παραδείγματα μόνο τις περιπτώσεις αστάθειας λόγω αύξησης της ζήτησης, το σημείο όπου η χαρακτηριστική φορτίου εφάπτεται στη χαρακτηριστική δικτύου προσδιορίζει το *όριο φόρτισης* του συστήματος [VCV98]. Αύξηση της ζήτησης πέραν του ορίου φόρτισης έχει ως συνέπεια την απώλεια του σημείου ισορροπίας και το σύστημα δεν μπορεί να λειτουργήσει. Στο Σχ. 1.2α το όριο φόρτισης ταυτίζεται με τη μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύ, καθώς το φορτίο θεωρείται πρακτικά σταθερής ισχύος ($\alpha = \beta = 0$). Ωστόσο το όριο φόρτισης δεν ταυτίζεται πάντοτε με το μέγιστο μεταφερόμενο φορτίο (Σχ. 1.3α). Υπάρχουν επίσης τύποι φορτίων για τους οποίους το σύστημα δεν παρουσιάζει όριο φόρτισης. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν σημεία λειτουργίας για όλες τις τιμές της ζήτησης του φορτίου (τα οποία ωστόσο μπορεί να μην είναι βιώσιμα για άλλους λόγους).

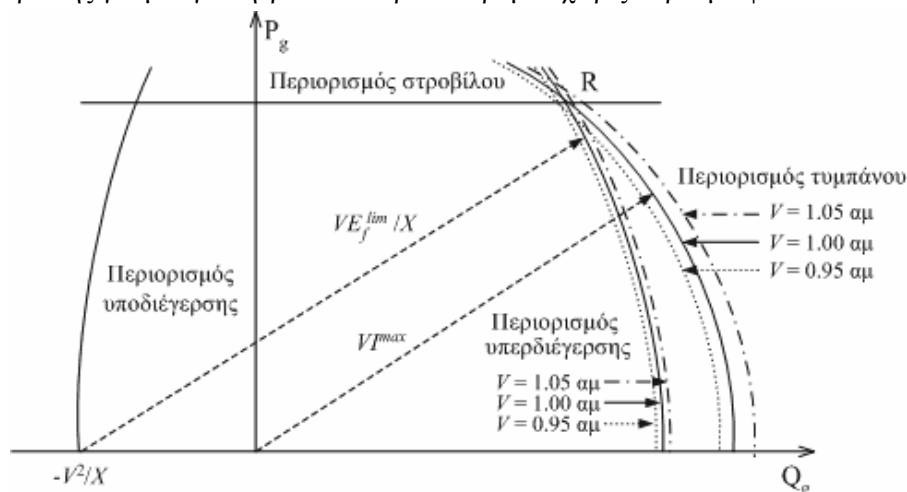
Τα παραπάνω μας εισάγουν στην έννοια των μηχανισμών αστάθειας τάσης, χωρίς όμως να εστιάζουν στις αιτίες γέννησής της. Μια πιο ενδελεχής ανάλυση των μηχανισμών αστάθειας απαιτεί την πλήρη περιγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς των διατάξεων του συστήματος και θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο. Ωστόσο, στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται μία αρχική προσέγγιση της επίδρασης των διατάξεων του συστήματος (γεννήτριες, φορτία) στην ευστάθεια τάσης, η οποία θα επιτρέψει την ποιοτική κατανόηση του φαινομένου για τη μετέπειτα ανάλυση των μέτρων προστασίας.

1.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ

Ο ρόλος των σύγχρονων γεννητριών στην εύρυθμη λειτουργία των μεγάλων διασυνδεδεμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι πρωταρχικής σημασίας. Οι γεννήτριες είναι οι κύριες πηγές αέργου ισχύος στο δίκτυο και σε μεγάλο βαθμό είναι υπεύθυνες για τη διατήρηση των τάσεων των ζυγών του συστήματος στα επιθυμητά επίπεδα. Ιδιαίτερως καθοριστική είναι η επίδραση της λειτουργικής κατάστασης των γεννητριών στην εξέλιξη ενός φαινομένου αστάθειας τάσης [Tay94,Kun94,VCV98]. Αξίζει να σημειωθεί ότι σχεδόν σε όλα τα περιστατικά αστάθειας τάσης, μία ή περισσότερες κρίσιμες γεννήτριες λειτουργούσαν με περιορισμένη την ικανότητα παραγωγής αέργου ισχύος. Επίσης σε περιπτώσεις υψηλής φόρτισης των γεννητριών είναι πιθανό να ενεργοποιηθούν οι αυτόματοι περιοριστές ρεύματος τυμπάνου [CTF93,CTF94a], περιορίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο την ικανότητα παραγωγής των γεννητριών. Συνεπώς στην ανάλυση ευστάθειας τάσης τα χαρακτηριστικά και οι περιορισμοί φόρτισης των γεννητριών έχουν ιδιαίτερη σημασία.

1.4.1 Λειτουργικά Όρια Γεννητριών

Το λειτουργικό σημείο μιας σύγχρονης γεννήτριας χαρακτηρίζεται από την ενεργό P_g και άεργο Q_g ισχύ της και από την τερματική της τάση V . Το διάγραμμα ικανότητας φόρτισης, στο οποίο απεικονίζεται η μέγιστη παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς της γεννήτριας για δεδομένη τάση, αποτελεί τη συνηθέστερη παράσταση των λειτουργικών ορίων μίας γεννήτριας. Ένα τυπικό διάγραμμα ικανότητας φόρτισης για μία γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα χωρίς κορεσμό φαίνεται στο Σχ. 1.4.



Σχ. 1.4 Διάγραμμα ικανότητας φόρτισης γεννητριών κυλινδρικού δρομέα χωρίς κορεσμό

Τέσσερις είναι οι περιοριστικοί παράγοντες που φράσσουν την περιοχή λειτουργίας μίας γεννήτριας:

- Η μέγιστη μηχανική ισχύς P_m^{max} του στροβίλου.
- Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα I^{max} του στάτη της γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση (ώστε να αποφεύγεται υπερφόρτιση του τυλίγματος τυμπάνου).
- Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση διέγερσης E_f^{lim} στη μόνιμη κατάσταση (ώστε να αποφεύγεται υπερφόρτιση του τυλίγματος πεδίου).
- Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση διέγερσης E_f^{min} στη μόνιμη κατάσταση (ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση στα άκρα του τυλίγματος τυμπάνου λόγω των εκεί παραγόμενων ισχυρών δινορρευμάτων όταν η γεννήτρια λειτουργεί υποδιεγερμένη).

Το τμήμα του διαγράμματος ικανότητας φόρτισης λόγω μέγιστης μηχανικής ισχύος του στροβίλου καθορίζεται, αν αμελήσουμε την αντίσταση του στάτη της γεννήτριας και θεωρήσουμε ονομαστική συχνότητα, από την ευθεία:

$$P_g = P_m^{max} \quad (1.5)$$

Το τμήμα του διαγράμματος λόγω μέγιστου ρεύματος τυμπάνου I^{max} καθορίζεται από την εξίσωση:

$$S = \sqrt{P_g^2 + Q_g^2} = VI^{max} \quad (1.6)$$

η οποία στο επίπεδο $P_g - Q_g$ ορίζει κύκλο με κέντρο την αρχή των αξόνων και ακτίνα VI^{max} .

Το τμήμα του διαγράμματος που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση διέγερσης E_f^{lim} , προκύπτει από τις εξισώσεις ισορροπίας της σύγχρονης γεννήτριας για τάση διέγερσης ίση με τη μέγιστη τιμή της στη μόνιμη κατάσταση:

$$V^2 (E_f^{lim})^2 = (V^2 + XQ_g)^2 + (XP_g)^2 \quad (1.7)$$

η οποία στο επίπεδο $P_g - Q_g$ ορίζει κύκλο με κέντρο $(P_g = 0, Q_g = -V^2/X)$ και ακτίνα VE_f^{lim} / X .

Από το διάγραμμα ικανότητας φόρτισης του Σχ. 1.4 μπορεί να φανεί η επίδραση της τάσης στα λειτουργικά όρια της γεννήτριας. Καθώς η τερματική τάση παίρνει μεγαλύτερες τιμές, το όριο ρεύματος στάτη και το όριο ρεύματος δρομέα γίνονται μεγαλύτερα. Αυτό βέβαια συμβαίνει στο παράδειγμα της απλής μηχανής κυλινδρικού δρομέα, όπου δεν συνεκτιμάται η επίδραση του φαινομένου του κορεσμού. Στη γενικευμένη περίπτωση, θεωρώντας το φαινόμενο του κορεσμού, όσο η τερματική τάση παίρνει μεγαλύτερες τιμές το όριο του ρεύματος δρομέα μπορεί να μειώνεται. Αυτό αποτελεί ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα των γεννητριών, το οποίο οφείλεται αποκλειστικά στον κορεσμό: όταν μειώνεται η τάση ακροδεκτών, η μηχανή μπορεί να παράγει περισσότερη άεργο ισχύ παρά όταν βρίσκεται υπό ονομαστική ή υψηλότερη τάση. Το γνώρισμα αυτό έχει θετική επίπτωση σε συστήματα που εμφανίζουν προβλήματα τάσης, στα οποία η ύπαρξη αποθεμάτων αέργου ισχύος σε χαμηλά επίπεδα τάσης είναι ευεργετική.

1.4.2 Διατάξεις Προστασίας

Κάτω από ιδιαίτερες συνθήκες, που μπορεί να προκληθούν για παράδειγμα από την εμφάνιση μιας διαταραχής στο σύστημα (π.χ. βραχυκύκλωμα), οι γεννήτριες είναι δυνατό να λειτουργήσουν για ορισμένο χρονικό διάστημα έξω από τα επιτρεπόμενα λειτουργικά τους όρια με κίνδυνο να καταστραφούν βασικά τους τμήματα. Για την αντιμετώπιση τέτοιων καταστάσεων υπάρχουν κατάλληλα συστήματα προστασίας [IWG03] που δρουν έγκαιρα ώστε να διασφαλίσουν την ακεραιότητα του εξοπλισμού. Για πολύ σοβαρές διαταραχές (π.χ. εσωτερικό σφάλμα στα τυλίγματα του στάτη) οι διατάξεις προστασίας δρουν απομονώνοντας τη γεννήτρια από το υπόλοιπο σύστημα. Σε άλλες περιπτώσεις, οι διατάξεις προστασίας δεν διακόπτουν τη λειτουργία της γεννήτριας, αλλά την περιορίζουν μέσα στα όρια ασφαλούς λειτουργίας της.

Στα πλαίσια της ανάλυσης ευστάθειας τάσης, καθοριστικό ρόλο παίζουν οι παρακάτω διατάξεις προστασίας των γεννητριών, οι οποίες περιλαμβάνονται στο σύστημα της αυτόματης ρύθμισης τάσης:

- *Σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης.* Το σύστημα αυτό προστατεύει το τύλιγμα διέγερσης από υπερθέρμανση που μπορεί να προκληθεί κατά την εμφάνιση υψηλού ρεύματος πεδίου.
- *Σύστημα προστασίας υποδιέγερσης.* Το σύστημα αυτό εμποδίζει τη μείωση της διέγερσης της μηχανής κάτω από ένα όριο (που αντιστοιχεί σε συνθήκες απορρόφησης αέργου ισχύος) για λόγους ευστάθειας.
- *Σύστημα περιορισμού ρεύματος τυμπάνου.* Το σύστημα αυτό προστατεύει το τύλιγμα του τυμπάνου από καταστροφή λόγω υπερτάσεων.
- *Περιοριστής V/f .* Ο περιοριστής αυτός προστατεύει τη γεννήτρια από την πλεονάζουσα μαγνητική ροή που μπορεί να προκύψει από υπερτάσεις ή από χαμηλές συχνότητες.

Οι ηλεκτρονόμοι προστασίας των γεννητριών αποσκοπούν κυρίως στην αντιμετώπιση προβλημάτων που δεν έχουν άμεση σχέση με τη βαθμιαία πτώση των τάσεων στο σύστημα, δηλαδή με φαινόμενα αστάθειας τάσης. Πρωτίστως αποσκοπούν στην αντιμετώπιση σοβαρών καταστάσεων δυσλειτουργίας των γεννητριών (απώλεια διέγερσης, εσωτερικά σφάλματα, ασύμμετρη φόρτιση κλπ.), αλλά και προβλημάτων αστάθειας άλλης μορφής από την αστάθεια τάσης (π.χ. ταλαντώσεις ισχύος). Ωστόσο, οι ηλεκτρονόμοι υποτάσεως των γεννητριών εξαιρούνται του παραπάνω κανόνα και έχουν καθοριστική επίδραση στην ευστάθεια τάσης του συστήματος, γιατί η λειτουργία τους προκαλεί την αποσύνδεση των γεννητριών από το δίκτυο.

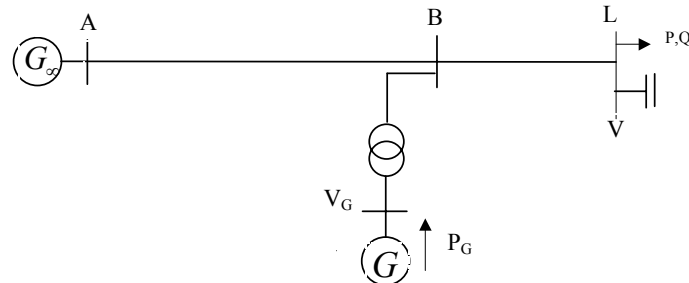
Η σχεδίαση των γεννητριών που πρόκειται να λειτουργήσουν σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται συνήθως κατά τέτοιο τρόπο, ώστε κατά τη λειτουργία τους να συναντούν πρώτα το όριο του ρεύματος διέγερσης και μετά αυτό του ρεύματος στάτη. Ωστόσο, σε συνθήκες χαμηλών τάσεων ή σε συνθήκες αυξημένης παραγωγής, το όριο του ρεύματος στάτη μπορεί να γίνει πιο περιοριστικό από αυτό του ρεύματος δρομέα [JPH97].

Οι περισσότερες γεννήτριες του Ελληνικού συστήματος δεν διαθέτουν αυτόματο σύστημα περιορισμού ρεύματος στάτη, με αποτέλεσμα κατά την εμφάνιση υπερεντάσεων να απαιτείται παρέμβαση του χειριστή του σταθμού για να κρατηθούν στο δίκτυο με περιορισμένο ρεύμα στάτη. Για μεγάλες υπερεντάσεις θα λειτουργήσει ο ηλεκτρονόμος υπερέντασης (στοιχείο αντιστρόφου χρόνου) που θα τις απομονώσει από το δίκτυο. Είναι προφανές ότι η ύπαρξη ενός αυτόματου συστήματος περιορισμού ρεύματος στάτη θα απέτρεπε τη λειτουργία του ηλεκτρονόμου και θα διατηρούσε τη γεννήτρια στο δίκτυο, με ευεργετικά αποτελέσματα για την ευστάθεια του συστήματος.

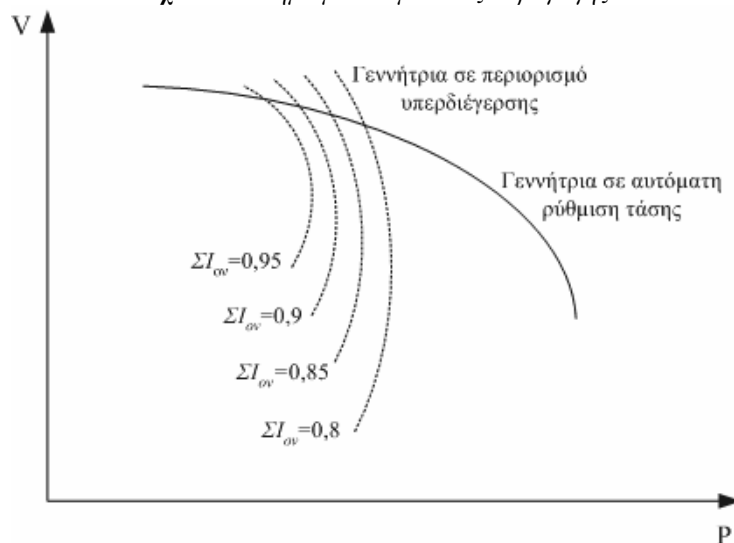
1.4.3 Επίδραση Περιορισμού Υπερδιέγερσης στη Μεταφερόμενη Ισχύ

Στον ορισμό της αστάθειας τάσης τονίστηκε ότι τα όρια της μεταφερόμενης ισχύος εξαρτώνται τόσο από το σύστημα μεταφοράς όσο και από το σύστημα παραγωγής. Στην παράγραφο αυτή θα δούμε πώς ο περιορισμός της διέγερσης των γεννητριών επιδρά στην ευστάθεια τάσης του συστήματος και συγκεκριμένα στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ στα φορτία.

Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί το απλό σύστημα του Σχ. 1.5, όπου από τις δύο μονάδες παραγωγής η G_∞ θεωρείται πηγή σταθερής τάσης (άπειρος ζυγός), ενώ η G αποτελεί συμβατική σύγχρονη γεννήτρια που υποστηρίζει τοπικά το δίκτυο. Αρχικά, η ενεργός ισχύς P του φορτίου καλύπτεται από τη γεννήτρια G , ενώ στη συνέχεια το φορτίο αυξάνεται υπό σταθερό συντελεστή ισχύος, με την ενεργό ισχύ που αντιστοιχεί στην αύξηση αυτή να παρέχεται από τη G_∞ και να μεταφέρεται μέσω της γραμμής AB . Η γραμμή AB θεωρείται ότι έχει πολύ μεγαλύτερο μήκος από τη γραμμή BL .



Σχ. 1.5 Σύστημα με δύο μονάδες παραγωγής



Σχ. 1.6 Καμπύλες PV πριν και μετά την υπερδιέγερση της γεννήτριας

Στο Σχ. 1.6 παρουσιάζονται οι καμπύλες PV του συστήματος. Η συνεχής καμπύλη αντιστοιχεί στις συνθήκες ισορροπίας του συστήματος παραγωγής - μεταφοράς για την περίπτωση που η γεννήτρια G λειτουργεί σε αυτόματη ρύθμιση τάσης, ενώ οι εστιγμένες καμπύλες στις συνθήκες ισορροπίας του συστήματος με τη γεννήτρια G σε λειτουργία υπό περιορισμό υπερδιέγερσης.

Οι διαφορετικές εστιγμένες καμπύλες του Σχ. 1.6 αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές ονομαστικού συντελεστή ισχύος ΣI_{ov} της γεννήτριας για την ίδια μέγιστη ισχύ στροβίλου P_R . Στο Σχ. 1.4 το σημείο R αντιστοιχεί στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας της γεννήτριας και προκύπτει από την τομή του ορίου στροβίλου και του ορίου τυμπάνου υπό ονομαστική τάση. Θεωρώντας την ενεργό P_R και άεργο Q_R ισχύ της γεννήτριας στο σημείο αυτό, ο ονομαστικός συντελεστής ισχύος ΣI_{ov} υπολογίζεται ως:

$$\Sigma I_{ov} = \frac{P_R}{\sqrt{P_R^2 + Q_R^2}} \quad (1.8)$$

Είναι προφανές ότι μικρότερος συντελεστής συνεπάγεται μεγαλύτερη ονομαστική φαινόμενη ισχύ, άρα και μεγαλύτερη επιτρεπόμενη τάση διέγερσης. Από τις καμπύλες του Σχ. 1.6 συμπεραίνουμε ότι:

- Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς στο φορτίο μειώνεται δραστικά όταν λαμβάνεται υπόψη ο περιορισμός διέγερσης της γεννήτριας.
- Το όριο άεργου ισχύος της γεννήτριας επηρεάζει τη μεταφορά ενεργού ισχύος, υποδεικνύοντας ότι η αστάθεια τάσης εμπλέκει μια ισχυρή σύζευξη μεταξύ ενεργού και άεργου ισχύος.
- Υψηλότερες τιμές του ονομαστικού συντελεστή ισχύος της γεννήτριας αντιστοιχούν σε μικρότερα περιθώρια παραγωγής άεργου ισχύος από τη γεννήτρια και άρα σε περιορισμό υπερδιέγερσης για μικρότερο φορτίο. Οι καμπύλες δείχνουν ότι είναι σημαντικό να διατηρούνται επαρκή αποθέματα άεργου ισχύος σε περιοχές κοντά στο φορτίο. Έτσι στο στάδιο προγραμματισμού του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να επιλέγονται γεννήτριες με αρκετά μικρό ονομαστικό συντελεστή ισχύος. Το κόστος που συνδέεται με την υψηλότερη φαινόμενη ισχύ είναι συνήθως λογικό.
- Συνήθως μετά τον περιορισμό διέγερσης της γεννήτριας το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος συναντάται σε υψηλότερη τάση. Όσο πιο αυστηρός ο περιορισμός υπερδιέγερσης, τόσο πιο έντονη η επίδραση αυτή.

1.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ

1.5.1 Δυναμική Φορτίων

Η ακριβής παράσταση των φορτίων είναι δύσκολο να επιτευχθεί, λόγω της πολυπλοκότητας και της διαφορετικής σύνθεσής τους στα συστήματα διανομής. Κατά συνέπεια η δυναμική συμπεριφορά των μεικτών φορτίων είναι δύσκολο να μελετηθεί. Η ανάλυση όμως της δυναμικής των φορτίων, που αποτελούν τις συνιστώσες ενός συστήματος διανομής, συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην κατανόηση της φύσης των φαινομένων αστάθειας τάσης [PSL95].

Στην πλειονότητά τους τα φορτία παρουσιάζουν ευαισθησία ως προς την τάση, δηλαδή η καταναλισκόμενη σε αυτά ισχύς εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση. Η εξάρτηση αυτή μπορεί να είναι μόνιμη, με τα φορτία στην περίπτωση αυτή να χαρακτηρίζονται ως *στατικά*, είτε μεταβαλλόμενη με το χρόνο, με τα φορτία να χαρακτηρίζονται ως *δυναμικά*. Στην τελευταία περίπτωση εγγενείς μηχανισμοί ή διατάξεις ελέγχου τείνουν να αποκαταστήσουν την καταναλισκόμενη ισχύ του φορτίου κοντά σε μία σταθερή τιμή. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται ως *αποκατάσταση ή επαναφορά ισχύος*.

Προτού αναφερθούμε σε συγκεκριμένες συνιστώσες φορτίου, είναι σκόπιμο να περιγραφεί στη γενική του μορφή ο μηχανισμός αποκατάστασης της ισχύος. Ας θεωρήσουμε ότι η ισχύς που καταναλώνεται κάθε χρονική στιγμή στα δυναμικά φορτία δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P = P_t(V, z, x) \quad (1.9)$$

$$Q = Q_t(V, z, x) \quad (1.10)$$

όπου P_t , Q_t είναι ομαλές συναρτήσεις της τάσης V , της ζήτησης z και μίας μεταβλητής κατάστασης x του φορτίου. Οι σχέσεις αυτές συνιστούν τις *μεταβατικές ή βραχυπρόθεσμες χαρακτηριστικές φορτίου*.

Ας θεωρήσουμε επίσης ότι η δυναμική των φορτίων περιγράφεται από την ομαλή διαφορική εξίσωση:

$$\dot{x} = f(V, z, x) \quad (1.11)$$

Στη μόνιμη κατάσταση η εξίσωση (1.11) μετασχηματίζεται στην αλγεβρική εξίσωση:

$$0 = f(V, z, x) \quad (1.12)$$

Εφόσον ισχύει $\partial f / \partial x \neq 0$ στη μόνιμη κατάσταση, η εξίσωση (1.12) με τη βοήθεια του Θεωρήματος Πεπλεγμένης Συνάρτησης μπορεί να εκφράσει τη μεταβλητή κατάστασης x του φορτίου συναρτήσει της τάσης V και της ζήτησης z :

$$x = h(V, z) \quad (1.13)$$

Είναι προφανές ότι η συνάρτηση h θα ικανοποιεί την εξίσωση (1.12):

$$0 = f(V, z, h(V, z)) \quad (1.14)$$

Αντικαθιστώντας την (1.13) στις (1.9) και (1.10) προκύπτουν οι *χαρακτηριστικές μονίμου καταστάσεως* ή *μακροπρόθεσμες χαρακτηριστικές* του φορτίου:

$$P = P_t(V, z, h(V, z)) = P_s(V, z) \quad (1.15)$$

$$Q = Q_t(V, z, h(V, z)) = Q_s(V, z) \quad (1.16)$$

Η μετάβαση από τη βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική του φορτίου στη χαρακτηριστική μονίμου καταστάσεως πραγματοποιείται σύμφωνα με τη δυναμική συμπεριφορά του φορτίου που περιγράφεται από την (1.11). Συνήθως η μεταβατική χαρακτηριστική φορτίου είναι περισσότερο ευαίσθητη στην τάση από τη μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική, με αποτέλεσμα στη μόνιμη κατάσταση η ισχύς του φορτίου να αποκαθίσταται πιο κοντά στην τιμή προ της διαταραχής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μετάβαση από φορτίο σταθερής αγωγιμότητας σε φορτίο σταθερής ισχύος.

Τυπικές συνιστώσες δυναμικών φορτίων είναι οι κινητήρες επαγωγής, τα φορτία που τροφοδοτούνται μέσω μετασχηματιστών διανομής εξοπλισμένων με ΣΑΤΥΦ και τα θερμοστατικά φορτία [VCV98]. Στον Πίν. 1.2 παρουσιάζονται οι μεταβλητές κατάστασης και ζήτησης των προαναφερόμενων φορτίων.

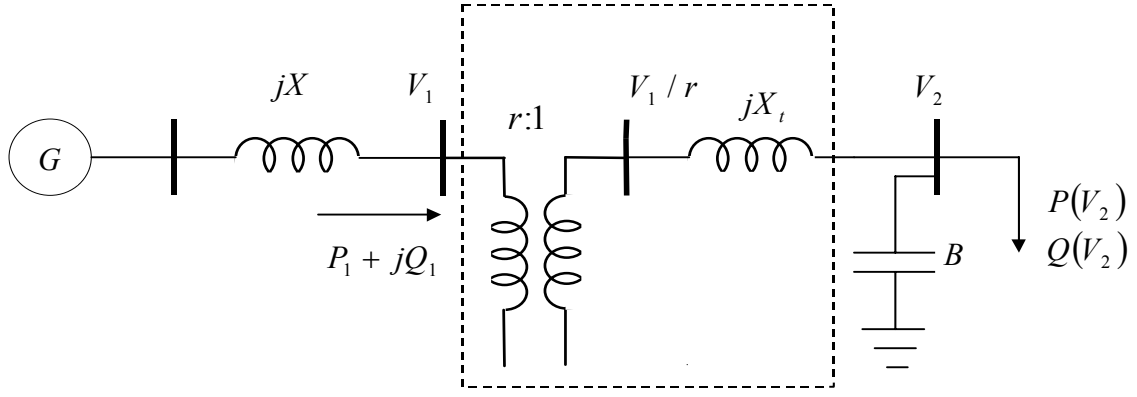
Πίν. 1.2 Τυπικές συνιστώσες δυναμικών φορτίων

ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ ΦΟΡΤΙΟΥ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ x	ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΖΗΤΗΣΗΣ z
Κινητήρες Επαγωγής	Ολίσθηση s	Μηχανική ροπή
Φορτία πίσω από ΣΑΤΥΦ	Λόγος μετασχηματισμού r	Ζήτηση φορτίου
Θερμοστατικά Φορτία	Πλήθος συνδεδεμένου εξοπλισμού	Εξυπηρέτηση ενέργειας

Στην παρούσα διατριβή το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς των φορτίων που τροφοδοτούνται μέσω μετασχηματιστών διανομής με ΣΑΤΥΦ. Θεωρήθηκε επίσης ένα ισοδύναμο μοντέλο δυναμικού φορτίου με εγγενή μηχανισμό αποκατάστασης. Οι κινητήρες επαγωγής δεν θα μας απασχολήσουν γιατί εμπλέκονται με βραχυπρόθεσμα φαινόμενα αστάθειας τάσης που δεν αποτελούν αντικείμενο της διατριβής.

1.5.2 ΣΑΤΥΦ και Αποκατάσταση Φορτίου

Το ΣΑΤΥΦ αποτελεί ίσως τον κυριότερο μηχανισμό αποκατάστασης της ισχύος στα φορτία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία αυτή είναι έμμεση. Στην προσπάθεια του ΣΑΤΥΦ να αποκαταστήσει το επίπεδο της τάσης στο ζυγό που ρυθμίζει, αποκαθιστά έμμεσα το φορτίο καθώς αυτό εξαρτάται εν γένει από την τάση. Κατά την εξέλιξη όμως ενός φαινομένου αστάθειας τάσης είναι αρκετά σύνηθες η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ να καθίσταται ασταθής, με αποτέλεσμα αντί για αποκατάσταση ισχύος να επιφέρει απόκλιση από την επιθυμητή ζήτηση. Για την κατανόηση αυτού του φαινομένου ακολουθεί περιγραφή της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ (με έλεγχο κανονικής κατάστασης) και ανάλυση της επίδρασής της στην ευστάθεια τάσης του συστήματος. Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται το συνεχές μοντέλο ΣΑΤΥΦ [Cal84,VCV98].



Σχ. 1.7 Σύστημα γεννήτριας - γραμμής μεταφοράς - μετασχηματιστή εξοπλισμένου με ΣΑΤΥΦ

Στο Σχ. 1.7 φαίνεται ένα απλό σύστημα που απαρτίζεται από μια γεννήτρια, μια γραμμή μεταφοράς και ένα φορτίο που τροφοδοτείται μέσω ενός ΣΑΤΥΦ. Το ΣΑΤΥΦ παριστάνεται ως ένας ιδανικός μετασχηματιστής σε σειρά με μια επαγωγική αντίδραση X_t . Θεωρούμε ότι η μεταβλητή λήψη βρίσκεται στο τυλίγμα πρωτεύοντος του μετασχηματιστή. Σε αυτή τη διάταξη για την αύξηση της τάσης στο φορτίο απαιτείται μείωση του λόγου μετασχηματισμού και αντίστροφα για τη μείωσή της αύξηση του λόγου μετασχηματισμού. Το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί ώστε να διατηρεί σταθερή την τάση στο δευτερεύον του, δηλαδή αμελούμε αρχικά την επίδραση της νεκρής ζώνης. Οι απώλειες στη γραμμή μεταφοράς και οι απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του μετασχηματιστή αμελούνται επίσης χάριν απλότητας.

Θεωρούμε ότι η ενεργός P και η άεργος Q ισχύς του φορτίου δίνονται συναρτήσει της τάσης V_2 και της ζήτησης z από τις παρακάτω γνωστές σχέσεις:

$$P = P(z, V_2) \quad (1.17)$$

$$Q = Q(z, V_2) \quad (1.18)$$

Το σύστημα χωρίζεται από τον ιδανικό μετασχηματιστή σε δύο υποσυστήματα. Στα κατάντη του ιδανικού μετασχηματιστή, η εξίσωση του δικτύου που συνδέει την τάση V_2 με την V_1 είναι:

$$\left(\frac{V_1}{r}\right)^2 = \left[V_2 + \left(\frac{Q(z, V_2)}{V_2} - BV_2\right)X_t\right]^2 + \left[\frac{P(z, V_2)X_t}{V_2}\right]^2 \quad (1.19)$$

Η ενεργός ισχύς P_1 που διέρχεται από τον ιδανικό μετασχηματιστή ισούται με αυτή που απορροφά το φορτίο και είναι συνάρτηση της τάσης V_2 . Η άεργος ισχύς Q_1 που διέρχεται από τον ιδανικό μετασχηματιστή ισούται με αυτή που απορροφά το φορτίο συν τις άεργες απώλειες στην αντίδραση X_t του μετασχηματιστή μείων την άεργο αντιστάθμιση στο ζυγό του φορτίου και είναι συνάρτηση της τάσης V_2 . Επομένως:

$$P_1 = P(z, V_2) \quad (1.20)$$

$$Q_1 = Q(z, V_2) + \frac{P(z, V_2)^2 + [Q(z, V_2) - BV_2]^2}{V_2^2} X_t - BV_2^2 \quad (1.21)$$

Απαλείφοντας το V_2 από τις εξισώσεις (1.20) και (1.21) με τη βοήθεια της (1.19), οι ισχύεις P_1 , Q_1 προκύπτουν συναρτήσει του λόγου V_1/r και της ζήτησης z :

$$P_1 = P(z, V_1/r) \quad (1.22)$$

$$Q_1 = Q(z, V_1/r) \quad (1.23)$$

Οι εξισώσεις (1.22) και (1.23) δίνουν τη χαρακτηριστική του φορτίου (όπως φαίνεται από την πλευρά πρωτεύοντος του μετασχηματιστή) για συγκεκριμένη τιμή του λόγου μετασχηματισμού r . Από τις παραπάνω σχέσεις είναι προφανές ότι όταν αλλάξει ο λόγος r του ΣΑΤΥΦ, αλλάζει και η χαρακτηριστική του φορτίου. Η δράση λοιπόν του ΣΑΤΥΦ μεταβάλλει τη χαρακτηριστική φορτίου. Μπορούμε έτσι να διακρίνουμε τη βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου που τροφοδοτείται μέσω ΣΑΤΥΦ, η οποία αντιστοιχεί σε ένα δεδομένο λόγο μετασχηματισμού r και τη μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου, η οποία αντιστοιχεί στο αποτέλεσμα της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, δηλαδή

στην αποκατάσταση της τάσης διανομής ($V_2 = V_2^0$) άρα και της καταναλισκόμενης ισχύος ($P_2 = P_2^0$). Με βάση τα παραπάνω η μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου παράγεται όταν αποκατασταθεί η τάση V_2 στην τάση αναφοράς V_2^0 , οπότε το φορτίο καταναλώνει σταθερή ποσότητα ενεργού (P^0) και άεργου (Q^0) ισχύος:

$$P = P(V_2^0) = P^0 \quad (1.24)$$

$$Q = Q(V_2^0) = Q^0 \quad (1.25)$$

Στα ανάντη του ιδανικού μετασχηματιστή, η σχέση που περιγράφει το σύστημα είναι η κλασική διτετράγωνη εξίσωση [VCV98]:

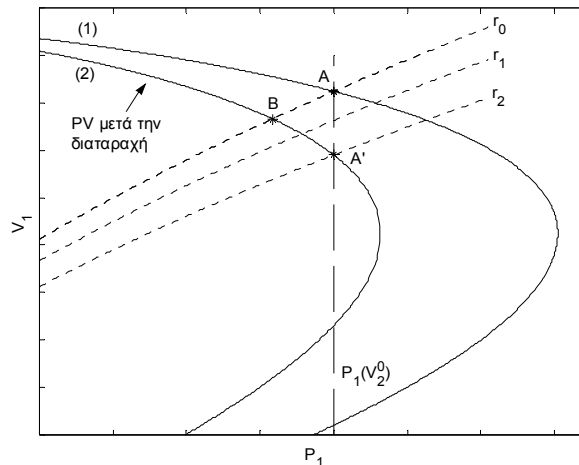
$$V_1^4 - (E^2 - 2Q_1X)V_1^2 + (P_1^2 + Q_1^2)X^2 = 0 \quad (1.26)$$

Απαλείφοντας από την παραπάνω σχέση το Q_1 μέσω της (1.21) προκύπτει μια συνάρτηση της μορφής:

$$f(P_1, V_1) = 0 \quad (1.27)$$

Η συνάρτηση αυτή παριστάνει τη *χαρακτηριστική του δικτύου*. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την παραδοχή σταθερής ζήτησης, η χαρακτηριστική δικτύου που προέκυψε δεν εξαρτάται από το λόγο r του ΣΑΤΥΦ. Κάθε σημείο της χαρακτηριστικής αυτής αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη ενεργό P_1 και άεργο Q_1 ισχύ του φορτίου και συγκεκριμένη τάση δικτύου V_1 , οπότε μέσω των σχέσεων (1.22)-(1.23) σε συγκεκριμένη τιμή του λόγου μετασχηματισμού r . Με άλλα λόγια η μετάβαση από σημείο σε σημείο της στατικής χαρακτηριστικής δικτύου πραγματοποιείται μέσω των βραχυπρόθεσμων χαρακτηριστικών φορτίου που αντιστοιχούν σε μεταβολές του λόγου r του ΣΑΤΥΦ.

Η μετάβαση αυτή φαίνεται στο Σχ. 1.8, όπου έχουν παρασταθεί γραφικώς δύο καμπύλες δικτύου PV, οι οποίες αναφέρονται στην κατάσταση του συστήματος πριν και μετά από την εμφάνιση μιας διαταραχής, οι βραχυπρόθεσμες χαρακτηριστικές φορτίου για τρεις τιμές του λόγου μετασχηματισμού r και η μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου όπως φαίνεται από το πρωτεύον του μετασχηματιστή.



Σχ. 1.8 Χαρακτηριστική δικτύου και χαρακτηριστικές φορτίου συστήματος

Οι δύο καμπύλες δικτύου PV αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της αντίδρασης X της γραμμής μεταφοράς. Συγκεκριμένα η καμπύλη (1) αντιστοιχεί στην αρχική τοπολογία του συστήματος (Σχ. 1.7), ενώ η καμπύλη (2) αντιστοιχεί σε μια διαταραχή, όπως είναι η απώλεια κυκλώματος, που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αντίδρασης της γραμμής μεταφοράς. Οι βραχυπρόθεσμες χαρακτηριστικές φορτίου αντιστοιχούν σε διαφορετικούς λόγους μετασχηματισμού. Η μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου έχει τη μορφή της κατακόρυφης ευθείας με διακεκομμένες γραμμές, γιατί η τάση αναφοράς V_2^0 (οπότε και η ισχύς $P(V_2^0)$ που καταναλώνει το φορτίο) είναι ανεξάρτητη της V_1 . Με άλλα λόγια, στη μόνιμη κατάσταση η ισχύς που απορροφά το φορτίο είναι σταθερή.

Για να ερμηνεύσουμε τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ ως θεωρήσουμε ότι το σημείο λειτουργίας του συστήματος βρίσκεται αρχικά στη θέση Α της καμπύλης (1) του Σχ. 1.8. Η εμφάνιση της διαταραχής αναγκάζει τη χαρακτηριστική του δικτύου να συρρικνωθεί στη μετά τη διαταραχή καμπύλη (2). Η τάση V_1 θα μειωθεί στιγμιαία ακολουθώντας τη βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου που αντιστοιχεί στην αρχική τιμή του λόγου r (δηλαδή θα κινηθεί από το σημείο Α στο Β). Σε αυτό το σημείο η καταναλισκόμενη ισχύς από το φορτίο είναι μικρότερη από αυτή που αντιστοιχεί σε τάση V_2^0 , συνεπώς μετά τη διαταραχή η τάση του φορτίου είναι μικρότερη της τάσης αναφοράς ($V_2 < V_2^0$). Το ΣΑΤΥΦ θα ενεργοποιηθεί μειώνοντας το λόγο μετασχηματισμού ώστε να αυξήσει την τάση V_2 . Η αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού θα αλλάξει τη βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου και το σημείο λειτουργίας θα κινηθεί κατά μήκος της χαρακτηριστικής δικτύου, όπως αυτή διαμορφώνεται μετά τη διαταραχή, μέχρι να φτάσει στο σημείο Α', όπου η μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου τέμνει τη χαρακτηριστική δικτύου. Με τον τρόπο αυτό κατά τη διάρκεια που το ΣΑΤΥΦ αποκαθιστά την τάση στο δευτερεύον, ταυτόχρονα αποκαθιστά και την καταναλισκόμενη ισχύ στο φορτίο.

1.5.3 Συνθήκες Ευστάθειας ΣΑΤΥΦ

Προκειμένου να εξάγουμε τις συνθήκες ευστάθειας των ΣΑΤΥΦ, θα θεωρήσουμε ότι η λειτουργία τους περιγράφεται από την παρακάτω συνεχή διαφορική εξίσωση υπό περιορισμούς:

$$T_c \dot{r} = V_2 - V_2^0, \quad r_{min} \leq r \leq r_{max} \quad (1.28)$$

Γραμμικοποιώντας τη διαφορική εξίσωση (1.28) προκύπτει:

$$\Delta \dot{r} = \frac{1}{T_c} \frac{\partial V_2}{\partial r} \Delta r \quad (1.29)$$

Συνεπώς η συνθήκη ευστάθειας ενός ΣΑΤΥΦ είναι η εξής:

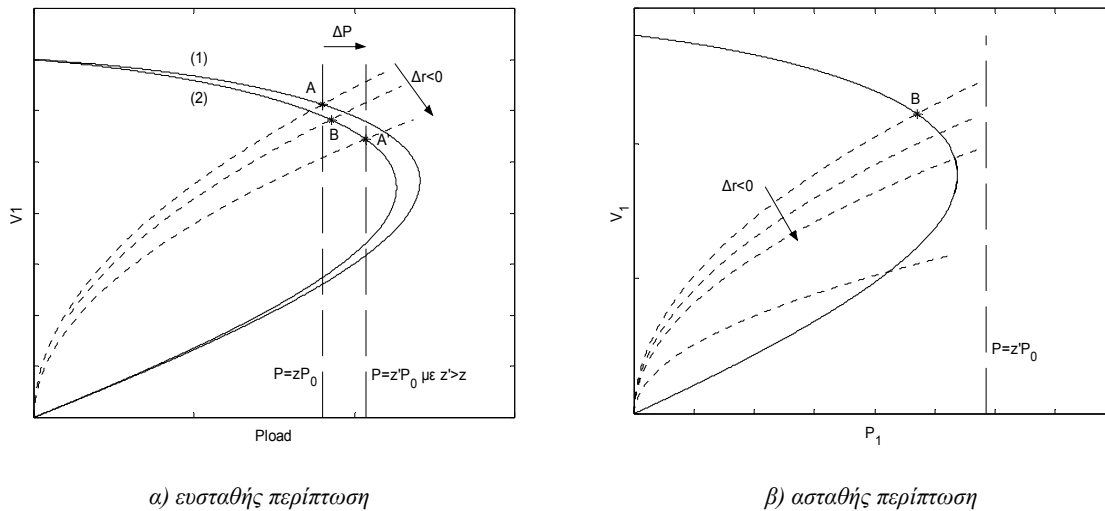
$$\frac{\partial V_2}{\partial r} < 0 \quad (1.30)$$

Δηλαδή η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ είναι ευσταθής όταν η αύξηση του λόγου μετασχηματισμού r έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή V_2 και αντίστροφα. Αντίθετα όταν η αύξηση του λόγου μετασχηματισμού r του ΣΑΤΥΦ έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή V_2 και αντίστροφα, η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ είναι ασταθής.

1.5.4 Το ΣΑΤΥΦ ως Μηχανισμός Αστάθειας Τάσης

Στο Σχ. 1.9 φαίνεται τι θα συμβεί αν μεταβληθεί η ζήτηση του φορτίου. Η αύξηση της ζήτησης από z σε z' αντιστοιχεί σε μετατόπιση της μακροπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου κατά ΔP από τη θέση P πριν τη μεταβολή στη θέση P' . Η αύξηση της ζήτησης μεταβάλλει επίσης ακαριαία τόσο τη μεταβατική χαρακτηριστική φορτίου όσο και τη χαρακτηριστική δικτύου του συστήματος, δεδομένου ότι αλλάζει ο συντελεστής ισχύος του φορτίου που «αντιλαμβάνεται» το δίκτυο στο πρωτεύον του μετασχηματιστή.

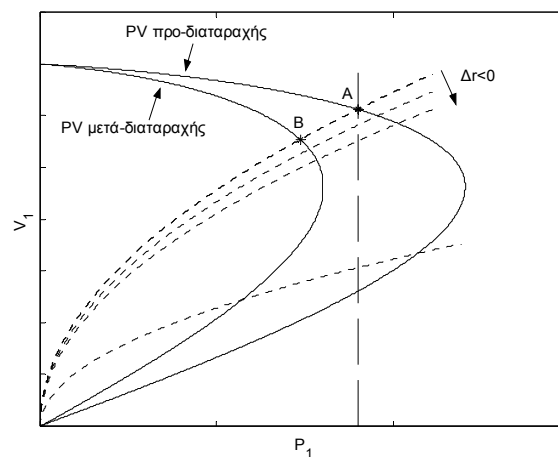
Στην ευσταθή περίπτωση (Σχ. 1.9α) το σημείο λειτουργίας μετατίθεται από το Α, προ της αύξησης της ζήτησης, στο Β. Δεδομένου ότι στο σημείο Β η καταναλισκόμενη ισχύς είναι μικρότερη από P' (άρα και η τάση του δευτερεύοντος είναι μικρότερη από την τάση αναφοράς), ο λόγος μετασχηματισμού μειώνεται διαδοχικά κατά Δr μέχρι το σημείο λειτουργίας να γίνει το Α'. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στην τομή της μακροπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου με τη χαρακτηριστική του δικτύου για τη νέα ζήτηση z' . Αν όμως η αύξηση της ζήτησης του φορτίου είναι τέτοια ώστε να μην υπάρχει σημείο τομής των χαρακτηριστικών δικτύου και φορτίου μονίμου καταστάσεως (Σχ. 1.9β), τότε το ΣΑΤΥΦ προσπαθώντας να αποκαταστήσει την τάση στο ζυγό φορτίου εξακολουθεί να μειώνει το λόγο μετασχηματισμού πέραν της τιμής που αντιστοιχεί στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, δίνοντας κάθε φορά ένα σημείο λειτουργίας με διαρκώς χαμηλότερη τάση.



Σχ. 1.9 Αύξηση ζήτησης φορτίου

Ένα διαφορετικό σενάριο αστάθειας μπορεί να εξελιχθεί αν λόγω κάποιας μεταβολής στο δίκτυο μεταβληθεί η χαρακτηριστική του κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μην υπάρχει σημείο λειτουργίας στη μόνιμη κατάσταση για την αρχική ζήτηση του φορτίου (Σχ. 1.10).

Τυπικές διαταραχές που μπορούν να οδηγήσουν σε αστάθεια τάσης είναι η απώλεια γραμμών μεταφοράς ή μονάδων παραγωγής, η αστοχία διατάξεων αντιστάθμισης κλπ. Σημειώνεται ότι στα σενάρια αστάθειας των Σχ. 1.9 και Σχ. 1.10 η τάση στο δίκτυο θα πέφτει συνεχώς μέχρις ότου το ΣΑΤΥΦ εξαντλήσει την περιοχή ρύθμισής του. Όταν συμβεί αυτό και αν υποθέσουμε ότι δεν υπάρχει άλλη δυναμική συνιστώσα φορτίου, το φαινόμενο θα σταματήσει να εξελίσσεται, αλλά η τάση θα παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα (μερική κατάρρευση).



Σχ. 1.10 Σενάριο αστάθειας τάσης λόγω διαταραχής στο δίκτυο

1.6 ΟΙΟΝΕΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

1.6.1 Διαχωρισμός Μοντέλου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Χρονικές Κλίμακες

Η μαθηματική αποτύπωση των δυναμικών φαινομένων που εξελίσσονται σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με χρήση των εξισώσεων (διαφορικών και αλγεβρικών) που περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά των διατάξεων του συστήματος που εμπλέκονται σε αυτά. Έτσι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στη μαθηματική του έκφραση περιγράφεται από το παρακάτω σύστημα διαφορικών εξισώσεων που υπόκειται σε αλγεβρικούς περιορισμούς [VCV98]:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (1.31)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (1.32)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (1.33)$$

$$\mathbf{z}_d(k+1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k), \mathbf{p}) \quad (1.34)$$

όπου:

- \mathbf{x} : διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα (διάστασης n_x)
- \mathbf{y} : διάνυσμα των αλγεβρικών μεταβλητών (διάστασης n_y)
- \mathbf{z}_c : διάνυσμα των συνεχών μεταβλητών κατάστασης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα (διάστασης n_c)
- \mathbf{z}_d : διάνυσμα των διακριτών μεταβλητών κατάστασης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα (διάστασης n_d)
- \mathbf{p} : διάνυσμα των συνεχών p_c (πλήθους n_{pc}) και διακριτών p_d (πλήθους n_{pd}) μεταβλητών εισόδου και παραμέτρων του συστήματος (διάστασης $n_p = n_{pc} + n_{pd}$).

Στο παραπάνω σύστημα, οι εξισώσεις (1.31) αποτελούν τις n_y αλγεβρικές εξισώσεις \mathbf{g} του δικτύου. Όπως βλέπουμε η απόκριση του δικτύου θεωρείται ακαριαία. Στην ακαριαία απόκριση του δικτύου συμπεριλαμβάνεται και αυτή των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων στα τυλίγματα του στάτη των σύγχρονων γεννητριών και των κινητήρων επαγωγής. Αμελούνται δηλαδή οι τάσεις μετασχηματιστή, άρα θεωρούμε ότι έχουμε μια οιονεί ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση, όπου οι στιγμιαίες τιμές των τάσεων και ρευμάτων παριστάνονται από χρονικά μεταβαλλόμενους παραστατικούς μιγάδες.

Οι εξισώσεις (1.32) αποτελούν τις n_x διαφορικές εξισώσεις \mathbf{f} , οι οποίες περιγράφουν τη συνεχή δυναμική συμπεριφορά των διατάξεων που δρουν στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Οι διατάξεις αυτές είναι οι σύγχρονες γεννήτριες και οι ρυθμιστικές διατάξεις τους, οι κινητήρες επαγωγής, τα ηλεκτρονικά ελεγχόμενα συστήματα αντιστάθμισης και οι διασυνδετικές γραμμές συνεχούς ρεύματος.

Οι εξισώσεις (1.33) αποτελούν τις n_c διαφορικές εξισώσεις \mathbf{z}_c , οι οποίες περιγράφουν τη συνεχή δυναμική συμπεριφορά των διατάξεων που δρουν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Οι διατάξεις αυτές είναι τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης, τα αυτορρυθμιζόμενα φορτία και ορισμένες διατάξεις προστασίας.

Οι εξισώσεις (1.34) αποτελούν τις n_d εξισώσεις διαφορών \mathbf{z}_d , οι οποίες περιγράφουν τη διακριτή δυναμική συμπεριφορά των διατάξεων που δρουν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Οι διατάξεις αυτές είναι τα ΣΑΤΥΦ, τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης, οι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζευξης διατάξεων αντιστάθμισης και ορισμένες διατάξεις προστασίας.

Το σύστημα εξισώσεων (1.31)-(1.34) περιγράφει πλήρως την κατάσταση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε χρονική στιγμή. Στις μέρες μας η υπολογιστική ικανότητα των ηλεκτρονικών υπολογιστών επιτρέπει την ενιαία επίλυση του παραπάνω συστήματος διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων. Ωστόσο επειδή το πλήρες μοντέλο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εμπλέκει ταυτόχρονα όλους τους μηχανισμούς αστάθειας τάσης, για λόγους σαφέστερης κατανόησης του προβλήματος, είναι προτιμότερη η απλοποίηση της επίλυσης με εκμετάλλευση του διαχωρισμού των δυναμικών φαινομένων του συστήματος στις δύο χρονικές κλίμακες εξέλιξης, τη βραχυπρόθεσμη και τη μακροπρόθεσμη. Επιπροσθέτως, δεν είναι καθόλου εύκολο να βρεθούν δεδομένα που να παριστάνουν λεπτομερώς όλες τις διατάξεις ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως απαιτείται σε προγράμματα πλήρους προσομοίωσης.

Η απλοποίηση της επίλυσης του πλήρους συστήματος εξισώσεων επιτυγχάνεται με εφαρμογή της τεχνικής των οιονεί στατικών μεταβολών [VCV98]. Σύμφωνα με αυτή, το πλήρες σύστημα διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων μπορεί να διαχωριστεί σε δυο υποσυστήματα ελαττωμένης τάξης, καθένα από τα οποία είναι κατάλληλο για την ανάλυση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στην αντίστοιχη χρονική κλίμακα. Συγκεκριμένα, το βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα περιγράφει τη δυναμική του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, ενώ το οιονεί στατικό σύστημα περιγράφει τη δυναμική του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Το βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα βασίζεται στην παραδοχή ότι κατά τη διάρκεια εξέλιξης των ταχέων δυναμικών φαινομένων, τα αργά δυναμικά φαινόμενα του συστήματος εξελίσσονται με

πολύ βραδύτερο ρυθμό και κατά συνέπεια μπορούν να θεωρηθούν σταθερά. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι στο πλήρες σύστημα διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων οι μεταβλητές κατάστασης \mathbf{z}_c και \mathbf{z}_d παραμένουν σταθερές σε όλο το διάστημα που ενδιαφέρει στην ανάλυση.

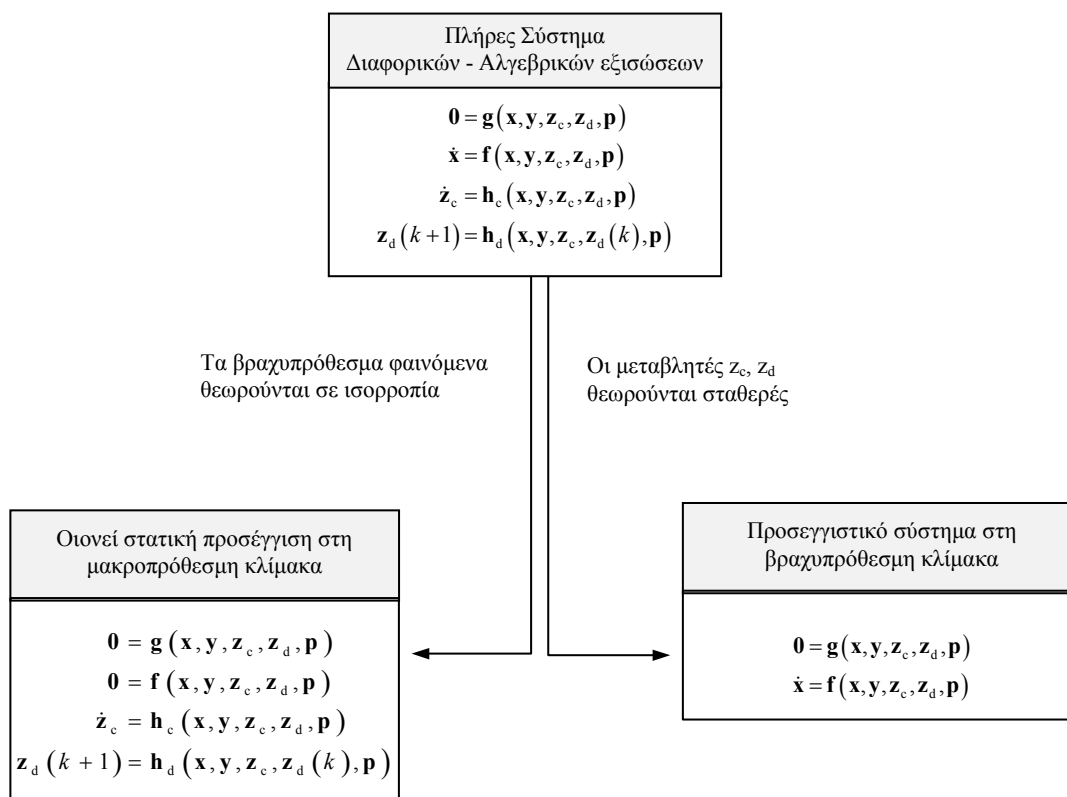
Το οιονεί στατικό σύστημα βασίζεται στην παραδοχή ότι τα ταχεία δυναμικά φαινόμενα είναι καταρχήν ευσταθή και συγκρινόμενα με τα βραδέα εξελίσσονται πολύ ταχύτερα. Αυτό σημαίνει ότι στο πλήρες σύστημα διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων, οι εξισώσεις (1.32) μπορούν να αντικατασταθούν από τις εξισώσεις ισορροπίας τους:

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (1.35)$$

Η χρήση της μεθόδου της οιονεί στατικής προσέγγισης είναι αποδεκτή όταν ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες:

- Οι αλγεβρικές εξισώσεις (1.31) δεν παρουσιάζουν ιδιόμορφα σημεία.
- Τα δυναμικά φαινόμενα στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα δεν παρουσιάζουν αστάθεια για σταθερές τιμές των αργών μεταβλητών $\mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d$, δηλαδή ο πίνακας κατάστασης του συστήματος των αλγεβρικών (1.31) και διαφορικών (1.32) εξισώσεων έχει όλες τις ιδιοτιμές του με αρνητικά πραγματικά μέρη.
- Το σημείο λειτουργίας του συστήματος μετά από διαταραχή βρίσκεται στην περιοχή έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων.

Τα παραπάνω οδηγούν στα προσεγγιστικά μοντέλα του Σχ. 1.11. Σε σχέση με το πλήρες σύστημα, τα προσεγγιστικά υποσυστήματα προσδιορίζουν το καθένα μία μόνο χρονική κλίμακα και είναι πιο εύκολο να επιλυθούν. Ένα πλεονέκτημα που αποκομίζεται από τη χρήση των συστημάτων ελαττωμένης τάξης, είναι η κατά πολύ μείωση του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός απαραίτητο σε πολλές εφαρμογές ευστάθειας τάσης (ιδιαίτερα σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου).



Σχ. 1.11 Προσεγγιστικό μοντέλο συστήματος

1.6.2 Οιονεί Στατική Προσομοίωση

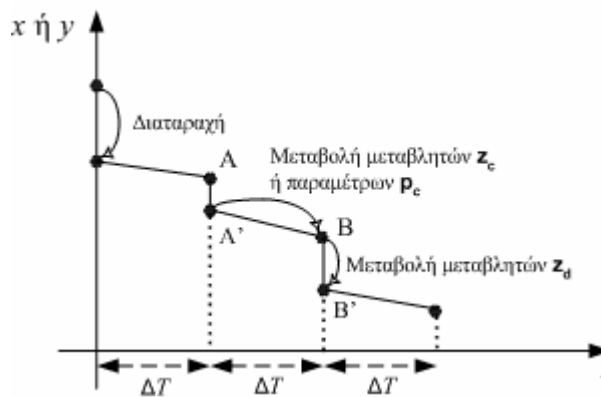
Η αρχή της μεθόδου της οιονεί στατικής προσομοίωσης [VCV98] είναι ότι κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης τα ταχέα δυναμικά φαινόμενα θεωρούνται ευσταθή και συγκρινόμενα με τα βραδέα εξελίσσονται ουσιαστικά ακαριαία. Η μέθοδος αυτή κάνει δηλαδή χρήση του οιονεί στατικού συστήματος, που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Λόγω της παραδοχής ότι τα γρήγορα δυναμικά φαινόμενα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ευσταθή απόκριση, η μέθοδος αυτή δεν είναι κατάλληλη για την ανάλυση φαινομένων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης, ούτε για τις περιπτώσεις φαινομένων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης που οφείλονται σε μακροπρόθεσμους μηχανισμούς. Ωστόσο στην τελευταία περίπτωση η αστάθεια εντοπίζεται με τη μορφή απώλειας βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας που αναγνωρίζεται από τη μη σύγκλιση της αριθμητικής επίλυσης.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι αφενός αίρει τις απλουστευτικές παραδοχές που εισάγουν τα προγράμματα ροής ισχύος και αφετέρου εστιάζει στους μηχανισμούς εκείνους που κυρίως επιδρούν στην ευστάθεια τάσης. Επομένως είναι κατάλληλη για εκτεταμένες προσομοιώσεις σε μεγάλη χρονική κλίμακα και για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο [BBC02,VCK05].

Η περιγραφή της μεθόδου είναι η εξής: Σε κάθε βήμα της προσομοίωσης επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας του συστήματος στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, ολοκληρώνονται οι διαφορικές εξισώσεις των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων, ενώ παράλληλα ανανεώνονται τα δεδομένα του συστήματος κάθε φορά που συμβαίνει μια αλλαγή σε διακριτές μεταβλητές ή σε παραμέτρους του συστήματος.

Η διαδικασία αυτή περιγράφεται εποπτικά στο Σχ. 1.12, όπου φαίνεται η χρονική εξέλιξη μίας αλγεβρικής μεταβλητής y ή μίας μεταβλητής κατάστασης x στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, κατά τη μετάβαση του συστήματος από μία χρονική στιγμή t_{j-1} στην επόμενη t_j της προσομοίωσης. Η συνεχή μετάβαση από το σημείο A' στο σημείο B οφείλεται είτε στην ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων (1.33), είτε σε συνεχή μεταβολή των μεταβλητών $\mathbf{p}_c(t)$ (μεταβολή φορτίων ή παραγωγών γεννητριών). Η διακριτή μετάβαση από το σημείο B στο σημείο B' οφείλεται είτε σε μεταβολές των διακριτών μεταβλητών \mathbf{z}_d είτε σε διαταραχές που συμβαίνουν στο σύστημα (αποκοπή φορτίου, ένταξη-απόρριψη μονάδων παραγωγής, σύνδεση-αποσύνδεση γραμμών μεταφοράς κτλ.).



Σχ. 1.12 Χρονική εξέλιξη συστήματος λόγω της μεταβολής των διανυσμάτων \mathbf{z}_d , \mathbf{z}_c , \mathbf{p}

Τα σημεία ισορροπίας A' , B' κλπ. υπολογίζονται λύνοντας το σύστημα εξισώσεων (1.31) και (1.35) ως προς τις μεταβλητές x και y με τη μέθοδο Newton–Raphson. Απαιτείται έτσι η αριθμητική επίλυση του παρακάτω γραμμικού συστήματος:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{(l+1)}^{j+1} - \mathbf{x}_{(l)}^{j+1} \\ \mathbf{y}_{(l+1)}^{j+1} - \mathbf{y}_{(l)}^{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{f}(\mathbf{x}_{(l)}^{j+1}, \mathbf{y}_{(l)}^{j+1}) \\ -\mathbf{g}(\mathbf{x}_{(l)}^{j+1}, \mathbf{y}_{(l)}^{j+1}) \end{bmatrix} \quad (1.36)$$

όπου ο δείκτης l ($l = 0, 1, 2, \dots$) αντιστοιχεί σε πλήθος ανακυκλώσεων της αριθμητικής μεθόδου και j είναι το βήμα της προσομοίωσης. Το ΔT αποτελεί το βήμα της ολοκλήρωσης ($t_j = t_{j-1} + \Delta T$) και συνήθως παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 10 s.

Το βήμα της ολοκλήρωσης ΔT , επιλέγεται έτσι ώστε:

- Όλες οι διακριτές μεταβάσεις, οι οποίες εκφράζονται από τις εξισώσεις διαφορών (1.34), να λαμβάνουν χώρα σε χρονικά διαστήματα πολλαπλάσια του ΔT . Με άλλα λόγια οι διακριτές μεταβλητές αλλάζουν τιμές από $\mathbf{z}_d(k)$ σε $\mathbf{z}_d(k+1)$ σε χρονικές στιγμές $t_k = k\Delta T$ ($k = 0, 1, 2, \dots$). Η απαίτηση αυτή εξασφαλίζει τον ταυτοχρονισμό των διακριτών μεταβάσεων.
- Να είναι υποπολλαπλάσιο της μικρότερης σταθεράς χρόνου των διαφορικών εξισώσεων (1.33). Η απαίτηση αυτή είναι καθοριστική, γιατί εξασφαλίζει την ευστάθεια της αριθμητικής ολοκλήρωσης.

Κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα η ανανέωση του Ιακωβιανού πίνακα του συστήματος (1.36) πραγματοποιείται μόνο όταν συντρέχουν συγκεκριμένοι λόγοι.

Μια ειδική περίπτωση προσομοίωσης προκύπτει όταν όλοι οι μηχανισμοί του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι διακριτοί. Σε αυτήν την περίπτωση για τη μετάβαση από το σημείο Α' στο σημείο Β δεν απαιτείται αριθμητική ολοκλήρωση. Το σημείο Β υπολογίζεται επιλύοντας τις αλγεβρικές εξισώσεις ισορροπίας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα για τις τιμές των μεταβλητών \mathbf{z}_d και των παραμέτρων $\mathbf{p}_c(t)$ πριν να λάβουν χώρα οι διακριτές μεταβάσεις τη χρονική στιγμή t_j , ενώ το σημείο Β' υπολογίζεται επιλύοντας τις εξισώσεις ισορροπίας για τις νέες τιμές των διακριτών μεταβλητών \mathbf{z}_d και μεταβλητών εισόδου $\mathbf{p}_c(t)$.

1.7 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας υπόκειται σε δυο κατηγορίες περιορισμών, τους *περιορισμούς φορτίου* και τους *περιορισμούς λειτουργίας* [Mom01]. Οι περιορισμοί φορτίου αναφέρονται στην απαίτηση η παραγόμενη ισχύς να καλύπτει τη ζήτηση και τις απώλειες ισχύος και αποτελούν ουσιαστικά τις συνθήκες ισορροπίας του συστήματος στη μόνιμη κατάσταση. Οι περιορισμοί φορτίου εκφράζονται μαθηματικά από το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \quad (1.37)$$

όπου:

\mathbf{u} : διάνυσμα των αλγεβρικών μεταβλητών και μεταβλητών κατάστασης του συστήματος

\mathbf{p} : διάνυσμα των μεταβλητών εισόδου και παραμέτρων του συστήματος.

Στη μόνιμη κατάσταση, η (1.37) ισοδυναμεί με το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \quad (1.38)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \quad (1.39)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{h}_c(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \quad (1.40)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{h}_d(\mathbf{u}, \mathbf{p}) - \mathbf{z}_d \quad (1.41)$$

όπου το διάνυσμα των αλγεβρικών μεταβλητών και μεταβλητών κατάστασης του συστήματος είναι:

$$\mathbf{u} = [\mathbf{x}^T, \mathbf{y}^T, \mathbf{z}_c^T, \mathbf{z}_d^T]^T \quad (1.42)$$

Οι περιορισμοί λειτουργίας αναφέρονται στην απαίτηση για λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εντός συγκεκριμένων φυσικών ή λειτουργικών ορίων. Τέτοια όρια μπορεί να είναι για παράδειγμα το επίπεδο της τάσης στους ζυγούς ή τα θερμικά όρια των γραμμών. Οι περιορισμοί αυτοί εκφράζονται υπό μορφή ανισοτήτων:

$$\mathbf{0} \leq \mathbf{q}(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \quad (1.43)$$

Σε κάθε περίπτωση ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε μια από τις ακόλουθες καταστάσεις:

- *Κανονική κατάσταση*, στην οποία ικανοποιούνται τόσο οι περιορισμοί φορτίου όσο και οι περιορισμοί λειτουργίας:

$$\begin{aligned} \mathbf{0} &= \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \\ \mathbf{0} &\leq \mathbf{q}(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \end{aligned} \quad (1.44)$$

- *Κατάσταση εκτάκτου ανάγκης*, στην οποία ικανοποιούνται οι περιορισμοί φορτίου αλλά τουλάχιστον ένας περιορισμός λειτουργίας i δεν ικανοποιείται:

$$\begin{aligned} \mathbf{0} &= \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \\ \mathbf{0} &> q_i(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \end{aligned} \quad (1.45)$$

- *Κατάσταση επαναφοράς*, στην οποία ικανοποιούνται οι περιορισμοί λειτουργίας αλλά δεν ικανοποιούνται οι περιορισμοί φορτίου (όπως συμβαίνει π.χ. μετά από αποκοπή φορτίου):

$$\begin{aligned} \mathbf{0} &\neq \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \\ \mathbf{0} &\leq \mathbf{q}(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \end{aligned} \quad (1.46)$$

Υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται στην κανονική κατάσταση. Όταν συμβεί μια διαταραχή, ένα από τα εξής τινά μπορεί να συμβεί: α) το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να παραμείνει στην κανονική κατάσταση, β) το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να μεταβεί στην κατάσταση εκτάκτου ανάγκης. Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε *ασφαλή κανονική κατάσταση* όταν μετά την εμφάνιση οποιασδήποτε διαταραχής παραμένει σε κανονική κατάσταση, ενώ βρίσκεται σε *ανασφαλή κανονική κατάσταση* όταν μετά την εμφάνιση κάποιας διαταραχής μεταβαίνει σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης.

Ο *έλεγχος ασφάλειας* (Σχ. 1.13) έγκειται στην εφαρμογή των κατάλληλων μέτρων, ώστε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να διατηρείται όσο το δυνατόν περισσότερο στην κανονική κατάσταση, δηλαδή αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των πιθανών μεταβάσεων από την κανονική κατάσταση στην κατάσταση εκτάκτου ανάγκης ή επαναφοράς [CH01]. Συγκεκριμένα:

- Ο *προληπτικός έλεγχος* συνίσταται στη λήψη εκείνων των μέτρων, ώστε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να μεταβεί από την ανασφαλή στην ασφαλή κανονική κατάσταση.
- Ο *διορθωτικός έλεγχος* αποβλέπει στη μετάβαση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στην κανονική κατάσταση, από την κατάσταση εκτάκτου ανάγκης στην οποία έχει μεταβεί μετά από κάποια διαταραχή.
- Ο *έλεγχος εκτάκτου ανάγκης* αποβλέπει στη μετάβαση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στην κατάσταση επαναφοράς, από την κατάσταση εκτάκτου ανάγκης στην οποία έχει μεταβεί μετά από κάποια διαταραχή.
- Ο *έλεγχος επαναφοράς* έγκειται στη σταδιακή μετάβαση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας από την κατάσταση επαναφοράς στην κανονική κατάσταση.

Η *εκτίμηση ασφάλειας* περιλαμβάνει όλο το φάσμα λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, από τη λειτουργία σε πραγματικό χρόνο ως το στάδιο του προγραμματισμού και πραγματοποιείται σε τρία επίπεδα ελέγχου. Τα επίπεδα αυτά είναι η *εποπτεία ασφάλειας*, όπου ελέγχονται οι περιορισμοί λειτουργίας ώστε να καθοριστεί με ένα βαθμό βεβαιότητας η ασφάλεια του τρέχοντος λειτουργικού σημείου του συστήματος, η *ανάλυση ασφάλειας*, όπου εκτιμάται η ικανότητα του συστήματος να «επιβιώσει» μετά από την εμφάνιση κάποιων ενδεχομένων διαταραχών, έχοντας ως γνωστό το δεδομένο λειτουργικό σημείο και συνεκτιμώντας πιθανά μέτρα ελέγχου και τέλος ο *προσδιορισμός περιθωρίων ασφάλειας*, όπου πλέον ενδιαφέρει η εκτίμηση της ασφάλειας του συστήματος στο άμεσο μέλλον, δηλαδή για σημεία λειτουργίας πέραν του συγκεκριμένου τη χρονική στιγμή της εκτίμησης.

Η *ασφάλεια τάσης* αποτελεί μια σημαντική συνιστώσα του προβλήματος ελέγχου ασφάλειας του συστήματος. Με τον όρο ασφάλεια τάσης εννοούμε την ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όχι μόνο να λειτουργεί ευσταθώς από απόψεως τάσεων, αλλά επίσης να παραμένει σε ευστάθεια μετά από μια αναμενόμενη διαταραχή ή αλλαγή στη δομή του [VCV98]. Η *εκτίμηση ασφάλειας τάσης* που αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο αποτελεί μέρος της ανάλυσης ασφάλειας τάσης.



Σχ. 1.13 Διαχωρισμός λειτουργικών καταστάσεων συστήματος

Υπό τις εφαρμοζόμενες στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αρχές της ελεύθερης αγοράς, το θέμα της ασφάλειας τάσης κερδίζει ολοένα και μεγαλύτερη προσοχή. Στις μέρες μας, η σχεδίαση της προστασίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται προς την κατεύθυνση οι πιο πιθανές διαταραχές ($N - 1$) να αντιμετωπίζονται με μέτρα προληπτικού ελέγχου, ενώ οι πιο σπάνιες και σοβαρές διαταραχές να αντιμετωπίζονται με έλεγχο εκτάκτου ανάγκης. Μεταξύ των κυριότερων λόγων που γίνεται αυτό είναι οι εξής:

- Η λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων γίνεται κάτω από ολοένα και πιο φορτισμένες συνθήκες, καθώς τα έργα ενίσχυσης του δικτύου είναι περιορισμένα, ενώ η ζήτηση αυξάνεται συνεχώς. Έτσι είναι δύσκολο να διατηρηθούν επαρκώς ικανοποιητικά περιθώρια ασφάλειας.
- Οι επικίνδυνες καταστάσεις σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπονται ολοένα και πιο δύσκολα λόγω της συνθετότερης δομής λειτουργίας των συστημάτων παραγωγής και διανομής, η οποία επιβάλλεται από τη σύναψη εμπορικών συμφωνιών, αλλά και της χρήσης μη ελεγχόμενων πηγών ενέργειας, όπως για παράδειγμα ο άνεμος ή ο ήλιος. Έτσι είναι ιδιαίτερα δύσκολος ο προσδιορισμός των περιθωρίων ασφάλειας του συστήματος στο στάδιο του προγραμματισμού.
- Σε ένα απορρυθμισμένο περιβάλλον, η προτεραιότητα των «παικτών» της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι να επιτύχουν μεγιστοποίηση του κέρδους τους. Ο προληπτικός έλεγχος θεωρείται ότι πολλές φορές παρεμποδίζει την αρμονική λειτουργία της αγοράς, καθώς αποτρέπει κάποιες συναλλαγές για λόγους ασφάλειας του συστήματος από υποθετικά συμβάντα, που μπορεί να μην εμφανιστούν ποτέ.

1.8 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ

Για την αντιμετώπιση των φαινομένων αστάθειας τάσης μπορούν να παρθούν μέτρα στα διάφορα στάδια σχεδίασης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (Πίν. 1.3). Η σχεδίαση της κλασικής προστασίας ισοδυναμεί με τη λήψη μέτρων προφύλαξης του εξοπλισμού. Στις μέρες μας η αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας είναι τόσο σημαντική για την κοινωνία και το κόστος διακοπής της τόσο μεγάλο που η φιλοσοφία σχεδίασης της προστασίας διευρύνθηκε, ώστε πέρα από τη διαφύλαξη των ίδιων των διατάξεων του συστήματος, να αποσκοπεί στην αντιμετώπιση φαινομένων αστάθειας που μπορεί να προκαλέσουν μέχρι και εκτεταμένες διακοπές στην εξυπηρέτηση των καταναλωτών.

Πίν. 1.3 Μέτρα αντιμετώπισης αστάθειας τάσης

ΣΤΑΔΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ
Μακροχρόνιος Προγραμματισμός	<ul style="list-style-type: none"> • Ενίσχυση συστήματος μεταφοράς • Αντιστάθμιση εν σειρά ή παραλλήλω • Κατασκευή νέων μονάδων παραγωγής <ul style="list-style-type: none"> ✓ κοντά στα κέντρα κατανάλωσης ✓ με αντιστάθμιση γραμμής ✓ με χαμηλό συντελεστή ισχύος ✓ με έλεγχο του μετασχηματιστή ανύψωσης
Σχεδίαση Προστασίας Συστήματος	<ul style="list-style-type: none"> • Έλεγχος ροής ισχύος συνδέσμων συνεχούς ρεύματος • Ζεύξη-απόζευξη διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος <ul style="list-style-type: none"> ✓ πυκνωτές, πηνία ✓ ηλεκτρονικά ελεγχόμενες διατάξεις • Έλεγχος εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ • Αποκοπή φορτίου • Ελεγχόμενος διαχωρισμός περιοχών
Προγραμματισμός Λειτουργίας	<ul style="list-style-type: none"> • Ένταξη μονάδων εκτός προγράμματος οικονομικής κατανομής • Εκτίμηση ασφάλειας τάσης
Λειτουργία σε πραγματικό χρόνο	<ul style="list-style-type: none"> • Έλεγχος τάσεων και διατήρηση εφεδρείας αέργου ισχύος • Ανακατανομή της παραγωγής • Ταχεία ένταξη-απόρριψη μονάδων • Εκτίμηση ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο

Προς αυτή την κατεύθυνση ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται σήμερα στην ανάπτυξη της *προστασίας συστήματος* [CTF01], η οποία αποσκοπεί στη διαφύλαξη της ικανότητας του συστήματος να αντιμετωπίζει σοβαρές διαταραχές που διαφορετικά θα προκαλούσαν σημαντικά προβλήματα στη λειτουργία του ή ακόμα και τη διακοπή της. Η προστασία συστήματος περιλαμβάνει μέτρα προστασίας, συμπληρωματικά της κλασικής προστασίας εξοπλισμού, τα οποία συνθέτουν ένα δίκτυο ασφάλειας του συστήματος από την εμφάνιση φαινομένων αστάθειας. Συνεπώς, η προστασία συστήματος μπορεί να αναφέρεται σε προστασία από αστάθεια τάσης, αστάθεια συχνότητας ή αστάθεια γωνίας.

Με το γενικό όρο *προστασία συστήματος από αστάθεια τάσης* εννοούμε την πρόβλεψη που λαμβάνεται ώστε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να είναι σε θέση να ξεπεράσει χωρίς σοβαρές συνέπειες οποιοδήποτε από έναν αριθμό ακραίων περιστατικών που μπορεί να προκαλέσουν την εμφάνιση φαινομένων αστάθειας τάσης. Τέτοια περιστατικά μπορεί να είναι σοβαρές διαταραχές του συστήματος, όπως η ταυτόχρονη απώλεια κρίσιμων γραμμών μεταφοράς ή γεννητριών κοντά στα κύρια κέντρα κατανάλωσης φορτίου, οι οποίες φέρνουν το σύστημα να λειτουργεί σε συνθήκες εκτάκτου ανάγκης. Για την επαναφορά των συνθηκών κανονικής λειτουργίας και την αποφυγή της κατάρρευσης που συχνά ακολουθεί αυτές τις περιπτώσεις λαμβάνονται μέτρα προστασίας, το σύνολο των οποίων περιγράφεται στην παράγραφο 1.9.3.

Βασικό πρόβλημα στην προστασία συστήματος από αστάθεια τάσης είναι ο καθορισμός αφενός των περιοχών του συστήματος όπου θα εφαρμοστούν τα διορθωτικά μέτρα, και αφετέρου ο προσδιορισμός της χρονικής στιγμής της εφαρμογής. Ο χρόνος εφαρμογής των μέτρων πρέπει να είναι αρκετά μικρός, ώστε να μπορεί να αποκατασταθεί ισορροπία στο σύστημα, και αρκετά μεγάλος ώστε να αποφεύγεται η εφαρμογή τους όταν αυτό δεν είναι απολύτως αναγκαίο. Ειδικά στην περίπτωση της αποκοπής φορτίου, απαιτείται εύλογη χρονική καθυστέρηση.

Τα μέτρα προστασίας μπορεί να βασίζονται σε τοπικό ή κεντρικό έλεγχο του συστήματος. Στην πρώτη περίπτωση επιτυγχάνεται γρήγορη απόκριση της προστασίας, ενώ στη δεύτερη προσδιορίζεται καλύτερα η προβληματική περιοχή και υπάρχει καλύτερος συντονισμός των διορθωτικών μέτρων στα διαφορετικά επίπεδα ελέγχου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

1.9 ΣΧΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

1.9.1 Περιγραφή Σχημάτων Προστασίας Συστήματος

Η υλοποίηση της προστασίας συστήματος πραγματοποιείται με τη σχεδίαση των λεγόμενων *σχημάτων προστασίας συστήματος*. Τα σχήματα προστασίας συστήματος αποτελούν πλήρως αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου και προστασίας, τα οποία βρίσκονται συνεχώς σε ετοιμότητα, παρακολουθούν με διάφορους τρόπους τη λειτουργία του δικτύου και επεμβαίνουν μόνο τη στιγμή που χρειάζεται. Ο ακριβής ορισμός του σχήματος προστασίας συστήματος, διατυπώθηκε στην εργασία [CTF01]:

Ένα σχήμα προστασίας συστήματος αποτελεί προστασία σχεδιασμένη κατάλληλα να ανιχνεύει μη κανονικές καταστάσεις του συστήματος και να εκτελεί προκαθορισμένες διορθωτικές ενέργειες (διαφορετικές από την απομόνωση διατάξεων υπό σφάλμα) ώστε να εξασφαλίζει τη συνοχή του συστήματος και την ικανοποιητική λειτουργία του.

Η ανάπτυξη των σχημάτων προστασίας συστήματος γίνεται πάντοτε προς εκπλήρωση των κριτηρίων σχεδίασης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κριτήρια σχεδίασης συνιστούν τα ελάχιστα προαπαιτούμενα για τη διαμόρφωση αξιόπιστων διασυνδεδεμένων συστημάτων. Η αξιοπιστία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας προσδιορίζεται σε μεγάλο βαθμό από δύο παράγοντες: α) την επάρκεια (adequacy) του συστήματος, η οποία αναφέρεται στην ικανότητά του, λαμβάνοντας υπόψη προβλεπόμενες ή μη απώλειες συνιστωσών του, να παρέχει τη ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές με συγκεκριμένες προδιαγραφές ποιότητας, β) την ασφάλεια του συστήματος, η οποία αναφέρεται στην ικανότητά του να αντιμετωπίζει την εμφάνιση διαταραχών σε αυτό. Καθώς όμως δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί άριστος βαθμός αξιοπιστίας, ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι ικανό να αντιμετωπίζει όλες τις πιθανές διαταραχές χωρίς καμία απώλεια φορτίου (σε σχέση με την προβλεπόμενη ζήτηση και την ικανότητα μεταφοράς του συστήματος), ενώ οι ακραίες (λιγότερο πιθανές) διαταραχές θα πρέπει να αντιμετωπίζονται από την προστασία συστήματος.

Σύμφωνα με διάφορες ερμηνείες ένα σχήμα προστασίας συστήματος χαρακτηρίζεται ως:

- Προστασία από επιλεγμένες σπάνιες διαταραχές που συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη κατά το στάδιο σχεδίασης του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή πραγματοποιούνται ενέργειες ελέγχου, όπως απόρριψη φορτίου ή παραγωγής, που δεν επιτρέπονται όταν το σύστημα βρίσκεται σε κανονική κατάσταση λειτουργίας.
- Προστασία που επιτρέπει τη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με μεγαλύτερο ρίσκο, με τις ενδεχόμενες συνέπειες από το γεγονός αυτό να μη μπορούν να αντιμετωπιστούν από την κλασική προστασία.
- Προστασία ευρείας περιοχής, η οποία δρα με συντονισμένες ενέργειες σε πολλαπλά σημεία του συστήματος.

Παρά το σαφή διαχωρισμό των σχημάτων προστασίας συστήματος από την κλασική προστασία, υπάρχουν οι εξής κοινές απαιτήσεις σχεδίασης:

- *Εξαρτησιμότητα*: το σχήμα προστασίας συστήματος θα πρέπει να δρα όποτε χρειάζεται.
- *Ασφάλεια*: το σχήμα προστασίας συστήματος δεν θα πρέπει να δρα όταν δεν χρειάζεται.
- *Αξιοπιστία*: το σχήμα προστασίας συστήματος θα πρέπει να καλύπτει τις απαιτήσεις εξαρτησιμότητας και ασφάλειας.
- *Επιλογικότητα*: το μέγεθος της δράσης θα πρέπει να προσαρμόζεται στη σοβαρότητα της διαταραχής.
- *Σθεναρότητα*: το σχήμα προστασίας συστήματος θα πρέπει να είναι ικανό να αντιμετωπίζει όσο το δυνατόν περισσότερες διαταραχές από αυτές που ενδεχομένως θα εμφανιστούν στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η γενική δομή ενός σχήματος προστασίας συστήματος παρουσιάζεται στο Σχ. 1.14. Το μπλοκ εισόδου αναφέρεται στη συλλογή στοιχείων, αντιπροσωπευτικών της λειτουργικής κατάστασης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα στοιχεία αυτά μπορεί να είναι είτε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών είτε κατάλληλα σήματα που προσδιορίζουν έναν συνδυασμό συμβάντων στο σύστημα. Ο ρόλος του μπλοκ απόφασης είναι να εκτιμήσει τα στοιχεία εισόδου και να δώσει την εντολή για την εφαρμογή των κατάλληλων μέτρων προστασίας. Η εντολή αυτή θα εκτελεστεί ακολούθως από το μπλοκ δράσης.



Σχ. 1.14 Δομή σχήματος προστασίας συστήματος

Ένας συνδυασμός σχημάτων προστασίας συστήματος τα οποία έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την προστασία ενός συγκεκριμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας συνιστά ένα *σχέδιο άμυνας* του συστήματος. Ένα σχέδιο άμυνας μπορεί να οριστεί ως [CTF01]:

Ένα σύνολο από συντονισμένα σχήματα προστασίας που αποσκοπούν στη διασφάλιση της ικανότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να αντιμετωπίζει ακραίες ή πολλαπλές διαταραχές, που διαφορετικά θα προκαλούσαν την κατάρρευσή του.

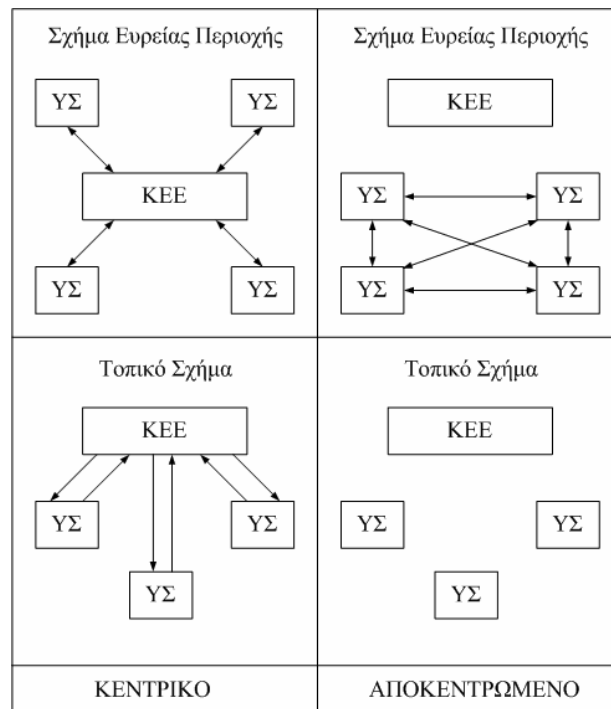
Ουσιαστικά ένα σχέδιο άμυνας μετουσιώνει τη φιλοσοφία της προστασίας συστήματος στις ανάγκες ενός συγκεκριμένου συστήματος ηλεκτρικής ανάγκης. Σήμερα λίγα ολοκληρωμένα σχέδια άμυνας συναντώνται ανά τον κόσμο, με πιο χαρακτηριστικά αυτά των ηλεκτρικών εταιρειών Hydro-Quebec του Καναδά και EDF της Γαλλίας.

1.9.2 Κατηγοριοποίηση Σχημάτων Προστασίας Συστήματος

Ως προς την αρχή λειτουργίας

Η βασική λειτουργική διάκριση μεταξύ των σχημάτων προστασίας συστήματος είναι η εξής:

- *Σχήματα προστασίας συστήματος ευρείας περιοχής ή τοπικά.* Ένα σχήμα προστασίας συστήματος ευρείας περιοχής συλλέγει πληροφορίες από διάφορα σημεία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και δρα σε διατάξεις που βρίσκονται σε διάφορα σημεία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Το τοπικό σχήμα προστασίας συστήματος χρησιμοποιεί τοπικές μετρήσεις ή σήματα και δρα σε τοπικές διατάξεις. Για παράδειγμα, οι εισοδοί ενός τέτοιου σχήματος προστασίας συστήματος προέρχονται από έναν υποσταθμό και οι ενέργειές του αφορούν στον ίδιο υποσταθμό.
- *Σχήματα προστασίας συστήματος με κεντρική ή αποκεντρωμένη λογική.* Ένα αποκεντρωμένο σχήμα προστασίας συστήματος λαμβάνει αποφάσεις χωρίς τη μεσολάβηση κάποιου κέντρου ελέγχου και μπορεί να είναι είτε τοπικό είτε ευρείας περιοχής. Αντίθετα, ένα κεντρικό σχήμα προστασίας συστήματος (τοπικό ή ευρείας περιοχής) δρα πάντα υπό την εποπτεία ενός κέντρου ελέγχου. Όλες οι δυνατές διαμορφώσεις ενός σχήματος προστασίας συστήματος παρουσιάζονται στο Σχ. 1.15.
- *Σχήματα προστασίας συστήματος αποκρινόμενα σε μετρήσεις ή συμβάντα.* Ένα αποκρινόμενο σε μετρήσεις σχήμα προστασίας συστήματος ενεργοποιείται με την ανίχνευση κατάλληλων ηλεκτρικών μεγεθών (τάση, συχνότητα κλπ.) που μπορούν να υποδείξουν τη δυσλειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα αποκρινόμενο σε συμβάντα σχήμα προστασίας συστήματος ενεργοποιείται με την αναγνώριση ενός προκαθορισμένου συμβάντος στο σύστημα ή την ανίχνευση ενός συνδυασμού τέτοιων συμβάντων.
- *Σχήματα προστασίας συστήματος σχεδιασμένα σε λογική κανόνων ή αλγορίθμους.* Ένα σχήμα προστασίας συστήματος που παίρνει αποφάσεις με βάση κανόνες στηρίζεται στη λογική της επαλήθευσης απλών κανόνων της μορφής “αν...τότε...”, ενώ ένα σχήμα προστασίας συστήματος που παίρνει αποφάσεις με βάση αλγορίθμους στηρίζεται σε ένα πιο σύνθετο μοντέλο του συστήματος.
- *Σχήματα προστασίας συστήματος κλειστού ή ανοιχτού βρόχου.* Ένα σχήμα προστασίας συστήματος που δρα με τη λογική του κλειστού βρόχου μπορεί να ενεργοποιηθεί αρκετές φορές ανάλογα με το αποτέλεσμα της προηγούμενης δράσης του. Αντίθετα, ένα σχήμα προστασίας συστήματος ανοιχτού βρόχου δρα μία μόνο φορά.



Σχ. 1.15 Δυνατή διαμόρφωση σχημάτων προστασίας συστήματος

Τα σχήματα προστασίας συστήματος ευρείας περιοχής με κεντρική λογική βρίσκουν μεγάλο πεδίο εφαρμογής σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όπου το το κέντρο ελέγχου έχει την ευθύνη για το βέλτιστο συντονισμό όλων των διαθέσιμων μέτρων ελέγχου. Όπως και τα σχήματα προστασίας συστήματος ευρείας περιοχής με αποκεντρωμένη λογική, βασίζονται στη συλλογή και μετάδοση πληροφοριών και η απαίτηση αυτή για εξειδικευμένα συστήματα τηλεπικοινωνιών ανεβάζει το κόστος τους.

Τα τοπικά σχήματα προστασίας συστήματος με αποκεντρωμένη λογική παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία, γιατί δεν βασίζονται στη μεταφορά δεδομένων και την τηλεπικοινωνία και έχουν μικρότερο κόστος. Τοπικά σχήματα με κεντρική λογική συναντώνται σπάνια. Σε αυτά η πληροφορία που συλλέγει η διάταξη προστασίας στο επίπεδο του υποσταθμού μεταδίδεται στο κέντρο ελέγχου, το οποίο στη συνέχεια παίρνει την κατάλληλη απόφαση.

Τα σχήματα προστασίας συστήματος που αποκρίνονται στην αντίχρεση συμβάντων έχουν το πλεονέκτημα της γρήγορης απόκρισης, καθώς για την ενεργοποίησή τους (μετά από την εμφάνιση μίας διαταραχής) δεν απαιτείται η αναγκαία χρονική εξέλιξη της συμπεριφοράς του συστήματος, η οποία θα υποδείξει την αστάθεια. Ωστόσο παρουσιάζουν μικρότερη σθεναρότητα από τα αποκρινόμενα σε μετρήσεις σχήματα προστασίας συστήματος, καθώς δεν μπορούν να προβλέψουν όλες τις ενδεχόμενες διαταραχές στο σύστημα.

Τα αλγοριθμικά σχήματα προστασίας συστήματος στηρίζονται στη μοντελοποίηση και προσομοίωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά αυτόν τον τρόπο έχουν την ικανότητα να αντιμετωπίζουν απρόβλεπτες καταστάσεις στο σύστημα και να προσαρμόζονται στο μέγεθος της σοβαρότητας των διαταραχών. Ωστόσο, όσο πιο λεπτομερής είναι η παράσταση του συστήματος, τόσο μικρότερη είναι η σθεναρότητα των αλγοριθμικών σχημάτων προστασίας συστήματος εξαιτίας των πιθανών ανακριβειών του μοντέλου, των ανακριβειών των δεδομένων πραγματικού χρόνου και της εξάρτησης από τα πληροφοριακά συστήματα (π.χ. SCADA).

Τα σχήματα προστασίας συστήματος κλειστού βρόχου παρουσιάζουν αυξημένη ασφάλεια και εξαρτησιμότητα, καθώς με τη συνεχή επαναλαμβανόμενη δράση τους προσαρμόζονται αυτόματα στη σοβαρότητα της διαταραχής. Ωστόσο είναι περισσότερο σύνθετα από τα σχήματα προστασίας συστήματος ανοικτού βρόχου.

Ως προς την κρισιμότητα

Μία άλλη κατηγοριοποίηση των σχημάτων προστασίας συστήματος γίνεται με βάση τη σοβαρότητα των διαταραχών τις οποίες έχουν να αντιμετωπίσουν. Η διάκριση αυτή επιτρέπει την ταξινόμηση των σχημάτων προστασίας συστήματος ως προς τη κρισιμότητά τους για το σύστημα, από την οποία μπορούν να εξαχθούν οι απαιτούμενες προδιαγραφές των κριτηρίων εξαρτησιμότητας, ασφάλειας και συντήρησής τους. Διακρίνονται τρεις κατηγορίες σχημάτων προστασίας συστήματος:

- *Τύπου I.* Στην κατηγορία αυτή ανήκουν σχήματα προστασίας συστήματος που έχουν σχεδιαστεί να αναγνωρίζουν ή να προλαμβάνουν μη κανονικές συνθήκες στο σύστημα, οι οποίες οφείλονται σε διαταραχές (συνήθως N-1) που έχουν προβλεφθεί στο στάδιο της σχεδίασης και λειτουργίας του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή η εσφαλμένη λειτουργία του σχήματος προστασίας συστήματος ή η αστοχία ενεργοποίησής του θα έχει σημαντική αρνητική επίδραση σε ολόκληρο το σύστημα. Αντίθετα, η σωστή λειτουργία του σχήματος προστασίας συστήματος και η ενεργοποίηση των άλλων διατάξεων προστασίας αναμένεται να ισορροπήσει το σύστημα σε μία νέα ευσταθή κατάσταση.
- *Τύπου II.* Στην κατηγορία αυτή ανήκουν σχήματα προστασίας συστήματος που έχουν σχεδιαστεί να αναγνωρίζουν ή να προλαμβάνουν μη κανονικές συνθήκες στο σύστημα, οι οποίες οφείλονται σε ακραίες διαταραχές (N-2 ή περισσότερο). Και πάλι μία εσφαλμένη λειτουργία του σχήματος προστασίας συστήματος ή η μη λειτουργία του θα έχει σημαντική αρνητική επίδραση σε ολόκληρο το σύστημα. Στην περίπτωση αυτή η ασφάλεια του σχήματος προστασίας συστήματος είναι ένας παράγοντας πρωταρχικής σημασίας.
- *Τύπου III.* Στην κατηγορία αυτή ανήκουν σχήματα προστασίας συστήματος, των οποίων η εσφαλμένη λειτουργία ή αστοχία ενεργοποίησης δεν θα έχει σημαντική αρνητική επίδραση στο σύστημα, εκτός από προβλήματα σε τοπική κλίμακα. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα σχήματα προστασίας συστήματος τύπου III μπορούν υπό προϋποθέσεις να μετατραπούν σε σχήματα τύπου I ή τύπου II.

Ως προς τη χρησιμότητα

Τα σχήματα προστασίας συστήματος μπορούν να αποτελέσουν μία ενδιάμεση λύση μεταξύ της πραγματοποίησης μεγάλων επενδύσεων, της εξοικονόμησης μέρους του λειτουργικού κόστους του συστήματος και της ικανοποίησης ενός αποδεκτού επιπέδου ποιότητας εξυπηρέτησης. Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος χρησιμότητων των σχημάτων προστασίας συστήματος, από τις οποίες οι κυριότερες που έχουν καταγραφεί σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι εξής:

- *Βελτίωση των πρακτικών λειτουργίας.* Υπάρχουν σχήματα προστασίας συστήματος που έχουν σχεδιαστεί για την αντιμετώπιση προβλημάτων που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοια προβλήματα μπορεί να είναι η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μακρινές αποστάσεις λόγω της ιδιομορφίας του συστήματος παραγωγής-διανομής, η συχνότερη έκθεση των γραμμών μεταφοράς σε βραχυκυκλώματα από αυτά που είχαν ληφθεί υπόψη στο στάδιο της σχεδίασης κ.ά.
- *Λειτουργία σε συνθήκες υψηλότερης φόρτισης.* Τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω της δυσκολίας στην ανάπτυξη των συστημάτων μεταφοράς και της σημαντικής αύξησης της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια, η χρήση των διαθέσιμων δικτύων μεταφοράς έγινε εντατικότερη, με αποτέλεσμα τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε συνθήκες υψηλότερης φόρτισης όπου τα περιθώρια ασφάλειας είναι μικρότερα. Κατάλληλα σχήματα προστασίας συστήματος, που ήδη βρίσκουν εφαρμογή σε πολλές χώρες, επιτρέπουν τη λειτουργία των συστημάτων με πολύ μικρά περιθώρια ασφάλειας. Όμως η λειτουργία του συστημάτων με μεγάλο ρίσκο παρουσιάζει το μειονέκτημα να μη μπορούν να αντιμετωπιστούν ασφαλώς όλες οι πιθανές διαταραχές.
- *Αύξηση της ικανότητας μεταφοράς για το ίδιο επίπεδο ασφάλειας.* Η εφαρμογή κατάλληλων σχημάτων προστασίας συστήματος έχει σε πολλές περιπτώσεις επιτύχει την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος των συστημάτων, χωρίς να μειωθεί το επίπεδο της ασφαλείας τους. Η χρήση αυτή των σχημάτων προστασίας συστήματος παρέχει τη δυνατότητα να μπορούν να αγνοηθούν εν μέρει και βραχυπρόθεσμα, προβλήματα ελλιπούς επέκτασης του δικτύου ή άλλα προβλήματα λειτουργίας που οφείλονται σε οικονομικούς λόγους.

- *Προσωρινή λύση κατά τη διάρκεια έργων ανάπτυξης.* Μπορούν να αποτελέσουν μεταβατική λύση ενίσχυσης της ασφάλειας του συστήματος μέχρι την ολοκλήρωση ενός προγράμματος ανάπτυξης ή ενός έργου υπό κατασκευή.
- *Αντιμετώπιση ακραίων διαταραχών.* Αποτελεί διαδεδομένη πρακτική η σχεδίαση σχημάτων προστασίας συστήματος για την αντιμετώπιση των ακραίων διαταραχών, που εμπλέκουν πολλές διατάξεις του συστήματος και οδηγούν συνήθως σε διαδοχικές απώλειες μονάδων ή γραμμών. Αυτή η χρήση είναι η πιο διαδεδομένη και αποτελεί ίσως τη σπουδαιότερη συμβολή των σχημάτων προστασίας συστήματος στην προστασία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και την ενίσχυση της ασφάλειάς τους.

Ως προς τη χρονική κλίμακα εφαρμογής

Στο Σχ. 1.16 παρουσιάζονται ως προς τη χρονική κλίμακα ενεργοποίησής τους τα συνηθέστερα μέτρα προστασίας που υλοποιούνται σε σχήματα προστασίας συστήματος [CTF01]. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται η συσχέτιση με τα δυναμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η κλίμακα που χρησιμοποιείται είναι λογαριθμική, με το συνεχές ευθύγραμμο τμήμα να υποδεικνύει το τυπικό (σύνθηες) χρονικό διάστημα εντός του οποίου μπορεί να πραγματοποιηθεί η ενεργοποίηση του συγκεκριμένου σχήματος προστασίας συστήματος και τη διακεκομμένη να υποδεικνύει το εν δυνάμει εφικτό χρονικό διάστημα ενεργοποίησης.

Με τη βοήθεια του Σχ. 1.16 επιτυγχάνεται σαφής διάκριση μεταξύ των σχημάτων προστασίας συστήματος και των λοιπών αυτόματων δράσεων, που ενισχύουν την ασφάλεια του συστήματος αλλά δεν αποτελούν μέρος κάποιου σχήματος προστασίας συστήματος. Για παράδειγμα, οι αυτόματες ενέργειες που πραγματοποιούνται εντός χρονικού διαστήματος 10^{-3} s με 10^{-2} s μετά τη διαταραχή, αποτελούν μέρος της προστασίας εξοπλισμού, η οποία αντιμετωπίζει προβλήματα που σχετίζονται με ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα (π.χ. βραχυκυκλώματα). Επίσης άλλοι αυτόματοι χειρισμοί ελέγχου, όπως ο αυτόματος έλεγχος παραγωγής, αποτελούν μέρος της λειτουργίας του συστήματος και επιτελούνται αφού προηγουμένως έχει μεταβληθεί η κατάσταση του.

1.9.3 Σχεδίαση Σχημάτων Προστασίας Συστήματος

Η σχεδίαση ενός σχήματος προστασίας συστήματος περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

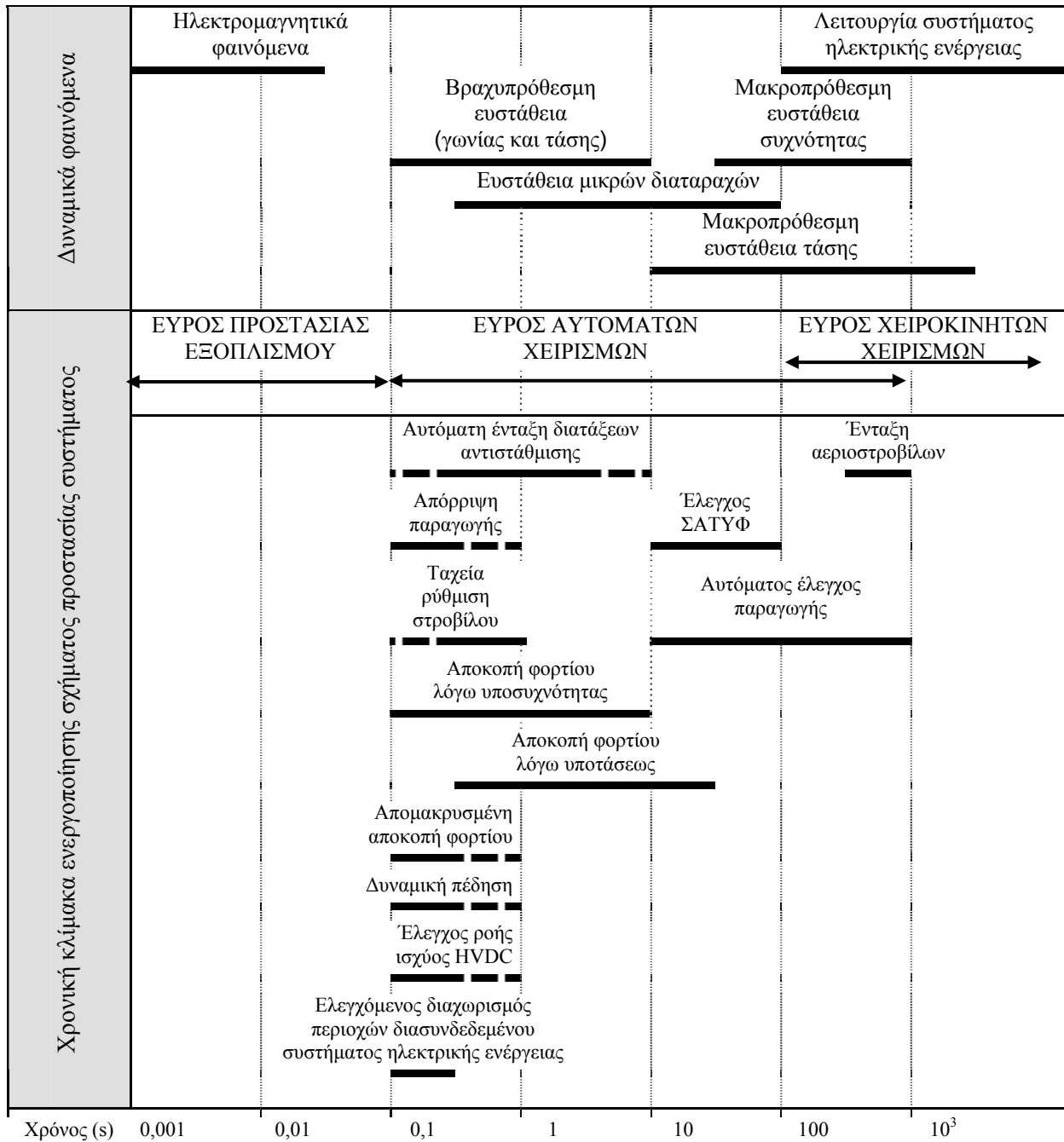
- Σχεδίαση της λογικής
- Επιλογή διατάξεων
- Υλοποίηση και δοκιμή
- Σύνταξη πρωτοκόλλου λειτουργίας και συντήρησης
- Επαναθεώρηση και τροποποίηση της σχεδίασης.

Η σχεδίαση της λογικής ενός σχήματος προστασίας συστήματος βασίζεται στον καθορισμό των διαταραχών του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, τις συνέπειες των οποίων καλείται να αντιμετωπίσει, και στην επιλογή της αρχής λειτουργίας του. Ο καθορισμός των πιο κρίσιμων διαταραχών του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να προκύψει είτε εμπειρικά, από τη γνώση του συστήματος, είτε με τη βοήθεια κατάλληλων εργαλείων προσομοίωσης. Από τη διαδικασία αυτή προσδιορίζεται παράλληλα η περιοχή που προκαλεί τα προβλήματα ασφάλειας του συστήματος, την οποία και θα επιβλέπει το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με τα φαινόμενα αστάθειας που πρέπει να αντιμετωπιστούν επιλέγεται σε τελική φάση η αρχή λειτουργίας του σχήματος προστασίας συστήματος.

Η σχεδίαση της λογικής αφορά τον προσδιορισμό των συνθηκών ή συμβάντων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που θα πρέπει να ενεργοποιήσουν τη λειτουργία του σχήματος προστασίας συστήματος και την εκτίμηση των συνεπειών από ενδεχόμενη μη λειτουργία του. Απλουστευτικά, η λογική σχεδίαση του σχήματος προστασίας συστήματος μπορεί να ερμηνευτεί ως η αναζήτηση ενός γενικού κανόνα της μορφής:

$$AN (A \cap B) \text{ TOTE } (C)$$

όπου A οι συνθήκες οπλισμού, B οι συνθήκες διέγερσης και C οι δράσεις του σχήματος προστασίας συστήματος.



Σχ. 1.16 Χρονική κλίμακα ενεργοποίησης σχημάτων προστασίας συστήματος

Προκύπτει επομένως η απαίτηση προσδιορισμού των παραπάνω συνθηκών. Οι συνθήκες οπλισμού προσδιορίζονται συνήθως με βάση την παρακολούθηση μίας παραμέτρου λειτουργίας του συστήματος, π.χ. επίπεδο τάσης, φορτίου ή ροής ισχύος. Οι συνθήκες διέγερσης αναφέρονται συνήθως σε ανίχνευση μίας ή περισσοτέρων αποκρίσεων ή διαταραχών στο σύστημα. Οι δράσεις αναφέρονται είτε σε δραστηκές μεταβολές στο σύστημα (π.χ. απόρριψη γεννητριών ή φορτίου), είτε στον έλεγχο του (π.χ. αύξηση τερματικής τάσης γεννητριών ή ανακατανομή της παραγωγής).

Ο κανόνας μπορεί να είναι και συνθετότερος:

$$AN (A \cap B1) \text{ TOTE } (C1) \text{ \textit{H} } AN (A \cap B2) \text{ TOTE } (C2)$$

Ωστόσο, η αυξημένη πολυπλοκότητα συμβάλλει γενικά στο μειωμένο επίπεδο αξιοπιστίας του σχήματος προστασίας συστήματος, λόγω κυρίως της αλληλεπίδρασης του με άλλες λογικές προστασίας, αλλά και των μεγάλων αναγκών σε λογισμικό (software) και υλικό (hardware) για την εκτέλεση του ελέγχου.

Ο έλεγχος του κανόνα με χρήση εργαλείων προσομοίωσης είναι απαραίτητος γιατί μπορεί να οδηγήσει σε πιθανή τροποποίηση και προσαρμογή του. Η προσομοίωση πρέπει να γίνεται με εργαλεία κατάλληλα για την ανάλυση των φαινομένων αστάθειας του συστήματος που σχεδιάζονται να αντιμετωπιστούν από το σχήμα προστασίας συστήματος. Για το λόγο αυτό απαιτείται η ενδεδειγμένη παράσταση του συστήματος κατά την προσομοίωση, δηλαδή η χρήση των κατάλληλων μοντέλων.

Ο υλικοτεχνικός εξοπλισμός ενός σχήματος προστασίας συστήματος αποτελείται γενικά από:

Λογικό επεξεργαστή

Ο λογικός επεξεργαστής (logic solver) αποτελεί τη μονάδα του σχήματος προστασίας συστήματος που εκτελεί τους λογικούς ελέγχους για την ενεργοποίηση των δράσεων. Πρόκειται για ένα προγραμματιζόμενο ηλεκτρονικό σύστημα και μπορεί να είναι ένας μικροεπεξεργαστής, ένας μικροελεγκτής, ένας προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (PLC) ή ένα εξειδικευμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Όπως είναι προφανές, ο λογικός επεξεργαστής αποτελεί την καρδιά του σχήματος προστασίας συστήματος και πρέπει να έχει μεγάλο δείκτη αξιοπιστίας. Ο λογικός επεξεργαστής πρέπει να συνοδεύεται από λογισμικό υποστήριξης και εγχειρίδιο πλήρους περιγραφής της αρχιτεκτονικής του λογισμικού, του λειτουργικού συστήματος, της βάσης δεδομένων, των υποσυστημάτων εισόδου/εξόδου και επικοινωνίας και της γλώσσας προγραμματισμού. Τόσο ο επεξεργαστής όσο και το λογισμικό υποστήριξης πρέπει να πληρούν τα διεθνή στάνταρ προδιαγραφών.

Διατάξεις παρακολούθησης

Οι διατάξεις παρακολούθησης (sensors) περιλαμβάνουν γενικά ηλεκτρονόμους προστασίας και ανιχνευτές κατάστασης διακοπών ισχύος. Οι διατάξεις αυτές δεν πρέπει να ενεργοποιούνται σε μέτρηση μηδενικού ρεύματος ή ισχύος και οι ρυθμίσεις τους πρέπει να διαχωρίζουν τοπικά σφάλματα από γενικευμένα προβλήματα στο σύστημα, ελέγχοντας ρυθμούς αντί για απόλυτα μεγέθη. Η απώλεια τροφοδοσίας των διατάξεων δεν πρέπει να αποτρέπει τη λειτουργία του σχήματος προστασίας συστήματος. Επιπλέον ορίζεται διαδικασία αυτοελέγχου και καταγραφής συμβάντων, η οποία επιτρέπει την ακριβή ανάλυση της λειτουργίας των διατάξεων είτε αυτή είναι σωστή είτε λανθασμένη.

Διατάξεις επικοινωνίας

Η πληροφορία που συλλέγεται από τις διατάξεις παρακολούθησης μεταδίδεται μέσω δικτύου επικοινωνίας στο λογικό επεξεργαστή του σχήματος προστασίας συστήματος. Η απόφαση που λαμβάνεται ακολούθως, μεταδίδεται μέσω του ίδιου δικτύου στις διατάξεις προστασίας για την εκτέλεση της δράσης. Τυχόν σφάλμα στο δίκτυο επικοινωνίας δεν πρέπει να επηρεάζει τη λειτουργία του σχήματος και για αυτό απαραίτητος είναι ο έλεγχος του εξοπλισμού επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο.

Στο στάδιο της υλοποίησης και δοκιμής του σχήματος προστασίας συστήματος ελέγχεται η σωστή εγκατάσταση των διατάξεων και η συμφωνία τους με την αρχική σχεδίαση. Η δοκιμή περιλαμβάνει πρωτίστως τον έλεγχο λειτουργίας του λογικού επεξεργαστή, των διατάξεων παρακολούθησης, των διατάξεων επικοινωνίας και των βοηθητικών διατάξεων.

Η σύνταξη πρωτοκόλλου λειτουργίας και συντήρησης αποσκοπεί στην εξασφάλιση των κριτηρίων αξιοπιστίας του σχήματος καθόλη τη διάρκεια ζωής του. Η εύκολη πρόσβαση του τεχνικού προσωπικού στο πρωτόκολλο κρίνεται επιβεβλημένη για την αποφυγή σφαλμάτων κατά τη συντήρηση. Οι κυριότερες διαδικασίες του πρωτοκόλλου λειτουργίας αναφέρονται στο πότε και στο πώς θα γίνεται ο οπλισμός του σχήματος, στο πότε θα διεγείρεται και στο πώς θα αντιδρούν οι χειριστές της λειτουργίας. Οι κυριότερες διαδικασίες του πρωτοκόλλου συντήρησης αφορούν στον περιοδικό έλεγχο της λειτουργίας του σχήματος, στον προληπτικό έλεγχο των διατάξεών του και στην επισκευή τους μετά από διάγνωση σφάλματος.

Ανά περιοδικά διαστήματα πρέπει να πραγματοποιείται επανεκτίμηση του σχήματος, σε περίπτωση που απαιτείται αναθεώρηση της σχεδίασής του λόγω σημαντικών μεταβολών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ο έλεγχος αφορά την αποτελεσματικότητα του σχήματος για τη δεδομένη αλλά και μελλοντική κατάσταση του συστήματος, εξετάζοντας παράλληλα τις συνέπειες από πιθανή εσφαλμένη λειτουργία του. Πιθανότατα η διαδικασία αυτή να υποδείξει την εκ νέου σχεδίασή του.

1.9.4 Σχήματα Προστασίας Συστήματος από Αστάθεια Τάσης

Παρά το γεγονός ότι το απλούστερο σενάριο αστάθειας τάσης προκαλείται από μια αύξηση του φορτίου πέραν της μέγιστης ικανότητας μεταφοράς ισχύος του συστήματος, τα συνηθέστερα σενάρια αστάθειας τάσης οφείλονται στην εμφάνιση μεγάλων διαταραχών, όπως είναι η απώλεια μίας ή περισσοτέρων διατάξεων. Όσον αφορά στη μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης οι διαταραχές που ενδιαφέρουν είναι η απώλεια γραμμών μεταφοράς ή η απώλεια γεννητριών (ειδικά εκείνων που στηρίζουν τις κρίσιμες περιοχές του συστήματος), ενώ όσον αφορά στη βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης ενδιαφέρουν κυρίως τα σφάλματα, των οποίων η καθυστέρηση στην εκκαθάριση μπορεί να προκαλέσει την επιβράδυνση κινητήρων επαγωγής στα συστήματα διανομής.

Οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν στην ευστάθεια τάσης είναι οι εξής [BFG95,VCV98,VC00a]:

- Οι μεγάλες ηλεκτρικές αποστάσεις μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης.
- Η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ισχύος υπό φορτισμένες συνθήκες του συστήματος.
- Η δυναμική αποκατάστασης των φορτίων.
- Ο χαμηλός συντελεστής ισχύος στα φορτία.
- Η έλλειψη ταχείας υποστήριξης σε άεργο ισχύ (μικρά αποθέματα γεννητριών, έλλειψη σύγχρονων πυκνωτών, έλλειψη ηλεκτρονικά ελεγχόμενων διατάξεων αντιστάθμισης).
- Η έλλειψη κλασικών διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος (συστοιχίες πυκνωτών και πηνίων).

Για την αντιμετώπιση των φαινομένων αστάθειας τάσης μπορούν να υλοποιηθούν σχήματα προστασίας συστήματος με εφαρμογή των παρακάτω μέτρων προστασίας και ελέγχου [CTF94b]:

- Ταχεία εκκαθάριση σφάλματος.
- Έλεγχος ροής ισχύος των διασυνδέσεων με συνεχές ρεύμα.
- Έλεγχος διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος.
- Ταχεία ένταξη ή απόρριψη μονάδων παραγωγής.
- Έλεγχος εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ.
- Αποκοπή φορτίου.
- Ελεγχόμενος διαχωρισμός περιοχών διασυνδεδεμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Ταχεία εκκαθάριση σφάλματος

Για την περίπτωση φαινομένων βραχυπρόθεσμης αστάθειας που προκαλούνται από βραχυκυκλώματα, αποτελεσματικό μέτρο αντιμετώπισης αποτελεί η ταχεία εκκαθάριση του σφάλματος. Οι μικροί κινητήρες επαγωγής (οικιακοί) επιβραδύνονται όταν υπόκεινται σε χαμηλές τάσεις λόγω κάποιου σφάλματος ακόμα και για πολύ μικρούς χρόνους εκκαθάρισης [WSD92]. Ωστόσο οι μεγάλοι βιομηχανικοί κινητήρες επαγωγής, αλλά και κινητήρες επαγωγής μικρότερης ονομαστικής ισχύος που βρίσκονται μακριά από το σφάλμα, δεν επιβραδύνονται εφόσον το σφάλμα εκκαθαριστεί γρήγορα. Έτσι με κατάλληλο συντονισμό των ηλεκτρονόμων προστασίας είναι εφικτή η αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων αστάθειας. Στα συστήματα μεταφοράς υψηλής τάσης (YT) οι χρόνοι εκκαθάρισης των σφαλμάτων είναι μικρότεροι συγκρινόμενοι με αυτούς στα συστήματα μεταφοράς υπερηψηλής τάσης (YYT), για οικονομικούς λόγους. Έτσι όταν τα συστήματα μεταφοράς YT τροφοδοτούν με ισχύ φορτία με μεγάλο ποσοστό κινητήρων επαγωγής, η αποκοπή φορτίου κρίνεται ως πιο αποδοτικό οικονομικά μέτρο [DDF97].

Έλεγχος ροής ισχύος των διασυνδέσεων με συνεχές ρεύμα

Στους τερματικούς σταθμούς των συνδέσεων συνεχούς ρεύματος υπό YT (HVDC links) υπάρχουν μετατροπείς ισχύος με δυνατότητα ταχείας ελέγχου. Το γεγονός αυτό καθιστά τον έλεγχο της ροής ισχύος που ανταλλάσσεται διαμέσου των συνδέσεων, ως ένα σημαντικό μέτρο για την αντιμετώπιση φαινομένων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης [ICR91]. Στα περισσότερα φαινόμενα αστάθειας, ο πιο αποτελεσματικός τρόπος ελέγχου των ανταλλαγών ισχύος με συνεχές ρεύμα είναι η μείωση της τιμής αναφοράς της ροής ισχύος ή του ρεύματος της ζεύξης, που οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης αέργου ισχύος στους μετατροπείς ισχύος των τερματικών σταθμών [PSH93]. Επίσης στην περίπτωση που από

ένα ασθενές σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται εξαγωγή ισχύος διαμέσου μίας ζεύξης, η μείωση της εξαγωγής μπορεί να ενισχύσει την ικανότητα μεταφοράς ισχύος εντός του ασθενούς συστήματος. Παρά το γεγονός ότι ο έλεγχος του συνδέσμου με συνεχές ρεύμα είναι ταχύς, οι μεταβολές στην ισχύ που ανταλλάσσεται περιορίζονται από τη διατήρηση του ισοζυγίου ενέργειας στις δυο πλευρές του συνδέσμου, η οποία θα πρέπει να επιτυγχάνεται χωρίς την εμφάνιση ανεπιθύμητων διακυμάνσεων της συχνότητας.

Έλεγχος διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος

Διάφορα σχήματα προστασίας συστήματος με δυνατότητα αυτόματης ζεύξης-απόζευξης διατάξεων αντιστάθμισης έχουν σχεδιαστεί για τον έλεγχο της αέργου ισχύος στους υποσταθμούς διανομής [BTS96, ILS96]. Στην πράξη πρόκειται για ελεγκτές που εποπτεύουν μέσω απλών ηλεκτρονόμων μέτρησης την τάση συγκεκριμένων ζυγών του υποσταθμού και προχωρούν τοπικά στη ζεύξη ή την απόζευξη πυκνωτών ή πηνίων ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να αντιμετωπιστούν συνθήκες υπερτάσεων, που δημιουργούνται όταν για παράδειγμα συμβεί μία ξαφνική μείωση φορτίου, ή συνθήκες υποτάσεων, οι οποίες μπορεί να προκληθούν από την απώλεια μιας γραμμής ή μονάδας παραγωγής. Εγκάρσια πηνία συνδέονται συνήθως στο ζυγό YT των υποσταθμών διανομής ή στο τριτεύον τύλιγμα των αυτομετασχηματιστών στα Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (KYT). Οι συστοιχίες πυκνωτών εγκαθίστανται σε ζυγούς για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος των φορτίων ή τον έλεγχο της τάσης σε τροφοδοτικές γραμμές. Η δυνατότητα αυτόματης ζεύξης-απόζευξης διατάξεων αντιστάθμισης έχει ιδιαίτερη σημασία σε μεγάλα ακτινικά συστήματα.

Οι ηλεκτρονικά ελεγχόμενες διατάξεις αντιστάθμισης (SVC, STATCOM κλπ) αποτελούν ίσως το καλύτερο μέσο για την αντιμετώπιση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης [HE89], ιδιαίτερα αυτής που σχετίζεται με την επιβράδυνση των κινητήρων επαγωγής. Οι διατάξεις αυτές, με κατάλληλη έγχυση αέργου ισχύος, ρυθμίζουν πρακτικά ακαριαία την τάση ενός συγκεκριμένου ζυγού σε μία τιμή αναφοράς. Επειδή όμως το εύρος της ρύθμισης είναι περιορισμένο, οι ηλεκτρονικά ελεγχόμενες διατάξεις αντιστάθμισης στα πλαίσια υλοποίησης ενός σχήματος προστασίας συστήματος συνδυάζονται συνήθως με τον αυτόματο έλεγχο στατών πυκνωτών ή πηνίων.

Στην περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμοι σύγχρονοι πυκνωτές, αποτελούν την πλέον αξιόπιστη λύση για την υποστήριξη του συστήματος σε άεργο ισχύ. Η παραγόμενη άεργος ισχύς του σύγχρονου πυκνωτή καθορίζεται από την τιμή της τάσης αναφοράς του αυτόματου ρυθμιστή τάσης με τον οποίο είναι εξοπλισμένος, η οποία μπορεί να ρυθμίζεται αυτόματα. Έχουν σχεδιαστεί σχήματα προστασίας συστήματος που προβαίνουν σε αυτόματη αύξηση της τάσης αναφοράς των σύγχρονων πυκνωτών όταν εντοπίσουν σοβαρό πρόβλημα αστάθειας τάσης. Τα σχήματα αυτά, όμως, απαιτούν πολύ καλό συντονισμό με τη δευτερεύουσα ρύθμιση τάσης (όταν υπάρχει), η οποία στο επίπεδο των γεννητριών αποκρίνεται μετά την πάροδο χρονικού διαστήματος της ίδιας τάξης μεγέθους.

Ταχεία εκκίνηση ή απόρριψη μονάδων παραγωγής

Η ταχεία εκκίνηση μονάδων παραγωγής (π.χ. αεριοστροβίλων) αποτελεί ουσιαστικά ένα μέτρο ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Το μέτρο αυτό είναι κατάλληλο για την αντιμετώπιση περιπτώσεων μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης με μεγάλη πιθανότητα επικείμενης κατάρρευσης λόγω της ανεπαρκούς παραγωγής σε κρίσιμες περιοχές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αστάθειας αυτής της μορφής αποτελεί η περίπτωση όπου σε μία περιοχή με μεγάλο φορτίο, μετά την απώλεια μίας γραμμής μεταφοράς που συνδέει το κέντρο της παραγωγής με την περιοχή αυτή, προκαλείται έλλειμμα παραγωγής. Η ταχεία εκκίνηση των μονάδων διαρκεί από μερικά λεπτά ως μερικές δεκάδες λεπτών και μπορεί να συνδυαστεί σε ένα σχήμα προστασίας συστήματος με άλλα μέτρα προστασίας που εκτελούνται στην ίδια χρονική κλίμακα.

Η απόρριψη μονάδων παραγωγής αποτελεί σύνθετο μέτρο προστασίας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ιδιαίτερα για την αντιμετώπιση προβλημάτων ευστάθειας γωνίας) και υλοποιείται κατά κόρον ως σχήμα προστασίας συστήματος αποκρινόμενο στην ανίχνευση κάποιου συμβάντος [GWG94]. Έτσι, όταν ανιχνευτεί το προκαθορισμένο συμβάν, αυτομάτως μία ή περισσότερες γεννήτριες αποσυνδέονται από το σύστημα. Στην περίπτωση της ευστάθειας τάσης η απόρριψη μονάδων είναι απαραίτητη όταν αντιμετωπίζονται προβλήματα κατά τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ισχύος από συγκεκριμένες επιβαρυνμένες διαδρομές (bottlenecks) του συστήματος μεταφοράς. Για παράδειγμα, σε

ένα σύστημα με απομακρυσμένο κέντρο παραγωγής και μειωμένη ικανότητα μεταφοράς ισχύος, η απόρριψη γεννητριών είναι απαραίτητη όταν χαθεί μία κρίσιμη γραμμή ώστε να αντιμετωπιστεί ο κίνδυνος υπερφόρτισης των γειτονικών γραμμών. Η κάλυψη της απώλειας παραγωγής γίνεται με τη διατήρηση στρεφόμενης εφεδρείας στην περιοχή του φορτίου ή με απόρριψη του πλεονάζοντος φορτίου.

Έλεγχος εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ

Ο κύριος ρόλος των ΣΑΤΥΦ είναι να ρυθμίζουν την τάση στους ζυγούς φορτίου των υποσταθμών διανομής εντός ενός προκαθορισμένου εύρους ρύθμισης που επιβάλλεται από την τάση αναφοράς και τη νεκρή ζώνη ρύθμισης. Έτσι, καθώς το φορτίο μεταβάλλεται, το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζει με μία καθυστέρηση το λόγο μετασχηματισμού των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης, ώστε να διασφαλίσει ότι η τάση θα βρεθεί εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων. Όταν όμως συμβεί μία μεγάλη διαταραχή στο σύστημα (σημαντική αύξηση φορτίου ή απώλεια διάταξης), ο μηχανισμός αποκατάστασης της τάσης (και της ισχύος) στα φορτία μέσω των ΣΑΤΥΦ μπορεί να καταστεί ασταθής. Στην περίπτωση αυτή η μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού οδηγεί σε ταυτόχρονη μείωση της τάσης και της ισχύος στο φορτίο.

Για την αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων αστάθειας τάσης έχουν σχεδιαστεί σχήματα προστασίας συστήματος που εφαρμόζουν τον έλεγχο εκτάκτου ανάγκης στα ΣΑΤΥΦ. Τα μέτρα αυτά αποσκοπούν εν γένει στη μείωση της τάσης στην πλευρά της διανομής, ώστε να επιφέρουν έμμεση αποκοπή φορτίου στο σύστημα, αυξάνοντας την τάση στη μεταφορά και αναχαιτίζοντας την εξέλιξη της αστάθειας. Ωστόσο κανένα από τα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ δεν μπορεί να αντιμετωπίσει την επίδραση στην ευστάθεια τάσης των δυναμικών αποκατάστασης του φορτίου στα κατάντη του μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης. Πλήρης βιβλιογραφική έρευνα γύρω από την εφαρμογή του ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στην ενότητα 1.11.

Η εφαρμογή του μέτρου της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ επιτυγχάνει επιβράδυνση στην κατάρρευση των τάσεων του συστήματος, ενώ το μέτρο της μείωσης της τάσης αναφοράς κάνει την τάση στην πλευρά του φορτίου λιγότερη ευαίσθητη στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος μεταφοράς. Το μέτρο κλειδώματος της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση αποσκοπεί στην ενίσχυση των τάσεων στο επίπεδο της μεταφοράς με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών αέργου ισχύος. Ως πιο αποτελεσματικό κρίνεται το μέτρο της αντιστροφής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ, η εφαρμογή του οποίου σταθεροποιεί για μεγάλο χρονικό διάστημα την ισχύ στο φορτίο και ενισχύει τις τάσεις στο σύστημα της μεταφοράς ακόμα και όταν υπάρχουν και άλλες δυναμικές επαναφορές του φορτίου.

Να σημειωθεί ότι υπάρχουν συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας στα οποία γίνεται ρύθμιση της τάσης τόσο στο επίπεδο της διανομής όσο και στο επίπεδο της μεταφοράς, δηλαδή στα συστήματα αυτά υπάρχουν ΣΑΤΥΦ όχι μόνο στους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ αλλά και σε υποσταθμούς ΥΥΤ/ΥΤ (ΚΥΤ). Για παράδειγμα στο σύστημα της Σουηδίας υπάρχουν ΣΑΤΥΦ που ρυθμίζουν την τάση σε τέσσερα διαδοχικά επίπεδα. Σχήματα προστασίας συστήματος που έχουν εγκατασταθεί σε τέτοια σύνθετα συστήματα ρύθμισης τάσης έχουν ως βασική αρχή τη διατήρηση χαμηλών τάσεων στο επίπεδο της διανομής και τη διατήρηση σε κανονικό επίπεδο ή λίγο υψηλότερα των τάσεων στο επίπεδο της υπομεταφοράς, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών αέργου ισχύος και τη βέλτιστη εκμετάλλευση της αντιστάθμισης στην ΥΤ.

Αποκοπή φορτίου

Η αποκοπή φορτίου αποτελεί το έσχατο μέτρο για την προστασία του συστήματος από αστάθεια τάσης. Τα περισσότερα σχήματα προστασίας συστήματος που υλοποιούν την αποκοπή φορτίου είναι τοπικά με αποκεντρωμένη λογική, δηλαδή οι αποκοπές πραγματοποιούνται με κριτήριο την τάση των ζυγών στους υποσταθμούς διανομής, οι οποίοι παρακολουθούνται μέσω κάποιου ηλεκτρονόμου τάσης. Οι αποκοπές γίνονται σε διάφορα στάδια με διαβαθμισμένη χρονική καθυστέρηση εφαρμογής. Τα περισσότερα σχήματα προστασίας συστήματος ευρείας περιοχής διαθέτουν κεντρική λογική και οι αποκοπές πραγματοποιούνται αυτόματα ή χειροκίνητα με βάση διεσπαρμένες μετρήσεις μεγεθών σε διάφορα σημεία του συστήματος.

Ειδικά για την αντιμετώπιση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης κατάλληλη θεωρείται η ταχεία αποκοπή φορτίου. Διάφορα κεντρικά ή αποκεντρωμένα σχήματα προστασίας συστήματος έχουν σχεδιαστεί για ταχεία αποκοπή φορτίου. Η χρονική απόκριση αυτών των σχημάτων αποκοπής είναι μικρότερη από 1,5 s και κρίνεται ως αποτελεσματική για την αποφυγή της επιβράδυνσης των κινητήρων επαγωγής. Σε κεντρικά σχήματα προστασίας που κάνουν χρήση μετρήσεων μέσω SCADA η χρονική απόκριση μπορεί να είναι μεγαλύτερη, οπότε τα σχήματα αυτά κρίνονται ως λιγότερο αποτελεσματικά για αυτό το είδος της αστάθειας τάσης.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα βελτίωσης της ασφάλειας των σχημάτων αποκοπής φορτίου με την πρόβλεψη χειροκίνητου οπλισμού, ώστε να είναι οπλισμένα μόνο όταν υπάρχουν ενδείξεις πιθανής αστάθειας. Αναλυτική παρουσίαση της βιβλιογραφίας γύρω από την αποκοπή φορτίου, ως μέτρου προστασίας συστήματος από αστάθειας τάσης γίνεται στην ενότητα 1.11.

Ελεγχόμενος διαχωρισμός περιοχών διασυνδεδεμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Ο ελεγχόμενος διαχωρισμός των περιοχών ενός διασυνδεδεμένου συστήματος αποτελεί το έσχατο μέτρο προστασίας για τη διατήρηση της ευστάθειας γωνίας μετά από την εμφάνιση μιας μεγάλης διαταραχής που εμπλέκει την απώλεια κρίσιμων μονάδων παραγωγής και οδηγεί σε επικείμενη διάδοση της αστάθειας μεταξύ περιοχών. Ένα σχήμα προστασίας συστήματος κατάλληλο για την εφαρμογή αυτού του μέτρου παρακολουθεί ταυτόχρονα μία ή περισσότερες ποσότητες, όπως την ξαφνική μεταβολή της κατεύθυνσης της ροής ισχύος σε μια διασυνδετική γραμμή, το ρυθμό μεταβολής μιας ροής ισχύος ή τη γωνία μίας τάσης και όταν εντοπίσει συνθήκες αστάθειας που δημιουργούν προϋποθέσεις σβέσης, προχωρεί στην αποσύνδεση προκαθορισμένων διακοπών ισχύος απομονώνοντας επιλεγμένες περιοχές. Ο ελεγχόμενος διαχωρισμός των περιοχών μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο όταν υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ συγκεκριμένων περιοχών φορτίου και περιοχών παραγωγής στο ίδιο σύστημα ή μεταξύ γειτονικών διασυνδεδεμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι εξαιρετικά δύσκολο να προσδιοριστούν τα σαφή σημεία στα οποία θα γίνει ο διαχωρισμός των περιοχών για κάθε πιθανή κατάσταση εκτάκτου ανάγκης στην οποία θα βρεθεί το σύστημα και έτσι δεν αποτελεί ένα ευρέως διαδεδομένο μέτρο προστασίας. Σε κάθε περίπτωση ο διαχωρισμός θα πρέπει να πραγματοποιείται αφού προηγουμένως έχει εξαντληθεί κάθε μέτρο αποκοπής φορτίου.

1.10 ΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

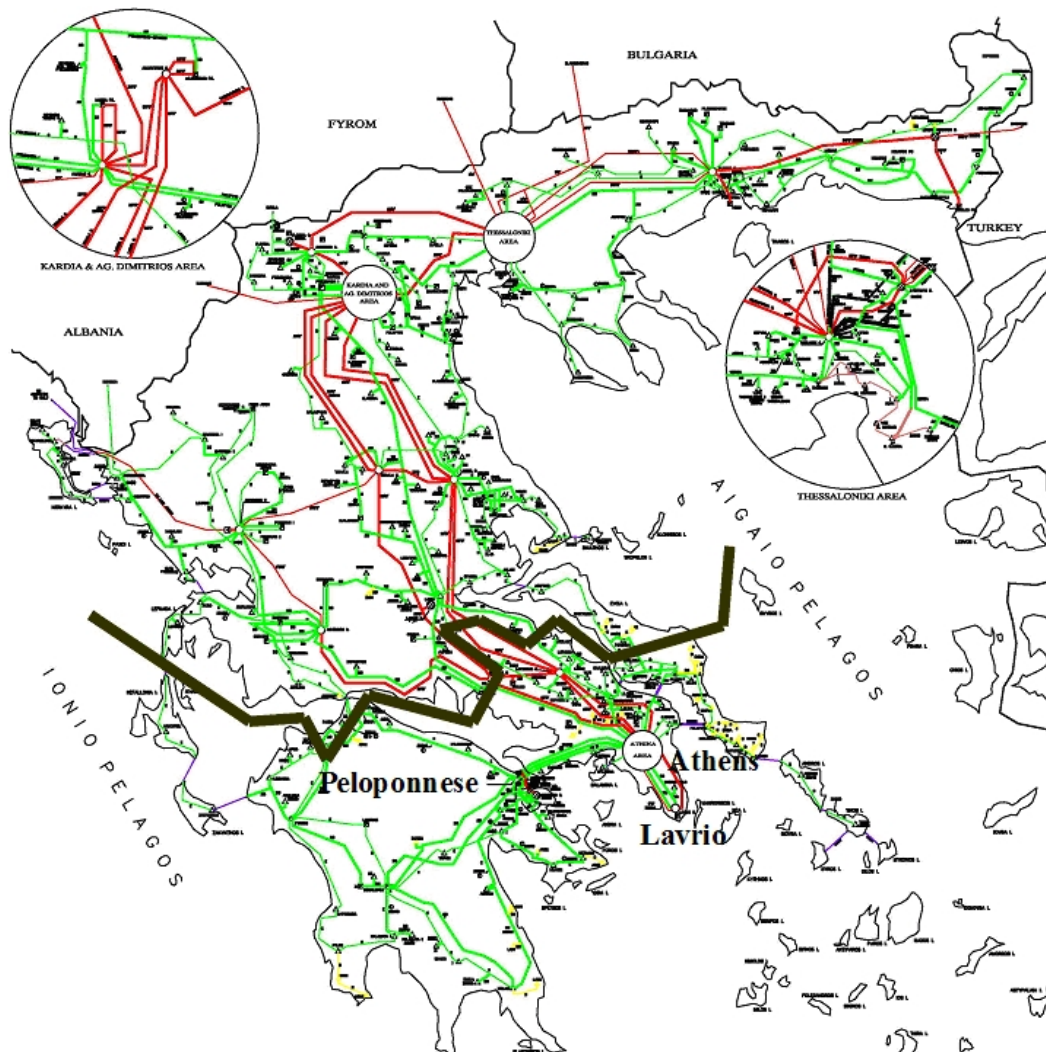
1.10.1 Περιγραφή

Η ιδιαιτερότητα του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος έγκειται στο γεγονός ότι, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής εντοπίζεται στη βορειοδυτική χώρα, το κυριότερο κέντρο κατανάλωσης βρίσκεται στο Νότο (ευρύτερη περιοχή της Αττικής). Αποτέλεσμα αυτής της ανισοκατανομής είναι η μεταφορά σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας κατά μήκος μεγάλων αποστάσεων που, κάτω από συνθήκες υψηλής φόρτισης του συστήματος, οδηγεί σε προβλήματα χαμηλών τάσεων στις περιοχές της Πελοποννήσου, της Θεσσαλίας, της Αττικής και της Στερεάς Ελλάδας.

Στο Σχ. 1.17 απεικονίζεται το μονογραμμικό διάγραμμα του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σύστημα μεταφοράς διακρίνονται δύο επίπεδα τάσης: το επίπεδο ΥΥΤ των 400 kV και το επίπεδο ΥΤ των 150 kV (οι γραμμές μεταφοράς των 66 kV είναι ελάχιστες). Το δίκτυο διανομής λειτουργεί στο επίπεδο των 20 kV, που χαρακτηρίζεται ως μέση τάση (ΜΤ). Στους υποσταθμούς διανομής (ΥΤ/ΜΤ) υπάρχουν μετασχηματιστές 150/20 kV, εξοπλισμένοι με ΣΑΤΥΦ για τον έλεγχο της τάσης στο δευτερεύον τύλιγμα. Σημειώνεται ότι η μεταβλητή λήψη των μετασχηματιστών αυτών βρίσκεται στη μεριά των 150 kV, δηλαδή προς το σύστημα μεταφοράς. Οι μετασχηματιστές ανύψωσης των γεννητριών έχουν σταθερές λήψεις και οι αυτομετασχηματιστές 400/150 kV έχουν ΣΑΤΥΦ χωρίς αυτόματη ρύθμιση που λειτουργούν με χειρισμό. Τα φορτία του συστήματος είναι κατά κανόνα συγκεντρωμένα στους ζυγούς ΜΤ των υποσταθμών διανομής. Υπάρχουν και φορτία (συνήθως βιομηχανικά) συνδεδεμένα απευθείας στην ΥΤ.

Ανάλογα με την τοπολογία, η σύνθεση του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος περιλαμβάνει γύρω στους 900 ζυγούς, 1100 κλάδους και 70 γεννήτριες. Εκτός των διατάξεων του συστήματος, υπάρχουν και οι διασυνδέσεις με τις γειτονικές χώρες. Συγκεκριμένα, το Ελληνικό σύστημα συνδέεται στα βόρεια με τη Βουλγαρία, μέσω μίας γραμμής μεταφοράς 400 kV από το Blagoevgrad στη Θεσσαλονίκη, και την ΠΓΔΜ με μία γραμμή 400 kV από το Dubrono στη Θεσσαλονίκη. Στα βορειοανατολικά υπάρχει η διασύνδεση με την Αλβανία μέσω δύο γραμμών μεταφοράς, μία στα 400 kV από το Elbasan στην Καρδιά και μία στα 150 kV από τη Bistrice στο Μούρτο, και με την Ιταλία μέσω υποθαλάσσιου καλωδίου συνεχούς ρεύματος στα 500kV. Σύντομα επίκειται διασύνδεση και με την Τουρκία.

Σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες δυσκολίες για την ανάπτυξη νέων έργων μεταφοράς, αλλά και την ούτως ή άλλως εγγενή δυσκολία για την ανανέωση των υπάρχοντων σταθμών παραγωγής ή τη δημιουργία νέων, τα προβλήματα αστάθειας τάσης στο σύστημα που παρατηρήθηκαν περιστασιακά στο παρελθόν είναι πιθανά να εμφανιστούν και στο μέλλον. Το πρώτο περιστατικό αστάθειας τάσης καταγράφηκε τον Ιούλιο του 1996 [VMK00]. Το πιο πρόσφατο και ταυτόχρονα πιο δυσμενές συνέβη τον Ιούλιο του 2004 και προκάλεσε τη σβέση του νότιου τμήματος του συστήματος [VNT06]. Η μαύρη γραμμή του Σχ. 1.17 αναφέρεται στο διαχωρισμό του συστήματος, που οδήγησε στην προαναφερόμενη σβέση.



Σχ. 1.17 Μονογραμμικό διάγραμμα Ελληνικού Διασυνδεδεμένου ΣΗΕ

1.10.2 Εφαρμογή Εκτίμησης Ασφάλειας Τάσης σε Πραγματικό Χρόνο

Η εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας τάσης πραγματικού χρόνου On-line VSA που έχει εγκατασταθεί στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας του ΔΕΣΜΗΕ αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο της Λιέγης και το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στα πλαίσια του, χρηματοδοτούμενου από την Ευρωπαϊκή Ένωση, ερευνητικού προγράμματος OMASES [BBC02]. Σκοπός της εφαρμογής είναι η εκτίμηση των ασφαλών περιθωρίων φόρτισης του συστήματος υπό την επίδραση ενδεχομένων διαταραχών στο σύστημα παραγωγής και μεταφοράς και ο προσδιορισμός των ορίων ασφάλειας με όρους ποσοτήτων μεταφοράς και κατανάλωσης ισχύος.

Οι κυριότερες λειτουργίες της εφαρμογής είναι η επιλογή των κρισιμότερων από τις ενδεχόμενες διαταραχές, ο προσδιορισμός ορίων ασφαλούς λειτουργίας και ο υπολογισμός ορίων φόρτισης. Το όριο ασφαλούς λειτουργίας [VCV98,VCK05] αντιστοιχεί στο λειτουργικό σημείο, όπου το σύστημα για δεδομένη κατεύθυνση καταπόνησης αποκρίνεται ευσταθώς σε όλες τις επιλεγμένες διαταραχές. Οι διαταραχές αυτές είναι όλες οι απλές διαταραχές και κάποιες επιλεγμένες διπλές διαταραχές. Αντίστοιχα, τα όρια φόρτισης υποδεικνύουν πόσο μπορεί να αυξηθεί το φορτίο του συστήματος συνολικά αλλά και σε συγκεκριμένες περιοχές μετά από τη διαταραχή.

Ο προσδιορισμός των ορίων φόρτισης για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή γίνεται με το πρόγραμμα WPSTAB [Man98,Vou99], που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Καρδιά της μεθόδου προσομοίωσης αποτελεί η προσέγγιση των οιονεί στατικών μεταβολών. Σύμφωνα με αυτήν, οι διατάξεις του συστήματος που δρουν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα παρίστανται με τα δυναμικά τους μοντέλα, ενώ οι διατάξεις που δρουν στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα εκφράζονται από τις εξισώσεις ισορροπίας τους. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης επιβάλλεται ομοιόμορφη αύξηση στο φορτίο, η οποία καλύπτεται με ανακατανομή της παραγωγής. Οποιαδήποτε ανισοκατανομή φορτίου - παραγωγής οφειλόμενη στις απώλειες του συστήματος ή στη νεκρή ζώνη των ΣΑΤΥΦ αντισταθμίζονται από την πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας.

Προϊόν του υπολογισμού των ορίων φόρτισης είναι η γραφική απεικόνιση ενός συνόλου καμπυλών δικτύου PV, στις οποίες φαίνεται η κατανάλωση ισχύος (κάποιας περιοχής ή ολόκληρου του συστήματος) συναρτήσει της τάσης ενός χαρακτηριστικού ζυγού. Οι καμπύλες PV αντικατοπτρίζουν γραφικά την ποσότητα του φορτίου που μπορεί να αποκατασταθεί σε κάθε περιοχή του συστήματος ή στο σύνολό του αντίστοιχα. Αντίθετα, τα όρια ασφαλούς λειτουργίας παρέχουν μια αίσθηση της «απόστασης» του συστήματος από την κατάσταση αστάθειας πριν από την εκδήλωση της διαταραχής.

Η ακολουθία των διαδικασιών που επιτελούνται στην εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο On-line VSA φαίνεται στο Σχ. 1.18. Η εφαρμογή είναι δομημένη πάνω σε έναν εξυπηρετητή σε περιβάλλον WINDOWS-XP, ο οποίος μπορεί να επικοινωνεί ταυτόχρονα με τη σχεσιακή βάση δεδομένων της εφαρμογής, με την κύρια υπολογιστική μονάδα για την εκτέλεση της εκτίμησης ασφάλειας τάσης και με έναν εξυπηρετητή HTTP. Οι προσωπικοί υπολογιστές, στους οποίους εμφανίζονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης, επικοινωνούν με τον εξυπηρετητή HTTP μέσω ενός τοπικού δικτύου LAN, κάτω από το πρωτόκολλο TCP/IP.



Σχ. 1.18 Δομή εφαρμογής Εκτίμησης Ασφάλειας Τάσης πραγματικού χρόνου

Ο κύριος σταθμός εργασίας του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας λειτουργεί σε περιβάλλον λειτουργικού συστήματος VMS και εξυπηρετεί την πλατφόρμα του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (EMS) και τις ιεραρχικές βάσεις δεδομένων της. Η επικοινωνία μεταξύ του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας και της εφαρμογής εκτίμησης ασφάλειας τάσης, που λειτουργούν ανεξάρτητα, γίνεται με FTP μετάδοση των αρχείων δεδομένων.

Συγκεκριμένα, από το EMS εξάγονται 14 αρχεία κειμένου, τα οποία περιέχουν είτε τα δεδομένα της κατάστασης του Ελληνικού συστήματος, όπως αυτή εκτιμήθηκε από τον εκτιμητή κατάστασης σε πραγματικό χρόνο, είτε τη λύση της ροής φορτίου που προκύπτει από το EMS μετά από αίτηση του χρήστη. Κάθε αρχείο αποτελεί στην πράξη μία πλήρη περιγραφή των διατάξεων του συστήματος και αντιστοιχεί σε έναν πίνακα της σχεσιακής βάσης δεδομένων της εφαρμογής On-line VSA. Τα αρχεία αυτά μεταφέρονται σε έναν συγκεκριμένο φάκελο εισαγωγής δεδομένων του εξυπηρετητή της εφαρμογής. Ο φάκελος αυτός ελέγχεται περιοδικά για την παρουσία νέων δεδομένων και όταν αυτά υπάρξουν, φορτώνονται στη βάση δεδομένων της εφαρμογής και εκτελείται αυτόματα ένας κύκλος διαδικασιών στην κύρια υπολογιστική μονάδα με σκοπό την εκτίμηση της ασφάλειας τάσης. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων και μπορούν να ανακτηθούν από το χρήστη μέσω του εξυπηρετητή HTTP από τον προσωπικό του υπολογιστή.

Τα δεδομένα εξόδου της εφαρμογής On-line VSA είναι πίνακες ορίων ασφάλειας, διακυμάνσεις τάσεων, προφίλ τάσεων και καμπύλες PV. Τα περιθώρια ισχύος σε MW, που αναφέρονται σε όρια ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος, εμφανίζονται σε πίνακες. Στους πίνακες αυτούς καταγράφονται μόνο τα περιθώρια ισχύος που είναι μικρότερα από μία προκαθορισμένη τιμή.

Σε ένα διάγραμμα διακύμανσης τάσης παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της τάσης ενός συγκεκριμένου ζυγού μετά από μία διαταραχή. Ο ζυγός που επιλέγεται είναι αυτός που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη πτώση τάσης για τη δεδομένη διαταραχή. Με βάση το κριτήριο αυτό, εξετάζοντας όλες τις διαταραχές που δίνουν μικρό περιθώριο φόρτισης του συστήματος, προκύπτει ένα σύνολο ζυγών. Για τους ζυγούς αυτούς χαράσσονται δύο καμπύλες διακύμανσης τάσης, από τις οποίες η μία αντιστοιχεί στην οριακά αποδεκτή και η άλλη στην οριακά μη αποδεκτή φόρτιση του συστήματος. Από τις καμπύλες διακύμανσης των τάσεων μπορεί εύκολα να γίνει κατανοητό αν ένα περιθώριο ισχύος οφείλεται σε αστάθεια ή σε χαμηλές τάσεις. Για παράδειγμα, αν για την οριακά μη αποδεκτή φόρτιση του συστήματος προκύπτουν τάσεις που ισορροπούν σε μία τιμή λίγο μικρότερη από ένα καθορισμένο κατώφλι, η περίπτωση αυτή δεν αναφέρεται σε αστάθεια τάσης και το όριο ασφάλειας που προκύπτει δεν αποτελεί όριο ευστάθειας. Αντίθετα, όταν για την οριακά μη αποδεκτή φόρτιση ορισμένες τάσεις μειώνονται διαρκώς χωρίς να σταθεροποιούνται, η περίπτωση αναφέρεται σε αστάθεια τάσης και το όριο ασφάλειας αποτελεί όριο ευστάθειας. Για τις γεννήτριες έχει προβλεφθεί ένα ελάχιστο κατώφλι τερματικής τάσης, ώστε να συνεκτιμηθεί ο κίνδυνος αποσύνδεσής τους από προστασία υποτάσεως.

Διαγράμματα προφίλ τάσεων εξάγονται για κάθε διαταραχή που εμφανίζεται στον πίνακα των περιθωρίων φόρτισης. Στα διαγράμματα αυτά απεικονίζεται η γεωγραφική κατανομή των ζυγών, που παρουσιάζουν τάση μικρότερη από μία προκαθορισμένη, από την οποία μπορεί να εκτιμηθεί το εύρος εξάπλωσης της αστάθειας. Κατά συνέπεια από την παρατήρηση των ζυγών που εμφανίζονται στο διάγραμμα είναι αρκετά εύκολο να προκύψουν οι πλέον θιγόμενες περιοχές του συστήματος.

Τέλος, για κάθε διαταραχή που εμφανίζεται στον πίνακα των περιθωρίων φόρτισης παράγεται ένα σύνολο καμπυλών PV που αναφέρονται τόσο στο συνολικό σύστημα όσο και στις επιμέρους περιοχές του. Οι καμπύλες αυτές παρουσιάζουν το μέγιστο φορτίο που μπορεί να καταναλωθεί σε κάθε περιοχή συναρτήσει μίας χαρακτηριστικής τάσης της περιοχής.

Στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας η εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας τάσης μπορεί να λειτουργήσει με τρεις διαφορετικούς τρόπους: σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου, σε περιβάλλον μελέτης και σε περιβάλλον εξειδικευμένης ανάλυσης. Κατά τη λειτουργία σε πραγματικό χρόνο, ο εκτιμητής κατάστασης του κέντρου ελέγχου παρέχει περιοδικά τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου της εφαρμογής (η περίοδος ανανέωσης των δεδομένων εισόδου είναι 10 λεπτά). Η εκτέλεση της εκτίμησης ασφάλειας τάσης ξεκινά αυτόματα αμέσως μετά τη μεταφορά νέων δεδομένων από τον εκτιμητή κατάστασης και διαρκεί μερικά λεπτά. Η ενεργοποίηση της εκτέλεσης μπορεί να πραγματοποιηθεί και χειροκίνητα σε περίπτωση που θεωρηθεί ότι η κατάσταση του συστήματος έχει μεταβληθεί σημαντικά από την προηγούμενη εκτέλεση.

Κατά τη λειτουργία σε περιβάλλον μελέτης, η εκτέλεση της εκτίμησης ασφάλειας τάσης πραγματοποιείται με αίτηση του χρήστη. Τα δεδομένα εισόδου είναι δυνατόν να προέρχονται από παρελθόντα στιγμιότυπα του συστήματος που έχουν αποθηκευτεί στη βάση δεδομένων της εφαρμογής, αλλά και από την τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας του συστήματος.

Τέλος, κατά τη λειτουργία σε περιβάλλον εξειδικευμένης ανάλυσης ο χρήστης έχει επιπλέον πρόσβαση σε διαγνωστικά εργαλεία, όπως η ανάλυση ευαισθησίας ή η ανάλυση ιδιοτιμών. Στην περίπτωση

μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης η ανάλυση του πίνακα κατάστασης παρέχει απαραίτητες πληροφορίες για τη λήψη καταλλήλων μέτρων, όπως για παράδειγμα τον τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να γίνει η ανακατανομή της παραγωγής ή την υπόδειξη των φορτίων που θα πρέπει να αποκοπούν. Η ανάλυση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας (απώλεια σημείου λειτουργίας) στηρίζεται στον υπολογισμό της μικρότερης ιδιοτιμής του πίνακα κατάστασης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα και στα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα. Από την ανάλυση αυτή προκύπτουν οι συνιστώσες εκείνες του δικτύου (π.χ σύγχρονες γεννήτριες, κινητήρες επαγωγής) οι οποίες παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην αστάθεια.

Η προσαρμογή των δεδομένων του Ελληνικού συστήματος που περιγράφεται στο τρίτο κεφάλαιο, αποτέλεσε μέρος της διαδικασίας συντήρησης της βάσης δεδομένων της εφαρμογής εκτίμησης ασφάλειας τάσης πραγματικού χρόνου On-line VSA του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας του ΔΕΣΜΗΕ, η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ερευνητικού έργου [Vou05a]. Η διαδικασία αυτή συνέβαλλε σημαντικά στη βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της εφαρμογής.

Στα πλαίσια της διατριβής αυτής αναπτύχθηκαν ορισμένα υποπρογράμματα, τα οποία ενσωματώθηκαν στην εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας τάσης πραγματικού χρόνου On-line VSA του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας, με σκοπό την παράσταση συγκεκριμένων λειτουργιών της προστασίας του συστήματος, που παίζουν κρίσιμο ρόλο στην εκτίμηση της ασφάλειας τάσης του συστήματος. Τα μοντέλα παράστασης διατάξεων του συστήματος και αυτά των μέτρων προστασίας από αστάθεια τάσης, που αναπτύχθηκαν επίσης στα πλαίσια της διατριβής αυτής, αποτελούν εργαλεία για τη σχεδίαση σχημάτων προστασίας από αστάθεια τάσης σε διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μελλοντικά στην εφαρμογή On-line VSA.

1.11 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Η επισκόπηση της βιβλιογραφίας διενεργήθηκε στις ακόλουθες περιοχές έρευνας, τις οποίες πραγματεύεται η παρούσα διατριβή:

1. Αποκοπή φορτίου λόγω χαμηλών τάσεων
2. Έλεγχος εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ
3. Σχήματα προστασίας συστήματος από αστάθεια τάσης με αποκοπή φορτίου ή έλεγχο εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ

1.11.1 Αποκοπή Φορτίου λόγω Χαμηλών Τάσεων

Η έρευνα γύρω από την εφαρμογή της αποκοπής φορτίου ως μέτρου προστασίας συστήματος από αστάθεια τάσης πραγματοποιείται με την αποδοχή είτε της *στατικής* είτε της *δυναμικής* προσέγγισης.

Στη στατική προσέγγιση το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας περιγράφεται από ένα σύνολο εξισώσεων ισορροπίας, που στην απλούστερη περίπτωση είναι οι εξισώσεις ροής ισχύος [VCV98]. Ένα σημείο λειτουργίας του συστήματος προκύπτει από τη λύση του συνόλου των εξισώσεων ισορροπίας. Σε περίπτωση που το σημείο λειτουργίας κρίνεται ότι δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφάλειας, είναι δυνατός ο προσδιορισμός με στατικές μεθόδους της αποκοπής φορτίου που θα αυξήσει την «απόσταση» του δεδομένου σημείου λειτουργίας από το σημείο της αστάθειας (προληπτικός έλεγχος). Όμως, η εμφάνιση μίας ακραίας διαταραχής στο σύστημα είναι δυνατόν να προκαλέσει την απώλεια μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας, με αποτέλεσμα το σύνολο των παραπάνω εξισώσεων να μην έχει λύση. Στην περίπτωση αυτή, οι στατικές μέθοδοι αποσκοπούν στον προσδιορισμό της ελάχιστης αναγκαίας αποκοπής φορτίου για την οποία το σύστημα θα αποκαταστήσει σημείο ισορροπίας ή ισοδύναμα το σύνολο των εξισώσεων θα έχει λύση (έλεγχος εκτάκτου ανάγκης).

Μία αρχική στατική προσέγγιση της αποκοπής φορτίου έγινε στην εργασία [HPT68], όπου οι συνθήκες βελτιστοποίησης Kuhn-Tucker εφαρμόζονται στην επίλυση του προβλήματος ροής ισχύος με τη μέθοδο Newton-Raphson. Για λόγους απλοποίησης του προβλήματος, οι απώλειες αέργου ισχύος στο σύστημα θεωρήθηκαν αμελητέες, ενώ η παραγωγή αέργου ισχύος από τις γεννήτριες όπως και η ισχύς που καταναλώνουν τα φορτία θεωρήθηκε σταθερή. Μία παραπλήσια μέθοδος βελτιστοποίησης, στην οποία όμως λαμβάνεται υπόψη η εξάρτηση των φορτίων από την τάση και τη συχνότητα, όπως και η επίδραση των διατάξεων ελέγχου των γεννητριών, αναπτύχθηκε αρκετά αργότερα στην εργασία [PMS85].

Στις εργασίες [MEM96, MEM97] γίνεται σύγκριση μίας αντίστοιχης μεθοδολογίας για την ελαχιστοποίηση της αποκοπής φορτίου, με αυτές που προαναφέρθηκαν στις [HPT68, PMS85]. Στην περίπτωση αυτή ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών της ενεργού (αντίστοιχα αέργου) ισχύος που ζητείται και καταναλώνεται από κάθε φορτίο του συστήματος. Τα διαθέσιμα προς αποκοπή φορτία προκύπτουν από λίστα προτεραιότητας, που εισάγει σταθμισμένα βάρη στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης. Επιπλέον λαμβάνονται υπόψη οι λειτουργικοί περιορισμοί του συστήματος.

Στην εργασία [Sub71] εισάγεται η ανάλυση ευαισθησίας στο πρόβλημα της ελάχιστης αποκοπής φορτίου. Τα πιο αποτελεσματικά φορτία ιεραρχούνται με βάση ένα κριτήριο σταθμισμένου σφάλματος (weighted error criterion), όμως δεν λαμβάνονται υπόψη λειτουργικοί περιορισμοί του συστήματος και των διατάξεών του. Στις [CS79, CY79] το πρόβλημα βελτιστοποίησης της αποκοπής φορτίου συνυπολογίζει το μέτρο της ανακατανομής της παραγωγής. Το μη γραμμικό πρόβλημα γραμμικοποιείται με τη βοήθεια της ανάλυσης ευαισθησίας και η επίλυσή του στηρίζεται σε έναν αλγόριθμο αραιού γραμμικού προγραμματισμού. Η ακρίβεια των μεθόδων περιορίζεται από τα όρια της γραμμικοποίησης.

Η εξάλειψη των υπερφορτίσεων σε γραμμές και λοιπό εξοπλισμό ενός συστήματος, με στατικές μεθόδους που στηρίζονται στη χρήση των κλασικών εξισώσεων ροής ισχύος, είναι ο σκοπός των μεθοδολογιών αποκοπής φορτίου που παρουσιάζονται στις [MBS79, AT88]. Παραπλήσια μέθοδος αποκοπής φορτίου για την εξάλειψη υπερφορτίσεων σε γραμμές μεταφοράς υπό συνθήκες ανεπαρκούς παραγωγής παρουσιάζεται στην [HS98]. Στόχος στην περίπτωση αυτή είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Η ευριστική μέθοδος που προτείνεται στην [SS89] επεκτείνει την εφαρμογή του μέτρου της αποκοπής φορτίου στον έλεγχο αποκατάστασης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η αναγκαία αποκοπή φορτίου προσδιορίζεται και πάλι από την απαίτηση για εξάλειψη των υπερφορτίσεων, ενώ η τελική αποκατάσταση του ισοζυγίου ισχύος στο σύστημα υποδεικνύεται από βέλτιστη ροή ισχύος.

Στην [QFS92] προσδιορίζεται, εν οίδει προληπτικού ελέγχου, η αποκοπή φορτίου που θα προκαλέσει ικανοποιητική αύξηση των τάσεων του συστήματος, τέτοια ώστε ο κίνδυνος εμφάνισης αστάθειας τάσης να θεωρείται περιορισμένος. Οι πιο ασθενείς ζυγοί, στους οποίους και εφαρμόζεται η αποκοπή, καθορίζονται με ανάλυση ευαισθησίας. Όμως, το μέτρο της τάσης δεν αποτελεί ασφαλή δείκτη της αστάθειας και μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική απόρριψη φορτίου. Το γεγονός αυτό λήφθηκε υπόψη στην εργασία [QFH94], όπου οι ίδιοι συγγραφείς προτείνουν τον υπολογισμό ενός δείκτη αστάθειας, ο οποίος προτάθηκε για πρώτη φορά στην [KG86]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, οι αποκοπές εφαρμόζονται επαναληπτικά από τους ζυγούς του συστήματος που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη ευαισθησία του παραπάνω δείκτη ως προς την ενεργό και άεργο συνιστώσα του φορτίου, μέχρι οι ευαισθησίες αυτές να μειωθούν κάτω από ένα όριο. Ωστόσο, το όριο αυτό επιλέγεται και πάλι κάπως αυθαίρετα.

Μία γενικευμένη στατική μέθοδος ιεράρχησης των πιο αποδοτικών μέτρων ελέγχου, μεταξύ των οποίων και η αποκοπή φορτίου, παρουσιάζεται στις εργασίες [WPH99, WPH01]. Αρχικά υπολογίζεται η ελάχιστη απόσταση του σημείου λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος από την επιφάνεια ορίων φόρτισης και στη συνέχεια η ευαισθησία της ελάχιστης αυτής απόστασης ως προς διάφορες παραμέτρους ελέγχου. Με εφαρμογή διαφορικού δυναμικού προγραμματισμού προκύπτει η βέλτιστη ιεράρχηση των μέτρων ελέγχου για τη μεγιστοποίηση της ελάχιστης απόστασης.

Στην [BBM96] η ελάχιστη αποκοπή φορτίου προκύπτει από ένα πρόβλημα γραμμικής βελτιστοποίησης. Η ιεράρχηση των πιο αποδοτικών φορτίων προς αποκοπή γίνεται με βάση την ευαισθησία της μικρότερης ιδιάζουσας τιμής του Ιακωβιανού πίνακα κατάστασης (ή ισοδύναμα της μεγαλύτερης ιδιάζουσας τιμής του αντιστρόφου παραγοντοποιημένου Ιακωβιανού πίνακα) ως προς την ενεργό και άεργο συνιστώσα κάθε διαθέσιμου φορτίου. Στην εργασία [ELR03] υπολογίζεται και πάλι με εφαρμογή ενός αλγορίθμου γραμμικής βελτιστοποίησης, η ελάχιστη αποκοπή φορτίου για την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή, η βέλτιστη επιλογή των φορτίων προς αποκοπή εξασφαλίζεται με τον υπολογισμό των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης ως προς τις παραμέτρους φορτίου, ενώ η ακρίβεια της γραμμικοποίησης επιτυγχάνεται με την επαναληπτική εφαρμογή του αλγορίθμου μετά από κάθε αποκοπή.

Οι περισσότερες από τις προαναφερόμενες μεθόδους εμπεριέχουν την έννοια του προληπτικού ελέγχου, δηλαδή είναι κατάλληλες για να εφαρμοστούν όταν το περιθώριο φόρτισης που υπολογίζεται

για ένα σημείο λειτουργίας κρίνεται ανεπαρκές. Στις περιπτώσεις που το σύστημα των εξισώσεων δεν έχει λύση, οι μεθοδολογίες αυτές δεν μπορούν να παράσχουν πληροφορία για τη λήψη μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης.

Κατάλληλες στατικές μέθοδοι που αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα είναι η ροή ισχύος για μη επιλύσιμες περιπτώσεις [Ove94] ή η ροή ισχύος με τη μέθοδο της συνέχειας [AC92,FAL00]. Πρόκειται ουσιαστικά για τροποποιήσεις της κλασικής ροής ισχύος, που επιτρέπουν την επίλυση των εξισώσεων κοντά στο σημείο της αστάθειας. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να υπολογίζονται τα ακριβή όρια φόρτισης του ηλεκτρικού συστήματος και να προσδιορίζεται η απόστασή τους από το σημείο λειτουργίας πριν τη διαταραχή. Η πληροφορία αυτή αξιοποιείται για τη λήψη των ελάχιστων μέτρων εκτάκτου ανάγκης.

Μία εφαρμογή της μεθόδου της συνέχειας για την ελαχιστοποίηση της αποκοπής φορτίου σε συνθήκες εκτάκτου ανάγκης του συστήματος παρουσιάζεται στην εργασία [FAM98], όπου προσδιορίζεται η βέλτιστη στρατηγική αποκοπής φορτίου για την αποκατάσταση σημείου ισορροπίας στο σύστημα μετά από διαταραχή που προκαλεί τη μη επιλυσιμότητα των εξισώσεων που το περιγράφουν. Στην [FAM00] γίνεται μία συνολική θεώρηση της παραπάνω μεθόδου, ενσωματώνοντας και την έννοια του προληπτικού ελέγχου. Ο προληπτικός έλεγχος υλοποιείται στην περίπτωση αυτή ως ένα πρόβλημα γραμμικής βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό των πιο αποδοτικών μέτρων.

Στην [NC95] εκτιμάται αρχικά η ασφάλεια τάσης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο ενέργειας Lyapunov. Η συνάρτηση ενέργειας που επιλέγεται χαρακτηρίζεται ως «απόλυτη», καθώς δεν απαιτεί τον υπολογισμό των ασταθών σημείων λειτουργίας του συστήματος. Στη συνέχεια ο προσδιορισμός της βέλτιστης τοποθεσίας και ποσότητας αποκοπής φορτίου μπορεί να προσεγγιστεί με τον υπολογισμό της ευαισθησίας της συνάρτησης ενέργειας ως προς την ενεργό και άεργο συνιστώσα των φορτίων του συστήματος. Η ίδια μέθοδος εφαρμόζεται στην [OK98] για τον προσδιορισμό των πιο αποδοτικών μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης, μεταξύ των οποίων και η αποκοπή φορτίου.

Ο προσδιορισμός των ελάχιστων αναγκαίων δράσεων για την αποκατάσταση ευσταθούς σημείου λειτουργίας από μη βιώσιμα σημεία λειτουργίας που προκύπτουν μετά από την εμφάνιση κρίσιμων διαταραχών, μπορεί να επιτευχθεί και με τη μέθοδο βελτιστοποίησης του άμεσου εσωτερικού σημείου [GMM96,WET98,GIR99]. Το πλεονέκτημα της μεθόδου συνίσταται στην εύρεση της ελάχιστης αποκοπής φορτίου (σε συνδυασμό και με άλλα μέτρα ελέγχου) και της βέλτιστης ιεράρχησης των ζυγών σε ένα μόνο βήμα βελτιστοποίησης. Στην [BLS05], οι συγγραφείς προτείνουν την προσθήκη των λόγων μετασχηματισμού των ΣΑΤΥΦ στις μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος ελαχιστοποίησης της αποκοπής φορτίου με τη μέθοδο του άμεσου εσωτερικού σημείου.

Στην εργασία [APK05] η βέλτιστη αποκοπή φορτίου προσδιορίζεται με εφαρμογή της τροποποιημένης μεθόδου βελτιστοποίησης νευρωνικού δικτύου Hopfield. Για την κατάστροφη του προβλήματος ελαχιστοποίησης του απορριπτόμενου φορτίου κατασκευάζεται μία τετραγωνική αντικειμενική συνάρτηση, η οποία υπόκειται σε ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς. Σε πρώτο στάδιο πραγματοποιείται αποκοπή φορτίου από τους ζυγούς που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη τιμή ευαισθησίας της μικρότερης πραγματικής ιδιοτιμής του Ιακωβιανού πίνακα της κλασικής ροής ισχύος ως προς την ενεργό και άεργο συνιστώσα του φορτίου τους. Η αποκοπή φορτίου από τους συγκεκριμένους ζυγούς επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη αύξηση του μέτρου της μικρότερης (αρνητικής) πραγματικής ιδιοτιμής, απομακρύνοντας το σύστημα από την αστάθεια. Στη συνέχεια ελέγχονται οι λειτουργικοί περιορισμοί του συστήματος και εφόσον εκπληρούνται, η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε πιο φορτισμένο επίπεδο συστήματος.

Στην [IZ03a] η αποκοπή του φορτίου γίνεται με σκοπό τη διατήρηση ενός προκαθορισμένου επιπέδου τάσης σε έναν χαρακτηριστικό ζυγό ή μια χαρακτηριστική ομάδα ζυγών του συστήματος, ακολουθώντας όμοια λογική με αυτή της δευτερεύουσας ρύθμιση τάσης. Εφόσον η τάση του/των ζυγών είναι καθορισμένη, ο Ιακωβιανός πίνακας της κλασικής ροής ισχύος μπορεί να ελαττωθεί αφαιρώντας τα στοιχεία που αντιστοιχούν στους συγκεκριμένους ζυγούς. Αντίστοιχα, η μεταβολή του φορτίου σε έναν ζυγό, εξαιτίας της εφαρμογής της αποκοπής, ενσωματώνεται στο πρόβλημα ροής ισχύος ως μεταβλητή κατάστασης. Οι ζυγοί στους οποίους εφαρμόζεται η αποκοπή προκύπτουν από την πληροφορία που δίνεται από το κάθετο διάνυσμα, ενώ η ποσότητα της αποκοπής προσδιορίζεται από την επίλυση της ροής ισχύος. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί το ίδιο αποδοτικά σε επιλύσιμες και μη επιλύσιμες περιπτώσεις.

Η μέθοδος βελτιστοποίησης Particle Swarm Optimization χρησιμοποιείται στην [AMR06] για τον προσδιορισμό της ελάχιστης ποσότητας φορτίου που πρέπει να αποκοπεί και της βέλτιστης επιλογής των πιο αποδοτικών ζυγών για το σκοπό αυτό. Η μέθοδος αυτή συνεκτιμά ταυτόχρονα οικονομικούς και λειτουργικούς περιορισμούς, ενσωματώνοντας την πληροφορία που παρέχεται από τις ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς τις παραμέτρους φορτίου στην κλασική οικονομικοστραφή αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης της ροής ισχύος.

Στην εργασία [WB05] η βέλτιστη επιλογή των φορτίων που πρέπει να αποκοπούν για δεδομένο σενάριο αστάθειας, καθορίζεται με βάση αποκλειστικά το ελάχιστο κόστος από τη διακοπή της παροχής ισχύος στους καταναλωτές. Προς αυτή την κατεύθυνση αναλύεται μία τεχνική εύρεσης των βέλτιστων για αποσύνδεση αναχωρήσεων από έναν ζυγό, με βάση έναν δείκτη κόστους που συνυπολογίζει διάφορους παράγοντες, όπως τη χρονική στιγμή της ημέρας στην οποία εφαρμόζεται η αποκοπή και τη διάρκεια της.

Μία γενικευμένη προσέγγιση συνολικής ενίσχυσης της ασφάλειας τάσης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με ανακατανομή της ενεργού και αέργου ισχύος στο σύστημα εξετάζεται στην [AdS04]. Πιο αναλυτικά, η προτεινόμενη μεθοδολογία συνδυάζει τη βελτίωση του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού, εισάγοντας κριτήρια ασφάλειας τάσης στο πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος, με την εφαρμογή της αποκοπής φορτίου σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης του συστήματος. Η ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων παρέχει τη βέλτιστη κατεύθυνση μεταβολής των παραμέτρων φορτίου, η οποία με τον υπολογισμό των συντελεστών συμμετοχής υποδεικνύει τα πιο αποδοτικά από αυτά για αποκοπή.

Στην [EOV05] προτείνεται ο συνδυασμός μεθόδων ανάλυσης ευαισθησίας και γραμμικής βελτιστοποίησης για το συντονισμένο έλεγχο των διατάξεων FACTS ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και της αποκοπής φορτίου. Στόχος της συντονισμένης δράσης αποτελεί η εξάλειψη των υπερφορτίσεων που προκαλούνται από την απώλεια γραμμών μεταφοράς στο σύστημα, με το μικρότερο κόστος. Για το σκοπό αυτό, ένα σύστημα ελέγχου παρακολουθεί τη ροή ισχύος στο δίκτυο και εφαρμόζει το βέλτιστο έλεγχο σε κάθε διάταξη FACTS, ώστε να διατηρεί τις ροές σε ανεκτά επίπεδα. Αν αυτό δεν είναι δυνατό με έλεγχο των FACTS προχωρά και σε αποκοπή φορτίου. Η φιλοσοφία εφαρμογής της αποκοπής φορτίου για την αποσυμφόρηση του δικτύου ακολουθείται και στις εργασίες [EVO05, TSM05], όπου το μέτρο της αποκοπής βελτιστοποιείται στη μεν πρώτη σε συνδυασμό με τον έλεγχο διατάξεων FACTS, στη δε δεύτερη σε συνδυασμό με το μέτρο της ανακατανομής της παραγωγής.

Παρά την υπολογιστική ταχύτητα των στατικών μεθόδων προσέγγισης της αποκοπής φορτίου, το μειονέκτημά τους είναι ότι δεν μπορούν να απεικονίσουν την επίδραση του χρόνου στην εφαρμογή του μέτρου, ούτε και την αλληλεπίδραση της αποκοπής με άλλα μέτρα ελέγχου που λαμβάνονται σε μεταγενέστερο χρόνο. Μάλιστα, η χρονική καθυστέρηση εφαρμογής της αποκοπής φορτίου συνδέεται άμεσα με την ποσότητα του φορτίου που πρέπει να αποκοπεί για τη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος. Η πλήρης εποπτεία της χρονικής εξέλιξης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί μόνο με δυναμικές μεθόδους προσομοίωσης.

Στις εργασίες [Tay92, KKT05] τίθενται ζητήματα που αφορούν στη δυναμική προσέγγιση της αποκοπής φορτίου και ιδιαίτερα στη σωστότερη κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς των φορτίων (κινητήρες επαγωγής, θερμοστατικά φορτία κλπ.) κατά την εξέλιξη των φαινομένων αστάθειας τάσης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα προβλήματα υλοποίησης της αποκοπής φορτίου, λαμβάνοντας υπόψη και την ανάγκη για σωστό συντονισμό της προστασίας συστήματος με την προστασία εξοπλισμού. Η επίδραση της φύσης των φορτίων στην ευστάθεια τάσης εξετάζεται και στην εργασία [Rif04], με μία περαιτέρω θεωρητική ανάλυση των παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ακριβή παράσταση του φορτίου στη σχεδίαση σχημάτων αποκοπής φορτίου. Προς την ίδια κατεύθυνση πραγματοποιείται στην [LR04] μια πιο λεπτομερής ανάλυση της επίδρασης των φορτίων καθώς και άλλων διατάξεων του συστήματος στην ευστάθεια τάσης, ενώ γίνεται εκτενέστερη αναφορά στους παράγοντες που επηρεάζουν την αποκοπή φορτίου. Στην [MEC04] εξετάζεται με τη βοήθεια προσομοιώσεων, η επίδραση της διαφορετικής σύνθεσης του φορτίου στην αποτελεσματικότητα του σχήματος αποκοπής που σχεδιάστηκε για το συγκεκριμένο σύστημα.

Στην εργασία [DDF97] επιτελείται μια διαδικασία βελτίωσης (tuning) του σχήματος αποκοπής φορτίου, που σχεδιάστηκε για την αντιμετώπιση προβλημάτων χαμηλών τάσεων στο συγκεκριμένο σύστημα

ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυναμική ανάλυση πραγματοποιείται με τη χρήση ενός εργαλείου προσομοίωσης [SBD89], με το οποίο εκτός των άλλων μελετάται η εξάρτηση της ποσότητας του απορριπτόμενου φορτίου από την καθυστέρηση εφαρμογής του μέτρου της αποκοπής. Η ανάλυση αυτή γίνεται για διαφορετικές συνθέσεις φορτίου του συστήματος, που προέκυψαν από εκτίμηση των παραμέτρων φορτίου που καταγράφηκαν σε πραγματικά περιστατικά αστάθειας του συστήματος.

Ο συνδυασμός βέλτιστης ροής ισχύος και προσομοίωσης προτείνεται στην [PMS98]. Αρχικά, από την ανάλυση ιδιοτιμών που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης προσδιορίζεται το σημείο αστάθειας του συστήματος. Στη συνέχεια, από την επίλυση της βέλτιστης ροής ισχύος με τη μέθοδο του εσωτερικού σημείου, καθορίζεται η ελάχιστη αποκοπή φορτίου και η βέλτιστη τοποθεσία εφαρμογής της. Η αποτελεσματικότητα της αποκοπής φορτίου ελέγχεται με προσομοίωση του συστήματος.

Στην εργασία [AAH97] τίθενται κριτήρια εφαρμογής της αποκοπής φορτίου, τα οποία εισάγουν την έννοια της έλξης του σημείου λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος προς το ευσταθές σημείο ισορροπίας. Η επίδραση της δυναμικής φύσης των φορτίων στην προηγούμενη μεθοδολογία αποκοπής παρουσιάζεται στη δημοσίευση [AAH98] των ίδιων συγγραφέων. Στην [BPA98a] το «αυστηρό» κριτήριο εφαρμογής της αποκοπής φορτίου που προτάθηκε στην [AAH97] επεκτείνεται, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε συνθήκες πραγματικού χρόνου. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, οι παράμετροι φορτίου του συστήματος, που στις προηγούμενες εργασίες θεωρούνται εκ των προτέρων γνωστές, προκύπτουν μετά από εκτίμηση σε πραγματικό χρόνο.

Πιο ενδελεχής μελέτη της συσχέτισης της έλξης προς το ευσταθές σημείο ισορροπίας με την ελάχιστη ποσότητα αποκοπής φορτίου σε μικρά υβριδικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στις εργασίες [VS04,LJA05]. Το πρόβλημα της έλξης υπονοείται στην εργασία [VC00b], όπου τονίζεται η σπουδαιότητα της σωστής επιλογής του χρόνου εφαρμογής της αποκοπής φορτίου και γενικότερα οποιουδήποτε αντίστοιχου μέτρου ελέγχου εκτάκτου ανάγκης στην αποτελεσματικότητα της προστασίας από αστάθεια τάσης. Μία εφαρμογή αποκοπής φορτίου και αντιστάθμισης αέργου ισχύος σε πραγματικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας επιβεβαιώνει το παραπάνω γεγονός.

Στην εργασία [MVC99] προτείνεται η χρήση της οιονεί στατικής προσομοίωσης σε συνδυασμό με την ανάλυση ευαισθησίας για τον προσδιορισμό της βέλτιστης θέσης και ποσότητας αποκοπής φορτίου. Στην [MLV00] οι ίδιοι συγγραφείς εισάγουν το πρόβλημα σχεδίασης σχημάτων προστασίας συστήματος με εφαρμογή μεθόδων συνδυαστικής βελτιστοποίησης και συγκεκριμένα γενετικών αλγορίθμων. Η μέθοδος συνδυαστικής βελτιστοποίησης Branch-and-Bound [MLV01,VCM02,Moo03] αποδείχθηκε πιο αποτελεσματική για το σχεδιασμό σχημάτων αποκοπής φορτίου σε πραγματικά ηλεκτρικά συστήματα. Πράγματι, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για τη σχεδίαση του σχήματος αποκοπής φορτίου λόγω χαμηλών τάσεων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της εταιρείας Hydro-Quebec στον Καναδά [LMV03,LBV04].

Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί αρκετά δείκτες για την πρόβλεψη της αστάθειας τάσης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας [OD91,BP92,LSA92,GMK92,CdS96]. Οι περισσότεροι από αυτούς απαιτούν για τον υπολογισμό τους, την ανάλυση τουλάχιστον του Ιακωβιανού πίνακα κατάστασης της κλασικής ροής ισχύος, δηλαδή ένα μοντέλο πραγματικού χρόνου του συστήματος. Στις [VBN99,VG02] προτείνεται ως κριτήριο αστάθειας τάσης, η εξίσωση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης Thevenin του δικτύου που βλέπει ένας ζυγός του συστήματος, με τη φαινόμενη αντίσταση του φορτίου που τροφοδοτεί ο ίδιος ζυγός. Η παραπάνω συνθήκη αποτελεί ένδειξη αστάθειας τάσης στον ασθενέστερο κόμβο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [VCV98]. Η αντίσταση του φορτίου μπορεί να υπολογιστεί από κατάλληλους ηλεκτρονόμους με τοπικές μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος, ενώ η ισοδύναμη αντίσταση Thevenin μπορεί να εκτιμηθεί από τη μεταβολή των παραμέτρων κατάστασης του συστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών στιγμιοτύπων. Ωστόσο, η εκτίμηση της ισοδύναμης αντίστασης Thevenin μπορεί να αποδειχθεί αναξιόπιστη, εάν δεν συμβεί σημαντική μεταβολή ή συμβεί απότομη μεταβολή των παραμέτρων κατάστασης μεταξύ των δύο στιγμιοτύπων.

Η εφαρμογή του προαναφερόμενου κριτηρίου στην υλοποίηση μίας στρατηγικής βέλτιστης αποκοπής φορτίου σε ένα σύστημα με δυναμικά φορτία εξετάζεται στην [BPA98b]. Στην ίδια εργασία μελετάται το πρόβλημα της έλξης προς το ευσταθές σημείο ισορροπίας. Η εφαρμογή της ίδιας μεθόδου σε ένα σχήμα προστασίας συστήματος ευρείας περιοχής σε πραγματικό χρόνο με χρήση διατάξεων συγχρονισμένης μέτρησης φασιθετών (PMU) εξετάζεται στην εργασία [MB03].

Στην εργασία [ΚΝΙ04] προτείνεται η χρήση των PMU στην εκτίμηση ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο. Διατάξεις PMU μεταδίδουν τους συγχρονισμένους φασιθέτες τάσης και ρεύματος σε ένα κέντρο ελέγχου, όπου πραγματοποιείται η εκτίμηση της ασφάλειας τάσης του συστήματος με τη χρήση δέντρων αποφάσεων. Η αρχιτεκτονική του δέντρου αποφάσεων βασίζεται σε δεδομένα ευρείας περιοχής, που παράγονται από προγράμματα ροής ισχύος με τη μέθοδο της συνέχειας. Οι διαφορές των γωνιών των τάσεων και οι ροές αέργου ισχύος στις γραμμές μεταφοράς αποδείχθηκαν τα πιο αποδοτικά δεδομένα για τη λήψη σε πραγματικό χρόνο αποφάσεων ελέγχου, όπως η αποκοπή φορτίου. Ο προσδιορισμός κανόνων αποκοπής φορτίου με χρήση δέντρων αποφάσεων, στα πλαίσια μίας γενικότερης εκτίμησης της δυναμικής ασφάλειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζεται στην [VGH06].

Ένα σχήμα αποκοπής φορτίου στην κατεύθυνση του προληπτικού ελέγχου προτείνεται στην εργασία [ΚΝV05], όπου με βάση την πληροφορία που παρέχεται από το διάνυσμα των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης ως προς τις παραμέτρους φορτίου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του συστήματος, επιτυγχάνεται ταυτόχρονα ο προσδιορισμός της ελάχιστης αποκοπής φορτίου και η ιεράρχηση των βέλτιστων ζυγών. Στην [CVC05] προτείνεται ο υπολογισμός του διανύσματος ευαισθησιών της τάσης ως προς τις παραμέτρους φορτίου για την ιεράρχηση των πιο αποδοτικών ζυγών για αποκοπή φορτίου. Η πληροφορία που παρέχει η ευαισθησία της τάσης μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας του συστήματος, όσο και σε συνθήκες αστάθειας τάσης. Η πληροφορία από τον υπολογισμό της ευαισθησίας της τάσης, χρησιμοποιήθηκε στη σχεδίαση του σχήματος αποκοπής φορτίου που παρουσιάζεται στην εργασία [Vou06].

Στην εργασία [PLG97] εξετάζεται η συνδυασμένη εφαρμογή της αποκοπής φορτίου και της δευτερεύουσας ρύθμισης τάσης στον έλεγχο εκτάκτου ανάγκης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα προτείνονται δύο στρατηγικές ελέγχου: η σύνθετη, που εφαρμόζει ταυτόχρονα τα δύο μέτρα και η ακολουθιακή, όπου η αποκοπή φορτίου εφαρμόζεται μετά τη δευτερεύουσα ρύθμιση τάσης. Η βελτιστοποίηση του ελέγχου επιτυγχάνεται με αλγορίθμους γραμμικής βελτιστοποίησης σε πραγματικό χρόνο. Με την εφαρμογή δυναμικών προσομοιώσεων μελετώνται τέσσερα διαφορετικά σενάρια: εφαρμογή μόνο της αποκοπής φορτίου (σε τοπικό ή συστημικό επίπεδο) και συνδυασμός της με τη δευτερεύουσα ρύθμιση τάσης.

Η αποκοπή φορτίου στο επίπεδο των τελικών καταναλωτών της διανομής (καταναλωτές XT) εξετάζεται στην [CDM05]. Η εντολή θα δίνεται αυτόματα από το κέντρο ελέγχου της διανομής μέσω καινοτόμων μετρητικών διατάξεων, που σε κανονικές συνθήκες του συστήματος θα υλοποιούν ένα πρόγραμμα διαχείρισης ζήτησης (demand side management). Η απόφαση της αποκοπής φορτίου θα παίρνεται από το διαχειριστή του συστήματος, ο οποίος και θα καθορίζει την ποσότητα αποκοπής. Οι καταναλωτές που θα συμμετέχουν στο πρόγραμμα θα τυχαίνουν ευνοϊκής μεταχείρισης σε περιόδους χαμηλού φορτίου, με σημαντικές οικονομικές ελαφρύνσεις.

Η αξιολόγηση από πλευράς κόστους του μέτρου της αποκοπής φορτίου σε σχέση με αυτό της ανακατανομής της παραγωγής, για την ενίσχυση της ασφάλειας τάσης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε συνθήκες απορυθμισμένης αγοράς, εξετάζεται στην [Vou01]. Φαίνεται ότι η αποκοπή φορτίου μπορεί υπό προϋποθέσεις να αποδειχθεί οικονομική λύση στο ανταγωνιστικό περιβάλλον της αγοράς ενέργειας. Στο σενάριο που εξετάζεται, η αποκοπή φορτίου επιτυγχάνει την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος με μειωμένο κόστος, σε σχέση με αυτό που προκύπτει από την ανακατανομή της παραγωγής μία μονάδας. Το τελευταίο καθορίζεται από τη μεταβολή της παραγωγής της γεννήτριας σε σχέση με την αρχική προσφορά του σταθμού στο χρηματιστήριο ενέργειας.

Μία υβριδική (στατική-δυναμική) μέθοδος βελτιστοποίησης της αποκοπής φορτίου σε συνθήκες προληπτικού ή διορθωτικού ελέγχου προτείνεται στην [CC03]. Η μέθοδος τροποποιεί το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να λαμβάνει υπόψη τη δυναμική φύση του ελέγχου ασφάλειας και να παρέχει κανόνες σχετικούς με το χρόνο, την τοποθεσία και την ποσότητα της αποκοπής φορτίου. Σε εφαρμογές προληπτικού ελέγχου, λαμβάνονται υπόψη πολλαπλές ενδεχόμενες διαταραχές και εξάγονται ταυτόχρονα οι βέλτιστοι δράσεις ελέγχου για όλες τις διαταραχές. Ο διορθωτικός έλεγχος ανάγεται σε ένα πρόβλημα γραμμικής βελτιστοποίησης, που επιτρέπει τον προσδιορισμό των βέλτιστων ενεργειών ελέγχου για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή σε πραγματικό χρόνο. Στατιστικές μέθοδοι ενσωματώνονται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, επισπεύδοντας τη διαδικασία επίλυσης.

1.11.2 Έλεγχος Εκτάκτου Ανάγκης Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο

Τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης μπορούν να αποτελέσουν βασικό μηχανισμό αστάθειας τάσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας [OYS91, Tay94, VCV98, ZTL00]. Η βιβλιογραφία που αναφέρεται στον έλεγχο εκτάκτου ανάγκης του ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης είναι περιορισμένη. Μία συνολική θεώρηση της συμβολής των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στον προληπτικό έλεγχο και έλεγχο εκτάκτου ανάγκης παρουσιάζεται στις εργασίες [Vou02, VK04]. Ο έλεγχος εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ μπορεί να υλοποιηθεί με τους εξής τρόπους [IWG96]:

α) *Απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ.* Με τον τρόπο αυτό σταματά η διαδικασία επαναφοράς της τάσης (άρα και του εξαρτώμενου από την τάση φορτίου) στους ζυγούς διανομής. Συνέπεια του μέτρου αυτού είναι να χειροτερεύει η ποιότητα της τάσης στην κατανάλωση, αφού είναι πλέον πιο ευαίσθητη στις διακυμάνσεις της τάσης στο σύστημα μεταφοράς, ωστόσο αυτό γίνεται προς όφελος του συνολικού συστήματος.

Η εφαρμογή του μέτρου της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε συνθήκες χαμηλών τάσεων, ως μέτρο αντιμετώπισης της εξελισσόμενης αστάθειας τάσης, εξετάζεται στις αναφορές [IWG90, VC93, VCV98]. Στην εργασία [PHH96] μελετάται η αλληλεπίδραση της δυναμικής αυτορρύθμισης του φορτίου με τη δυναμική του ΣΑΤΥΦ σε ένα μικρό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Από τον προσδιορισμό της περιοχής έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας, εξάγονται κριτήρια για τη σχεδίαση του μέτρου της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ, όπως η βέλτιστη επιλογή του χρόνου και η κρίσιμη θέση απενεργοποίησης της λήψης. Το πρόβλημα της περιοχής έλξης σε ανάλογα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μελετάται στις [LPH98, DH02] για τον προσδιορισμό των κριτηρίων τοπικής και ολικής ευστάθειας του οριακού κύκλου που μπορεί να εμφανιστεί σε τέτοια υβριδικά δυναμικά συστήματα.

Με τη βοήθεια ενός τεχνητού σεναρίου προσομοίωσης, προσδιορίζεται στην εργασία [VC95] η βέλτιστη αποκοπή φορτίου που μπορεί να επιτευχθεί με εφαρμογή του μέτρου της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε ένα σενάριο αστάθειας τάσης. Η βέλτιστη αποκοπή αναφέρεται σε όρους ελάχιστης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας εξαιτίας της εφαρμογής του μέτρου και ελάχιστου αριθμού ΣΑΤΥΦ που συμμετέχουν σε αυτό και επιβεβαιώνεται από την προσομοίωση του ίδιου σεναρίου σε πραγματικές συνθήκες. Η ελάχιστη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια που προσδιορίστηκε με την παραπάνω μέθοδο, αποτελεί την ποσότητα φορτίου που πρέπει να απορριφθεί άμεσα στο ίδιο σενάριο αστάθειας, συμπληρωματικά ως προς το μέτρο της απενεργοποίησης της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ, για την αποκατάσταση των τάσεων του συστήματος.

Στην εργασία [VM99] αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στο Ελληνικό σύστημα ένας αλγόριθμος κεντρικού ελέγχου για τον εντοπισμό των ΣΑΤΥΦ, των οποίων η απενεργοποίηση επαρκεί για τη σταθεροποίηση ενός ασταθούς σημείου. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την πληροφορία από τον υπολογισμό του πίνακα ευαισθησιών της τάσης των ελεγχόμενων ζυγών ως προς το λόγο μετασχηματισμού οποιουδήποτε ΣΑΤΥΦ του συστήματος. Τα αποτελέσματα της εργασίας αναδεικνύουν τη δυσκολία προσδιορισμού των ΣΑΤΥΦ, στα οποία θα πρέπει να εφαρμοστούν οι δράσεις ελέγχου, με βάση μόνο τη γεωγραφική τους θέση ή τοπικές μετρήσεις της τάσης.

Στην [IZ03b] ο προσδιορισμός των ΣΑΤΥΦ στα οποία εφαρμόζεται η απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής λήψης, προκύπτει από τον υπολογισμό του καθέτου διανύσματος με τη μέθοδο της συνεχόμενης ροής ισχύος. Επιλέγοντας ως παράμετρο συνέχειας τη μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού των ΣΑΤΥΦ, το κάθετο διάνυσμα παρέχει την ευαισθησία των μεταβλητών κατάστασης ως προς τη μεταβολή του λόγου αυτού. Ο χρόνος εφαρμογής του μέτρου προσδιορίζεται από τη στιγμή που η παραπάνω ευαισθησία αλλάζει πρόσημο.

Στην [YFS98] προτείνεται η απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης ως μέτρο αποφυγής της αστάθειας τάσης που μπορεί να προκληθεί σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας από την ταυτόχρονη λειτουργία ΣΑΤΥΦ σε διαδοχικά επίπεδα τάσης. Η αναγνώριση της αστάθειας επιτυγχάνεται μέσω ενός δείκτη, ο οποίος υπολογίζεται με τη βοήθεια του Θεωρήματος Lyapunov και του πίνακα ευαισθησιών της τάσης ως προς το λόγο μετασχηματισμού των ΣΑΤΥΦ. Η αρχική ιδέα υπολογισμού του δείκτη αυτού, ο οποίος υποδεικνύει την ασταθή δράση των ΣΑΤΥΦ, παρουσιάζεται στην [YDK97].

Στην [Laf00] παρουσιάζεται μια μέθοδος προσδιορισμού των βέλτιστων μεταξύ των διαθέσιμων μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης. Οι βέλτιστες ενέργειες προσδιορίζονται από την επίλυση ενός προβλήματος συνδυαστικής βελτιστοποίησης, εφαρμόζοντας τεχνικές προβλεπτικού ελέγχου και δέντρων αναζήτησης. Ο αλγόριθμος ενσωματώθηκε σε ένα κεντρικό σχήμα προστασίας συστήματος για τον προσδιορισμό των αποτελεσματικότερων μέτρων μεταξύ της αποκοπής φορτίου, του ελέγχου ΣΑΤΥΦ (προσδιορισμού της βέλτιστης μεταβολής του λόγου μετασχηματισμού και εφαρμογής της απενεργοποίησης της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ) και της ζεύξης πυκνωτών. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή σε ένα δοκιμαστικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και σύγκριση του κεντρικού σχήματος με άλλα τοπικά σχήματα προστασίας συστήματος παρουσιάζονται στην [LHO02]. Στην [LK03], επαναλαμβάνεται η εφαρμογή συνυπολογίζοντας στα προαναφερόμενα μέτρα ελέγχου και τη μεταβολή της τερματικής τάσης των γεννητριών.

β) *Μείωση της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ*. Με το μέτρο αυτό όχι μόνο κρατείται η τάση στους ζυγούς διανομής σε χαμηλά επίπεδα, αλλά είναι και λιγότερο ευαίσθητη στις διάφορες διακυμάνσεις της τάσης του συστήματος μεταφοράς. Επομένως, η ποιότητα της παρεχόμενης τάσης στον καταναλωτή είναι καλύτερη από ότι στην προηγούμενη περίπτωση. Μάλιστα το μέτρο αυτό είναι το μόνο από τα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ που μπορεί υπό προϋποθέσεις να αποκαταστήσει μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Η εφαρμογή του μέτρου της μείωσης της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ για τη σταθεροποίηση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μετά από την εμφάνιση μιας ασταθούς διαταραχής παρουσιάζεται στην εργασία [VCJ94]. Η ποσοτικοποίηση της μείωσης της τάσης αναφοράς σε όρους ενεργού και αέργου ισχύος, επιτρέπει τον προσδιορισμό των ΣΑΤΥΦ εκείνων που είναι τα πιο αποδοτικά για την εφαρμογή του μέτρου, όπως και εκείνων στα οποία η εφαρμογή του μέτρου δεν επιφέρει καμία μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος.

γ) *Αντιστροφή της λογικής ελέγχου του ΣΑΤΥΦ*. Το μέτρο μεταφέρει τον έλεγχο του ΣΑΤΥΦ στην πλευρά της μεταφοράς, συμβάλλοντας έτσι στην ενίσχυση των τάσεων του συστήματος μεταφοράς εις βάρος του φορτίου. Η ποιότητα της τάσης στην κατανάλωση χειροτερεύει, όμως η τάση στη μεταφορά σταθεροποιείται μέχρι την εξάντληση του εύρους μεταβολής του λόγου μετασχηματισμού.

Η εφαρμογή του μέτρου της αντιστροφής της λογικής ελέγχου του ΣΑΤΥΦ σε ένα μικρό ακτινικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, με μία γεννήτρια που τροφοδοτεί ένα φορτίο με δυναμική αυτορρύθμισης της ισχύος, ερευνάται στην εργασία [VK03] και γίνεται σύγκριση με την εφαρμογή του μέτρου της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης στο ίδιο σενάριο αστάθειας. Ακολουθεί εφαρμογή του μέτρου της αντιστροφής της λογικής ελέγχου του ΣΑΤΥΦ στο Ελληνικό σύστημα και γίνεται σύγκριση με άλλα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης (έλεγχος ροής ισχύος του συνδέσμου συνεχούς ρεύματος του συστήματος, ζεύξη χωρητικού φίλτρου στον ίδιο σταθμό HVDC, ταχεία ανάληψη φορτίου από μονάδα στην κρίσιμη περιοχή).

Στην εργασία [VCO03] προτείνεται ένα κεντρικό σχήμα εφαρμογής του μέτρου σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που διαθέτουν ΣΑΤΥΦ σε διαφορετικά επίπεδα τάσης. Τα ΣΑΤΥΦ χωρίζονται σε ομάδες (clusters) και σε κάθε ομάδα επιλέγεται ένας αντιπροσωπευτικός ζυγός (πλότος). Η εντολή για εφαρμογή του μέτρου στα ΣΑΤΥΦ μίας ομάδας δίνεται, εφόσον ικανοποιηθεί το κριτήριο της τάσης στον πλότο ζυγό. Από την προσομοίωση της εφαρμογής του σχήματος προστασίας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας RTE της Γαλλίας, διαφαίνεται η ανάγκη βελτίωσης (tuning) διαφόρων παραμέτρων (παράμετροι φορτίου, ρυθμίσεις ηλεκτρονόμων τάσης, ρυθμίσεις δευτερεύουσας ρύθμισης τάσης) κατά τη σχεδίαση τέτοιων σχημάτων.

δ) *Κλειδώμα της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη λήψη*. Το μέτρο κλειδώματος της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση, αποσκοπεί και αυτό στην ενίσχυση των τάσεων της μεταφοράς με μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος στα φορτία. Σε αντίθεση όμως με το μέτρο της αντιστροφής της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ, το οποίο ρυθμίζει συνεχώς την τάση στη μεταφορά, αυτό γίνεται με τη λογική του ανοιχτού βρόχου, μη επιτυγχάνοντας έτσι τη σταθεροποίηση της τάσης στην πλευρά της μεταφοράς.

Η εφαρμογή του μέτρου κλειδώματος της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση σε ένα μικρό ηλεκτρικό σύστημα παρουσιάζεται στην εργασία [VMK04]. Στην ίδια εργασία γίνεται σύγκριση όλων των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ, καθώς και σύγκριση με το μέτρο της αποκοπής

φορτίου. Από την ανάλυση προκύπτουν συμπεράσματα για το πώς θα μπορούσαν τα μέτρα αυτά να συνδυαστούν σε ένα ενιαίο σχήμα προστασίας για την αντιμετώπιση καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης.

Στην εργασία [CCM96] παρουσιάζεται μία συγκεκριμένη στρατηγική συνδυασμένης εφαρμογής μέτρων ελέγχου ΣΑΤΥΦ, ανάλογα με την κατάσταση ασφάλειας στην οποία βρίσκεται το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν το σύστημα βρίσκεται σε ασφαλή κανονική κατάσταση, τα ΣΑΤΥΦ παραμένουν σε κανονική λειτουργία και ρυθμίζουν την τάση σε μία τιμή αναφοράς που ελαχιστοποιεί τις απώλειες ενεργού ισχύος στο σύστημα της υπομεταφοράς. Όταν το σύστημα βρίσκεται σε ανασφαλή κανονική κατάσταση, πραγματοποιείται μείωση της τάσης αναφοράς στα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών ΥΤ/ΜΤ και αύξηση της τάσης αναφοράς στα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών ΥΥΤ/ΥΤ, με σκοπό τη μείωση των απωλειών αέργου ισχύος και τη βέλτιστη εκμετάλλευση των εγκάρσιων διατάξεων αέργου αντιστάθμισης στο δίκτυο υπομεταφοράς. Σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης, ο μηχανισμός αλλαγής λήψης στα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών ΥΤ/ΜΤ απενεργοποιείται, ενώ η λήψη στα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών ΥΥΤ/ΥΤ κλειδώνεται στο μικρότερο δυνατό λόγο μετασχηματισμού.

Στην εργασία [SML00] παρουσιάζεται ένας διαφορετικός τρόπος ελέγχου του ΣΑΤΥΦ ενός μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης, στην περίπτωση που αυτός ρυθμίζει την τάση ενός ζυγού ο οποίος ελέγχεται επιπλέον από μία διάταξη SVC. Η μέθοδος διαφέρει εξ' ολοκλήρου από αυτές που περιγράφηκαν προηγουμένως, καθώς αντί να ρυθμίζεται η λήψη του μετασχηματιστή, ελέγχεται κατάλληλα η χρονική καθυστέρηση της αλλαγής της λήψης. Σκοπός αυτής της μεθόδου ελέγχου είναι ο συντονισμός των δράσεων των δύο δυναμικών διατάξεων (ΣΑΤΥΦ και SVC), ώστε σε συνθήκες εκτάκτου ανάγκης να επιτευχθεί βέλτιστη εκμετάλλευση της ικανότητας παραγωγής αέργου ισχύος από το SVC.

1.11.3 Σχήματα Προστασίας Συστήματος από Αστάθεια Τάσης με Αποκοπή Φορτίου ή Έλεγχο Εκτάκτου Ανάγκης Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο

Οι βασικές κατευθυντήριες γραμμές για τη σχεδίαση της προστασίας συστήματος δίνονται συνοπτικά στην [Lac03]. Η συνολική θεώρηση ενός σχήματος προστασίας συστήματος πραγματοποιείται στην αναφορά [CTF01], όπου αναλύονται λεπτομερώς όλα τα στάδια ανάπτυξης τέτοιων σχημάτων, από τη σχεδίαση μέχρι την υλοποίηση και την εφαρμογή τους. Στην ίδια εργασία γίνεται καταγραφή των σημαντικότερων σχημάτων προστασίας που υφίστανται σε λειτουργία σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αναγκαιότητα ανάπτυξης σχημάτων προστασίας συστήματος τονίζεται στην [GTS04]. Στην εργασία αυτή περιγράφονται οι κυριότερες αιτίες που μπορεί να προκαλέσουν αστάθεια σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και προτείνονται τα καταλληλότερα μέτρα αντιμετώπισης (τοπικά ή ευρείας περιοχής) των αιτιών αυτών. Ενδεικτικά, περιγράφονται περιστατικά αστάθειας που συνέβησαν σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και σχήματα προστασίας που υλοποιήθηκαν για την αντιμετώπιση ανάλογων φαινομένων.

Ιδιαίτερη αναφορά στην προστασία συστήματος ευρείας περιοχής γίνεται στην [MNA04], ενώ αναλυτική περιγραφή της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση τέτοιων σχημάτων σήμερα και στο μέλλον γίνεται στην [AAB06]. Στην εργασία [KBG04] δίνεται έμφαση στη μελλοντική τάση ανάπτυξης σχημάτων προστασίας ευρείας περιοχής με χρήση προηγμένων τεχνολογιών, όπως για παράδειγμα η συγχρονισμένη μέτρηση φασιθετών με χρήση διατάξεων PMU. Εκτενής βιβλιογραφική έρευνα γύρω από την προστασία ευρείας περιοχής συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, με πλήρη αναφορά σε εφαρμογές με χρήση τόσο συμβατικών όσο και προηγμένων τεχνολογιών πραγματοποιείται στην [XWC06].

Στην εργασία [DKH00] οι συγγραφείς συσχετίζουν την ανάγκη εξέλιξης της προσαρμοστικής προστασίας (adaptive protection) ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με την προστασία ευρείας περιοχής. Οι προϋποθέσεις για τη σωστή σχεδίαση σχημάτων προστασίας ευρείας περιοχής που τίθενται στην εργασία αποτελούν μέχρι και σήμερα πεδίο έρευνας, αν και προσανατολίζονται αποκλειστικά σε σχήματα με κεντρική λογική.

Η σύγκριση της υλοποίησης σχημάτων προστασίας ευρείας περιοχής και έργων ενίσχυσης για τον προσδιορισμό της πιο συμφέρουσας επένδυσης για τη βελτίωση της ασφάλειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται στην [ZKA03]. Η αξιολόγηση των επενδύσεων λαμβάνει υπόψη τα χρηματικά κόστη και οφέλη που προκύπτουν από τη λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής

ενέργειας, συνυπολογίζοντας στα παραπάνω την οικονομική επίδραση από την αποσυμφόρηση του συστήματος μεταφοράς που συνεπάγεται μία τέτοια επένδυση και άλλα τεχνικοοικονομικά οφέλη. Στην [FZM02] το όφελος από τη λειτουργία ενός σχήματος προστασίας συστήματος εξετάζεται υπό το πρίσμα της ανάλυσης αξιοπιστίας. Η ανάλυση αξιοπιστίας δίνει τη δυνατότητα στους χειριστές ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να αποφασίσουν τις λιγότερο επικίνδυνες σε όρους ασφάλειας και κόστους ενέργειες ελέγχου, όπως για παράδειγμα την όπλιση ή όχι ενός σχήματος προστασίας συστήματος.

Στην [RB01] προτείνεται η συγχρονισμένη μέτρηση φασιθετών για την ακριβέστερη εκτίμηση της ασφάλειας τάσης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στα πλαίσια ενός αλγορίθμου προστασίας ευρείας περιοχής πραγματικού χρόνου. Εφόσον συμβεί κάποια σοβαρή διαταραχή στο σύστημα, ο αλγόριθμος του σχήματος προστασίας ξεκινά τη διαδικασία πρόβλεψης της κατάστασης του συστήματος για το επόμενο χρονικό διάστημα που ορίζεται από τον κύκλο εκτέλεσης της εκτίμησης, με βάση τις μετρήσεις που ελήφθησαν περιοδικά από τα PMU σε προηγούμενους κύκλους. Για την προβλεπόμενη κατάσταση του συστήματος υπολογίζεται με τη μέθοδο της συνέχειας το περιθώριο ισχύος του συστήματος. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε διαδοχικά χρονικά διαστήματα μέχρι τη σταθεροποίηση του συστήματος ή την κατάρρευσή του. Το πλεονέκτημα του σχήματος έγκειται στο ότι επιτρέπει σε πραγματικό χρόνο την κάπως ακριβέστερη εκτίμηση της ασφάλειας τάσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στους χειριστές να λάβουν γρηγορότερα τα κατάλληλα μέτρα.

Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή των σχημάτων προστασίας από αστάθειας τάσης με εφαρμογή αποκοπής φορτίου ή ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ που συναντώνται σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι σε αρκετές εργασίες αναφέρεται η εφαρμογή μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ (απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης, μείωση της τάσης αναφοράς κλπ.) για την αντιμετώπιση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, χωρίς όμως να υπάρχουν συγκεκριμένες αναφορές που να δημοσιεύουν λεπτομερή στοιχεία για αυτά τα μέτρα προστασίας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας της Ιταλίας και του Τόκιο (TEPCO).

Από το 1997 η ηλεκτρική εταιρεία Hydro-Quebec στον Καναδά έθεσε σε λειτουργία ένα σχήμα προστασίας συστήματος με την ονομασία MAIS, για τον έλεγχο των τάσεων του συστήματος μετά από την εμφάνιση οποιασδήποτε κρίσιμης διαταραχής από μία λίστα επιλεγμένων N-1 διαταραχών [BTS96,TBS99]. Το σχήμα προχωρά αυτόματα στην απόζευξη εγκάρσιων πηνίων αντιστάθμισης για την αντιμετώπιση των υποτάσεων που εμφανίζονται μετά τη διαταραχή. Εξαιτίας της έντονα χωρητικής συμπεριφοράς του συστήματος μεταφοράς, οι ελεγκτές του σχήματος προστασίας έχουν επιπλέον τη δυνατότητα να προχωρούν στη ζεύξη εγκάρσιων πηνίων αντιστάθμισης για την αντιμετώπιση πιθανών υπερτάσεων. Επιπροσθέτως, υπάρχει πρόβλεψη γρήγορης απόκρισης για την αντιμετώπιση φαινομένων μεταβατικής ευστάθειας. Η λογική του σχήματος είναι αποκεντρωμένη, η λήψη της απόφασης βασίζεται σε κανόνες και η δράση επαναλαμβάνεται όσες φορές αυτό απαιτείται, συνιστώντας κατά αυτόν τον τρόπο ένα σχήμα προστασίας κλειστού βρόχου. Για την ακρίβεια, κάθε ελεγκτής παρακολουθεί ένα συγκεκριμένο μέγεθος (π.χ. τάση ή άεργο ισχύ) και δρα σε καθορισμένη ομάδα πηνίων, εφόσον και όποτε ικανοποιείται το κριτήριο που ορίζει ο κανόνας.

Αργότερα, η ίδια εταιρεία έθεσε σε εφαρμογή ένα σχήμα αποκοπής φορτίου για την αντιμετώπιση φαινομένων αστάθειας τάσης που προκαλούνται από πιο σοβαρές διαταραχές (N-2 ή δυσμενέστερες), με την ονομασία TDST [LMV03,LBV04]. Το σχήμα παρακολουθεί τη μέση τιμή των τάσεων πέντε χαρακτηριστικών ζυγών του συστήματος, καθώς και το ρυθμό μεταβολής αυτής της μέτρησης, και προχωρεί σε αποκοπή φορτίου με βάση απλούς κανόνες: Αν η μετρούμενη τάση πέσει για καθορισμένο χρονικό διάστημα κάτω από το στάδιο υποτάσεως που ορίζουν οι κανόνες, αποκόπτεται προκαθορισμένη ποσότητα φορτίου από συγκεκριμένους ζυγούς του συστήματος. Η αποκοπή φορτίου με βάση τους κανόνες μπορεί να γίνει μία μόνο φορά, όμως υπό συνθήκη επιτρέπονται επαναληπτικές αποκοπές φορτίου, προσαρμοσμένες στο μέγεθος της διαταραχής. Οι ρυθμίσεις των σταδίων υποτάσεως, των χρονικών καθυστερήσεων, των ποσοτήτων αποκοπής φορτίου και των ελεγκτών του σχήματος βελτιστοποιήθηκαν, ακολουθώντας μεθόδους συνδυαστικής βελτιστοποίησης και προσομοίωσης.

Μετά την εμφάνιση ενός σημαντικού περιστατικού αστάθειας τάσης στη Γαλλία το 1987, η εταιρεία EDF υιοθέτησε ένα κεντρικό σχήμα προστασίας συστήματος, αποκρινόμενο σε κανόνες, για την εφαρμογή της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε συνθήκες εξέλιξης μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης [CTF01]. Το δίκτυο διαχωρίστηκε σε ζώνες, ονομαζόμενες ως ΖΑΒ, στις οποίες ένας κεντρικός ελεγκτής παρακολουθεί την τάση ενός αντιπροσωπευτικού (πιλότου) ζυγού. Όταν η τάση ενός πιλότου ζυγού παραμένει για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα κάτω από μία προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου, ο ελεγκτής δίνει εντολή απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης στα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών ΥΥΤ/ΥΤ της ζώνης, στην οποία ανήκει ο πιλότος. Εναλλακτικά, υπάρχει η δυνατότητα χειροκίνητης εφαρμογής του μέτρου μείωσης της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ και της αποκοπής φορτίου.

Στο κεντρικό τμήμα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Σουηδίας συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης της χώρας, με αποτέλεσμα η περιοχή αυτή να είναι ευάλωτη για την εμφάνιση αστάθειας τάσης μετά από μία σοβαρή διαταραχή. Για την αύξηση σε συνθήκες ασφάλειας τάσης του ορίου μεταφερόμενης ισχύος από το βόρειο προς το κεντρικό τμήμα του συστήματος, σχεδιάστηκε ένα σχήμα προστασίας συστήματος [ILK96]. Διάφορα σήματα, όπως το χαμηλό επίπεδο της τάσης, η αυξημένη παραγωγή αέργου ισχύος ή η ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης των γεννητριών, συλλέγονται κεντρικά μέσω του συστήματος SCADA από τον ελεγκτή του σχήματος προστασίας. Μετά από την επεξεργασία της πληροφορίας, ο ελεγκτής έχει τη δυνατότητα να αποφασίσει στη βάση απλών κανόνων μεταξύ αρκετών διαθέσιμων μέτρων προστασίας: ζεύξη-απόζευξη πυκνωτών - πηνίων αντιστάθμισης, ταχεία εκκίνηση αεριοστροβίλων, εισαγωγή ισχύος από γειτονικές χώρες και ως ύστατο μέτρο την απόρριψη φορτίου. Η αποκοπή φορτίου πραγματοποιείται μόνο εφόσον ικανοποιούνται παράλληλα και τοπικά κριτήρια, όπως χαμηλή τάση στον υποσταθμό.

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της κεντρικής Σαουδικής Αραβίας, που ελέγχεται από την εταιρεία SEC-CRB, εισάγει σημαντική ποσότητα ενέργειας μέσω τριών γραμμών διπλού κυκλώματος 380 kV από το γειτονικό σύστημα της ανατολικής χώρας, που ελέγχεται από την εταιρεία SEC-ERB. Με σκοπό την ενίσχυση της ασφάλειας τάσης στο ενδεχόμενο απώλειας μία ή δύο από τις τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος 380 kV της διασύνδεσης σε συνθήκες υψηλής εισαγωγής ισχύος, η SEC-CRB σχεδίασε και έθεσε σε λειτουργία ένα αυτόματο σχήμα αποκοπής φορτίου [MHC03]. Το σχήμα ενεργοποιείται εφόσον έχει προηγηθεί ο οπλισμός του από το κέντρο ελέγχου και ικανοποιούνται ταυτόχρονα τα δύο από τα τρία κριτήρια αναγνώρισης της διαταραχής, που αφορούν τόσο στην ανίχνευση του συμβάντος όσο και σε μετρήσεις τάσης. Η αποκοπή πραγματοποιείται σε δύο στάδια, ένα ακαριαίο και ένα δεύτερο με καθυστέρηση, αποσυνδέοντας καταναλωτές από προκαθορισμένους υποσταθμούς. Η ποσότητα του απορριπτόμενου φορτίου προσδιορίζεται από αναλυτικές εκφράσεις που προέκυψαν από προσομοιώσεις του συγκεκριμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορα λειτουργικά σημεία και διαφορετικά σενάρια διαταραχών.

Στη δημοσίευση [NM92] γίνεται η περιγραφή του αυτόματου σχήματος ταχείας αποκοπής (αποκαλούμενου FALS), που από πολύ νωρίς υλοποίησε η εταιρεία ηλεκτρισμού Florida Power and Light (ΗΠΑ) για την αντιμετώπιση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης που μπορεί να προκληθεί στο σύστημα από την απώλεια δύο ή περισσότερων γεννητριών. Το FALS ενεργοποιείται αυτόματα στην ανίχνευση της διπλής διαταραχής, η οποία πραγματοποιείται όταν ικανοποιηθούν ταυτόχρονα τα κριτήρια που ορίζει μία από τις στήλες ενός πίνακα διάστασης 6x6. Δυναμικές μελέτες εκείνης της περιόδου υπέδειξαν την αναγκαιότητα αποκοπής τουλάχιστον 800 MW, με αποσύνδεση ολόκληρων υποσταθμών διανομής σε διαβαθμισμένες χρονικές στιγμές. Ένα εναλλακτικό σχήμα αποκοπής (CFALS) αποκρίνεται στη ανίχνευση της απώλειας ενός διαδρόμου (corridor) του συστήματος μεταφοράς. Για κάθε υφιστάμενο διάδρομο του συστήματος ορίζονται ανάλογοι 6x6 πίνακες για την εντολοδότηση της αποκοπής.

Στην [KTS00] περιγράφεται η σχεδίαση και υλοποίηση στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που ελέγχεται από την εταιρεία Entergy (ΗΠΑ), ενός άλλου κεντρικού σχήματος ταχείας αποκοπής φορτίου σε πραγματικό χρόνο. Η λογική του σχήματος απαιτεί την ταυτόχρονη ικανοποίηση καθορισμένων συνθηκών για την εντολοδότηση της αποκοπής. Η μετάδοση όλων των απαραίτητων πληροφοριών γίνεται μέσω του συστήματος SCADA και η εντολή της αποκοπής δίνεται αυτόματα σε προκαθορισμένες ομάδες φορτίων. Το σχήμα προστασίας λειτούργησε επιτυχώς σε ένα περιστατικό αστάθειας τάσης του συγκεκριμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που ελέγχεται από την Public Service Company στο Νέο Μεξικό των ΗΠΑ, μπορεί να παρουσιάσει προβλήματα βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης στο ενδεχόμενο εμφάνισης της πιο κρίσιμης διπλής διαταραχής, εξαιτίας της έλλειψης αποθεμάτων αέργου ισχύος στην περιοχή. Ο κίνδυνος αυτός επιτείνεται, όταν το ποσοστό συμμετοχής των κινητήρων επαγωγής στην κατανάλωση είναι αυξημένο. Για τους παραπάνω λόγους σχεδιάστηκε ένα σχήμα ταχείας αποκοπής φορτίου [MEC04], το οποίο με την ανίχνευση της κρίσιμης διαταραχής και εφόσον ικανοποιούνται και ορισμένα κριτήρια μέτρησης χαμηλής τάσης, αποσυνδέει αυτόματα προκαθορισμένα φορτία (μέχρι και πλήρη αποηλέκτριση υποσταθμών διανομής) μέσω μίας διάταξης PLC. Επιπροσθέτως, το ίδιο σχήμα έχει τη δυνατότητα αποκοπής φορτίου για την αντιμετώπιση φαινομένων μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης. Στην περίπτωση αυτή, η σχεδίαση της αποκοπής γίνεται για την πιο σοβαρή διαταραχή του συστήματος και η εφαρμογή της απαιτεί χαμηλό επίπεδο τάσης σε δυο ζυγούς 115 kV. Το σχήμα λειτουργήσε επιτυχώς σε διάφορα περιστατικά αστάθειας τάσης του συγκεκριμένου συστήματος.

Η Pacific Gas & Energy (ΗΠΑ) υλοποίησε ένα αποκεντρωμένο, τοπικό σχήμα προστασίας. Η αποκοπή φορτίου εφαρμόζεται σε τρεις συγκεκριμένους υποσταθμούς, με κριτήριο αποκλειστικά την τάση στην πλευρά της μεταφοράς [WEC99]. Εφόσον η τάση αυτή παραμείνει κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι για σταθερό χρονικό διάστημα, απορρίπτεται το φορτίο που αντιστοιχεί στον υποσταθμό. Οι εταιρείες Puget Sound Energy και Bonneville Power Administration χρησιμοποιούν επίσης κοινούς ηλεκτρονόμους υποτάσεως, για την αποκοπή φορτίου από συγκεκριμένους ζυγούς και τροφοδοτικές γραμμές [WEC99]. Η αποκοπή γίνεται σε τρία στάδια, απορρίπτοντας στο καθένα το 5% της συνολικής ζήτησης του φορτίου του συστήματος.

Η BC Hydro στον Καναδά πραγματοποιεί (ταυτόχρονα ή ανεξάρτητα) αποκοπή φορτίου από προκαθορισμένα φορτία, σε δύο διαφορετικές περιοχές κατανάλωσης του συστήματος. Το σχήμα αποκοπής που σχεδιάστηκε για το σκοπό αυτό παρακολουθεί την τάση τριών αντιπροσωπευτικών ζυγών του συστήματος μεταφοράς, καθώς και τα αποθέματα αέργου ισχύος συγκεκριμένων γεννητριών [WEC99]. Οι αποκοπές πραγματοποιούνται εφόσον η τάση σε δύο από τους τρεις ζυγούς παραμείνει κάτω από τη ρύθμιση υποτάσεως για προκαθορισμένο χρονικό διάστημα και τα αποθέματα αέργου ισχύος των γεννητριών βρίσκονται κάτω από ένα προδιαγεγραμμένο όριο. Η εντολή αποκοπής αποστέλλεται από το κέντρο ελέγχου του συστήματος στο κέντρο ελέγχου της περιοχής και εφαρμόζεται σε στάδια με μειούμενη χρονική καθυστέρηση.

Ο διαχειριστής του ευρύτερου ηλεκτρικού δικτύου των δυτικών πολιτειών των ΗΠΑ (WECC), αποφάσισε να θέσει σε εφαρμογή ένα σχήμα απευθείας αποκοπής φορτίου για την περίπτωση που αποσυνδεθούν δύο γεννήτριες του πυρηνικού σταθμού στο Palo Verde της Αριζόνα [HCW05]. Η συγκεκριμένη διαταραχή προκαλεί σοβαρό πρόβλημα αστάθειας τάσης σε πολλές περιοχές των συγκεκριμένων πολιτειών και η αντιμετώπισή του θα είναι δύσκολη καθώς οι περιοχές αυτές ελέγχονται από διαφορετικές εταιρείες ηλεκτρισμού.

Σήμερα, η εταιρεία Bonneville Power Administration έχει θέσει σε λειτουργία ένα σύστημα ελέγχου του συστήματός της με χρήση συγχρονισμένων φασιθετών (WACS) [TVC00,TEW05]. Το σύστημα αυτό αποσκοπεί στη λήψη των κατάλληλων ενεργειών ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Οι συγχρονισμένες μετρήσεις συλλέγονται από μία διάταξη συλλογής φασιθετών (PDC) και αποστέλλονται στον κύριο ελεγκτή που είναι εγκατεστημένος στο κέντρο ελέγχου. Ακολουθεί η επεξεργασία των σημάτων με κατάλληλους αλγορίθμους ασαφούς λογικής, που με βάση την πληροφορία της τάσης στο σύστημα της μεταφοράς και την παραγόμενη άεργο ισχύ από τις γεννήτριες, αποφασίζουν τις καταλληλότερες ενέργειες ελέγχου (ζεύξη-απόζευξη διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος, αποκοπή φορτίου ή γεννητριών) για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή. Η σχεδίαση και ο έλεγχος των αλγορίθμων έγινε με δυναμικές προσομοιώσεις του συστήματος, οι οποίες βασίστηκαν στη ακριβή μοντελοποίηση των διατάξεών του, των μετρητικών διατάξεων, των διατάξεων επικοινωνίας, των διακοπών ισχύος και των τοπικών διατάξεων παρακολούθησης [WT04].

Στην Ιταλία, ο διαχειριστής του συστήματος υπογράφει συμβάσεις με βιομηχανικούς πελάτες, ώστε να προχωρά στην αποκοπή του φορτίου τους οποτεδήποτε καταστεί περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Η συμφωνία αυτή εξασφαλίζει στους βιομηχανικούς πελάτες σημαντική έκπτωση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Προκειμένου η αποκοπή του φορτίου των συγκεκριμένων καταναλωτών να γίνεται σε πραγματικό χρόνο, εγκαταστάθηκε στο ιταλικό εθνικό κέντρο ελέγχου ένας ελεγκτής με την ονομασία Interruptible Management Console (IMC) [GLM05]. Οι αποκοπές πραγματοποιούνται

αυτόματα με εντολή που δίνεται από τον ελεγκτή IMC σε διατάξεις τύπου RTU που εγκαθίστανται στις εγκαταστάσεις των συμβεβλημένων πελατών.

Η μελλοντική αναβάθμιση του ελεγκτή φέρει την ονομασία Automatic Shedding Processor (ASP) και εκτός του ελέγχου της αποκοπής φορτίου στους συμβεβλημένους πελάτες ενσωματώνει και άλλα μέτρα ελέγχου και προστασίας (π.χ. αποκοπές φορτίου υπό άλλο καθεστώς), καθώς και λειτουργίες της αγοράς, στο ίδιο κεντρικό σύστημα επεξεργασίας. Ο ASP προβαίνει σε εκτίμηση της κατάστασης του ιταλικού συστήματος, ακολούθως σε εκτίμηση της δυναμικής του ασφάλειας και εφόσον προκύπτουν οι αναγκαίοι λόγοι σε όπλιση των διαφόρων διατάξεων αποκοπής. Αν συμβεί μία από τις εξεταζόμενες διαταραχές, η αποκοπή εφαρμόζεται απευθείας χωρίς κεντρικό έλεγχο. Οι μέθοδοι ανάλυσης, για την εκτίμηση της δυναμικής ασφάλειας του συστήματος, και οι αλγόριθμοι ελέγχου, για τη βελτιστοποίηση της αποκοπής φορτίου, που επιτελούνται στον ASP περιγράφονται στην εργασία [GSS05].

Μετά από ένα περιστατικό αστάθειας τάσης που συνέβη το 1987 στο Τόκιο και οδήγησε στη σβέση συνολικού φορτίου 8 GW, η εταιρεία ηλεκτρισμού TEPCO ανέπτυξε μεταξύ άλλων ένα αποκεντρωμένο σχήμα αποκοπής φορτίου ευρείας περιοχής για την αντιμετώπιση αντίστοιχων περιστατικών στο μέλλον [Ima05]. Η αποκοπή εφαρμόζεται με τη λογική του κλειστού βρόχου, κάθε φορά που ο ρυθμός μείωσης της τάσης ($\Delta V/\Delta t$) σε τρεις από τέσσερις αντιπροσωπευτικούς ζυγούς του συστήματος μεταφοράς ικανοποιεί τα κριτήρια ενεργοποίησης, που καθορίζονται από μία χαρακτηριστική αντιστρόφου χρόνου. Η χαρακτηριστική αυτή προσδιορίζει 6 διαφορετικές ρυθμίσεις ρυθμού μείωσης της τάσης για την αναγνώριση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, ενώ απαραίτητη είναι η ταυτόχρονη ανίχνευση τάσης κάτω από 95% της ονομαστικής στον εποπτευόμενο ζυγό. Η αναγνώριση της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης γίνεται εφόσον ικανοποιείται ταυτόχρονα η μοναδική ρύθμιση ρυθμού μείωσης της τάσης (υπάρχει εντολή μπλοκαρίσματος όταν ο ρυθμός είναι υπερβολικά μεγάλος υποδεικνύοντας σφάλμα) και η ανίχνευση τάσης κάτω από 95% της ονομαστικής στον εποπτευόμενο ζυγό. Το σχήμα διαθέτει επιπροσθέτως τη δυνατότητα αποκοπής φορτίου, λόγω εξαιρετικά αργής επαναφοράς της τάσης.

Το 1999 ένα περιστατικό αστάθειας τάσης στη Νότια Αφρική, που προκλήθηκε από την αδυναμία ενός διακόπτη ισχύος να επανακλείσει μετά από λειτουργία της προστασίας αποστάσεως σε μία γραμμή μεταφοράς 275 kV, οδήγησε στην κατάρρευση των τάσεων του συστήματος. Στατικές μελέτες ασφάλειας του συστήματος έδειξαν ότι υπάρχει ο κίνδυνος πρόκλησης παρόμοιου περιστατικού στο μέλλον, από την εμφάνιση διαφορετικών διαταραχών σε διαφορετικά σημεία του δικτύου. Κατόπιν αυτού και επειδή μέτρα, όπως η βελτίωση των ρυθμίσεων της προστασίας (η οποία σωστά λειτούργησε στο περιστατικό), η κατασκευή γραμμών μεταφοράς και η ένταξη διατάξεων αέργου αντιστάθμισης στο σύστημα δεν εξαλείφουν εξ' ολοκλήρου το πρόβλημα, η ηλεκτρική εταιρεία Eskom αποφάσισε να θωρακίσει το σύστημά της με την υλοποίηση ενός σχήματος αποκοπής φορτίου [VDM05]. Το σχήμα εφαρμόζει την αποκοπή φορτίου σε τοπικό επίπεδο, αποκεντρωμένα, με τη βοήθεια αφοσιωμένων ηλεκτρονόμων υποτάσεως που ακολουθούν λογική αντιστρόφου χρόνου. Η χαρακτηριστική αντιστρόφου χρόνου των ηλεκτρονόμων σχεδιάστηκε με τρόπο που να προκαλεί την αποκοπή της αναγκαίας (μη βέλτιστης) ποσότητας φορτίου για τη σταθεροποίηση του συστήματος για οποιαδήποτε από τις κρίσιμες διαταραχές.

Σε εξέλιξη βρίσκεται ένα διεθνές ερευνητικό πρόγραμμα που εξετάζει την υλοποίηση ενός συστήματος ελέγχου ευρείας περιοχής με χρήση συγχρονισμένων φασιθετών (WACS) στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της ρωσικής Άπω Ανατολής (Russian Far East Interconnected Power System). Στην [LSD06] δημοσιεύονται οι διερευνητικές μελέτες που έγιναν με σκοπό τον προσδιορισμό του χρόνου απόκρισης δύο σχημάτων προστασίας συστήματος που εγκαταστάθηκαν ήδη στην περιοχή, καθώς και του τρόπου απόκρισής τους στην εμφάνιση κάποιας σοβαρής διαταραχής.

Στην εργασία [Cor05] παρουσιάζεται ένας εναλλακτικός τρόπος προστασίας από αστάθεια τάσης του ιταλικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, με εκμετάλλευση της υποδομής από τη δευτερεύουσα και τριτεύουσα ρύθμιση τάσης. Με τη βοήθεια ενός δείκτη αστάθειας τάσης, ο οποίος υπολογίζεται σε πραγματικό χρόνο, υποδεικνύεται η περιοχή του συστήματος που είναι υπεύθυνη για την αστάθεια και προσδιορίζεται η αναγκαία αποκοπή φορτίου (ή και άλλα μέτρα, όπως η απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής λήψης των ΣΑΤΥΦ). Πρόκειται για προστασία ευρείας περιοχής με συνεισφορά και στη βελτίωση του ελέγχου των τάσεων στο σύστημα.

1.12 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η διερεύνηση μέτρων αντιμετώπισης των φαινομένων μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, η διατριβή εστιάζεται στη διερεύνηση των μέτρων προστασίας από αστάθεια τάσης που επιδρούν άμεσα ή έμμεσα στην καταναλισκόμενη ισχύ των φορτίων του συστήματος.

Στα πλαίσια αυτά, κυρίαρχο θέμα της διατριβής αποτελεί η ανάλυση των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η ανάλυση της άμεσης αποκοπής φορτίου, ως μέτρα αντιμετώπισης της αστάθειας τάσης. Η εφαρμογή του ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ εξετάζεται ως μία ήπια λύση απέναντι στους καταναλωτές, καθώς εισάγει έμμεση μείωση στην καταναλισκόμενη ισχύ. Η αποκοπή φορτίου εξετάζεται ως το έσχατο μέτρο προστασίας για την αποφυγή της κατάρρευσης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκεται σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης και έχει σαφώς δυσμενέστερες συνέπειες για τους καταναλωτές, καθώς προκαλεί την ολοσχερή διακοπή της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η σχεδίαση σχημάτων προστασίας από αστάθεια τάσης με εφαρμογή των προαναφερόμενων μέτρων αποτελεί το σκοπό της διατριβής. Προς την κατεύθυνση αυτή έχουν σχεδιαστεί διαφορετικά σχήματα προστασίας για το Ελληνικό σύστημα. Από αυτά, τα σχήματα που υλοποιούν τον έλεγχο εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ μπορούν να θεωρηθούν ως συμπληρωματικά των σχημάτων αποκοπής φορτίου, καθώς όπως είναι αναμενόμενο η σταθεροποίηση του συστήματος, όταν αυτό λειτουργεί κάτω από δυσμενείς συνθήκες, δεν εξασφαλίζεται με την εφαρμογή των συγκεκριμένων μέτρων αν υπάρχει άλλος μηχανισμός αποκατάστασης φορτίου.

Η σχεδίαση των σχημάτων αποκοπής φορτίου για την αντιμετώπιση του περιστατικού της σβέσης του νοτίου τμήματος του Ελληνικού συστήματος το καλοκαίρι του 2004, μπορεί να αποτελέσει ένα ολοκληρωμένο δίκτυο ασφάλειας του συστήματος κατά την εμφάνιση παρόμοιων περιστατικών στο μέλλον. Η σχεδίαση αυτή βασίζεται στην αναλυτική προσομοίωση του φαινομένου [VNT06], η οποία πέτυχε να αναπαραστήσει με ακρίβεια τα πραγματικά γεγονότα, επιτρέποντας κατά αυτόν τον τρόπο την εξαγωγή ποιοτικών και ποσοτικών συμπερασμάτων που διασφαλίζουν την ακρίβεια της σχεδίασης.

Προαπαιτήση της αναλυτικής προσομοίωσης του περιστατικού της διακοπής αποτέλεσε η ανάγκη για τη βελτίωση του μοντέλου του Ελληνικού συστήματος, καθώς και η ανάγκη για προσομοίωση λειτουργιών της προστασίας του συστήματος που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη του συμβάντος και οι οποίες μπορεί και στο μέλλον να διαδραματίσουν τέτοιο ρόλο.

Η αναπροσαρμογή των δεδομένων του Ελληνικού συστήματος αποτέλεσε μέρος της διαδικασίας συντήρησης της βάσης δεδομένων της εφαρμογής εκτίμησης ασφάλειας τάσης πραγματικού χρόνου του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας του ΔΕΣΜΗΕ, η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ερευνητικού έργου [Vou05a]. Η διαδικασία αυτή συνέβαλλε σημαντικά στη βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της εφαρμογής. Ορισμένα από τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν με σκοπό την παράσταση συγκεκριμένων λειτουργιών της προστασίας του συστήματος στην προσομοίωση του φαινομένου της διακοπής, ενσωματώθηκαν στην εφαρμογή Εκτίμησης Ασφάλειας Τάσης του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας, καθώς ο ρόλος τους θεωρείται κρίσιμος στην εκτίμηση της ασφάλειας τάσης του συστήματος. Άλλα μοντέλα έχουν επίσης αναπτυχθεί με δυνατότητα μελλοντικής ενσωμάτωσής τους στην εφαρμογή.

Τα σχήματα αποκοπής φορτίου που σχεδιάστηκαν για την αντιμετώπιση ενδεχόμενης αστάθειας τάσης του Ελληνικού συστήματος στο μέλλον [Vou06] έχουν ήδη υλοποιηθεί από τον ΔΕΣΜΗΕ. Παράλληλα, εξετάστηκε ένα σχήμα αποκοπής φορτίου προληπτικού ελέγχου, κατάλληλο για την εφαρμογή του στον έλεγχο της ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο.

Σε ορισμένες περιπτώσεις διερευνάται επιπροσθέτως ο έλεγχος των διατάξεων αντιστάθμισης ως ένα μέτρο προστασίας συστήματος. Ιδιαίτερα εξετάζεται το μέτρο της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης των εγκάρσιων πηνίων αντιστάθμισης του συστήματος.

Η σχεδίαση όλων των μέτρων προστασίας που πραγματεύεται η διατριβή, βασίζεται στην ανάπτυξη αντίστοιχων υποπρογραμμάτων στο προγραμματιστικό περιβάλλον του πακέτου προσομοίωσης WPSTAB. Το πακέτο αυτό είναι κατάλληλο για την προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα και έχει ενταχθεί στην εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας τάσης

πραγματικού χρόνου του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας. Η ανάπτυξη του λογισμικού του WPSTAB με υποπρογράμματα προστασίας που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, επιτρέπει τη χρήση του προγράμματος για την αξιολόγηση και σχεδίαση μέτρων προστασίας σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνοπτικά, οι κύριοι στόχοι αυτής της διατριβής είναι:

- Η ανάλυση της αποκοπής φορτίου και του ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής, καθώς και των διατάξεων αέργου αντιστάθμισης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ως μέτρα για την αντιμετώπιση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης.
- Η μοντελοποίηση των προαναφερόμενων μέτρων προστασίας από αστάθεια τάσης στο πρόγραμμα προσομοίωσης WPSTAB του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, επιτρέποντας έτσι την προσομοίωση και ανάλυση της εφαρμογής των μέτρων αυτών και των αντίστοιχων σχημάτων προστασίας σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η μοντελοποίηση λειτουργιών της προστασίας του συστήματος που επιδρούν στην ευστάθεια τάσης του συστήματος.
- Η σχεδίαση σχημάτων προστασίας για την αντιμετώπιση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης στο Ελληνικό σύστημα.
- Η έρευνα γύρω από τον υλικοτεχνικό εξοπλισμό που απαιτείται για την υλοποίηση σχημάτων προστασίας συστήματος, βασισμένων στα εξεταζόμενα μέτρα.

1.13 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η παρούσα διατριβή διαρθρώνεται σε οκτώ κεφάλαια.

Στο παρόν εισαγωγικό **1ο Κεφάλαιο** δόθηκε συνοπτικά η έννοια της ευστάθειας τάσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, περιγράφηκε η διάκριση των φαινομένων αστάθειας τάσης με βάση τη χρονική κλίμακα στην οποία εξελίσσονται. Η διάκριση αυτή διευκολύνει την ακριβή ανάλυση των διαφορετικών αιτιών πρόκλησης των φαινομένων αστάθειας τάσης και αποτελεί μέρος του γενικότερου διαχωρισμού των δυναμικών φαινομένων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε χρονικές κλίμακες, η οποία καθορίζεται από τη δράση των διατάξεων που εμπλέκονται σε αυτά.

Αναλύθηκε διεξοδικά η επίδραση των γεννητριών στην ευστάθεια τάσης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να διαφανεί ο καθοριστικός ρόλος τον οποίο διαδραματίζουν στην έκβαση των φαινομένων αστάθειας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επίδραση που έχουν οι περιορισμοί λειτουργίας των γεννητριών στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ του συστήματος, αλλά και στην ανάδειξη της κρισιμότητας των διατάξεων προστασίας των γεννητριών.

Η ανάλυση της επίδρασης των φορτίων στην ευστάθεια τάσης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έγινε, ώστε να εισαχθεί η έννοια του ελέγχου της καταναλισκόμενης ισχύος ως μέτρο προστασίας του συστήματος σε συνθήκες εκτάκτου ανάγκης. Καθώς ο έλεγχος εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μέρος της διατριβής αυτής, έμφαση δόθηκε στην περιγραφή της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ σε κανονική κατάσταση και ιδιαίτερα στον τρόπο με τον οποίο η λειτουργία αυτή μπορεί από μηχανισμός αποκατάστασης της τάσης και της ισχύος να μετατραπεί σε μηχανισμό αστάθειας.

Αναπτύχθηκε η μέθοδος διαχωρισμού των χρονικών κλιμάκων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, με τη βοήθεια της οποίας εξάγονται τα προσεγγιστικά μοντέλα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Το οιονεί στατικό σύστημα αποτελεί το προσεγγιστικό μοντέλο του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα και ως εκ τούτου είναι κατάλληλο για τη χρήση του στη μέθοδο προσομοίωσης με την παραδοχή των οιονεί στατικών μεταβολών. Η οιονεί στατική προσομοίωση ακολουθείται στη διατριβή αυτή για την ανάλυση της μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσης.

Ακολούθησε σύντομη αναφορά στην έννοια της ανάλυσης ασφάλειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και αναδείχθηκε η σπουδαιότητα της εκτίμησης ασφάλειας τάσης στο σημερινό, απορυθμισμένο περιβάλλον αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Έγινε στη συνέχεια η διάκριση μεταξύ της κλασικής προστασίας εξοπλισμού και της προστασίας συστήματος και επεξηγήθηκε λεπτομερώς η

έννοια του σχήματος προστασίας συστήματος. Ειδική αναφορά έγινε σε όλες τις κατηγορίες των σχημάτων προστασίας για την αντιμετώπιση της αστάθειας τάσης που μπορούν να υλοποιηθούν σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα σχήματα προστασίας από αστάθεια τάσης που αναπτύσσονται στη διατριβή αυτή σχεδιάστηκαν για το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα. Σύντομη περιγραφή του Ελληνικού συστήματος, όπως και στοιχεία ως προς τη σημερινή του κατάσταση δόθηκαν προς το τέλος του παρόντος κεφαλαίου. Περιγράφηκε επίσης η εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο On-line VSA που λειτουργεί στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας του ΔΕΣΜΗΕ.

Στο **2ο Κεφάλαιο** περιγράφονται οι διαφορετικές μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας τάσης που χρησιμοποιούνται στη διατριβή αυτή για τη μελέτη και σχεδίαση των σχημάτων προστασίας. Αρχικά εισάγεται το βασικό μαθηματικό υπόβαθρο που απαιτείται για την ανάλυση των φαινομένων αστάθειας τάσης. Ορίζεται η ευστάθεια σημείου ισορροπίας σε γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα και παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της θεωρίας διακλαδώσεων. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στις διακλαδώσεις σαγματικού κόμβου, οι οποίες αποτελούν το συνηθέστερο είδος διακλάδωσης που συναντάται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολουθεί η περιγραφή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ως δυναμικών συστημάτων που υπόκεινται σε αλγεβρικούς περιορισμούς και διερευνάται η εμφάνιση διακλαδώσεων σαγματικού κόμβου σε αυτά.

Στη συνέχεια δίνεται η έννοια των ορίων φόρτισης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και επεξηγείται η χρησιμότητα του προσδιορισμού τους στην εκτίμηση της ασφάλειας τάσης. Το σύνολο των ορίων φόρτισης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στο χώρο των παραμέτρων σχηματίζει μια υπερεπιφάνεια που καλείται επιφάνεια ορίων φόρτισης. Σημαντική πληροφορία για τη σχεδίαση των μέτρων αντιμετώπισης της αστάθειας τάσης παρέχει το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια αυτή.

Η ανάλυση ευαισθησίας βρίσκει επίσης σημαντικό πεδίο εφαρμογής στην ανάλυση της ευστάθειας τάσης. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η γενική μέθοδος υπολογισμού των ευαισθησιών σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και εξάγονται οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς τις παραμέτρους φορτίου.

Η προσομοίωση στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα αποτελεί το κυριότερο εργαλείο ανάλυσης ευστάθειας τάσης σε αυτή τη διατριβή. Το πρόγραμμα WPSTAB, που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό, βασίζεται στην υλοποίηση της μεθόδου προσομοίωσης με οιονεί στατικές μεταβολές. Καρδιά της μεθόδου αποτελεί το οιονεί στατικό μοντέλο συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο οι διατάξεις που δρουν στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα εκφράζονται από αλγεβρικές εξισώσεις, ενώ αυτές που δρουν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα από διαφορικές εξισώσεις ή εξισώσεις διαφορών. Το σύνολο των εξισώσεων αυτής της μορφής, για όλες τις διατάξεις του συστήματος που θεωρούνται στο μοντέλο της προσομοίωσης, περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο αυτό. Ακολούθως περιγράφεται η μέθοδος επίλυσης του παραπάνω συστήματος.

Το κεφάλαιο κλείνει με τη θεωρητική ανάλυση των μεθόδων αντιμετώπισης της αστάθειας τάσης. Στα πλαίσια αυτά παρουσιάζονται οι βασικότεροι μηχανισμοί αστάθειας τάσης στη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα και αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τη σχεδίαση των μέτρων αποκατάστασης μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας, που αποτελεί μέρος της διατριβής.

Στο **3ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι αναγκαίες τροποποιήσεις που έπρεπε να γίνουν στα δεδομένα του μοντέλου του Ελληνικού συστήματος, με σκοπό την ακριβέστερη παράστασή του στις προσομοιώσεις. Η ακριβής παράσταση του συστήματος επιτρέπει την εξαγωγή ποιοτικών και ποσοτικών συμπερασμάτων που συμβάλλουν στη σωστή αξιολόγηση των μέτρων προστασίας που πραγματεύεται η διατριβή. Η ανάγκη αναπροσαρμογής των δεδομένων προέκυψε επιτακτικότερη μετά το περιστατικό της σβέσης του νότιου τμήματος του Ελληνικού συστήματος στις 12 Ιουλίου 2004, οπότε και αποφασίστηκε η εγκατάσταση στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας της εφαρμογής εκτίμησης ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο On-line VSA, ως συμβουλευτικού εργαλείου των χειριστών λειτουργίας του συστήματος. Η βάση δεδομένων της εφαρμογής εκτίμησης ασφάλειας τάσης έχει επικαιροποιηθεί σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας προσαρμογής.

Το περιστατικό της σβέσης του νοτίου τμήματος του Ελληνικού συστήματος στις 12 Ιουλίου 2004 ανέδειξε ορισμένες λειτουργίες της προστασίας του συστήματος ως υπαίτιες για την πρόκληση της κατάρρευσης και το μετέπειτα διαχωρισμό του στον άξονα Βορρά-Νότου. Για την προσομοίωση των συγκεκριμένων λειτουργιών της προστασίας του συστήματος, οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο

στην εξέλιξη ενός περιστατικού αστάθειας τάσης, αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής κατάλληλα μοντέλα, τα οποία ενσωματώθηκαν στη συνέχεια στην εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας τάσης πραγματικού χρόνου του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας για τη βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της. Πλήρης περιγραφή όλων μοντέλων της προστασίας, όπως και των άλλων μοντέλων που αναπτύχθηκαν, καθώς και παραδείγματα από την εφαρμογή τους παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό.

Στο **4ο Κεφάλαιο** ακολουθεί η διερεύνηση των μεθόδων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ ως μέτρα προστασίας από αστάθεια τάσης. Για την πληρέστερη κατανόηση των μέτρων αυτών, στα πλαίσια μάλιστα ενδεχόμενης υλοποίησής τους σε ρεαλιστικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται αρχικά σύντομη περιγραφή των κυριότερων συνιστωσών μίας τυπικής διάταξης ΣΑΤΥΦ. Από τη θεωρητική ανάλυση των μεθόδων, που ακολουθεί, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την εφαρμογή του ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη συνέχεια ο έλεγχος εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ προσομοιώνεται σε ένα μικρό ηλεκτρικό σύστημα και εξάγονται οι κατευθυντήριες γραμμές για τη σχεδίασή του σε ρεαλιστικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολουθεί η προσομοίωση των ίδιων μέτρων στο Ελληνικό σύστημα, από την οποία προκύπτουν οι διαφορές σε σχέση με την εφαρμογή στο μικρό ηλεκτρικό σύστημα. Ανακύπτουν προβλήματα και προβληματισμοί για τη βελτίωση των μεθόδων. Τέλος, γίνεται εισαγωγή στη λογική της υλοποίησής τέτοιων σχημάτων προστασίας.

Στο **5ο Κεφάλαιο** πραγματοποιείται η ανάλυση της αποκοπής φορτίου ως άμεσου μέτρου αντιμετώπισης της αστάθειας τάσης. Η πρώτη μέθοδος αποκοπής φορτίου που εξετάζεται στη διατριβή αυτή, στηρίζεται στη συνήθη πρακτική της παρακολούθησης της τάσης. Αναλύονται τα δύο σχήματα αποκοπής φορτίου με κριτήριο την τάση:

- Το κεντρικό σχήμα, όπου η απόφαση για την απόρριψη φορτίου λαμβάνεται από το κέντρο ελέγχου, συνήθως βάσει μίας γενικότερης εποπτείας των τάσεων στο σύστημα.
- Το αποκεντρωμένο σχήμα, όπου η απόφαση για την απόρριψη φορτίου λαμβάνεται στο επίπεδο του υποσταθμού, συνήθως βάσει της μέτρησης της τάσης τοπικά.

Ακολουθεί η προσομοίωση της αποκοπής φορτίου με αποκεντρωμένη λογική αρχικά σε ένα μικρό ηλεκτρικό σύστημα και στη συνέχεια στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο, ενώ το κεντρικό σχήμα αποκοπής φορτίου με κριτήριο την τάση, όπως και παραλλαγές του αποκεντρωμένου, προσομοιώνεται σε επόμενα κεφάλαια.

Η επόμενη μέθοδος αποκοπής φορτίου που εξετάζεται, συνιστά ουσιαστικά ένα μέτρο προληπτικού ελέγχου. Η μέθοδος αυτή πραγματοποιεί αποκοπή φορτίου με σκοπό τη μεγιστοποίηση του περιθωρίου φόρτισης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, στην περίπτωση που αυτό κρίνεται ανεπαρκές από τους χειριστές της λειτουργίας. Αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου στο Ελληνικό σύστημα, επιδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του συγκεκριμένου σχήματος αποκοπής και το καθιστούν ως ένα ιδιαίτερα ελπιδοφόρο εργαλείο για τον έλεγχο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο.

Η τελευταία μέθοδος αποκοπής φορτίου που εξετάζεται, επιτρέπει τον προσδιορισμό της πιο αποδοτικής αποκοπής φορτίου σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή εξέλιξης ενός φαινομένου αστάθειας τάσης, δηλαδή ακόμα και μακριά από τη χρονική στιγμή εμφάνισης της αστάθειας. Γίνεται προφανές ότι με τον τρόπο αυτό παρέχεται ασφαλής πληροφορία για την αποδοτικότητα της αποκοπής ακόμα και όταν αυτή εφαρμόζεται σε ευσταθή σημεία ισορροπίας, όπου άλλες μέθοδοι ανάλυσης (π.χ. ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων) δεν μπορούν να εφαρμοστούν.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη χρήση των ευαισθησιών της τάσης ως προς τις παραμέτρους φορτίου ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, για τον υπολογισμό των οποίων αναπτύχθηκε το αντίστοιχο υποπρόγραμμα στο υπολογιστικό περιβάλλον του προγράμματος προσομοίωσης WPSTAB. Με τη βοήθεια της ρουτίνας αυτής, μπορούν να υπολογίζονται οι ευαισθησίες της τάσης σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή της προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Ενδεικτικά παρουσιάζονται ορισμένα αποτελέσματα από τον υπολογισμό των ευαισθησιών της τάσης ως προς τις παραμέτρους φορτίου κατά την προσομοίωση ενός σεναρίου αστάθειας τάσης στο Ελληνικό σύστημα, με σκοπό τη σύγκριση της πληροφορίας που παρέχεται από τις ευαισθησίες της τάσης σε σχέση με αυτή που παρέχεται από το κάθετο διάνυσμα. Ακολουθεί η εφαρμογή της

εξεταζόμενης μεθόδου αποκοπής φορτίου σε ένα μικρό ηλεκτρικό σύστημα, ενώ η εφαρμογή της στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα πραγματοποιείται σε επόμενο κεφάλαιο.

Το κεφάλαιο κλείνει με μία εισαγωγή ως προς την υλοποίηση του μέτρου της αποκοπής φορτίου, με έμφαση στην περιγραφή του συνηθέστερου υλικοτεχνικού εξοπλισμού. Περιγράφονται επίσης τα συνηθέστερα σχήματα αποκοπής φορτίου για την αντιμετώπιση της αστάθειας τάσης που συναντώνται σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και αυτά που αναμένεται να κυριαρχήσουν στο μέλλον.

Στο **6ο Κεφάλαιο** περιγράφεται το γενικευμένο φαινόμενο αστάθειας τάσης που οδήγησε στη σβέση ολόκληρου του νοτίου τμήματος του Ελληνικού συστήματος στις 12 Ιουλίου 2004 και μελετώνται τα αίτια που το προκάλεσαν. Η ανάλυση του περιστατικού βασίζεται στη λεπτομερή προσομοίωση του φαινομένου, η οποία πέτυχε να αναπαραστήσει με εξαιρετική επιτυχία την αλληλουχία των πραγματικών γεγονότων. Σε αυτό συνέβαλλε καθοριστικά η αναπροσαρμογή των δεδομένων του μοντέλου του Ελληνικού συστήματος, καθώς και η αναβάθμιση του λογισμικού του προγράμματος προσομοίωσης, διαδικασίες οι οποίες περιγράφονται λεπτομερώς στο τρίτο κεφάλαιο.

Το βελτιωμένο μοντέλο του Ελληνικού συστήματος που απαιτήθηκε για τις ανάγκες της ανάλυσης του περιστατικού της κατάρρευσης, χρησιμοποιείται σήμερα στην εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας τάσης πραγματικού χρόνου του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας, η οποία πλέον επιτρέπει ποιοτικά και ποσοτικά ακριβή συμπεράσματα. Επιπροσθέτως, η ενδεδειγμένη μελέτη του περιστατικού ανέδειξε την ανάγκη για προσομοίωση λειτουργιών της προστασίας του συστήματος κατά την εκτίμηση της ασφάλειας τάσης του Ελληνικού συστήματος από την εφαρμογή.

Η ικανοποιητική προσομοίωση της διακοπής της 12^{ης} Ιουλίου 2004 επιτρέπει τη σχεδίαση κατάλληλων σχημάτων αποκοπής φορτίου που θα μπορούσαν να είχαν αποτρέψει την κατάρρευση του συστήματος. Τα σχήματα αποκοπής φορτίου που σχεδιάστηκαν προς την κατεύθυνση αυτή, μπορούν να αποτελέσουν ένα ύστατο πλέγμα ασφάλειας του Ελληνικού συστήματος κατά την εμφάνιση αντίστοιχων φαινομένων στο μέλλον.

Στο **7ο Κεφάλαιο** περιγράφονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της εκτίμησης ασφάλειας τάσης του Ελληνικού συστήματος για όλο το χρονικό διάστημα από το καλοκαίρι του 2004, που συνέβη το περιστατικό της διακοπής, μέχρι σήμερα. Η εκτίμηση αυτή πραγματοποιείται ακολούθως για ένα ιδιαίτερα δυσμενές στιγμιότυπο του συστήματος που προβλέπεται για το καλοκαίρι του 2007.

Από την ανάλυση αυτή προκύπτει ότι οι πλέον ασθενείς περιοχές του συστήματος, τόσο στο πρόσφατο παρελθόν όσο και στο μέλλον, είναι η Πελοπόννησος και η Αττική. Ο κίνδυνος να προκληθεί γενικευμένο πρόβλημα αστάθειας τάσης του συστήματος στο ενδεχόμενο εμφάνισης πιθανής διαταραχής στις περιοχές αυτές είναι αυξημένος. Για την αντιμετώπιση αυτού του ενδεχομένου σχεδιάζονται σχήματα προστασίας του συστήματος με αποκοπή φορτίου από την Πελοπόννησο και από την Αττική. Η σχεδίαση των σχημάτων αυτών, όπως και η ακολουθούμενη φιλοσοφία υλοποίησής τους από τον ΔΕΣΜΗΕ, περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο αυτό.

Τέλος, στο **8ο κεφάλαιο** συνοψίζονται τα συμπεράσματα, η συμβολή και οι προοπτικές της διατριβής.

2ο Κεφάλαιο

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ

2.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1.1 Ευστάθεια Σημείων Ισορροπίας

Ας θεωρήσουμε το παρακάτω σύστημα αποτελούμενο από n συνήθεις διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (2.1)$$

όπου \mathbf{x} είναι το διάνυσμα κατάστασης, διάστασης $n \times 1$, και κάθε f_i ($i = 1, \dots, n$) είναι στη γενική περίπτωση μία μη γραμμική, συνεχής και διαφορίσιμη συνάρτηση όλων των μεταβλητών κατάστασης x_i , ($i = 1, \dots, n$).

Η απόκριση στο πεδίο του χρόνου ενός φυσικού συστήματος που περιγράφεται από εξισώσεις της μορφής (2.1), προκύπτει από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων για μία δεδομένη αρχική συνθήκη ($t = 0$):

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (2.2)$$

Το διάνυσμα κατάστασης προσδιορίζει ένα σημείο στο χώρο κατάστασης, στο χώρο δηλαδή που έχει ως συντεταγμένες του όλες τις μεταβλητές κατάστασης. Η λύση $\mathbf{x}(t)$ που προκύπτει για την αρχική συνθήκη \mathbf{x}_0 μπορεί να παρασταθεί ως μία καμπύλη στο χώρο κατάστασης, που ονομάζεται τροχιά του συστήματος. Η λύση $\mathbf{x}(t)$ που αντιστοιχεί σε $t > 0$ καλείται θετική τροχιά και αυτή που αντιστοιχεί σε $t < 0$ καλείται αρνητική τροχιά.

Ένα σημείο \mathbf{x}^* αποτελεί σημείο ισορροπίας του συστήματος (2.1) αν ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) = \mathbf{0} \quad (2.3)$$

Τα σημεία ισορροπίας χαρακτηρίζονται κατά Lyapunov ως προς την ευστάθειά τους ως εξής [HK92,VCV98]:

- Ένα σημείο ισορροπίας \mathbf{x}^* είναι ευσταθές, εάν για κάθε περιοχή V του \mathbf{x}^* , μπορεί να βρεθεί μία περιοχή V_1 του \mathbf{x}^* , τέτοια ώστε για όλα τα \mathbf{x}_0 τα οποία ανήκουν στην V_1 , υπάρχει λύση $\mathbf{x}(t)$ και βρίσκεται εντός της περιοχής V για κάθε χρονική στιγμή $t > 0$.
- Ένα σημείο ισορροπίας \mathbf{x}^* είναι ασυμπτωτικά ευσταθές, εάν όλες οι τροχιές του συστήματος με αρχική συνθήκη \mathbf{x}_0 εντός της περιοχής V_1 τείνουν στο \mathbf{x}^* , καθώς ο χρόνος τείνει στο άπειρο ($t \rightarrow \infty$).
- Ένα σημείο ισορροπίας \mathbf{x}^* καλείται ασταθές εάν δεν είναι ευσταθές.

Η κατά Lyapunov ευστάθεια όπως προκύπτει από τα παραπάνω είναι μία τοπική ιδιότητα του συστήματος, αφορά δηλαδή περιοχές κοντά στα σημεία ισορροπίας. Εποπτικότερη εικόνα για τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος ως προς την ευστάθειά του δίνεται από τη μελέτη του πορτρέτου φάσεων, από όπου μπορεί να προσδιοριστεί η περιοχή εκείνη από την οποία όλες οι τροχιές του συστήματος καταλήγουν σε ένα ευσταθές σημείο ισορροπίας. Η περιοχή αυτή που χαρακτηρίζεται ως περιοχή A καλείται *περιοχή έλξης* του \mathbf{x}^* , γιατί όλες οι τροχιές του συστήματος με αρχικές συνθήκες $\mathbf{x}_0 \in A$ τείνουν σε ένα ασυμπτωτικά ευσταθές σημείο ισορροπίας \mathbf{x}^* .

Στα γραμμικά συστήματα όπως αυτό της μορφής:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (2.4)$$

η ευστάθεια του σημείου ισορροπίας ($\mathbf{x}^* = \mathbf{0}$) καθορίζεται από τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης \mathbf{A} .

Οι ιδιοτιμές μπορεί να είναι πραγματικές ή μιγαδικές. Εάν ο πίνακας \mathbf{A} είναι πραγματικός (υπόθεση που ισχύει σε όλα τα φυσικά συστήματα όπως είναι τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας), οι μιγαδικές ιδιοτιμές εμφανίζονται πάντα σε συζυγή ζεύγη. Αν όλες οι ιδιοτιμές έχουν αρνητικά πραγματικά μέρη, το σημείο ισορροπίας είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. Αν έστω και μία ιδιοτιμή έχει θετικό πραγματικό μέρος, το σημείο ισορροπίας είναι ασταθές. Σημειώνεται ότι στα γραμμικά συστήματα η περιοχή έλξης ενός ασυμπτωτικά ευσταθούς σημείου ισορροπίας είναι όλος ο χώρος των καταστάσεων.

Σε αντίθεση με τα γραμμικά συστήματα, το πλήθος των σημείων ισορροπίας σε ένα μη γραμμικό σύστημα ποικίλει. Συγκεκριμένα, ένα μη γραμμικό σύστημα μπορεί να έχει ένα, περισσότερα του ενός ή κανένα σημείο ισορροπίας. Επιπρόσθετα, η περιοχή έλξης ενός σημείου ισορροπίας σε ένα μη γραμμικό σύστημα μπορεί να είναι φραγμένη. Συνεπώς, η ύπαρξη ευσταθούς σημείου ισορροπίας δεν είναι επαρκής για να εγγυηθεί την ευσταθή απόκριση του συστήματος.

Στις περισσότερες περιπτώσεις μη γραμμικών συστημάτων, η μελέτη της ευστάθειας των σημείων ισορροπίας διευκολύνεται με γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από μία περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας. Αν οριστεί:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}^* \quad (2.5)$$

και διατηρηθεί μόνο ο όρος πρώτης τάξης του αναπτύγματος Taylor γύρω από το \mathbf{x}^* , το αντίστοιχο γραμμικοποιημένο σύστημα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad (2.6)$$

Ο πίνακας κατάστασης \mathbf{A} στην περίπτωση αυτή είναι ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} = \mathbf{f}'_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^*) \quad (2.7)$$

Με τον τρόπο αυτό, η μελέτη ευστάθειας των σημείων ισορροπίας του μη γραμμικού συστήματος ανάγεται στη μελέτη ευστάθειας του γραμμικοποιημένου συστήματος γύρω από κάθε σημείο ισορροπίας, δηλαδή στον υπολογισμό των ιδιοτιμών του πίνακα \mathbf{A} .

Με βάση την ανάλυση των ιδιοτιμών ενός συστήματος μπορούν να προσδιοριστούν οι εξής κατηγορίες σημείων ισορροπίας [VCV98]:

- *Ευσταθείς κόμβοι.* Πρόκειται για τα ασυμπτωτικά ευσταθή σημεία ισορροπίας ενός μη γραμμικού συστήματος
- *Πηγές ή ασταθείς κόμβοι.* Πρόκειται για τα ασταθή σημεία ισορροπίας, τα οποία έχουν όλες τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης με θετικά πραγματικά μέρη.
- *Σαγματικά σημεία ή διάσελα.* Πρόκειται για τα ασταθή σημεία ισορροπίας, τα οποία έχουν μερικές ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης με θετικά πραγματικά μέρη και όλες τις άλλες με αρνητικά.
- *Μη υπερβολικά.* Πρόκειται για σημεία ισορροπίας για τα οποία ο Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης έχει μία ή περισσότερες ιδιοτιμές με μηδενικό πραγματικό μέρος, με αποτέλεσμα η γραμμικοποίηση να μην παρέχει πληροφορία για την ευστάθειά τους. Σε αυτήν την περίπτωση η ευστάθεια προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τον ορισμό.
- *Σαγματικοί κόμβοι.* Πρόκειται για έναν συγκεκριμένο τύπο μη υπερβολικού σημείου ισορροπίας. Η χαρακτηριστική ιδιότητα ενός σαγματικού κόμβου είναι ότι υπάρχει μία κατεύθυνση στο χώρο των καταστάσεων, τέτοια ώστε οι τροχιές με αρχικές συνθήκες από τη μία μεριά του σημείου ισορροπίας να συγκλίνουν στο σημείο ισορροπίας, ενώ από την άλλη μεριά να αποκλίνουν από αυτό.
- *Κέντρα.* Πρόκειται για έναν άλλο τύπο μη υπερβολικού σημείου ισορροπίας. Το κέντρο είναι ένα σημείο ισορροπίας, του οποίου ο Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης χαρακτηρίζεται από ένα ζευγάρι συζυγών μιγαδικών ιδιοτιμών με μηδενικό πραγματικό μέρος.

2.1.2 Διακλαδώσεις

Οι διακλαδώσεις παρατηρούνται συχνά στα μη γραμμικά συστήματα. Συγκεκριμένα, η θεωρία των διακλαδώσεων μελετά το εξής φαινόμενο των μη γραμμικών συστημάτων: την εμφάνιση ριζικών μεταβολών στη συμπεριφορά του συστήματος οι οποίες οφείλονται σε ομαλές, συνεχείς μεταβολές των παραμέτρων του [Am86].

Ας υποθέσουμε ότι ένα σύστημα περιγράφεται από ομαλές συνήθεις διαφορικές εξισώσεις της μορφής:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \quad (2.8)$$

όπου \mathbf{x} είναι το διάνυσμα κατάστασης (διάστασης $n \times 1$) και \mathbf{p} το διάνυσμα παραμέτρων (διάστασης $k \times 1$). Οι συναρτήσεις \mathbf{f} θεωρούνται συνεχείς και διαφορίσιμες ως προς τα \mathbf{x} και \mathbf{p} . Για κάθε τιμή του διανύσματος \mathbf{p} τα σημεία ισορροπίας του συστήματος (2.8) προκύπτουν από την επίλυση του παρακάτω συστήματος:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}^*, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.9)$$

Η εξίσωση (2.9) ορίζει μία πολλαπλότητα (διάστασης k) στο χώρο των μεταβλητών κατάστασης και παραμέτρων (διάστασης $n + k$), στην οποία ανήκουν τα σημεία ισορροπίας του συστήματος.

Για το διάνυσμα παραμέτρων \mathbf{p}_0 θεωρούμε ένα σημείο ισορροπίας $\mathbf{x}^{(1)}$, όπου ο Ιακωβιανός \mathbf{f}_x του συστήματος ως προς τις μεταβλητές κατάστασης είναι αντιστρέψιμος:

$$\det \mathbf{f}_x(\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{p}_0) \neq 0 \quad (2.10)$$

Σύμφωνα με το Θεώρημα Πεπλεγμένης Συνάρτησης υπάρχει μία μοναδική ομαλή συνάρτηση:

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{g}^{(1)}(\mathbf{p}) \quad (2.11)$$

τέτοια ώστε η $\mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{g}^{(1)}(\mathbf{p}_0)$ να δίνει έναν κλάδο (πολλαπλότητα) σημείων ισορροπίας της (2.8) συναρτήσει των παραμέτρων \mathbf{p} .

Υποθέτοντας ότι για την ίδια τιμή \mathbf{p}_0 των παραμέτρων υπάρχει ένα δεύτερο σημείο ισορροπίας $\mathbf{x}^{(2)}$, για το οποίο ο Ιακωβιανός $\mathbf{f}_x(\mathbf{x}^{(2)}, \mathbf{p}_0)$ είναι αντιστρέψιμος, προκύπτει σύμφωνα με το Θεώρημα Πεπλεγμένης Συνάρτησης μία δεύτερη ομαλή συνάρτηση:

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{g}^{(2)}(\mathbf{p}) \quad (2.12)$$

τέτοια ώστε η $\mathbf{x}^{(2)} = \mathbf{g}^{(2)}(\mathbf{p}_0)$ να δίνει έναν νέο κλάδο (πολλαπλότητα) σημείων ισορροπίας της (2.8) συναρτήσει των παραμέτρων \mathbf{p} .

Ο όρος *διακλάδωση* προκύπτει ως έννοια από το γεγονός ότι διαφορετικές πολλαπλότητες σημείων ισορροπίας συναντώνται, δηλαδή με κάποιο τρόπο «διακλαδίζονται». Επομένως στα σημεία ισορροπίας όπου συναντώνται δύο πολλαπλότητες των σημείων ισορροπίας λέμε ότι εμφανίζεται διακλάδωση. Στα σημεία της διακλάδωσης ο Ιακωβιανός \mathbf{f}_x δεν είναι αντιστρέψιμος και το Θεώρημα Πεπλεγμένης Συνάρτησης δε μπορεί να εφαρμοστεί.

Σε ένα γενικότερο πλαίσιο θεωρούμε ότι μία διακλάδωση εμφανίζεται σε κάθε σημείο στο χώρο των παραμέτρων, στο οποίο παρατηρείται μεταβολή της ποιοτικής δομής του συστήματος (2.8) μετά από μικρή μεταβολή των παραμέτρων \mathbf{p} . Πιθανές μεταβολές στην ποιοτική δομή ενός συστήματος που μπορούν να προκαλέσουν την εμφάνιση διακλαδώσεων σχετίζονται με [VCV98]:

- Το πλήθος των σημείων ισορροπίας ή των οριακών κύκλων.
- Την ευστάθεια των σημείων ισορροπίας ή των οριακών κύκλων.
- Την περίοδο των περιοδικών λύσεων.

2.1.3 Διακλάδωση Σαγματικού Κόμβου

Η *διακλάδωση σαγματικού κόμβου* είναι ο συνηθέστερος τύπος διακλάδωσης που εμφανίζεται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάζεται με την εξαφάνιση ή την εμφάνιση ενός ζεύγους σημείων ισορροπίας (συνήθως ενός ευσταθούς και ενός ασταθούς), συνεπεία μίας μικρής μεταβολής των παραμέτρων του συστήματος. Η διακλάδωση σαγματικού κόμβου είναι ένα καθαρά μη γραμμικό φαινόμενο και δεν συναντάται σε γραμμικά συστήματα.

Ας θεωρήσουμε ένα μονοπαραμετρικό σύστημα από n συνήθεις διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mu) \quad (2.13)$$

Η εξίσωση ισορροπίας του παραπάνω συστήματος είναι η εξής:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}^*, \mu) = \mathbf{0} \quad (2.14)$$

Η διακλάδωση σαγματικού κόμβου εμφανίζεται σε ένα σημείο στο χώρο κατάστασης και παραμέτρων όπου δύο διαφορετικοί κλάδοι σημείων ισορροπίας συναντώνται, με τα αντίστοιχα σημεία ισορροπίας να συγχωνεύονται σε ένα, το λεγόμενο σαγματικό κόμβο. Στο σημείο αυτό ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος δεν είναι αντιστρέψιμος. Επομένως η αναγκαία συνθήκη για μια διακλάδωση σαγματικού κόμβου προκύπτει από την εξίσωση ισορροπίας (2.14) σε συνδυασμό με τη συνθήκη μη αντιστρεψιμότητας (2.15):

$$\det \mathbf{f}_x(\mathbf{x}^*) = 0 \quad (2.15)$$

Συνολικά πρόκειται για $n + 1$ εξισώσεις για $n + 1$ μεταβλητές (\mathbf{x} και μ). Σημειώνεται ότι όλα τα σημεία που ικανοποιούν τις αναγκαίες συνθήκες δεν είναι κατά ανάγκη διακλάδωση σαγματικού κόμβου. Ο ακριβής ορισμός μίας διακλάδωσης σαγματικού κόμβου είναι ο εξής [VCV98]:

Σε μία διακλάδωση σαγματικού κόμβου δύο σημεία ισορροπίας συγχωνεύονται και εξαφανίζονται (ή εμφανίζονται) ταυτόχρονα. Το ένα σημείο ισορροπίας έχει μία θετική πραγματική ιδιοτιμή και το άλλο μία αρνητική πραγματική ιδιοτιμή, οι οποίες μηδενίζονται ταυτόχρονα στο σημείο της διακλάδωσης

Η παραπάνω διατύπωση του προβλήματος για την περίπτωση του μονοπαραμετρικού συστήματος γενικεύεται και στα πολυπαραμετρικά συστήματα. Αν θεωρήσουμε το διάνυσμα των παραμέτρων \mathbf{p} (διάστασης $k \times 1$), τα σημεία του χώρου κατάστασης και παραμέτρων (διάστασης $n + k$) που ικανοποιούν τις αναγκαίες συνθήκες για την εμφάνιση διακλάδωσης σαγματικού κόμβου σχηματίζουν μία πολλαπλότητα διάστασης $k - 1$. Τα σημεία που δεν πληρούν τις ικανές συνθήκες σχηματίζουν υποπολλαπλότητες διάστασης $k - 2$, οι οποίες βρίσκονται πάνω στην προηγούμενη πολλαπλότητα. Όταν όμως το διάνυσμα των παραμέτρων κινείται κατά μήκος μίας δεδομένης καμπύλης, δηλαδή όταν οι παράμετροι του συστήματος αποτελούν συνάρτηση μίας μόνο βαθμωτής μεταβλητής μ ($\mathbf{p} = \mathbf{p}(\mu)$), το πρόβλημα απλοποιείται σε πρόβλημα μίας παραμέτρου.

Από γεωμετρικής άποψης, η προβολή των σημείων διακλάδωσης σαγματικού κόμβου στο χώρο των παραμέτρων (διάστασης k) σχηματίζει μία υπερεπιφάνεια (διάστασης $k - 1$) που ονομάζεται *επιφάνεια διακλαδώσεων*. Η επιφάνεια διακλαδώσεων φράσσει την *περιοχή ύπαρξης λύσης* του συστήματος στο χώρο των παραμέτρων, δηλαδή καθορίζει την περιοχή του χώρου παραμέτρων στην οποία υπάρχουν σημεία ισορροπίας.

2.1.4 Συστήματα Διαφορικών Εξισώσεων με Αλγεβρικούς Περιορισμούς

Ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς στη γενική του μορφή περιγράφεται από n διαφορικές και m αλγεβρικές εξισώσεις:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \quad (2.16)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \quad (2.17)$$

όπου \mathbf{x} είναι το διάνυσμα των n μεταβλητών κατάστασης, \mathbf{y} το διάνυσμα των m αλγεβρικών μεταβλητών και \mathbf{p} το διάνυσμα των k παραμέτρων του συστήματος. Οι m αλγεβρικές εξισώσεις (2.17) ορίζουν μία πολλαπλότητα διάστασης $n + k$ στο $(n + m + k)$ -χώρο, που ονομάζεται *πολλαπλότητα αλγεβρικών περιορισμών* [HH89].

Το σύστημα εξισώσεων που είδαμε στην παράγραφο 1.6.1 του πρώτου κεφαλαίου, το οποίο περιγράφει πλήρως το μοντέλο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί μία περίπτωση συστήματος της παραπάνω μορφής. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται ως «θεωρητικώς προβληματικά» καθώς οι m αλγεβρικές εξισώσεις δεν μπορούν πάντα να επίλυθούν ως προς τις m αλγεβρικές μεταβλητές \mathbf{y} . Τα σημεία όπου δεν είναι δυνατή η επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων καλούνται *ιδιόμορφα σημεία*.

Η ανάλυση των συστημάτων διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς γίνεται με εφαρμογή του Θεωρήματος Πεπλεγμένης Συνάρτησης. Αν θεωρήσουμε ένα σημείο $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p})$ στο οποίο ο Ιακωβιανός πίνακας $\mathbf{g}_y(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p})$ των αλγεβρικών εξισώσεων ως προς τις αλγεβρικές μεταβλητές είναι αντιστρέψιμος, τότε σύμφωνα με το Θεωρήματος Πεπλεγμένης Συνάρτησης στο σημείο αυτό υπάρχει τοπικά μία ομαλή συνάρτηση \mathbf{F} από την οποία έχουν απαλειφθεί οι αλγεβρικές μεταβλητές:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \quad (2.18)$$

Καθώς η \mathbf{F} είναι συνεχής ομαλή και παραγωγίσιμη σε κάθε σημείο όπου ο Ιακωβιανός \mathbf{g}_y είναι αντιστρέψιμος, από το Θεώρημα Ύπαρξης προκύπτει ότι υπάρχει μία μοναδική λύση του συστήματος διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων στο πεδίο του χρόνου. Αν ονομάσουμε U_p το πεδίο ορισμού της \mathbf{F} στο χώρο κατάστασης για δεδομένη τιμή των παραμέτρων \mathbf{p} , η περιοχή αυτή φράσσεται από τα σημεία εκείνα που ικανοποιούν τη συνθήκη μη αντιστρεψιμότητας του πίνακα \mathbf{g}_y . Η περιοχή αυτή μπορεί ενδεχομένως να φράσσεται και από τα φυσικά όρια των μεταβλητών κατάστασης.

Για δεδομένη τιμή των παραμέτρων \mathbf{p} , τα σημεία ισορροπίας των (2.16)-(2.17) προκύπτουν από τη λύση του παρακάτω συστήματος εξισώσεων:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.20)$$

Η ευστάθεια των σημείων ισορροπίας μπορεί να προσδιοριστεί από τη γραμμικοποίηση του συστήματος (2.16)-(2.17) γύρω από το σημείο ισορροπίας:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

όπου \mathbf{J} είναι ο μη ελαττωμένος Ιακωβιανός του συστήματος διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Θεωρώντας ότι ο \mathbf{g}_y είναι αντιστρέψιμος μπορούμε να απαλείψουμε το $\Delta \mathbf{y}$ από την (2.21):

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x] \Delta \mathbf{x} \quad (2.23)$$

Προκύπτει έτσι ο πίνακας κατάστασης \mathbf{A} του γραμμικοποιημένου συστήματος:

$$\mathbf{A} = \mathbf{F}_x = [\mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x] \quad (2.24)$$

Ο πίνακας \mathbf{A} ονομάζεται και ελαττωμένος Ιακωβιανός του συστήματος εν αντιθέσει με τον μη ελαττωμένο Ιακωβιανό \mathbf{J} .

Η ευστάθεια των σημείων ισορροπίας ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς προσδιορίζεται από τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης \mathbf{A} , όταν το πραγματικό τους μέρος είναι διάφορο του μηδενός. Σημειώνεται ότι όταν ο πίνακας \mathbf{A} δεν είναι αντιστρέψιμος δεν είναι αντιστρέψιμος ούτε ο πίνακας \mathbf{J} . Έτσι αναγκαία συνθήκη για την ύπαρξη διακλάδωσης σαγματικού κόμβου του συστήματος διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς είναι η μη αντιστρεψιμότητα του πίνακα \mathbf{J} , δηλαδή ισοδύναμα ο πίνακας \mathbf{J} να έχει μία μηδενική ιδιοτιμή.

2.1.5 Ανάλυση Διακλαδώσεων Σαγματικού Κόμβου σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στην παράγραφο 1.6.1 παρουσιάστηκε το πλήρες μοντέλο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων και εξισώσεων διαφορών με αλγεβρικούς περιορισμούς, που περιγράφουν λεπτομερώς την κατάσταση του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή. Από το πλήρες σύστημα, με βάση το διαχωρισμό των δυναμικών φαινομένων σε χρονικές κλίμακες, εξήχθησαν το προσεγγιστικό βραχυπρόθεσμο υποσύστημα, που είναι κατάλληλο για τη μελέτη των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων, και το οιονεί στατικό υποσύστημα, που είναι κατάλληλο για τη μελέτη των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων.

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει ανάλυση των διακλαδώσεων που σχετίζονται με το οιονεί στατικό υποσύστημα, καθώς μας ενδιαφέρει η συμπεριφορά του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Όπως είδαμε στο πρώτο κεφάλαιο, το οιονεί στατικό σύστημα περιγράφεται από το παρακάτω σύνολο διαφορικών εξισώσεων και εξισώσεων διαφορών με αλγεβρικούς περιορισμούς:

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (2.25)$$

$$\mathbf{z}_d(k+1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k), \mathbf{p}) \quad (2.26)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (2.27)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (2.28)$$

Για λόγους απλότητας θα θεωρήσουμε μόνο συνεχείς μεταβλητές κατάστασης $\mathbf{z} = \mathbf{z}_c$ στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, οπότε και $\mathbf{h} = \mathbf{h}_c$. Ο μη ελαττωμένος Ιακωβιανός \mathbf{J}_l του οιονεί στατικού συστήματος είναι:

$$\mathbf{J}_l = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_z & \mathbf{h}_x & \mathbf{h}_y \\ \mathbf{f}_z & \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_z & \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Θεωρώντας ότι τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα είναι ευσταθή, δηλαδή ο μη ελαττωμένος Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{J}_s του βραχυπρόθεσμου προσεγγιστικού υποσυστήματος:

$$\mathbf{J}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

είναι αντιστρέψιμος, μπορεί με χρήση του Θεωρήματος Πεπλεγμένης Συνάρτησης στην (2.25) να θεωρηθεί η παρακάτω ομαλή συνάρτηση:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{H}(\mathbf{z}, \mathbf{p}) \quad (2.31)$$

Η συνθήκη ισοροπίας των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων είναι τότε:

$$\mathbf{H}(\mathbf{z}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.32)$$

ή ισοδύναμα:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.33)$$

Ο πίνακας κατάστασης υπολογίζεται από τον μη ελαττωμένο Ιακωβιανό πίνακα \mathbf{J}_l ως εξής:

$$\mathbf{H}_z = \mathbf{h}_z - [\mathbf{h}_x \quad \mathbf{h}_y] \mathbf{J}_s^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_z \\ \mathbf{g}_z \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Προκύπτει λοιπόν η παρακάτω ισοδυναμία:

$$\det \mathbf{H}_z = 0 \Leftrightarrow \det \mathbf{J}_l = 0 \quad (2.35)$$

Δηλαδή:

Η αναγκαία συνθήκη για την εμφάνιση διακλάδωσης σαγματικού κόμβου των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων είναι η μη αντιστρεψιμότητα του μη ελαττωμένου Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_l .

Αποδεικνύεται [VCV98] ότι και στο συζευγμένο (πλήρες) μοντέλο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας η αναγκαία συνθήκη για την εμφάνιση διακλάδωσης σαγματικού κόμβου είναι η μη αντιστρεψιμότητα του μη ελαττωμένου Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_l .

2.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ

Ένα σημείο λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη μόνιμη κατάσταση καθορίζεται ως το σημείο ισοροπίας των εξισώσεων (2.25)-(2.28) και μπορεί να προσδιοριστεί από την επίλυση του συστήματος των αντίστοιχων αλγεβρικών εξισώσεων ισοροπίας. Το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων ισοροπίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη μόνιμη κατάσταση περιγράφεται συνοπτικά από τη σχέση:

$$\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.36)$$

όπου $\boldsymbol{\varphi}^T = [\mathbf{h}^T, \mathbf{f}^T, \mathbf{g}^T]$ το διάνυσμα των εξισώσεων ισορροπίας, $\mathbf{u}^T = [\mathbf{x}^T, \mathbf{y}^T, \mathbf{z}^T]$ το διάνυσμα των n αλγεβρικών μεταβλητών και μεταβλητών κατάστασης σε ισορροπία και \mathbf{p} το διάνυσμα των n_p παραμέτρων του συστήματος. Σημειώνεται περαιτέρω ότι η σχέση (2.36) περιγράφει τις εξισώσεις ισορροπίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, εάν ληφθούν υπόψη μόνο οι εξισώσεις ισορροπίας (2.27) και (2.28). Στην περίπτωση αυτή το διάνυσμα των εξισώσεων ισορροπίας του συστήματος παίρνει τη μορφή $\boldsymbol{\varphi}^T = [\mathbf{f}^T, \mathbf{g}^T]$, με $\mathbf{u}^T = [\mathbf{x}^T, \mathbf{y}^T]$ το διάνυσμα των αλγεβρικών μεταβλητών και βραχυπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης σε ισορροπία και $\mathbf{p}_s^T = [\mathbf{z}^T, \mathbf{p}^T]$ το διάνυσμα των παραμέτρων του συστήματος στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, αποτελούμενο από τα διανύσματα \mathbf{z} και \mathbf{p} .

Ως *όρια φόρτισης* ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ορίζονται τα σημεία εκείνα στα οποία η ζήτηση ισχύος παρουσιάζει μέγιστη τιμή, πέραν της οποίας το σύστημα (2.36) δεν έχει λύση. Με βάση τα προηγούμενα είναι προφανές ότι υπάρχουν όρια φόρτισης στη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Στις εφαρμογές που αφορούν στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ως ανεξάρτητες παράμετροι \mathbf{p} θεωρούνται οι μεταβλητές ζήτησης ισχύος. Θεωρητικά υπάρχουν άπειροι τρόποι εύρεσης ενός ορίου φόρτισης, καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο συνδυασμό των παραμέτρων \mathbf{p} . Με μαθηματικούς όρους, ένα όριο φόρτισης ορίζεται στη γενική περίπτωση ως το τοπικό μέγιστο μιας βαθμωτής συνάρτησης $\zeta(\mathbf{p})$ των παραμέτρων υπό τους περιορισμούς (2.36) των εξισώσεων ισορροπίας, με την προϋπόθεση ότι η $\zeta(\mathbf{p})$ δεν έχει μέγιστο χωρίς περιορισμούς [MV00], οπότε:

$$\max_{\mathbf{p}, \mathbf{u}} \{ \zeta(\mathbf{p}) : \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \} \quad (2.37)$$

Όταν το σύστημα εξισώσεων (2.36) απαρτίζεται από ομαλές συναρτήσεις, στο όριο φόρτισης ο Ιακωβιανός πίνακας $\boldsymbol{\varphi}_{\mathbf{u}}$ είναι μη αντιστρέψιμος. Ένα τέτοιο μοντέλο συστήματος χαρακτηρίζεται ως *ομαλό* και σε αυτήν την περίπτωση το όριο φόρτισης είναι στη γενική περίπτωση και διακλάδωση σαγματικού κόμβου.

Ωστόσο σε ένα πραγματικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας οι συναρτήσεις (2.36) παρουσιάζουν ασυνέχειες που οφείλονται ως επί το πλείστον στις διακριτές μεταβλητές \mathbf{z}_d . Σε αυτήν την περίπτωση στο όριο φόρτισης ο Ιακωβιανός πίνακας $\boldsymbol{\varphi}_{\mathbf{u}}$ μπορεί να είναι αντιστρέψιμος και το όριο δεν ταυτίζεται με διακλάδωση σαγματικού κόμβου. Στην πράξη, σε ένα τέτοιο όριο φόρτισης πραγματοποιείται μεταγωγή από μία συνάρτηση σε μία άλλη (π.χ. μεταγωγή των γεννητριών από αυτόματη ρύθμιση τάσης σε προστασία υπερδιέγερσης [DL92, VCV98]), με αποτέλεσμα το σύνολο των εξισώσεων (2.36) να προσαυξάνεται τοπικά κατά τον αριθμό των εξισώσεων μεταγωγής. Ένα τέτοιο προσαυξημένο μοντέλο ονομάζεται *μοντέλο μεταγωγής* [Kar05].

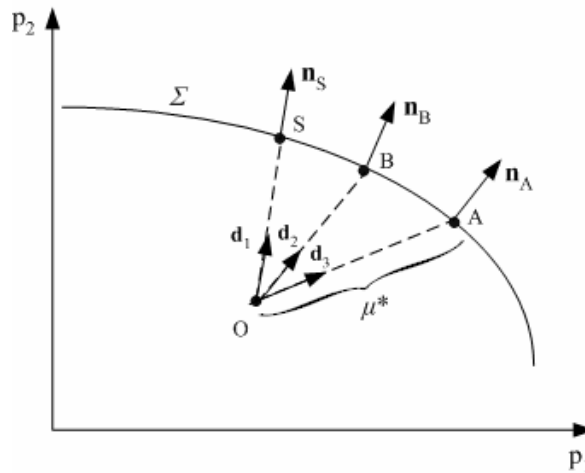
Τα όρια φόρτισης ενός συστήματος υπολογίζονται με σκοπό:

- Την εκτίμηση της ικανότητας του συστήματος να αντιμετωπίσει ασφαλώς μια προβλεπόμενη αύξηση φορτίου. Σε αυτήν την περίπτωση ξεκινώντας από τη δεδομένη λειτουργική κατάσταση του συστήματος, μεταβάλλεται η φόρτισή του με συγκεκριμένο τρόπο μέχρι να προσδιοριστεί το όριο φόρτισης.
- Την εκτίμηση της ικανότητας του συστήματος να αντιμετωπίσει ασφαλώς μια δεδομένη διαταραχή. Σε αυτήν την περίπτωση εφαρμόζεται αρχικά μια διαταραχή στο σύστημα και ακολουθεί η φόρτισή του με συγκεκριμένο τρόπο μέχρι την εύρεση του ορίου φόρτισης. Στην πράξη αυτά τα όρια φόρτισης είναι πιο χρήσιμα και συχνά χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν το επίπεδο ασφάλειας ενός ηλεκτρικού συστήματος.

Γεωμετρικά ο κατάλληλος χώρος απεικόνισης των ορίων φόρτισης είναι ο χώρος των ανεξάρτητων παραμέτρων της ζήτησης φορτίου \mathbf{p} . Ωστόσο στην ανάλυση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί συνήθη πρακτική ο χαρακτηρισμός ενός σημείου λειτουργίας με όρους ισχύος, δηλαδή σε MW και MVar. Για το λόγο αυτό, ως χώρος παραμέτρων επιλέγεται ο χώρος της ενεργού και αέργου ισχύος των φορτίων, που καλείται εν συντομία *χώρος φορτίου*. Ειδικά στην περίπτωση που θεωρείται ότι τα φορτία αποκαθιστούν σταθερή ισχύ, οι ισχείς των φορτίων είναι ανεξάρτητες παράμετροι και επομένως ο χώρος φορτίου ταυτίζεται με το χώρο των παραμέτρων.

Το σύνολο όλων των οριακών σημείων φόρτισης στο χώρο των παραμέτρων ορίζει την *επιφάνεια ορίων φόρτισης* Σ , η οποία φράσσει την περιοχή ύπαρξης λύσης, δηλαδή χωρίζει το χώρο των παραμέτρων σε μια επιτρεπόμενη περιοχή λειτουργίας και σε μια περιοχή όπου οι τιμές των παραμέτρων δεν επιτρέπουν τη λειτουργία του συστήματος. Το σύνολο των λύσεων του προβλήματος (2.37) ορίζει μια υπερεπιφάνεια (πολλαπλότητα) διάστασης $m-1$ ως επιφάνεια ορίων φόρτισης στο χώρο των παραμέτρων \mathbf{p} , διάστασης m . Στη γενική περίπτωση η επιφάνεια ορίων φόρτισης μπορεί να παρουσιάζει ασυνέχειες και να *απαρτίζεται* από διακριτές πολλαπλότητες (π.χ. σε ένα διαπαραμετρικό χώρο από καμπυλόγραμμα τμήματα) κάθε μία από τις οποίες έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Από τη σκοπιά της ασφαλούς λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι χρήσιμο να προσδιορίζεται η επιφάνεια ορίων φόρτισης σε σχέση με ένα δεδομένο ή εκτιμώμενο σημείο λειτουργίας. Στην περίπτωση που το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε κανονική κατάσταση λειτουργίας η πληροφορία αυτή παρέχει το περιθώριο ασφάλειας του συστήματος, ενώ σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης παρέχει τη γενική κατεύθυνση για τις διορθωτικές ενέργειες που πρέπει να ληφθούν προς αποκατάσταση ενός λειτουργικού σημείου.



Σχ. 2.1 Επιφάνεια ορίων φόρτισης και κάθετο διάνυσμα

Στο Σχ. 2.1 φαίνεται μια σχηματική παράσταση της επιφάνειας ορίων φόρτισης Σ στο επίπεδο δυο ανεξάρτητων παραμέτρων (φορτίων) p_1 και p_2 . Το σημείο O αντιστοιχεί στο αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος, ενώ με \mathbf{d}_i ($i=1, \dots, 3$) απεικονίζονται τρεις διαφορετικές κατευθύνσεις μεταβολής των παραμέτρων.

Να σημειωθεί ότι για κάθε μια από τις τρεις κατευθύνσεις μεταβολής των παραμέτρων \mathbf{d}_1 , \mathbf{d}_2 και \mathbf{d}_3 του Σχ. 2.1 προκύπτει ένα διαφορετικό περιθώριο φόρτισης του συστήματος. Με τον όρο *περιθώριο φόρτισης* μ^* εννοούμε την απόσταση του σημείου λειτουργίας O από το όριο φόρτισης που προκύπτει για συγκεκριμένη κατεύθυνση \mathbf{d}_i μεταβολής των παραμέτρων στο χώρο των παραμέτρων. Για τον υπολογισμό αυτής της απόστασης έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία [DL93,ADH94,VMK01] διάφορες νόρμες, όπως οι νόρμες L_1 , L_2 και L_∞ . Ειδικά για την περίπτωση φορτίων σταθερής ισχύος το περιθώριο φόρτισης μ^* αντιστοιχεί σε ισχύ (MW) και ονομάζεται *περιθώριο ισχύος*.

Με μαθηματικούς όρους, θεωρώντας ως κατεύθυνση μεταβολής των παραμέτρων (ισχύων) την κατεύθυνση \mathbf{d} , το περιθώριο φόρτισης (ισχύος) μ^* δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{p}^* = \mathbf{p}_0 + \mu^* \mathbf{d} \quad (2.38)$$

όπου:

- \mathbf{p}_0 : το διάνυσμα των αρχικών τιμών των παραμέτρων (ισχύων)
- \mathbf{p}^* : το διάνυσμα των παραμέτρων (ισχύων) στο όριο φόρτισης
- \mathbf{d} : η δεδομένη κατεύθυνση μεταβολής των παραμέτρων (ισχύων)
- μ^* : το περιθώριο φόρτισης (ισχύος) για τη δεδομένη κατεύθυνση \mathbf{d} .

Στο Σχ. 2.1 απεικονίζονται τα κάθετα διανύσματα σε τρία διαφορετικά σημεία (A , B , S) της επιφάνειας ορίων φόρτισης. Το *κάθετο διάνυσμα* \mathbf{n} σε ένα σημείο της επιφάνειας Σ ορίζεται ως το διάνυσμα εκείνο το οποίο είναι κάθετο στο εφαπτόμενο υπερεπίπεδο που διέρχεται από το σημείο αυτό της επιφάνειας [VCV98].

Στην περίπτωση του ομαλού μοντέλου, το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια ορίων φόρτισης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{n} = \boldsymbol{\varphi}_p^T \mathbf{w} \quad (2.39)$$

όπου:

$\boldsymbol{\varphi}_p$: ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος ως προς τις παραμέτρους \mathbf{p} (τετραγωνικός πίνακας)

\mathbf{w} : το αριστερό ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στη μηδενική ιδιοτιμή του Ιακωβιανού πίνακα $\boldsymbol{\varphi}_p$.

Στην περίπτωση του μοντέλου μεταγωγής το κάθετο διάνυσμα δίνεται από παρόμοια σχέση, με τη διαφορά ότι το διάνυσμα \mathbf{v} δεν αντιστοιχεί στη μηδενική ιδιοτιμή του Ιακωβιανού πίνακα $\boldsymbol{\varphi}_p$, αλλά στη μηδενική ιδιάζουσα τιμή του επαυξημένου Ιακωβιανού πίνακα $\boldsymbol{\Psi}_p$:

$$\mathbf{n} = \boldsymbol{\Psi}_p^T \mathbf{v} \quad (2.40)$$

όπου:

$\boldsymbol{\Psi}_p$: ο Ιακωβιανός πίνακας του επαυξημένου συστήματος ως προς τις παραμέτρους \mathbf{p} (ορθογώνιος πίνακας)

\mathbf{v} : το ιδιάζον διάνυσμα που αντιστοιχεί στη μηδενική ιδιάζουσα τιμή του Ιακωβιανού πίνακα $\boldsymbol{\Psi}_p$.

Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αστάθειας που οφείλεται σε ταυτόχρονη μεταγωγή περισσοτέρων διατάξεων [VMK01], για κάθε συνθήκη μεταγωγής υπάρχει ξεχωριστό σύστημα εξισώσεων $\boldsymbol{\Psi}_i$ κάθε ένα από τα οποία ορίζει ένα ξεχωριστό ιδιάζον διάνυσμα \mathbf{v}_i και κατ' επέκταση ένα ξεχωριστό κάθετο διάνυσμα \mathbf{n}_i .

Το κάθετο διάνυσμα παρέχει έναν τρόπο για να προσδιορίσουμε την «πλησιέστερη απόσταση» ενός σημείου στο χώρο των παραμέτρων από την επιφάνεια ορίων φόρτισης. Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα το σημείο S στο Σχ. 2.1. Η κατεύθυνση φόρτισης \mathbf{d}_i που εφαρμόζεται για να φτάσουμε σε αυτό το σημείο είναι συγγραμική με το κάθετο διάνυσμα στο ίδιο σημείο. Επομένως το σημείο S της επιφάνειας Σ είναι το πιο κοντινό σημείο στο O υπό την έννοια της ευκλείδειας απόστασης:

$$\|\mathbf{p} - \mathbf{p}_o\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_p} (p_i - p_{o,i})^2} \quad (2.41)$$

Ας θεωρήσουμε τώρα ένα σημείο στα δεξιά της επιφάνειας Σ , δηλαδή εκτός της περιοχής λειτουργίας. Σε ένα τέτοιο σημείο η ζήτηση δε μπορεί να ικανοποιηθεί και το σύστημα θα οδηγηθεί σε αστάθεια αφού δεν υπάρχει σημείο ισορροπίας. Σε αυτή την περίπτωση η απόσταση του σημείου από την επιφάνεια Σ εκφράζει την αναγκαία μεταβολή των παραμέτρων για να αποκατασταθεί η λειτουργία του συστήματος [Ove95,VCV98], δηλαδή ορίζει την ελάχιστη αναγκαία δράση (π.χ. αποκοπή φορτίου, αναπροσαρμογή παραγωγής κλπ.) για την αποκατάσταση σημείου ισορροπίας στο σύστημα. Η εφαρμογή του καθέτου διανύσματος στη λήψη μέτρων προστασίας για την αποφυγή αστάθειας τάσης θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα.

2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

2.3.1 Εφαρμογή της Ανάλυσης Ευαισθησιών

Οι ευαισθησίες χρησιμοποιούνται ως ένα εργαλείο ανάλυσης, συμπληρωματικό άλλων εφαρμοσμένων τεχνικών ανάλυσης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (όπως για παράδειγμα η ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων), για τη λήψη αποφάσεων τόσο στο στάδιο του μακροχρόνιου και ημερήσιου προγραμματισμού όσο και κατά τη λειτουργία και τον έλεγχο του συστήματος. Στις εφαρμογές που αφορούν στην ευστάθεια τάσης, η ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιείται ευρύτατα κατά την προσομοίωση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας για τον εντοπισμό της αστάθειας και τον προσδιορισμό των καταλλήλων μέτρων αντιμετώπισής της [VC95,VCV98]. Σημαντική είναι επίσης η εφαρμογή της στην εκτίμηση ασφάλειας τάσης. Η εκτίμηση ασφάλειας με υπολογισμό ευαισθησιών πραγματοποιείται ως επί το πλείστον στα κέντρα ελέγχου, προ της εμφάνισης της διαταραχής, με περιοδικές προσομοιώσεις της συμπεριφοράς του συστήματος για κάθε υπό εξέταση διαταραχή.

Σε επίπεδο προληπτικού ελέγχου, αναλύσεις ευαισθησίας πραγματοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό της βέλτιστης ανακατανομής της παραγωγής και λιγότερο συχνά για τον προσδιορισμό της κατάλληλης αποκοπής φορτίου. Τυπική περίπτωση συμβολής των ευαισθησιών στον προληπτικό έλεγχο είναι ο υπολογισμός τους με σκοπό την ιεράρχηση των διαθέσιμων ενεργειών ελέγχου και η μετέπειτα ελαχιστοποίηση του πλήθους των ενεργειών με χρήση μη γραμμικών προσομοιώσεων [MVC99]. Άλλη εφαρμογή αποτελεί ο προσδιορισμός με τη βοήθεια των ευαισθησιών κατάλληλων γραμμικών ανισοτικών περιορισμών για τη χρησιμοποίησή τους στη διατύπωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης [Cap03].

Σε επίπεδο ελέγχου εκτάκτου ανάγκης, οι αναλύσεις ευαισθησίας είναι κατάλληλες για τον προσδιορισμό των πιο αποδοτικών ζυγών για την εφαρμογή των μέτρων προστασίας (αποκοπή φορτίου, έλεγχος ΣΑΤΥΦ, έλεγχος αντιστάθμισης) [VCV98, VM99, Μοο03]. Η πληροφορία της ιεράρχησης των ζυγών με βάση τη αποτελεσματικότητά τους στα διάφορα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης χρησιμοποιείται ευρύτατα στη σχεδίαση σχημάτων προστασίας συστήματος από αστάθεια τάσης.

Στα πλαίσια του ελέγχου των ηλεκτρικών συστημάτων, ιδιαίτερη σημασία αποκτά η ανάλυση ευαισθησίας του περιθωρίου φόρτισης ως προς τις διάφορες παραμέτρους. Αν το περιθώριο φόρτισης που αντιστοιχεί σε ένα σημείο λειτουργίας δεν είναι επαρκές, είναι σκόπιμο να προσδιοριστεί η ποσοτική και ποιοτική επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων του ηλεκτρικού συστήματος στο περιθώριο αυτό. Την επίδραση αυτή αναδεικνύει ο υπολογισμός των ευαισθησιών, οπότε εξάγονται οι μεταβολές εκείνες των παραμέτρων που εξασφαλίζουν επαρκή περιθώρια ασφάλειας για τα διάφορα πιθανά λειτουργικά σημεία των ηλεκτρικών συστημάτων. Οι παράμετροι που ενδιαφέρουν είναι τόσο οι παράμετροι φορτίου, οπότε η δράση (αποκοπή φορτίου) αφορά έκτακτες συνθήκες λειτουργίας, όσο και παράμετροι που δεν έχουν επίδραση στους καταναλωτές, όπως οι λόγοι μετασχηματισμού των αυτομετασχηματιστών στα κέντρα ΥΥΤ και σχετίζονται κυρίως με τον προληπτικό έλεγχο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Για τον υπολογισμό των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια διάφορες προσεγγίσεις. Η πιο απλή προσέγγιση έγκειται στον επαναληπτικό υπολογισμό του περιθωρίου φόρτισης κάθε φορά που μεταβάλλονται οι παράμετροι. Μια δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί τη μέθοδο συνέχειας για να βρει ένα τμήμα της επιφάνειας ορίων φόρτισης αρχίζοντας από ένα οριακό σημείο. Προκειμένου να εντοπιστεί η περιοχή των σημείων ισορροπίας που ικανοποιούν τις οριακές συνθήκες, παράμετρος συνέχειας γίνεται η παράμετρος ελέγχου [HD01]. Στην τρίτη προσέγγιση για τον υπολογισμό των ευαισθησιών το αποτέλεσμα της μεταβολής των παραμέτρων στο περιθώριο φόρτισης μπορεί να προβλεφθεί με γραμμικοποίηση στο αρχικό οριακό σημείο, δεδομένου ότι το περιθώριο φόρτισης έχει υπολογιστεί για την αρχική τιμή των παραμέτρων.

2.3.2 Υπολογισμός Ευαισθησιών

Έστω ότι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ικανοποιώντας την εξίσωση (2.36). Ας θεωρήσουμε επίσης μία ποσότητα η , η οποία είναι συνάρτηση των μεταβλητών \mathbf{u} και των παραμέτρων \mathbf{p} του συστήματος:

$$\eta = \eta(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \quad (2.42)$$

Αν συμβεί μία μεταβολή στις παραμέτρους \mathbf{p} , το σύστημα εν γένει θα αποκαταστήσει ένα νέο σημείο ισορροπίας, το οποίο θα ικανοποιεί και πάλι την (2.36). Ως αποτέλεσμα, η ποσότητα η θα μεταβληθεί και αυτή. Για μία μικρή μεταβολή των παραμέτρων \mathbf{p} , η ευαισθησία $S_{\eta p_i}$ της ποσότητας η ως προς κάθε παράμετρο p_i δίνεται από την εξίσωση:

$$S_{\eta p_i} = \lim_{\Delta p_i \rightarrow 0} \frac{\Delta \eta}{\Delta p_i} \quad (2.43)$$

Αποδεικνύεται [VCV98] ότι η ευαισθησία $S_{\eta p_i}$ μπορεί να υπολογιστεί από το στοιχείο i του διανύσματος ευαισθησιών $\mathbf{S}_{\eta \mathbf{p}}$:

$$\mathbf{S}_{\eta \mathbf{p}} = \nabla_{\mathbf{p}} \eta - \Phi_{\mathbf{p}}^T (\Phi_{\mathbf{u}}^T)^{-1} \nabla_{\mathbf{u}} \eta \quad (2.44)$$

Με χρήση των ιδιοδιανυσμάτων της Φ_u η εξίσωση (2.44) γράφεται:

$$\mathbf{S}_{\eta p} = \nabla_p \eta - \Phi_p^T \left[\sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{w}_i \mathbf{v}_i^T}{\lambda_i} \right] \nabla_u \eta \quad (2.45)$$

όπου:

- λ_i : κάθε διακεκριμένη ιδιοτιμή i του Ιακωβιανού πίνακα Φ_u
- \mathbf{v}_i : το δεξί ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή λ_i
- \mathbf{w}_i : το αριστερό ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή λ_i .

Επειδή σε ένα όριο φόρτισης που είναι ταυτόχρονα διακλάδωση σαγματικού κόμβου ο Ιακωβιανός Φ_u είναι μη αντιστρέψιμος, δηλαδή έχει μία μηδενική ιδιοτιμή, συμπεραίνουμε ότι καθώς προσεγγίζεται ένα τέτοιο όριο φόρτισης όλες οι ευαισθησίες απειρίζονται και στη συνέχεια αλλάζουν πρόσημο. Σημειώνεται ότι τα παραπάνω ισχύουν για την περίπτωση του ομαλού μοντέλου. Όταν όμως ένα όριο φόρτισης δεν είναι διακλάδωση σαγματικού κόμβου (δηλαδή προέρχεται από το μοντέλο μεταγωγής), οι ευαισθησίες δεν απειρίζονται αλλά αποκτούν μία μεγάλη τιμή και στη συνέχεια αλλάζουν πρόσημο.

Στην προηγούμενη ενότητα αναφερθήκαμε στο περιθώριο φόρτισης ως ένα μέτρο της ασφάλειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Για όρια φόρτισης που ταυτίζονται με διακλάδωση σαγματικού κόμβου μπορεί να υπολογιστεί η ευαισθησία $S_{\mu^* p_0}$ του περιθωρίου φόρτισης ως προς τις αρχικές παραμέτρους \mathbf{p}_0 του συστήματος με βάση το αριστερό ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στη μηδενική ιδιοτιμή του Ιακωβιανού πίνακα Φ_u . Η ευαισθησία αυτή δίνεται από τη σχέση [GDA97,VCV98]:

$$\mathbf{S}_{\mu^* p_0} = -\frac{\Phi_p^T \mathbf{w}}{\mathbf{w}^T \Phi_p \mathbf{d}} = -\frac{\mathbf{n}}{\mathbf{n}^T \mathbf{d}} \quad (2.46)$$

Όταν το εξεταζόμενο όριο φόρτισης είναι όριο λόγω μιας απλής μεταγωγής στη θέση των εξισώσεων ισορροπίας Φ λαμβάνουμε τις εξισώσεις Ψ που αποτελούνται από το σύνολο των εξισώσεων ισορροπίας και των ανισοτικών περιορισμών που είναι ενεργοί στο όριο φόρτισης. Σε αυτή την περίπτωση οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς τις παραμέτρους δίνονται από τη σχέση:

$$\mathbf{S}_{\mu^* p_0} = -\frac{\Psi_p^T \mathbf{v}}{\mathbf{w}^T \Psi_p \mathbf{d}} = -\frac{\mathbf{n}}{\mathbf{n}^T \mathbf{d}} \quad (2.47)$$

Οι (2.46)-(2.47) ισχύουν για κάθε περιθώριο φόρτισης, όμως από πρακτικής απόψεως η ευαισθησία του περιθωρίου ισχύος έχει ιδιαίτερη χρησιμότητα.

Τα μεγαλύτερα στοιχεία του διάνυσματος ευαισθησιών $S_{\mu^* p_0}$ υποδεικνύουν τα φορτία των οποίων οι μεταβολές ισχύος έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στο περιθώριο ισχύος, ή ισοδύναμα τα φορτία των οποίων ο κατάλληλος χειρισμός (π.χ. αποκοπή) είναι περισσότερο ευεργετικός για την αύξηση του περιθωρίου ισχύος. Παρόμοια στην περίπτωση όπου το διάνυσμα παραμέτρων δεν ταυτίζεται με την ισχύ των φορτίων, η σχέση (2.46) ή (2.47) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό άλλων παραμέτρων του ηλεκτρικού συστήματος των οποίων οι μεταβολές έχουν σημαντική επίδραση στο περιθώριο ισχύος.

Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να ενδιαφέρει η επίδραση συγκεκριμένων μόνο παραμέτρων στο περιθώριο φόρτισης του συστήματος. Αν οι παράμετροι αυτές χαρακτηριστούν ως \mathbf{p}_1 , οι υπόλοιπες παράμετροι \mathbf{p}_2 του συστήματος δεν συμμετέχουν στον προσδιορισμό του περιθωρίου φόρτισης και θεωρούνται σταθερές. Έτσι το διάνυσμα των παραμέτρων \mathbf{p} και το διάνυσμα κατεύθυνσης \mathbf{d} παίρνουν τη μορφή:

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{p}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{0,1} \\ \mathbf{p}_{0,2} \end{bmatrix} \quad \mathbf{d} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

όπου το διάνυσμα κατεύθυνσης \mathbf{d} καθορίζεται αποκλειστικά από την κατεύθυνση μεταβολής \mathbf{d}_1 των καθοριστικών παραμέτρων \mathbf{p}_1 του συστήματος.

Στην περίπτωση αυτή η ευαισθησία του περιθωρίου φόρτισης ως προς τις παραμέτρους \mathbf{p}_1 δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{S}_{\mu^* \mathbf{p}_{0,1}} = -\frac{\boldsymbol{\varphi}_{\mathbf{p}_1}^T \mathbf{w}}{\mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}_{\mathbf{p}_1} \mathbf{d}_1} \quad (2.49)$$

ενώ η ευαισθησία του περιθωρίου φόρτισης ως προς τις παραμέτρους \mathbf{p}_2 δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{S}_{\mu^* \mathbf{p}_{0,2}} = -\frac{\boldsymbol{\varphi}_{\mathbf{p}_2}^T \mathbf{w}}{\mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}_{\mathbf{p}_1} \mathbf{d}_1} \quad (2.50)$$

Από πρακτικής σκοπιάς, οι μεγαλύτερες ευαισθησίες $\mathbf{S}_{\mu^* \mathbf{p}_{0,1}}$ υποδεικνύουν τα φορτία ή τις γεννήτριες με τη μεγαλύτερη επίδραση στο περιθώριο φόρτισης ή ισοδύναμα τα πιο αποδοτικά από τα φορτία και τις γεννήτριες για την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης. Ομοίως οι ευαισθησίες $\mathbf{S}_{\mu^* \mathbf{p}_{0,2}}$ υποδεικνύουν ποιες από τις υπόλοιπες παραμέτρους επιδρούν περισσότερο στο περιθώριο φόρτισης παρόλο που δε μεταβάλλονται κατά τον υπολογισμό του. Τυπικό παράδειγμα ευαισθησίας αυτής της περίπτωσης αποτελεί η ευαισθησία του περιθωρίου φόρτισης ως προς τις αντιδράσεις των κλάδων ενός ηλεκτρικού δικτύου, οι οποίες υποδεικνύουν του κρίσιμους κλάδους του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για ένα δεδομένο σενάριο αστάθειας ή αντίστοιχα τη βέλτιστη τοποθεσία για την εγκατάσταση διατάξεων αντιστάθμισης.

2.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΗ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ

Στην παρούσα διατριβή η ανάλυση επικεντρώνεται σε φαινόμενα αστάθειας τάσης που εξελίσσονται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα εξέλιξης των δυναμικών φαινομένων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Για την αξιολόγηση των μέτρων αντιμετώπισης της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, όπου η χρονική στιγμή λήψης των διορθωτικών μέτρων είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, απαιτούνται χρονικές προσομοιώσεις του συστήματος. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι αυτή της οιονεί στατικής προσομοίωσης [VCV98], η οποία περιγράφηκε στο πρώτο κεφάλαιο (παράγραφος 1.6.2).

Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιείται το πρόγραμμα WPSTAB [Man98, Vou99], το οποίο αναπτύχθηκε στο εργαστήριο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το WPSTAB είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, κατάλληλο για τον υπολογισμό των περιθωρίων φόρτισης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η καρδιά του προγράμματος εντοπίζεται στη μέθοδο της οιονεί στατικής προσέγγισης, επομένως η συμπεριφορά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας προσομοιώνεται με τη διαδοχική επίλυση του συστήματος των εξισώσεων ισορροπίας \mathbf{f} , των διαφορικών εξισώσεων ή εξισώσεων διαφορών \mathbf{h} και των αλγεβρικών περιορισμών \mathbf{g} , που συνθέτουν το οιονεί στατικό υποσύστημα. Η δομή του οιονεί στατικού συστήματος στο πρόγραμμα περιγράφεται από τις εξισώσεις (2.25)-(2.28).

Για τις ανάγκες της διατριβής αυτής έγινε αναβάθμιση του λογισμικού του προγράμματος WPSTAB, ώστε να περιληφθούν τα μέτρα προστασίας από αστάθεια τάσης που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια και τα οποία αποτελούν το αντικείμενο της διατριβής. Τα μέτρα προστασίας, αλλά και διάφορα μοντέλα διατάξεων και ειδικών προστασιών του συστήματος, που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής αυτής, διαμορφώθηκαν σε ένα ολοκληρωμένο *πακέτο προστασίας* (protection module), το οποίο ενσωματώθηκε στη βασική έκδοση του WPSTAB και επιτρέπει τη μελλοντική χρήση τους στο πρόγραμμα. Η αναλυτική περιγραφή των συνιστωσών που συνθέτουν αυτό το πακέτο προστασίας θα παρουσιαστεί σε επόμενα κεφάλαια.

2.4.1 Παράσταση Διατάξεων

Οι διατάξεις του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα που περιγράφονται από διαφορικές εξισώσεις ή εξισώσεις διαφορών και μοντελοποιούνται στο πρόγραμμα είναι οι εξής:

- Τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των γεννητριών.
- Τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης.
- Οι ιδεατοί μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης πίσω από φορτία που συνδέονται στην ΥΤ.
- Οι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζευξης στατών διατάξεων αντιστάθμισης.

Οι διατάξεις του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα που περιγράφονται από εξισώσεις ισορροπίας και μοντελοποιούνται στο πρόγραμμα είναι οι εξής:

- Οι σύγχρονες γεννήτριες.
- Οι ρυθμιστές στροφών.
- Οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης των γεννητριών.
- Οι κινητήρες επαγωγής (που δεν εξετάζονται σε αυτήν την εργασία).

Τέλος, το δίκτυο μεταφοράς περιγράφεται από τις εξισώσεις ροής ισχύος που αποτελούν τους αλγεβρικούς περιορισμούς (2.28) του συστήματος αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων.

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των προαναφερόμενων μοντέλων του προγράμματος και παρουσιάζονται οι εξισώσεις που συνθέτουν το οιονεί στατικό σύστημα.

Σύγχρονες γεννήτριες

Για την παράσταση των σύγχρονων γεννητριών χρησιμοποιείται το μοντέλο μόνιμης κατάστασης [Kun94], το οποίο περιγράφει τη μηχανή με ένα μόνο κύκλωμα στο δρομέα της, αυτό του τυλίγματος διέγερσης. Το μοντέλο αυτό αν και βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές έχει ικανοποιητική εφαρμογή στην ανάλυση των φαινομένων ευστάθειας τάσης. Η επίδραση του κορεσμού του μαγνητικού κυκλώματος της γεννήτριας στη συμπεριφορά της λαμβάνεται υπόψη.

Οι εκφράσεις (2.51) και (2.52) της παραγόμενης ενεργού P_g και αέργου Q_g ισχύος αντίστοιχα της γεννήτριας, η εξίσωση (2.53) για τον υπολογισμό του συντελεστή κορεσμού f_{sat} και η εξίσωση (2.54) του ισοζυγίου ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος στη μόνιμη κατάσταση αποτελούν τις εξισώσεις ισορροπίας της σύγχρονης γεννήτριας και περιλαμβάνονται στο σύστημα εξισώσεων (2.27).

$$P_g = \frac{KE_f V}{X_l + K(X_d - X_l)} \sin(\delta - \theta) + \frac{V^2}{2} \left(\frac{\sin 2(\delta - \theta)}{X_l + K(X_q - X_l)} - \frac{\sin 2(\delta - \theta)}{X_l + K(X_d - X_l)} \right) \quad (2.51)$$

$$Q_g = \frac{KE_f V}{X_l + K(X_d - X_l)} \cos(\delta - \theta) - V^2 \left(\frac{\sin^2(\delta - \theta)}{X_l + K(X_q - X_l)} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_l + K(X_d - X_l)} \right) \quad (2.52)$$

$$f_{sat} = \left[\left(1 - \frac{X_l}{X_l + K(X_d - X_l)} \right) V \cos(\delta - \theta) + \frac{X_l}{X_l + K(X_d - X_l)} KE_f \right]^2 + \left[\left(1 - \frac{X_l}{X_l + K(X_q - X_l)} \right) V \sin(\delta - \theta) \right]^2 - \left(\frac{1}{Km} - \frac{1}{m} \right)^2 = 0 \quad (2.53)$$

$$P_g = P_m - D(\omega_{sys} - 1) \quad (2.54)$$

όπου:

- X_d, X_q : οι σύγχρονες αντιδράσεις ευθέως και εγκάρσιου άξονα αντίστοιχα
- X_l : η αντίδραση σκεδάσεως του στάτη
- E_f, V : η τάση διέγερσης και η τερματική τάση αντίστοιχα της γεννήτριας
- $\delta - \theta$: η εσωτερική γωνία ή γωνία ροπής
- D : ο συντελεστής απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων
- K : ο συντελεστής κορεσμού του μαγνητικού κυκλώματος της γεννήτριας
- m, n : οι σταθερές του μοντέλου κορεσμού
- ω_{sys} : η ενιαία συχνότητα του συστήματος.

Ρυθμιστής στροφών

Για την παράσταση του ρυθμιστή στροφών των γεννητριών θεωρείται ένα απλουστευμένο μοντέλο [Man98], στο οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος του στροβίλου. Κάθε μονάδα που συμμετέχει στη ρύθμιση φορτίου - συχνότητας συνεισφέρει στις μεταβολές ισχύος του συστήματος βάσει του στατισμού της (πρωτεύουσα ρύθμιση).

Η ακόλουθη εξίσωση που δίνει τη μηχανική ισχύ εισόδου P_m στον άξονα της γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση, προσθέτει μια ακόμη εξίσωση ισορροπίας στο σύνολο των εξισώσεων (2.27).

$$P_m = P_{mo} - \frac{1}{R_g} (\omega_{sys} - 1), \quad P_m^{min} \leq P_m \leq P_m^{max} \quad (2.55)$$

όπου P_{mo} η τιμή αναφοράς της μηχανικής ισχύος του στροβίλου, P_m^{max} , P_m^{min} η μέγιστη και ελάχιστη αντίστοιχα επιτρεπόμενη ισχύς εξόδου του στροβίλου για συνεχή λειτουργία της γεννήτριας και R_g ο στατισμός της γεννήτριας.

Αυτόματος ρυθμιστής τάσης

Για την παράσταση της αυτόματης ρύθμισης τάσης των σύγχρονων γεννητριών χρησιμοποιείται το μοντέλο του αναλογικού APT με στρεφόμενη ή στατή διέγερση [Man98], το οποίο περιγράφεται από την εξίσωση ισορροπίας (2.56) που περιλαμβάνεται στο σύστημα εξισώσεων (2.27).

$$E_f = G_{AVR} (V_{ref} - V), \quad E_f^{min} \leq E_f \leq E_f^{max} \quad (2.56)$$

όπου G_{AVR} το κέρδος του APT, V_{ref} η τάση αναφοράς της γεννήτριας και E_f^{max} , E_f^{min} η μέγιστη και ελάχιστη αντίστοιχα επιτρεπόμενη ΗΕΔ διέγερσης για συνεχή λειτουργία της γεννήτριας.

Σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης

Για την παράσταση του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης των γεννητριών χρησιμοποιείται το μοντέλο με αναλογική - ολοκληρωτική μονάδα ελέγχου [VMS99]. Ο τύπος αυτός συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης περιορίζει το ρεύμα διέγερσης I_f στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή συνεχούς λειτουργίας I_f^{lim} εφόσον εντοπίσει υπέρβαση του ορίου αυτού πέραν μιας σταθερής χρονικής καθυστέρησης T_{oxi} :

$$I_f = I_f^{lim} \quad (2.57)$$

Επιλέγοντας ως βασικό ρεύμα διέγερσης I_{fB} το ρεύμα διέγερσης που παράγει τάση 1 αμ πάνω στην ευθεία διακένου του στάτη, η ανά μονάδα τιμή της ΗΕΔ διέγερσης E_f της γεννήτριας είναι στη μόνιμη κατάσταση ίση με την ανά μονάδα τιμή του ρεύματος πεδίου I_f :

$$E_f = I_f = I_f^{lim} = E_f^{lim} \quad (2.58)$$

Η (2.58) αποτελεί την εξίσωση ισορροπίας ενός συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης διακοπτικού τύπου και περιλαμβάνεται στο σύστημα των εξισώσεων ισορροπίας (2.27).

Σημειώνεται ότι το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης εντάσσεται στις διατάξεις που δρουν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, καθώς η χρονική καθυστέρηση T_{oxi} είναι της τάξης αρκετών δευτερολέπτων. Η ενεργοποίηση του περιορισμού υπερδιέγερσης καθορίζεται από μία μακροπρόθεσμη συνεχή μεταβλητή κατάστασης x_i , η οποία συμπεριφέρεται ουσιαστικά ως μετρητής του χρόνου της υπερδιέγερσης και εναλλάσσει τη λειτουργία της γεννήτριας από λειτουργία σε αυτόματη ρύθμιση τάσης σε λειτουργία με προστασία υπερδιέγερσης. Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την παραπάνω διαδικασία ολοκλήρωσης του χρόνου έχει τη μορφή της ακόλουθης συνάρτησης και περιλαμβάνεται στο σύστημα εξισώσεων (2.25).

$$\dot{x}_i = h_c (I_f - I_f^{lim}) \quad (2.59)$$

Όταν η μακροπρόθεσμη συνεχής μεταβλητή x_i πάρει την κατάλληλη τιμή, ενεργοποιείται μια διακριτή μετάβαση από τη συνθήκη ισορροπίας (2.56) του αυτόματου ρυθμιστή τάσης, στη συνθήκη ισορροπίας (2.58) του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης.

Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ

Η παράσταση των μετασχηματιστών σταθερής λήψης γίνεται με το ισοδύναμο-π κύκλωμα [Kun94]. Για τους μετασχηματιστές με μεταβλητή λήψη χρησιμοποιείται το διακριτό μοντέλο ΣΑΤΥΦ [VCV98] με τη μεταβλητή λήψη στο τύλιγμα πρωτεύοντος του μετασχηματιστή, καθώς αυτή είναι η διάταξη που έχουν τα ΣΑΤΥΦ στους μετασχηματιστές ρύθμισης του Ελληνικού συστήματος. Η επιλογή αυτή γίνεται για τους εξής κυρίως λόγους:

- Το ρεύμα στην πλευρά ΥΤ είναι μικρότερο, με αποτέλεσμα η μεταγωγή να γίνεται ευκολότερα και με μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης ηλεκτρικού σπινθήρα.
- Συνήθως στην πλευρά ΥΤ υπάρχουν περισσότερες σπείρες και άρα η ρύθμιση τάσης πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η δυναμική συμπεριφορά του μοντέλου ΣΑΤΥΦ περιγράφεται από την παρακάτω διακριτή εξίσωση:

$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, & \text{αν } V_2 > V_2^o + d \text{ και } r_k < r_{max} \\ r_k - \Delta r, & \text{αν } V_2 < V_2^o - d \text{ και } r_k > r_{min} \\ r_k & , \text{ σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (2.60)$$

όπου:

- V_2 : η τάση δευτερεύοντος του μετασχηματιστή
 V_2^o : η τιμή αναφοράς της τάσης δευτερεύοντος
 $2d$: το εύρος της νεκρής ζώνης της τάσης αναφοράς
 r_k : ο λόγος μετασχηματισμού
 Δr : το βήμα αλλαγής της λήψης.

Κατά τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ θεωρείται αρχική χρονική καθυστέρηση T_{d1} και επακόλουθη χρονική καθυστέρηση T_{d2} . Έτσι η πρώτη αλλαγή του βήματος γίνεται μετά από χρόνο T_{d1} , ενώ οι επόμενες μετά από χρόνο T_{d2} .

Σημειώνεται επίσης ότι τα όρια ρύθμισης του λόγου μετασχηματισμού έχουν μεγάλη επίδραση στη λειτουργία των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης και άρα στην ευστάθεια τάσης του συστήματος. Τα όρια αυτά έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$r_{min} \leq r \leq r_{max} \quad (2.61)$$

Υπάρχουν επίσης φορτία συνδεδεμένα απευθείας στην ΥΤ (συνήθως βιομηχανικοί καταναλωτές), για τα οποία δεν υπάρχει μοντέλο μετασχηματιστή. Για τη μοντελοποίηση της αποκατάστασης της ισχύος στα φορτία αυτά, τα οποία αντιπροσωπεύουν ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης, χρησιμοποιείται η υπόθεση ύπαρξης ιδεατών μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης.

Οι *ιδεατοί μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης πίσω από φορτία που συνδέονται στην ΥΤ* ελέγχουν την τάση ενός φανταστικού ζυγού ΜΤ γύρω από μία τιμή αναφοράς, κατά παρόμοιο τρόπο με αυτόν της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ. Η διαφορά έγκειται στο ότι στους μετασχηματιστές αυτούς η μεταβλητή λήψη θεωρείται στο δευτερεύον τύλιγμα. Η λειτουργία τους περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση διαφορών, όπου V_2 είναι τώρα η τάση του ελεγχόμενου (φανταστικού) ζυγού ΜΤ.

$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k - \Delta r, & \text{αν } V_2 > V_2^o + d \text{ και } r_k < r_{min} \\ r_k + \Delta r, & \text{αν } V_2 < V_2^o - d \text{ και } r_k > r_{max} \\ r_k & , \text{ σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (2.62)$$

Κατά τη λειτουργία του φανταστικού μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ιδεατών μετασχηματιστών πίσω από φορτία ΥΤ, θεωρείται πάλι αρχική χρονική καθυστέρηση T_{d1} και επακόλουθη χρονική καθυστέρηση T_{d2} . Επίσης υπάρχουν πεπερασμένα όρια ρύθμισης του λόγου μετασχηματισμού, της μορφής (2.61). Οι εξισώσεις (2.60) και (2.62) εντάσσονται στο σύστημα των εξισώσεων διαφορών (2.26).

Φορτία

Το μοντέλο φορτίου που έχει υιοθετηθεί στο πρόγραμμα είναι αυτό του εκθετικού φορτίου (στατικό μοντέλο), όπου η ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος παριστάνεται αντίστοιχα από τις ακόλουθες εκθετικές εξισώσεις [Kun94,PSL95,VCV98]:

$$P = z_P P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^\alpha \quad (2.63)$$

$$Q = z_Q Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^\beta \quad (2.64)$$

όπου z_P και z_Q είναι αδιάστατες μεταβλητές ζήτησης που σχετίζονται με το πλήθος του συνδεδεμένου εξοπλισμού, $z_P P_o$ και $z_Q Q_o$ είναι αντίστοιχα η κατανάλωση ενεργού και αέργου ισχύος στο σημείο της αρχικοποίησης (αποκαλούμενες και ονομαστική ενεργός και άεργος ισχύς φορτίου αντίστοιχα), V_o είναι η τάση στο αρχικό σημείο, V είναι η εφαρμοζόμενη τάση στο φορτίο, ενώ οι εκθέτες α και β χαρακτηρίζουν τον τύπο του φορτίου.

Τρεις βασικές κατηγορίες φορτίων εκθετικού τύπου είναι οι ακόλουθες:

- $\alpha=\beta=2$: Φορτίο σταθερής αγωγιμότητας.
- $\alpha=\beta=1$: Φορτίο σταθερού ρεύματος.
- $\alpha=\beta=0$: Φορτίο σταθερής ισχύος.

Αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης – απόζευξης στατών διατάξεων αντιστάθμισης

Οι στατές διατάξεις αντιστάθμισης αέργου ισχύος σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι πυκνωτές και τα πηνία. Σε ορισμένους ζυγούς του Ελληνικού συστήματος, που διαθέτουν στατές διατάξεις αντιστάθμισης, υπάρχουν εγκατεστημένοι τέτοιοι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης - απόζευξης [VSK06]. Οι μηχανισμοί αυτοί παίζουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση των τάσεων του δικτύου σε ικανοποιητικά επίπεδα, εξαιτίας της ισχυρής εξάρτησης της τάσης από την παροχή αέργου ισχύος.

Η αρχή λειτουργίας των αυτόματων μηχανισμών ζεύξης – απόζευξης είναι η εξής: Όταν η τάση V στον ελεγχόμενο ζυγό πέσει κάτω από κάποια επιθυμητή τιμή V_{des} προκαλείται ζεύξη (εφόσον πρόκειται για πυκνωτές) ή απόζευξη (εφόσον πρόκειται για πηνία) της διάταξης αντιστάθμισης. Με τον τρόπο αυτό συνδέοντας διαδοχικά πυκνωτές καλύπτεται από τοπική πηγή η ανεπάρκεια του ζυγού σε άεργο ισχύ, ενώ ανάλογα αποσυνδέοντας πηνία εγχέεται στο δίκτυο η πλεονάζουσα άεργος ισχύς που καταναλισκόταν στο πηνίο. Αντίστοιχα αν η τάση του ελεγχόμενου ζυγού ξεπεράσει ένα άνω όριο, τότε αποσυνδέονται διαδοχικά πυκνωτές ή συνδέεται ξανά το πηνίο, για να επανέλθει η τάση στα επιθυμητά επίπεδα.

Η διαδικασία της ζεύξης - απόζευξης πυκνωτών και πηνίων γίνεται με κάποια καθυστέρηση (συνήθως μερικών δεκάδων δευτερολέπτων) από τη στιγμή που θα παρατηρηθούν ανεπιθύμητες τάσεις στο ζυγό. Ο ρόλος της χρονικής καθυστέρησης είναι να αποτρέπει άσκοπες ρυθμίσεις, οι οποίες μπορεί να προκληθούν από μεταβατικές μεταβολές της τάσης.

Η προαναφερθείσα λειτουργία των αυτόματων μηχανισμών ζεύξης - απόζευξης περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση διαφορών [Man98]:

$$B_{k+1} = \begin{cases} B_k + \Delta B, & \text{αν } V < V_{des} - \varepsilon \\ B_k, & \text{αν } |V - V_{des}| < \varepsilon \\ B_k - \Delta B, & \text{αν } V > V_{des} + \varepsilon \end{cases} \quad \text{με } B_{min} \leq B \leq B_{max} \quad (2.65)$$

όπου V είναι η τάση του ελεγχόμενου ζυγού, V_{des} η επιθυμητή τάση, ε μια ανοχή της ρύθμισης, ΔB η μεταβολή της αγωγιμότητας (που θεωρείται πάντοτε θετική) και B είναι η συνολική αγωγιμότητα της αντιστάθμισης στο ζυγό. Για πυκνωτές ισχύει $B \geq 0$, ενώ για πηνία $B \leq 0$. Η σύνδεση ή αποσύνδεση των στατών διατάξεων αντιστάθμισης γίνεται σε χρονικές στιγμές $t_k = k\Delta T$, όπου ΔT η αναγκαία χρονική καθυστέρηση. Η εξίσωση διαφορών (2.65) περιλαμβάνεται στο σύστημα εξισώσεων (2.26).

Δίκτυο

Οι εξισώσεις δικτύου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να διατυπωθούν με τη βοήθεια του Σχ. 2.2 που απεικονίζει έναν τυπικό ζυγό. Η γραμμή μεταξύ των ζυγών k και m παριστάνεται με το ονομαστικό κύκλωμα π . Στο Σχ. 2.2 οι S_{Gk} και S_{Lk} είναι αντίστοιχα η φαινόμενη παραγωγή και η φαινόμενη ισχύς του φορτίου του ζυγού k . Στο ίδιο Σχήμα η Y_{km} παριστάνει την αγωγιμότητα σειράς και οι Y_{skm} και Y_{smk} τις εγκάρσιες αγωγιμότητες της γραμμής μεταφοράς ή του μετασχηματιστή. Οι αγωγιμότητες αυτές μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$Y_{km} = g_{km} + jb_{km} \quad (2.66)$$

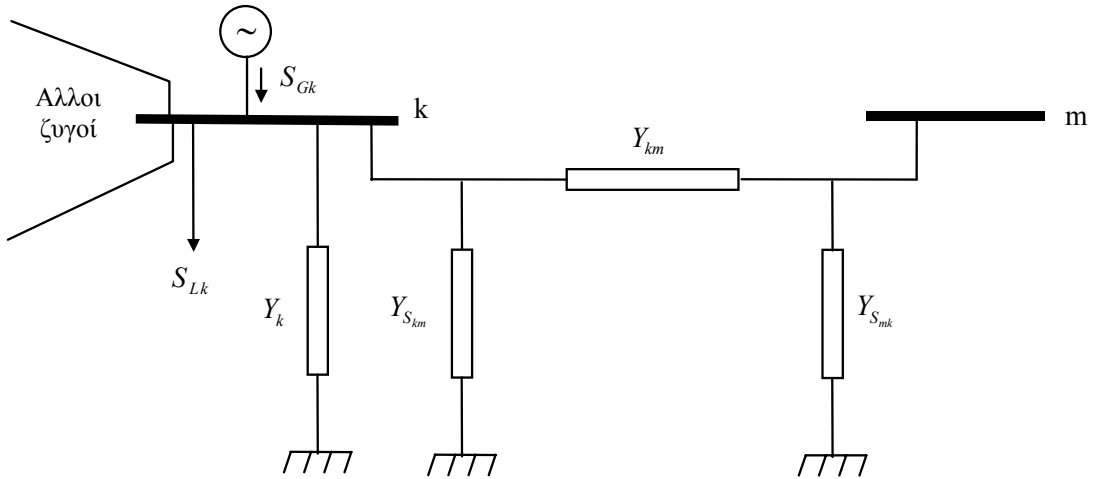
$$Y_{skm} = g_{skm} + jb_{skm} \quad (2.67)$$

$$Y_{smk} = g_{smk} + jb_{smk} \quad (2.68)$$

Στη γενική περίπτωση μπορεί να υπάρχουν περισσότερες από μία γραμμές που να συνδέουν τους ζυγούς k και m . Τότε η συνολική σύνθετη αντίσταση μεταξύ των ζυγών k και m προκύπτει από τον παράλληλο συνδυασμό των επιμέρους αντιστάσεων των γραμμών μεταφοράς ή μετασχηματιστών. Στο ζυγό k είναι επίσης συνδεδεμένη μια εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα:

$$Y_k = g_k + jb_k \quad (2.69)$$

η οποία παριστάνει οποιοδήποτε συνδυασμό πυκνωτών, αυτεπαγωγών ή φορτίων σταθερής αγωγιμότητας πάνω στο ζυγό. Η τάση στο ζυγό k είναι $\vec{V}_k = V_k \angle \theta_k$, ενώ η τάση στο ζυγό m είναι $\vec{V}_m = V_m \angle \theta_m$.



Σχ. 2.2 Γενικευμένος ζυγός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η συνολική ροή ενεργού και αέργου ισχύος από το ζυγό k δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις ροής ισχύος [CH01]:

$$P_{NET_k}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = V_k^2 \sum_{m \in A_k} (g_{km} + g_{skm}) + V_k^2 g_k - V_k \sum_{m \in A_k} V_m \alpha_{km} \quad (2.70)$$

$$Q_{NET_k}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = -V_k^2 \sum_{m \in A_k} (b_{km} + b_{skm}) + V_k^2 b_k - V_k \sum_{m \in A_k} V_m \beta_{km} \quad (2.71)$$

όπου:

$$\alpha_{km} = g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (2.72)$$

$$\beta_{km} = g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) \quad (2.73)$$

και A_k το σύνολο των γραμμών που συνδέονται με το ζυγό k . Τα $\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}$ είναι διανύσματα των τάσεων και των γωνιών των ζυγών του δικτύου αντίστοιχα. Για ένα σύστημα N ζυγών υπάρχουν N σχέσεις της μορφής (2.70) και N σχέσεις της μορφής (2.71).

2.4.2 Μέθοδος Επίλυσης

Κατά την προσομοίωση, το σύστημα των εξισώσεων ισορροπίας που παρατέθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, επιλύεται με την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson. Επιλύεται επομένως ένα γραμμικό σύστημα της μορφής (1.36), με τη διαφορά ότι αυτό επαυξάνεται κατά μία ακόμα εξίσωση που αντιστοιχεί στην ενιαία συχνότητα του συστήματος ω_{sys} . Συνεπώς, οι άγνωστες μεταβλητές του συστήματος των εξισώσεων ισορροπίας είναι οι εξής:

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\delta}, \mathbf{y}^T = [\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{V}^T \omega_{sys}]^T \quad (2.74)$$

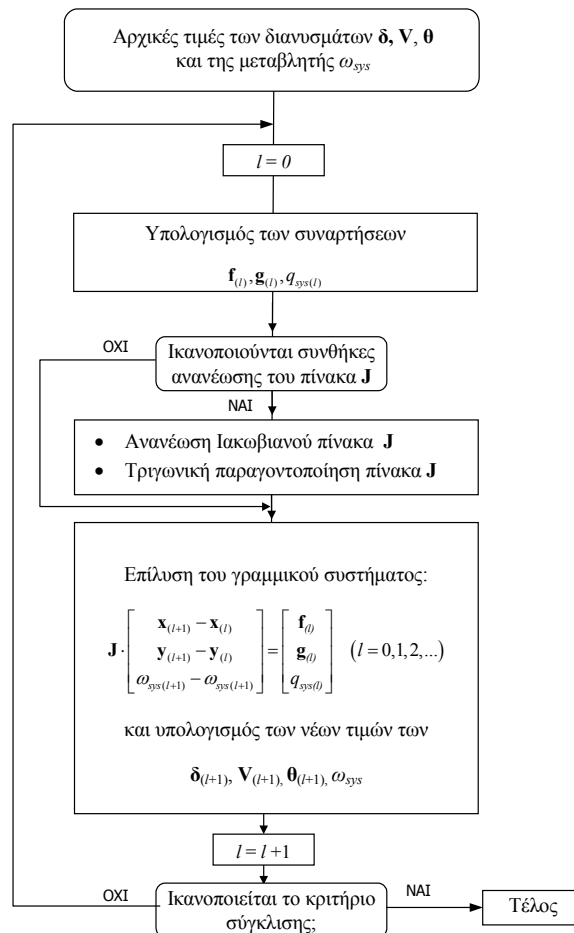
όπου $\boldsymbol{\delta}$ οι γωνίες δρομέα των γεννητριών του συστήματος, $\boldsymbol{\theta}$ οι γωνίες των τάσεων των ζυγών και \mathbf{V} τα μέτρα των τάσεων των ζυγών εκτός των ζυγών σταθερής τάσης.

Πιο συγκεκριμένα, ένα σημείο ισορροπίας του συστήματος $[\boldsymbol{\delta}^T \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{V}^T \omega_{sys}]^T$ προκύπτει επιλύοντας επαναληπτικά μια ακολουθία γραμμικών συστημάτων της μορφής:

$$\mathbf{J} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{(l+1)} - \mathbf{x}_{(l)} \\ \mathbf{y}_{(l+1)} - \mathbf{y}_{(l)} \\ \omega_{sys(l+1)} - \omega_{sys(l)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{(l)} \\ \mathbf{g}_{(l)} \\ q_{sys(l)} \end{bmatrix} \quad (l = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.75)$$

όπου \mathbf{J} ο Ιακωβιανός πίνακας των εξισώσεων ισορροπίας του συστήματος και q_{sys} η εξίσωση ορισμού της γωνίας αναφοράς του συστήματος. Ο δείκτης l αντιστοιχεί σε πλήθος ανακυκλώσεων της αριθμητικής μεθόδου.

Το γραμμικό σύστημα (2.75) επιλύεται με τη μέθοδο της ευθείας και αντιστρόφου αντικατάστασης. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την τριγωνική παραγοντοποίηση του Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J} , η οποία πραγματοποιείται με τη μέθοδο απαλοιφής Gauss [CH01]. Για την απλοποίηση των υπολογισμών χρησιμοποιούνται τεχνικές αραιών πινάκων.



Σχ. 2.3 Διάγραμμα ροής διαδικασίας επίλυσης εξισώσεων ισορροπίας του συστήματος

Στο Σχ. 2.3 φαίνεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας επίλυσης των εξισώσεων ισορροπίας του συστήματος. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, οι αρχικές τιμές των μεταβλητών x , y και ω_{sys} προέρχονται από προηγούμενες τιμές των ίδιων μεταβλητών. Οι μακροπρόθεσμες μεταβλητές κατάστασης z που σχετίζονται με διατάξεις (ΣΑΤΥΦ, συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης κλπ.) που δρουν σε διακριτές χρονικές στιγμές, παραμένουν σταθερές κατά την επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας.

Δεδομένου ότι η δυσκολότερη υπολογιστικά διαδικασία είναι η τριγωνική παραγοντοποίηση του Ιακωβιανού πίνακα J , η ανανέωσή του πραγματοποιείται μόνο όταν συντρέχουν οι εξής λόγοι:

- Αλλάζει η τοπολογία του δικτύου (άνοιγμα-κλείσιμο διακοπών).
- Η σύγκλιση δεν έχει επιτευχθεί μετά από συγκεκριμένο αριθμό ανακυκλώσεων.
- Συμβαίνει μεταβολή στο σύστημα (ενεργοποίηση συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης).
- Συμβαίνει μεγάλη διαταραχή στις παραγωγές ή στα φορτία του συστήματος.

2.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ

2.5.1 Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης

Όπως γνωρίζουμε τα φαινόμενα αστάθειας τάσης εξελίσσονται σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Με βάση το διαχωρισμό των χρονικών κλιμάκων που παρουσιάστηκε ήδη, προχωρούμε περαιτέρω στην κατηγοριοποίηση των μηχανισμών αστάθειας τάσης [VCV98].

Μηχανισμοί βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης

Κινητήρια δύναμη της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης αποτελεί η δυναμική συμπεριφορά ορισμένων φορτίων να αποκαταστήσουν την ισχύ που καταναλώνουν εντός δευτερολέπτου. Γίνεται αντιληπτό ότι το χρονικό πλαίσιο εντός του οποίου εξελίσσεται η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης συμπίπτει με αυτό της μεταβατικής ευστάθειας γωνίας και για αυτό είναι γνωστή και ως *μεταβατική κατάρρευση τάσης* [Tay94].

Στο χρονικό διάστημα αμέσως μετά από μία διαταραχή, οι αργές δυναμικές του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας δεν προλαβαίνουν να αποκριθούν. Κατά συνέπεια, οι μεταβλητές κατάστασης z που τις περιγράφουν μπορούν να θεωρηθούν σταθερές, οδηγώντας στο βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα που περιγράφεται στο πρώτο κεφάλαιο (παράγραφος 1.6.1).

Οι τρεις κύριοι μηχανισμοί αστάθειας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι οι παρακάτω:

- ΒΠ1: Απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας μετά από διαταραχή.
- ΒΠ2: Απώλεια έλξης προς το ευσταθές βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας μετά από διαταραχή.
- ΒΠ3: Ταλαντωτική αστάθεια του σημείου ισορροπίας μετά τη διαταραχή.

Μία τυπική περίπτωση αστάθειας τάσης τύπου ΒΠ1 αποτελεί το φαινόμενο της οριστικής επιβράδυνσης των κινητήρων επαγωγής μετά από την εμφάνιση μίας διαταραχής, η οποία προκαλεί μεγάλη αύξηση στη συνολική επαγωγική αντίδραση του συστήματος μεταφοράς που «βλέπουν» οι κινητήρες. Λόγω της αύξησης αυτής είναι δυνατό οι καμπύλες μηχανικής και ηλεκτρικής ροπής ορισμένων κινητήρων να μην παρουσιάζουν σημείο τομής με αποτέλεσμα το σύστημα να χάσει βραχυπρόθεσμα το σημείο ισορροπίας του. Ως αποτέλεσμα, οι κινητήρες επιβραδύνονται μέχρι την ακινησία και οι τάσεις του συστήματος καταρρέουν.

Μία τυπική περίπτωση αστάθειας τάσης τύπου ΒΠ2 αποτελεί το φαινόμενο της προσωρινής επιβράδυνσης των κινητήρων επαγωγής μετά από την εμφάνιση ενός βραχυκυκλώματος. Όταν η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται καθυστερημένα, οι κινητήρες (ιδιαίτερα οι κινητήρες μεγάλης ονομαστικής ισχύος) δε μπορούν να επιταχυνθούν ξανά μετά την εκκαθάριση. Στην περίπτωση αυτή οι καμπύλες μηχανικής και ηλεκτρικής ροπής διατηρούν σημείο τομής, αλλά τη στιγμή της εκκαθάρισης του σφάλματος η ολίσθηση του κινητήρα έχει υπερβεί την περιοχή έλξης της ευσταθούς τιμής.

Η περίπτωση αστάθειας τάσης τύπου ΒΠ3 δεν εμφανίζεται συχνά, όμως έχουν αναφερθεί στην πράξη περιπτώσεις ταλαντώσεων μεταξύ γεννητριών και κινητήρων [dMF96].

Μηχανισμοί μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης

Ας υποθέσουμε ότι μετά από μία διαταραχή το σύστημα συμπεριφέρεται ευσταθώς στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, δηλαδή τα γρήγορα δυναμικά φαινόμενα ισορροπούν αρχικά σε ένα νέο σημείο ισορροπίας. Από εκεί και έπειτα στο σύστημα επιδρούν οι αργές δυναμικές που περιγράφονται από τις μεταβλητές κατάστασης z . Θεωρώντας ότι τα γρήγορα δυναμικά φαινόμενα αποκρίνονται ευσταθώς σε κάθε μεταβολή των μεταβλητών κατάστασης z , οδηγούμαστε στο οιονεί στατικό σύστημα που περιγράφεται στο πρώτο κεφάλαιο (παράγραφος 1.6.1).

Οι τρεις κύριοι μηχανισμοί αστάθειας στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι οι παρακάτω:

- ΜΠ1: Απώλεια μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας.
- ΜΠ2: Απώλεια έλξης προς το ευσταθές μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας.
- ΜΠ3: Αργά αναπτυσσόμενες ταλαντώσεις τάσης.

Η αστάθεια τάσης τύπου ΜΠ1 αποτελεί την πιο συχνά εμφανιζόμενη στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, με τα φορτία να προσπαθούν να αποκαταστήσουν ασταθώς τη ζήτησή τους μέσω των ΣΑΤΥΦ ή άλλων αργών μηχανισμών επαναφοράς της καταναλισκόμενης ισχύος.

Η αστάθεια τάσης τύπου ΜΠ2 συναντάται συνήθως κατά την εξέλιξη ενός φαινομένου αστάθειας τύπου ΜΠ1 όταν τα διάφορα μέτρα αντιμετώπισης (π.χ. αντιστάθμιση αέργου ισχύος, αποκοπή φορτίου κλπ.) λαμβάνονται με τέτοια καθυστέρηση, ώστε να αποκαθίσταται μεν ευσταθές σημείο ισορροπίας στο σύστημα αλλά όχι έγκαιρα ώστε να προκύψει έλξη του συστήματος προς αυτό.

Η περίπτωση αστάθειας τάσης τύπου ΜΠ3 δεν έχει εμφανιστεί σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται συνήθως για αστάθεια τάσης που προκαλείται από μη συντονισμένη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ σε διαφορετικά επίπεδα ρύθμισης τάσης.

Οι αστάθειες τύπου ΜΠ1 και ΜΠ2 μπορεί να καταλήγουν σε μία κατάσταση ψευδοϊσορροπίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπου τα ΣΑΤΥΦ και η αυτορρύθμιση του φορτίου έχουν φτάσει στα όρια ρύθμισής τους. Για το λόγο αυτό, τέτοιες περιπτώσεις αστάθειας χαρακτηρίζονται και ως *μερική κατάρρευση τάσης* [Tay94].

Βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης προκαλούμενη από μακροπρόθεσμες δυναμικές

Στην περίπτωση αυτή η ασταθής συμπεριφορά των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων του συστήματος προκαλεί τη βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης. Οι τρεις κύριοι μηχανισμοί αστάθειας αυτής της μορφής είναι οι παρακάτω:

- Β-ΜΠ1: Απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας λόγω ασταθούς συμπεριφοράς των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων.
- Β-ΜΠ2: Απώλεια έλξης προς το ευσταθές βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας λόγω συρρίκνωσης της περιοχής έλξης, η οποία οφείλεται στην ασταθή συμπεριφορά των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων.
- Β-ΜΠ3: Ταλαντωτική βραχυπρόθεσμη αστάθεια που οφείλεται σε ασταθή συμπεριφορά των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων.

Τυπική περίπτωση αστάθειας τύπου Β-ΜΠ1 αποτελεί η εμφάνιση ενός φαινομένου βραχυπρόθεσμης αστάθειας (π.χ. αποσυγχρονισμός γεννητριών ή επιβράδυνση κινητήρων επαγωγής) λόγω αστάθειας τύπου ΜΠ1 ή ΜΠ2. Σε αυτή την περίπτωση η μακροπρόθεσμη αστάθεια αποτελεί το αίτιο, ενώ η βραχυπρόθεσμη το αποτέλεσμα. Η μείωση των τάσεων κατά τη διάρκεια εξέλιξης της μακροπρόθεσμης αστάθειας είναι σχετικά αργή, μέχρις ότου η απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας οδηγήσει στην κατάρρευσή τους. Αν οι αργές δυναμικές του συστήματος είναι αρκετά βραδείες, η αστάθεια αυτή εμφανίζεται ως διακλάδωση σαγματικού κόμβου των γρήγορων δυναμικών με τις αργές δυναμικές να θεωρούνται παράμετροι του συστήματος.

Η αστάθεια τύπου Β-ΜΠ2 εμφανίζεται, στην πράξη, προτού το σύστημα συναντήσει το σημείο σαγματικού κόμβου, λόγω της συρρίκνωσης της περιοχής έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας καθώς αυτό προσεγγίζεται από το ασταθές σημείο ισορροπίας. Έτσι μία τυχαία μεταβολή παραμέτρων ή μία μικρή διακριτή μετάβαση μπορεί να προκαλέσει απώλεια έλξης.

Η αστάθεια τύπου Β-ΜΠ3 δεν είναι συχνή και μπορεί να εμφανιστεί σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν συγχρόνως προβλήματα ταλαντώσεων τάσης και ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.

2.5.2 Αντιμετώπιση Μακροπρόθεσμης Αστάθειας Τάσης

Τα μέτρα που λαμβάνονται για την αντιμετώπιση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης αποσκοπούν στην επίτευξη των παρακάτω στόχων:

- Αποκατάσταση νέου μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας το ταχύτερο δυνατόν, ώστε να υπάρξει έλξη προς αυτό.
- Αποφυγή βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης προκαλούμενης από μακροπρόθεσμες δυναμικές του συστήματος (αστάθεια τύπου Β-ΜΠ).
- Αναχαίτιση της περαιτέρω υποβάθμισης του συστήματος.

Ο πρώτος στόχος αποτελεί μία προφανή απαίτηση για την επαναφορά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε κανονική κατάσταση λειτουργίας. Ο δεύτερος στόχος αποσκοπεί απλώς στη διατήρηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε λειτουργία, ενώ ο τρίτος και πιο φιλόδοξος στόχος αποσκοπεί στην αποσόβηση περαιτέρω μείωσης των τάσεων του συστήματος, η οποία μπορεί να οδηγήσει μέχρι τη σβέση του από πιθανή εμφάνιση διαδοχικών διαταραχών για λόγους προστασίας (αποσύνδεση γραμμών μεταφοράς λόγω υπερφόρτισης, αποσύνδεση γεννητριών λόγω χαμηλών τάσεων ή ενεργοποίηση της 3^{ης} ζώνης της προστασίας αποστάσεως) [BFG95].

Οι παραπάνω στόχοι μπορούν να επιτευχθούν με την εφαρμογή ενός πλήθους μέτρων, που αφορούν κυρίως στην αντιστάθμιση της αέργου ισχύος στο δίκτυο, στην ανακατανομή της παραγωγής, στην αύξηση των τερματικών τάσεων των γεννητριών (όταν υπάρχουν εφεδρείες αέργου ισχύος) και στην έμμεση ή άμεση αποκοπή φορτίου.

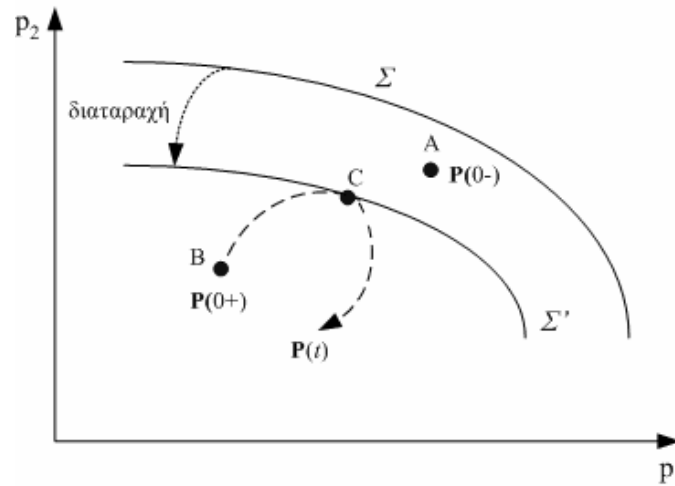
Παρακάτω θα δοθεί αρχικά η έννοια της αποκατάστασης μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας μετά από την εμφάνιση μίας σοβαρής διαταραχής στο σύστημα και στη συνέχεια θα αναλυθεί η επίδραση διαφόρων κρίσιμων παραγόντων στην επίτευξη αυτού του στόχου.

Αποκατάσταση μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας

Στην περίπτωση που τα φορτία ενός συστήματος αποκαθίστανται σε σταθερή ισχύ, ο χώρος φορτίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παράσταση της μεταβολής της ζήτησής τους. Στο Σχ. 2.4 απεικονίζεται ο χώρος αυτός για δύο φορτία P_1 και P_2 , όπου $\mathbf{p} = [P_1 \ P_2]^T$. Με Σ συμβολίζεται η επιφάνεια ορίων φόρτισης του συστήματος. Στο αρχικό σημείο ισορροπίας A η καταναλισκόμενη ισχύς $\mathbf{P}(0^-)$ είναι ίση με τη ζήτηση \mathbf{p} . Μετά την εμφάνιση της διαταραχής η επιφάνεια Σ συρρικνώνεται και το σημείο ισορροπίας A βρίσκεται εκτός της νέας επιφάνειας ορίων φόρτισης Σ' . Αυτό σημαίνει ότι η ζήτηση \mathbf{p} δε μπορεί να ικανοποιηθεί, δηλαδή το μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας έχει πλέον χαθεί.

Η εξέλιξη της συμπεριφοράς του συστήματος παρακολουθείται παριστάνοντας στο χώρο φορτίου την καταναλισκόμενη από τα φορτία ισχύ συναρτήσει του χρόνου. Προκύπτει κατ' αυτόν τον τρόπο η τροχιά $\mathbf{P}(t)$. Η ισχύς $\mathbf{P}(0^+)$ που καταναλίσκεται αμέσως μετά την εμφάνιση της διαταραχής (σημείο B) είναι μικρότερη από αυτήν προ της διαταραχής λόγω της μείωσης της τάσης. Οι μηχανισμοί αποκατάστασης ισχύος (ΣΑΤΥΦ, μεταβλητή αγωγιμότητα κλπ.) τείνουν να επαναφέρουν την ισχύ $\mathbf{P}(t)$ στο αρχικό σημείο A , αλλά η προσπάθεια αυτή τελικά αποτυγχάνει. Το σημείο C όπου η τροχιά $\mathbf{P}(t)$ συναντά την επιφάνεια Σ' καλείται *κρίσιμο σημείο* και είναι το σημείο εμφάνισης αστάθειας. Πέραν του κρίσιμου σημείου η καταναλισκόμενη ισχύς μειώνεται παρά την απόπειρα των φορτίων να την αποκαταστήσουν.

Κάθε σημείο κατά μήκος της τροχιάς $\mathbf{P}(t)$ μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας, με την παραδοχή ότι η ζήτηση \mathbf{p} αντιστοιχεί στην τρέχουσα κατανάλωση $\mathbf{P}(t)$. Επομένως θεωρώντας $\mathbf{p}' = \mathbf{P}(t)$ προκύπτει ένα σύνολο σημείων ισορροπίας, που ονομάζονται *εν δυνάμει σημεία ισορροπίας*. Από το σύνολο αυτό των σημείων ισορροπίας, το κρίσιμο σημείο C πάνω στην επιφάνεια ορίων φόρτισης αποτελεί διακλάδωση σαγματικού κόμβου. Κατά συνέπεια υπολογίζοντας κατά μήκος της τροχιάς του συστήματος τον μη ελαττωμένο Ιακωβιανό πίνακα \mathbf{J}_I (ή τον ελαττωμένο \mathbf{H}_L) για κάθε εν δυνάμει σημείο ισορροπίας, στο κρίσιμο σημείο οι πίνακες αυτοί είναι μη αντιστρέψιμοι έχοντας μία μηδενική ιδιοτιμή.



Σχ. 2.4 Παράσταση αστάθειας στο χώρο φορτίου

Στη γενική περίπτωση που δεν εμφανίζεται ταλαντωτική αστάθεια, τα εν δυνάμει σημεία ισορροπίας που αντιστοιχούν στο τμήμα της τροχιάς πριν το κρίσιμο σημείο θεωρούνται ευσταθή, έχοντας μία αρνητική πραγματική ιδιοτιμή να προσεγγίζει το μηδέν, ενώ τα σημεία ισορροπίας που αντιστοιχούν στο τμήμα της τροχιάς μετά το κρίσιμο σημείο θεωρούνται ασταθή, παρουσιάζοντας μία θετική πραγματική ιδιοτιμή. Με βάση την (2.45) προκύπτει ότι στο κρίσιμο σημείο οι ευαισθησίες απειρίζονται και αλλάζουν πρόσημο, καθώς η πραγματική ιδιοτιμή περνά από το μηδέν.

Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση που η αποκατάσταση της ισχύος γίνεται μέσω ΣΑΤΥΦ, πριν το κρίσιμο σημείο επιτυγχάνεται ταυτόχρονα αποκατάσταση της τάσης του φορτίου και της καταναλισκόμενης ισχύος, ενώ μετά το κρίσιμο σημείο τόσο η τάση του φορτίου όσο και η καταναλισκόμενη ισχύς μειώνονται ταυτόχρονα. Αν η αποκατάσταση της ισχύος γίνεται με αύξηση της αγωγιμότητας των φορτίων, πριν το κρίσιμο σημείο η αύξηση της αγωγιμότητας συνεπάγεται και αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος, ενώ μετά το κρίσιμο σημείο η αύξηση της αγωγιμότητας δεν οδηγεί σε αύξηση της ισχύος αλλά σε μείωση.

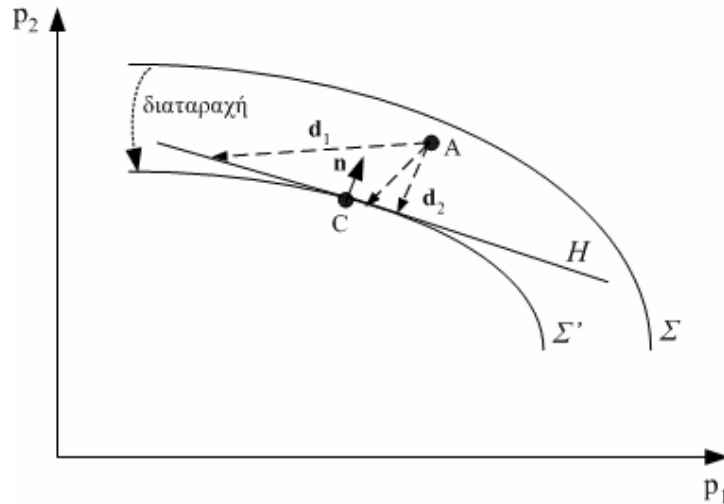
Το πρόβλημα λοιπόν έγκειται στην αποκατάσταση, με την εφαρμογή κάποιου κατάλληλου μέτρου προστασίας, ενός νέου σημείου ισορροπίας εντός της επιφάνειας Σ' . Η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής οποιουδήποτε τέτοιου μέτρου θέτει τρεις νέες προϋποθέσεις:

- Την βέλτιστη επιλογή των φορτίων για αποκοπή.
- Τον βέλτιστο χρόνο εφαρμογής της αποκοπής.
- Το μέγεθος της αποκοπής.

Επιλογή φορτίων για αποκοπή

Το ζητούμενο της επιλογής των βέλτιστων φορτίων για τη λήψη μέτρων προς αποκατάσταση μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας αντιστοιχεί σε ένα πρόβλημα γεωμετρικού υπολογισμού της ελάχιστης απόστασης του σημείου ισορροπίας A από την επιφάνεια ορίων φόρτισης Σ' . Διάφορες μέθοδοι [ADH94, Ove95, VCV98, VMK01] έχουν προταθεί για τον υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης, με επικρατέστερη αυτή που βασίζεται στο υπολογισμό του κάθετου διανύσματος και τις παραλλαγές της.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το κάθετο διάνυσμα \mathbf{n} εξάγεται (στη γενική περίπτωση) από το αριστερό ιδιοδιάνυσμα \mathbf{w} της μηδενικής ιδιοτιμής του πίνακα \mathbf{J}_l (ή \mathbf{H}_l). Υπολογίζοντας το κάθετο διάνυσμα στο σημείο C της επιφάνειας ορίων φόρτισης Σ' εξάγεται το εφαπτόμενο στο σημείο αυτό υπερεπίπεδο H (Σχ. 2.5). Με χρήση της κατάλληλης νόρμας μπορεί να υπολογιστεί η ελάχιστη απόσταση από το υπερεπίπεδο H, η οποία αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο συνδυασμό φορτίων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη γραμμικοποίηση και ως εκ τούτου είναι λιγότερο ακριβής για την εκτίμηση διορθωτικών μέτρων με μεγάλη επίδραση στο σύστημα (π.χ. αποκοπή μεγάλης ποσότητας φορτίου).



Σχ. 2.5 Αποκατάσταση σημείου ισορροπίας με χρήση του εφαπτόμενου υπερεπιπέδου

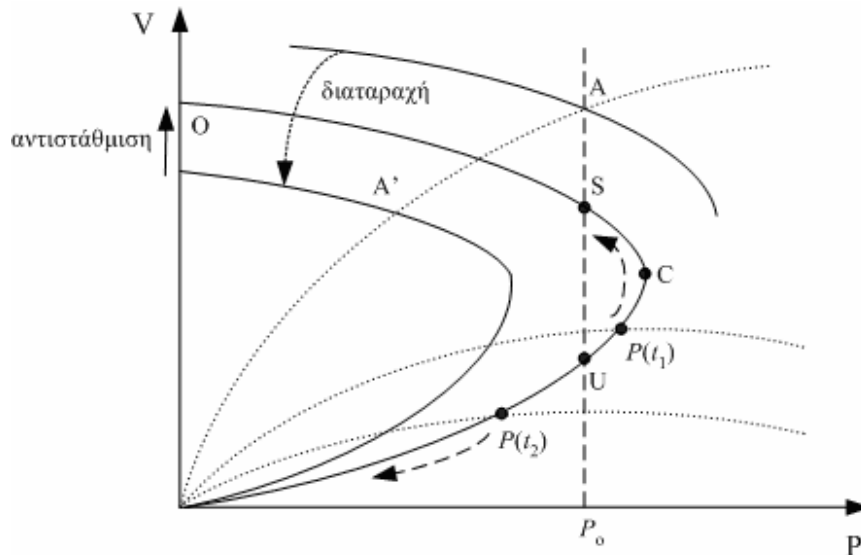
Αντίστροφα, η παραπάνω μέθοδος μπορεί να υποδείξει τα πιο αποδοτικά φορτία για τη λήψη διαθέσιμων μέτρων προστασίας. Συγκεκριμένα, για δεδομένες κατευθύνσεις \mathbf{d} ($\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots$), οι οποίες αναφέρονται σε μέτρα προστασίας που εμπλέκουν διαφορετικούς συνδυασμούς φορτίων, μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση του σημείου A από το εφαπτόμενο υπερεπίπεδο H. Στη συνέχεια τα μέτρα εφαρμόζονται με φθίνουσα σειρά της υπολογισμένης απόστασης, έως ότου το σημείο A βρεθεί εντός της νέας επιφάνειας ορίων φόρτισης.

Επίδραση του χρόνου εφαρμογής μέτρων αποκατάστασης

Το ζητούμενο του βέλτιστου χρόνου εφαρμογής επιβάλλεται από την ανάγκη για έλξη του σημείου λειτουργίας, που θα προκύψει μετά τη λήψη του μέτρου, προς το ευσταθές μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας [Ove95, AAN97, VS04]. Αν υπάρξει καθυστέρηση πέραν ενός ανεκτού χρονικού ορίου, ελλοχεύει ο κίνδυνος το μέτρο να μην είναι αποτελεσματικό. Γενικά για ενέργειες, όπως είναι η ένταξη διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος ή η αύξηση της τάσης αναφοράς των γεννητριών, καμία καθυστέρηση δεν είναι αναγκαία καθώς τα μέτρα αυτά είναι ευεργετικά για το σύστημα και δεν επηρεάζουν την τροφοδοσία των καταναλωτών. Ο παράγοντας χρόνος είναι καθοριστικός στα μέτρα που σχετίζονται με την έμμεση ή άμεση αποκοπή φορτίου. Μάλιστα υπάρχει άμεση συσχέτιση του χρόνου με την ποσότητα του φορτίου που θα αποκοπεί.

Ένα παράδειγμα καθυστερημένης αντιστάθμισης αέργου ισχύος, που έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια έλξης του σημείου λειτουργίας του συστήματος προς το ευσταθές σημείο ισορροπίας και συνακόλουθα την πρόκληση αστάθειας τάσης τύπου ΜΠ2, περιγράφεται παρακάτω.

Θεωρούμε ένα φορτίο σταθερής αγωγιμότητας που αποκαθίσταται μακροπρόθεσμα σε σταθερή ισχύ. Έστω ότι το αρχικό σημείο ισορροπίας του συστήματος είναι το σημείο A του Σχ. 2.6, που αντιστοιχεί στην τομή της χαρακτηριστικής δικτύου προ της διαταραχής (συνεχής καμπύλη) με τη μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου $P = P_0$ (διακεκομμένη καμπύλη). Μετά την εμφάνιση της διαταραχής, το σημείο λειτουργίας μεταπηδά από το σημείο A στο σημείο A' και η χαρακτηριστική δικτύου συρρικνώνεται αποκτώντας τη μορφή της συνεχούς καμπύλης που διέρχεται από το σημείο A', η οποία δεν παρουσιάζει πλέον σημείο τομής με τη μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου. Οι μηχανισμοί επαναφοράς της ισχύος (ΣΑΤΥΦ, μεταβλητή αγωγιμότητα κλπ.) τείνουν να επαναφέρουν την καταναλισκόμενη ισχύ στην αρχική ζήτηση P_0 , αλλά η προσπάθεια αυτή τελικά αποτυγχάνει οδηγώντας σε συνεχή μείωση της τάσεως και της ισχύος. Ο μηχανισμός αυτός παριστάνεται στο Σχ. 2.6 με τη διαδοχική μετατόπιση των βραχυπρόθεσμων χαρακτηριστικών φορτίου (εστιγμένες καμπύλες) προς το κάτω τμήμα της νέας χαρακτηριστικής δικτύου. Εξελίσσεται λοιπόν μία αστάθεια τάσης τύπου ΜΠ1.



Σχ. 2.6 Επίδραση του χρόνου στην αντιστάθμιση αέργου ισχύος

Η έγχυση αέργου ισχύος στο σύστημα της μεταφοράς ισοδυναμεί με τη μετατόπιση της χαρακτηριστικής δικτύου σε μία νέα θέση, όπου υπάρχουν πλέον δύο μακροπρόθεσμα σημεία ισορροπίας, ένα ευσταθές (S) και ένα ασταθές (U). Αν ως χρονική στιγμή της αντιστάθμισης θεωρηθεί η στιγμή t_1 , μπορούμε να υποθέσουμε ότι η καταναλισκόμενη από το φορτίο ισχύς αμέσως μετά την αντιστάθμιση είναι ίση με $P(t_1)$. Η ισχύς αυτή είναι μεγαλύτερη από τη ζητούμενη P_0 , οπότε οι μηχανισμοί αποκατάστασης του φορτίου θα μειώσουν την κατανάλωση ισχύος και το σύστημα έλκεται προς το ευσταθές σημείο ισορροπίας. Αντίθετα, αν η αντιστάθμιση πραγματοποιηθεί τη χρονική στιγμή t_2 , με την καταναλισκόμενη ισχύ μετά την αντιστάθμιση να είναι ίση με $P(t_2)$ (Σχ. 2.6), οι μηχανισμοί αποκατάστασης του φορτίου θα προσπαθήσουν να αυξήσουν την κατανάλωση, προκαλώντας κατά αυτόν τον τρόπο αστάθεια τάσης τύπου ΜΠ2. Σε αυτή την περίπτωση η περιοχή έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας S φράσσεται από το ασταθές σημείο ισορροπίας U.

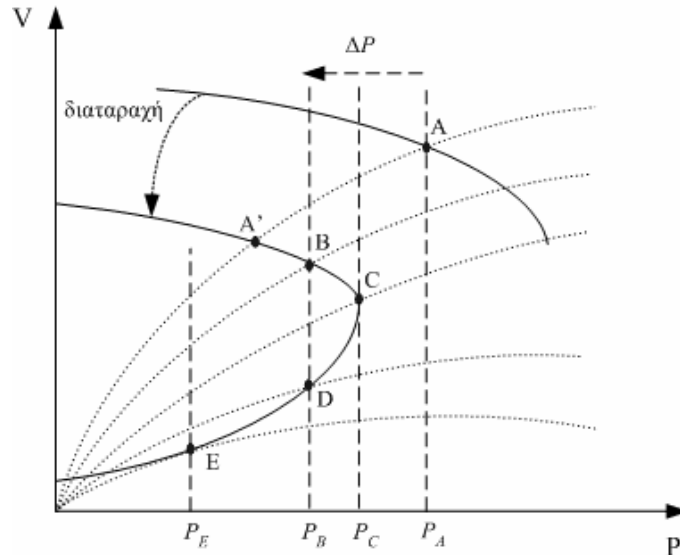
Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι για κάθε διορθωτικό μέτρο που είναι ικανό να αποκαταστήσει μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας, υπάρχει ένα ανώτατο χρονικό όριο πέραν του οποίου η λήψη του μέτρου δε μπορεί να σταθεροποιήσει το σύστημα.

Επίδραση μεγέθους αποκοπής

Μέχρι τώρα είδαμε ότι για ορισμένα μέτρα αντιμετώπισης της αστάθειας τάσης υπάρχει ένα ανώτατο χρονικό περιθώριο εφαρμογής τους, ώστε να αποδειχθούν αποτελεσματικά. Καθ' όμοιο τρόπο προκύπτει ότι το μέγεθος της αποκοπής επηρεάζεται σημαντικά από το χρόνο λήψης του μέτρου. Στις μέρες μας, χάρη στη μεγάλη υπολογιστική δύναμη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, είναι σχετικά εύκολο κατά την ανάλυση των φαινομένων αστάθειας τάσης με χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης, να προσδιοριστούν οι ελάχιστες αναγκαίες ποσότητες αποκοπής φορτίου ΔP_{min} ως συνάρτηση του χρόνου [AAH98].

Η επίδραση του χρόνου στο μέγεθος της δράσης εξηγείται παρακάτω με ορισμένα παραδείγματα. Τα διορθωτικά μέτρα που θα παρουσιαστούν αποσκοπούν όχι μόνο στην αποκατάσταση μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας, αλλά και στην επίτευξη των άλλων δύο στόχων που αναφέρθηκαν στην αρχή της παραγράφου 2.5.2, δηλαδή στην αποφυγή απώλειας βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας και στην αναχίτιση περαιτέρω υποβάθμισης του συστήματος. Σχετικά με τον τελευταίο στόχο, παρακολουθείται η τιμή της χαμηλότερης τάσης του συστήματος μεταφοράς και ως κριτήριο αναχίτισης της υποβάθμισης θεωρείται η διατήρηση της τάσης αυτής πάνω από ένα όριο.

Το πρώτο παράδειγμα αναφέρεται σε μία περίπτωση έμμεσης αποκοπής φορτίου με μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αμελείται η επίδραση της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ όπως και κάθε μηχανισμός αυτορρύθμισης της ισχύος πέραν του ΣΑΤΥΦ. Έτσι, το φορτίο επανέρχεται μακροπρόθεσμα σε σταθερή ισχύ, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη ρύθμιση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ.



Σχ. 2.7 Έμμεση αποκοπή φορτίου με μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ

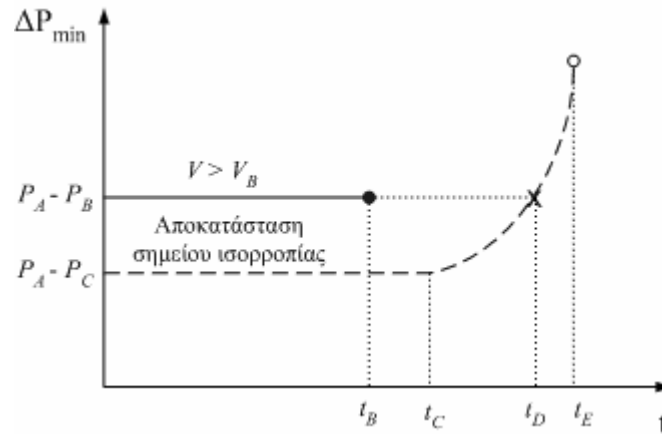
Στο Σχ. 2.7 απεικονίζονται δύο χαρακτηριστικές δικτύου, οι οποίες αντιστοιχούν στην κατάσταση του συστήματος πριν και μετά από την εμφάνιση μίας σοβαρής διαταραχής. Το αρχικό σημείο λειτουργίας A αντιστοιχεί σε ζήτηση P_A . Η μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου παριστάνεται με διακεκομμένη καμπύλη, ενώ με εστιγμένη καμπύλη έχουν χαραχθεί ορισμένες βραχυπρόθεσμες χαρακτηριστικές φορτίου. Είναι φανερό ότι θα εξελιχθεί αστάθεια τύπου ΜΠ1, καθώς η ζήτηση P_A είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ P_C του συστήματος μετά τη διαταραχή.

Ας παρακολουθήσουμε τη χρονική εξέλιξη του συστήματος, κατά την περίπτωση που δεν λαμβάνεται κανένα μέτρο μετά τη διαταραχή. Την χρονική στιγμή $t = 0^+$ το σημείο λειτουργίας είναι το A'. Την χρονική στιγμή $t = t_C$ το σημείο λειτουργίας του συστήματος ταυτίζεται με το κρίσιμο σημείο C, ενώ τη στιγμή $t = t_E$ συμβαίνει απώλεια του σημείου ισορροπίας (αστάθεια τύπου Β-ΜΠ1) και το σύστημα καταρρέει.

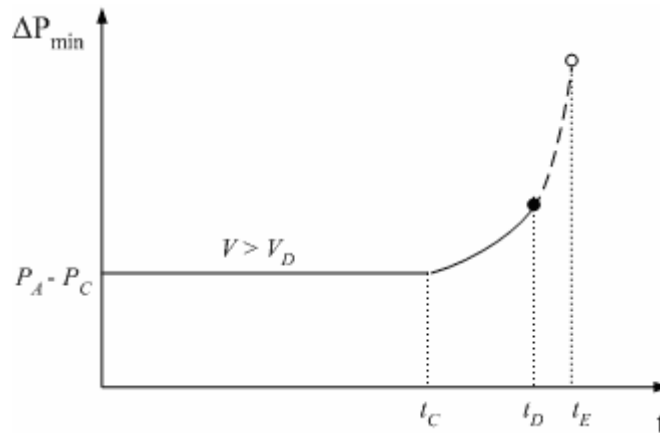
Στη συνέχεια εξετάζεται η αποκοπή φορτίου στο σύστημα με μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ. Η βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου δεν επηρεάζεται από το μέτρο αυτό, ενώ η μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου μετατοπίζεται προς τα αριστερά κατά ένα συγκεκριμένο ποσό ΔP , που αντιστοιχεί στην περικοπή που πραγματοποιήθηκε. Η ελάχιστη αναγκαία ποσότητα φορτίου ΔP_{min} που πρέπει να αποκοπεί για την αποκατάσταση νέου μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας εξαρτάται από το χρόνο. Μέχρι την κρίσιμη χρονική στιγμή t_C , που αντιστοιχεί στη μέγιστη ικανότητα μεταφοράς ισχύος μετά τη διαταραχή, η ποσότητα ΔP_{min} παραμένει σταθερή και ίση με αυτή που απαιτείται για την αποκατάσταση ενός μοναδικού σημείου ισορροπίας (σημείο σαγματικού κόμβου), ίση δηλαδή με $\Delta P_{min} = P_A - P_C$. Μετά την κρίσιμη χρονική στιγμή, η ελάχιστη αναγκαία ποσότητα απορριπτόμενου φορτίου αυξάνεται, ώστε μετά την αποκοπή να προκύπτει έλξη του σημείου λειτουργίας προς το ευσταθές σημείο ισορροπίας του συστήματος. Για παράδειγμα, τη χρονική στιγμή t_D που αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας D, η ελάχιστη αναγκαία αποκοπή φορτίου θα πρέπει να είναι ίση τουλάχιστον με $P_A - P_B > P_A - P_C$, ώστε να υπάρξει έλξη προς το ευσταθές σημείο ισορροπίας Β.

Χαράζοντας την ελάχιστη αναγκαία αποκοπή φορτίου ΔP_{min} ως συνάρτηση του χρόνου, προκύπτει η διακεκομμένη καμπύλη του Σχ. 2.8. Όπως φαίνεται, υπάρχει ένα ανώτατο χρονικό περιθώριο για τη λήψη οποιουδήποτε μέτρου. Το όριο αυτό καθορίζεται από τη χρονική στιγμή t_E , χρονική στιγμή κατά την οποία εμφανίζεται απώλεια του βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας του συστήματος (αστάθεια τύπου Β-ΜΠ1). Πέραν αυτής της χρονικής στιγμής, που αντιστοιχεί στο κενό σημείο του Σχ. 2.8, επέρχεται κατάρρευση των τάσεων και σβέση του συστήματος.

Στο ίδιο σχήμα, με συνεχή καμπύλη παρουσιάζεται η ελάχιστη αναγκαία αποκοπή φορτίου συναρτήσει του χρόνου, για τη διατήρηση της τάσης πάνω από μία επιθυμητή τιμή V_B . Στη συγκεκριμένη περίπτωση η τιμή αυτή επιλέγεται μεγαλύτερη από την V_C , που αντιστοιχεί στο κρίσιμο σημείο C. Έτσι η ελάχιστη αναγκαία αποκοπή φορτίου ισούται με $P_A - P_B$, μεγαλύτερη από την $P_A - P_C$ που απαιτείται απλώς για την αποκατάσταση μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας.



Σχ. 2.8 Διάγραμμα ελάχιστης αποκοπής φορτίου συναρτήσει του χρόνου για $V_B > V_C$



Σχ. 2.9 Διάγραμμα ελάχιστης αποκοπής φορτίου συναρτήσει του χρόνου για $V_D < V_C$

Αν η αποκοπή αυτή εφαρμοστεί πριν τη χρονική στιγμή t_B , που αντιστοιχεί στη διέλευση του σημείου λειτουργίας από το σημείο B, η τάση θα εξακολουθήσει να μειώνεται, αλλά σε κάθε περίπτωση θα παραμείνει μεγαλύτερη από V_B . Έτσι ο χρόνος t_B , που αντιστοιχεί στο πλήρες σημείο του Σχ. 2.8, αποτελεί το ανώτατο χρονικό περιθώριο για συνεχή διατήρηση της τάσης σε τιμή μεγαλύτερη από την V_B . Αν η αποκοπή πραγματοποιηθεί πέραν του χρόνου t_B , αλλά πριν από τη χρονική στιγμή t_D , η τάση θα μειωθεί μεταβατικά κάτω από την V_B , όμως τελικά θα ισορροπήσει στην τιμή V_B . Ο χρόνος t_D αποτελεί το ανώτατο χρονικό περιθώριο για την επίτευξη τάσης μεγαλύτερης από V_B στη μόνιμη κατάσταση. Αυτή η λιγότερη «αυστηρή» απαίτηση για τη διατήρηση της τάσης στην επιθυμητή τιμή V_B αντιστοιχεί σε χρόνο που υποδεικνύεται από τη διακεκομμένη καμπύλη του Σχ. 2.8 που καταλήγει στο σημείο x.

Ας εξετάσουμε τώρα την απαίτηση η τάση να μη μειωθεί κάτω από την τιμή V_D , μικρότερη της κρίσιμης. Στην περίπτωση αυτή, μέχρι τη χρονική στιγμή t_D (Σχ. 2.9) ο στόχος της αποκατάστασης μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας είναι ισοδύναμος με το στόχο διατήρησης της τάσης σε τιμή μεγαλύτερη της V_D . Μετά τη χρονική στιγμή t_D ο στόχος διατήρησης της τάσης πάνω από την τιμή V_D δε μπορεί να επιτευχθεί. Είναι φανερό ότι απαιτώντας ως ελάχιστη τάση μία τάση μικρότερη της κρίσιμης, η ελάχιστη αναγκαία αποκοπή φορτίου παραμένει ποσοτικά η ίδια, αλλά το ανώτατο χρονικό περιθώριο για τη λήψη του μέτρου μειώνεται.

3ο Κεφάλαιο

ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, οι απαιτούμενες ενέργειες για την πρόληψη ή αντιμετώπιση φαινομένων αστάθειας τάσης βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στον περιοδικό έλεγχο της ικανότητας του συστήματος να αντιμετωπίζει πιθανές διαταραχές, όπως για παράδειγμα την απώλεια μίας κρίσιμης διάταξης ή μία σημαντική αύξηση στο φορτίο. Ο έλεγχος αυτός καλείται *εκτίμηση ασφάλειας τάσης* [Tay94,VCV98] και πραγματοποιείται στο πλαίσιο της γενικότερης εκτίμησης της ασφάλειας ενός συστήματος, όπως αναλυτικά περιγράφηκε στο πρώτο κεφάλαιο.

Για την εκτέλεση της εκτίμησης ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο απαιτούνται κατάλληλα εργαλεία λογισμικού που αναγνωρίζουν επικίνδυνες διαταραχές στο σύστημα, προχωρούν σε εκτίμηση των ορίων ασφάλειάς του και προτείνουν κατάλληλα διορθωτικά μέτρα [GMK96,Tay00]. Η εφαρμογή On-line VSA [BBC02,VCK05] που λειτουργεί στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας του ΔΕΣΜΗΕ είναι ένα τέτοιο λογισμικό εκτίμησης ασφάλειας τάσης πραγματικού χρόνου, με δυνατότητα παράλληλης χρήσης σε μελετητικό περιβάλλον. Μέρος της εφαρμογής αποτελεί το πρόγραμμα WPSTAB, το οποίο χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των ασφαλών περιθωρίων φόρτισης του συστήματος υπό την επίδραση ενδεχομένων διαταραχών στο σύστημα παραγωγής και μεταφοράς. Η δομή και λειτουργία της εφαρμογής έχει περιγραφεί αναλυτικά στην παράγραφο 1.10.2.

Για τις ανάγκες της διατριβής αυτής έγινε αναβάθμιση του λογισμικού του προγράμματος WPSTAB, ώστε να περιληφθούν σε αυτό τα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ και των διατάξεων αντιστάθμισης και η αποκοπή φορτίου, που αποτελούν το αντικείμενο της διατριβής. Τα αντίστοιχα υποπρογράμματα διαμορφώθηκαν σε ένα *πακέτο προστασίας*, το οποίο ενσωματώθηκε στη βασική έκδοση του WPSTAB και επιτρέπει τη χρήση τους στο πρόγραμμα. Η αναλυτική περιγραφή των συγκεκριμένων συνιστωσών του πακέτου προστασίας θα παρουσιαστεί σε επόμενα κεφάλαια.

Εκτός των προαναφερόμενων υποπρογραμμάτων, αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής αυτής και άλλες ρουτίνες, οι οποίες μοντελοποιούν λειτουργίες της προστασίας του συστήματος, που θεωρούνται κρίσιμες για την εξέλιξη των φαινομένων αστάθειας τάσης. Όπως θα φανεί από την αναλυτική προσομοίωση του περιστατικού της σβέσης του νότιου τμήματος του Ελληνικού συστήματος στις 12 Ιουλίου 2004 [Vou05b,VNT06], που περιγράφεται στο έκτο κεφάλαιο, οι λειτουργίες αυτές έπαιξαν πράγματι καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη του συμβάντος [Por04,VNT05]. Το γεγονός αυτό οδήγησε τον ΔΕΣΜΗΕ στο να ενσωματώσει ορισμένα από αυτά τα υποπρογράμματα του WPSTAB στην εφαρμογή On-line VSA, ώστε να έχει μία ακριβέστερη εκτίμηση της ασφάλειας τάσης του Ελληνικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται περιγραφή αυτών των μοντέλων προστασίας, όπως και ενός μοντέλου φορτίου δυναμικής φύσης που επίσης αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα WPSTAB για τις ανάγκες της διατριβής αυτής.

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται επίσης η διαδικασία ελέγχου και αναπροσαρμογής των δεδομένων του Ελληνικού συστήματος, η οποία έγινε με σκοπό την ακριβέστερη παράστασή του στο πρόγραμμα WPSTAB και κατ' επέκτασιν στην εφαρμογή On-line VSA. Το αναπροσαρμοσμένο μοντέλο του Ελληνικού συστήματος επιτρέπει την ακριβή ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων στις προσομοιώσεις που ακολουθούν στα επόμενα κεφάλαια της διατριβής, καθώς και την ακριβέστερη εκτίμηση της ασφάλειας τάσης στο κέντρο ελέγχου. Η ανάγκη αναπροσαρμογής των δεδομένων προέκυψε ιδιαίτερα μετά το περιστατικό της σβέσης του νότιου τμήματος του Ελληνικού συστήματος στις 12 Ιουλίου 2004, οπότε και αποφασίστηκε η ανελλιπή χρήση της εφαρμογής On-line VSA στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας ως συμβουλευτικού εργαλείου των χειριστών λειτουργίας του συστήματος.

Όπως θα δούμε στο έκτο κεφάλαιο, η προσομοίωση του περιστατικού της σβέσης στο Ελληνικό σύστημα μετά την αναβάθμιση του λογισμικού της εφαρμογής εκτίμησης ασφάλειας τάσης On-line VSA και την αναπροσαρμογή των δεδομένων του μοντέλου του Ελληνικού συστήματος, πιστοποίησε ότι τα προσαρμοσμένα δεδομένα απεικονίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια την πραγματική κατάσταση του συστήματος.

3.2 ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ WPSTAB

3.2.1 Περιορισμός Ρεύματος Τυμπάνου Γεννητριών

Η σχεδίαση των γεννητριών που πρόκειται να λειτουργήσουν σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται συνήθως με τέτοιο τρόπο, ώστε κατά τη λειτουργία τους να συναντούν πρώτα το όριο του ρεύματος διέγερσης και μετά αυτό του ρεύματος στάτη. Ωστόσο, σε συνθήκες χαμηλών τάσεων ή σε συνθήκες αναβάθμισης στροβίλου, το όριο του ρεύματος στάτη μπορεί να γίνει πιο περιοριστικό από αυτό του ρεύματος δρομέα [Joh00].

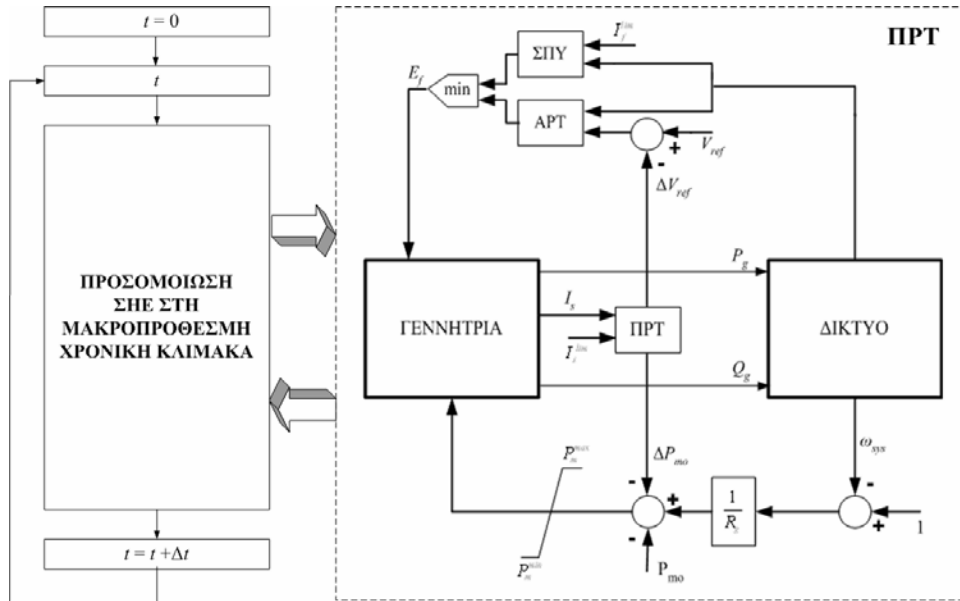
Κατά κανόνα, πρωταρχικό μέλημα των χειριστών των μονάδων είναι να περιορίσουν την άεργο παραγωγή της γεννήτριας, όταν η θερμοκρασία του τυλίγματος δρομέα ξεπεράσει το επιτρεπόμενο όριο υπερθέρμανσης. Η ίδια πρακτική ακολουθείται για την αντιμετώπιση των υπερεντάσεων στο στάτη της μηχανής, ενώ σπανιότερα πραγματοποιείται μείωση της παραγωγής ενεργού ισχύος για τον ίδιο σκοπό.

Ορισμένες σύγχρονες γεννήτριες είναι εξοπλισμένες με αυτόματους περιοριστές ρεύματος τυμπάνου [CTF93,CTF94a], δηλαδή με διατάξεις ελέγχου οι οποίες περιορίζουν αυτόματα την υπερένταση στους ακροδέκτες της γεννήτριας με μείωση της παραγωγής αέργου ισχύος. Ωστόσο, οι περισσότερες γεννήτριες του Ελληνικού συστήματος δεν διαθέτουν αυτόματους περιοριστές ρεύματος τυμπάνου, με αποτέλεσμα ο περιορισμός των υπερεντάσεων να εφαρμόζεται χειροκίνητα από τους χειριστές του σταθμού.

Το μοντέλο *περιορισμού ρεύματος τυμπάνου* [VNT06], που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και περιγράφεται παρακάτω, προσομοιώνει τη συμπεριφορά των χειριστών στους σταθμούς παραγωγής, στην προσπάθειά τους να προστατέψουν τις γεννήτριες όταν αυτές βρίσκονται σε κατάσταση υπερφόρτισης. Στο μοντέλο αυτό η μείωση της υπερέντασης στο στάτη επιχειρείται αρχικά με μείωση της ενεργού παραγωγής της γεννήτριας, διατηρώντας παράλληλα το ρεύμα δρομέα στην ονομαστική του τιμή ώστε να διατηρηθεί στο μέγιστο η παραγωγή αέργου ισχύος. Κατόπιν, εφόσον οι συνθήκες είναι τέτοιες που δεν μπορεί να επιτευχθεί ο περιορισμός του ρεύματος στάτη με μείωση της ενεργού παραγωγής της γεννήτριας λόγω τεχνικού ελαχίστου, ακολουθούν κατάλληλες μειώσεις της αέργου παραγωγής.

Πιο συγκεκριμένα, κάθε φορά που το ρεύμα στάτη ξεπερνά τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του, η ενεργός παραγωγή της γεννήτριας περιορίζεται με ένα σταθερό ρυθμό που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος στροβίλου-γεννήτριας. Η μείωση της ενεργού ισχύος συνεχίζεται ωσότου πάψει η παραβίαση του ορίου ρεύματος στάτη ή η μονάδα φτάσει στο τεχνικό της ελάχιστο. Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατή περαιτέρω μείωση της ενεργού παραγωγής της γεννήτριας λόγω τεχνικού ελαχίστου πραγματοποιείται κατάλληλη μείωση της τάσης αναφοράς της, ώστε να επιτευχθεί περιορισμός του ρεύματος στάτη με μείωση της αέργου παραγωγής.

Ακολουθεί η πλήρης περιγραφή του μοντέλου περιορισμού ρεύματος τυμπάνου, όπως αυτό αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα προσομοίωσης WPSTAB και ενσωματώθηκε στο περιβάλλον της εφαρμογής εκτίμησης ασφάλειας τάσης On-line VSA του ΔΕΣΜΗΕ. Όπως έγινε φανερό νωρίτερα, το μοντέλο περιορισμού ρεύματος τυμπάνου επιδρά τόσο στον έλεγχο της διέγερσης όσο και στον έλεγχο της παραγωγής της γεννήτριας (Σχ. 3.1). Το μπλοκ της προσομοίωσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα περιλαμβάνει το πλήρες σύνολο αλγεβρικών-διαφορικών εξισώσεων του συστήματος που επιλύεται με την παραδοχή των οιονεί στατικών μεταβολών. Το διάγραμμα ροής του μοντέλου περιορισμού ρεύματος τυμπάνου παρουσιάζεται στο Σχ. 3.2.



Σχ. 3.1 Μοντέλο περιορισμού ρεύματος τυμπάνου

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ο έλεγχος του ρεύματος στάτη πραγματοποιείται σε όλες τις γεννήτριες του συστήματος, στις οποίες εφαρμόζεται η πρακτική του περιορισμού ρεύματος τυμπάνου, ακολουθώντας τα παρακάτω αλγοριθμικά βήματα:

1. Σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης υπολογίζεται το ρεύμα στάτη I_s με βάση το δεδομένο σημείο λειτουργίας (P_g, Q_g, V) της γεννήτριας και ελέγχεται αν παραβιάζεται το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο I_s^{lim} . Το ρεύμα στάτη δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_s = \frac{\sqrt{P_g^2 + Q_g^2}}{V} \quad (3.1)$$

Το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ρεύματος στάτη λαμβάνεται ίσο με το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας ανηγμένο στη βάση του συστήματος:

$$I_s^{lim} = I_{s,ov} = \frac{S_{ov}}{V_{ov}} \quad (3.2)$$

2α. Στην περίπτωση που παραβιάζεται το όριο I_s^{lim} για χρονικό διάστημα d , δίνεται εντολή για μείωση της ενεργού παραγωγής της γεννήτριας. Η καθυστέρηση αυτή ορίζεται ως εξής:

$$d = \begin{cases} d_1, & \text{αρχική χρονική καθυστέρηση} \\ d_2, & \text{επακόλουθη χρονική καθυστέρηση} \end{cases} \quad (3.3)$$

Η αρχική χρονική καθυστέρηση d_1 απαιτείται προκειμένου να μην εφαρμοστεί μείωση στην παραγωγή της γεννήτριας για παροδικές υπερβάσεις του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου ρεύματος στάτη που μπορεί να οφείλονται σε σφάλματα ή άλλα αίτια. Η επακόλουθη χρονική καθυστέρηση d_2 είναι πάντα μικρότερη από την αρχική, ώστε μετά την ανίχνευση της υπερέντασης στο στάτη να υπάρξει ο όσο το δυνατόν πιο γρήγορος περιορισμός της.

Η μείωση της ενεργού παραγωγής της γεννήτριας πραγματοποιείται ελαττώνοντας τη μηχανική ισχύ του στροβίλου με βάση τη σχέση:

$$P_{mo} = P_{mo} - r_{mo} d_2 \quad (3.4)$$

όπου P_{mo} η τιμή αναφοράς της μηχανικής ισχύος του στροβίλου και r_{mo} ο ρυθμός μείωσής της.

Ο ρυθμός μείωσης r_{mo} καθορίζεται μονοσήμαντα από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας και του στροβίλου και ενδέχεται να είναι μικρότερος από τον επιθυμητό για τον περιορισμό του ρεύματος στάτη στην ονομαστική του τιμή σε ένα βήμα της προσομοίωσης. Συνεπώς, μπορεί να

απαιτηθούν περισσότερα βήματα μέχρι την επίτευξη του επιθυμητού περιορισμού του ρεύματος στάτη στην ονομαστική του τιμή και για αυτό η επακόλουθη καθυστέρηση d_2 είναι μικρότερη από την αρχική.

2β. Στην περίπτωση που δεν παραβιάζεται το όριο του ρεύματος στάτη, δηλαδή ισχύει $I_s < I_s^{lim}$, ο έλεγχος συνεχίζεται στην επόμενη γεννήτρια του συστήματος που υπόκειται σε περιορισμό ρεύματος τυμπάνου.

3α. Ακολουθεί έλεγχος του τεχνικού ελαχίστου των γεννητριών στις οποίες πραγματοποιήθηκε μείωση της ενεργού παραγωγής. Αν παραβιάζεται το όριο ελάχιστης ισχύος εξόδου P_m^{min} του στροβίλου, η προηγούμενη μείωση της ενεργού παραγωγής (βήμα 2α) δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί και ακυρώνεται. Στην περίπτωση αυτή η παραβίαση του επιτρεπόμενου ορίου ρεύματος στάτη θα αρθεί με μεταβολή της αέργου παραγωγής (βήμα 4).

3β. Αν δεν υπάρχει πρόβλημα τεχνικού ελαχίστου, ο έλεγχος συνεχίζεται στην επόμενη γεννήτρια του συστήματος που υπόκειται σε περιορισμό ρεύματος τυμπάνου.

4. Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατή η μείωση της ενεργού παραγωγής της γεννήτριας λόγω τεχνικού ελαχίστου, ο περιορισμός του ρεύματος στάτη πραγματοποιείται με μείωση της τάσης αναφοράς της γεννήτριας. Αν η γεννήτρια βρίσκεται σε λειτουργία αυτόματης ρύθμισης τάσης, η μείωση της τάσης αναφοράς γίνεται με σταθερό ρυθμό α μέχρι να αρθεί η παραβίαση του επιτρεπόμενου ορίου ρεύματος στάτη. Αν η γεννήτρια βρίσκεται σε λειτουργία με περιορισμό υπερδιέγερσης, πραγματοποιείται αρχικά μία βηματική μείωση ΔV_{ref}^{step} της τάσης αναφοράς ώστε η μηχανή να επανέλθει σε λειτουργία με αυτόματη ρύθμιση τάσης και στη συνέχεια, εφόσον εξακολουθεί η παραβίαση του επιτρεπόμενου ορίου ρεύματος στάτη, η μείωση της τάσης αναφοράς γίνεται με σταθερό ρυθμό β .

Η βηματική μείωση της τάσης αναφοράς για τη μεταγωγή της γεννήτριας από λειτουργία με προστασία υπερδιέγερσης σε λειτουργία με αυτόματη ρύθμιση τάσης προσδιορίζεται ως εξής: Κατά τη λειτουργία της γεννήτριας με προστασία υπερδιέγερσης, η ΗΕΔ διέγερσης E_f είναι ίση με τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή συνεχούς λειτουργίας E_f^{lim} :

$$E_f = E_f^{lim} \quad (3.5)$$

Κατά τη λειτουργία της γεννήτριας με αυτόματη ρύθμιση τάσης, η ΗΕΔ διέγερσης E_f δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$E_f = G_{AVR}(V_{ref} - V), \text{ με } E_f < E_f^{lim} \quad (3.6)$$

όπου G_{AVR} είναι το κέρδος του αναλογικού αυτόματου ρυθμιστή τάσης στη μόνιμο κατάσταση και V_{ref} η τάση αναφοράς.

Στο σημείο μεταγωγής της γεννήτριας από αυτόματη ρύθμιση τάσης σε περιορισμό υπερδιέγερσης, ισχύει η παρακάτω σχέση (αγνοώντας τη λογική αντιστρόφου χρόνου του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης):

$$E_f^{lim} = G_{AVR}(V_{ref} - V) \quad (3.7)$$

Για να επαναφέρουμε τη μηχανή σε αυτόματη ρύθμιση θα πρέπει η ΗΕΔ διέγερσης να είναι οριακά μικρότερη από την E_f^{lim} , δηλαδή να ισχύει η (3.6). Αυτό επιτυγχάνεται μειώνοντας την τάση αναφοράς της γεννήτριας κατά την τιμή:

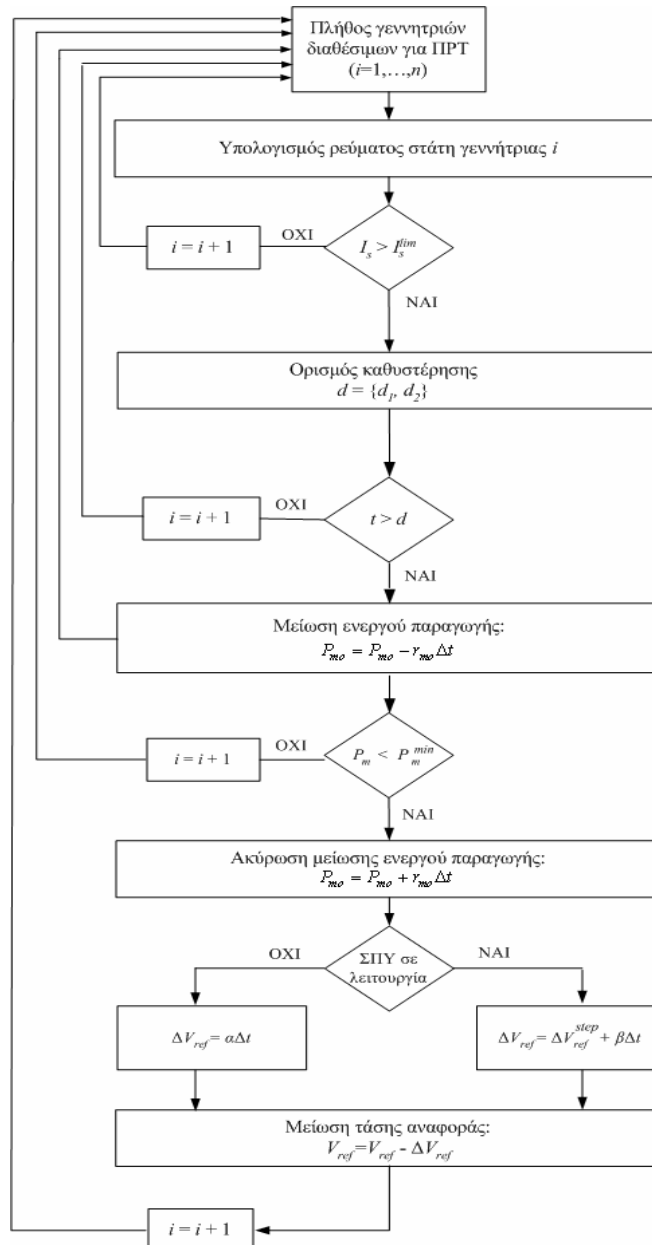
$$\Delta V_{ref}^{step} = V_{ref} - \left(V + \frac{E_f^{lim}}{G_{AVR}} \right) \quad (3.8)$$

Συνολικά η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$V_{ref} = V_{ref} - \Delta V_{ref} \quad (3.9)$$

$$\Delta V_{ref} = \begin{cases} \alpha d_2 & , \text{ γεννήτρια σε αυτόματη ρύθμιση τάσης} \\ \Delta V_{ref}^{step} + \beta d_2 & , \text{ γεννήτρια σε προστασία υπερδιέγερσης} \end{cases} \quad (3.10)$$

όπου α, β σταθεροί ρυθμοί μείωσης της τάσης αναφοράς.



Σχ. 3.2 Διάγραμμα ροής μοντέλου περιορισμού ρεύματος τυμπάνου

3.2.2 Εφαρμογή Περιορισμού Ρεύματος Τυμπάνου στο Ελληνικό Σύστημα

Στην παράγραφο αυτή ελέγχεται η εφαρμογή του υποπρογράμματος περιορισμού ρεύματος τυμπάνου χρησιμοποιώντας δεδομένα από την προσομοίωση της διακοπής της 12^{ης} Ιουλίου 2004, που οδήγησε στη διακοπή ηλεκτροδότησης του νοτίου συστήματος. Η ανάλυση αναφέρεται μόνο στην προσομοίωση της λειτουργίας του περιορισμού ρεύματος τυμπάνου και όχι στην πραγματική εξέλιξη του φαινομένου που περιγράφεται στο έκτο κεφάλαιο.

Με βάση τα προαναφερόμενα, η εφαρμογή που ακολουθεί βασίζεται στο στιγμιότυπο ροής ισχύος που κατέγραψε ο εκτιμητής κατάστασης του κέντρου ελέγχου στις 11:30 της 12^{ης} Ιουλίου 2004, μία ώρα περίπου προτού τη σβέση. Τη δεδομένη χρονική στιγμή η συνολική κατανάλωση ήταν ήδη αρκετά υψηλή (9084 MW) και υπήρχαν προβλήματα λειτουργίας λόγω ορισμένων ιδιομορφιών τοπολογίας που οφείλονταν σε έργα ενίσχυσης του συστήματος [Por04]. Λεπτομερέστερη περιγραφή της συγκεκριμένης κατάστασης του συστήματος γίνεται σε επόμενα κεφάλαια.

Το σενάριο που προσομοιώνεται είναι η ομοιόμορφη αύξηση του φορτίου με ρυθμό 0,0017 %/s από τη χρονική στιγμή $t = 100$ s και μέχρι την κατάρρευση των τάσεων του συστήματος. Από το συνολικό φορτίο στο αρχικό σημείο, το φορτίο που συμμετέχει στην ομοιόμορφη αύξηση είναι ίσο με 7710 MW

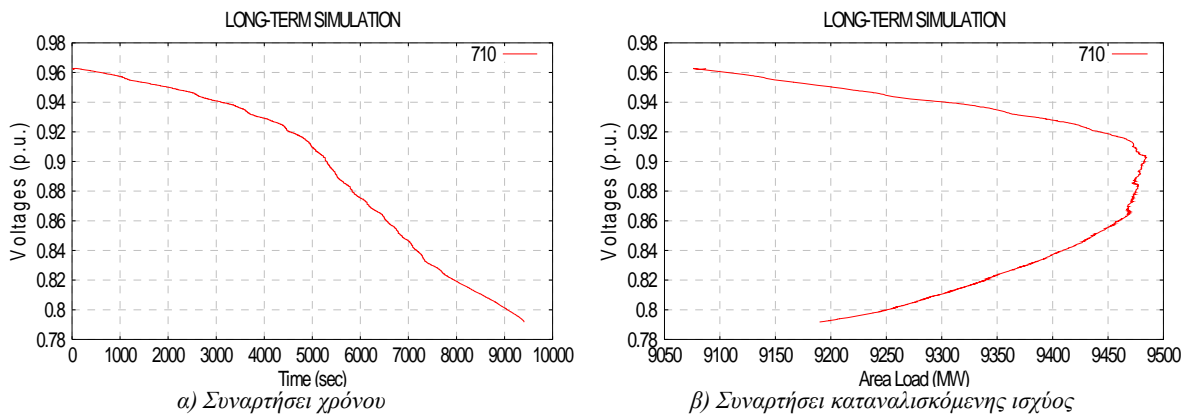
και αντιστοιχεί στο φορτίο των τελικών καταναλωτών, ενώ το υπόλοιπο (1374 MW) αντιστοιχεί σε βιομηχανικό φορτίο ή βοηθητικό φορτίο των μονάδων παραγωγής και παραμένει σταθερό καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο επιβαλλόμενος ρυθμός αντιστοιχεί στον πραγματικό ρυθμό αύξησης του φορτίου του συστήματος που καταγράφηκε την ημέρα αυτή στο διάστημα μεταξύ 11:30 και 12:00, μισή ώρα σχεδόν πριν τη σβέση του νοτίου τμήματος της χώρας.

Ο περιορισμός ρεύματος τυμπάνου εφαρμόζεται στις μονάδες Αγ. Γεώργιος 8-9, Αλιβέρι 3-4 και Λαύριο 1-3-4, στις οποίες κατά το περιστατικό της αστάθειας της 12^{ης} Ιουλίου 2004 παρατηρήθηκε τέτοια συμπεριφορά. Ο ρυθμός μείωσης r_{mo} της παραγωγής ενεργού ισχύος για κάθε γεννήτρια σε MW/min παρουσιάζεται στον Πίν. 3.1 και αντιστοιχεί σε αυτόν που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του περιστατικού.

Πίν. 3.1 Ρυθμός μείωσης ενεργού ισχύος γεννητριών

ΜΟΝΑΔΑ	MW/min
Αγ. Γεώργιος 8	3,30
Αγ. Γεώργιος 9	4,38
Αλιβέρι 3,4	3,42
Λαύριο 1	6,00
Λαύριο 3	3,30
Λαύριο 4	11,88

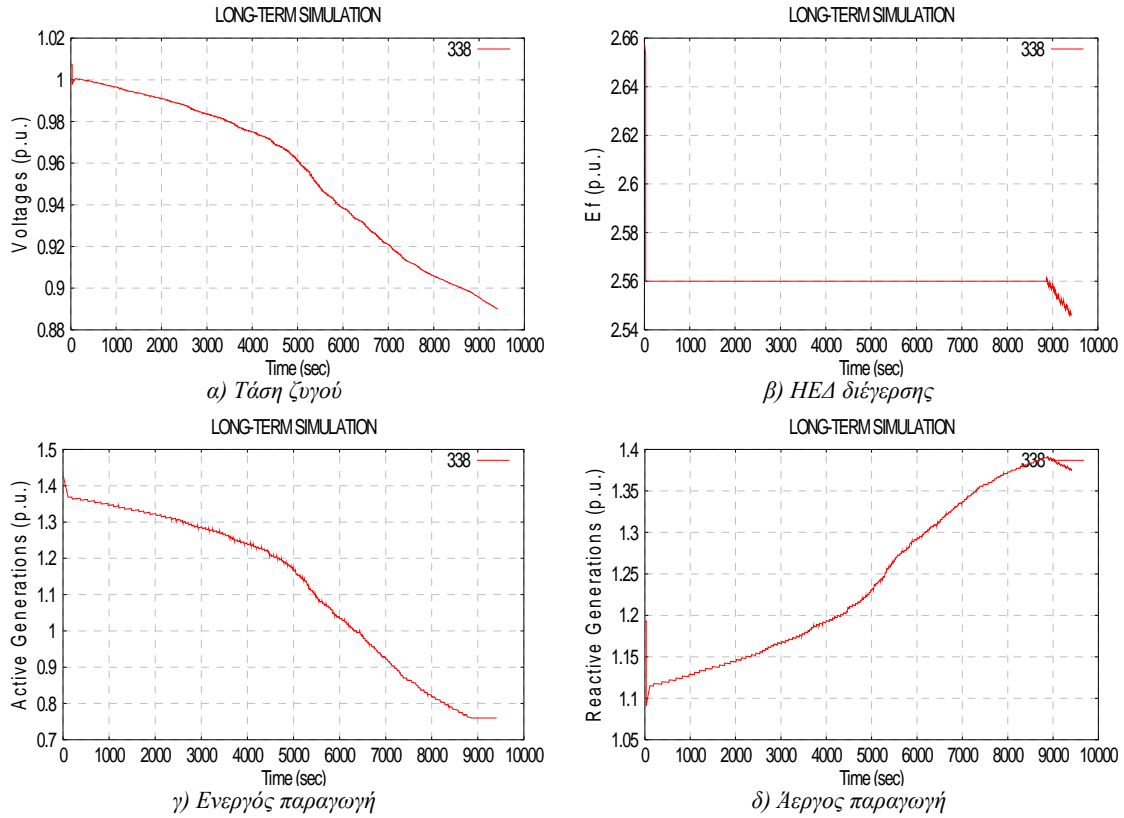
Στο Σχ. 3.3 φαίνεται το διάγραμμα της τάσης του ζυγού 150 kV στο Ρουφ συναρτήσει του χρόνου και του συνολικού φορτίου του συστήματος. Είναι φανερό ότι το συνολικό φορτίο μπορεί να αυξηθεί μέχρι τα 9475 MW περίπου, ενώ στη συνέχεια η ζήτηση δεν μπορεί να ικανοποιηθεί, προκαλώντας δια των μηχανισμών αποκατάστασης της ισχύος στα φορτία την κατάρρευση του συστήματος. Ο σχετικά μεγάλος χρόνος μέχρι την κατάρρευση θα περιοριζόταν αισθητά αν είχαν ληφθεί υπόψη περιορισμοί, όπως οι ρυθμίσεις υποτάσεως των γεννητριών.



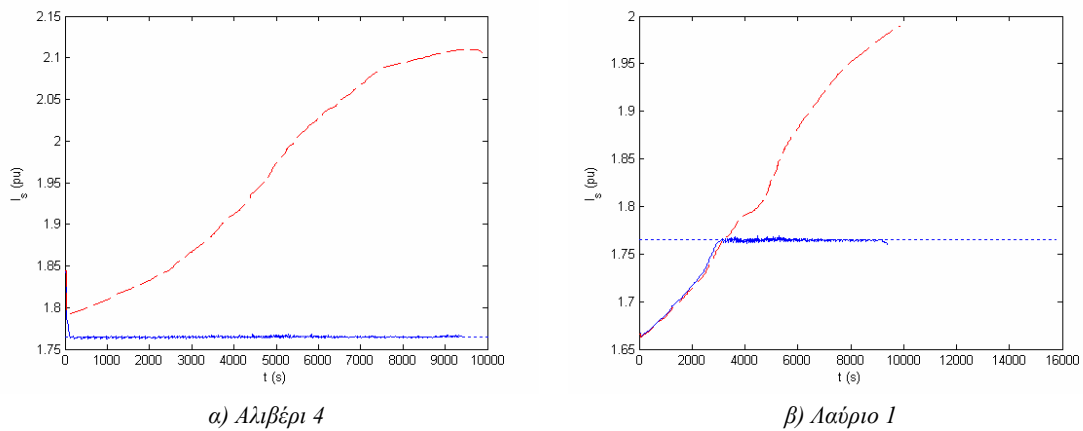
Σχ. 3.3 Τάση ζυγού 150 kV Ρουφ

Στο Σχ. 3.4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τερματικής τάσης, ΗΕΔ διέγερσης και παραγόμενης ενεργού και αέργου ισχύος της μονάδας Αλιβέρι 4. Λόγω της αρχικοποίησης, η γεννήτρια εμφανίζεται υπερδιεγερμένη στο αρχικό σημείο της προσομοίωσης με αποτέλεσμα να ενεργοποιηθεί το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης, προκαλώντας την αρχική μείωση στη διέγερση της μηχανής που φαίνεται στο Σχ. 3.4β.

Στο Σχ. 3.5α φαίνεται η χρονική διακύμανση του ρεύματος στάτη της γεννήτριας. Η διακεκομμένη καμπύλη αντιστοιχεί στο ρεύμα στάτη χωρίς εφαρμογή του περιορισμού, ενώ η συνεχής καμπύλη στο ρεύμα στάτη με εφαρμογή του περιορισμού. Η γεννήτρια παραβιάζει το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ρεύματος στάτη (εστιγμένη καμπύλη) από την αρχή της προσομοίωσης ($t = 0$), με αποτέλεσμα μετά από καθυστέρηση $d_1 = 20$ s να εφαρμοστεί για πρώτη φορά ο περιορισμός ρεύματος τυμπάνου, μειώνοντας την ενεργό παραγωγή της γεννήτριας με σταθερό ρυθμό $r_{mo} = 3,42$ MW/min = 0,057 MW/s. Η επακόλουθη χρονική καθυστέρηση d_2 ορίζεται ίση με το βήμα Δt της προσομοίωσης ($d_2 = 10$ s).

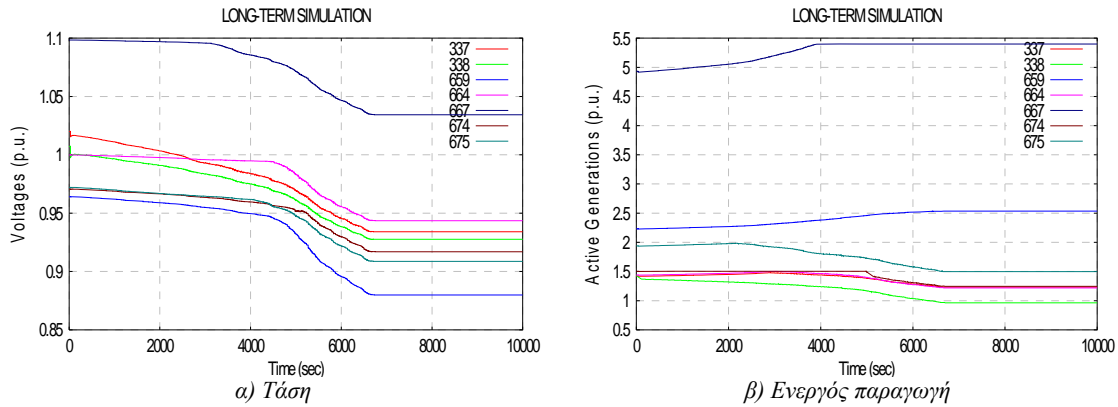


Σχ. 3.4 Μονάδα Αλιβέρι 4



Σχ. 3.5 Περιορισμός ρεύματος στάτη

Η μείωση ενεργού ισχύος συνεχίζεται ως τις 13:58 ($t = 8850$ s), οπότε η μονάδα φτάνει στο τεχνικό της ελάχιστο (Σχ. 3.4γ). Ωστόσο, υπό τη συνεχή αύξηση του φορτίου το ρεύμα στάτη εξακολουθεί να υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο. Συνεπώς, με τη μηχανή να βρίσκεται σε λειτουργία με προστασία υπερδιέγερσης (Σχ. 3.4β), εφαρμόζεται μείωση της τάσης αναφοράς της γεννήτριας. Η πρώτη (βηματική) μείωση της τάσης αναφοράς γίνεται τη χρονική στιγμή $t = 8870$ s και προκαλεί τη μεταγωγή της γεννήτριας από λειτουργία με προστασία υπερδιέγερσης σε λειτουργία με αυτόματη ρύθμιση τάσης. Οι επακόλουθες μειώσεις της τάσης αναφοράς γίνονται με σταθερό ρυθμό $\alpha = \beta = 2 \cdot 10^{-3}$ αμ/s. Παρατηρούμε ότι το συνολικό αποτέλεσμα του περιορισμού ρεύματος τυμπάνου είναι η ικανοποιητική προσαρμογή του ρεύματος στάτη στο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο (ονομαστική τιμή). Στο Σχ. 3.5β φαίνεται η ίδια διαδικασία προσαρμογής του ρεύματος στάτη για τη γεννήτρια Λαύριο 1.



Σχ. 3.6 Έλεγχος ευσταθούς λειτουργίας περιορισμού ρεύματος τυμπάνου

Η ευσταθής λειτουργία του περιορισμού ρεύματος τυμπάνου εξετάζεται ως εξής: Το κρίσιμο σημείο C (σημείο αστάθειας) του συστήματος συναντάται τη χρονική στιγμή $t = 6560$ s (στις 13:20 περίπου). Αν υποθεθεί ότι η αύξηση του φορτίου σταματά αυτή τη χρονική στιγμή, το σύστημα με τις γεννήτριες να υπόκεινται σε περιορισμό ρεύματος τυμπάνου βρίσκει νέο σημείο ισορροπίας. Αυτό φαίνεται στο Σχ. 3.6, όπου παρουσιάζεται η διακύμανση της τάσης και της ενεργού παραγωγής των γεννητριών που υπέστησαν περιορισμό ρεύματος τυμπάνου στο παραπάνω σενάριο.

Συμπερασματικά, η ρουτίνα που αναπτύχθηκε προσομοιώνει επιτυχώς τον περιορισμό ρεύματος στάτη των γεννητριών. Όπως φαίνεται επίσης, η λειτουργία του περιορισμού ρεύματος τυμπάνου δεν δημιουργεί πρόβλημα ευστάθειας στο σύστημα από μόνη της.

3.2.3 Προστασία Υποτάσεως

Προστασία υποτάσεως γεννητριών

Σε συνθήκες όπου η τερματική τάση των γεννητριών προσεγγίζει ιδιαίτερα χαμηλές τιμές, είναι πιθανό να συμβεί αποσύνδεσή τους από το δίκτυο απόρροια της διακοπής των βοηθητικών λόγω υπερθέρμανσης εξαιτίας των υψηλών ρευμάτων [IWG03]. Μία τέτοια περίπτωση καταγράφηκε στο περιστατικό της σβέσης της 12^{ης} Ιουλίου 2004, όπου από τη μελέτη των αρχείων συμβάντων προέκυψε ότι πράγματι υπήρξε αποσύνδεση ορισμένων μονάδων από χαμηλή τερματική τάση και συνακόλουθης υπερφόρτισης των βοηθητικών. Έτσι, για την πιστότερη αποτύπωση της συμπεριφοράς του συστήματος στις προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, μοντελοποιήθηκε στο πρόγραμμα WPSTAB η λειτουργία της προστασίας υποτάσεως των γεννητριών. Εν συνεχεία, το μοντέλο αυτό ενσωματώθηκε στην εφαρμογή On-line VSA που λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου του ΔΕΣΜΗΕ.

Ο αλγόριθμος του μοντέλου είναι ιδιαίτερα απλός: Αν η τερματική τάση της γεννήτριας V_t παραμείνει για περισσότερο από μία προκαθορισμένη χρονική καθυστέρηση t_{del} κάτω από τη ρύθμιση υποτάσεως V_{thres} του ηλεκτρονόμου, η γεννήτρια αποσυνδέεται από το σύστημα. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή, το κατώφλι V_{thres} αντιστοιχεί όχι σε πραγματική ρύθμιση της προστασίας υποτάσεως των γεννητριών (που ενδεχομένως μπορεί να υπάρχει σε ορισμένες γεννήτριες), αλλά σε αυτήν την τιμή της τερματικής τάσης πέραν της οποίας υπάρχει απώλεια των βοηθητικών και κατά συνέπεια συνακόλουθη αποσύνδεση της γεννήτριας.

Από τη διερεύνηση των αιτιών σβέσης του νοτίου τμήματος του Ελληνικού συστήματος την 12 Ιουλίου 2004 [VNT06], προέκυψε μια ενδεικτική κατώτατη τιμή τερματικής τάσης των γεννητριών, πέραν της οποίας θεωρείται ότι οι γεννήτριες αποσυνδέονται από το δίκτυο. Η τιμή αυτή επιβεβαιώθηκε από τις προσομοιώσεις του φαινομένου τουλάχιστον για τις μονάδες του νοτίου συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, μολονότι η ακριβής αλληλουχία των διακοπών δεν έχει πλήρως διαπιστωθεί, θεωρήθηκε κατά την προσομοίωση ότι οι μονάδες αποσυνδέονται λόγω υπερθέρμανσης των βοηθητικών συνεπεία της χαμηλής τάσης, εφόσον επί 10 δευτερόλεπτα η τερματική τους τάση παραμένει κάτω από 88% της ονομαστικής τους. Με αυτόν τον τρόπο έγινε εφικτή η πιστότερη κατά το δυνατόν προσομοίωση του φαινομένου της κατάρρευσης επιβεβαιώνοντας την παραπάνω κατώτατη επιτρεπόμενη τιμή τερματικής τάσης γεννητριών. Με βάση τα προαναφερόμενα, στις εφαρμογές που περιλαμβάνονται στη διατριβή, ως ρυθμίσεις της προστασίας υποτάσεως των γεννητριών λαμβάνονται οι παραπάνω τιμές.

Προστασία υποτάσεως γραμμών μεταφοράς

Εκτός από τη λειτουργία της προστασίας υποτάσεως γεννητριών, μοντελοποιήθηκε στο πρόγραμμα WPSTAB και η λειτουργία της προστασίας υποτάσεως γραμμών μεταφοράς. Στην περίπτωση αυτή, τα στοιχεία υποτάσεως των ηλεκτρονόμων αποστάσεως χρησιμοποιούνται για την αποσύνδεση γραμμών μεταφοράς του συστήματος, όταν επικρατούν συνθήκες χαμηλής τάσης που υποδεικνύουν αστάθεια τάσης στο σύστημα.

Το μοντέλο που κατασκευάστηκε αναπαριστά μία απλουστευμένη εκδοχή της προστασίας υποτάσεως γραμμών μεταφοράς. Η λογική του είναι όμοια με αυτή που περιγράφηκε για την προστασία των γεννητριών από χαμηλή τερματική τάση: Αν η τάση V_l στο άκρο μίας γραμμής μεταφοράς παραμείνει για περισσότερο από μία προκαθορισμένη χρονική καθυστέρηση t_{del} κάτω από τη ρύθμιση υποτάσεως V_{thres} του στοιχείου υποτάσεως του ηλεκτρονόμου αποστάσεως, ο διακόπτης ισχύος στο άκρο αυτό της γραμμής ανοίγει.

Η λειτουργία της προστασίας υποτάσεως γραμμών μεταφοράς προκάλεσε το άνοιγμα των διακοπών ισχύος σε ορισμένες γραμμές μεταφοράς 400 kV του Ελληνικού συστήματος κατά το περιστατικό της σβέσης στις 12 Ιουλίου 2004 [VNT06]. Η αποσύνδεση των συγκεκριμένων γραμμών οδήγησε στο διαχωρισμό του συστήματος, ο οποίος αποδείχθηκε σωτήριος για τη μη εξάπλωση της αστάθειας στο Βορρά.

3.2.4 Αυτόματη Ζεύξη-Απόζευξη Εγκάρσιων Πηνίων Αντιστάθμισης

Ένα από τα σχήματα προστασίας συστήματος που μοντελοποιήθηκαν στο πρόγραμμα WPSTAB είναι αυτό της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης εγκάρσιων πηνίων αντιστάθμισης σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης του συστήματος. Το μέτρο αυτό διαφέρει από τα υπόλοιπα που πραγματεύονται στη διατριβή αυτή, στο ότι δεν προκαλεί αποκοπή φορτίου, αλλά συμβάλλει στον έλεγχο της αέργου ισχύος στο σύστημα. Με το μέτρο αυτό μπορούν να αντιμετωπιστούν συνθήκες υπερτάσεων, που δημιουργούνται όταν για παράδειγμα συμβεί μία ξαφνική μείωση του φορτίου, ή συνθήκες υποτάσεων, οι οποίες μπορεί να προκληθούν από την απώλεια μιας γραμμής μεταφοράς ή μιας μονάδας παραγωγής.

Εγκάρσια πηνία αντιστάθμισης συνδέονται συνήθως στο ζυγό YT των υποσταθμών διανομής ή στο τρίτευον τύλιγμα των αυτομετασχηματιστών στα KYT. Στο Ελληνικό σύστημα υπάρχουν λίγα πηνία αντιστάθμισης, κυρίως στα σημεία διασύνδεσης του νησιωτικού με το ηπειρωτικό σύστημα μέσω καλωδιακών ζεύξεων. Ωστόσο, η θέση τους (στο δυτικό και νότιο τμήμα του συστήματος) καθιστά χρήσιμη τη μελέτη της αποσύνδεσης των πηνίων αντιστάθμισης από το σύστημα ως μέτρο προστασίας από αστάθεια τάσης. Πράγματι, τα πηνία καταναλώνουν σημαντική άεργο ισχύ και η έγχυση της ισχύος αυτής στο δίκτυο ενδεχομένως μπορεί να αποσοβήσει την εξέλιξη ενός φαινομένου αστάθειας τάσης.

Τα περισσότερα σχήματα προστασίας συστήματος με αυτόματη ζεύξη-απόζευξη πηνίων αντιστάθμισης χρησιμοποιούν κοινούς ελεγκτές που εποπτεύουν μέσω απλών διατάξεων μέτρησης την τάση των ζυγών στους οποίους συνδέονται τα πηνία. Στην περίπτωση αυτή, η μέτρηση της τάσης αποτελεί το κριτήριο για την εντολοδότηση της ζεύξης ή απόζευξης προκαθορισμένων πηνίων. Επικουρικά μπορεί να απαιτηθούν και άλλα σήματα ελέγχου, που ωστόσο αυξάνουν την πολυπλοκότητα και το κόστος υλοποίησης του σχήματος προστασίας.

Ο αλγόριθμος του μοντέλου ακολουθεί τη λογική της παρακολούθησης της τάσης με αποκεντρωμένο έλεγχο: Αν η τάση V_r στο ζυγό του πηνίου αντιστάθμισης παραμείνει για περισσότερο από μία προκαθορισμένη χρονική καθυστέρηση t_{del} κάτω από τη ρύθμιση υποτάσεως V_r^{min} , το πηνίο αποσυνδέεται από το σύστημα. Το πηνίο επανασυνδέεται όταν η τάση στο ζυγό του ξεπεράσει μία ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή V_r^{max} .

3.2.5 Δυναμικά Φορτία

Μοντελοποίηση

Η ανάλυση της συμπεριφοράς των φορτίων συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην κατανόηση της φύσης των φαινομένων αστάθειας τάσης [PSL95]. Η ακριβής παράσταση των φορτίων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι όμως δύσκολο να επιτευχθεί, λόγω της πολυπλοκότητας και της διαφορετικής σύνθεσής τους στα συστήματα διανομής.

Στο WPSTAB τα φορτία του συστήματος που δεν είναι κινητήρες θεωρούνται εξ ορισμού εκθετικής μορφής και στατικής φύσης. Η αποκατάσταση της καταναλισκόμενης σε αυτά ισχύος πραγματοποιείται μόνο μέσω του μηχανισμού του ΣΑΤΥΦ. Ωστόσο, τα φορτία του συστήματος δεν παρουσιάζουν πάντα στατική συμπεριφορά, αλλά μπορεί να διαθέτουν και κάποια εγγενή δυναμική αποκατάστασης της καταναλισκόμενης ισχύος.

Για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των φορτίων αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή ένα μοντέλο φορτίου με μηχανισμό αυτορρύθμισης της ισχύος. Στο μοντέλο αυτό, η αποκατάσταση της καταναλισκόμενης ισχύος στην αρχική (ονομαστική) ή μεταβαλλόμενη ζήτηση γίνεται με ρύθμιση των μεταβλητών κατάστασης z_P και z_Q , που σχετίζονται με τη μεταβολή της ωμικής και επαγωγικής αντίστοιχα αγωγιμότητας του φορτίου. Η δυναμική αυτορρύθμισης της ισχύος περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$T_P \frac{P_o}{V_o^a} \dot{z}_P = P_s - (z_P \frac{P_o}{V_o^a}) V^a \quad (3.11)$$

$$T_Q \frac{Q_o}{V_o^\beta} \dot{z}_Q = Q_s - (z_Q \frac{Q_o}{V_o^\beta}) V^\beta \quad (3.12)$$

όπου $P_s = P_s(t)$, $Q_s = Q_s(t)$ είναι η μακροπρόθεσμη ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος αντίστοιχα και T_P , T_Q οι χρονικές σταθερές επαναφοράς της ενεργού και αέργου συνιστώσας αντίστοιχα του φορτίου. Οι μεταβλητές κατάστασης z_P και z_Q αρχικοποιούνται έτσι, ώστε για $V = V_o$ να ισχύει $z_P = z_Q = 1$.

Θεωρώντας ότι η συνολική ζήτηση του συστήματος αυξάνεται με ρυθμό r , η συμμετοχή κάθε φορτίου στην αύξηση αυτή καθορίζεται από τους συντελεστές συμμετοχής r_P της ενεργού και r_Q της αέργου συνιστώσας του, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$P_s = P_o (1 + r \cdot r_P t) \quad (3.13)$$

$$Q_s = Q_o (1 + r \cdot r_Q t) \quad (3.14)$$

όπου:

P_o : η αρχική ζήτηση ενεργού ισχύος

Q_o : η αρχική ζήτηση αέργου ισχύος

r : ο ρυθμός αύξησης της ζήτησης

r_P : ο συντελεστής συμμετοχής της ενεργού συνιστώσας του φορτίου στην αύξηση της ζήτησης

r_Q : ο συντελεστής συμμετοχής της αέργου συνιστώσας του φορτίου στην αύξηση της ζήτησης.

Αν δεν υπάρχει αύξηση της ζήτησης, ο ρυθμός r λαμβάνεται ίσος με μηδέν και οι συντελεστές συμμετοχής των φορτίων δεν παίζουν κανένα ρόλο στην προσομοίωση. Αντίστοιχα, αν οι συντελεστές συμμετοχής είναι μηδενικοί, το φορτίο δε συμμετέχει στην αύξηση της ζήτησης.

Οι μεταβλητές κατάστασης \dot{z}_P και \dot{z}_Q αναφέρονται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα και οι αντίστοιχες εξισώσεις (3.11) και (3.12) εντάσσονται στο σύνολο των διαφορικών εξισώσεων του οιονεί στατικού συστήματος. Σημειώνεται ωστόσο ότι στην προσομοίωση η δυναμική της αυτορρύθμισης του φορτίου υλοποιείται με διακριτοποίηση των μεταβλητών κατάστασης \dot{z}_P και \dot{z}_Q , δηλαδή οι παραπάνω εξισώσεις μετασχηματίζονται στις εξισώσεις διαφορών:

$$z_{P,k+1} = \begin{cases} z_{P,k} + \frac{\Delta t}{T_P} (P_s \frac{V_o^a}{P_o} - z_{P,k} V^a), & \text{αν } \left| P_s - z_{P,k} \frac{P_o}{V_o^a} V^a \right| > db \\ z_{P,k}, & \text{αν } \left| P_s - z_{P,k} \frac{P_o}{V_o^a} V^a \right| \leq db \end{cases} \quad (3.15)$$

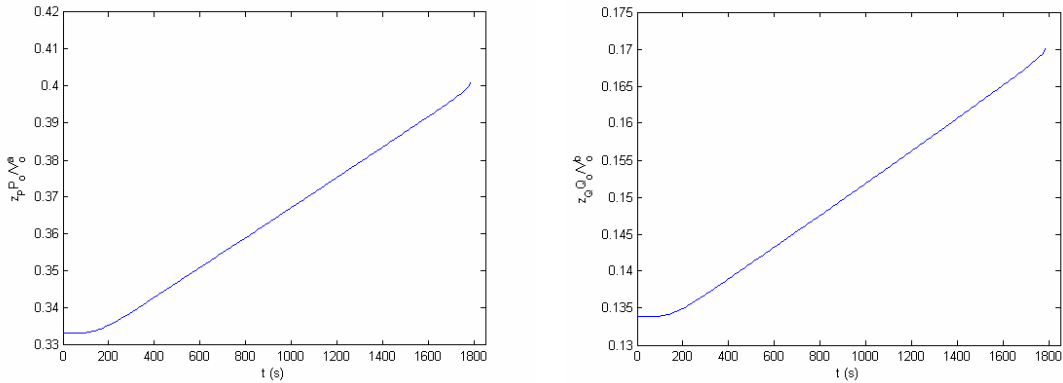
$$z_{Q,k+1} = \begin{cases} z_{Q,k} + \frac{\Delta t}{T_Q} (Q_s \frac{V_o^\beta}{Q_o} - z_{Q,k} V^\beta), & \text{αν } \left| Q_s - z_{Q,k} \frac{Q_o}{V_o^\beta} V^\beta \right| > db \\ z_{Q,k}, & \text{αν } \left| Q_s - z_{Q,k} \frac{Q_o}{V_o^\beta} V^\beta \right| \leq db \end{cases} \quad (3.16)$$

όπου Δt το βήμα της προσομοίωσης και db η νεκρή ζώνη ρύθμισης της ισχύος ως προς τη μακροπρόθεσμη ζήτηση.

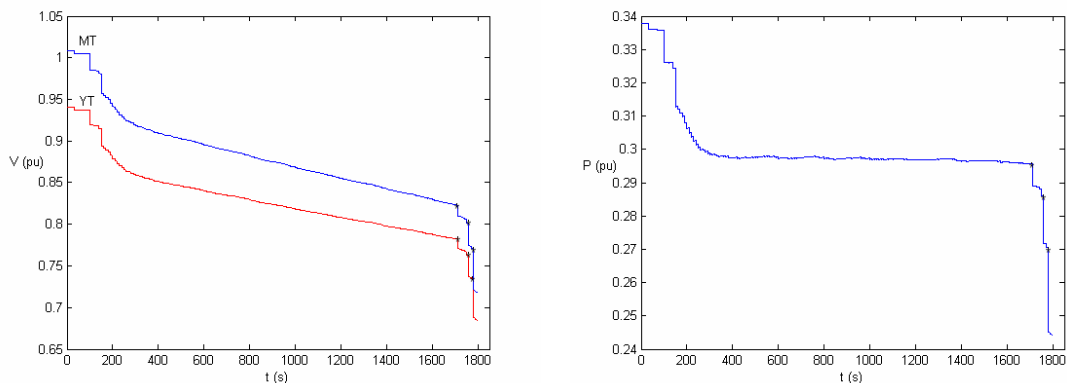
Παραδείγματα αυτορρύθμισης ισχύος

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα αυτορρύθμισης φορτίου στο Ελληνικό σύστημα με τη βοήθεια προσομοιώσεων στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Κοινή αφετηρία όλων των προσομοιώσεων αποτελεί το στιγμιότυπο ροής ισχύος που κατέγραψε ο εκτιμητής κατάστασης του κέντρου ελέγχου στις 11:30 της 12^{ης} Ιουλίου 2004, μία ώρα περίπου προτού τη σβέση του νοτίου συστήματος. Το βήμα της προσομοίωσης λαμβάνεται ίσο με $\Delta t = 10$ s, ενώ οι χρονικές σταθερές επαναφοράς της ενεργού και αέργου συνιστώσας λαμβάνονται ίσες με $T_P = T_Q = 1000$ s. Στις προσομοιώσεις λαμβάνεται υπόψη ο περιορισμός ρεύματος τυμπάνου και η προστασία υποτάσεως των γεννητριών.

Στο πρώτο παράδειγμα προσομοιώνεται η απώλεια των μονάδων Αλιβέρι 3 και 4 κατά τις χρονικές στιγμές $t = 150$ s και $t = 200$ s αντίστοιχα. Το σύστημα μετά τη διαταραχή αυτή δεν μπορεί να αποκαταστήσει μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας και καταρρέει. Στο Σχ. 3.7 φαίνεται η αμ μεταβολή της ωμικής και επαγωγικής αγωγιμότητας του φορτίου στο ζυγό 20 kV Σχηματάρι 52, στην απόπειρά του να αποκαταστήσει την καταναλισκόμενη ισχύ στην αρχική ζήτηση. Το ΣΑΤΥΦ στο συγκεκριμένο υποσταθμό δε συμβάλλει στην αποκατάσταση της ισχύος, καθώς η λήψη του μετασχηματιστή βρίσκεται εξ αρχής στο κάτω όριο r_{min} του εύρους μεταβολής της. Η συνεχής αύξηση της αγωγιμότητας αποτελεί έναν έμμεσο δείκτη της κατάρρευσης. Μάλιστα λίγο πριν την απώλεια βραχυπρόθεσμοι σημεία ισορροπίας εξαιτίας των αποσυνδέσεων ορισμένων γεννητριών του συστήματος λόγω υποτάσεως (αστερίσκοι στο Σχ. 3.8), η κλίση των καμπυλών αγωγιμότητας αυξάνεται.



Σχ. 3.7 Αυτορρύθμιση αγωγιμότητας φορτίου ζυγού Σχηματάρι 52



α) Τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος

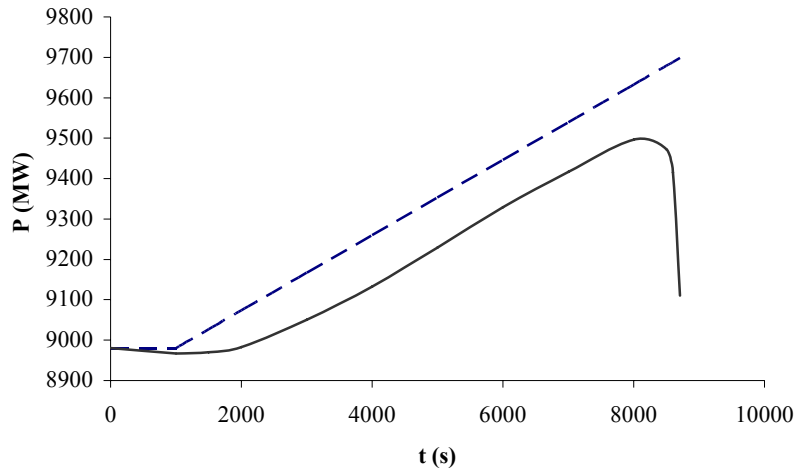
β) Κατανάλωση ενεργού ισχύος

Σχ. 3.8 Τάση και κατανάλωση ζυγού Σχηματάρι 52

Στο δεύτερο παράδειγμα εφαρμόζεται ομοιόμορφη και αναλογική αύξηση στη συνολική ενεργό (διακεκομμένη καμπύλη του Σχ. 3.9) και άεργο ζήτηση του συστήματος με ρυθμό $r = 0,5 \cdot 10^{-5}$ %/s. Η αύξηση στη ζήτηση επιβάλλεται από τη χρονική στιγμή $t = 1000$ s, οπότε και τα φορτία του συστήματος προσπαθούν να την ακολουθήσουν μέσω των μηχανισμών αποκατάστασης της ισχύος που διαθέτουν (μεταβλητή αγωγιμότητα και ΣΑΤΥΦ). Ο ρυθμός της αύξησης είναι μικρός, ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος για την αποκατάσταση της ισχύος. Η αρχική μείωση της καταναλισκόμενης ενεργού ισχύος P του συστήματος (συνεχής καμπύλη του Σχ. 3.9) οφείλεται στην επιβολή περιορισμού

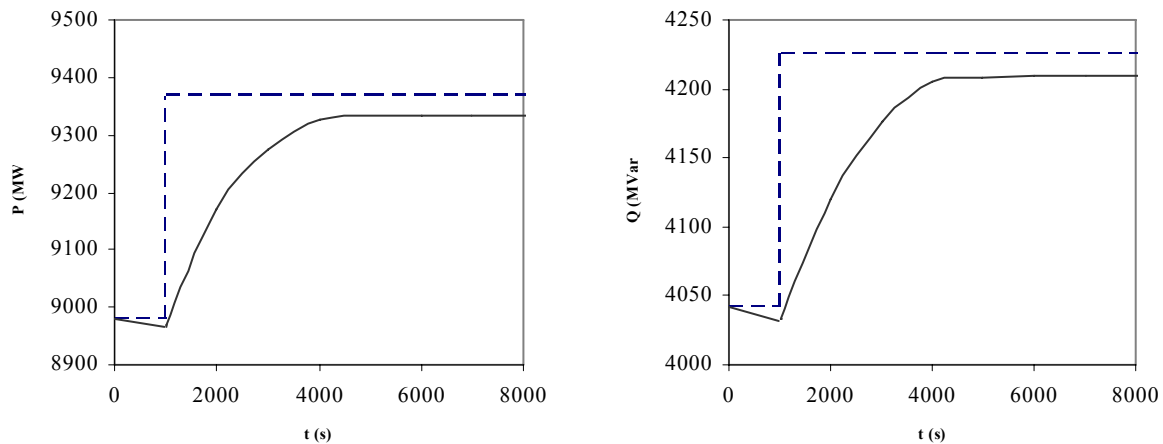
υπερδιέγερσης σε ορισμένες γεννήτριες που παραβίαζαν το επιτρεπόμενο όριο, καθώς και στη μεταβολή των λήψεων ορισμένων ΣΑΤΥΦ που βρέθηκαν εκτός της νεκρής ζώνης ρύθμισης κατά την αρχικοποίηση.

Μέχρι τη χρονική στιγμή $t = 8000$ s περίπου, η καταναλισκόμενη ενεργός ισχύς παρακολουθεί την αύξηση της ζήτησης. Η απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών που παρατηρείται στο χρονικό αυτό διάστημα οφείλεται στην επίδραση της νεκρής ζώνης ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ και της νεκρής ζώνης ρύθμισης της ισχύος. Μετά τη χρονική στιγμή $t = 8500$ s, όπου συναντάται το σημείο αστάθειας του συστήματος (κρίσιμο σημείο), ο μηχανισμός αύξησης της αγωγιμότητας γίνεται ασταθής και η καταναλισκόμενη ενεργός ισχύς μειώνεται, αποκλίνοντας συνεχώς από την καμπύλη της ζήτησης. Η προσομοίωση σταματά με την απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας.



Σχ. 3.9 Ασταθής αποκατάσταση του φορτίου

Στο τρίτο παράδειγμα εφαρμόζεται μία βηματική αύξηση κατά 5% στη ζήτηση $P_{s,0}$ και $Q_{s,0}$ των φορτίων του συστήματος που έχουν μη μηδενικούς συντελεστές συμμετοχής και εξετάζεται η χρονική απόκριση της συνολικής ενεργού P και αέργου Q συνιστώσας του φορτίου. Η διαδικασία αποκατάστασης της ισχύος πραγματοποιείται μέσω των μηχανισμών αυτορρύθμισης της ισχύος και των ΣΑΤΥΦ του συστήματος. Η προσαρμογή του φορτίου εντός της νεκρής ζώνης ισχύος (δεν φαίνεται στο σχήμα Σχ. 3.10) γίνεται αργά, λόγω της μεγάλης σταθεράς χρόνου (T_p , T_Q) του μηχανισμού αυτορρύθμισης της ισχύος και του περιορισμένου εύρους μεταβολής της λήψης των ΣΑΤΥΦ, που στην περίπτωση αυτή αποτελεί την ταχεία δυναμική αποκατάσταση της ισχύος.



Σχ. 3.10 Αυτορρύθμιση φορτίου σε βηματική αύξηση της ζήτησης

3.3 ΑΝΑΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η αναπροσαρμογή των δεδομένων του Ελληνικού συστήματος αποτέλεσε μέρος της διαδικασίας συντήρησης της βάσης δεδομένων της εφαρμογής On-line VSA, η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου [Vou05a]. Η διαδικασία αυτή περιλάμβανε αρχικά τη συλλογή όλων των δεδομένων του συστήματος από τον ΔΕΣΜΗΕ και εν συνεχεία την ανάλυση, επεξεργασία και αναπροσαρμογή τους. Προκειμένου να συστηματικοποιηθεί ο έλεγχος των δεδομένων που φορτώνονται στη βάση δεδομένων της εφαρμογής, συντάχθηκαν κατάλληλες εντολές ελέγχου με τη χρήση απλών προγραμματιστικών εντολών της MySQL.

Τα δεδομένα εισόδου της εφαρμογής On-line VSA κατηγοριοποιούνται σε τέσσερα σύνολα:

- Δεδομένα εκτίμησης κατάστασης συστήματος.
- Δεδομένα φόρτισης συστήματος.
- Δεδομένα ενδεχόμενων διαταραχών.
- Δυναμικά δεδομένα διατάξεων.

Ο εκτιμητής κατάστασης του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (EMS) στο κέντρο ελέγχου παράγει 14 αρχεία εξόδου, τα οποία εισάγονται στη βάση δεδομένων της εφαρμογής On-line VSA κάθε φορά που πρόκειται να εκτελεστεί ένας κύκλος εργασιών εκτίμησης ασφάλειας τάσης. Τα αρχεία αυτά περιγράφουν πλήρως την κατάσταση του συστήματος (κατάσταση φορτίων, μονάδων παραγωγής, γραμμών μεταφοράς, ζυγών, μετασχηματιστών ισχύος, υποσταθμών, πυκνωτών, πηνίων κλπ.) τη στιγμή της εκτίμησης.

Τα δεδομένα εξόδου του εκτιμητή κατάστασης μελετήθηκαν διεξοδικά σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (στιγμιότυπα) καθ' όλη τη διάρκεια του ερευνητικού έργου και όπου παρατηρήθηκαν ασυμφωνίες με την πραγματική κατάσταση του συστήματος έγιναν συγκεκριμένες υποδείξεις στον ΔΕΣΜΗΕ για την αναπροσαρμογή των αντίστοιχων δεδομένων του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας. Για παράδειγμα, διορθώθηκαν κάποια προβλήματα τοπολογίας σε σχέση με τη συνδεσμολογία ορισμένων μετασχηματιστών στην Αττική.

Τα δεδομένα φόρτισης καθορίζουν την κατεύθυνση φόρτισης του συστήματος για την εκτίμηση των περιθωρίων ασφάλειάς του. Πρόκειται για 5 αρχεία της βάσης δεδομένων της εφαρμογής, τα οποία περιγράφουν ποιες από τις γεννήτριες και τα φορτία (συνολικά και ανά γεωγραφική περιοχή) συμμετέχουν στη φόρτιση του συστήματος, καθώς και το είδος (ομοιόμορφη φόρτιση ή μη) και τη διάρκεια αυτής. Τα δεδομένα αυτά μελετήθηκαν και τροποποιήθηκαν σε όσες περιπτώσεις χρειάστηκε (π.χ. ορίστηκαν συντελεστές συμμετοχής για νέα φορτία ή μονάδες που εντάχθηκαν στο σύστημα).

Τα δεδομένα διαταραχών αναφέρονται στις ενδεχόμενες απλές ή πολλαπλές διαταραχές, που εν δυνάμει θεωρούνται επικίνδυνες για την ασφάλεια των τάσεων του συστήματος. Πρόκειται για 6 αρχεία, τα οποία προσδιορίζουν την ονομασία κάθε πιθανής διαταραχής, τις διατάξεις του συστήματος που εμπλέκονται σε αυτές και τη χρονική στιγμή της εφαρμογής τους. Οι ενδεχόμενες διαταραχές καθορίζονται με βάση την εμπειρική γνώση του συστήματος, ενώ η ίδια η εφαρμογή «φιλτράρει» τις πιο κρίσιμες από αυτές για κάθε εξεταζόμενο σενάριο αστάθειας.

Κατά τη διάρκεια συντήρησης της βάσης δεδομένων προστέθηκαν ή αφαιρέθηκαν διαταραχές από τα αρχεία, εξαιτίας της εγκατάστασης νέων διατάξεων στο σύστημα (π.χ. κατασκευή νέας μονάδας παραγωγής, η απώλεια της οποίας πρέπει να περιληφθεί στις διαταραχές ή έργα ενίσχυσης στο σύστημα μεταφοράς που μειώνουν τον αριθμό των επικίνδυνων διαταραχών).

Τα δεδομένα εισόδου της εφαρμογής που τροποποιούνται συχνότερα είναι τα δεδομένα εκτίμησης κατάστασης του συστήματος και τα δυναμικά δεδομένα των διατάξεων του. Τα δυναμικά δεδομένα των διατάξεων του συστήματος περιγράφουν πλήρως τη δυναμική συμπεριφορά των γεννητριών και των διατάξεων ελέγχου τους (αυτόματος ρυθμιστής τάσης, σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης κλπ.), των γεννητριών του εξωτερικού συστήματος που παριστάνονται ως ζυγοί σταθερής τάσης και των ΣΑΤΥΦ στους (πραγματικούς και φανταστικούς) μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνονται σε συνολικά 7 αρχεία, τα δεδομένα των οποίων μελετήθηκαν λεπτομερώς και προσαρμόστηκαν κατάλληλα όπου χρειάστηκε. Για παράδειγμα, για κάθε ένταξη στο σύστημα μίας νέας μονάδας παραγωγής ή ενός νέου υποσταθμού, εξήχθησαν τα δυναμικά δεδομένα της γεννήτριας και του ΣΑΤΥΦ αντίστοιχα.

Η ακρίβεια των δυναμικών δεδομένων παίζει καθοριστικό ρόλο στην εκτίμηση της ασφάλειας των τάσεων του συστήματος και ως εκ τούτου κρίνεται απαραίτητη για την αξιοπιστία της εφαρμογής πραγματικού χρόνου On-line VSA. Στην ανάλυση ευστάθειας τάσης ιδιαίτερη σημασία έχουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά των γεννητριών και κυρίως οι σύγχρονες επαγωγικές αντιδράσεις ευθέως και εγκάρσιου άξονα, οι συντελεστές μαγνητικού κορεσμού, το μέγιστο ρεύμα διέγερσης, τα κέρδη των αυτόματων ρυθμιστών τάσης και οι ρυθμοί ανάληψης και απόρριψης φορτίου. Δεδομένου επίσης ότι η δυναμική συμπεριφορά των γεννητριών υπήρξε καθοριστική στην εξέλιξη του περιστατικού σβέσης της 12^{ης} Ιουλίου 2004, πραγματοποιήθηκε ενδεδειγμένη ανάλυση και προσαρμογή των δυναμικών δεδομένων των γεννητριών του Ελληνικού συστήματος.

3.3.1 Σύγχρονες Αντιδράσεις Γεννητριών

Στον Πίν. 3.2 παρατίθενται οι αμ τιμές των σύγχρονων επαγωγικών αντιδράσεων ευθέως και εγκάρσιου άξονα των γεννητριών του Ελληνικού συστήματος που προέκυψαν μετά την επεξεργασία των δεδομένων που δόθηκαν από τον ΔΕΣΜΗΕ. Τα στοιχεία του πίνακα αντιστοιχούν σε δεδομένα που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βάση δεδομένων της εφαρμογής On-line VSA.

Πίν. 3.2 Σύγχρονες αντιδράσεις γεννητριών Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος

ΜΟΝΑΔΑ	X_d	X_q	ΜΟΝΑΔΑ	X_d	X_q
Αγ. Γεώργιος 8	1,830	1,800	Λαύριο 3 (Ισοδ.)	1,997	1,874
Αγ. Γεώργιος 9	1,880	1,850	Λαύριο 4 (Ισοδ.)	2,059	1,980
Αγ. Δημήτριος 1, 2	1,724	1,597	Λαύριο 5	2,100	2,000
Αγ. Δημήτριος 3, 4	1,680	1,680	ΛΠΠΤΟΛ 1,2	1,670	1,650
Αγ. Δημήτριος 5	1,846	1,800	Λούρος (Ισοδ.)	0,937	0,623
Άγρας 1, 2	1,100	0,770	Μεγαλόπολη 1, 2	1,770	1,680
Αλιβέρι 3,4	1,759	1,726	Μεγαλόπολη 3	1,980	1,880
Αμύνταιο 1, 2	1,600	1,600	Μεγαλόπολη 4	2,120	2,020
Ασώματα 1, 2	0,990	0,650	Πλαστήρας 1, 2, 3	1,150	0,725
Αωός 1, 2	1,170	0,720	Πλατανόβρυση (Ισοδ.)	1,110	0,680
Γκιώνα 1	1,300	0,750	Πολύφυτο 1, 2, 3	1,380	0,860
Εδεσσαίος 1	1,010	0,604	Πουρνάρι Ι-1, 2, 3	0,960	0,640
ΕΝΘΕΣ (Ισοδ.)	2,135	2,015	Πουρνάρι ΙΙ-1, 2	1,700	1,115
ΗΡΩΝ 1, 2	2,312	2,254	Πουρνάρι ΙΙ-3	1,010	0,604
ΗΡΩΝ 3	2,520	2,300	Πτολεμαΐδα 1	1,700	1,680
Θησαυρός 1, 2, 3	1,060	0,630	Πτολεμαΐδα 2	1,758	1,718
Καρδιά 1, 2	1,823	1,723	Πτολεμαΐδα 3	1,700	1,588
Καρδιά 3, 4	1,700	1,620	Πτολεμαΐδα 4	1,940	1,840
Καστράκι 1, 2, 3, 4	1,000	0,562	Στράτος Ι-1,2	0,970	0,650
Κομοτηνή (Ισοδ.)	1,960	1,860	Στράτος ΙΙ (Ισοδ.)	1,780	1,130
Κρεμαστά 1,2,3,4	0,920	0,580	Σφηκιά 1, 2, 3	0,870	0,560
Λάδωνας 1, 2	0,950	0,560	ΤΕΡΝΑ	2,405	2,355
Λαύριο 1	1,440	1,400	Φλώρινα (Μελίτη)	1,600	1,520
Λαύριο 2	1,823	1,720			

Για τους σταθμούς παραγωγής που περιλαμβάνουν περισσότερες από μία γεννήτριες, αλλά στην τοπολογία του συστήματος φαίνονται να συνδέονται σε έναν ζυγό, εξήχθη ένα απλουστευτικό μοντέλο ισοδύναμης γεννήτριας. Η ελάττωση αυτή πραγματοποιήθηκε στις εξής περιπτώσεις:

- Η μονάδα Λαύριο 3 (μικρός συνδυασμένος κύκλος), που αποτελείται από τρεις γεννήτριες (δύο αεριοστροβλικές και μία ατμοστροβλική), παριστάνεται ως μία ισοδύναμη μονάδα στο ζυγό 150 kV του Λαυρίου.
- Η μονάδα Λαύριο 4 (μεγάλος συνδυασμένος κύκλος), η οποία αποτελείται από τέσσερις γεννήτριες (τρεις αεριοστροβλικές και μία ατμοστροβλική) παριστάνεται ως μία ισοδύναμη γεννήτρια στο ζυγό 15 kV του Λαυρίου.
- Η μονάδα συνδυασμένου κύκλου Ενεργειακή Θεσσαλονίκης (ΕΝΘΕΣ) αποτελείται από μία αεριοστροβλική και μία ατμοστροβλική γεννήτρια και παριστάνεται ως μία ισοδύναμη γεννήτρια στο ζυγό 15,75 kV της Θεσσαλονίκης.
- Η μονάδα συνδυασμένου κύκλου της Κομοτηνής, που περιλαμβάνει τρεις όμοιες ατμοστροβλικές γεννήτριες, παριστάνεται ως μία ισοδύναμη γεννήτρια στο ζυγό 15 kV της Κομοτηνής.
- Τέλος, ως ισοδύναμες γεννήτριες παριστάνονται οι υδροηλεκτρικές μονάδες Λούρος, Πλατανόβρυση και Στράτος II.

Για τις ισοδύναμες γεννήτριες η αμ σύγχρονη επαγωγική αντίδραση ευθέος και εγκάρσιου άξονα (X_d^{eq} και X_q^{eq} αντίστοιχα), καθώς και η αμ αντίδραση σκεδάσεως (X_l^{eq}) υπολογίστηκαν από τις αντίστοιχες αντιδράσεις των επιμέρους γεννητριών που συναποτελούν την ισοδύναμη μονάδα, με βάση τον παράλληλο συνδυασμό τους:

$$X_d^{eq} = \frac{\sum S_i}{\sum \frac{S_i}{X_{d,i}}}, \quad X_q^{eq} = \frac{\sum S_i}{\sum \frac{S_i}{X_{q,i}}}, \quad X_l^{eq} = \frac{\sum S_i}{\sum \frac{S_i}{X_{l,i}}} \quad (3.17)$$

όπου:

S_i : η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της συνιστώσας γεννήτριας i

$X_{d,i}$: η αμ επαγωγική αντίδραση ευθέος άξονα της συνιστώσας γεννήτριας i

$X_{q,i}$: η αμ επαγωγική αντίδραση εγκάρσιου άξονα της συνιστώσας γεννήτριας i

$X_{l,i}$: η αμ αντίδραση σκεδάσεως της συνιστώσας γεννήτριας i .

3.3.2 Παράσταση Μαγνητικού Κορεσμού Γεννητριών

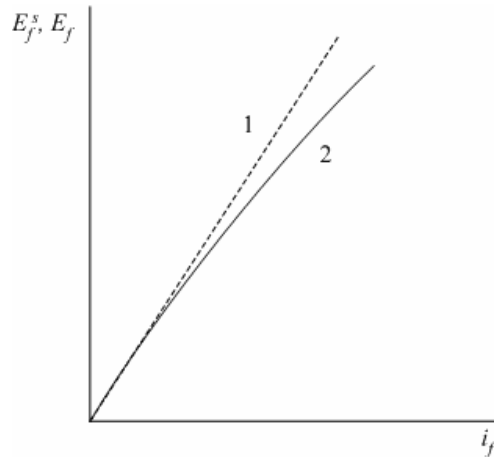
Στο Σχ. 3.11 φαίνεται η χαρακτηριστική ανοικτοκυκλώσεως μίας σύγχρονης μηχανής, η οποία παριστάνει τη σχέση μεταξύ της ΗΕΔ κενού φορτίου και του ρεύματος πεδίου i_f . Αν η μηχανή δεν είχε μαγνητικό κορεσμό, η παραγόμενη ΗΕΔ E_f θα ακολουθούσε τη διακεκομμένη ευθεία 1, που καλείται *ευθεία διακένου*. Λαμβάνοντας υπόψη τον κορεσμό, η παραγόμενη ΗΕΔ E_f^s δίνεται από τη συνεχή καμπύλη 2 του σχήματος. Στην ανάλυση που ακολουθεί ως βασικό ρεύμα δρομέα θεωρούμε το ρεύμα δρομέα που παράγει 1 αμ τάση στάτη πάνω στην ευθεία διακένου.

Ορίζουμε το συντελεστή κορεσμού K ως το λόγο της κορεσμένης ΗΕΔ κενού φορτίου E_f^s προς την τιμή της που θα προέκυπτε για γραμμικό μαγνητικό κύκλωμα:

$$K = \frac{E_f^s}{E_f} < 1 \quad (3.18)$$

Σε συνθήκες κενού φορτίου η τάση ανοικτοκυκλώσεως E_f^s αποτελεί συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής στο διάκενο ψ_{ag} :

$$E_f^s = f(i_f) = f(\psi_{ag}) \quad (3.19)$$



Σχ. 3.11 Χαρακτηριστική ανοικτοκυκλώσεως

Επομένως αν διαθέτουμε τη χαρακτηριστική ανοικτοκυκλώσεως που συσχετίζει το ρεύμα διέγερσης i_f στο τύλιγμα του πεδίου με την κορεσμένη τιμή της ΗΕΔ κενού φορτίου E_f^s , ο συντελεστής κορεσμού μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της πεπλεγμένης ροής στο διάκενο ψ_{ag} . Σε αυτή την κατεύθυνση έχουν προταθεί αρκετές αναλυτικές εκφράσεις. Εδώ υιοθετούμε την ακόλουθη έκφραση [SH79]:

$$K = K(\psi_{ag}) = \frac{1}{1 + m(\omega_0 \psi_{ag})^n} \quad (3.20)$$

όπου m και n είναι οι (θετικοί) συντελεστές μαγνητικού κορεσμού και ω_0 η ονομαστική γωνιακή ταχύτητα του συστήματος. Η τιμή $m = 0$ αντιστοιχεί σε συνθήκες όπου δεν υπάρχει κορεσμός.

Σε συνθήκες φορτίου προκύπτουν διαφορετικοί συντελεστές κορεσμού και κατά συνέπεια διαφορετικές κορεσμένες τιμές σύγχρονης επαγωγικής αντίδρασης (X_d^s, X_q^s) στους δύο άξονες. Στις μηχανές κυλινδρικού δρομέα οι συντελεστές κορεσμού K_d, K_q στους δύο άξονες, αν και διαφορετικοί, έχουν πολύ κοντινές τιμές πράγμα που επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι κατά προσέγγιση είναι ίσοι:

$$K_d = K_q = K \quad (3.21)$$

Στις μηχανές εκτόπων πόλων ο κορεσμός στον εγκάρσιο άξονα της μηχανής είναι συνήθως αμελητέος λόγω του μεγαλύτερου διακένου, με αποτέλεσμα ο συντελεστής κορεσμού εγκάρσιου άξονα K_q να λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα ($K_q = 1$).

Σε κάθε περίπτωση ο συντελεστής κορεσμού υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση, που αποτελεί γενίκευση της (3.20):

$$K = \frac{E_f^s}{E_f} = \frac{1}{1 + mV_l^n} \quad (3.22)$$

όπου V_l είναι το μέτρο της τάσης πίσω από την αντίδραση σκεδάσεως X_l της μηχανής.

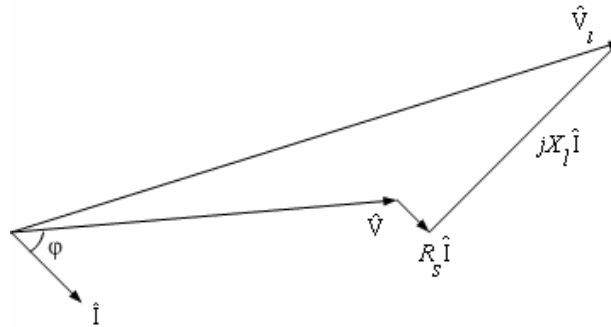
Η τάση V_l υπολογίζεται από το διανυσματικό διάγραμμα της σύγχρονης μηχανής (Σχ. 3.12), σύμφωνα με τη σχέση:

$$\hat{V}_l = \hat{V} + R_s \hat{I} + jX_l \hat{I} \quad (3.23)$$

όπου \hat{V} και \hat{I} η τερματική τάση και το ρεύμα αντίστοιχα της γεννήτριας και R_s η ωμική αντίσταση του στάτη.

Ειδικά σε συνθήκες ανοικτοκυκλώσεως, η τάση $V_l = V$ είναι ίση με την κορεσμένη τιμή της ΗΕΔ κενού φορτίου E_f^s , οπότε η σχέση (3.22) γράφεται:

$$\frac{E_f^s}{E_f} = \frac{1}{1 + (E_f^s)^n} \Rightarrow E_f^s + m(E_f^s)^{n+1} - E_f = 0 \quad (3.24)$$



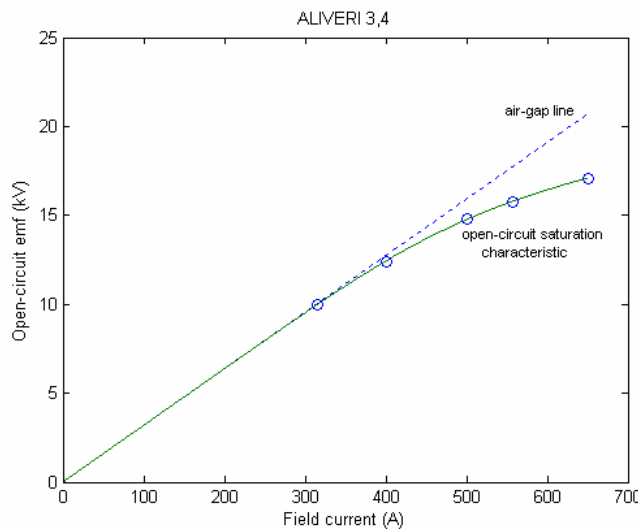
Σχ. 3.12 Διανυσματικό διάγραμμα τάσης πίσω από επαγωγική αντίδραση

Προσδιορισμός συντελεστών μαγνητικού κορεσμού

Στα εγχειρίδια των κατασκευαστών που δόθηκαν από τον ΔΕΣΜΗΕ, υπάρχουν οι χαρακτηριστικές ανοικτοκυκλώσεως για ορισμένες μονάδες του Ελληνικού συστήματος. Για όσες μονάδες δεν υπάρχουν οι χαρακτηριστικές ανοικτοκυκλώσεως, αυτές εξήχθησαν με τη μέθοδο της προσαρμογής (curve-fitting) από ορισμένα μόνο σημεία τους που προκύπτουν μετά από επεξεργασία των δεδομένων των εγχειριδίων.

Στο Παράρτημα Α του ερευνητικού έργου [Βου05α] υπάρχουν τα διαγράμματα ανοικτοκυκλώσεως που εξήχθησαν με την παραπάνω μεθοδολογία για όλες τις γεννήτριες κυλινδρικού δρομέα του Ελληνικού συστήματος. Στις γεννήτριες εκτύπων πόλων το φαινόμενο του μαγνητικού κορεσμού έχει αμεληθεί, επειδή όπως προαναφέραμε η επίδραση του κορεσμού είναι σημαντική μόνο στον ευθύ άξονα και γενικά είναι αρκετά μικρή.

Στο Σχ. 3.13 φαίνεται ενδεικτικά η χαρακτηριστική ανοικτοκυκλώσεως των (όμοιων) μονάδων Αλιβέρι 3 και 4. Στο διάγραμμα αυτό με διακεκομμένη ευθεία παριστάνεται η ευθεία διακένου και με συνεχή καμπύλη η κορεσμένη χαρακτηριστική ανοικτοκυκλώσεως. Οι κύκλοι αντιστοιχούν στις τιμές των μεγεθών E_f^s , i_f που δόθηκαν για την εκτίμηση της χαρακτηριστικής ανοικτοκυκλώσεως με τη μέθοδο της προσαρμογής.



Σχ. 3.13 Εκτίμηση κορεσμένης χαρακτηριστικής ανοικτοκυκλώσεως μονάδων Αλιβέρι 3 και 4

Έχοντας πλέον στη διάθεσή μας τις χαρακτηριστικές ανοικτοκυκλώσεως όλων των γεννητριών κυλινδρικού δρομέα του Ελληνικού συστήματος μπορούν να εκτιμηθούν οι συντελεστές κορεσμού με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στη συνέχεια.

Από τη χαρακτηριστική ανοικτοκυκλώσεως κάθε γεννήτριας προκύπτουν οι τιμές της κορεσμένης ΗΕΔ κενού φορτίου E_f^s για διάφορες τιμές του ρεύματος διέγερσης. Οι τιμές της ακόρεστης ΗΕΔ κενού φορτίου E_f για διάφορες τιμές του ρεύματος διέγερσης προκύπτουν από την ευθεία διακένου. Για τα ζεύγη τιμών των μεγεθών E_f^s , E_f που εξάγονται από τις παραπάνω καμπύλες (ανοικτοκυκλώσεως και διακένου), η (3.24) δίνει ένα μη γραμμικό σύστημα.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για τα μη γραμμικά συστήματα, προσεγγίζουμε τις τιμές των συντελεστών κορεσμού m και n , έτσι ώστε οι τιμές για την ΗΕΔ κενού φορτίου να παρουσιάζουν το ελάχιστο τετραγωνικό σφάλμα. Οι τιμές των αντιδράσεων σκεδάσεως X_l που απαιτούνται για τον υπολογισμό του κορεσμού κατά τη λειτουργία υπό φορτίο λαμβάνονται από τα εγχειρίδια των κατασκευαστών, ενώ όπου δεν υπάρχει η τιμή της αντίδρασης σκεδάσεως λαμβάνεται μία τυπική τιμή.

Οι τιμές των συντελεστών κορεσμού που υπολογίστηκαν για το σύνολο των γεννητριών κυλινδρικού δρομέα του Ελληνικού συστήματος καθώς και αυτές της επαγωγικής αντίδρασης σκεδάσεως για τις ίδιες γεννήτριες παρουσιάζονται στον Πίν. 3.3.

Πίν. 3.3 Συντελεστές κορεσμού και αντιδράσεις σκεδάσεως γεννητριών Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος

ΜΟΝΑΔΑ	X_l	m	n	ΜΟΝΑΔΑ	X_l	m	n
Αγ. Γεώργιος 8	0,100	0,0705	7,8852	Λαύριο 2	0,149	0,0319	11,8096
Αγ. Γεώργιος 9	0,100	0,0764	7,0880	Λαύριο 3 (Ισοδ.)	0,150	0,0696	6,8208
Αγ. Δημήτριος 1, 2	0,141	0,0218	14,2200	Λαύριο 4 (Ισοδ.)	0,169	0,1204	9,7897
Αγ. Δημήτριος 3, 4	0,212	0,0727	7,1518	Λαύριο 5	0,150	0,0856	6,6053
Αγ. Δημήτριος 5	0,171	0,0600	9,4336	ΛΙΠΤΟΛ 1,2	0,100	0,0900	8,0000
Αλιβέρι 3,4	0,094	0,1211	6,7215	Μεγαλόπολη 1,2	0,120	0,0736	7,0028
Αμύνταιο 1,2	0,203	0,0818	7,2580	Μεγαλόπολη 3	0,100	0,1972	5,2124
ΕΝΘΕΣ (Ισοδ.)	0,150	0,0500	12,377	Μεγαλόπολη 4	0,210	0,1471	7,2433
ΗΡΩΝ 1,2	0,2657	0,2950	7,0897	Πτολεμαΐδα 1	0,150	0,1038	6,0600
ΗΡΩΝ 3	0,100	0,1215	8,0028	Πτολεμαΐδα 2	0,170	0,2013	7,5132
Καρδιά 1,2	0,100	0,0819	9,5681	Πτολεμαΐδα 3	0,100	0,0712	7,5780
Καρδιά 3,4	0,100	0,0526	8,2742	Πτολεμαΐδα 4	0,100	0,0790	9,6135
Κομοτηνή (Ισοδ.)	0,150	0,0685	11,7642	ΤΕΡΝΑ	0,2478	0,0696	6,8208
Λαύριο 1	0,100	0,1174	6,4233	Φλώρινα (Μελίτη)	0,158	0,0720	8,4194

3.3.3 Προσδιορισμός Μέγιστης Τάσης Διέγερσης Γεννητριών

Ο υπολογισμός της τάσης διέγερσης μιας γεννήτριας σε ένα σημείο λειτουργίας της, συνυπολογίζοντας την επίδραση του μαγνητικού κορεσμού, γίνεται θεωρώντας τη γενική περίπτωση μιας γεννήτριας εκτύπων πόλων με τάση ακροδεκτών \hat{V} και παρεχόμενο στο δίκτυο ρεύμα \hat{I} . Το διανυσματικό διάγραμμα μόνιμης κατάστασης μιας γεννήτριας εκτύπων πόλων με κορεσμό φαίνεται στο Σχ. 3.14.

Αν θεωρήσουμε ως αρχή των αξόνων το διάνυσμα της τάσης στους ακροδέκτες της γεννήτριας, έχουμε:

$$\hat{V} = V \angle 0 \quad (3.25)$$

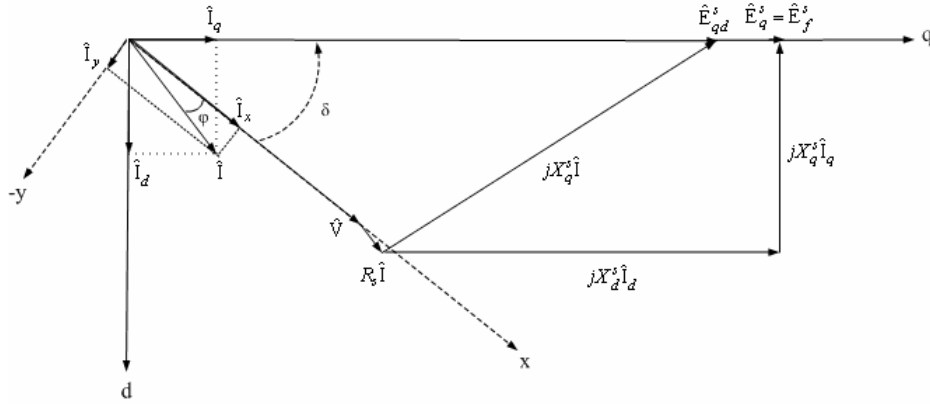
$$\hat{I} = I \angle -\phi = \left(\frac{S}{V} \right)^* = \frac{P_g - jQ_g}{V} = I_x - jI_y \quad (3.26)$$

όπου S η μιγαδική ισχύς παραγωγής της γεννήτριας, P_g , Q_g η ενεργός και άεργος αντίστοιχα παραγόμενη ισχύς και ϕ η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος της γεννήτριας.

Η τάση πίσω από την επαγωγική αντίδραση εγκάρσιου άξονα \hat{E}_{qd}^s δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{E}_{qd}^s = V + (R_s + jX_q^s)\hat{I} = E_{qd}^s \angle \delta \quad (3.27)$$

όπου δ η γωνία ροπής της μηχανής.



Σχ. 3.14 Διανυσματικό διάγραμμα μόνιμης κατάστασης γεννήτριας εκτόπων πόλων με κορεσμό

Τα ρεύματα στο στρεφόμενο πλαίσιο δρομέα της μηχανής (d, q) προκύπτουν με κατάλληλο μετασχηματισμό των ρευμάτων στο πλαίσιο αναφοράς του συστήματος (x, y) [VCV98]:

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Η τάση V_l πίσω από την αντίδραση σκεδάσεως υπολογίζεται από τη σχέση (3.23) και από αυτήν μέσω της σχέσης (3.22) υπολογίζεται ο συντελεστής κορεσμού K . Ακολούθως οι αντιδράσεις της μηχανής στους άξονες d, q δίνονται από τις σχέσεις:

$$X_d^s = X_l + K_d(X_d - X_l) \quad (3.29)$$

$$X_q^s = X_l + K_q(X_q - X_l) \quad (3.30)$$

Η τάση διέγερσης είναι ίση με την τάση πίσω από την επαγωγική αντίδραση εγκάρσιου άξονα X_q^s προσαυξημένη κατά την επίδραση της επαγωγικής αντίδρασης ευθέως άξονα X_d^s . Επομένως η κορεσμένη τιμή της ΗΕΔ κενού φορτίου είναι:

$$E_q^s = E_f^s = E_{qd}^s + (X_d^s - X_q^s)I_d \quad (3.31)$$

όπου:

$$I_d = I_x \sin \delta - I_y \cos \delta \quad (3.32)$$

Τελικά, η τάση διέγερσης E_f βρίσκεται από τη σχέση:

$$E_f = \frac{E_q^s}{K} \quad (3.33)$$

Σημειώνεται ότι οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται για τις αμ τιμές των εμφανιζόμενων μεγεθών:

$$P_g^{a\mu} = \frac{P_g}{S_b}, \quad Q_g^{a\mu} = \frac{Q_g}{S_b}, \quad V^{a\mu} = \frac{V}{V_b} \quad (3.34)$$

όπου S_b, V_b οι βασικές τιμές ισχύος και τάσης. Υπενθυμίζουμε ότι για να ισχύει η (3.33) ως βασικό ρεύμα δρομέα επιλέγεται το ρεύμα δρομέα που παράγει 1 αμ τάση στάτη πάνω στην ευθεία διακένου.

Όμοιος είναι ο υπολογισμός της τάσης διέγερσης μιας γεννήτριας σε ένα σημείο λειτουργίας της χωρίς τη θεώρηση μαγνητικού κορεσμού. Στην περίπτωση αυτή ισχύουν και πάλι οι παραπάνω σχέσεις όμως αντί των κορεσμένων μεγεθών X_d^s, X_q^s χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα μη κορεσμένα μεγέθη X_d, X_q οπότε και η ΗΕΔ κενού φορτίου που προκύπτει είναι η μη κορεσμένη.

Ο υπολογισμός της μέγιστης τάσης διέγερσης των γεννητριών του Ελληνικού συστήματος έγινε για την ονομαστική τους φόρτιση, οπότε η μέγιστη επιτρεπόμενη ΗΕΔ διέγερσης E_f^{lim} αντιστοιχεί στο ρεύμα διέγερσης I_f^{lim} στο δρομέα της γεννήτριας για την ονομαστική κατάσταση λειτουργίας. Για τον υπολογισμό των μεγίστων τάσεων διέγερσης των γεννητριών με κυλινδρικό δρομέα,

χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα κορεσμού που προέκυψαν από την ανάλυση που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, σε συνδυασμό με τα μεγέθη ονομαστικής λειτουργίας των γεννητριών όπως αυτά δόθηκαν από τον ΔΕΣΜΗΕ και επιβεβαιώθηκαν από τις καμπύλες ορίων φόρτισης. Για τις γεννήτριες εκτύπων πόλων, στην παράσταση των οποίων δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο του κορεσμού έγινε, όπου απαιτήθηκε, αναπροσαρμογή του μέγιστου ρεύματος δρομέα.

Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται οι τιμές της μέγιστης ΗΕΔ διέγερσης E_f^{lim} για συνεχή λειτουργία, όπως προέκυψαν με την παραπάνω μεθοδολογία, για όλες τις μονάδες του Ελληνικού συστήματος. Στους ίδιους πίνακες παρατίθενται τα ονομαστικά μεγέθη των γεννητριών.

Πίν. 3.4 Ονομαστικά μεγέθη και μέγιστη τάση διέγερσης γεννητριών ΘΗΣ Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος

ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ							
ΜΟΝΑΔΑ	V_{ov} (kV)	S_{ov} (MVA)	P_{ov} (MW)	Q_{ov} (MVar)	$I_{s,ov}$ (A)	ΣI_{ov}	E_f^{lim} (αμ)
Αγ. Γεώργιος 8	15,75	190,00	161,50	100,09	6965	0,85	2,6013
Αγ. Γεώργιος 9	15,75	235,00	199,75	123,79	8614	0,85	2,6516
Αγ. Δημήτριος 1,2	21,00	333,30	299,97	145,28	9163	0,90	2,3890
Αγ. Δημήτριος 3,4	20,00	344,00	309,60	149,95	9930	0,90	2,4454
Αγ. Δημήτριος 5	21,00	431,50	366,78	227,31	11863	0,85	2,6605
Αλιβέρι 3,4	15,75	176,47	150,00	92,96	6469	0,85	2,5906
Αμύνταιο 1,2	20,00	333,00	299,70	145,15	9613	0,90	2,3865
ΗΡΩΝ 1,2	11,50	63,50	50,80	38,10	3188	0,80	3,4026
ΗΡΩΝ 3	11,50	63,50	50,80	38,10	3188	0,80	3,3961
ΕΝΘΕΣ (Ισοδ.)	15,75	490,4	416,87	258,36	17977	0,85	2,9213
Καρδιά 1,2	21,00	353,00	300,05	185,95	9705	0,85	2,6210
Καρδιά 3,4	20,00	353,00	300,05	185,95	10190	0,85	2,4572
Κομοτηνή (Ισοδ.)	15,75	606,00	515,10	319,23	22214	0,85	2,7962
Λαύριο 1	15,75	176,47	150,00	92,96	6469	0,85	2,2964
Λαύριο 2	21,00	353,00	300,05	185,95	9705	0,85	2,5771
Λαύριο 3 (Ισοδ.)	150,00	223,00	186,00	123,08	858	0,834	2,7983
Λαύριο 4 (Ισοδ.)	15,00	752,00	639,20	396,13	28945	0,85	3,0067
Λαύριο 5	19,00	468,00	374,40	280,80	14221	0,80	2,9661
ΛΙΠΤΟΛ 1	6,30	12,50	10,00	7,50	1146	0,80	2,5429
ΛΙΠΤΟΛ 2	12,50	38,80	33,00	20,41	1792	0,85	2,4791
Μεγαλόπολη 1,2	15,75	147,00	124,95	77,44	5389	0,85	2,5549
Μεγαλόπολη 3	21,00	353,00	300,05	185,95	9705	0,85	2,8782
Μεγαλόπολη 4	21,00	353,00	300,05	185,95	9705	0,85	3,1178
Πτολεμαΐδα 1	15,75	101,20	86,02	53,31	3710	0,85	2,5459
Πτολεμαΐδα 2	15,75	147,00	124,95	77,44	5389	0,85	2,8355
Πτολεμαΐδα 3	15,75	147,00	124,95	77,44	5389	0,85	2,4796
Πτολεμαΐδα 4	21,00	375,00	300,00	225,00	10310	0,80	2,7930
ΤΕΡΝΑ	11,50	123,13	98,50	73,88	6182	0,80	3,1149
Φλώρινα (Μελίτη)	21,00	366,70	330,03	159,84	10082	0,90	2,3502

Πίν. 3.5 Ονομαστικά μεγέθη και μέγιστη τάση διέγερσης γεννητριών ΥΗΣ Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος

ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ							
ΜΟΝΑΔΑ	V_{ov} (kV)	S_{ov} (MVA)	P_{ov} (MW)	Q_{ov} (MVar)	$I_{s,ov}$ (A)	ΣI_{ov}	E_f^{lim} (αμ)
Άγρας 1,2	15,75	25,60	23,04	11,16	938	0,90	1,7692
Ασώματα 1,2	15,75	66,00	56,10	34,77	2419	0,90	1,6722
Αώος 1,2	15,75	122,00	109,80	53,18	4472	0,90	1,8200
Γκιώνα 1	6,30	9,40	8,46	4,10	861	0,90	1,9269
Εδεσσαίος 1	15,75	25,50	22,95	11,12	935	0,90	1,6823
Θησαυρός 1,2,3	15,75	140,00	126,00	61,02	5132	0,90	1,7236
Καστράκι 1,2,3,4	15,75	77,39	69,65	33,73	2837	0,90	1,6690
Κρεμαστά 1,2,3,4	15,75	115,00	109,25	35,91	4216	0,95	1,5361
Λάδωνας 1,2	15,75	32,00	28,80	13,95	1173	0,90	1,6317
Λούρος (Ισοδ.)	15,75	12,50	10,31	7,05	459	0,825	1,7344
Πλαστήρας 1,2,3	15,75	47,00	39,95	24,76	1723	0,85	1,8647
Πλατανόβρυση (Ισοδ.)	15,75	136,00	122,40	59,28	4985	0,90	1,7683
Πολύφυτο 1,2,3	15,75	136,00	122,40	59,28	4985	0,90	2,0049
Πουρνάρι I 1,2,3	15,75	111,00	99,90	48,38	4069	0,90	1,6481
Πουρνάρι II 1,2	6,30	18,00	16,20	7,85	1650	0,90	2,2991
Πουρνάρι II 3	6,30	2,65	1,80	1,94	242	0,68	1,6017
Στράτος I 1,2	15,75	84,00	75,60	36,61	3079	0,90	1,6568
Στράτος II (Ισοδ.)	6,30	7,00	6,30	3,06	642	0,90	2,3697
Σφηκιά 1,2,3	15,75	117,00	105,30	51,00	4289	0,90	1,5723

4ο Κεφάλαιο

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΚΤΑΚΤΟ ΕΛΕΓΧΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΑΣΗΣ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ

Στη διατριβή αυτή εξετάζονται μέτρα προστασίας συστήματος από αστάθεια τάσης, τα οποία προκαλούν ελεγχόμενη μείωση στο καταναλισκόμενο φορτίο. Η μείωση του φορτίου πραγματοποιείται είτε άμεσα, αποσυνδέοντας ορισμένους καταναλωτές από το δίκτυο, είτε έμμεσα, ελέγχοντας κατάλληλα τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης στους υποσταθμούς διανομής. Υπενθυμίζεται ότι κατά τη σχεδίαση σχημάτων προστασίας συστήματος, η άμεση αποκοπή φορτίου αποτελεί πάντοτε το έσχατο μέτρο.

Στο κεφάλαιο αυτό εστιάζουμε αποκλειστικά στα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ. Από αυτά ορισμένα έχουν εφαρμοστεί σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. στη Γαλλία), ενώ άλλα βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο. Αρχικά γίνεται σύντομη περιγραφή της διάταξης του ΣΑΤΥΦ. Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση των εξεταζόμενων μεθόδων προστασίας και περιγράφεται η αλγοριθμική υλοποίησή τους στο περιβάλλον του προγράμματος WPSTAB. Με χρήση του προγράμματος WPSTAB πραγματοποιείται κατόπιν η προσομοίωση της συμπεριφοράς του Ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα σενάρια αστάθειας τάσης που εξετάζονται. Προηγείται η εφαρμογή σε ένα μικρό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, από την οποία εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη σχεδίαση της προστασίας με έλεγχο εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ στο πραγματικό σύστημα. Η άμεση αποκοπή φορτίου εξετάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΑΣΗΣ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ

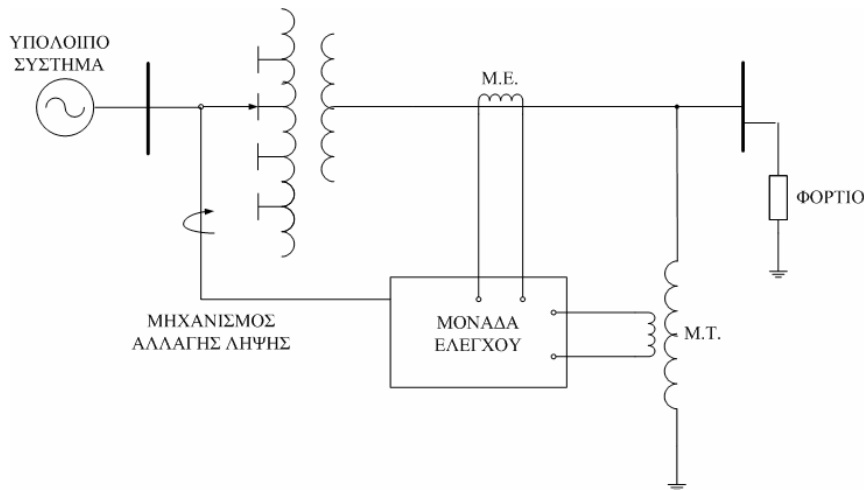
Για την κατανόηση της εφαρμογής των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ, που περιγράφονται στις επόμενες ενότητες, είναι χρήσιμο να προηγηθεί συνοπτική περιγραφή των κυριότερων συνιστωσών της διάταξης του ΣΑΤΥΦ.

Σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας τα ΣΑΤΥΦ συναντώνται κυρίως:

- Στους μετασχηματιστές ισχύος των υποσταθμών διανομής.
- Στους μετασχηματιστές διασύνδεσης συστημάτων υπομεταφοράς με συστήματα μεταφοράς.

Στο Ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με ΣΑΤΥΦ είναι εξοπλισμένοι κατά κανόνα μόνο οι μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης στους υποσταθμούς διανομής. Στους μετασχηματιστές αυτούς το τύλιγμα μεταβλητής λήψης βρίσκεται στην πλευρά ΥΤ, καθώς κατά αυτόν τον τρόπο οι αλλαγές υπό φορτίο πραγματοποιούνται σε χαμηλότερο επίπεδο ρευμάτων άρα με μικρότερη φυσική καταπόνηση για τη διάταξη, ενώ επιπλέον υπάρχουν περισσότερες σπείρες για ακριβέστερη ρύθμιση.

Σκοπός κάθε ΣΑΤΥΦ είναι να παρακολουθεί τις μεταβολές της τάσης στο ζυγό φορτίου, τον οποίο ελέγχει, και να ρυθμίζει το μέτρο της εντός ενός καθορισμένου εύρους τιμών. Με τη ρύθμιση αυτή επιτυγχάνεται η αποκατάσταση της ισχύος στο φορτίο που τροφοδοτείται μέσω του μετασχηματιστή, καθώς αυτή είναι συνάρτηση της τάσης. Από κατασκευαστικής πλευράς, για να επιτευχθεί ρύθμιση υπό φορτίο απαιτείται μεταβολή της λήψης κατά τέτοιον τρόπο, ώστε με την αντίστοιχη προσθήκη ή αφαίρεση σπειρών να μεταβάλλεται κατάλληλα ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή ισχύος.



Σχ. 4.1 Κύρια διάταξη ΣΑΤΥΦ

Καθοριστικό ρόλο στη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης παίζει το διαθέσιμο εύρος μεταβολής της λήψης στο τύλιγμα μεταβλητής λήψης του μετασχηματιστή. Τυπικές τιμές για το κάτω όριο ρύθμισης της λήψης είναι μεταξύ 0,85-0,90 αμ, ενώ αντίστοιχα για το άνω όριο ρύθμισης οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 1,10-1,15 αμ [Bec94,San01]. Το βήμα αλλαγής της λήψης κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,5% - 1,5%, ενώ η νεκρή ζώνη ρύθμισης της τάσης αναφοράς είναι συνήθως ίση με το διπλάσιο του βήματος. Στα περισσότερα ΣΑΤΥΦ του εμπορίου (ιδιαίτερα στη Βόρειο Αμερική) το μέγιστο επιτρεπτό εύρος ρύθμισης της τάσης είναι της τάξης του $\pm 10\%$ και πραγματοποιείται σε συνολικά 32 βήματα με 5/8% ρύθμιση της τάσης ανά βήμα. Στα περισσότερα ΣΑΤΥΦ του Ελληνικού συστήματος το εύρος ρύθμισης της τάσης είναι της τάξης του $\pm 10\%$ και πραγματοποιείται σε συνολικά 16 βήματα (0,0125 ρύθμιση της τάσης ανά βήμα). Αντίστοιχα το εύρος της νεκρής ζώνης κυμαίνεται μεταξύ 3% - 5%. Σε γενικές γραμμές το εύρος ρύθμισης και το πλήθος των βημάτων ποικίλει ανάλογα με τον κατασκευαστή.

Η ελάχιστη χρονική καθυστέρηση για μία αλλαγή της λήψης είναι συνήθως 5 s και αποτελεί τη λεγόμενη μηχανική καθυστέρηση T_m . Στην καθυστέρηση αυτή προστίθεται σκόπιμη (σταθερή ή μεταβλητή) χρονική καθυστέρηση T_{int} της τάξης μερικών δευτερολέπτων, για την αποφυγή ανεπιθύμητων ή συχνών αλλαγών της λήψης οι οποίες καταπονούν το μηχανισμό και περιορίζουν τη διάρκεια ζωής του. Η συνολική χρονική καθυστέρηση για κάθε αλλαγή της λήψης προσδιορίζεται τελικά σε $T_{d2} = T_m + T_{int}$. Εξαιρέση αποτελεί η πρώτη αλλαγή της λήψης για την οποία μπορεί να απαιτηθεί διαφορετική χρονική καθυστέρηση T_{d1} . Στα ΣΑΤΥΦ του Ελληνικού συστήματος θεωρείται σταθερή αρχική χρονική καθυστέρηση T_{d1} ίση με 30 s και σταθερή επακόλουθη χρονική καθυστέρηση T_{d2} ίση με 10 s.

Η κύρια διάταξη ενός ΣΑΤΥΦ παρουσιάζεται στο Σχ. 4.1. Όπως ειπώθηκε νωρίτερα, θεωρείται η διάταξη με τη μεταβλητή λήψη στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή, δηλαδή στην πλευρά του συστήματος μεταφοράς. Διακρίνουμε εκτός του μετασχηματιστή ισχύος, έναν μετασχηματιστή έντασης (Μ.Ε.) σε σειρά και έναν μετασχηματιστή τάσης (Μ.Τ.) παράλληλα προς το φορτίο. Ο ρόλος του Μ.Τ. είναι προφανώς η μέτρηση της ελεγχόμενης τάσης (τάσης φορτίου), ενώ ο Μ.Ε. μετρά το ρεύμα για την αντιστάθμιση της πτώσης τάσης σε περιπτώσεις υψηλής φόρτισης του ζυγού. Οι τιμές των μετρούμενων μεγεθών (στο δευτερεύον των μετασχηματιστών μετρήσεως) είναι συνήθως της τάξης των 120 V ac για την τάση και 0,2 A για το ρεύμα.

Οι μετρήσεις αυτές αποτελούν σήματα εισόδου της μονάδας ελέγχου. Η μονάδα ελέγχου είναι κατάλληλα προγραμματισμένη ώστε να επεξεργάζεται τα σήματα εισόδου και εφόσον διακρίνει παραβίαση των επιτρεπόμενων ορίων της τάσης στο ζυγό του φορτίου να δίνει κατάλληλες εντολές προς το μηχανισμό αλλαγής της λήψης για τη διατήρηση της τάσης εντός της νεκρής ζώνης ρύθμισης.

Συνήθως υπάρχει ένας μορφοτροπέας για να μετατρέπει τα σήματα εξόδου της μονάδας ελέγχου σε κατάλληλα σήματα για το μηχανισμό αλλαγής της λήψης. Ο μορφοτροπέας μπορεί να είναι ενσωματωμένος στο ΣΑΤΥΦ ή μπορεί να αποτελεί ανεξάρτητη διάταξη. Στην τελευταία περίπτωση ο μορφοτροπέας συνδέεται ηλεκτρικά με τη μονάδα ελέγχου και μηχανικά με το μηχανισμό αλλαγής της λήψης. Συνήθεις μορφοτροπείς αυτής της κατηγορίας είναι μορφοτροπείς τάσης / συχνότητας.

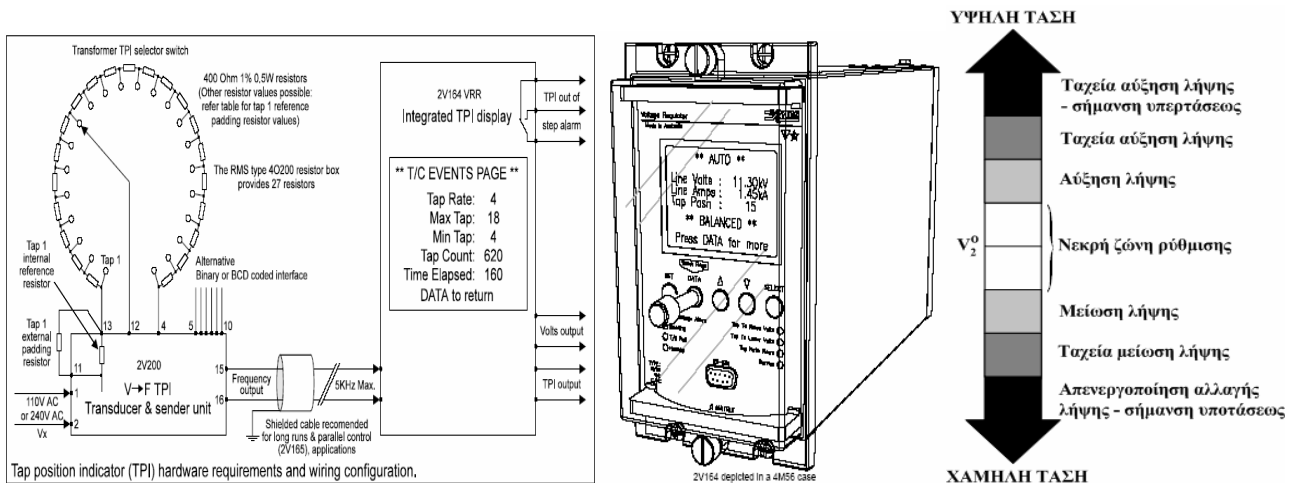
4.1.1 Διατάξεις Ελέγχου ΣΑΤΥΦ

Τα ΣΑΤΥΦ απαρτίζονται από πλήθος διατάξεων ελέγχου εκ των οποίων το σπουδαιότερο ρόλο κατέχει η μονάδα ελέγχου. Οι μονάδες ελέγχου χαρακτηρίζονται στο εμπόριο ως ηλεκτρονόμοι ρύθμισης της τάσης και ελέγχου αλλαγής της λήψης του ΣΑΤΥΦ. Ένας σύγχρονος ψηφιακός ηλεκτρονόμος αυτής της κατηγορίας παρέχει ένα μεγάλο εύρος λειτουργιών μεταξύ των οποίων:

- Παρακολούθηση και έλεγχο διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών όπως τάση, ένταση, ισχύ, συντελεστή ισχύος κλπ.
- Καταγραφή σε μνήμη επιλεγμένων μεγεθών και συμβάντων.
- Τηλεπικοινωνία με απομακρυσμένο χρήστη (π.χ. με το κέντρο ελέγχου).
- Σειριακή επικοινωνία με τοπικό χρήστη (π.χ. με την αίθουσα ελέγχου του υποσταθμού διανομής).
- Επικοινωνία ανθρώπου-μηχανής μέσω οθόνης και πληκτρολογίου.
- Πρωτόκολλο αυτοελέγχου της συσκευής και αυτόματη ειδοποίηση σε περίπτωση βλάβης.
- Δυνατότητα προγραμματισμού εξειδικευμένων αλγορίθμων από το χρήστη.

Σε σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μια μονάδα ελέγχου, εκτός από τον κεντρικό ρόλο που παίζει στη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ, μπορεί να αποτελέσει στοιχείο συλλογής και μετάδοσης πληροφοριών με χρήση διαφόρων τεχνικών. Επομένως είναι εφικτή η παρακολούθηση της κατάστασης του ΣΑΤΥΦ σε πραγματικό χρόνο και ο έλεγχος από απόσταση. Ανάλογα λοιπόν με τις δυνατότητες (κυρίως) της μονάδας ελέγχου είναι δυνατή η σχεδίαση σχημάτων προστασίας με κεντρικό έλεγχο εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ. Μέχρι σήμερα η σχεδίαση τέτοιων σχημάτων ήταν προσανατολισμένη αποκλειστικά στη λογική του αποκεντρωμένου ελέγχου.

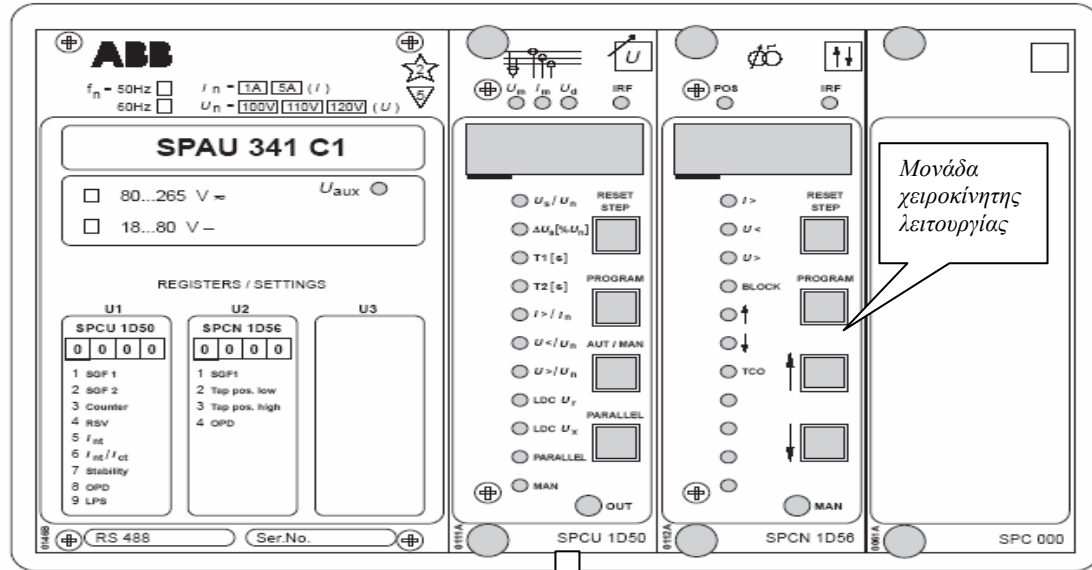
Στο Σχ. 4.2 φαίνεται μια ενδεικτική μονάδα ελέγχου ΣΑΤΥΦ με ανεξάρτητο μορφοτροπέα. Πρόκειται για έναν στοιχειώδη ηλεκτρονόμο της κατηγορίας, ο οποίος ωστόσο διαθέτει ορισμένες λειτουργίες προστασίας μεταξύ των οποίων (βλ. σχήμα) τη δυνατότητα απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης σε συνθήκες χαμηλής τάσης και τη δυνατότητα ταχείας μετακίνησης της λήψης σε συνθήκες υπέρτασης-υπότασης. Ο μορφοτροπέας επικοινωνεί με τον ηλεκτρονόμο για τη μετάδοση στο μηχανισμό κίνησης του ΣΑΤΥΦ της εντολής αλλαγής λήψης του μετασχηματιστή.



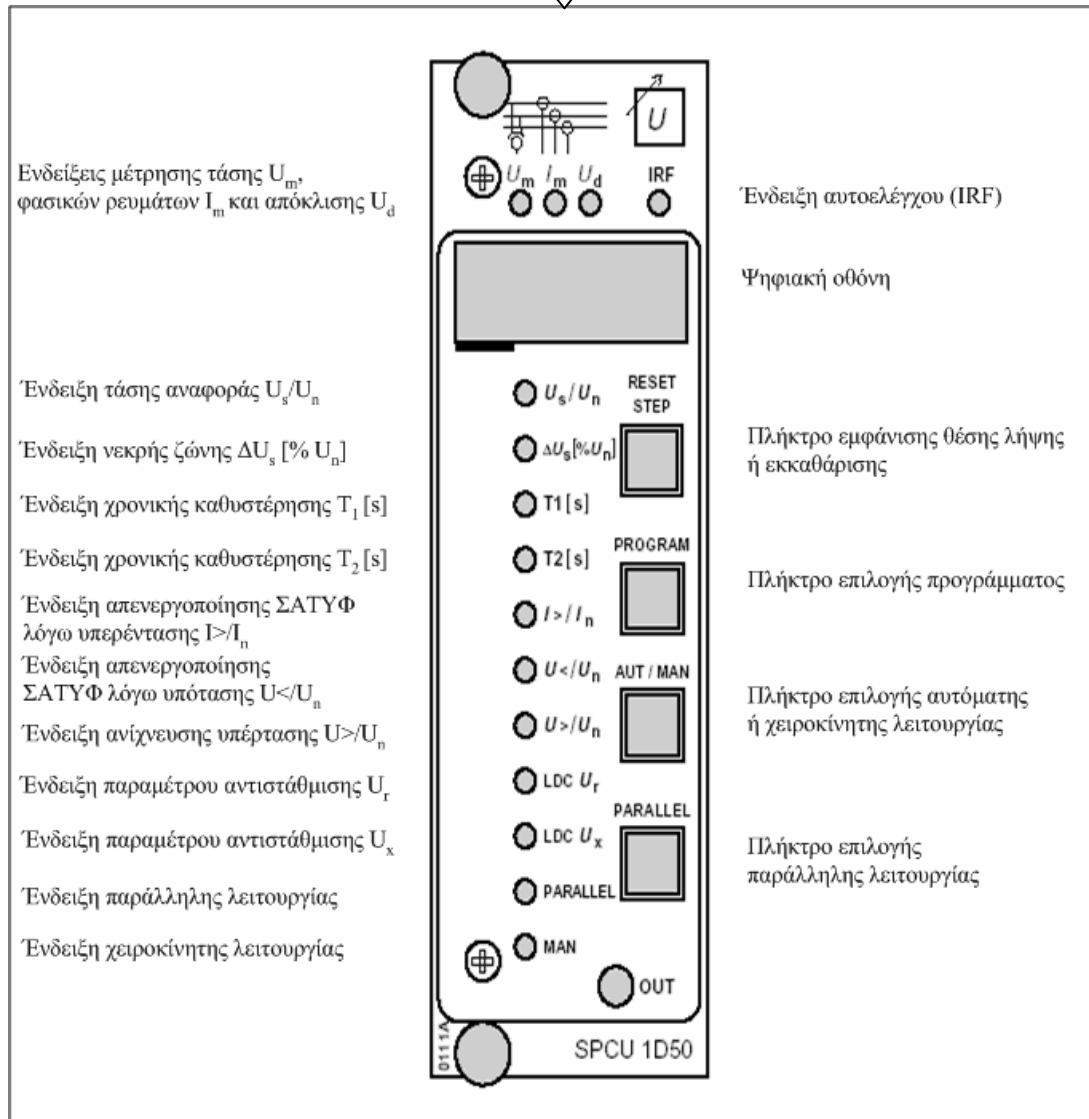
Σχ. 4.2 Μορφοτροπέας 2V200 και μονάδα ελέγχου 2V164 της εταιρείας RMS [www.rmspl.com.au]

Ο ηλεκτρονόμος του Σχ. 4.3 αποτελεί μια πιο σύνθετη μονάδα ελέγχου και εκτός από τις βασικές δυνατότητες που περιγράφηκαν παραπάνω για τους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους διαθέτει τις εξής λειτουργίες προστασίας:

- Απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης σε συνθήκες υπότασης ή υπέρντασης.
- Μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ.
- Ταχεία μετακίνηση της λήψης σε συνθήκες υπέρτασης.
- Χρήση σε παράλληλη λειτουργία μετασχηματιστών με μείωση του ρεύματος ανακυκλοφορίας.



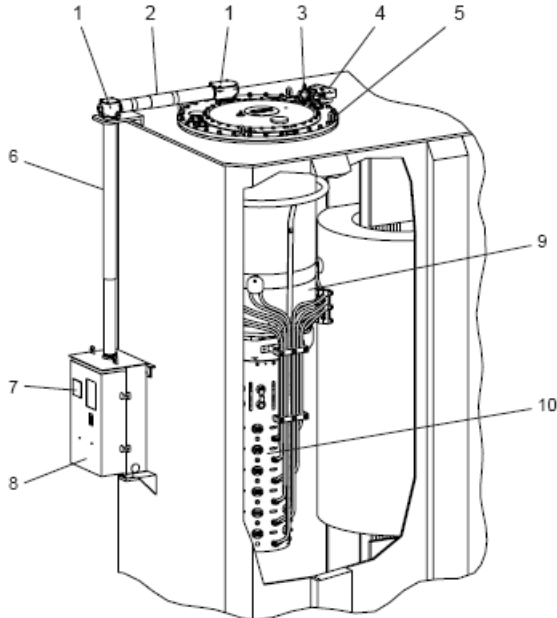
Περιγραφή μονάδας αυτόματης λειτουργίας



Σχ. 4.3 Ηλεκτρονόμος ρύθμισης τάσης ABB SPAU 341C [www.abb.com]

4.1.2 Μηχανισμοί Αλλαγής Λήψης ΣΑΤΥΦ

Ένας τυπικός μηχανισμός αλλαγής της λήψης φαίνεται στο Σχ. 4.4. Πρόκειται για μηχανισμό όπου ο επιλογέας επαγωγής (στοιχείο 10), πάνω στον οποίο μετακινείται η λήψη αλλάζοντας το λόγο μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ, βρίσκεται εντός του δοχείου του μετασχηματιστή και είναι ανεξάρτητος από το μηχανισμό κίνησης (στοιχείο 8).

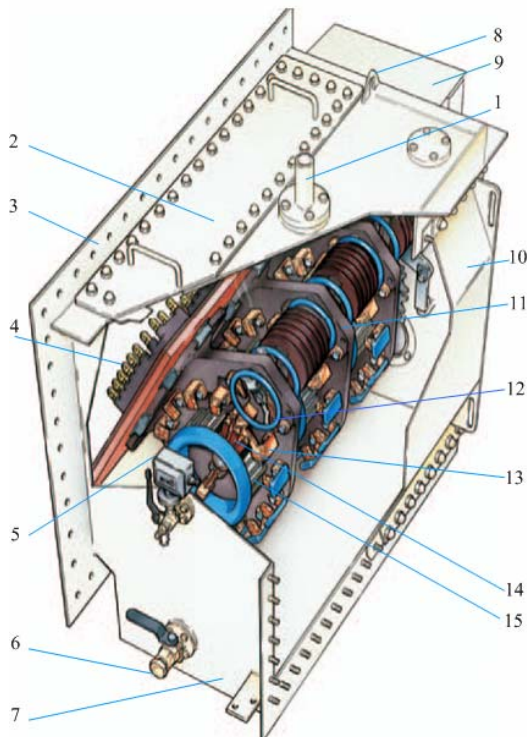


Διάταξη μηχανισμού αλλαγής λήψης

1. Κεκλιμένα γρανάζια
2. Οριζόντιος κινητήριος άξονας με προστατευτικούς σωλήνες
3. Βαλβίδα λαδιού
4. Ρελέ πίεσης
5. Άνω τμήμα
6. Κατακόρυφος κινητήριος άξονας με προστατευτικούς σωλήνες
7. Πινακίδα χαρακτηριστικών
8. Μηχανισμός κίνησης
9. Περίβλημα διακόπτη απόκλισης
10. Επιλογέας επαγωγής

Σχ. 4.4 Μηχανισμός αλλαγής λήψης UC (in-tank) της ABB [www.abb.com]

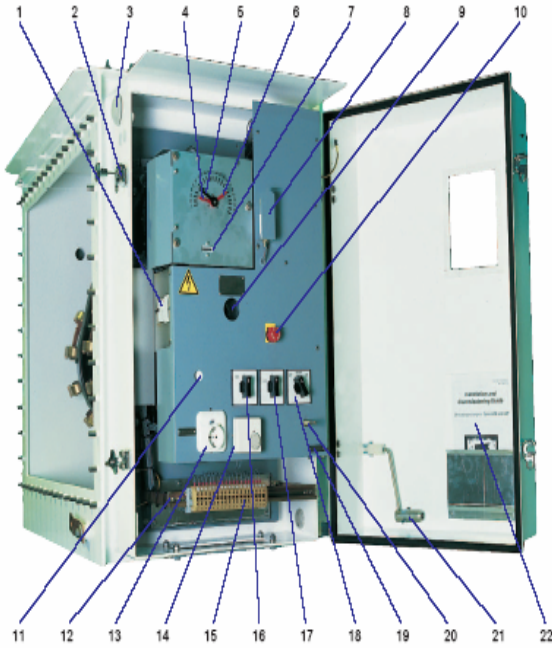
Διαφορετική δομή παρουσιάζει ο μηχανισμός αλλαγής λήψης του Σχ. 4.5. Σε αυτή τη διάταξη ο μηχανισμός κίνησης είναι ενσωματωμένος στον επιλογέα επαγωγής και βρίσκεται εκτός του δοχείου του μετασχηματιστή.



Διάταξη μηχανισμού αλλαγής λήψης

1. Σύνδεση με δοχείο διατήρησης λαδιού
2. Κάλυμμα πρόσβασης στους αγωγούς
3. Φλάντζα προσαρμογής στο δοχείο του Μ/Σ
4. Ακροδέκτες για τους αγωγούς
5. Ρελέ πίεσεως
6. Βαλβίδα λαδιού
7. Δοχείο επαγωγέα τάσεως
8. Θηλιά ανύψωσης
9. Μηχανισμός κίνησης
10. Μπροστινό κάλυμμα
11. Καλούπι
12. Επιλογέας μεταπήδησης
13. Σταθερή επαφή
14. Κινούμενο σύστημα επαφών
15. Αντιστάτης μετάπτωσης

Σχ. 4.5 Μηχανισμός αλλαγής λήψης UZ (on-tank) της ABB [www.abb.com]



Διάταξη μηχανισμού κίνησης

1. Προστατευτικός διακόπτης μοτέρ
2. Ασφαλιστική συσκευή, προετοιμασμένη για λουκέτο
3. Άνοιγμα αερισμού
4. Συρόμενος δείκτης για ελάχιστη θέση
5. Δείκτης θέσης
6. Συρόμενος δείκτης για μέγιστη θέση
7. Μετρητής
8. Λυχνία (25 W πρίζα E14)
9. Άξονας μανιβέλας
10. Διακόπτης εκτάκτου ανάγκης
11. Δείκτης προόδου επαγωγής τάσεως (κόκκινο=εκτέλεση, λευκό=ολοκλήρωση)
12. Θερμαντήρας 50 W (+ προαιρετικός 250 W)
13. Έξοδος με προστασία από σφάλμα γείωσης
14. Θερμοστάτης ή υγροστάτης πρόσθετου θερμαντήρα
15. Μπλοκ ακροδεκτών
16. Διακόπτης ανύψωσης - χαμηλώματος λήψης
17. Διακόπτης επιτόπιου χειρισμού / τηλεχειρισμού (θέση τηλεχειρισμού για αυτόματη λειτουργία)
18. Διακόπτης επιπλέον θερμαντήρα
19. Αριθμός σειράς
20. Διακόπτης λάμπας ο οποίος ελέγχεται από την πόρτα
21. Μανιβέλα
22. Περιγραφές και διάγραμμα κυκλώματος

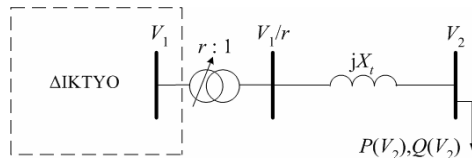
Σχ. 4.6 Τυπικός μηχανισμός κίνησης [www.abb.com]

Ένας τυπικός μηχανισμός κίνησης έχει τη μορφή του Σχ. 4.6. Η καρδιά του εντοπίζεται σε έναν κινητήρα επαγωγής, ο οποίος αφού δεχθεί την εντολή αλλαγής της λήψης από τη μονάδα ελέγχου κινεί το μηχανικό μέρος για την εκτέλεση της εντολής. Υπάρχει πρόβλεψη και για χειροκίνητη εντολή.

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΚΤΑΚΤΟΥ ΑΝΑΓΚΗΣ ΣΑΤΥΦ

4.2.1 Γενική περιγραφή

Για την ανάλυση των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ που ακολουθεί, θα χρησιμοποιηθεί το ηλεκτρικό σύστημα του Σχ. 4.7, όπου ένα φορτίο τροφοδοτείται από το δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή εξοπλισμένου με ΣΑΤΥΦ. Υπενθυμίζουμε ότι στη διατριβή αυτή χρησιμοποιείται το διακριτό μοντέλο ΣΑΤΥΦ με τη μεταβλητή λήψη στο τύλιγμα πρωτεύοντος του μετασχηματιστή. Το μοντέλο αυτό περιγράφηκε στην παράγραφο 2.4.1 και η δυναμική συμπεριφορά του αποδίδεται από τις διακριτές εξισώσεις (2.59) υπό τους περιορισμούς (2.60).



Σχ. 4.7 Ηλεκτρικό σύστημα για την ανάλυση των μέτρων

Όπως είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο, ένας βασικός μηχανισμός αστάθειας τάσης οφείλεται στην απόπειρα αποκατάστασης της τάσης και του φορτίου των ΣΑΤΥΦ. Η ασταθής αυτή λειτουργία των ΣΑΤΥΦ εκδηλώνεται συνήθως με μία συνεχή πτώση της τάσης στο ρυθμιζόμενο ζυγό, χωρίς αποκατάσταση της καταναλισκόμενης ισχύος στο φορτίο. Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα ότι στο ηλεκτρικό σύστημα του Σχ. 4.7 συμβαίνει μία σοβαρή διαταραχή, εξαιτίας της οποίας η χαρακτηριστική δικτύου συρρικνώνεται τόσο, ώστε να μην υπάρχει πλέον σημείο τομής με τη βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου. Το ΣΑΤΥΦ στην περίπτωση αυτή θα προσπαθήσει να αποκαταστήσει την ισχύ στο φορτίο μέχρι να προκαλέσει τελικά κατάρρευση της τάσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ασταθούς λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ λόγω απώλειας μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 1.5.4.

Κατά την εξέλιξη ενός τέτοιου φαινομένου, η λειτουργία των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης πραγματοποιείται με το συνήθη τρόπο: Όταν η τάση V_2 στον ελεγχόμενο ζυγό (ζυγός δευτερεύοντος) βρεθεί εκτός των ορίων της νεκρής ζώνης $\{V_2^o - d, V_2^o + d\}$, ο μηχανισμός αλλαγής της λήψης μεταβάλλει κατάλληλα το λόγο μετασχηματισμού r , ώστε να επαναφέρει την τάση δευτερεύοντος του μετασχηματιστή εντός της νεκρής ζώνης. Κατά αυτόν τον τρόπο το ΣΑΤΥΦ δρα προς αποκατάσταση της τάσης και της καταναλισκόμενης ισχύος στο φορτίο.

Όταν ο παραπάνω μηχανισμός αποκατάστασης καταστεί ασταθής, η μείωση του λόγου μετασχηματισμού προς ενίσχυση της βαθμιαία μειούμενης τάσης φορτίου προκαλεί ταυτόχρονα μείωση της τάσης στο πρωτεύον και δευτερεύον του μετασχηματιστή και συνακόλουθα μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος στο φορτίο. Η περαιτέρω μείωση του λόγου μετασχηματισμού επιταχύνει το φαινόμενο της αστάθειας με προφανή τον κίνδυνο για κατάρρευση της τάσης στο ρυθμιζόμενο ζυγό. Με όρους γραφικής απεικόνισης (Σχ. 1.9β-1.10) η παραπάνω διαδικασία αντιστοιχεί στην περίπτωση, όπου η βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου έχει ξεπεράσει το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (όριο φόρτισης ή σημείο μεταγωγής) και κινείται στο ασταθές τμήμα της χαρακτηριστικής δικτύου.

Για την αντιμετώπιση των περιπτώσεων ασταθούς λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ προτείνεται η ύπαρξη ενός συστήματος προστασίας που θα αντιλαμβάνεται έγκαιρα την αστάθεια και θα λαμβάνει μέτρα αποτροπής ή αναχαίτισής της. Τα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης που εφαρμόζονται στα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής δεν μπορούν να αποτρέψουν την αστάθεια (σε περίπτωση ύπαρξης άλλων μηχανισμών αποκατάστασης φορτίου), αλλά αναχαιτίζουν την εξέλιξή της. Τα μέτρα αυτά σκοπεύουν στην αναστολή του μηχανισμού αποκατάστασης της τάσης μέσω των ΣΑΤΥΦ, δηλαδή εμποδίζουν την επαναφορά της ισχύος του φορτίου στη ζήτηση πριν τη διαταραχή και συνεπώς εισάγουν μια έμμεση αποκοπή φορτίου. Ωστόσο η αποκοπή που υλοποιείται με τον τρόπο αυτό είναι λιγότερο ενοχλητική για τους καταναλωτές και επιθυμητή από την πλευρά της προστασίας του συστήματος.

Ο έλεγχος εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ μπορεί να υλοποιηθεί με τις ακόλουθες μεθόδους:

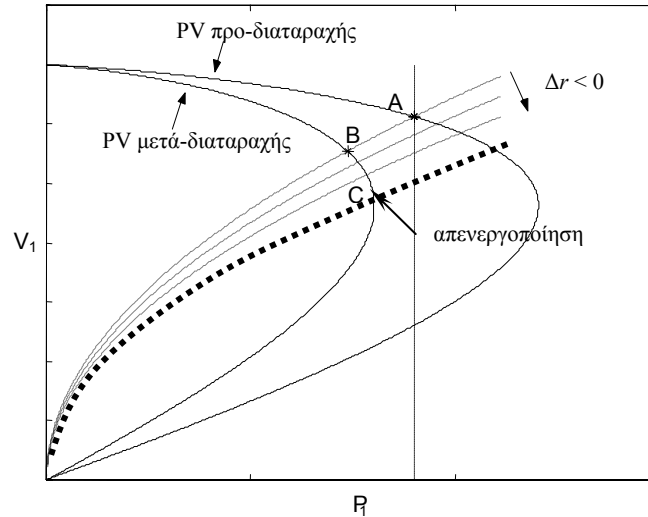
- Απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης του ΣΑΤΥΦ.
- Μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ.
- Κλείδωμα της λήψης του ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση.
- Αντιστροφή της λογικής ελέγχου του ΣΑΤΥΦ.

Όπως είδαμε στην επισκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας, διάφορα κριτήρια έχουν προταθεί για την εφαρμογή των μεθόδων. Στην παρούσα διατριβή ως κριτήριο εφαρμογής έχει επιλεγεί το επίπεδο της τάσης V_1 του ζυγού πρωτεύοντος του μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης. Όπου απαιτήθηκε θεωρήθηκε ανοχή ε και καθυστέρηση t_{del} , ώστε να αποφευχθεί άσκοπη εφαρμογή για ασήμαντη ή παροδική αντίστοιχα παραβίαση του κατωφλίου τάσης V_{thres} .

4.2.2 Απενεργοποίηση Μηχανισμού Αλλαγής Λήψης ΣΑΤΥΦ

Η δυναμική του ΣΑΤΥΦ να αποκαθιστά το φορτίο μετά από κάθε μεταβολή της τάσης αποτελεί τον πιο σημαντικό μηχανισμό αστάθειας τάσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Ένας τρόπος για να σταματήσει η εξέλιξη ενός τέτοιου φαινομένου είναι από κάποιο σημείο και μετά να διακοπεί η προσπάθεια αποκατάστασης της τάσης μέσω του ΣΑΤΥΦ [IWG90,VC93,VC95,VCV98,VM99,IZ03b,VMK04]. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει ο λόγος μετασχηματισμού να σταματήσει να μεταβάλλεται. Με τον τρόπο αυτό η τάση τροφοδοσίας του φορτίου παραμένει χαμηλή και η κατανάλωση μειώνεται λόγω της εξάρτησης του φορτίου από την τάση. Η απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής λήψης των ΣΑΤΥΦ είναι προτιμότερη από τη σκοπιά του καταναλωτή σε σχέση με την αποκοπή φορτίου, καθώς παρά το χαμηλό επίπεδο της τάσης το σύστημα παραμένει σε λειτουργία.

Ας επανέλθουμε στην περίπτωση που λόγω εμφάνισης μίας σοβαρής διαταραχής στο σύστημα του Σχ. 4.7, η χαρακτηριστική δικτύου συρρικνώνεται τόσο ώστε να μην υπάρχει πλέον σημείο τομής με τη βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου (Σχ. 4.8). Το ΣΑΤΥΦ θα προσπαθήσει να αποκαταστήσει τάση και ισχύ στο φορτίο με συνεχείς μειώσεις του λόγου μετασχηματισμού. Επειδή δεν υπάρχει μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας, αν επιτρεπόταν η συνεχής λειτουργία του ΣΑΤΥΦ αυτό θα περνούσε σε αστάθεια προκαλώντας κατάρρευση της τάσης.



Σχ. 4.8 Παράσταση μέτρου απενεργοποίησης μηχανισμού αλλαγής λήψης ΣΑΤΥΦ

Η ασταθής λειτουργία του ΣΑΤΥΦ μπορεί να αντιμετωπιστεί δίνοντας κατάλληλη εντολή απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης. Τη χρονική στιγμή που δίνεται η εντολή, η βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου ακινητοποιείται στο σημείο της χαρακτηριστικής δικτύου από το οποίο διήρχετο τη στιγμή εκείνη. Στο παράδειγμα του Σχ. 4.8 έχει επιλεγεί η απενεργοποίηση του μηχανισμού να γίνει τη χρονική στιγμή που η βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου διέρχεται από το κρίσιμο σημείο C του συστήματος (μέγιστο της χαρακτηριστικής δικτύου), ώστε να υπάρξει μέγιστη δυνατή αποκατάσταση της ισχύος στο φορτίο.

Η δυσκολία που πηγάζει από την απαίτηση για μέγιστη δυνατή αποκατάσταση της ισχύος είναι ο προσδιορισμός του (βέλτιστου) λόγου μετασχηματισμού r_{block}^{opt} που αντιστοιχεί στη διέλευση της βραχυπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου από το κρίσιμο σημείο C, ο οποίος δεν είναι γνωστός εκ των προτέρων. Στην περίπτωση ενός απλού συστήματος με ένα μόνο ΣΑΤΥΦ, ο βέλτιστος λόγος μετασχηματισμού προσδιορίζεται εύκολα αν παρακολουθείται η μεταβολή ΔV_2 της τάσης δευτερεύοντος για κάθε μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού Δr . Η ασταθής δράση του ΣΑΤΥΦ εντοπίζεται τότε, όταν για κάποια μεταβολή Δr του λόγου μετασχηματισμού, η μεταβολή ΔV_2 της τάσης δευτερεύοντος μηδενιστεί ή γίνει αρνητική. Όμως στην περίπτωση που αναφερόμαστε σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, κατά τον προσδιορισμό του βέλτιστου λόγου μετασχηματισμού θα πρέπει να συνεκτιμηθεί η αλληλεπίδραση του ΣΑΤΥΦ με τα υπόλοιπα του συστήματος, ώστε να προκύψει μέγιστη αποκατάσταση της συνολικής ισχύος του συστήματος. Ο λόγος αυτός μετασχηματισμού μπορεί να διαφέρει από αυτόν που επιφέρει μέγιστη αποκατάσταση της ισχύος στο συγκεκριμένο φορτίο. Επίσης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι πιθανές διαταραχές του συστήματος που μπορεί να προκαλέσουν την ασταθή λειτουργία του ΣΑΤΥΦ.

Η συμβολή του μέτρου έγκειται στην αναχαίτιση της οφειλόμενης στα ΣΑΤΥΦ αστάθειας και αν δεν υπάρχει άλλη δυναμική στο σύστημα (π.χ. αυτορρυθμισμό των φορτίων), πιθανώς στην επίτευξη ενός σημείου προσωρινής ισορροπίας. Ένα τέτοιο σημείο θα μπορούσε να οφείλεται αποκλειστικά στα όρια ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ, με τη διαφορά ότι σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει έλεγχος ως προς την αποκατάσταση της ισχύος στο φορτίο. Όμως με σωστή επιλογή των ορίων ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ είναι δυνατόν να προληφθεί ο κίνδυνος μετάβασής τους σε ασταθή λειτουργία [VCV98].

Ένας προληπτικός τρόπος εφαρμογής του μέτρου είναι να απενεργοποιούνται τα ΣΑΤΥΦ του συστήματος όταν κρίνεται ότι δεν υπάρχει επαρκές περιθώριο ασφάλειας για την αντιμετώπιση της αιχμής του φορτίου. Στην περίπτωση αυτή η απενεργοποίηση πρέπει να πραγματοποιείται πριν την έναρξη της ημερήσιας ανάληψης φορτίου και σε ημέρες που θεωρούνται κρίσιμες για την εμφάνιση της αιχμής. Μία τέτοια εφαρμογή του μέτρου δεν μπορεί να γίνει με κριτήριο την τάση, αλλά μάλλον με χειροκίνητο έλεγχο και συνιστά μέτρο προληπτικού ελέγχου του συστήματος.

Η μοντελοποίηση στο πρόγραμμα WPSTAB του μέτρου της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ στηρίζεται στον αλγόριθμο που φαίνεται στον Πίν. 4.1.

Πίν. 4.1 Αλγόριθμος μέτρου απενεργοποίησης μηχανισμού αλλαγής λήψης ΣΑΤΥΦ

ΑΝ $(V_1 \leq V_{\text{thres}} - \varepsilon)$ ΚΑΙ $(V_2 < V_2^{\circ} - d)$ ΚΑΙ $(t > t_{\text{del}})$ ΤΟΤΕ	
$r_{k+1} = r_k$	
ΑΛΛΙΩΣ ΑΝ $(V_1 > V_{\text{thres}} - \varepsilon)$ ΤΟΤΕ	
$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, & \text{αν } V_2 > V_2^{\circ} + d \text{ και } r_k < r_{\text{max}} \\ r_k - \Delta r, & \text{αν } V_2 < V_2^{\circ} - d \text{ και } r_k > r_{\text{min}} \\ r_k & , \text{ σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$	
όπου για κάθε ΣΑΤΥΦ που συμμετέχει στο μέτρο:	
V_{thres}	: το κατώφλι εφαρμογής του μέτρου
ε	: η ανοχή του κατωφλίου τάσης
t_{del}	: η χρονική καθυστέρηση εφαρμογής του μέτρου
V_1	: η τάση πρωτεύοντος
V_2	: η τάση δευτερεύοντος
V_2°	: η τιμή αναφοράς της τάσης δευτερεύοντος
d	: το μισό της νεκρής ζώνης ρύθμισης
r_k	: ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ
r_{min}	: το κάτω όριο ρύθμισης της λήψης
r_{max}	: το άνω όριο ρύθμισης της λήψης
Δr	: το βήμα αλλαγής της λήψης.

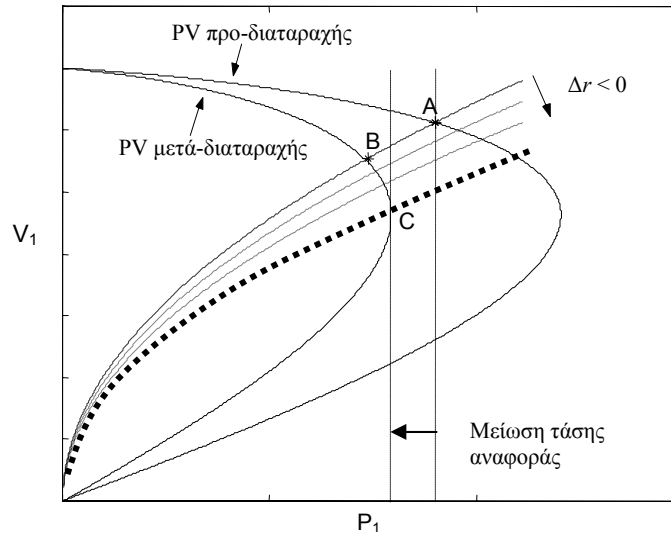
4.2.3 Μείωση Τάσης Αναφοράς ΣΑΤΥΦ

Ένας διαφορετικός τρόπος για να διακοπεί η ασταθής λειτουργία του ΣΑΤΥΦ είναι να μειωθεί κατάλληλα η τάση αναφοράς του [VCJ94,VMK04]. Με τη μείωση της τάσης του ΣΑΤΥΦ επιτυγχάνεται έμμεση αποκοπή της ζήτησης, καθώς απαιτείται αποκατάσταση της ισχύος σε χαμηλότερο επίπεδο. Σε όλη τη διάρκεια εφαρμογής του μέτρου ο μηχανισμός αλλαγής της λήψης του ΣΑΤΥΦ αφήνεται να ρυθμίζει κανονικά την τάση στον ελεγχόμενο ζυγό.

Στην περίπτωση της απώλειας μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας στο ηλεκτρικό σύστημα του Σχ. 4.7, η μείωση της τάσης αναφοράς κατά ΔV_2° ισοδυναμεί με μετατόπιση της μακροπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου προς τα αριστερά (Σχ. 4.9), σε θέση δηλαδή που αντιστοιχεί σε μικρότερη ζήτηση ισχύος. Η μείωση αυτή της ζήτησης καθορίζεται μονοσήμαντα από την τιμή ΔV_2° .

Στο παράδειγμα του Σχ. 4.9 το ποσοστό μείωσης της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ έχει επιλεγεί τόσο ώστε να αντιστοιχεί στην ελάχιστη δυνατή αποκοπή φορτίου, δηλαδή ισοδύναμα στη μέγιστη δυνατή αποκατάσταση της ισχύος στο φορτίο μετά τη διαταραχή. Ωστόσο, στη γενική περίπτωση που αναφερόμαστε σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ο προσδιορισμός της βέλτιστης για το σύστημα μείωσης $\Delta V_2^{\circ, \text{opt}}$ της τάσης αναφοράς ενός συγκεκριμένου ΣΑΤΥΦ είναι δύσκολη υπόθεση αναλογιζόμενος κανείς ότι θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι πιθανές διαταραχές του συστήματος που μπορεί να προκαλέσουν την ασταθή λειτουργία του ΣΑΤΥΦ, όπως και η αλληλεπίδρασή του με τα υπόλοιπα ΣΑΤΥΦ του συστήματος.

Εκτός από το μέγεθος του απορριπτόμενου φορτίου, κρίσιμο παράγοντα για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου αποτελεί ο χρόνος εφαρμογής της. Η χρονική στιγμή της εφαρμογής θα πρέπει να επιτρέπει την έλξη του σημείου λειτουργίας προς το νέο μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας του συστήματος, εφόσον αυτό προκύψει, καθώς η μείωση της τάσης αναφοράς ενδέχεται να μην είναι αρκετή για την αποκατάσταση νέου σημείου ισορροπίας. Η εξάρτηση της απαιτούμενης απόρριψης από το χρόνο και το πρόβλημα της έλξης προς το ευσταθές σημείο ισορροπίας έχουν περιγραφεί στην παράγραφο 2.5.2.



Σχ. 4.9 Παράσταση μέτρου μείωσης τάσης αναφοράς ΣΑΤΥΦ

Η μοντελοποίηση στο πρόγραμμα WPSTAB του μέτρου μείωσης της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ στηρίζεται στον αλγόριθμο που φαίνεται στον Πίν. 4.2.

Πίν. 4.2 Αλγόριθμος μέτρου μείωσης τάσης αναφοράς ΣΑΤΥΦ

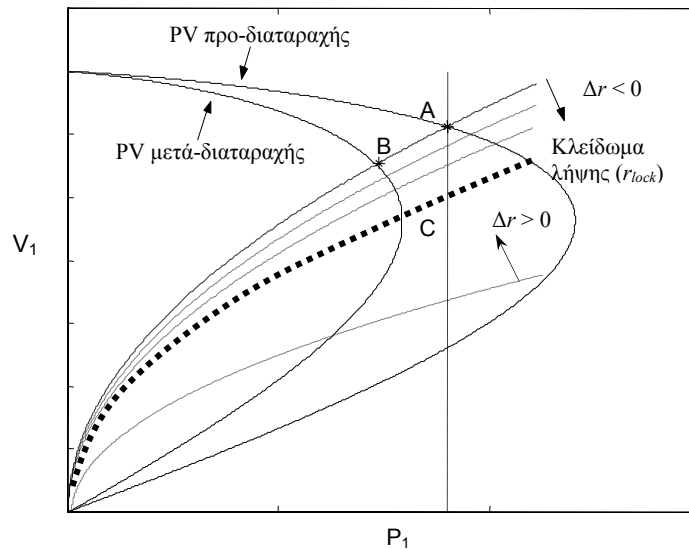
ΑΝ ($V_1 \leq V_{\text{thres}} - \varepsilon$) ΚΑΙ ($t > t_{\text{del}}$) ΤΟΤΕ	
$V_2^{\circ} = V_2^{\circ} - \Delta V_2^{\circ}$ ή	
$\begin{cases} V_2^{\text{max}} = V_2^{\text{max}} - \Delta V_2^{\circ} \\ V_2^{\text{min}} = V_2^{\text{min}} - \Delta V_2^{\circ} \end{cases}$	
ΑΛΛΙΩΣ ΑΝ ($V_1 > V_{\text{thres}} - \varepsilon$) ΤΟΤΕ	
$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, & \text{αν } V_2 > V_2^{\circ} + d \text{ και } r_k < r_{\text{max}} \\ r_k - \Delta r, & \text{αν } V_2 < V_2^{\circ} - d \text{ και } r_k > r_{\text{min}} \\ r_k & , \text{ σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$	
όπου για κάθε ΣΑΤΥΦ που συμμετέχει στο μέτρο:	
V_{thres}	: το κατώφλι εφαρμογής του μέτρου
ε	: η ανοχή του κατωφλίου τάσης
t_{del}	: η χρονική καθυστέρηση εφαρμογής του μέτρου
ΔV_2°	: η μείωση της τάσης αναφοράς
V_1	: η τάση πρωτεύοντος
V_2	: η τάση δευτερεύοντος
V_2°	: η τιμή αναφοράς της τάσης δευτερεύοντος
V_2^{max}	: το άνω όριο της νεκρής ζώνης ρύθμισης
V_2^{min}	: το κάτω όριο της νεκρής ζώνης ρύθμισης
d	: το μισό της νεκρής ζώνης ρύθμισης
r_k	: ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ
r_{min}	: το κάτω όριο ρύθμισης της λήψης
r_{max}	: το άνω όριο ρύθμισης της λήψης
Δr	: το βήμα αλλαγής της λήψης.

4.2.4 Κλειδώμα Λήψης ΣΑΤΥΦ σε Προκαθορισμένη Θέση

Το μέτρο κλειδώματος της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση [VMK04] αποσκοπεί στον έλεγχο των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης προς ενίσχυση των τάσεων στη μεταφορά, παρόλο που αυτό γίνεται εις βάρος των τάσεων στη διανομή και κατά συνέπεια εις βάρος της παρεχόμενης ισχύος στα φορτία. Είναι προφανές ότι με την εφαρμογή του μέτρου επιτελείται έμμεση αποκοπή φορτίου εξαιτίας της σκόπιμης μείωσης των τάσεων στα φορτία που οδηγεί σε μειωμένη κατανάλωση.

Η ενεργοποίηση του μέτρου επιβάλλει τη μετακίνηση και το κλειδώμα της λήψης του ΣΑΤΥΦ σε θέση, η οποία αντιστοιχεί σε προκαθορισμένο λόγο μετασχηματισμού r_{lock} . Στο παράδειγμα του ηλεκτρικού συστήματος που εξετάζουμε, η διαδικασία αυτή ισοδυναμεί με σταδιακή μετακίνηση της βραχυπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου από τη θέση στην οποία βρίσκεται τη στιγμή εφαρμογής του μέτρου στη θέση που αντιστοιχεί στο λόγο μετασχηματισμού r_{lock} (Σχ. 4.10), ανεξάρτητα από τις συνθήκες που επικρατούν στο φορτίο. Με τον τρόπο αυτό αντί της τάσης φορτίου επιχειρείται η ενίσχυση της τάσης δικτύου, σε μια προσπάθεια να αντιμετωπιστεί ή να επιβραδυνθεί η μείωση των τάσεων στο σύστημα της μεταφοράς.

Η μετακίνηση της βραχυπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου πραγματοποιείται με διαδοχικές (διακριτές) μεταβολές του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ. Αν το σύστημα βρίσκεται στην ασταθή περιοχή λειτουργίας, η βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου βρίσκεται στο κάτω τμήμα της χαρακτηριστικής δικτύου. Η ενεργοποίηση του μέτρου επιβάλλει στο ΣΑΤΥΦ να αυξήσει το λόγο μετασχηματισμού ($\Delta r > 0$) μέχρι να προσεγγιστεί η επιθυμητή τιμή κλειδώματος της λήψης. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται πράγματι ενίσχυση της τάσης δικτύου V_1 . Αν το σύστημα βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή λειτουργίας, η βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου βρίσκεται στο άνω τμήμα της χαρακτηριστικής δικτύου. Τότε μία τυχόν άστοχη ενεργοποίηση του μέτρου θα άφηνε το ΣΑΤΥΦ να μειώνει το λόγο μετασχηματισμού ($\Delta r < 0$) μέχρι να προσεγγιστεί η επιθυμητή τιμή κλειδώματος της λήψης. Η λανθασμένη αυτή ενεργοποίηση δεν επιφέρει αποκοπή φορτίου ούτε ενίσχυση των τάσεων στη μεταφορά και για να αποφευχθεί, ελέγχεται η τρέχουσα θέση $r(t)$ του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ και εφόσον είναι μεγαλύτερη από τη θέση κλειδώματος ($r(t) > r_{lock}$) δεν μετακινείται η λήψη.



Σχ. 4.10 Παράσταση μέτρου κλειδώματος λήψης ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση

Στην περίπτωση του Σχ. 4.10 έχει επιλεγεί η λήψη του ΣΑΤΥΦ να κλειδώσει στη θέση που αντιστοιχεί στο κρίσιμο σημείο C του συστήματος (μέγιστο της χαρακτηριστικής δικτύου), ώστε να υπάρξει η μέγιστη δυνατή αποκατάσταση της ισχύος στο φορτίο μετά τη διαταραχή. Η δυσκολία εντοπίζεται πάλι στον προσδιορισμό του βέλτιστου λόγου μετασχηματισμού r_{lock}^{opt} , εκτιμώντας όλες τις πιθανές διαταραχές του συστήματος που μπορεί να προκαλέσουν την ασταθή λειτουργία του συγκεκριμένου ΣΑΤΥΦ και την αλληλεπίδραση με τα άλλα ΣΑΤΥΦ του συστήματος.

Παρόλο που από την άποψη της αποκατάστασης της καταναλισκόμενης ισχύος στο φορτίο ο λόγος μεταβλητής λήψης r_{lock}^{opt} αποτελεί βέλτιστη λύση, από την άποψη της ενίσχυσης του συστήματος μεταφοράς βέλτιστος λόγος μετασχηματισμού είναι το άνω όριο ρύθμισης r_{max} της λήψης. Με την επιλογή αυτή οι τάσεις στο σύστημα της μεταφοράς ενισχύονται στο μέγιστο δυνατό βαθμό, περιορίζοντας τις απώλειες αέργου ισχύος στο δίκτυο.

Η μοντελοποίηση στο πρόγραμμα WPSTAB του μέτρου κλειδώματος της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση στηρίζεται στον αλγόριθμο που φαίνεται στον Πίν. 4.3.

Πίν. 4.3 Αλγόριθμος μέτρου κλειδώματος λήψης ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση

ΑΝ ($V_1 \leq V_{thres} - \epsilon$) ΚΑΙ ($r_k \leq r_{lock}$) ΤΟΤΕ	
$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, & \text{αν } r_k < r_{lock} \\ r_k & , \text{αν } r_k = r_{lock} \end{cases}$	
ΑΛΛΙΩΣ ΑΝ ($V_1 > V_{thres} - \epsilon$) ΤΟΤΕ	
$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, & \text{αν } V_2 > V_2^o + d \text{ και } r_k < r_{max} \\ r_k - \Delta r, & \text{αν } V_2 < V_2^o - d \text{ και } r_k > r_{min} \\ r_k & , \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$	
όπου για κάθε ΣΑΤΥΦ που συμμετέχει στο μέτρο:	
V_{thres}	: το κατώφλι εφαρμογής του μέτρου
ϵ	: η ανοχή του κατωφλίου τάσης
t_{del}	: η χρονική καθυστέρηση εφαρμογής του μέτρου
r_{lock}	: ο προκαθορισμένος λόγος κλειδώματος της λήψης
V_1	: η τάση πρωτεύοντος
V_2	: η τάση δευτερεύοντος
V_2^o	: η τιμή αναφοράς της τάσης δευτερεύοντος
d	: το μισό της νεκρής ζώνης ρύθμισης
r_k	: ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ
r_{min}	: το κάτω όριο ρύθμισης της λήψης
r_{max}	: το άνω όριο ρύθμισης της λήψης
Δr	: το βήμα αλλαγής της λήψης.

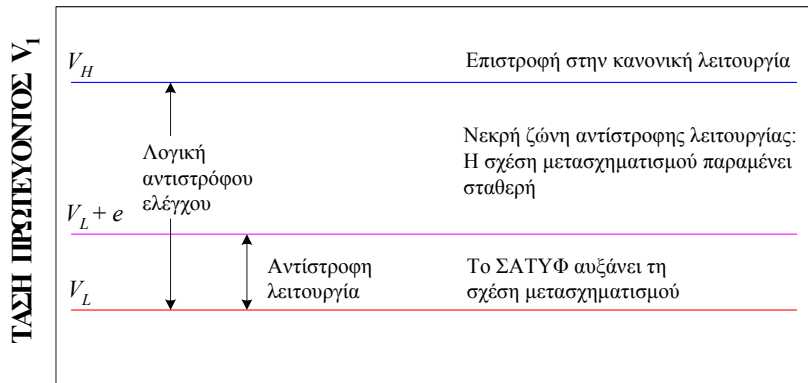
4.2.5 Αντιστροφή Λογικής Ελέγχου ΣΑΤΥΦ

Η φιλοσοφία του μέτρου αντιστροφής της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ [VK03,VCO03,VMK04] μοιάζει με αυτή του μέτρου κλειδώματος της λήψης σε προκαθορισμένη θέση, αποσκοπεί δηλαδή στον έλεγχο των ΣΑΤΥΦ προς ενίσχυση των τάσεων στο σύστημα της μεταφοράς με έμμεση αποκοπή του φορτίου στην πλευρά της διανομής. Με τον τρόπο αυτό επιχειρείται η επιβράδυνση της μείωσης των τάσεων στη μεταφορά και η αποφυγή ενδεχόμενης κατάρρευσής τους.

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου περιγράφεται με τη βοήθεια του Σχ. 4.11:

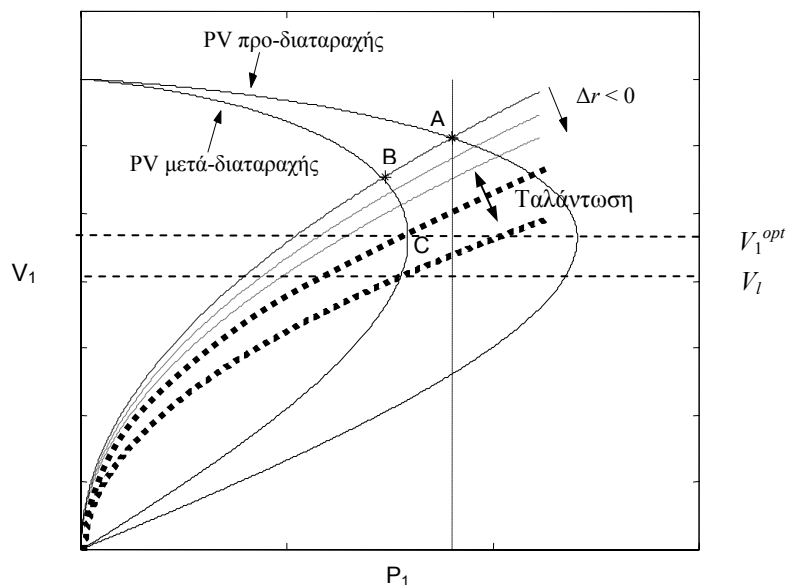
- Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας το ΣΑΤΥΦ ελέγχει την τάση δευτερεύοντος V_2 του μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης και τη ρυθμίζει μεταβάλλοντας κατάλληλα το λόγο μετασχηματισμού r .
- Αν η τάση πρωτεύοντος V_1 του μετασχηματιστή γίνει μικρότερη από μια τιμή κατωφλίου V_L ενεργοποιείται η αντίστροφη λογική, οπότε ο έλεγχος μεταφέρεται στο ζυγό YT με τάση αναφοράς πρωτεύοντος την τιμή $V_L + e$. Έτσι, όταν ο έλεγχος του ΣΑΤΥΦ έχει αντιστραφεί, εκτελούνται βήματα μεταβολής (αύξησης) του λόγου μετασχηματισμού μόνο όταν η τάση πρωτεύοντος V_1 διατηρείται κάτω από την τιμή $V_L + e$. Αν η τάση V_1 υπερβεί το όριο $V_L + e$ και το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται σε αντίστροφη λειτουργία, ο λόγος μετασχηματισμού παραμένει σταθερός.

- Αν η τάση πρωτεύοντος V_1 υπερβεί ένα άνω όριο V_H , ο αντίστροφος έλεγχος του ΣΑΤΥΦ απενεργοποιείται και ο μηχανισμός του επαναφέρεται σε κανονική λειτουργία. Επομένως ελεγχόμενη τάση γίνεται πάλι η τάση V_2 του ζυγού ΜΤ.
- Ο αντίστροφος έλεγχος τερματίζεται προσωρινά, αν κατά τη διάρκεια αυτού η τάση V_2 στο δευτερεύον του μετασχηματιστή πέσει κάτω από μια τιμή V_B , επανέρχεται όμως όταν η ίδια τάση υπερβεί το όριο V_B κατά μια μικρή ανοχή c .
- Οι χρονικές καθυστερήσεις T_{d1} , T_{d2} για την αλλαγή της λήψης θεωρούνται σταθερές και κοινές τόσο για την κανονική όσο και για την αντιστροφή λειτουργία του ΣΑΤΥΦ. Οι μετρητές χρόνου μηδενίζονται κάθε φορά που αλλάζει ο τρόπος λειτουργίας και ο ελεγχόμενος ζυγός.



Σχ. 4.11 Όρια λειτουργίας αντιστρόφου ελέγχου ΣΑΤΥΦ

Στο Σχ. 4.12 φαίνεται η διαδικασία της αντιστροφής του ελέγχου στο ΣΑΤΥΦ του ηλεκτρικού συστήματος που εξετάζουμε. Μετά την εμφάνιση της διαταραχής το ΣΑΤΥΦ μεταβάλλει κανονικά το λόγο μετασχηματισμού, ώστε να αποκαταστήσει την τάση και την ισχύ στο φορτίο. Όταν κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας η τάση πρωτεύοντος V_1 γίνει μικρότερη από την τιμή κατωφλίου V_L , ο έλεγχος αντιστρέφεται και το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζει την τάση πρωτεύοντος γύρω από την τιμή $V_L + e$. Στο παράδειγμα η ρύθμιση της τάσης πρωτεύοντος γίνεται πάνω από την τιμή $V_C (= V_L + e^{opt})$, η οποία αντιστοιχεί στο μέγιστο της χαρακτηριστικής δικτύου. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε με σκοπό τη μέγιστη αποκατάσταση της ισχύος στο φορτίο μετά τη διαταραχή. Ο προσδιορισμός της βέλτιστης τάσης αναφοράς πρωτεύοντος $V_1^{opt} (= V_L + e^{opt})$, δηλαδή ουσιαστικά της βέλτιστης τιμής διόρθωσης e^{opt} , είναι αρκετά δύσκολος δεδομένου ότι η τιμή αυτή διαφοροποιείται για κάθε διαταραχή που προκαλεί αστάθεια του συγκεκριμένου ΣΑΤΥΦ αλλά και από την αλληλεπίδραση με άλλα ΣΑΤΥΦ.



Σχ. 4.12 Παράσταση μέτρου αντιστροφής ελέγχου ΣΑΤΥΦ

Η έμμεση αποκοπή που πραγματοποιείται στο φορτίο εξαρτάται από την τιμή της διόρθωσης e . Για κάθε άλλη τιμή διόρθωσης διαφορετική από τη βέλτιστη e^{opt} , η οποία αντιστοιχεί στη ρύθμιση της τάσης πρωτεύοντος του μετασχηματιστή γύρω από την κρίσιμη τάση V_C , η αποκοπή που πραγματοποιείται είναι μεγαλύτερη της ελάχιστης αναγκαίας.

Η εφαρμογή της αντιστροφής ελέγχου του ΣΑΤΥΦ μπορεί να επιφέρει ισορροπία στο σύστημα αν δεν υπάρχει κάποια άλλη δυναμική όπως η αυτορρύθμιση του φορτίου. Αν υπάρχει αυτορρύθμιση του φορτίου, το αποτέλεσμα από την εφαρμογή του μέτρου είναι μία ταλάντωση της τάσης πρωτεύοντος και της καταναλισκόμενης ισχύος γύρω από μία περίπου σταθερή τιμή. Πιο παραστατικά, κατά τον αντίστροφο έλεγχο του ΣΑΤΥΦ κάθε αλλαγή της λήψης μετακινεί τη βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου προς το πάνω μέρος της χαρακτηριστικής δικτύου, ενώ κάθε αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου τη μετακινεί προς το κάτω τμήμα της χαρακτηριστικής δικτύου προκαλώντας την ταλάντωση που δείχνει το Σχ. 4.12. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου εξαντληθεί το όριο ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ, οπότε η αύξηση της αγωγιμότητας θα προκαλέσει την κατάρρευση.

Η μοντελοποίηση στο πρόγραμμα WPSTAB του μέτρου αντιστροφής της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ στηρίζεται στον αλγόριθμο που φαίνεται στον Πίν. 4.4.

Πίν. 4.4 Αλγόριθμος μέτρου αντιστροφής ελέγχου ΣΑΤΥΦ

ΑΝ ($V_1 < V_L$ κατά την κανονική λειτουργία) ΚΑΙ $V_2 < V_B$ ΤΟΤΕ		
$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, & \text{αν } V_1 < V_L + e, V_2 > V_B \text{ και } r_k < r_{\max} \\ r_k, & \text{αν } V_L + e < V_1 < V_H \text{ ή } V_2 < V_B \\ \text{επιστροφή σε κανονική λειτουργία, αν } V_1 > V_H \end{cases}$		Αντίστροφη λειτουργία
ΑΛΛΙΩΣ ΑΝ ($V_1 > V_L$ κατά την κανονική λειτουργία) ΤΟΤΕ		
$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, & \text{αν } V_2 > V_2^o + d \text{ και } r_k < r_{\max} \\ r_k - \Delta r, & \text{αν } V_2 < V_2^o - d \text{ και } r_k > r_{\min} \\ r_k, & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$		Κανονική λειτουργία
όπου για κάθε ΣΑΤΥΦ που συμμετέχει στο μέτρο:		
V_L	:	το κάτω όριο αντίστροφης λειτουργίας
V_H	:	το άνω όριο αντίστροφης λειτουργίας
V_B	:	το όριο απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης κατά την αντίστροφη λειτουργία
e	:	η επιθυμητή διόρθωση της τάσης πρωτεύοντος
c	:	η διόρθωση του ορίου επανενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης κατά την αντίστροφη λειτουργία.
V_1	:	η τάση πρωτεύοντος
V_2	:	η τάση δευτερεύοντος
V_2^o	:	η τιμή αναφοράς της τάσης δευτερεύοντος
d	:	το μισό της νεκρής ζώνης ρύθμισης
r_k	:	ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ
r_{\min}	:	το κάτω όριο ρύθμισης της λήψης
r_{\max}	:	το άνω όριο ρύθμισης της λήψης
Δr	:	το βήμα αλλαγής της λήψης.

4.2.6 Αποτίμηση Μέτρων - Συμπεράσματα

Πρέπει να τονιστεί ότι με την εφαρμογή των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ δεν αποκαθίσταται μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας στο σύστημα εάν το φορτίο μεταβάλλεται. Η συμβολή των μέτρων έγκειται στην αναχαίτιση της οφειλόμενης στα ΣΑΤΥΦ αστάθειας και αν δεν υπάρχει άλλη δυναμική στο σύστημα (π.χ. αυτορρύθμιση των φορτίων) πιθανώς στην επίτευξη ενός σημείου ψευδοϊσορροπίας. Για το λόγο αυτό η λύση αυτή είναι καθαρά προσωρινή μέχρι τη λήψη άλλων περισσότερο οριστικών μέτρων προστασίας, όπως ένταξη μονάδων ή αποκοπή φορτίου.

Τα *πλεονεκτήματα* από την εφαρμογή των μεθόδων μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

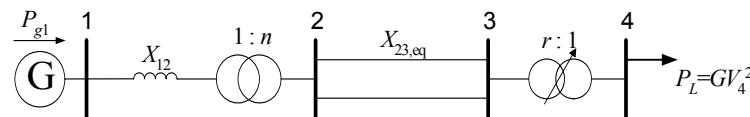
- Αντιμετώπιση της ασταθούς λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ.
- Επιβράδυνση της μείωσης των τάσεων, άρα κερδισμένος χρόνος για τη λήψη άλλων μέτρων προστασίας. Ειδικά η εφαρμογή του μέτρου της αντιστροφής της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ επιφέρει για αρκετό χρονικό διάστημα διατήρηση των τάσεων στο σύστημα μεταφοράς σε περίπου σταθερές τιμές ακόμα και όταν υπάρχει μηχανισμός επαναφοράς των φορτίων.
- Επίτευξη ανακούφισης του συστήματος με προσωρινή αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος στο φορτίο. Εξαιρεση αποτελεί το μέτρο της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης, όπου δεν επιτυγχάνεται αύξηση της ισχύος αλλά περιορισμός του ρυθμού μείωσης της.
- Δυνατότητα εφαρμογής των μεθόδων - με χρήση κατάλληλων αλγορίθμων - μόνο στα ΣΑΤΥΦ που ευθύνονται για την αστάθεια.
- Εκτός του μέτρου αντιστροφής της λογικής των ΣΑΤΥΦ, εύκολη σχετικά υλοποίηση.

Τα *μειονεκτήματα* από την εφαρμογή των μεθόδων μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Αδυναμία αντιμετώπισης άλλων δυναμικών στο σύστημα, όπως η αυτοεπαναφορά των φορτίων.
- Έμμεση αποκοπή φορτίου στους καταναλωτές (πλην όμως σκόπιμη).
- Εξάρτηση από την ευαισθησία των φορτίων ως προς την τάση. Στην περίπτωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που διαθέτουν σημαντικό αριθμό κινητήρων επαγωγής μεγάλης ονομαστικής ισχύος η εφαρμογή των μέτρων κρίνεται αναποτελεσματική, γιατί η μείωση της τερματικής τάσης στους κινητήρες αυτούς συνεπάγεται κατανάλωση περισσότερης αέργου ισχύος.
- Δύσκολη σχεδίαση της προστασίας σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της ανάγκης προσδιορισμού βέλτιστων κριτηρίων για συντονισμένη λειτουργία (off-line tuning).

4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΜΙΚΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

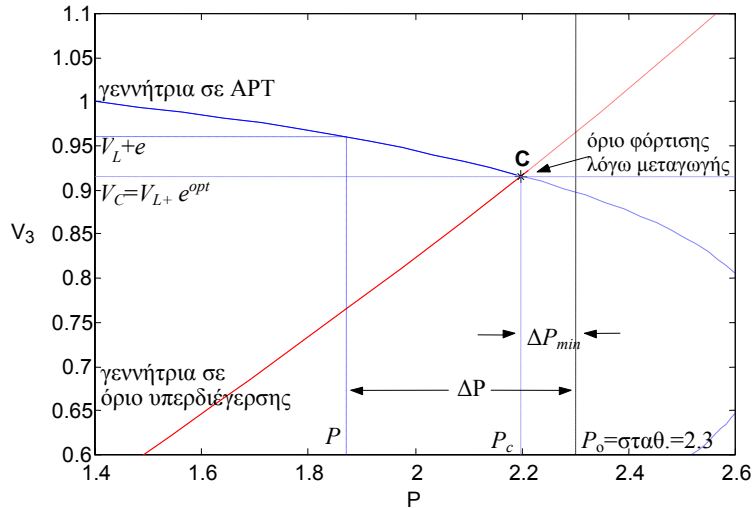
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η εφαρμογή των εξεταζόμενων μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ στο μικρό ηλεκτρικό σύστημα του Σχ. 4.13, όπου μια σύγχρονη γεννήτρια εξοπλισμένη με αυτόματο ρυθμιστή τάσης και σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης τροφοδοτεί μέσω μιας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος ένα καθαρά ωμικό φορτίο P_L [VMK04]. Για την παράσταση του μετασχηματιστή χρησιμοποιείται ένα απλουστευμένο μοντέλο, στο οποίο η επαγωγική αντίδραση σκεδάσεως αμελείται. Τα δεδομένα του συστήματος παρατίθενται στον Πίν. 4.5.



Σχ. 4.13 Σύστημα ενός φορτίου

Πίν. 4.5 Δεδομένα συστήματος (α.μ. σε κοινή βάση)

X_{12}	X_{23}	X_d	E_f^{lim}	$V_{1,ref}$
0,016	0,08	0,8	2,5968	1,0135
G_{AVR}	n	V_{1o}	V_{4o}	G_o
100	1,04	0,9897	0,9955	2,321
r_o	r_{max}	r_{min}	Δr	Εύρος ζώνης
1,0	1,2	0,8	0,00625	0,99 – 1,0056



Σχ. 4.14 Καμπύλη PV του συστήματος μετά τη διαταραχή

Να σημειωθεί ότι εκτός της δυναμικής του ΣΑΤΥΦ, το οποίο παριστάνεται ως μία διακριτή διάταξη με σταθερή χρονική καθυστέρηση 10 s, θεωρήθηκε συνεχής δυναμική αυτορρύθμισης του φορτίου σε σταθερή ισχύ P_0 :

$$T_L \dot{G} = P_0 - GV_4^2 \quad (4.1)$$

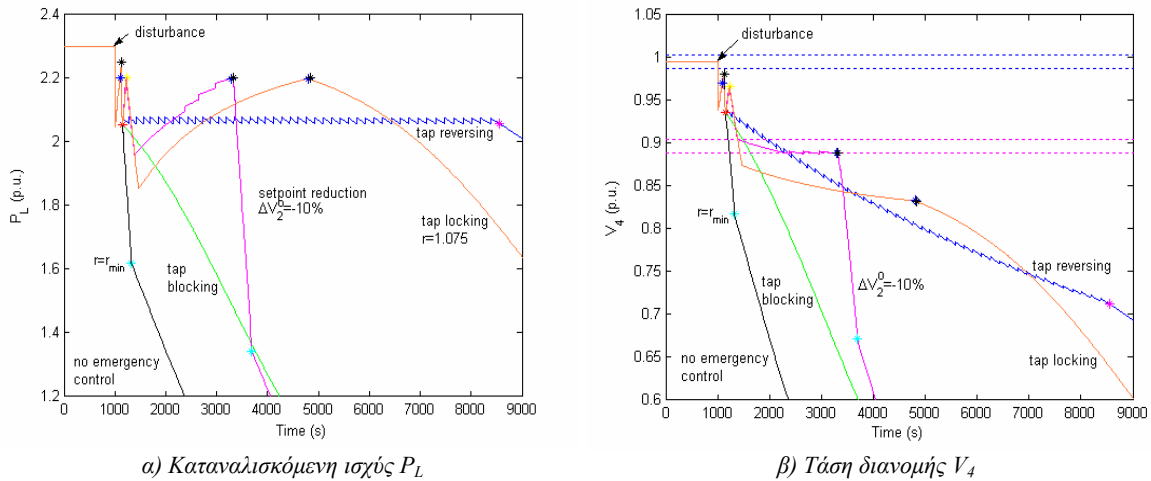
όπου $T_L = 1000$ s είναι η χρονική σταθερά αποκατάστασης του φορτίου και G η αγωγιμότητά του. Ας σημειωθεί ότι για τις ανάγκες της προσομοίωσης η δυναμική της αυτορρύθμισης του φορτίου υλοποιείται με διακριτό τρόπο, ενώ δεν υπάρχει επίσης άνω όριο για την αγωγιμότητα.

Η δυναμική της γεννήτριας και των διατάξεων ελέγχου της θεωρείται πολύ πιο γρήγορη σε σχέση με τη δυναμική του ΣΑΤΥΦ και του φορτίου. Έτσι στην παρούσα εφαρμογή για την παράσταση της μηχανής χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις ισορροπίας της γεννήτριας, του αυτόματου ρυθμιστή τάσης και του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης.

Η διαταραχή που εφαρμόζεται στο σύστημα είναι η απώλεια της μιας εκ των δύο γραμμών μεταφοράς τη χρονική στιγμή $t = 1000$ s. Λίγο μετά την εμφάνιση της διαταραχής η γεννήτρια περνάει από λειτουργία με αυτόματη ρύθμιση τάσης σε λειτουργία με προστασία υπερδιέγερσης, με αποτέλεσμα η ζήτηση P_0 να μη μπορεί να ικανοποιηθεί. Αυτό φαίνεται στο Σχ. 4.14, όπου η μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου P_0 δεν έχει σημείο τομής με τη χαρακτηριστική δικτύου (συνεχής καμπύλη) που προκύπτει μετά τη διαταραχή. Η εξίσωση (4.1) δεν έχει πλέον σημείο ισορροπίας και το σύστημα θα καταρρεύσει.

Η συμπεριφορά του συστήματος κάτω από τη συνδυασμένη δράση του ΣΑΤΥΦ και της αυτορρύθμισης του φορτίου αποτυπώνεται στις καμπύλες με το χαρακτηρισμό «no emergency control» του Σχ. 4.15. Όπως φαίνεται στο Σχ. 4.15α, η καταναλισκόμενη ισχύς P_L μειώνεται γρήγορα μέχρι τη χρονική στιγμή που το ΣΑΤΥΦ εξαντλεί όλα τα διαθέσιμα βήματα μεταβολής της λήψης του ($r = r_{min}$). Από τη στιγμή αυτή και μετά η μείωση της ισχύος οφείλεται αποκλειστικά στην επαναφορά του φορτίου και πραγματοποιείται με μικρότερο ρυθμό λόγω της μεγαλύτερης σταθεράς χρόνου T_L του φορτίου σε σχέση με αυτή του ΣΑΤΥΦ. Η αστάθεια τάσης είναι εμφανής στο Σχ. 4.15β. Η τάση του φορτίου μειώνεται μέχρι το 80% της ονομαστικής της τιμής όταν το ΣΑΤΥΦ έχει εξαντλήσει όλα τα διαθέσιμα βήματα αλλαγής της λήψης του και συνεχίζει να μειώνεται με μικρότερο ρυθμό λόγω της αύξησης της αγωγιμότητας του φορτίου.

Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται η συμπεριφορά του ηλεκτρικού συστήματος με εφαρμογή των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης στο ΣΑΤΥΦ. Ως κατώφλι τάσης πρωτεύοντος για την ενεργοποίηση όλων των μεθόδων θεωρήθηκε η τιμή $V_3 = 0,85$ αμ, ενώ δεν λήφθηκε υπόψη ανοχή ($\varepsilon = 0$) και χρονική καθυστέρηση ($t_{del} = 0$). Όπως φαίνεται από το σχήμα, το λιγότερο αποδοτικό μέτρο είναι αυτό της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης του ΣΑΤΥΦ (tap blocking). Η εφαρμογή του δεν παρέχει ανακούφιση στο σύστημα, με προσωρινή αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος, αλλά περιορίζει το ρυθμό μείωσής της, εξασφαλίζοντας χρόνο για τη λήψη άλλων μέτρων.

α) Καταναλισκόμενη ισχύς P_L β) Τάση διανομής V_4

Σχ. 4.15 Προσομοίωση μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ

Η μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ (setpoint reduction) κατά 10% αποδείχθηκε περισσότερο αποδοτική, καθώς με την εφαρμογή της αποτρέπεται η ασταθής λειτουργία του ΣΑΤΥΦ, ενώ επιτρέπεται στο φορτίο να ανακτήσει την ισχύ του με αύξηση της αγωγιμότητας. Ωστόσο η θετική δράση του μέτρου είναι χρονικά περιορισμένη, γιατί η αύξηση της αγωγιμότητας εξωθεί αργά την τάση έξω από τη μειωμένη νεκρή ζώνη, επαναφέροντας ξανά το ΣΑΤΥΦ στην ασταθή λειτουργία.

Η εφαρμογή του μέτρου κλειδώματος της λήψης στην προκαθορισμένη θέση $r_{lock} = 1,075$ αμ (tap locking) αντιμετωπίζει την ασταθή λειτουργία του ΣΑΤΥΦ και επιτρέπει την αποκατάσταση της ισχύος στο φορτίο για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Ωστόσο το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν ρυθμίζεται η τάση διανομής V_4 , η οποία πέφτει κάτω ακόμα και από τη μειωμένη νεκρή ζώνη.

Ως πιο αποτελεσματικό μέτρο αποδείχθηκε αυτό της αντιστροφής της λογικής ελέγχου του ΣΑΤΥΦ. Κατά την αντιστροφή λειτουργία, όσο υπάρχουν διαθέσιμα βήματα αλλαγής της λήψης η τάση δικτύου V_3 και η καταναλισκόμενη στο φορτίο ισχύς P_L διατηρούν σχεδόν σταθερές τιμές. Αυτό συμβαίνει γιατί σε όλη τη διάρκεια της αντιστροφής η αγωγιμότητα $G_1 = G / r^2$ που βλέπει ο μετασχηματιστής στο πρωτεύον του παραμένει σχεδόν σταθερή, καθώς η αύξηση του λόγου μετασχηματισμού αντισταθμίζεται από την αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου.

Η διακύμανση αυτή του φορτίου γύρω από σταθερή τιμή προκύπτει με βάση την παραδοχή ότι η επαγωγική αντίδραση σκεδάσεως του μετασχηματιστή αμελείται. Με την παραδοχή αυτή το φορτίο θεωρείται σταθερού συντελεστή ισχύος παρά τη μεταβολή της αγωγιμότητάς του. Αν χρησιμοποιηθεί το ακριβές μοντέλο μετασχηματιστή, όπως αυτό του Σχ. 4.7 με την αντίδραση σκεδάσεως στο δευτερεύον τύλιγμα, η καταναλισκόμενη ισχύς του φορτίου σταθεροποιείται γύρω από μία βαθμιαία μειούμενη τιμή [Met03]. Αυτό οφείλεται στη μείωση του συντελεστή ισχύος του φορτίου, όπως αυτό φαίνεται από την πλευρά του δικτύου.

Η αντιστροφή ελέγχου στο ΣΑΤΥΦ (tap reversing) προκαλεί ελεγχόμενη μείωση του φορτίου, η οποία εξαρτάται από τη διόρθωση e της τάσης πρωτεύοντος. Για οποιαδήποτε άλλη τιμή διόρθωσης πέραν της βέλτιστης e^{opt} (Σχ. 4.14), η αποκοπή φορτίου ΔP που πραγματοποιείται είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη δυνατή ΔP_{min} . Ένα άλλο σημαντικό συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί για περισσότερο χρόνο όταν η επιλεγόμενη τιμή διόρθωσης της τάσης πρωτεύοντος είναι η βέλτιστη [Met03].

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης που παρουσιάστηκαν στην ενότητα αυτή είναι συντηρητικά σε σχέση με την αναμενόμενη απόκριση ενός πραγματικού συστήματος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι σε ένα πραγματικό σύστημα η αυτορρύθμιση του φορτίου συναντάει άνω όρια. Στην περίπτωση λοιπόν που λαμβάνεται υπόψη όριο στη μεταβολή της αγωγιμότητας, η διαδικασία της αυτορρύθμισης είναι δυνατό να τερματιστεί στο όριο αυτό, πριν ακόμα εξαντληθούν τα όρια ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ. Επομένως το σύστημα δεν είναι απαραίτητο να καταρρεύσει αλλά μπορεί τελικά να ισορροπήσει σε μία μη ευσταθή κατάσταση λειτουργίας με χαμηλές τιμές τάσης και φορτίου που δεν είναι όμως επιθυμητή (μη βιώσιμο σημείο λειτουργίας).

4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

4.4.1 Δεδομένα και Παραδοχές Προσομοίωσης

Για την εφαρμογή των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και την προσομοίωση της συμπεριφοράς του στα σενάρια που μελετώνται παρακάτω, θα χρησιμοποιηθεί ως βάση το στιγμιότυπο ροής ισχύος του συστήματος που προέκυψε από τα αρχεία που κατέγραψε ο εκτιμητής κατάστασης του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας στις 11:30 της 12^{ης} Ιουλίου 2004, λίγο πριν από τη σβέση του νότιου τμήματος.

Τη δεδομένη χρονική στιγμή η σύνθεση του συστήματος περιλάμβανε 892 ζυγούς, 568 γραμμές μεταφοράς, 526 μετασχηματιστές εκ των οποίων οι 325 μεταβλητής λήψης, 130 συστοιχίες πυκνωτών, 7 πηνία και 101 γεννήτριες. Από το σύνολο των γεννητριών οι 64 ανήκουν στο Ελληνικό σύστημα, ενώ οι υπόλοιπες αντιστοιχούν σε ισοδύναμες μονάδες παραγωγής του εξωτερικού.

Στις προσομοιώσεις οι διατάξεις του συστήματος παριστάνονται με τα μοντέλα που περιγράφονται στην παράγραφο 2.4.1. Για τις γεννήτριες του Ελληνικού συστήματος λαμβάνεται υπόψη ο κορεσμός και η δράση του ρυθμιστή στροφών, του αυτόματου ρυθμιστή τάσης και του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης. Οι μονάδες του εξωτερικού θεωρούνται γεννήτριες σταθερής θερματικής τάσης που συμμετέχουν στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας. Τα αιολικά πάρκα και η διασύνδεση με συνεχές ρεύμα προς Ιταλία παριστάνονται ως αρνητικά φορτία. Τα ΣΑΤΥΦ στους μετασχηματιστές διανομής παριστάνονται ως διακριτές διατάξεις με σταθερή αρχική χρονική καθυστέρηση T_{d1} ίση με 30 s και σταθερή επακόλουθη χρονική καθυστέρηση T_{d2} ίση με 10 s για την αλλαγή της λήψης. Τα φορτία του συστήματος θεωρούνται εκθετικής μορφής με εκθέτες $\alpha = 1,5$, $\beta = 2$ και κατά κανόνα είναι συγκεντρωμένα στους ζυγούς ΜΤ των υποσταθμών διανομής. Οι μεγάλοι καταναλωτές (πελάτες ΥΤ, ορυχεία) παριστάνονται ως φορτία απευθείας ανηγμένα στην ΥΤ, στα οποία η αποκατάσταση της ισχύος πραγματοποιείται μέσω ιδεατών μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης. Τα βοηθητικά των μονάδων παραγωγής παριστάνονται ως φορτία σταθερής ισχύος στους ζυγούς των μονάδων.

Σχετικά με την παράσταση των διατάξεων προστασίας των γεννητριών χρησιμοποιείται επιπλέον το μοντέλο περιορισμού ρεύματος τυμπάνου, το οποίο προσομοιώνει τη διαδικασία μείωσης της ισχύος εξόδου των γεννητριών που πραγματοποιείται από τους χειριστές των μονάδων για την προστασία του τυμπάνου από καταστροφικές υπερεντάσεις. Επίσης χρησιμοποιείται το μοντέλο προστασίας υποτάσεως γεννητριών για την προσομοίωση της αποσύνδεσης των γεννητριών λόγω υπερθέρμανσης των βοηθητικών εξαιτίας χαμηλής θερματικής τάσης. Σχετικά με την παράσταση των φορτίων χρησιμοποιείται εναλλακτικά το δυναμικό μοντέλο φορτίου με μηχανισμό αυτορρύθμισης της ισχύος. Τα παραπάνω μοντέλα επεξηγήθηκαν αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο και χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται στη διατριβή αυτή.

Στον Πίν. 4.6 παρατίθενται οι τροποποιήσεις που έγιναν στα δεδομένα ορισμένων γεννητριών μετά από σχετική μελέτη [Vou05a] των αρχείων του εκτιμητή κατάστασης για την πιστότερη αποτύπωση της πραγματικής κατάστασης του συστήματος. Συγκεκριμένα, στα δεδομένα των υδροηλεκτρικών μονάδων Καστράκι 2 και Λάδωνας 1-2 έγιναν τροποποιήσεις στην ονομαστική και μέγιστη ισχύ εξόδου των γεννητριών, σύμφωνα με ακριβέστερες εκτιμήσεις που προέκυψαν από τη μελέτη των καμπυλών ικανότητας φόρτισης των συγκεκριμένων γεννητριών. Στα δεδομένα της μονάδας Λαύριο 3, η οποία συνίστατο από τη μονάδα μικρού συνδυασμένου κύκλου και τους φορητούς αεριοστροβίλους του Λαυρίου, προστέθηκαν 70 MW στη μετρούμενη ενεργό ισχύ (P) και 100 MW στη μέγιστη ισχύ εξόδου (P^{max}) για την ακριβέστερη παράσταση της πραγματικής έγχυσης ισχύος στο ζυγό του σταθμού.

Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται οι τροποποιήσεις που έγιναν στα δεδομένα ορισμένων ΣΑΤΥΦ για την επίτευξη ισορροπίας στο αρχικό σημείο της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, μεταβλήθηκε το άνω όριο (V_2^{max}) της νεκρής ζώνης ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ του πίνακα, ώστε στο αρχικό σημείο της προσομοίωσης η τάση του ελεγχόμενου ζυγού να βρίσκεται εντός της νεκρής ζώνης. Κατά αυτό τον τρόπο αποφεύχθηκε η δυναμική απόκριση του συστήματος που θα συνέβαινε λόγω μεταβολών (από το αρχικό σημείο ισορροπίας) στις σχέσεις μετασχηματισμού των ΣΑΤΥΦ.

Πίν. 4.6 Τροποποιήσεις στα δεδομένα του εκτιμητή κατάστασης

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ				
Τερματικός Ζυγός	Μονάδα	P^{max} (MW)		S^{max} (MVA)
449	Καστράκι 2	80		88,83
582	Λάδωνας 1	34,5		36
583	Λάδωνας 2	34,5		36
659	Λαύριο 3	222	272	351
		P (MW)	P^{max} (MW)	
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΑΤΥΦ				
Ελεγχόμενος Ζυγός	ΣΑΤΥΦ	V_2^{max}	V_2^{max} (νέα τιμή)	
122	Θεσσαλονίκη 51	0,9820	0,9837	
320	Δομοκός 51	1,0215	1,0234	
333	Λαμία 51	0,9430	0,9466	
346	Χαλκίδα 51	0,9100	0,9152	
381	Λιβαδειά 51	1,0000	1,0091	
439	Τριγωνίδα 51	1,1635	1,1673	
440	Τριγωνίδα 52	1,1330	1,1406	
510	Αργοστόλι 51	1,0349	1,0374	
511	Αργοστόλι 52	1,0165	1,0190	
539	Πάτρα 51	1,0565	1,0626	
553	Άργος 51	1,0340	1,0375	
560	Μέθανα 51	1,0271	1,0303	
585	Καλαμάτα 51	1,0176	1,0202	
586	Καλαμάτα 52	1,0090	1,0095	
687	Ελευσίνα 51	1,0550	1,0587	
709	Μέγαρα 51	1,0415	1,0428	
712	Ρουφ 52	0,9941	0,9959	
876	Δομοκός 52	0,9900	1,0027	
884	Χαλκίδα 52	1,0305	1,0309	
920	Πάτρα 52	1,0980	1,0992	
924	Κόρινθος 52	1,0162	1,0209	
925	Άργος 52	1,0330	1,0369	
950	Μέγαρα 52	1,0615	1,0660	

Οι παραδοχές που παρουσιάζονται στον Πίν. 4.7 προέκυψαν από τη μελέτη [VNT06] του φαινομένου της σβέσης του νοτίου συστήματος. Η αύξηση της τιμής του στατισμού στις μονάδες του Νότου ανέκλυσε από την ανάγκη οι μονάδες αυτές να μη συμμετέχουν στη ρύθμιση φορτίου-συχνότητας κατά την προσομοίωση, όπως συνέβη και στο πραγματικό περιστατικό. Η διατήρηση της ίδιας παραδοχής στην προσομοίωση των σεναρίων που εξετάζονται παρακάτω προκαλεί την αυξημένη φόρτιση του συστήματος, εξαιτίας της μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ισχύος από το Βορρά προς το Νότο για την κάλυψη της ζήτησης που δεν μπορεί να ικανοποιηθεί από τοπική παραγωγή. Λόγω της μείωσης αυτής των περιθωρίων φόρτισης του συστήματος, δημιουργούνται δυσμενείς συνθήκες στο νότιο τμήμα του που αποτελεί την πιο ευάλωτη περιοχή για την εμφάνιση φαινομένων αστάθειας τάσης.

Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται οι θεωρούμενοι εφικτοί ρυθμοί μείωσης της ενεργού ισχύος στις γεννήτριες όπου εφαρμόζεται ο περιορισμός ρεύματος τυμπάνου. Ο ρυθμός μείωσης εξαρτάται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μονάδων (γεννήτρια, στρόβιλος κλπ.) και θεωρείται συνάρτηση του μεγέθους της εγκατεστημένης ισχύος του σταθμού. Οι αναγραφόμενες τιμές προέκυψαν από τη μέτρηση των πραγματικών ρυθμών μείωσης κατά την εξέλιξη του φαινομένου της σβέσης [VNT06].

Πίν. 4.7 Παραδοχές προσομοίωσης γεννητριών

ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ			
Τερματικός Ζυγός	Μονάδα	αμ/min	MW/min
337	Αλιβέρι 3	0,0342	3,42
338	Αλιβέρι 4	0,0342	3,42
659	Λαύριο 1	0,0330	6,00
664	Λαύριο 3	0,1188	3,30
667	Λαύριο 4	0,0330	11,88
674	Αγ. Γεώργιος 8	0,0438	3,30
675	Αγ. Γεώργιος 9	0,0600	4,38
ΣΤΑΤΙΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ			
Τερματικός Ζυγός	Μονάδα	R_g %	R_g % (νέα τιμή)
337	Αλιβέρι 3	5	100
338	Αλιβέρι 4	5	100
674	Αγ. Γεώργιος 8	5	100
675	Αγ. Γεώργιος 9	5	100
664	Λαύριο 1	5	100
659	Λαύριο 3	7,59	100
667	Λαύριο 4	5	100
573	Μεγαλόπολη 2	5	100
569	Μεγαλόπολη 3	5	100
575	Μεγαλόπολη 4	5	100
582	Λάδωνας 1	5	100
583	Λάδωνας 2	5	100

Πίν. 4.8 Παραδοχές προσομοίωσης φορτίων

Ενεργός Συνιστώσα	Άεργος συνιστώσα	r_p	r_Q
$P > 0$	$Q > 0$	0,5	0,5
$P > 0$	$Q < 0$	0,5	0
$P < 0$	$Q < 0$	0	0
$P < 0$	$Q > 0$	0	0
$P = 0$	$Q \neq 0$	0	0
Δε συμμετέχουν στην αύξηση τα εξής φορτία: βιομηχανικά, βοηθητικά γεννητριών, αιοικά, διασυνδέσεις			

Στον Πίν. 4.8 αναγράφονται οι θεωρούμενοι συντελεστές συμμετοχής r_p της ενεργού και r_Q της αέργου συνιστώσας κάθε τύπου φορτίου του συστήματος σε πιθανή αύξηση της ζήτησης. Οι συντελεστές αυτοί δηλώνουν το ποσοστό συμμετοχής των φορτίων στη συνολική αύξηση της ζήτησης, σύμφωνα με τις σχέσεις που δίνονται στην παράγραφο 3.2.5 του τρίτου κεφαλαίου.

Κατά την προσομοίωση των εξεταζόμενων σεναρίων γίνονται ακόμη οι εξής παραδοχές:

1. Τα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ εφαρμόζονται μόνο στους μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης των περιοχών της Θεσσαλίας, της Στερεάς Ελλάδας, της Αττικής και της Πελοποννήσου, οι οποίες αποτελούν τις πιο κρίσιμες περιοχές του Ελληνικού συστήματος για την πλειοψηφία των σεναρίων αστάθειας τάσης. Εκεί επικεντρώνεται το μεγαλύτερο μέρος της καταναλισκόμενης ισχύος, με αποτέλεσμα η ασταθής δράση των ΣΑΤΥΦ να επιβαρύνει καθοριστικά το σύστημα.
2. Λόγω της απαίτησης για πλήρη αποκατάσταση της ισχύος στα φορτία μέσω των ΣΑΤΥΦ, η νεκρή ζώνη ρύθμισης προσαρμόζεται έτσι ώστε το νέο κάτω όριο της $V_{2,νέο}^{min}$ να είναι ίσο με την αρχική

τάση V_2^0 (όπως αυτή προσδιορίστηκε από τον εκτιμητή κατάστασης), ενώ το εύρος ρύθμισης ΔV διατηρείται σταθερό. Δηλαδή:

$$V_{2,νέο}^{min} = V_2^0 \quad (4.2)$$

$$V_{2,νέο}^{max} = V_{2,νέο}^{min} + \Delta V \quad (4.3)$$

όπου $\Delta V = V_2^{max} - V_2^{min}$ και V_2^{min} , V_2^{max} είναι τα όρια της αρχικής νεκρής ζώνης ρύθμισης.

3. Η ίδια απαίτηση επέβαλε το κάτω όριο ρύθμισης r_{min} της λήψης των ΣΑΤΥΦ να αφεθεί ελεύθερο.
4. Ομοίως ελεύθερο έχει αφεθεί το κάτω όριο ρύθμισης r_{min} της λήψης των φανταστικών μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης που βρίσκονται πίσω από φορτία ΥΤ.
5. Στην περίπτωση των δυναμικών φορτίων, η αποκατάσταση της ισχύος στην αρχική ζήτηση γίνεται με μία ανοχή db ως προς αυτήν, δηλαδή θεωρείται νεκρή ζώνη ρύθμισης της ισχύος.

Όπως ειπώθηκε, η παραδοχή 2 έγινε με σκοπό την πλήρη αποκατάσταση της ισχύος στα φορτία που τροφοδοτούνται μέσω ΣΑΤΥΦ. Ουσιαστικά με την παραδοχή αυτή περιορίζονται οι απώλειες αέργου ισχύος στις αντιδράσεις σκεδάσεως στο δευτερεύον των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης.

Πράγματι λόγω της ύπαρξης της νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ είναι δυνατόν να εμφανίζονται αυξημένες απώλειες αέργου ισχύος στις αντιδράσεις σκεδάσεως των μετασχηματιστών [Kar05]. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τάση δευτερεύοντος δεν αποκαθίσταται κατά ανάγκη στην τιμή αναφοράς του ΣΑΤΥΦ, αλλά οπουδήποτε εντός της νεκρής ζώνης. Για παράδειγμα, έστω ότι μετά τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ η τάση δευτερεύοντος V_2 έχει αποκατασταθεί σε μία τιμή μικρότερη της τάσης αναφοράς V_2^0 , δηλαδή $V_2 < V_2^0$. Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα φορτίου I_2 είναι μεγαλύτερο από το ονομαστικό I_2^0 για την εξυπηρέτηση της ζήτησης, δηλαδή $I_2 > I_2^0$. Η αυξημένη ροή ρεύματος μέσω του μετασχηματιστή συνεπάγεται αυξημένες απώλειες αέργου ισχύος Q_c στην αντίδραση σκεδάσεως X_i :

$$Q_c = I_2^2 X_i > (I_2^0)^2 X_i = Q_c^0 \quad (4.4)$$

Οι απώλειες αυτές αθροιζόμενες για όλους τους μετασχηματιστές διανομής του συστήματος είναι δυνατόν να αποτελέσουν σημαντικό ανασταλτικό παράγοντα ως προς την αποκατάσταση του φορτίου κατά την προσομοίωση. Έτσι, για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού το κάτω όριο της νεκρής ζώνης ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ τίθεται ίσο με την αρχική τάση. Με το τρόπο αυτό κατά την εξέλιξη της προσομοίωσης οι τάσεις θα ισορροπούν τουλάχιστον στην τιμή της αρχικής τάσης με αποτέλεσμα οι απώλειες σκεδάσεως να κυμαίνονται πρακτικά στα αρχικά επίπεδα.

4.4.2 Σενάρια Προσομοίωσης

Στην παράγραφο αυτή ακολουθεί περιγραφή των σεναρίων που προσομοιώνονται με χρήση του προγράμματος WPSTAB για τη μελέτη της επίδρασης των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ στο Ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως αναφέρθηκε, τα σενάρια που εξετάζονται βασίζονται στο στιγμιότυπο ροής ισχύος που καταγράφηκε το πρωί της 12^{ης} Ιουλίου 2004, λίγες ώρες πριν από την κατάρρευση του νότιου συστήματος της χώρας. Η διαταραχή που προσομοιώνεται είναι η απώλεια της μονάδας Λαύριο 4. Η απώλεια αυτή θεωρείται η πιο κρίσιμη διαταραχή για τη δεδομένη κατάσταση του συστήματος και οδηγεί σε ολική κατάρρευση των τάσεων. Εξετάζονται δύο σενάρια:

Σενάριο I: Απώλεια μονάδας Λαύριο 4 με θεώρηση στατικών φορτίων

Στο σενάριο αυτό τα φορτία του συστήματος θεωρούνται στατικά, δηλαδή χωρίς μηχανισμό αυτορρύθμισης. Με τη θεώρηση αυτή για τα φορτία, το σύστημα οδηγείται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα μόνο από τη δυναμική των ΣΑΤΥΦ.

Σενάριο II: Απώλεια μονάδας Λαύριο 4 με θεώρηση δυναμικών φορτίων

Στο σενάριο αυτό τα φορτία του συστήματος θεωρούνται δυναμικής φύσης, δηλαδή διαθέτουν μηχανισμό αυτορρύθμισης ο οποίος εκδηλώνεται με μεταβολή της αγωγιμότητάς τους. Με τη θεώρηση αυτορρυθμιζόμενων φορτίων, το σύστημα οδηγείται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα από τη δυναμική των ΣΑΤΥΦ και των φορτίων. Σημειώνεται ότι για τις ανάγκες της μελέτης αυτής χρησιμοποιείται το μοντέλο φορτίου επαναφερόμενης ισχύος που αναπτύχθηκε σε αυτή τη διατριβή και περιγράφεται στο τρίτο κεφάλαιο.

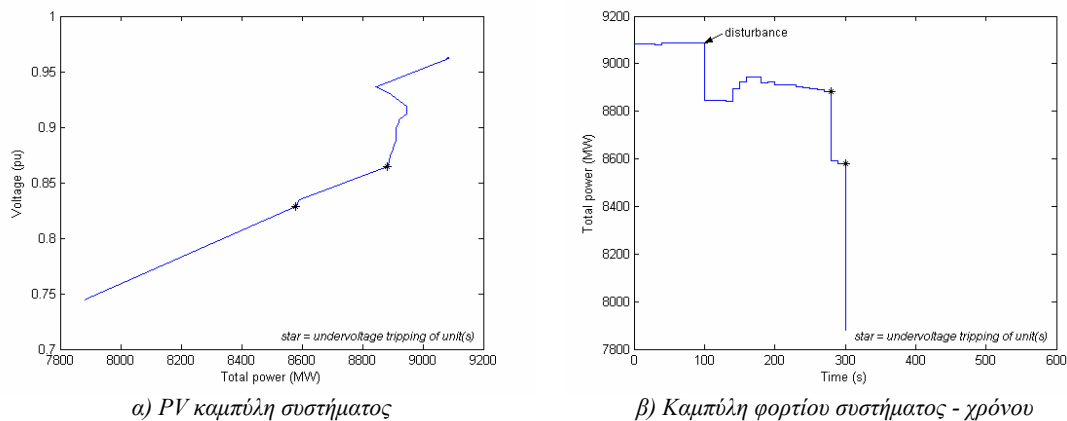
Στο βασικό σενάριο η προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος γίνεται χωρίς να εφαρμοστεί κανένα μέτρο προστασίας. Στη συνέχεια, με αφετηρία το βασικό σενάριο προσομοιώνεται η συμπεριφορά του συστήματος με εφαρμογή των εξεταζόμενων μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ. Τονίζεται ότι με την εφαρμογή των μέτρων αυτών δεν αναμένεται σταθεροποίηση του συστήματος (σε κανονικό σημείο λειτουργίας), καθώς δεν είναι δυνατόν να αποκατασταθεί μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας όταν υπάρχουν αυτορρυθμιζόμενα φορτία.

4.4.3 Προσομοίωση Σεναρίου I

Βασικό σενάριο

Στο αρχικό σημείο ($t = 0$) το συνολικό φορτίο του συστήματος ανέρχεται σε 9084 MW. Από το φορτίο αυτό τα 1374 MW αποτελούν βιομηχανικά φορτία ή βοηθητικά φορτία των μονάδων παραγωγής, ενώ τα υπόλοιπα 7710 MW αποτελούν φορτία τελικών καταναλωτών. Την χρονική στιγμή $t = 100$ s θεωρείται η απώλεια της μονάδας Λαύριο 4. Μετά την εμφάνιση της διαταραχής, το σύστημα καταρρέει εντός 200 s λόγω της αποσύνδεσης των παρακάτω μονάδων παραγωγής για λόγους ηλεκτρικής προστασίας από χαμηλή τάση (προστασία υποτάσεως): Λαύριο 3 ($t = 280$ s), Αλιβέρι 4, Λαύριο 1, Αγ. Γεώργιος 9 ($t = 300$ s).

Η καμπύλη PV του Σχ. 4.16α αποτυπώνει την τάση του ζυγού 150 kV στο Ρουφ συναρτήσει του συνολικού φορτίου του συστήματος. Στο Σχ. 4.16β παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση του συνολικού φορτίου. Και στις δυο περιπτώσεις η κατάρρευση είναι εμφανής μετά την αποσύνδεση των γεννητριών, η οποία υποδεικνύεται στα σχήματα με τους αστερίσκους.

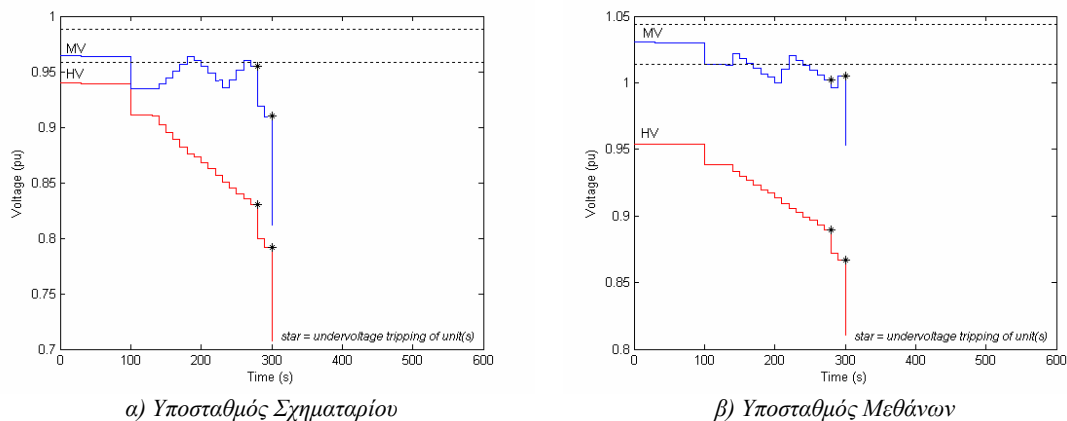


α) PV καμπύλη συστήματος

β) Καμπύλη φορτίου συστήματος - χρόνου

Σχ. 4.16 Συμπεριφορά συστήματος μέχρι την κατάρρευση

Στο Σχ. 4.17 φαίνεται η διακύμανση της τάσης πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης σε δύο αντιπροσωπευτικούς υποσταθμούς διανομής του συστήματος, τον υποσταθμό του Σχηματαρίου και των Μεθάνων. Στα διαγράμματα αυτά η τάση πρωτεύοντος (YT) χαρακτηρίζεται ως «HV», ενώ η τάση δευτερεύοντος (MT) ως «MV». Η ίδια σημειολογία θα χρησιμοποιηθεί σε όλα τα αντίστοιχα διαγράμματα που περιλαμβάνονται στη διατριβή.



α) Υποσταθμός Σχηματαρίου

β) Υποσταθμός Μεθάνων

Σχ. 4.17 Διακύμανση τάσεων (μέχρι την κατάρρευση) σε αντιπροσωπευτικούς υποσταθμούς

Σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης του βασικού σεναρίου, τα ΣΑΤΥΦ βρίσκονται σε κανονική λειτουργία και ρυθμίζουν την τάση δευτερεύοντος του μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης για την επαναφορά της εντός της νεκρής ζώνης. Η μη ύπαρξη μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας δεν επιτρέπει την αποκατάσταση της τάσης και της καταναλισκόμενης ισχύος στην αρχική ζήτηση, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται συνεχής μείωση των τάσεων (Σχ. 4.17) στο επίπεδο της μεταφοράς. Η σβέση του συστήματος προκαλείται με την αποσύνδεση των προαναφερόμενων μονάδων στο Νότο.

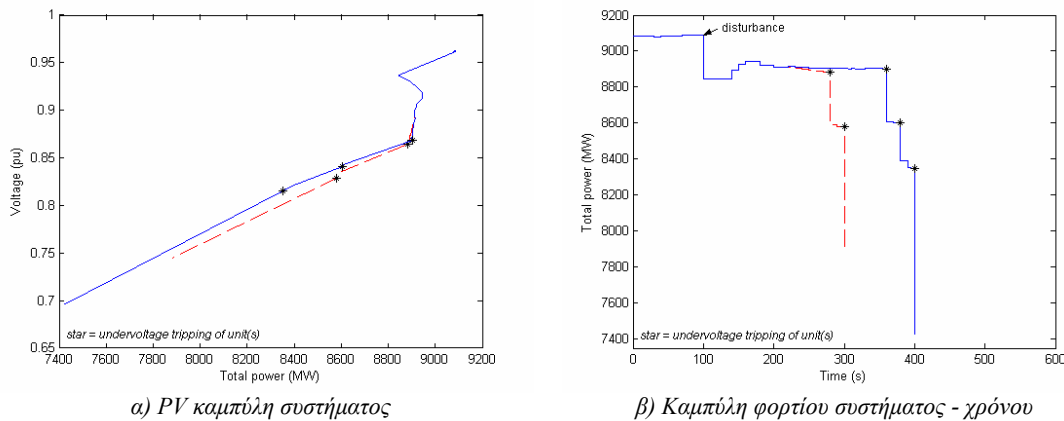
Απενεργοποίηση μηχανισμού αλλαγής λήψης ΣΑΤΥΦ

Αρχικά εξετάζεται η επίδραση του μέτρου της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ στη συμπεριφορά του συνολικού συστήματος. Οι τιμές των παραμέτρων εφαρμογής της μεθόδου φαίνονται στον Πίν. 4.9. Οι παράμετροι αυτές σχετίζονται με την υλοποίηση της μεθόδου όπως αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.1.

Πίν. 4.9 Παράμετροι εφαρμογής

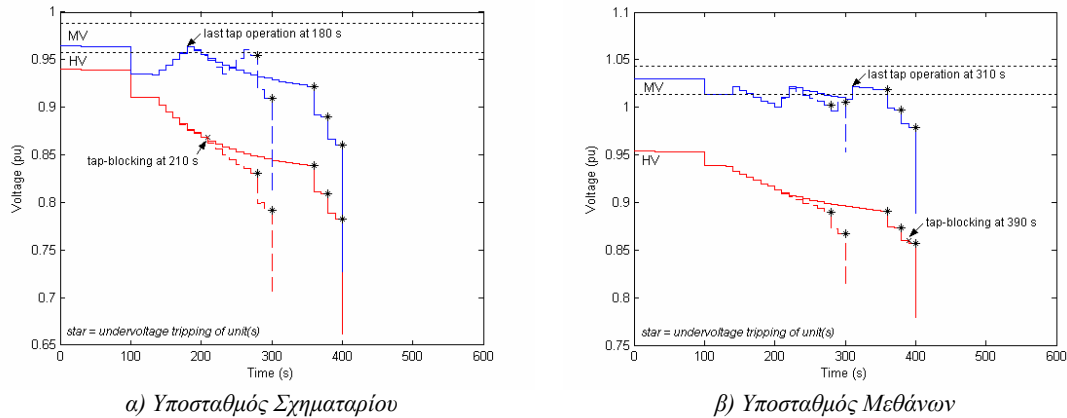
V_{thres}	=	0,87 αμ
ε	=	10^{-3} αμ
t_{del}	=	0

Όπως είδαμε στο βασικό σενάριο, μετά την απώλεια της γεννήτριας Λαύριο 4 ($t = 100$ s) το σύστημα καταρρέει εντός 200 s. Οι διακεκομμένες καμπύλες στα σχήματα που ακολουθούν αντιστοιχούν στο βασικό σενάριο, δηλαδή στη μη λήψη κάποιου μέτρου. Με την εφαρμογή του μέτρου της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ (Σχ. 4.18) το σύστημα δεν επιβιώνει της διαταραχής, αλλά επιτυγχάνεται επιβράδυνση της κατάρρευσης για περίπου 100 s. Το κέρδος που αποκομίζεται είναι χρόνος για τη λήψη επιπρόσθετων μέτρων (π.χ. αποκοπή φορτίου), ο οποίος αν και ελάχιστος στο δεδομένο σενάριο σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να είναι αρκετός για την επιβίωση του συστήματος. Η σβέση του συστήματος προκαλείται τελικά από την αποσύνδεση των παρακάτω μονάδων παραγωγής λόγω ενεργοποίησης της προστασίας υποτάσεως: Λαύριο 3 ($t = 360$ s), Λαύριο 1 ($t = 380$ s), Αλιβέρι 3-4, Αγ. Γεώργιος 8-9, Στράτος II, Καστράκι 1 ($t = 400$ s).



Σχ. 4.18 Συμπεριφορά συστήματος με απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής λήψης των ΣΑΤΥΦ

Στο Σχ. 4.19 φαίνεται η διακύμανση των τάσεων στους υποσταθμούς του Σχηματαρίου και των Μεθάνων. Στον υποσταθμό του Σχηματαρίου (Σχ. 4.19α) αμέσως μετά την εμφάνιση της διαταραχής ($t = 100$ s) η τάση δευτερεύοντος του μετασχηματιστή διανομής βρίσκεται έξω από τη νεκρή ζώνη ρύθμισης. Μετά από αρχική χρονική καθυστέρηση T_{d1} το ΣΑΤΥΦ αρχίζει να ρυθμίζει την τάση δευτερεύοντος μέχρι τελικά αυτή να αποκατασταθεί ($t = 180$ s) εντός της νεκρής ζώνης. Λόγω της δράσης των ΣΑΤΥΦ στο υπόλοιπο σύστημα, τη χρονική στιγμή $t = 200$ s η τάση δευτερεύοντος υποβιβάζεται εκ νέου πέραν της νεκρής ζώνης ρύθμισης. Ο μετρητής χρόνου του ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται πάλι και η αλλαγή της λήψης πρόκειται να γίνει μετά από αρχική καθυστέρηση T_{d1} . Όμως τη χρονική στιγμή $t = 210$ s η τάση δικτύου υποβιβάζεται πέραν του κατωφλίου $V_{thres}-\varepsilon$, με αποτέλεσμα να εφαρμοστεί χωρίς καθυστέρηση ($t_{del} = 0$) η απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης του ΣΑΤΥΦ. Η μείωση των τάσεων εξακολουθεί λόγω της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ στο υπόλοιπο σύστημα για την αποκατάσταση του φορτίου.



α) Υποσταθμός Σχηματαρίου

β) Υποσταθμός Μεθάνων

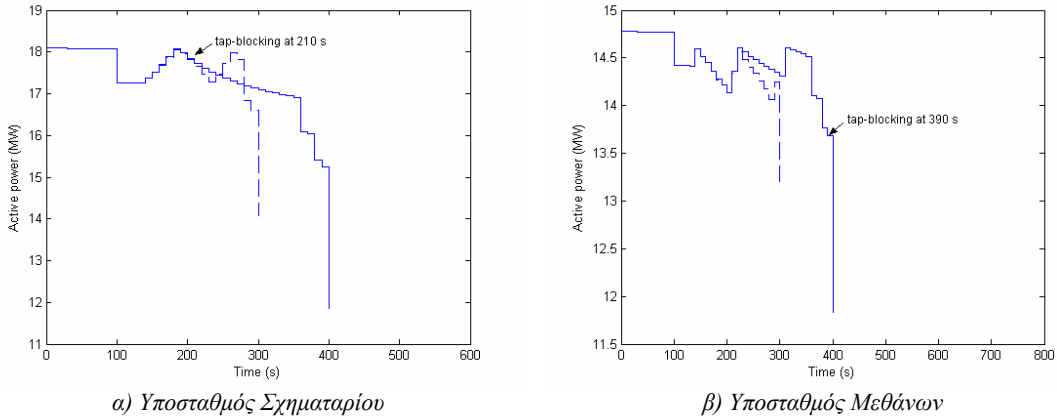
Σχ. 4.19 Χρονική διακύμανση τάσεων με απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής λήψης των ΣΑΤΥΦ

Στην περίπτωση του υποσταθμού των Μεθάνων (Σχ. 4.19β), η απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης του ΣΑΤΥΦ πραγματοποιείται λίγο πριν τη σβέση του συστήματος και ουσιαστικά δεν εφαρμόζεται καθόλου. Εδώ το μέτρο δεν έχει καμία επίδραση στο φορτίο του υποσταθμού. Το σημαντικό αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ είναι ο περιορισμός στη μείωση των τάσεων στο σύστημα μεταφοράς και κατά συνέπεια επιβράδυνση της κατάρρευσης.

Σχετικά με την επίδραση του μέτρου στην καταναλισκόμενη ισχύ, παρατηρείται ότι στους περισσότερους υποσταθμούς διανομής η εφαρμογή του γίνεται ενώ υπάρχει ακόμα η δυνατότητα αποκατάστασης της καταναλισκόμενης ισχύος μέσω της λειτουργίας των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης με τους οποίους είναι εξοπλισμένοι. Αυτό μοιάζει ανεπιθύμητο, καθώς φαινομενικά αντικρούει τη θεωρητική προσέγγιση για την εφαρμογή της μεθόδου που προέκυψε από τη μελέτη του μικρού ηλεκτρικού συστήματος του Σχ. 4.13. Σύμφωνα με αυτήν, το μέτρο θα πρέπει να λαμβάνεται όταν γίνεται αντιληπτή η ασταθής λειτουργία του ΣΑΤΥΦ με την έννοια της παραβίασης της συνθήκης ευστάθειας (1.30). Ωστόσο, ενώ αυτό είναι απόλυτα ακριβές στην περίπτωση του ενός φορτίου, σε ένα μεγάλο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας η αλληλεπίδραση της λειτουργίας των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης μπορεί να αποδειχθεί ασταθής για το συνολικό σύστημα, χωρίς αυτό να αποτυπώνεται στη λειτουργία κάποιου μεμονωμένου ΣΑΤΥΦ. Για παράδειγμα, η ευσταθής λειτουργία ενός ΣΑΤΥΦ μπορεί να οδηγήσει σε ασταθή λειτουργία ενός γειτονικού.

Πράγματι, στην ασταθή περιοχή λειτουργίας ενός συστήματος πολλών ζυγών, η δράση ενός ΣΑΤΥΦ μπορεί να επαναφέρει την τάση (και την ισχύ) στο ζυγό που είναι συνδεδεμένος, αλλά μειώνει περισσότερο την ισχύ των άλλων φορτίων. Αυτό φαίνεται στο Σχ. 4.18β όπου το συνολικό φορτίο του συστήματος είναι μεγαλύτερο μετά την απενεργοποίηση ορισμένων ΣΑΤΥΦ. Επομένως η αύξηση της τάσης δευτερεύοντος δεν είναι ικανό κριτήριο ευστάθειας. Τίθεται λοιπόν το θέμα της μελέτης της αλληλεπίδρασης των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης, το οποίο όμως δεν θα μας απασχολήσει στη διατριβή αυτή.

Στο Σχ. 4.20 φαίνεται η μεταβολή της καταναλισκόμενης ισχύος στους υποσταθμούς του Σχηματαρίου και των Μεθάνων. Στο Σενάριο I τα φορτία θεωρούνται στατικά οπότε η αποκατάσταση της ισχύος γίνεται μέσω των ΣΑΤΥΦ και μόνο μέχρι τη χρονική στιγμή που ο μηχανισμός αλλαγής της λήψης απενεργοποιείται. Σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως, στους ζυγούς όπου εφαρμόζεται το μέτρο προκαλείται μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος, ενώ θα ήταν δυνατόν να υπάρξει περαιτέρω αποκατάσταση της ισχύος στους συγκεκριμένους υποσταθμούς. Ωστόσο, όπως είπαμε και νωρίτερα, αυτό γίνεται προς όφελος της αποκατάστασης του συνολικού φορτίου του συστήματος (Σχ. 4.18β και Σχ. 4.20β).



α) Υποσταθμός Σχηματαρίου β) Υποσταθμός Μεθάνων
Σχ. 4.20 Χρονική διακύμανση καταναλισκόμενης ισχύος με απενεργοποίηση των ΣΑΤΥΦ

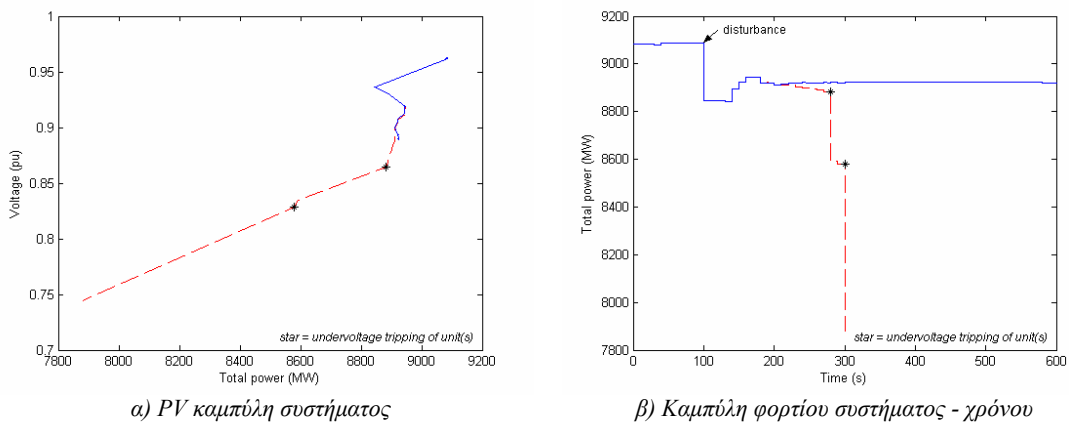
Μείωση τάσης αναφοράς ΣΑΤΥΦ

Το επόμενο μέτρο που εξετάζεται είναι αυτό της μείωσης της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ. Οι τιμές των παραμέτρων εφαρμογής της μεθόδου φαίνονται στον Πίν. 4.10. Οι παράμετροι αυτές σχετίζονται με την υλοποίηση της μεθόδου όπως αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.2.

Πίν. 4.10 Παράμετροι εφαρμογής

V_{thres}	=	0,87 αμ
ε	=	10^{-3} αμ
ΔV_2^0	=	10%
t_{del}	=	0

Όπως φαίνεται στο Σχ. 4.21, το σύστημα με εφαρμογή του μέτρου της μείωσης της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ επιβιώνει της θεωρούμενης διαταραχής και διατηρείται σε κατάσταση ισορροπίας ικανοποιώντας συνολικό φορτίο 8921 MW. Σε σχέση με την αρχική ζήτηση παραμένει ένα φορτίο 163 MW που δεν εξυπηρετείται λόγω της έμμεσης αποκοπής που πραγματοποιείται στο φορτίο και των ορίων ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ, ωστόσο η κατάρρευση έχει αποσοβηθεί και υπάρχει χρόνος για τη λήψη περαιτέρω μέτρων με σκοπό την αποκατάσταση της αρχικής ζήτησης ή την πιθανή αποκλιμάκωση των μηχανισμών αστάθειας.



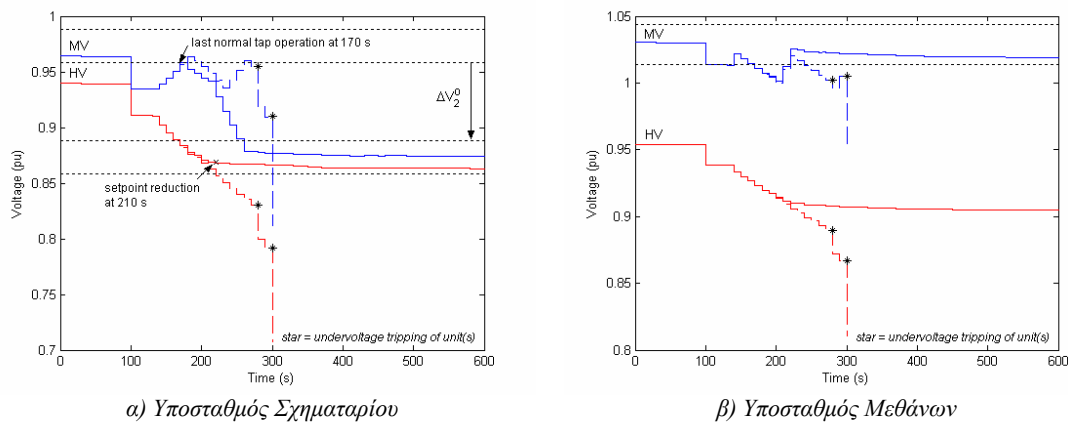
α) PV καμπύλη συστήματος β) Καμπύλη φορτίου συστήματος - χρόνου
Σχ. 4.21 Συμπεριφορά συστήματος με μείωση της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ

Στο Σχ. 4.22 φαίνεται η διακύμανση των τάσεων στους υποσταθμούς του Σχηματαρίου και των Μεθάνων. Στον υποσταθμό του Σχηματαρίου (Σχ. 4.22α) αμέσως μετά την εμφάνιση της διαταραχής ($t = 100$ s) η τάση δευτερεύοντος βρίσκεται έξω από τη νεκρή ζώνη ρύθμισης. Το ΣΑΤΥΦ ευρισκόμενο σε κανονική λειτουργία προσπαθεί να αποκαταστήσει την τάση εντός της νεκρής ζώνης και το πραγματοποιεί τη χρονική στιγμή $t = 170$ s. Όμως η αποκατάσταση είναι οριακή με αποτέλεσμα αμέσως μετά ($t = 180$ s) η τάση δευτερεύοντος να βρεθεί εκ νέου εκτός των ορίων της νεκρής ζώνης. Ο

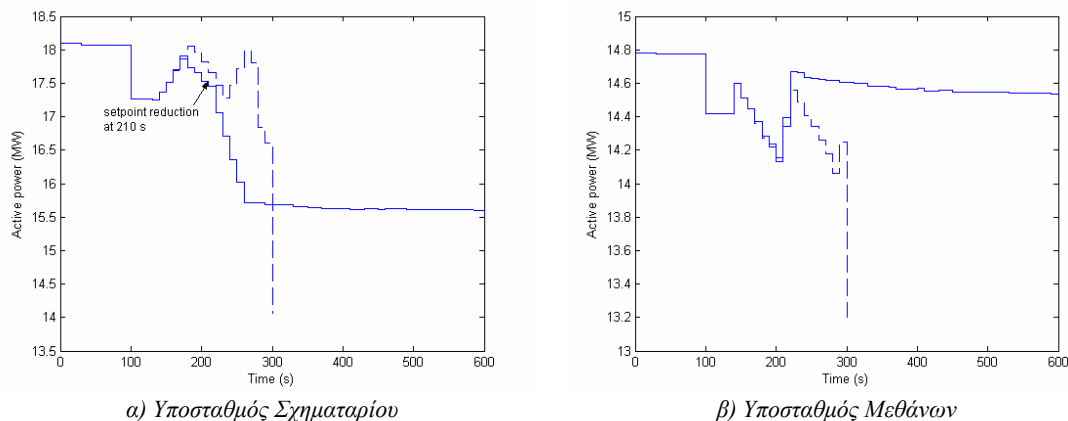
μετρητής χρόνου του ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται, αλλά δεν πραγματοποιείται αλλαγή της λήψης καθώς τη χρονική στιγμή $t = 210$ s η τάση δικτύου υποβιβάζεται πέραν του κατωφλίου $V_{thres-E}$ και εφαρμόζεται χωρίς καθυστέρηση ($t_{del} = 0$) η μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ κατά το επιθυμητό ποσοστό ΔV_2^0 . Η μείωση της τάσης αναφοράς οδηγεί σε ρύθμιση της τάσης δευτερεύοντος ως προς τη νέα χαμηλότερη τιμή αναφοράς, ωφελώντας κατά αυτόν τον τρόπο την τάση στην πλευρά του συστήματος μεταφοράς. Όταν η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εισέλθει στη μειωμένη νεκρή ζώνη ρύθμισης επέρχεται ισορροπία των τάσεων και δεν χρειάζεται νέα ρύθμιση.

Στον υποσταθμό των Μεθάνων (Σχ. 4.22β) δεν προκύπτει ανάγκη εφαρμογής του μέτρου. Αυτό συμβαίνει στο σύνολο των υποσταθμών διανομής της Πελοποννήσου, υποδεικνύοντας ότι η εφαρμογή του μέτρου σε ορισμένα από τα ΣΑΤΥΦ των υπολοίπων τριών περισσότερο θιγόμενων περιοχών (Αττική, Στερεά Ελλάδα και Θεσσαλία) είναι τόσο ευεργετική, ώστε οι τάσεις στην Πελοπόννησο να διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα. Το γεγονός αυτό επιδεικνύει επίσης το σημαντικό βαθμό προσαρμοστικότητας της μεθόδου: με την επιλογή μιας κοινής τάσης κατωφλίου V_{thres} η απώλεια της μονάδας Λαύριο 4 ενεργοποιεί την προστασία μόνο στα ΣΑΤΥΦ που βρίσκονται πιο κοντά στο πρόβλημα.

Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι ότι σε όλους τους υποσταθμούς η τάση σταθεροποιείται εντός της νεκρής ζώνης ρύθμισης (αρχικής ή μειωμένης). Σε όσους υποσταθμούς δεν εφαρμόστηκε μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ (π.χ. στα Μέθανοι), η αποκατάσταση της ισχύος υπήρξε η μέγιστη δυνατή. Στις περιπτώσεις όπου εφαρμόστηκε το μέτρο, αυτό συνέβη ενώ τα ΣΑΤΥΦ ρύθμιζαν ευσταθώς την τάση στον ελεγχόμενο ζυγό, με αποτέλεσμα τη μείωση του καταναλισκόμενου φορτίου (Σχ. 4.23α) κατά τη στιγμή που αυτό θα μπορούσε να αποκατασταθεί. Ωστόσο, πρόκειται για ζήτημα κατάλληλης επιλογής της τιμής κατωφλίου τάσης V_{thres} υπό το πρίσμα της αλληλεπίδρασης των ΣΑΤΥΦ και εις όφελος της αποκατάστασης του συνολικού φορτίου του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση η εφαρμογή του μέτρου επιφέρει έμμεση αποκοπή φορτίου, η οποία εξαρτάται από το ποσοστό μείωσης ΔV_2^0 της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ.



Σχ. 4.22 Χρονική διακύμανση τάσεων με μείωση της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ



Σχ. 4.23 Χρονική διακύμανση καταναλισκόμενης ισχύος με μείωση της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ

Κλειδώμα λήψης ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση

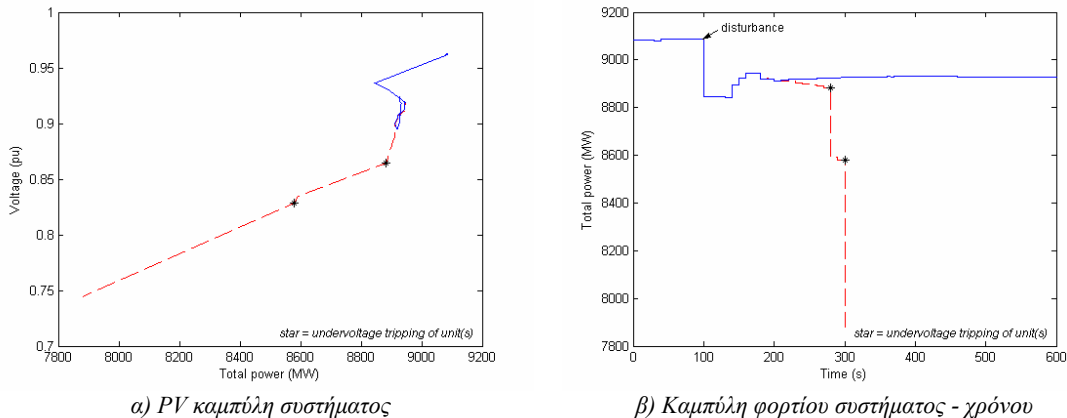
Οι παράμετροι εφαρμογής της μεθόδου κλειδώματος της λήψης του ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση φαίνονται στον Πίν. 4.11. Οι παράμετροι αυτές σχετίζονται με την υλοποίηση της μεθόδου όπως αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.3. Η ενεργοποίηση του μέτρου γίνεται με χρονική καθυστέρηση t_{del} , εφόσον πληρούνται οι συνθήκες παραβίασης του κατωφλίου τάσης $V_{thres}-\varepsilon$, οπότε ο μηχανισμός του ΣΑΤΥΦ προβαίνει σε συνεχείς αλλαγές της λήψης (ανεξάρτητα από το αν εξακολουθούν οι συνθήκες παραβίασης του κατωφλίου τάσης) μέχρι τελικά ο λόγος μετασχηματισμού να κλειδώσει στην προκαθορισμένη τιμή r_{lock} . Μετά την ενεργοποίηση του μέτρου οι αλλαγές της λήψης γίνονται με σταθερή χρονική καθυστέρηση T_{d2} .

Πίν. 4.11 Παράμετροι εφαρμογής

V_{thres}	=	0,87 αμ
ε	=	10^{-3} αμ
r_{lock}	=	1,075 αμ
t_{del}	=	10 s

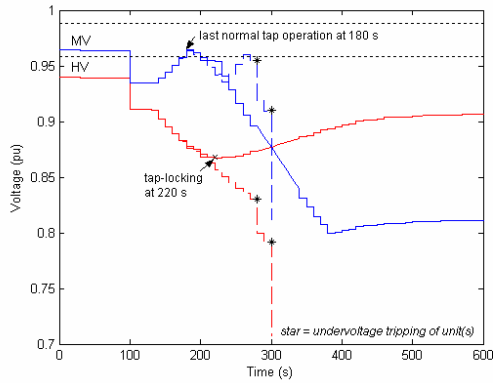
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η τιμή του λόγου r_{lock} συμπίπτει με το άνω όριο ρύθμισης r_{max} των περισσοτέρων ΣΑΤΥΦ του συστήματος. Η επιλογή αυτή έγινε με σκοπό τη μέγιστη ενίσχυση των τάσεων στο σύστημα της μεταφοράς και κατά συνέπεια την ελαχιστοποίηση των απωλειών αέργου ισχύος στο δίκτυο, παράγοντες οι οποίοι συμβάλλουν θετικά στη διαδικασία αποκατάστασης του συνολικού φορτίου του συστήματος.

Τελικά στο σημείο λειτουργίας του συστήματος που προκύπτει μετά την εφαρμογή του μέτρου κλειδώματος της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση (Σχ. 4.24), το καταναλισκόμενο φορτίο ανέρχεται σε 8925 MW, δηλαδή υπάρχει ένα μη εξυπηρετηθέν φορτίο ίσο με 159 MW σε σχέση με την αρχική ζήτηση που οφείλεται στην έμμεση αποκοπή του φορτίου και στα όρια ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ. Παρατηρούμε ότι η αποκατάσταση της ισχύος κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με αυτή που επιτεύχθηκε με την εφαρμογή του μέτρου μείωσης της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή το προφίλ των τάσεων στο σύστημα της μεταφοράς είναι αρκετά βελτιωμένο.

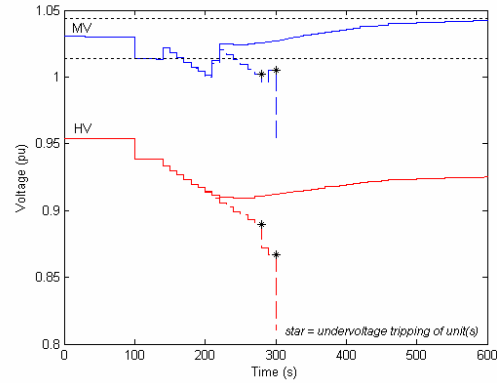


Σχ. 4.24 Συμπεριφορά συστήματος με κλειδώμα της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση

Στο Σχ. 4.25 φαίνεται η διακύμανση των τάσεων στους υποσταθμούς του Σχηματαρίου και των Μεθάνων. Στον υποσταθμό του Σχηματαρίου (Σχ. 4.25α) το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζει αρχικά την τάση δευτερεύοντος. Την χρονική στιγμή $t = 180$ s πραγματοποιείται η τελευταία αλλαγή της λήψης του ΣΑΤΥΦ σε κανονική λειτουργία, με την τάση δευτερεύοντος να έχει αποκατασταθεί εντός της νεκρής ζώνης. Ωστόσο, λόγω της λειτουργίας των υπόλοιπων ΣΑΤΥΦ του συστήματος η τάση εξέρχεται εκ νέου της νεκρής ζώνης. Η επόμενη αλλαγή της λήψης δεν πραγματοποιείται, γιατί τη χρονική στιγμή $t = 220$ s η τάση δικτύου υποβιβάζεται πέραν του κατωφλίου $V_{thres}-\varepsilon$, με αποτέλεσμα να εφαρμοστεί με καθυστέρηση t_{del} η ενεργοποίηση του μέτρου κλειδώματος της λήψης. Ακολουθούν με σταθερή καθυστέρηση T_{d2} αλλαγές στη λήψη του ΣΑΤΥΦ μέχρι αυτή να κλειδώσει στην προκαθορισμένη θέση r_{lock} . Η διαδικασία αυτή θα ολοκληρωθεί ανεξάρτητα από το αν η τάση πρωτεύοντος επανέλθει σε τιμή μεγαλύτερη από την τιμή κατωφλίου.

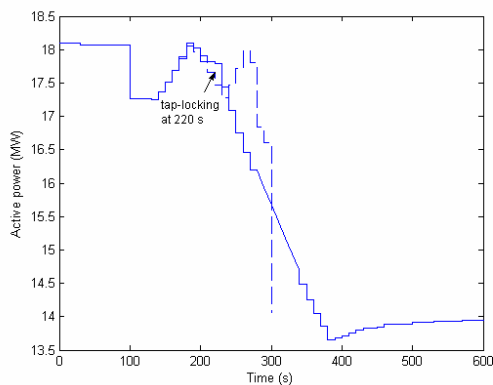


α) Υποσταθμός Σχηματαρίου

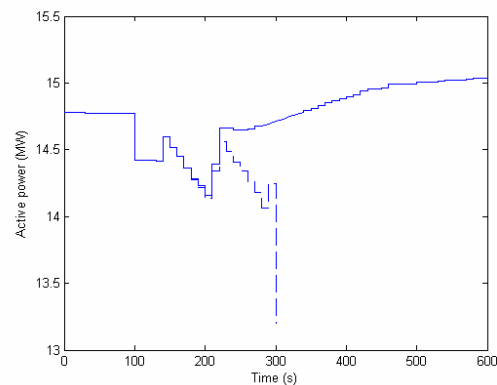


β) Υποσταθμός Μεθάνων

Σχ. 4.25 Χρονική διακύμανση τάσεων με κλείδωμα της λήψης των ΣΑΤΥΦ



α) Υποσταθμός Σχηματαρίου



β) Υποσταθμός Μεθάνων

Σχ. 4.26 Χρονική διακύμανση καταναλισκόμενης ισχύος με κλείδωμα της λήψης των ΣΑΤΥΦ

Αμέσως μετά την εφαρμογή της μεθόδου και μέχρι το κλείδωμα της λήψης στην προκαθορισμένη θέση, παρατηρούμε σημαντική αύξηση της τάσης πρωτεύοντος στους μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης που συμμετέχουν στον έλεγχο. Ωστόσο, ακόμα και σε υποσταθμούς όπου δεν εφαρμόστηκε το μέτρο (Σχ. 4.25β), παρατηρείται αύξηση της τάσης δικτύου λόγω της ενίσχυσης των τάσεων στους ζυγούς των γειτονικών περιοχών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η εφαρμογή του μέτρου στα ΣΑΤΥΦ των περιοχών της Αττικής, της Στερεάς Ελλάδας και της Θεσσαλίας είναι αρκετή, ώστε οι τάσεις στην Πελοπόννησο να διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα και κανένα ΣΑΤΥΦ της περιοχής να μην περνά σε έλεγχο εκτάκτου ανάγκης.

Εκτός λοιπόν από την αναχαίτιση της κατάρρευσης, η εφαρμογή του μέτρου συμβάλλει στην αποκατάσταση των τάσεων του συστήματος μεταφοράς σε κανονικά επίπεδα λειτουργίας. Αυτό όμως γίνεται εις βάρος των τάσεων στο σύστημα της διανομής και ταυτόχρονα εις βάρος της καταναλισκόμενης ισχύος, επειδή η εφαρμογή του μέτρου γίνεται όσο ακόμα τα ΣΑΤΥΦ μπορούν να αποκαταστήσουν την ισχύ στο φορτίο τους. Ωστόσο λόγω της αντιμετώπισης της ασταθούς αλληλεπίδρασης των ΣΑΤΥΦ το συνολικό αποτέλεσμα είναι θετικό για το σύστημα.

Εισάγεται επομένως μία μείωση του καταναλισκόμενου φορτίου στους ζυγούς όπου εφαρμόζεται ο έλεγχος του ΣΑΤΥΦ, η οποία όμως είναι επιθυμητή καθώς το κόστος από ενδεχόμενη κατάρρευση θα ήταν οδυνηρότερο για τους καταναλωτές προκαλώντας την οριστική αποσύνδεσή τους από το σύστημα. Η λήψη περαιτέρω μέτρων προστασίας θα επιδιώξει την πλήρη αποκατάσταση των τάσεων και του φορτίου.

Η μείωση του φορτίου στον υποσταθμό του Σχηματαρίου παρουσιάζεται στο Σχ. 4.26α και οφείλεται στη συνεχόμενη αύξηση της θέσης της λήψης. Η μείωση αυτή περιορίζεται εμφανώς όταν η λήψη φτάσει στην επιθυμητή θέση r_{lock} . Στην περίπτωση των Μεθάνων (Σχ. 4.26β), όπου δεν εφαρμόζεται το μέτρο, η αποκατάσταση της ισχύος πέραν της αρχικής ζήτησης οφείλεται στη δράση του ΣΑΤΥΦ αλλά και στην αύξηση της τάσης των γειτονικών ζυγών.

Αντιστροφή λογικής ελέγχου ΣΑΤΥΦ

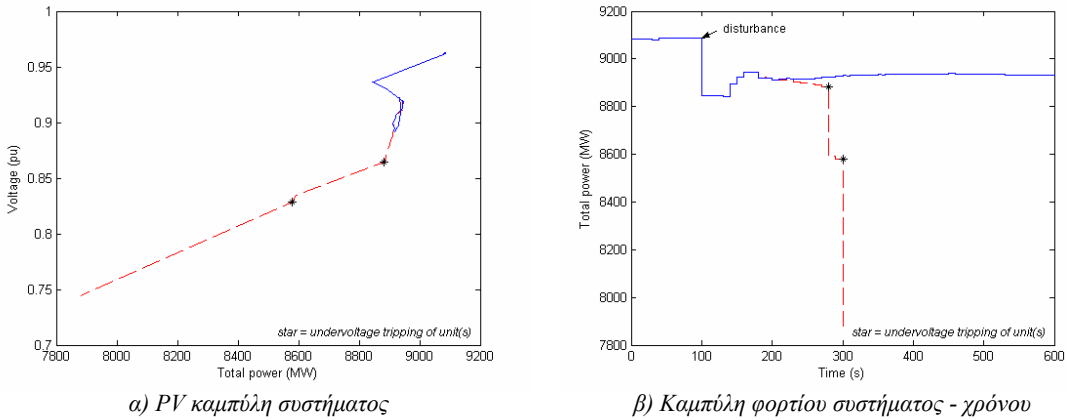
Για το μέτρο της αντιστροφής της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ ισχύουν οι τιμές των παραμέτρων εφαρμογής που φαίνονται στον Πίν. 4.12. Οι παράμετροι αυτές σχετίζονται με την υλοποίηση της μεθόδου όπως αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.4. Τονίζεται ότι κατά την αντιστροφή λειτουργία του ΣΑΤΥΦ, για την αλλαγή της λήψης ισχύουν οι δύο χρονικές καθυστερήσεις T_{d1} και T_{d2} που ισχύουν και κατά την κανονική λειτουργία του.

Πίν. 4.12 Παράμετροι εφαρμογής

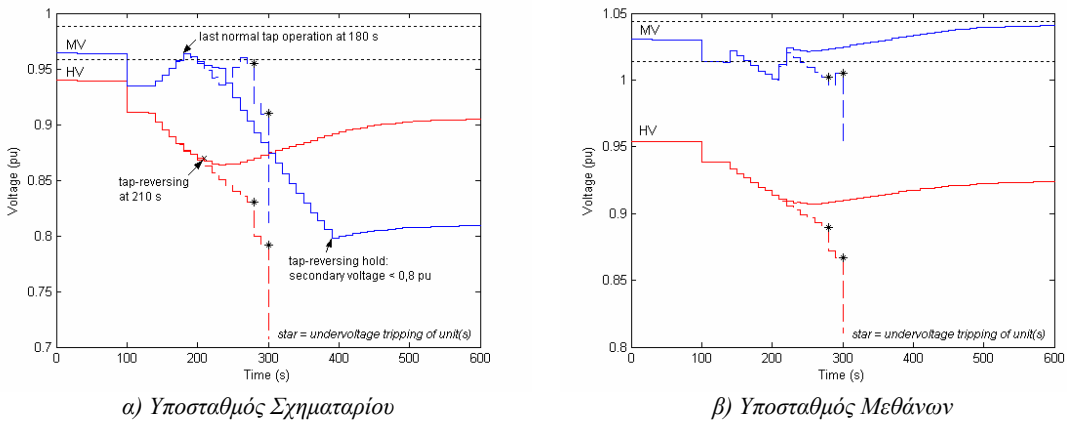
V_L	=	0,87 αμ
V_H	=	1,00 αμ
V_B	=	0,80 αμ
c	=	0,02 αμ
e	=	0,03 αμ

Με την εφαρμογή του μέτρου της αντιστροφής της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ το σύστημα επιβιώνει της απώλειας της μονάδας Λαύριο 4 και διατηρείται σε κατάσταση ισορροπίας εξυπηρετώντας φορτίο 8932 MW (Σχ. 4.27). Η αποκατάσταση της ισχύος ως προς την κατανάλωση στο αρχικό σημείο λειτουργίας είναι η μεγαλύτερη, συγκρινόμενη με αυτή που επιτεύχθηκε από την εφαρμογή των άλλων μεθόδων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ, αλλά πρακτικά κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα. Το μη εξυπηρετηθέν φορτίο ανέρχεται σε 152 MW και οφείλεται στη συντελούμενη αποκοπή φορτίου και στα όρια ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ.

Λόγω της ενίσχυσης των τάσεων του συστήματος μεταφοράς στην οποία αποσκοπεί, η μέθοδος αντιστροφής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ παρουσιάζει ομοιότητες με τη μέθοδο κλειδώματος της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση. Το πλεονέκτημα ωστόσο της αντιστροφής του ελέγχου είναι ότι η επαναφορά των τάσεων μεταφοράς σε κανονικά επίπεδα λειτουργίας γίνεται ελέγχοντας παράλληλα τις τάσεις στο σύστημα της διανομής ώστε να μην υποβιβαστούν σε εξαιρετικά χαμηλό επίπεδο.



Σχ. 4.27 Συμπεριφορά συστήματος με αντιστροφή της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ



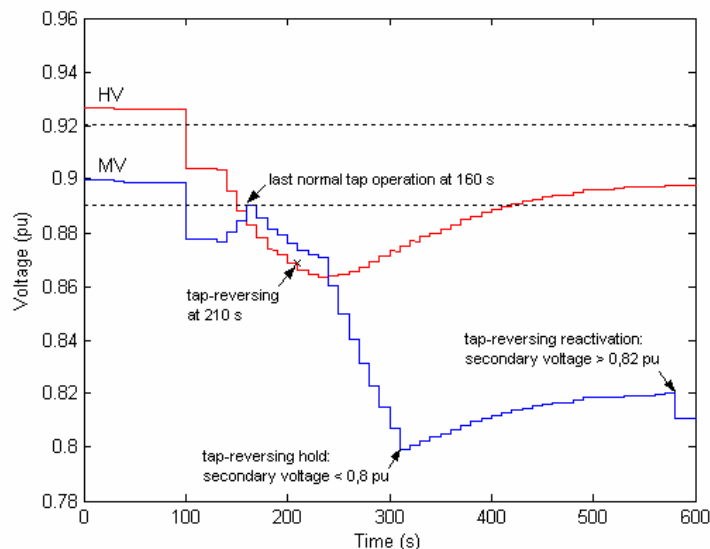
Σχ. 4.28 Χρονική διακύμανση τάσεων με αντιστροφή της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ

Στο Σχ. 4.28 φαίνεται η διακύμανση των τάσεων στους υποσταθμούς του Σχηματαρίου και των Μεθάνων. Στον υποσταθμό του Σχηματαρίου (Σχ. 4.28α) το ΣΑΤΥΦ ευρισκόμενο σε κανονική λειτουργία προσπαθεί να αποκαταστήσει την τάση δευτερεύοντος εντός της νεκρής ζώνης και το πραγματοποιεί τη χρονική στιγμή $t = 180$ s. Λόγω όμως της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ στο υπόλοιπο σύστημα, η τάση φορτίου εξακολουθεί να μειώνεται μέχρι τελικά να υποβιβαστεί εκ νέου πέραν της νεκρής ζώνης τη χρονική στιγμή $t = 210$ s. Την ίδια χρονική στιγμή ($t = 210$ s) η τάση πρωτεύοντος υποβιβάζεται πέραν του κατωφλίου V_L , με αποτέλεσμα να αντιστραφεί η λογική ελέγχου του ΣΑΤΥΦ. Πλέον ρυθμιζόμενη τάση είναι η τάση πρωτεύοντος. Μετά από χρονική καθυστέρηση T_{d1} εφαρμόζεται η αρχική αλλαγή της λήψης σε αντίστροφη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ. Ακολουθούν ανά χρονικά διαστήματα T_{d2} συνεχείς αλλαγές της λήψης καθώς η τάση δικτύου δεν υπερβαίνει την τιμή $V_L + e$. Την χρονική στιγμή $t = 390$ s η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή πέφτει κάτω από την τιμή V_B , οπότε ο μηχανισμός αλλαγής της λήψης απενεργοποιείται για την αποτροπή περαιτέρω μείωσης της τάσης δευτερεύοντος σε τιμές απαγορευτικές για τους καταναλωτές της διανομής.

Το ΣΑΤΥΦ θα επανέλθει σε κανονική λειτουργία ρυθμίζοντας ξανά την τάση φορτίου αν και μόνο αν η τάση δικτύου κατά την αντίστροφη λειτουργία υπερβεί την τιμή V_H . Στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτό δεν συμβαίνει και το ΣΑΤΥΦ μετά την αρχική ενεργοποίηση της μεθόδου βρίσκεται πάντα σε κατάσταση αντιστρόφου ελέγχου. Παρατηρούμε τη συνεχή αύξηση της τάσης δικτύου ακόμη και μετά την απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης του ΣΑΤΥΦ λόγω χαμηλού επιπέδου τάσης φορτίου ($V_2 < V_B$). Τελικά η τάση δικτύου ισορροπεί στην τιμή 0,906 αμ, δηλαδή πάνω από την επιθυμητή τιμή ρύθμισης της τάσης πρωτεύοντος ($V_L + e = 0,9$ αμ).

Στον υποσταθμό των Μεθάνων (Σχ. 4.28β) παρά το γεγονός ότι δεν πραγματοποιείται αντιστροφή ελέγχου στο ΣΑΤΥΦ, οι τάσεις ανυψώνονται εξαιτίας της ανύψωσης των τάσεων του συστήματος μεταφοράς. Μάλιστα η ενίσχυση των τάσεων υπήρξε τέτοια, ώστε δεν κατέστη αναγκαίος ο αντίστροφος έλεγχος σε κανένα ΣΑΤΥΦ της Πελοποννήσου.

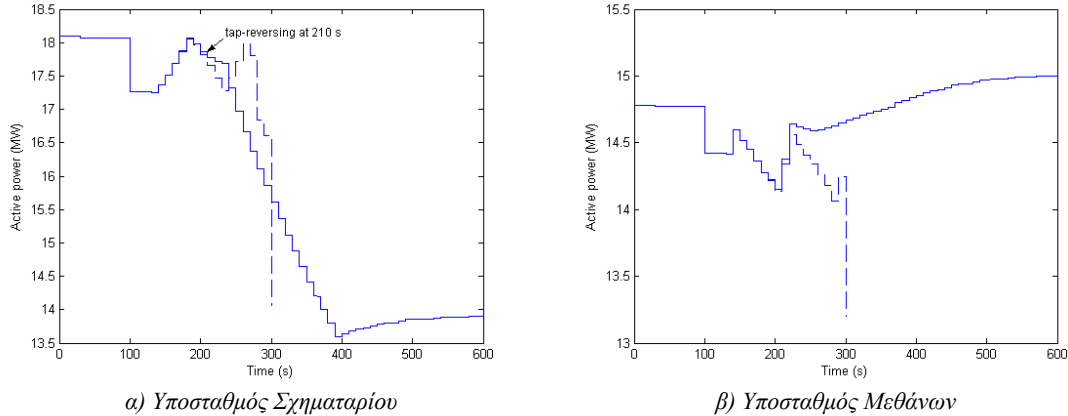
Στο Σχ. 4.29 απεικονίζεται η τάση στον υποσταθμό διανομής του Αχλαδιού. Το ΣΑΤΥΦ περνά σε αντίστροφο έλεγχο τη χρονική στιγμή $t = 210$ s και παραμένει στην κατάσταση αυτή μέχρι ($t = 300$ s) η τάση δευτερεύοντος να μειωθεί κάτω από το κατώφλι V_B απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης κατά την αντίστροφη λειτουργία. Την χρονική στιγμή $t = 580$ s η τάση δευτερεύοντος αυξάνεται πέραν του κατωφλίου $V_B + e$ επανενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης κατά την αντίστροφη λειτουργία, με αποτέλεσμα να πραγματοποιηθεί μία τελευταία αύξηση του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ μέχρι την επίτευξη ισορροπίας στο σύστημα.



Σχ. 4.29 Χρονική διακύμανση τάσεων στον υποσταθμό Αχλαδιού με αντιστροφή της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ

Η εφαρμογή του μέτρου παρεμποδίζει τη δυνατότητα αποκατάστασης της καταναλισκόμενης ισχύος μέσω του μηχανισμού του ΣΑΤΥΦ. Η συνειδητή μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος στο φορτίο που τροφοδοτείται από τον υποσταθμό του Σχηματαρίου αποτυπώνεται στο Σχ. 4.30α και είναι σημαντική μέχρι του σημείου που απενεργοποιείται ο μηχανισμός αλλαγής της λήψης. Από το σημείο αυτό και

μετά η αύξηση των τάσεων σε γειτονικούς περιοχές (λόγω της θετικής επίδρασης του μέτρου στο σύστημα μεταφοράς) προκαλεί μικρή αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος. Η μέγιστη δυνατή αποκατάσταση της ισχύος επιτελείται μόνο σε όσα ΣΑΤΥΦ βρίσκονται σε κανονική λειτουργία. Αυτό φαίνεται στην περίπτωση του υποσταθμού των Μεθάνων (Σχ. 4.30β), όπου η δράση του ΣΑΤΥΦ αλλά και η επίδραση της αύξησης της τάσης σε γειτονικούς ζυγούς οδηγεί σε καταναλισκόμενη ισχύ μεγαλύτερη της αρχικής ζήτησης.



α) Υποσταθμός Σχηματαρίου

β) Υποσταθμός Μεθάνων

Σχ. 4.30 Χρονική διακύμανση καταναλισκόμενης ισχύος με αντιστροφή της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ

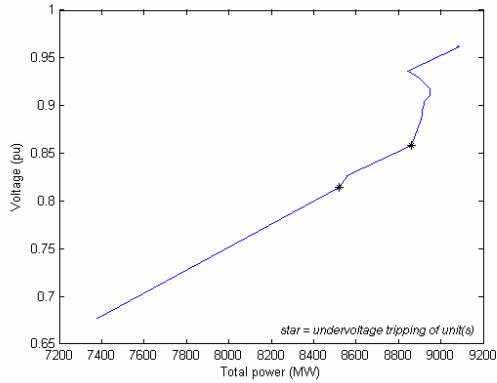
4.4.4 Προσομοίωση Σεναρίου II

Βασικό σενάριο

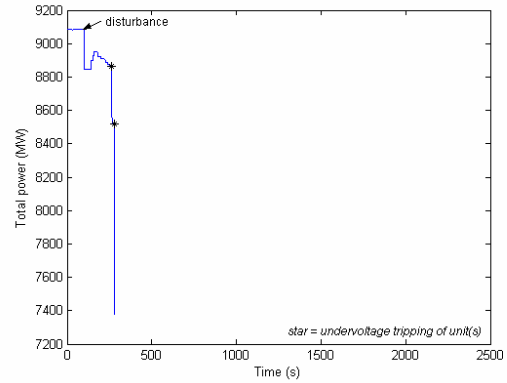
Στην περίπτωση του Σεναρίου II, το βασικό σενάριο (σενάριο κατάρρευσης) ξεκινά πάλι από το στιγμιότυπο ροής ισχύος που καταγράφηκε το πρωί της 12^{ης} Ιουλίου 2004. Η κατάσταση του συστήματος τη δεδομένη χρονική στιγμή έχει ήδη περιγραφεί. Η διαφορά με το Σενάριο I έγκειται στο γεγονός ότι τα φορτία του συστήματος θεωρούνται δυναμικά, δηλαδή διαθέτουν κάποιο μηχανισμό αυτορρύθμισης που τείνει να αποκαταστήσει την καταναλισκόμενη ισχύ στην αρχική ζήτηση. Έτσι εκτός της νεκρής ζώνης ρύθμισης της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ θεωρείται επίσης νεκρή ζώνη ρύθμισης της ισχύος. Το εύρος της νεκρής ζώνης ισχύος προσδιορίζεται στο $\pm 1\%$ ως προς την αρχική ζήτηση P_0 κάθε φορτίου, δηλαδή τα όρια της νεκρής ζώνης προσδιορίζονται σε $\{(1-db) \cdot P_0, (1+db) \cdot P_0\}$ με $db = 1\%$.

Η διαταραχή που εξετάζεται είναι η απώλεια της μονάδας Λαύριο 4 τη χρονική στιγμή $t = 100$ s. Μετά την απώλεια της μονάδας το σύστημα καταρρέει εντός 180 s (Σχ. 4.31) υπό την ταυτόχρονη δράση των δυο μηχανισμών αποκατάστασης της ισχύος: των ΣΑΤΥΦ και της αυτορρύθμισης των φορτίων. Είναι προφανές ότι, αφού μετά την εμφάνιση της διαταραχής δεν υπάρχει μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας στο σύστημα, η αρχική ζήτηση δεν μπορεί να αποκατασταθεί. Η προσπάθεια αποκατάστασης της ζήτησης με αύξηση της αγωγιμότητας έχει δυσμενέστερες συνέπειες για το σύστημα, γιατί κατά αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η φόρτισή του σε συνθήκες αστάθειας τάσης. Ως αποτέλεσμα, η αύξηση της αγωγιμότητας δεν επιτρέπει ούτε την επίτευξη μιας κατάστασης προσωρινής ισορροπίας στο σύστημα. Η σβέση του συστήματος προκαλείται τελικά από την αποσύνδεση των παρακάτω γεννητριών εξαιτίας χαμηλής τερματικής τάσης: Λαύριο 3 ($t = 260$ s), Λαύριο 1, Αλιβέρι 3-4, Αγ. Γεώργιος 8-9 ($t = 280$ s).

Στο Σχ. 4.32 φαίνεται η διακύμανση των τάσεων στους υποσταθμούς του Σχηματαρίου και των Μεθάνων. Σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης του βασικού σεναρίου, τα ΣΑΤΥΦ βρίσκονται σε κανονική λειτουργία και ρυθμίζουν κατάλληλα την τάση δευτερεύοντος του μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης για την επαναφορά της εντός της νεκρής ζώνης ρύθμισης της τάσης. Η μείωση των τάσεων από τη δράση των ΣΑΤΥΦ και την αύξηση της αγωγιμότητας των φορτίων είναι ταχύτερη και η συχνότητα ενεργοποίησης των ΣΑΤΥΦ υψηλότερη από ότι στην περίπτωση του Σεναρίου I. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η απώλεια του σημείου ισορροπίας του συστήματος εξαιτίας της αποσύνδεσης των γεννητριών για λόγους προστασίας από χαμηλή τερματική τάση να εμφανίζεται νωρίτερα.

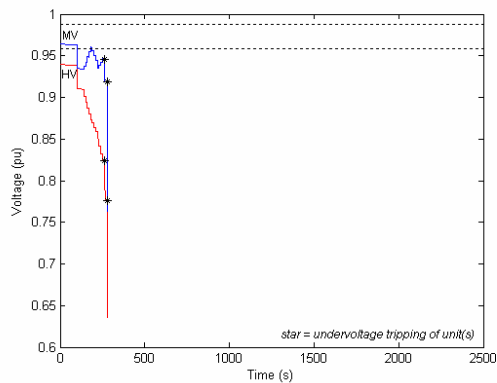


α) PV καμπύλη συστήματος

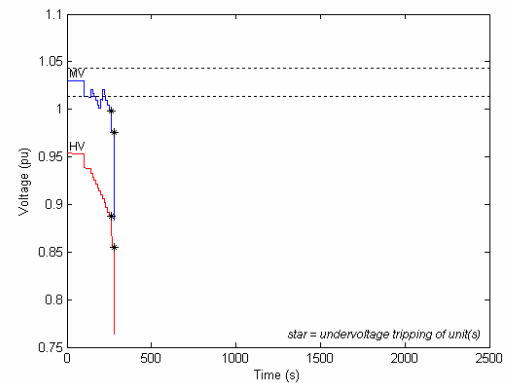


β) Καμπύλη φορτίου συστήματος - χρόνου

Σχ. 4.31 Συμπεριφορά συστήματος μέχρι την κατάρρευση



α) Υποσταθμός Σχηματαρίου

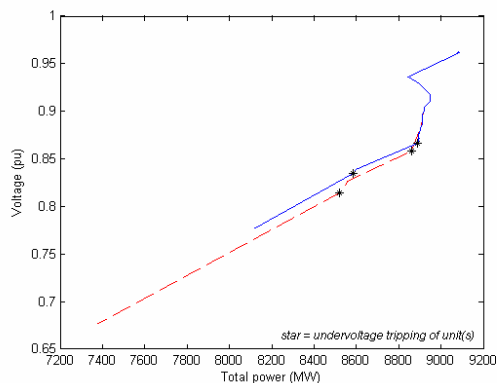


β) Υποσταθμός Μεθάνων

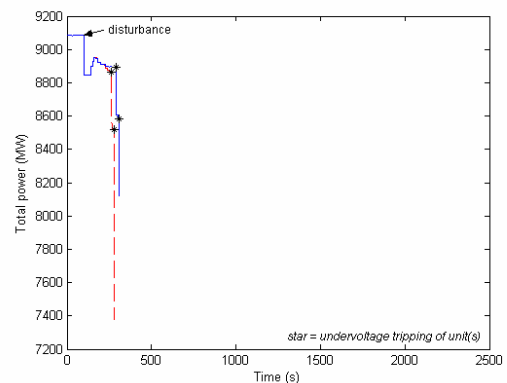
Σχ. 4.32 Διακύμανση τάσεων (μέχρι την κατάρρευση) σε αντιπροσωπευτικούς υποσταθμούς

Απενεργοποίηση μηχανισμού αλλαγής λήψης ΣΑΤΥΦ

Για την εφαρμογή του μέτρου της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής λήψης των ΣΑΤΥΦ ισχύουν οι τιμές των παραμέτρων του Πίν. 4.9. Όπως είδαμε στην προσομοίωση του βασικού σεναρίου, χωρίς τη λήψη κανενός μέτρου το σύστημα καταρρέει εντός 180 s από την απώλεια της μονάδας Λαύριο 4. Οι διακεκομμένες καμπύλες στα σχήματα που ακολουθούν αντιστοιχούν στο βασικό σενάριο. Με εφαρμογή του μέτρου της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ (Σχ. 4.33) επιτυγχάνεται επιβράδυνση της κατάρρευσης για 30 s μόνο (210 s μετά τη διαταραχή). Ο χρόνος αυτός μπορεί να θεωρηθεί ελάχιστος για τη λήψη επιπρόσθετων μέτρων, επομένως το μέτρο αυτό μπορεί να θεωρηθεί αναποτελεσματικό όταν υπάρχει αυτορρύθμιση του φορτίου. Οι μονάδες που προκαλούν τη σβέση του συστήματος εξαιτίας της αποσύνδεσής τους για λόγους υποτάσεως είναι οι ακόλουθες: Λαύριο 3 ($t = 290$ s), Λαύριο 1, Αγ. Γεώργιος 9 ($t = 310$ s).

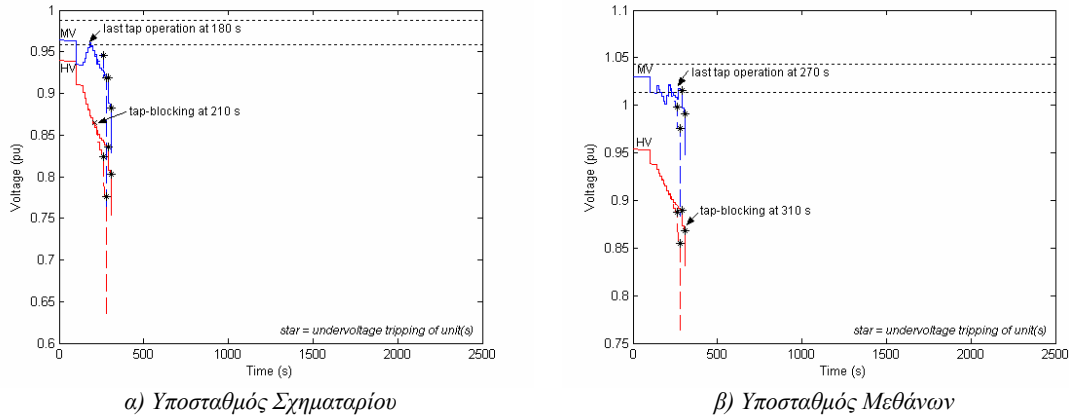


α) PV καμπύλη συστήματος

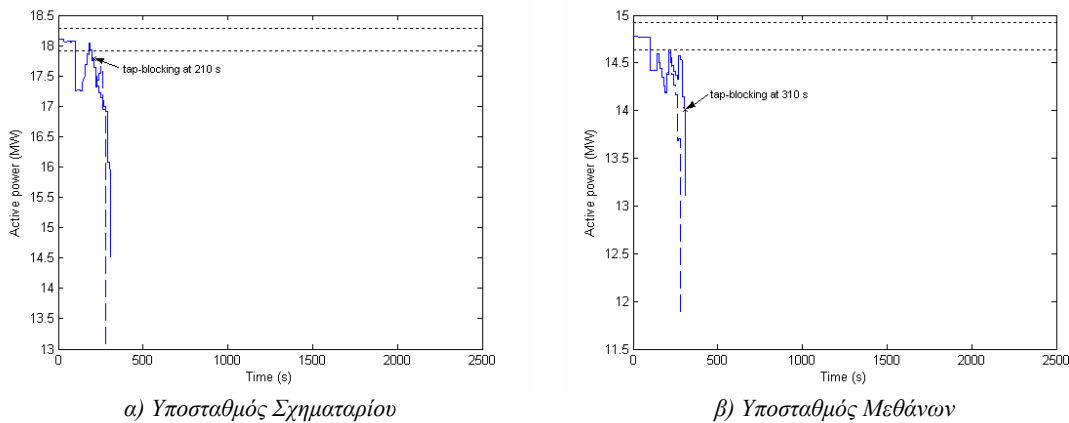


β) Καμπύλη φορτίου συστήματος - χρόνου

Σχ. 4.33 Συμπεριφορά συστήματος με απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ



Σχ. 4.34 Χρονική διακύμανση τάσεων με απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ



Σχ. 4.35 Χρονική διακύμανση καταναλισκόμενης ισχύος με απενεργοποίηση των ΣΑΤΥΦ

Στο Σχ. 4.34 φαίνεται η διακύμανση των τάσεων στους υποσταθμούς του Σχηματαρίου και των Μεθάνων. Στον υποσταθμό των Μεθάνων το μέτρο ενεργοποιείται ταυτόχρονα με τη σβέση του συστήματος και ουσιαστικά δεν εφαρμόζεται ποτέ. Στον υποσταθμό του Σχηματαρίου μετά την εφαρμογή του μέτρου η μείωση των τάσεων εξακολουθεί, λόγω της αύξησης της αγωγιμότητας του φορτίου αλλά και της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ στο υπόλοιπο σύστημα για την αποκατάσταση της ισχύος, όμως με μικρότερο ρυθμό. Η έλλειψη μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας προκαλεί τη συνεχή πτώση των τάσεων του συστήματος και τελικά την κατάρρευσή τους μετά την αποσύνδεση των προαναφερόμενων μονάδων παραγωγής στο Νότο για λόγους ηλεκτρικής προστασίας.

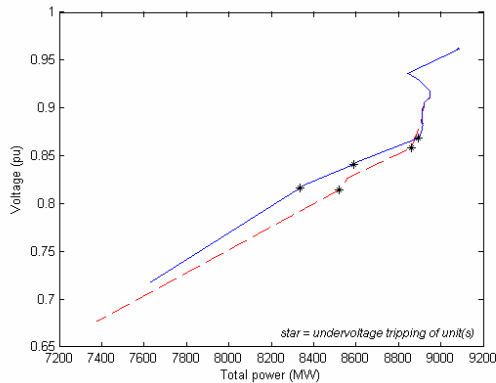
Στο Σχ. 4.35 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της καταναλισκόμενης ισχύος στους εξεταζόμενους υποσταθμούς. Με τις εστιγμένες ευθείες απεικονίζονται τα όρια της νεκρής ζώνης ρύθμισης της ισχύος. Στον υποσταθμό του Σχηματαρίου (Σχ. 4.35α) η αποκατάσταση της ισχύος γίνεται αρχικά μέσω της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ και της αύξησης της αγωγιμότητας του φορτίου. Μετά την απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης η αποκατάσταση της ισχύος πραγματοποιείται μόνο με αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου.

Αν και οι δύο μηχανισμοί αποκατάστασης της ισχύος του φορτίου (ΣΑΤΥΦ και αυτορρύθμιση) δρουν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, οι χρονικές σταθερές τους έχουν διαφορετικές τάξεις μεγέθους. Πράγματι η χρονική σταθερά των ΣΑΤΥΦ είναι της τάξης δεκάδων δευτερολέπτων, ενώ η σταθερά χρόνου της διαδικασίας αυτορρύθμισης των φορτίων συνήθως είναι της τάξης μερικών λεπτών. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η αύξηση της αγωγιμότητας δεν προλαβαίνει να αποκαταστήσει την ισχύ στο φορτίο λόγω της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ στο υπόλοιπο σύστημα που προκαλεί συνεχή πτώση των τάσεων στο σύστημα της μεταφοράς. Ως εκ τούτου εμφανίζεται σημαντική μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος μέχρι την κατάρρευση.

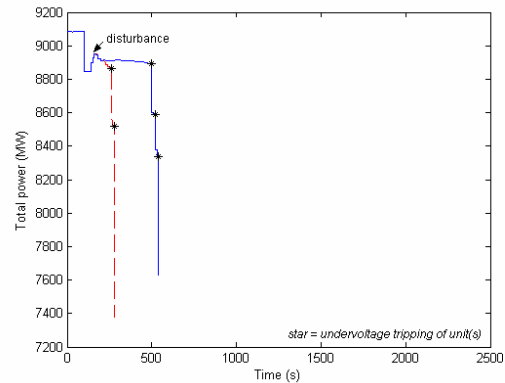
Στον υποσταθμό των Μεθάνων (Σχ. 4.35β) η εφαρμογή του μέτρου γίνεται σχεδόν ταυτόχρονα με τη σβέση του συστήματος. Η διαδικασία αποκατάστασης του φορτίου γίνεται επομένως μέσω του μηχανισμού του ΣΑΤΥΦ και της αυτορρύθμισης καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου.

Μείωση τάσης αναφοράς ΣΑΤΥΦ

Για την εφαρμογή του μέτρου μείωσης της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ ισχύουν οι τιμές των παραμέτρων του Πίν. 4.10. Το αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται είναι επιβράδυνση της κατάρρευσης. Πράγματι (Σχ. 4.36), το σύστημα υπό τη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ και την αύξηση της αγωγιμότητας των φορτίων καταρρέει εντός χρονικού διαστήματος 440 s ($t = 540$ s) από την εμφάνιση της διαταραχής. Το χρονικό αυτό διάστημα είναι μεγαλύτερο από αυτό που αποκομίζεται με εφαρμογή του μέτρου της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ. Η σβέση του συστήματος προκαλείται από την αποσύνδεση για λόγους υποτάσεως των παρακάτω γεννητριών: Λαύριο 3 ($t = 500$ s), Λαύριο 1 ($t = 520$ s), Αγ. Γεώργιος 8-9, Αλιβέρι 4, Στράτος II ($t = 540$ s).



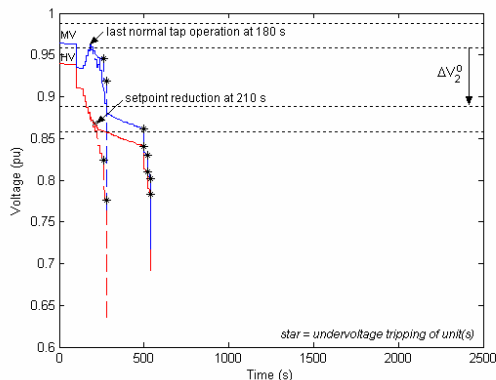
α) PV καμπύλη συστήματος



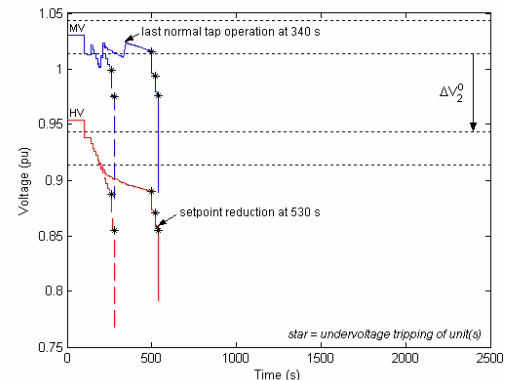
β) Καμπύλη φορτίου συστήματος - χρόνου

Σχ. 4.36 Συμπεριφορά συστήματος με μείωση της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ

Στο Σχ. 4.37 φαίνεται η διακύμανση της τάσης στους υποσταθμούς του Σχηματαρίου και των Μεθάνων. Στον υποσταθμό του Σχηματαρίου (Σχ. 4.37α) η μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ επιβάλλει τη ρύθμιση της τάσης δευτερεύοντος ως προς τη νέα χαμηλότερη νεκρή ζώνη, ενισχύοντας κατά αυτόν τον τρόπο το σύστημα της μεταφοράς. Όταν η τάση δευτερεύοντος του μετασχηματιστή εισέλθει στη μειωμένη νεκρή ζώνη ρύθμισης η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ σταματά, ωστόσο η τάση εξακολουθεί να μειώνεται με μικρότερο ρυθμό από την αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου και τη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ στο υπόλοιπο σύστημα. Η μείωση των τάσεων είναι συνεχής και οδηγεί στη σβέση του συστήματος με την αποσύνδεση των μονάδων παραγωγής. Στα Μέθανα (Σχ. 4.37β) το μέτρο εφαρμόζεται λίγο πριν την απώλεια σημείου ισορροπίας του συστήματος, δηλαδή ουσιαστικά δεν εφαρμόζεται καθόλου.



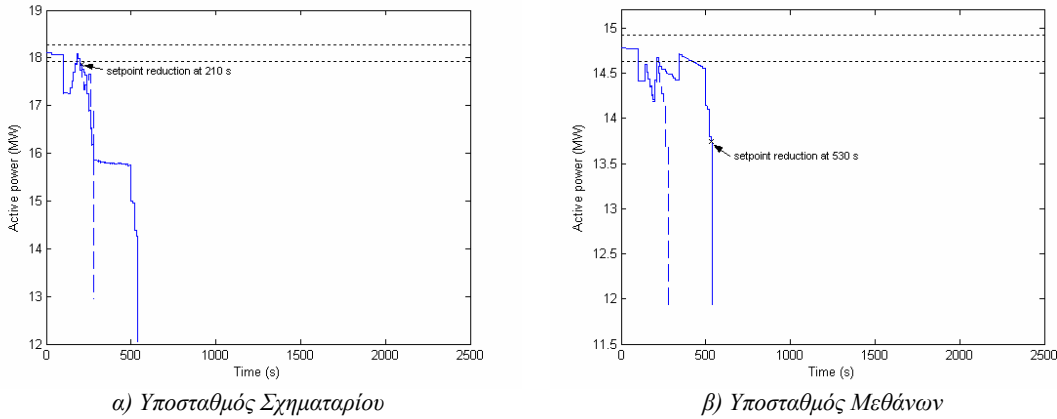
α) Υποσταθμός Σχηματαρίου



β) Υποσταθμός Μεθάνων

Σχ. 4.37 Χρονική διακύμανση τάσεων με μείωση της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ

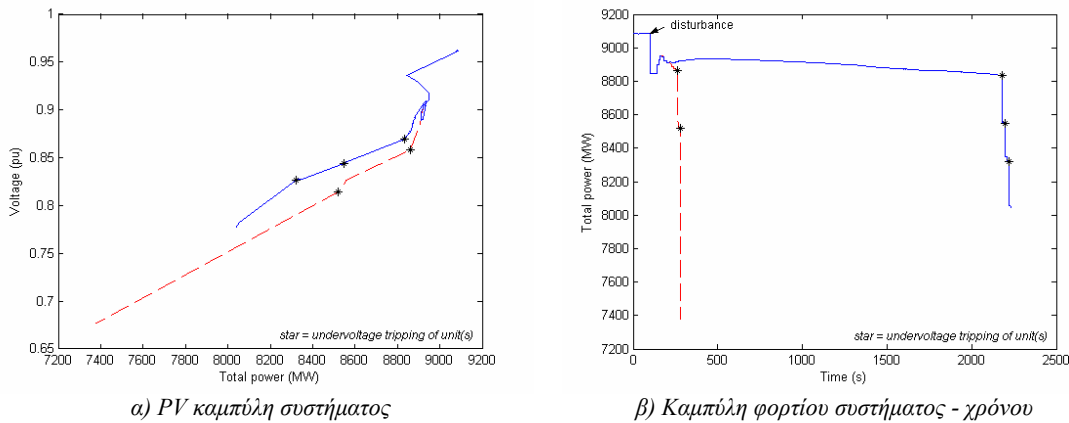
Το μέτρο μείωσης της τάσης αναφοράς έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος (Σχ. 4.38α) παρά την αύξηση της αγωγιμότητας, η οποία εξαιτίας της μεγαλύτερης χρονικής σταθεράς δεν προλαβαίνει να αντισταθμίσει τη δράση του ΣΑΤΥΦ. Ωστόσο λόγω της αντιμετώπισης της ασταθούς αλληλεπίδρασης των ΣΑΤΥΦ το συνολικό αποτέλεσμα είναι θετικό για το σύστημα. Στον υποσταθμό των Μεθάνων (Σχ. 4.38β), όπου το μέτρο ουσιαστικά δεν εφαρμόζεται, έχουμε μέγιστη δυνατή αποκατάσταση της ισχύος. Ωστόσο, η προσπάθεια αποκατάστασης της ισχύος σε συνθήκες αστάθειας τάσης δυσχεραίνει την κατάσταση του συστήματος.



Σχ. 4.38 Χρονική διακύμανση καταναλισκόμενης ισχύος με μείωση της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ

Κλειδώμα λήψης ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση

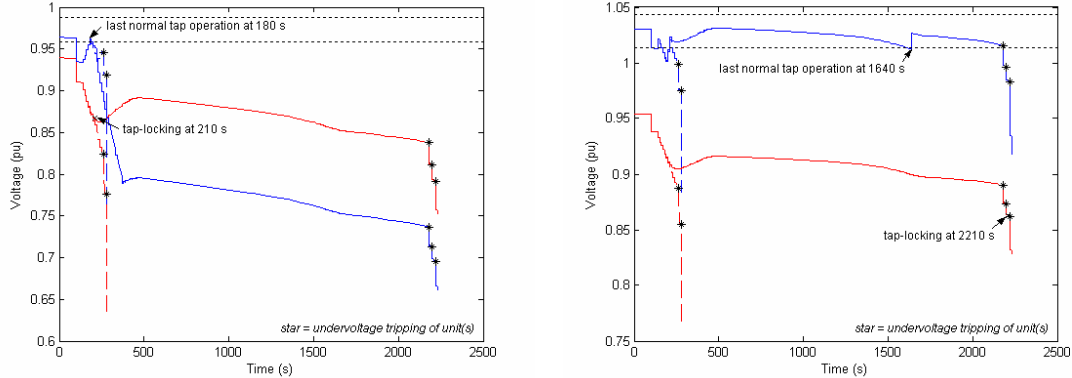
Για την εφαρμογή του μέτρου κλειδώματος της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση ισχύουν οι τιμές των παραμέτρων του Πίν. 4.11. Υπενθυμίζεται ότι επιλέχθηκε ρύθμιση r_{lock} που αντιστοιχεί στη μέγιστη δυνατή ενίσχυση των τάσεων στο επίπεδο της μεταφοράς. Στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνεται σημαντική επιβράδυνση της κατάρρευσης (Σχ. 4.39): από το χρονικό διάστημα των 180 s μετά τη διαταραχή εντός των οποίων συμβαίνει η κατάρρευση χωρίς τη λήψη κανενός μέτρου προστασίας, με εφαρμογή της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής λήψης των ΣΑΤΥΦ αυτή συμβαίνει εντός 210 s από τη διαταραχή, ενώ με το κλειδώμα της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση η κατάρρευση προκαλείται μετά από 2230 s (36 min) από τη διαταραχή. Ο χρόνος αυτός επιτρέπει την αντιμετώπιση της αστάθειας στην πράξη, καθιστώντας το μέτρο κλειδώματος της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση ως το πιο αποδοτικό μέτρο μαζί με αυτό της αντιστροφής του ελέγχου των ΣΑΤΥΦ που περιγράφεται παρακάτω. Οι μονάδες που προκαλούν τελικά τη σβέση του συστήματος εξαιτίας της αποσύνδεσής τους για λόγους υποτάσεως είναι οι ακόλουθες: Λαύριο 3 ($t = 2180$ s), Λαύριο 1 ($t = 2200$ s), Αγ. Γεώργιος 9, Στράτος II ($t = 2220$ s).



Σχ. 4.39 Συμπεριφορά συστήματος με κλειδώμα της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση

Στο Σχ. 4.40 φαίνεται η διακύμανση της τάσης στους υποσταθμούς του Σχηματαρίου και των Μεθάνων. Λίγο μετά την εφαρμογή του μέτρου και μέχρι το κλειδώμα της λήψης παρατηρούμε ικανοποιητική αύξηση της τάσης πρωτεύοντος στο ΣΑΤΥΦ του Σχηματαρίου (Σχ. 4.40α), εις βάρος όμως των τάσεων της διανομής. Βέβαια όταν η λήψη κλειδώσει στην προκαθορισμένη θέση r_{lock} , η αύξηση της αγωγιμότητας σε συνδυασμό με τη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ στο υπόλοιπο σύστημα προκαλεί νέα μείωση των τάσεων. Στον υποσταθμό των Μεθάνων (Σχ. 4.40β) η προστασία ουσιαστικά δεν εφαρμόζεται, ωστόσο παρατηρείται αύξηση της τάσης δικτύου υποδεικνύοντας τη θετική επίδραση του μέτρου στην ενίσχυση των τάσεων της μεταφοράς.

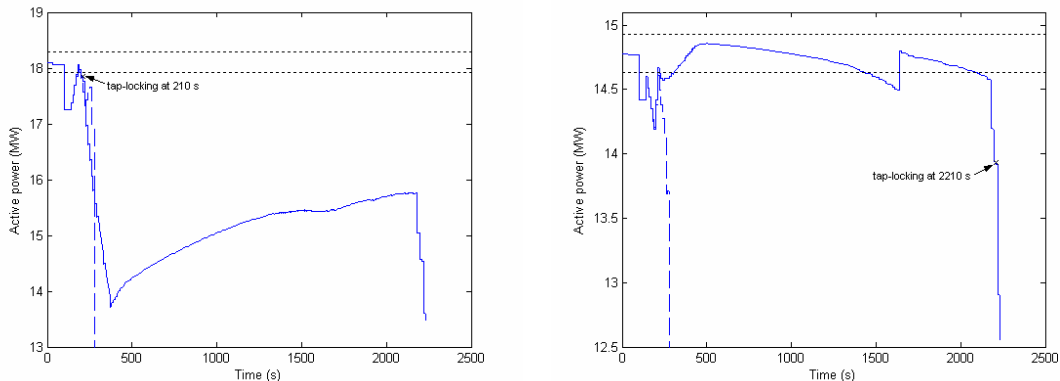
Σχετικά με την επίδραση στο καταναλισκόμενο φορτίο, η σχεδόν κατακόρυφη μείωση του φορτίου στον υποσταθμό του Σχηματαρίου (Σχ. 4.41α) οφείλεται στη διαδοχική αύξηση της θέσης της λήψης. Όταν η λήψη κλειδώσει στην επιθυμητή θέση r_{lock} η καταναλισκόμενη ισχύς αυξάνεται αργά, λόγω της συνεχιζόμενης αύξησης της αγωγιμότητας του φορτίου, μέχρι τη σβέση του συστήματος. Στον υποσταθμό των Μεθάνων (Σχ. 4.41β) η αποκατάσταση της ισχύος πραγματοποιείται μέσω της κανονικής λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ και της αύξησης της αγωγιμότητας του φορτίου.



α) Υποσταθμός Σχηματαρίου

β) Υποσταθμός Μεθάνων

Σχ. 4.40 Χρονική διακύμανση τάσεων με κλείδωμα της λήψης των ΣΑΤΥΦ



α) Υποσταθμός Σχηματαρίου

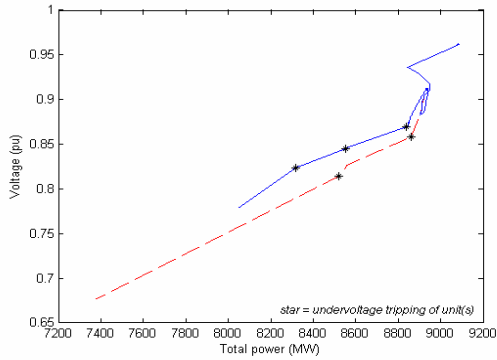
β) Υποσταθμός Μεθάνων

Σχ. 4.41 Χρονική διακύμανση καταναλισκόμενης ισχύος με κλείδωμα της λήψης των ΣΑΤΥΦ

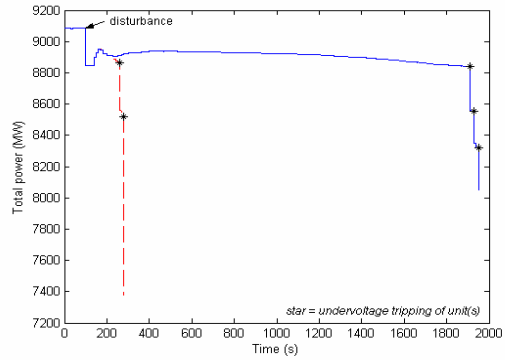
Αντιστροφή λογικής ελέγχου ΣΑΤΥΦ

Για την εφαρμογή της μεθόδου αντιστροφής της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ ισχύουν οι τιμές των παραμέτρων του Πίν. 4.12. Όπως φαίνεται στο Σχ. 4.42 η απώλεια σημείου ισορροπίας εμφανίζεται τη χρονική στιγμή $t = 1950$ s, δηλαδή 1850 s (30,83 min) μετά τη διαταραχή, εξαιτίας της αποσύνδεσης των παρακάτω γεννητριών λόγω χαμηλής τερματικής τάσης: Λαύριο 3 ($t = 1910$ s), Λαύριο 1 ($t = 1930$ s), Αγ. Γεώργιος 9, Στράτος II ($t = 1950$ s). Ο χρόνος που κερδίζεται είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτόν που κερδίζεται από την εφαρμογή του μέτρου κλειδώματος της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση και επιτρέπει τη λήψη σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας πιο αποδοτικών μέτρων (π.χ. αποκοπή φορτίου) για την αποκατάσταση μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας στο σύστημα.

Στο Σχ. 4.43 φαίνεται η διακύμανση της τάσης στους υποσταθμούς του Σχηματαρίου και των Μεθάνων. Στον υποσταθμό του Σχηματαρίου (Σχ. 4.43α) παρατηρούμε την αύξηση της τάσης πρωτεύοντος μετά την αντιστροφή του ελέγχου, χωρίς όμως να επιτυγχάνεται η σταθεροποίησή της στην επιθυμητή τιμή $V_L + e$. Η ενίσχυση των τάσεων στο σύστημα της μεταφοράς συνεχίζεται και μετά την απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης του ΣΑΤΥΦ λόγω χαμηλού επιπέδου τάσης φορτίου ($V_2 < V_B$) κατά την αντιστροφή λειτουργία. Ωστόσο η ενίσχυση αυτή αντισταθμίζεται από τη συνεχιζόμενη αύξηση της αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα μετά την απενεργοποίηση του αντιστρόφου ελέγχου στους περισσότερους μετασχηματιστές διανομής να εξελιχθεί σε προοδευτική μείωση μέχρι την κατάρρευση.

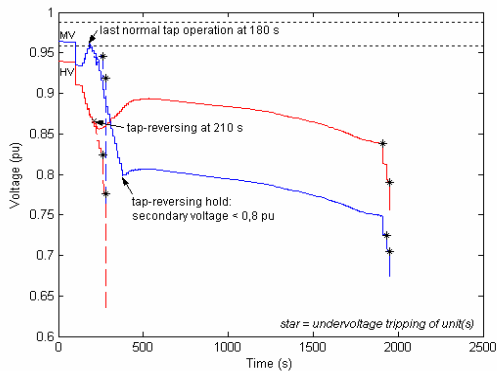


α) PV καμπύλη συστήματος

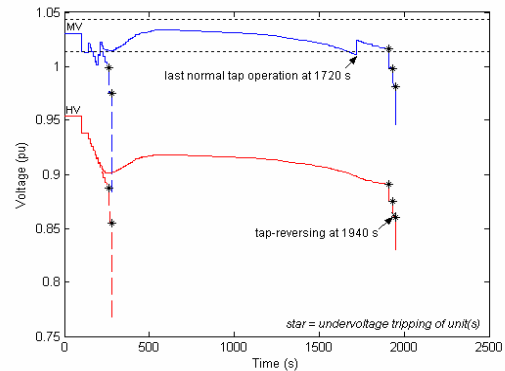


β) Καμπύλη φορτίου συστήματος - χρόνου

Σχ. 4.42 Συμπεριφορά συστήματος με αντιστροφή της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ

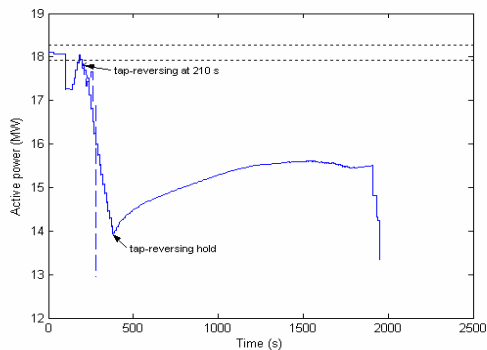


α) Υποσταθμός Σχηματαρίου

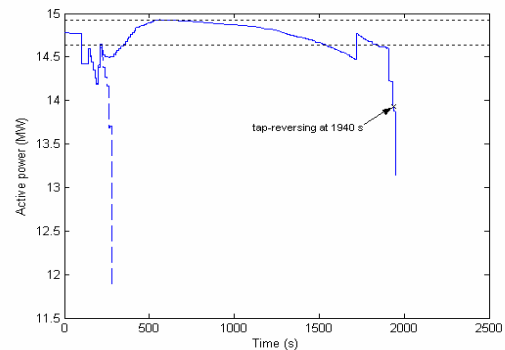


β) Υποσταθμός Μεθάνων

Σχ. 4.43 Χρονική διακύμανση τάσεων με αντιστροφή της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ



α) Υποσταθμός Σχηματαρίου



β) Υποσταθμός Μεθάνων

Σχ. 4.44 Χρονική διακύμανση καταναλισκόμενης ισχύος με αντιστροφή της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ

Στην περίπτωση του υποσταθμού των Μεθάνων (Σχ. 4.43β) μετά την αποκατάσταση της τάσης δευτερεύοντος εντός της νεκρής ζώνης ρύθμισης, η διακύμανσή της οφείλεται αποκλειστικά στη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ στο υπόλοιπο σύστημα και στην αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου. Τελικά υπό την επίδραση αυτών των παραγόντων η τάση δευτερεύοντος εξωθείται εκ νέου εκτός της νεκρής ζώνης και το ΣΑΤΥΦ την επαναφέρει με νέα αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού του.

Η εφαρμογή του μέτρου της αντιστροφής της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ προκαλεί σκόπιμη μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος στη διανομή. Η μείωση του φορτίου αποτυπώνεται στο Σχ. 4.44α και είναι σημαντική μέχρι του σημείου που απενεργοποιείται ο μηχανισμός αλλαγής της λήψης κατά την αντίστροφη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ. Ο μηχανισμός αυτορρύθμισης της ισχύος με αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου, διαπιστώνεται καθαρά αμέσως μετά την απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης. Είναι φανερό ότι μετά από κάποιο σημείο ο μηχανισμός αυτός καθίσταται ασταθής, με αποτέλεσμα η αύξηση της αγωγιμότητας να συνεπάγεται μείωση της κατανάλωσης. Στην περίπτωση του υποσταθμού των Μεθάνων (Σχ. 4.44β), όπου το ΣΑΤΥΦ βρίσκεται σε κανονική λειτουργία σε όλο το κρίσιμο διάστημα της προσομοίωσης, παρατηρείται η περίπτωση να συμβαίνει μείωση της αγωγιμότητας του φορτίου λόγω υπέρβασης της νεκρής ζώνης ισχύος.

4.4.5 Συμπεράσματα

Αυτό που πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα είναι ότι η εφαρμογή των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ κατά κανόνα δεν μπορεί να συντελέσει στην αποκατάσταση μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας στο σύστημα. Κυρίως τα μέτρα αυτά αποσκοπούν στην παροχή του αναγκαίου χρόνου για τη λήψη άλλων μέτρων προστασίας, όπως η αποκοπή φορτίου, η ένταξη μονάδων παραγωγής κλπ.

Στην περίπτωση που τα φορτία του συστήματος είναι στατικής φύσης, ο έλεγχος εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη μίας κατάστασης ισορροπίας χωρίς αποκατάσταση της τάσης και της ισχύος στα φορτία. Η ισορροπία αυτή, που θα οφείλεται στην εφαρμογή των μέτρων αντιμετώπισης της ασταθούς λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ ή/και στα όρια ρύθμισής τους, είναι εύθραυστη με αποτέλεσμα αν υπάρξει κάποιος άλλος μηχανισμός αστάθειας το σύστημα να κινδυνέψει με κατάρρευση. Στην περίπτωση που τα φορτία του συστήματος είναι δυναμικής φύσης, ο μηχανισμός αυτορρύθμισης της ισχύος δεν επιτρέπει την αποκατάσταση τέτοιας ψευδοϊσορροπίας.

Η μέθοδος απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης αποσκοπεί στη διακοπή της διαδικασίας αποκατάστασης της ισχύος στο φορτίο η οποία πραγματοποιείται μέσω της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ. Ωστόσο, όπως φάνηκε από τις προσομοιώσεις, η εφαρμογή της μεθόδου δεν υπήρξε αποτελεσματική σε κανένα από τα δύο σενάρια, καθώς παρά τη μικρή επιβράδυνση της κατάρρευσης αυτή δε μπόρεσε να αποφευχθεί. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ήδη από το αρχικό σημείο της προσομοίωσης οι τάσεις του συστήματος μεταφοράς βρίσκονται σε χαμηλό επίπεδο, δηλαδή το μεγαλύτερο μέρος της διαδικασίας αποκατάστασης της ισχύος μέσω των ΣΑΤΥΦ έχει ήδη πραγματοποιηθεί. Πράγματι, στο αρχικό σημείο της προσομοίωσης η λήψη στα περισσότερα ΣΑΤΥΦ που συμμετέχουν στο μέτρο έχει σχεδόν εξαντλήσει τα διαθέσιμα βήματα αλλαγής της προσεγγίζοντας το κάτω όριο ρύθμισής της. Η συμβολή του μέτρου θα ήταν περισσότερο αποδοτική αν αυτό εφαρμόζονταν αρκετά νωρίτερα (με βάση κάποιο προηγούμενο στιγμιότυπο του εκτιμητή κατάστασης), όσο δηλαδή η εξέλιξη της αποκατάστασης βρίσκονταν στο αρχικό της στάδιο.

Η μέθοδος μείωσης της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ υπήρξε περισσότερο αποτελεσματική. Στο Σενάριο I επιτεύχθηκε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας στο σύστημα, ενώ στο Σενάριο II παρόλο που δεν ήταν δυνατό να επιτευχθεί μια τέτοια κατάσταση ψευδοϊσορροπίας στο σύστημα λόγω της δυναμικής φύσης των φορτίων, το αποτέλεσμα από την εφαρμογή της μεθόδου ήταν μία καθυστέρηση της κατάρρευσης για μερικά λεπτά που ισοδυναμεί με χρήσιμο χρόνο για τη λήψη κάποιων επιπρόσθετων μέτρων προστασίας, όπως για παράδειγμα χειροκίνητη αποκοπή φορτίου.

Η μέθοδος κλειδώματος της λήψης των ΣΑΤΥΦ σε προκαθορισμένη θέση αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποδοτική και στα δύο σενάρια της προσομοίωσης. Η εφαρμογή στο Σενάριο I επέφερε ισορροπία στο σύστημα με σημαντική αποκατάσταση της αρχικής ζήτησης. Στο Σενάριο II από την εφαρμογή της μεθόδου κερδήθηκε σημαντικός χρόνος μέχρι την κατάρρευση, που επιτρέπει σε πραγματικές συνθήκες την έγκαιρη λήψη από μία ευρύτερη γκάμα κάποιου μέτρου προστασίας και ελέγχου συστήματος για την αντιμετώπιση της αστάθειας. Μάλιστα ο χρόνος που αποκομίστηκε υπήρξε ο μέγιστος σε σχέση με αυτούς από την εφαρμογή των άλλων μεθόδων και αυτό οφείλεται κυρίως στην επιλογή για μέγιστη ενίσχυση των τάσεων στο σύστημα της μεταφοράς.

Η μέθοδος της αντιστροφής της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ επιφέρει παραπλήσια αποτελέσματα στο σύστημα με αυτή του κλειδώματος της λήψης σε προκαθορισμένη θέση. Ως εκ τούτου κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματική, όμως παρουσιάζει το μειονέκτημα της συνθετότερης αρχής λειτουργίας άρα και της συνθετότερης υλοποίησης. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι όμως ότι κατά τη διάρκεια εφαρμογής της υπάρχει έλεγχος της ισχύος στο φορτίο, εν αντιθέσει με τις άλλες μεθόδους.

Ως προς την υλοποίηση των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ εκείνο που διαφαίνεται από τις προσομοιώσεις είναι η δυσκολία στην επιλογή μιας κοινής τιμής κατωφλίου τάσης V_{thres} για όλους τους ελεγχόμενους ζυγούς. Η επιλογή αυτή θα πρέπει να γίνει μετά από διαδοχικές off-line προσομοιώσεις του συστήματος για ένα μεγάλο εύρος ενδεχόμενων διαταραχών. Στο σενάρια που προσομοιώθηκαν επιλέχθηκε ως τιμή κατωφλίου το 87% (130,5 kV) της ονομαστικής τάσης των ζυγών 150 kV. Η επιλογή αυτή ενώ μπορεί να φαίνεται αρκετά χαμηλή βασίστηκε στο γεγονός ότι στο αρχικό σημείο οι τάσεις του συστήματος είχαν μικρές τιμές. Με την επιλογή κοινής τιμής κατωφλίου για όλους τους ζυγούς που συμμετέχουν στο μέτρο επιτυγχάνεται έμμεση επιλογικότητα της προστασίας, καθώς με τον τρόπο αυτό το μέτρο εφαρμόζεται μόνο σε εκείνους τους ζυγούς που βρίσκονται κοντά στην πηγή του προβλήματος. Με την ενίσχυση του δικτύου μετά το 2004, η σχεδίαση των μέτρων

προστασίας με έλεγχο εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ θα κατέληγε οπωσδήποτε σε υψηλότερες τιμές για το κατώφλι εφαρμογής.

Εκτός της υλοποίησης ενός σχήματος προστασίας με αποκεντρωμένο έλεγχο εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ, εναλλακτική λύση αποτελεί η επιλογή χαρακτηριστικών ζυγών (πυλών) ανά περιοχή και η ενεργοποίηση του μέτρου σε προκαθορισμένα ΣΑΤΥΦ με κριτήριο την τάση των πυλών ή κάποια άλλη ένδειξη. Μια τέτοια σχεδίαση ωστόσο είναι αρκετά σύνθετη και απαιτεί τη χρήση τηλεπικοινωνιών, για αυτό και δεν προτιμήθηκε στη διατριβή αυτή.

Συμπερασματικά, από τα μέτρα που εξετάστηκαν η μείωση της τάσης αναφοράς είναι το μόνο με άμεση προοπτική υλοποίησης, ενώ η απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής λήψης των ΣΑΤΥΦ συνιστάται μόνο εάν εφαρμοστεί σε ώρα σχετικά χαμηλού φορτίου (οπότε ισοδυναμεί με κλείδωμα κοντά στο λόγο μετασχηματισμού r_{max} των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης) και όχι με κριτήριο την τάση.

4.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

Η υλοποίηση του ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις απαιτήσεις σχεδίασης των μελετητών της προστασίας του συστήματος. Σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με κεντρικό έλεγχο είναι μάλλον επιθυμητή η ανάπτυξη ενός κεντρικού σχήματος προστασίας. Σε αυτήν την περίπτωση είναι απαραίτητος εξοπλισμός με δυνατότητες απομακρυσμένης παρακολούθησης και τηλεχειρισμού και η ανάπτυξη ενός προηγμένου τεχνολογικά συστήματος ελέγχου και επικοινωνίας. Σε τέτοια κεντρικά σχήματα προστασίας ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι συλλέγουν την πληροφορία και τη μεταδίδουν άμεσα ή μέσω συστημάτων επικοινωνίας στο κέντρο ελέγχου. Αφού γίνει η επεξεργασία της πληροφορίας, δίδεται εντολή με τηλεχειρισμό (αυτόματα ή χειροκίνητα) για την εφαρμογή του μέτρου. Η μονάδα ελέγχου του ΣΑΤΥΦ δέχεται την εντολή και προβαίνει στις κατάλληλες ενέργειες.

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της τεχνολογίας επιτρέπει τη χρησιμοποίηση προηγμένων τεχνικών συλλογής - επεξεργασίας σημάτων και μετάδοσης πληροφοριών. Οι ηλεκτρονόμοι επιβαρύνονται με το σύνθετο έργο ελέγχου των συνθηκών ενεργοποίησης της προστασίας (μέτρηση, επεξεργασία, απόφαση). Για τη συλλογή και μετάδοση των πληροφοριών χρησιμοποιούνται κλασικά συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης (RTU ή SCADA), ωστόσο η μελλοντική τάση συνίσταται στη χρήση διατάξεων συγχρονισμένης μέτρησης φασηθετών (PMU). Οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι παρέχουν επίσης τη δυνατότητα μετάδοσης πληροφοριών μέσω modem και σήμανσης ταυτοχρονισμού μέσω δορυφόρου.

Παρά την ταχύτητα και το μεγάλο εύρος δυνατοτήτων που παρέχεται από τη χρήση προηγμένων συστημάτων τηλεπικοινωνίας και επεξεργασίας σημάτων, τα συστήματα αυτά αυξάνουν την πολυπλοκότητα και το κόστος του σχήματος προστασίας και απαιτούν βέλτιστο συντονισμό. Αντίθετα, σχήματα με αποκεντρωμένο έλεγχο παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και έχουν μικρότερο κόστος.

Πράγματι κατά τη σχεδίαση ενός σχήματος προστασίας με αποκεντρωμένο έλεγχο δεν είναι αναγκαία η τηλεπικοινωνία ούτε η χρήση εξελιγμένων ψηφιακών συστημάτων. Απλοί ηλεκτρονόμοι εγκατεστημένοι στα ελεγχόμενα ΣΑΤΥΦ ενεργοποιούνται σε τοπικές μετρήσεις μεγεθών. Για παράδειγμα, αρκεί ένας ηλεκτρονόμος τάσης (ηλεκτρομηχανικός, στατικός ή ψηφιακός) να μεταδώσει την εντολή ενεργοποίησης στη μονάδα ελέγχου του ΣΑΤΥΦ όταν παρατηρήσει χαμηλή τάση στον ελεγχόμενο ζυγό.

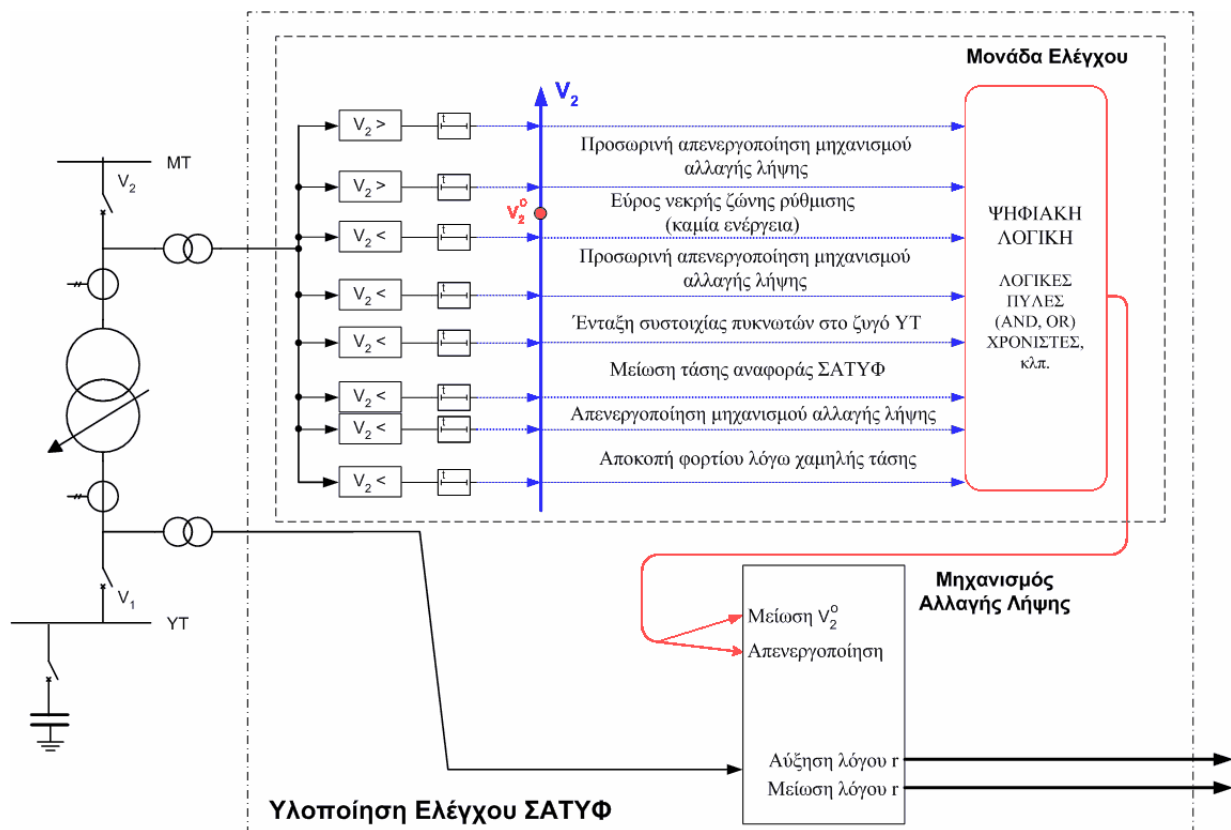
Η μονάδα ελέγχου των ΣΑΤΥΦ αποτελεί τον πυρήνα για την υλοποίηση της προστασίας εκτάκτου ανάγκης. Η μονάδα αυτή δέχεται σήματα εισόδου από διαφορετικές πηγές, επεξεργάζεται την πληροφορία και παράγει κατάλληλα σήματα εξόδου. Στην απλούστερη περίπτωση αποτελεί μια υπολογιστική μονάδα με μεγάλες δυνατότητες επεξεργασίας. Η σωστή σχεδίαση της προστασίας με έλεγχο εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ απαιτεί τη βέλτιστη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων ψηφιακής λογικής της μονάδας ελέγχου. Η διαδικασία αυτή, ενώ παρέχει στο χρήστη μεγάλη ευελιξία στη σχεδίαση σχημάτων προστασίας ανάλογα με την ιδιαιτερότητα κάθε συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζει τη δυσκολία της ψηφιακής σχεδίασης των μικροκυκλωμάτων της μονάδας.

Για παράδειγμα, για την εφαρμογή της πιο απλής σχετικά μεθόδου ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ, που είναι η απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης, απαιτείται στην πράξη η παραγωγή ενός λογικού παλμού ΝΑΙ (bit = 1) στην εσωτερική εντολή BLOCKING της μονάδας ελέγχου. Για την παραγωγή αυτού του παλμού απαιτείται ο κατάλληλος συνδυασμός με άλλες εσωτερικές εντολές που παράγονται κατά τη λειτουργία της μονάδας, ώστε να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα της παλμοδότησης του ακροδέκτη εξόδου για την απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης.

Στην περίπτωση του μέτρου της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης, η λειτουργία αυτή έχει προβλεφθεί από τους περισσότερους κατασκευαστές. Αυτό σημαίνει ότι ο κατασκευαστής έχει συμπεριλάβει στη λογική σχεδίαση της μονάδας τη συγκεκριμένη εφαρμογή και από το χρήστη απαιτείται μόνο η επιλογή της κατάλληλης ρύθμισης. Το ίδιο ισχύει και για την εφαρμογή της μείωσης της τάσης αναφοράς, η οποία στους περισσότερους κατασκευαστές έχει συμπεριληφθεί στις βασικές λειτουργίες της μονάδας ελέγχου.

Για τις περισσότερο σύνθετες μεθόδους ελέγχου ΣΑΤΥΦ, όπως η αντιστροφή της λογικής λειτουργίας ή το κλείδωμα της λήψης σε προκαθορισμένη θέση, δεν υπάρχει πρόβλεψη από τον κατασκευαστή με αποτέλεσμα ο χρήστης να πρέπει να σχεδιάσει τη λογική της μεθόδου στο προγραμματιστικό περιβάλλον της μονάδας ελέγχου. Η δυσκολία στην υλοποίηση αυτών των μεθόδων επιτείνεται από το γεγονός ότι απαιτείται η γνώση πολλών και διαφορετικών μονάδων ελέγχου, των οποίων οι λειτουργίες διαφέρουν ανάλογα με τον κατασκευαστή.

Στο Σχ. 4.45 [Kar04] φαίνεται ένα σύνθετο σχήμα προστασίας, όπου εκτός από μέτρα τοπικού ελέγχου του ΣΑΤΥΦ (απενεργοποίηση μηχανισμού αλλαγής λήψης, μείωση τάσης αναφοράς) έχει προβλεφθεί η εντολοδότηση από τη μονάδα ελέγχου της ένταξης συστοιχίας στατών πυκνωτών στο ζυγό ΥΤ του υποσταθμού, καθώς και η αποκοπή φορτίου με κριτήριο την τάση.



Σχ. 4.45 Τυπική υλοποίηση προστασίας με τοπικό έλεγχο ΣΑΤΥΦ

5ο Κεφάλαιο

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε ότι κατά την εξέλιξη φαινομένων αστάθειας τάσης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η εφαρμογή των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ δεν διασφαλίζει την αποσόβηση της κατάρρευσης των τάσεων στο σύστημα. Σε τέτοιες περιπτώσεις η αποκοπή φορτίου λόγω χαμηλών τάσεων είναι αναπόφευκτη. Στο κεφάλαιο αυτό εστιάζουμε στην ανάλυση των μεθόδων αποκοπής φορτίου.

5.1 ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΩΣ ΜΕΣΟ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Η αποκοπή φορτίου θα πρέπει να θεωρείται το έσχατο μέσον για την αποφυγή της κατάρρευσης των τάσεων σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Με την εφαρμογή της ένας αριθμός καταναλωτών αποσυνδέεται άμεσα από το σύστημα, με αποτέλεσμα ένα μέρος της συνολικής ζήτησης του φορτίου να μην ικανοποιείται. Ωστόσο αυτό γίνεται προς όφελος του συστήματος, γιατί αφενός η βαθμιαία πτώση των τάσεων μειώνει έμμεσα την καταναλισκόμενη ισχύ αφετέρου, αν δεν ληφθεί κάποιο μέτρο προστασίας, η επακόλουθη κατάρρευσή τους θα οδηγήσει σε μερική ή πλήρη σβέση του συστήματος με δυσμενέστερες συνέπειες για τους καταναλωτές. Υπενθυμίζουμε ότι η εφαρμογή των μεθόδων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ αποσκοπεί επίσης στην έμμεση αποκοπή μέρους του φορτίου. Γίνεται επομένως φανερό ότι δεδομένης της απόρριψης φορτίου, η προγραμματισμένη και ελεγχόμενη αποκοπή αποτελεί την ασφαλέστερη λύση για την αντιμετώπιση των φαινομένων αστάθειας τάσης.

Η αποκοπή φορτίου είναι κατάλληλη ως μέτρο προστασίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάζουν μειωμένη ικανότητα μεταφοράς ισχύος λόγω υψηλής φόρτισης του συστήματος μεταφοράς και μειωμένων αποθεμάτων αέργου ισχύος. Υπό τέτοιες δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας η εμφάνιση μίας σοβαρής διαταραχής (N-2 ή δυσμενέστερης) μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα αστάθειας τάσεων ή ακόμα και την κατάρρευσή τους. Συνεπώς, αν όλα τα μέτρα προστασίας έχουν αποτύχει να σταθεροποιήσουν τις τάσεις στο σύστημα, η αποκοπή φορτίου μπορεί να αποτελέσει μία πολύ αποτελεσματική και οικονομική λύση για την προστασία του από την κατάρρευση. Το αποτέλεσμα που αναμένεται είναι η σταθεροποίηση των τάσεων σε επίπεδα κανονικής λειτουργίας.

Η χρονική κλίμακα εντός της οποίας εξελίσσεται ένα φαινόμενο αστάθειας τάσης κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα ως αρκετά λεπτά ή ώρες. Ωστόσο, ακόμα και στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα η κατάρρευση των τάσεων εμφανίζεται ταχύτατα. Επομένως η έγκαιρη εκτίμηση μίας επικείμενης κατάρρευσης αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αντιμετώπιση της αστάθειας με αποκοπή φορτίου.

Η αποκοπή φορτίου μπορεί να εκτελεστεί με χειροκίνητη εντολή μόνο όταν ο ρυθμός μείωσης των τάσεων είναι αρκετά μικρός, δηλαδή όταν η αστάθεια τάσης εξελίσσεται σε χρονική κλίμακα λεπτών. Για την αποτελεσματική εφαρμογή της χειροκίνητης αποκοπής φορτίου απαιτείται ο προσδιορισμός ενός προκαθορισμένου πλάνου δράσης, βάσει μελετών της προστασίας, το οποίο θα ακολουθείται κατά γράμμα από το προσωπικό της λειτουργίας του συστήματος. Το μεγάλο μειονέκτημα σε αυτήν την περίπτωση είναι το βάρος που επωμίζεται το προσωπικό να αναγνωρίσει έγκαιρα την αστάθεια και να δράσει τάχιστα για την αποτροπή της.

Η αυτόματη αποκοπή φορτίου κρίνεται ως η πλέον αποτελεσματική λύση για την αντιμετώπιση των φαινομένων αστάθειας τάσης που εξελίσσονται τόσο στη βραχυπρόθεσμη όσο και στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Η απόφαση για την απόρριψη του φορτίου λαμβάνεται από ηλεκτρονόμους τάσης, οι οποίοι παρακολουθούν το επίπεδο της τάσης (ή και άλλα μεγέθη) και δρουν αυτομάτως όταν

ανιχνεύσουν συνθήκες απαράδεκτα χαμηλών τάσεων. Η επιλογή των ζυγών όπου θα εφαρμοστεί η αποκοπή και των ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων καθορίζεται από τη μελέτη της προστασίας του συστήματος.

Κατά τη σχεδίαση σχημάτων αποκοπής φορτίου θα πρέπει να προβλέπονται πιθανές καταστάσεις υπερσυχνότητας, υπέρτασης ή υπερφόρτισης που είναι δυνατόν να προκληθούν στο σύστημα μετά την απόρριψη του φορτίου. Για παράδειγμα, αν μετά από μία αποκοπή δημιουργούνται συνθήκες υπερσυχνότητας, η ποσότητα του απορριπτόμενου φορτίου θα πρέπει να μειωθεί ή θα πρέπει να υπάρξει συνδυασμένη λειτουργία με το σχήμα προστασίας του συστήματος από αστάθεια συχνότητας. Αν εμφανίζονται υπερτάσεις, θα πρέπει να γίνει γεωγραφική ανακατανομή των ζυγών, στους οποίους θα εφαρμοστεί η αποκοπή ή θα πρέπει να προβλεφθεί εναρμονισμένη λειτουργία με συστήματα αντιστάθμισης αέργου ισχύος, ενώ αν δημιουργούνται υπερφορτίσεις στις γραμμές μεταφοράς θα πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων προστασίας. Η συντονισμένη λειτουργία με σχήματα προστασίας γειτονικών (διασυνδεδεμένων) συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται επίσης απαραίτητη για τη διασφάλιση του επιθυμητού επιπέδου επιλογικότητας του τοπικού σχήματος προστασίας.

Σε γενικές γραμμές τα σχήματα αποκοπής φορτίου θα πρέπει να λειτουργούν εναρμονισμένα με [CTF01]:

- *Διατάξεις ελέγχου και προστασίας γεννητριών.* Η μεταγωγή των γεννητριών από λειτουργία με αυτόματη ρύθμιση τάσης σε λειτουργία με περιορισμό υπερδιέγερσης μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση ενός φαινομένου αστάθειας τάσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι σχεδόν σε όλα τα περιστατικά αστάθειας τάσης, μία ή περισσότερες κρίσιμες γεννήτριες λειτουργούσαν με περιορισμένη την ικανότητα παραγωγής αέργου ισχύος. Σε παρόμοιες καταστάσεις είναι επίσης συχνή η λειτουργία των αυτόματων περιοριστών ρεύματος τυμπάνου των γεννητριών. Συνεπώς κατάλληλα σήματα που παράγονται κατά την ενεργοποίηση αυτών των διατάξεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες της αστάθειας για την εφαρμογή της αποκοπής φορτίου.
- *Διατάξεις ελέγχου και προστασίας στο σύστημα μεταφοράς.* Κατά τη σχεδίαση του σχήματος αποκοπής φορτίου θα πρέπει να συνεκτιμηθεί η επίδραση που έχουν στην εξέλιξη ενός φαινομένου αστάθειας τάσης οι διατάξεις ελέγχου και προστασίας στο σύστημα της μεταφοράς. Η ένταξη πυκνωτών και η απόρριψη πηνίων αποτελούν ορισμένα μέτρα που πρέπει να προηγούνται της αποκοπής.
- *Συστήματα ρύθμισης ισχύος στους τελικούς καταναλωτές.* Ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενες συσκευές, ηλεκτρονικές διατάξεις αντιστάθμισης, οικιακοί κινητήρες (π.χ. κλιματιστικά), θερμοστατικά φορτία και άλλες διατάξεις των συστημάτων διανομής διαθέτουν συστήματα ρύθμισης της ισχύος και προστασίας από χαμηλή τάση. Η επίδραση των συστημάτων αυτών στο καταναλισκόμενο φορτίο πρέπει να συνεκτιμηθεί κατά τη σχεδίαση ενός σχήματος προστασίας από αστάθεια τάσης. Επίσης, η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ θα πρέπει να εκτιμηθεί αν γίνεται εις όφελος του συστήματος, διαφορετικά θα πρέπει να ελεγχθεί κατάλληλα (με τους τρόπους που είδαμε στο τέταρτο κεφάλαιο) πριν από την εφαρμογή της αποκοπής φορτίου.
- *Προγράμματα αποκοπών υποσυχνότητας.* Σχήματα αποκοπής φορτίου λόγω χαμηλών τάσεων έχουν αναπτυχθεί εντατικά κατά τα τελευταία μόνο χρόνια, όταν και τα περιστατικά αστάθειας τάσης πλήθηναν σημαντικά. Αντίθετα η εφαρμογή της αποκοπής φορτίου για την αντιμετώπιση προβλημάτων υποσυχνότητας χρησιμοποιείται ευρύτατα από την ανάπτυξη των πρώτων μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι αρκετά σύνηθες στην υλοποίηση της αποκοπής φορτίου από υπόταση να χρησιμοποιούνται τα ήδη υπάρχοντα στάδια αποκοπής υποσυχνότητας. Όπως θα δούμε στο έβδομο κεφάλαιο, αυτό συμβαίνει και στο Ελληνικό σύστημα.
- *Προγράμματα ελέγχου επαναφοράς συστήματος.* Μετά από την εφαρμογή αποκοπής φορτίου το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μεταβαίνει σε κατάσταση επαναφοράς, στην οποία όλοι οι περιορισμοί λειτουργίας ικανοποιούνται αλλά δεν ικανοποιούνται οι περιορισμοί φορτίου του συστήματος. Ο έλεγχος επαναφοράς αποσκοπεί στη μετάβαση του συστήματος από την κατάσταση επαναφοράς στην κατάσταση κανονικής λειτουργίας. Η διαδικασία αυτή εκτός των άλλων περιλαμβάνει ένα πρόγραμμα σταδιακής αποκατάστασης του φορτίου με δυνατότητα κυκλικών αποκοπών, που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη.

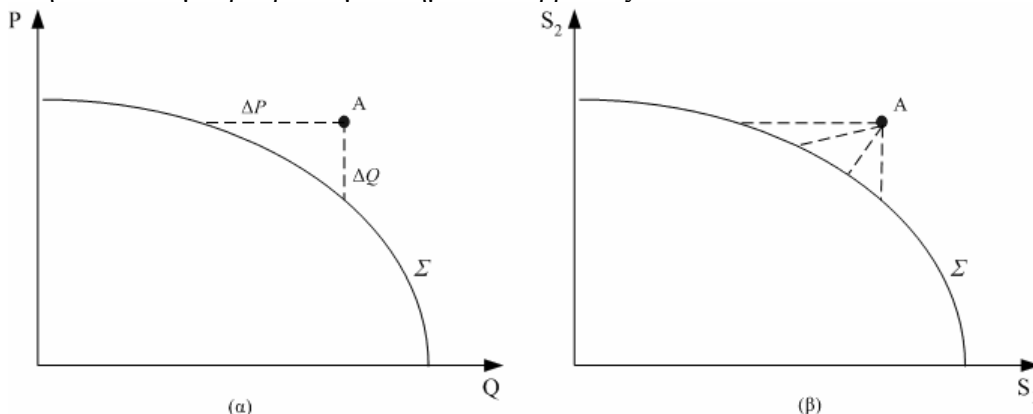
Στην αποκοπή φορτίου από χαμηλή τάση είναι ουσιώδης η γνώση του είδους των φορτίων που είναι συνδεδεμένα στο σύστημα. Όταν τα φορτία είναι κυρίως αγωγιότητες (θέρμανση, φωτισμός) μία ταχύτατη απόκριση δεν είναι απαραίτητη. Ωστόσο, με τη μεγάλη αύξηση των επαγωγικών φορτίων (κλιματιστικά, οικιακοί κινητήρες) ένα μέρος της αποκοπής [Tay92,AAH98] θα πρέπει να εκτελείται ταχύτατα διαφορετικά υπάρχει ο κίνδυνος απώλειας ευσταθούς σημείου ισορροπίας.

5.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η αποτελεσματικότητα του μέτρου της αποκοπής φορτίου εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες, που απαντούν στα αντίστοιχα ερωτήματα:

- Επιλογή των βέλτιστων ζυγών («πού θα εφαρμοστεί;»).
- Προσδιορισμός του βέλτιστου χρόνου εφαρμογής της αποκοπής («πότε θα εφαρμοστεί;»).
- Προσδιορισμός της ελάχιστης ποσότητας απορριπτόμενου φορτίου («πόσο θα αποκοπεί;»).

Το πρόβλημα της επιλογής των βέλτιστων ζυγών όπου θα εφαρμοστεί απόρριψη φορτίου, ανάγεται σε ένα γεωμετρικό πρόβλημα προσδιορισμού της ελάχιστης απόστασης από την επιφάνεια ορίων φόρτισης του συστήματος [VCV98,ADH94,Ove95,VMK01]. Έστω για παράδειγμα ότι τα φορτία ενός ηλεκτρικού συστήματος αποκαθίστανται μακροπρόθεσμα σε σταθερή ισχύ. Με την παραδοχή αυτή οι ισχύεις των φορτίων αποτελούν τις ανεξάρτητες παραμέτρους του συστήματος και ο χώρος ισχύος φορτίου ταυτίζεται με το χώρο των παραμέτρων. Στο Σχ. 5.1α απεικονίζεται ο χώρος φορτίου στην περίπτωση που ανεξάρτητες παράμετροι είναι η ενεργός και άεργος ισχύς του φορτίου, ενώ στο Σχ. 5.1β απεικονίζεται ο χώρος φορτίου στην περίπτωση που ανεξάρτητες παράμετροι είναι η φαινόμενη ισχύς σε δύο διαφορετικούς ζυγούς. Και στις δύο περιπτώσεις το σημείο Α αντιστοιχεί στη ζήτηση του φορτίου, ενώ η επιφάνεια Σ αποτελεί την επιφάνεια ορίων φόρτισης μετά από μία διαταραχή που προκαλεί την απώλεια μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας.

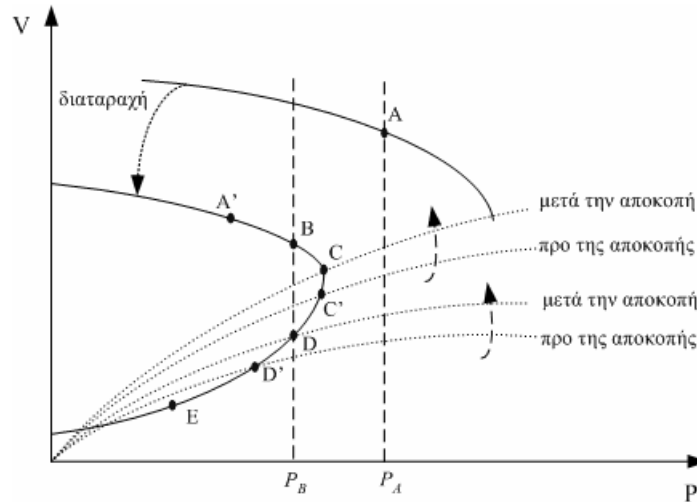


Σχ. 5.1 Αποκατάσταση μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας με αποκοπή φορτίου

Ένα βιώσιμο σημείο λειτουργίας του συστήματος, δηλαδή ένα σημείο στο εσωτερικό της επιφάνειας ορίων φόρτισης Σ , μπορεί να αποκατασταθεί με την αποκοπή μέρους της ενεργού ΔP και άεργου ΔQ συνιστώσας του φορτίου στην περίπτωση του Σχ. 5.1α ή την αποκοπή φορτίου από το ζυγό 1, το ζυγό 2 ή και από τους δύο ζυγούς στην περίπτωση του Σχ. 5.1β. Επομένως η αποκατάσταση μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας μπορεί να επιτευχθεί με έναν συνδυασμό μέτρων, τα οποία στο χώρο των παραμέτρων συνιστούν διαφορετικές κατευθύνσεις.

Κάθε κατεύθυνση στο χώρο φορτίου αντιστοιχεί σε διαφορετική απόσταση του σημείου Α από την επιφάνεια ορίων φόρτισης Σ . Με βάση την επιλογή της κατάλληλης νόρμας μπορεί να προσδιοριστεί η ελάχιστη απόσταση από την επιφάνεια ορίων φόρτισης, βάσει της οποίας καθορίζεται η βέλτιστη κατάταξη των φορτίων που θα συμμετάσχουν στην αποκοπή. Η μεθοδολογία προσδιορισμού των βέλτιστων ζυγών για αποκοπή φορτίου με χρήση του καθέτου διανύσματος \mathbf{n} στο εφαπτόμενο στην επιφάνεια ορίων φόρτισης υπερεπίπεδο H έχει περιγραφεί στην παράγραφο 2.5.2.

Η αναζήτηση αυτή των βέλτιστων ζυγών αποτελεί έναν ακόμα παράγοντα που διαφοροποιεί το πρόβλημα της αποκοπής φορτίου λόγω χαμηλών τάσεων από αυτό της αποκοπής φορτίου λόγω υποσυχνότητας, όπου δεν υπεισέρχεται η ανάγκη επιλογής ζυγών εντός της θιγόμενης περιοχής.



Σχ. 5.2 Επίδραση του χρόνου εφαρμογής της αποκοπής φορτίου

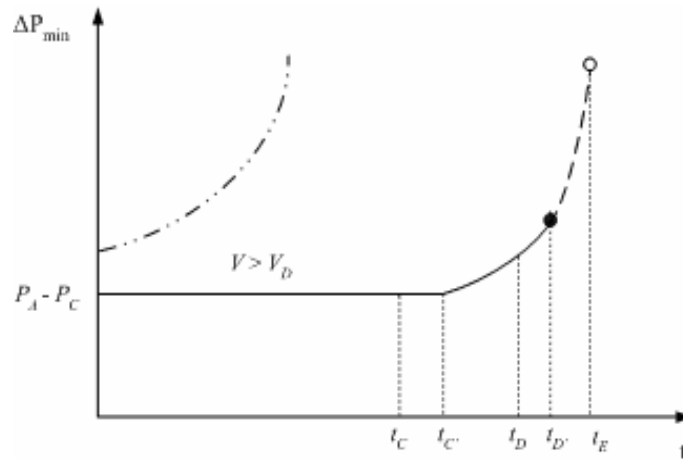
Το πρόβλημα του χρόνου εφαρμογής της αποκοπής συναρτάται άμεσα με αυτό της ποσότητας του φορτίου που θα απορριφθεί. Το ζητούμενο του βέλτιστου χρόνου εφαρμογής επιβάλλεται από την ανάγκη για έλξη του σημείου λειτουργίας, που θα προκύψει μετά τη λήψη του μέτρου, προς το ευσταθές μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας [Ove95,AAH97,VS04]. Αν υπάρξει καθυστέρηση πέραν ενός χρονικού ορίου, ελλοχεύει ο κίνδυνος στην ευνοϊκότερη περίπτωση να απαιτηθεί μεγαλύτερη απόρριψη φορτίου για αποκατάσταση μακροπρόθεσμης ισορροπίας ή στην ακραία περίπτωση το μέτρο να μην είναι αποτελεσματικό για την αποκατάσταση του συστήματος.

Στην παράγραφο 2.5.2 είδαμε την εξάρτηση της ποσότητας του φορτίου που αποκόπτεται (έμμεσα) μετά την εφαρμογή του μέτρου μείωσης της τάσης αναφοράς στο ΣΑΤΥΦ από το χρόνο εφαρμογής. Το παράδειγμα που περιγράφεται παρακάτω αναφέρεται στην περίπτωση της άμεσης αποκοπής φορτίου, η οποία σε σχέση με το μηχανισμό της έμμεσης αποκοπής, εισάγει έναν ακόμη βαθμό πολυπλοκότητας. Συγκεκριμένα, αποκόπτοντας φορτίο ώστε να μετατοπιστεί η μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου προς τα αριστερά, μετακινείται ταυτόχρονα η βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική προς τα πάνω. Το πλεονέκτημα ωστόσο που αποκομίζεται από το γεγονός αυτό είναι ότι παρέχεται περισσότερος χρόνος για τη λήψη του μέτρου. Η ανάλυση που ακολουθεί στοχεύει στην παρουσίαση του μέτρου μόνο ως προς την αποκατάσταση μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας, όμως μπορούν να εξαχθούν γενικότερα συμπεράσματα.

Ας θεωρήσουμε ένα φορτίο αγωγιμότητας που αποκαθίσταται μακροπρόθεσμα σε σταθερή ισχύ (Σχ. 5.2). Στην περίπτωση που η ποσότητα φορτίου την οποία θα απορρίψουμε είναι η ελάχιστη ($P_A - P_C$), ο μέγιστος χρόνος από την εμφάνιση της διαταραχής για αποκατάσταση μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας ισούται με t_C . Ο χρόνος αυτός είναι ίσος με το χρόνο που απαιτείται για να βρεθεί η βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου στο σημείο C', τέτοιο ώστε μετά την αποκοπή η χαρακτηριστική αυτή να μετατοπιστεί ακριβώς στο σημείο C. Πέραν της χρονικής στιγμής t_C η ελάχιστη αναγκαία αποκοπή φορτίου αυξάνεται.

Αντιστοιχη είναι η περίπτωση στην οποία η ποσότητα φορτίου που απορρίπτουμε είναι μεγαλύτερη της ελάχιστης. Για παράδειγμα, αν το φορτίο που απορρίπτουμε είναι ίσο με $P_A - P_B$, το χρονικό διάστημα από την εμφάνιση της διαταραχής που είναι διαθέσιμο για την εφαρμογή του μέτρου, ώστε να υπάρξει έλξη προς το ευσταθές σημείο ισορροπίας B είναι ίσο με t_D . Ο χρόνος αυτός αντιστοιχεί σε αυτόν που απαιτείται για να βρεθεί η βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου στο σημείο D', τέτοιο ώστε μετά την αποκοπή η χαρακτηριστική αυτή να μετατοπιστεί ακριβώς στο σημείο D.

Στο Σχ. 5.3 φαίνεται η μορφή του διαγράμματος ελάχιστου απορριπτόμενου φορτίου συναρτήσει του χρόνου. Σε σχέση με την περίπτωση όπου εφαρμόζεται έμμεση αποκοπή φορτίου (π.χ. με κάποιο μέτρο ελέγχου εκτάκτου ανάγκης στο ΣΑΤΥΦ) η διαφορά εναπόκειται στον περισσότερο διαθέσιμο χρόνο για την αποκοπή της ίδιας ποσότητας, λόγω της προαναφερόμενης επίδρασης της αποκοπής στη βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι το ανώτατο χρονικό περιθώριο t_E για τη λήψη οποιουδήποτε μέτρου παραμένει το ίδιο σε κάθε περίπτωση, καθώς στο σημείο E του Σχ. 5.2 το σύστημα καταρρέει λόγω απώλειας βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας (π.χ. αποσυγχρονισμός γεννητριών).



Σχ. 5.3 Διάγραμμα ελάχιστης αποκοπής φορτίου συναρτήσει του χρόνου

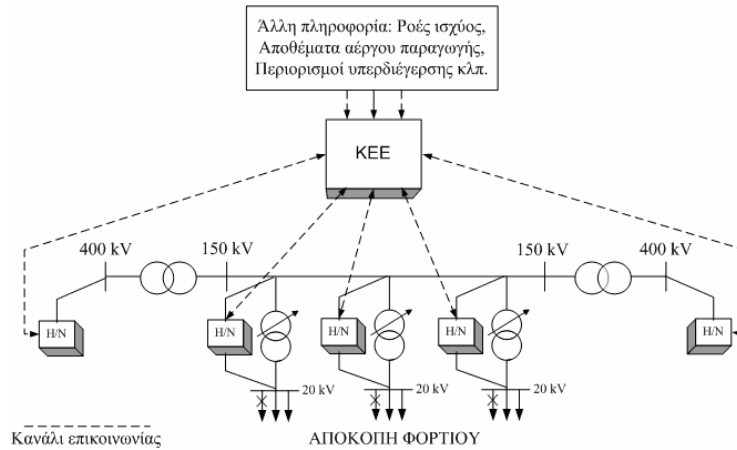
Δεδομένου ότι το ελάχιστο απορριπτόμενο φορτίο παραμένει σταθερό μέχρι το χρόνο t_C , συμπεραίνουμε ότι δεν υπάρχει κανένα κόστος αν καθυστερήσουμε την αποκοπή για αυτή τη χρονική διάρκεια. Εν τω μεταξύ είναι πιθανό να έχουν ληφθεί άλλα μέτρα προστασίας (π.χ. ένταξη πυκνωτών, απόρριψη πηνίων κλπ.), τα οποία να οδηγήσουν τελικά σε απόρριψη μικρότερου φορτίου. Σοβαρό μειονέκτημα ωστόσο είναι ότι ο χρόνος t_C , όπως και η ελάχιστη ποσότητα αποκοπής $P_A - P_C$ δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων, αλλά εξαρτώνται κάθε φορά από τη θεωρούμενη διαταραχή. Επίσης μια ισχυρή διαταραχή είναι δυνατόν να φέρει το σημείο λειτουργίας του συστήματος κατευθείαν στο κάτω τμήμα της χαρακτηριστικής δικτύου (κάτω δηλαδή από το κρίσιμο σημείο C) με αποτέλεσμα η ελάχιστη ποσότητα αποκοπής να αυξάνεται αμέσως με το χρόνο (διακεκομμένη-εστιγμένη καμπύλη του Σχ. 5.3).

Το πρόβλημα του προσδιορισμού της ελάχιστης αποκοπής φορτίου δεν είναι εύκολη υπόθεση σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της συνάρτησής της από το χρόνο και της διαφοροποίησής της ανάλογα με την εμφανιζόμενη διαταραχή. Για τον προσδιορισμό της ελάχιστης αποκοπής συχνά χρησιμοποιούνται στατικές μέθοδοι βελτιστοποίησης, οι οποίες ωστόσο δεν αποδίδουν με ακρίβεια την κατάσταση του συστήματος, καθώς δεν μπορούν να συνεκτιμήσουν τη δυναμική συμπεριφορά του. Ως καταλληλότερες μέθοδοι κρίνονται αυτές που συνδυάζουν μεθόδους βελτιστοποίησης με δυναμικές προσομοιώσεις του συστήματος [Μοο03]. Σε ένα πραγματικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων (φορτίων) δεν επιτρέπει ούτε τον προσδιορισμό της επιφάνειας ορίων φόρτισης παρά μόνο σε ένα μικρό χώρο γύρω από το σημείο λειτουργίας. Η γνώση της επιφάνειας ορίων φόρτισης θα επέτρεπε τον άμεσο υπολογισμό της ελάχιστης αποκοπής φορτίου με τη βοήθεια κατάλληλων τεχνικών βελτιστοποίησης.

5.3 ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΝ ΤΑΣΗ

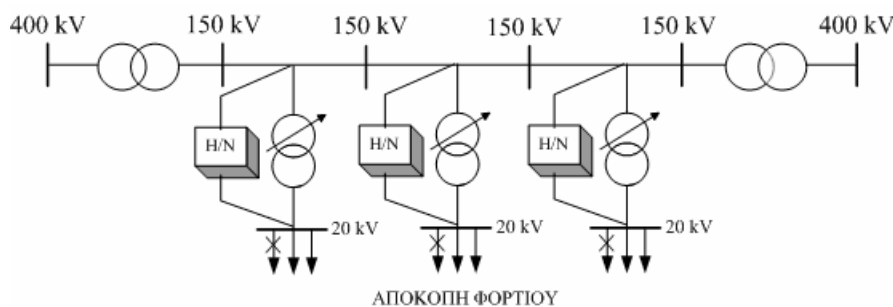
Η υλοποίηση της αποκοπής φορτίου με κριτήριο την τάση απαιτεί την παρακολούθηση του μέτρου της τάσης σε επιλεγμένους ζυγούς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ηλεκτρονόμοι τάσης, οι οποίοι όταν διαγνώσουν χαμηλή τάση σε έναν ή περισσότερους από τους ελεγχόμενους ζυγούς (πιθανόν σε συνδυασμό και με άλλους δείκτες αστάθειας) δίνουν εντολή ανοίγματος προκαθορισμένων διακοπών ισχύος. Η εντολή αυτή προκαλεί συνήθως την αποσύνδεση τροφοδοτικών γραμμών που αναχωρούν από υποσταθμούς διανομής. Εναλλακτικά υπάρχει η δυνατότητα αποσύνδεσης τροφοδοτικών γραμμών που συνδέονται απευθείας στην ΥΤ. Η αποκοπή του φορτίου πραγματοποιείται σε στάδια, ώστε να αποφευχθεί άσκοπη απόρριψη. Η επιλογή των καταλλήλων ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων τάσης καθώς και η επιλογή του φορτίου που θα πρέπει να απορριφθεί αποτελεί ιδιαίτερα σύνθετο πρόβλημα, με αποτέλεσμα η σχεδίαση σχημάτων αποκοπής φορτίου να απαιτεί εξειδικευμένη γνώση του συστήματος από τους μελετητές [ΙΡ93].

Στην περίπτωση που υιοθετείται ένα κεντρικό σχήμα αποκοπών όπως αυτό του Σχ. 5.4, η απόφαση για απόρριψη φορτίου λαμβάνεται από το κέντρο ελέγχου βάσει του ελέγχου των τάσεων στο σύστημα. Η συμμετοχή ηλεκτρονόμων σε μία ευρεία περιοχή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται επιβεβλημένη όταν απαιτούνται και άλλοι δείκτες αστάθειας (π.χ. πληροφορία ως προς τα αποθέματα παραγωγής ή υποστήριξης αέργου ισχύος). Στην πράξη ο έλεγχος κρίσιμων τάσεων στο σύστημα της μεταφοράς αποτελεί αρκετά ασφαλές κριτήριο για την εφαρμογή της αποκοπής. Ένα τέτοιο σχήμα προστασίας ευρείας περιοχής απαιτεί τη χρήση ανεπτυγμένου τεχνολογικά ηλεκτρολογικού και τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού [CTF01].



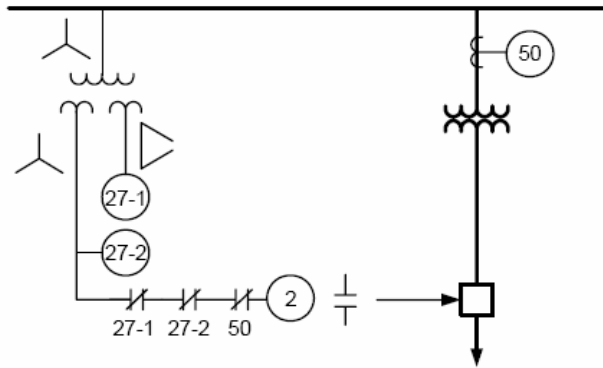
Σχ. 5.4 Κεντρικό σχήμα αποκοπής φορτίου

Στην περίπτωση που υιοθετείται ένα τοπικό σχήμα αποκοπών φορτίου με αποκεντρωμένο έλεγχο (Σχ. 5.5) δεν απαιτείται η εγκατάσταση ηλεκτρονόμων σε ευρεία περιοχή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ούτε η επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου. Οι αποκοπές πραγματοποιούνται από ηλεκτρονόμους τάσης που ελέγχουν απευθείας το μέτρο της τάσης στο ζυγό πρωτεύοντος του μετασχηματιστή διανομής. Ανάλογα με το σχήμα υλοποίησης είναι δυνατόν να παρακολουθείται και η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης. Ωστόσο με την εγκατάσταση του ηλεκτρονόμου στην αναχώρηση της γραμμή τροφοδοσίας ενός υποσταθμού διανομής, είναι δυνατόν λόγω της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ να αποκρυβούν καταστάσεις υπερφόρτισης ή να προκληθούν συνθήκες διέγερσης του ηλεκτρονόμου κατά την εκκίνηση ενός μεγάλου βιομηχανικού φορτίου. Συνεπώς, οι ηλεκτρονόμοι είναι προτιμότερο να τοποθετούνται σε σημεία με αρκετά υψηλές τάσεις για όλες τις συνθήκες κανονικής λειτουργίας, έτσι ώστε μια κατάσταση χαμηλής τάσης να υποδεικνύει αξιόπιστα την υπερφόρτιση.



Σχ. 5.5 Αποκεντρωμένο σχήμα αποκοπής φορτίου

Στο Σχ. 5.6 παρουσιάζεται η υλοποίηση του βασικού σχήματος αποκοπής φορτίου με αποκεντρωμένο έλεγχο σε έναν υποσταθμό διανομής [BFG95]. Το στοιχείο υποτάσεως (27-2) παρακολουθεί την τάση και στις τρεις φάσεις του ζυγού ΥΤ, ώστε να μην ενεργοποιηθεί κατά την εμφάνιση ασύμμετρων σφαλμάτων και λοιπών ασυμμετριών. Για τον ίδιο σκοπό ένα στοιχείο τάσης (27-1) συνδέεται στο ανοικτό τρίγωνο του μετασχηματιστή τάσης, ώστε να παρακολουθεί την τάση μηδενικής ακολουθίας στο ζυγό. Η εφαρμογή της αποκοπής του φορτίου γίνεται μόνο εφόσον το στοιχείο τάσης δεν ανιχνεύσει τάση μηδενικής ακολουθίας. Επιπλέον, στιγμιαίοι ηλεκτρονόμοι υπέρτασης (50) παρακολουθούν το ρεύμα στη γραμμή για να αποτρέψουν την αποκοπή φορτίου κατά την εμφάνιση σφαλμάτων σε αυτή.



Σχ. 5.6 Υλοποίηση βασικού σχήματος αποκεντρωμένης αποκοπής φορτίου

Το κριτήριο για την εφαρμογή της αποκοπής φορτίου είναι το μέτρο της τάσης του ζυγού πρωτεύοντος του μετασχηματιστή διανομής ανηγμένο στο δευτερεύον του μετασχηματιστή τάσης. Η αποκοπή πραγματοποιείται όταν η μετρούμενη τάση θετικής ακολουθίας και στις τρεις φάσεις πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή (ρύθμιση υποτάσεως) και εφόσον δεν παρατηρηθεί τάση μηδενικής ακολουθίας ούτε σφάλμα στη γραμμή.

Οι ηλεκτρονόμοι τάσης που χρησιμοποιούνται στην υλοποίηση της αποκοπής φορτίου διαθέτουν πολλά στάδια ρύθμισης υποτάσεως (συνήθως τέσσερα) και αντίστοιχα στάδια χρονικών καθυστερήσεων σταθερού ή αντιστρόφου χρόνου. Για τη σωστή επιλογή των ρυθμίσεων του ηλεκτρονόμου θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι:

- Η μέγιστη διάρκεια ενός σφάλματος δεν υπερβαίνει το μισό δευτερόλεπτο (0,5 s).
- Η μέγιστη βύθιση της τάσης που προκαλείται σε έναν ζυγό από την απώλεια κάποιας διάταξης του συστήματος δεν ξεπερνά συνήθως το 5% της ονομαστικής τιμής.

Με βάση τα παραπάνω, το πρώτο στάδιο υποτάσεως δεν μπορεί να ρυθμίζεται σε τιμή ίση ή μεγαλύτερη από το 95% της κατώτερης τάσης κανονικής λειτουργίας. Το πρόβλημα που εισάγεται ωστόσο με τον παραπάνω περιορισμό είναι ο ηλεκτρονόμος να μη μπορεί να ανιχνεύσει καταστάσεις ασταθούς λειτουργίας κατά τις οποίες η μετρούμενη τάση δεν πέφτει ποτέ κάτω από τη ρύθμιση υποτάσεως. Η χρονική καθυστέρηση διέγερσης του ηλεκτρονόμου δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να είναι μικρότερη από 0,5 s και για την επιλογή της θα πρέπει να συνεκτιμηθεί κατά πόσο το ΣΑΤΥΦ ή άλλες διατάξεις ελέγχου τείνουν να αντιμετωπίσουν την αστάθεια ή να επιβαρύνουν την κατάσταση. Χαρακτηριστικές ρυθμίσεις υποτάσεως του ηλεκτρονόμου κυμαίνονται στο 85%-90% της ονομαστικής τάσης του ζυγού, ενώ συνήθεις ρυθμίσεις χρονικών καθυστερήσεων κυμαίνονται μεταξύ 1 και 20 s.

Ένας ηλεκτρονόμος τάσης είναι δυνατόν να λειτουργήσει εσφαλμένα στις εξής περιπτώσεις [HF99]:

- *Ανακριβής δειγματοληψία-μέτρηση της τάσης.* Οι ηλεκτρονόμοι φιλτράρουν τη συχνότητα και λαμβάνουν τιμές από σημεία μηδενισμού της κυματομορφής της τάσης. Ένα σφάλμα μπορεί να προκαλέσει μηδενικά σημεία που δεν αντιστοιχούν στην ονομαστική συχνότητα, οπότε αναλόγως του φιλτραρίσματος, η μέτρηση της τάσης μπορεί να επηρεαστεί για έναν ή δύο κύκλους.
- *Τοπικές αυξομειώσεις της συχνότητας.* Μετά από μια διαταραχή είναι δυνατό να συμβούν αυξομειώσεις της συχνότητας σε κάποια σημεία του δικτύου, ενώ η μέση συχνότητα παραμένει στην τιμή της ονομαστικής. Αν οι αυξομειώσεις αυτές είναι σημαντικές, μπορούν να διεγείρουν τον ηλεκτρονόμο.
- *Αρμονική παραμόρφωση στην κυματομορφή της τάσης.* Μια σοβαρή αρμονική παραμόρφωση της κυματομορφής της τάσης μπορεί να προκαλέσει σημεία μηδενισμού της τάσης σε χρόνους που δεν αντιστοιχούν στην ονομαστική συχνότητα.

Η διαθεσιμότητα των φορτίων προς αποκοπή καθορίζεται από τους παρακάτω παράγοντες:

- *Δυνατότητα ελέγχου των διακοπών ισχύος.* Όπως αναφέρθηκε, έχουν αναπτυχθεί κατάλληλες μεθοδολογίες προσδιορισμού των βέλτιστων ζυγών για την εφαρμογή της αποκοπής φορτίου. Ωστόσο, η τελική επιλογή των ζυγών καθορίζεται από τη δυνατότητα ελέγχου των διακοπών ισχύος στις τροφοδοτικές γραμμές.

- *Κρίσιμα φορτία.* Σε ορισμένα κρίσιμα φορτία του συστήματος δεν επιτρέπεται η διακοπή της τροφοδοσίας. Τέτοια φορτία είναι τα νοσοκομεία, κάποιοι σημαντικοί φορείς (π.χ. οργανισμοί τηλεπικοινωνιών) και ορισμένοι βιομηχανικοί πελάτες.
- *Δεσμεύσεις μέσω συμβολαίων.* Ορισμένοι καταναλωτές (συνήθως βιομηχανικοί πελάτες) δεσμεύονται μέσω συμβολαίων να επιτρέψουν την προσωρινή διακοπή της παροχής ισχύος με αντάλλαγμα χαμηλότερες τιμές χρέωσης.

Τη στιγμή της αποκοπής φορτίου είναι πιθανό ορισμένες τροφοδοτικές γραμμές που βρίσκονται στο πρόγραμμα αποκοπών να έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας για λόγους συντήρησης ή βλάβης. Επίσης το φορτίο που τροφοδοτείται μέσω μίας τέτοιας γραμμής μπορεί να εμφανίζει σημαντική χρονολογική διακύμανση. Οι παραπάνω παράγοντες μπορεί να συντελέσουν στο γεγονός μία προγραμματισμένη απόρριψη να μην επιφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα, καθώς μπορεί να έχει απορριφθεί περισσότερο φορτίο ή να απαιτείται επιπλέον αποκοπή. Όπως θα δούμε στο έβδομο κεφάλαιο, μία τέτοια διαφοροποίηση μεταξύ του προσδοκώμενου και πραγματικά απορριφθέντος φορτίου συνέβη στις 22 Ιουνίου 2006 στο Ελληνικό σύστημα, όταν λειτούργησε το σχήμα αποκοπής φορτίου για την προστασία από υπερφόρτιση της διασύνδεσης με τη Βουλγαρία.

5.3.1 Μοντελοποίηση

Η μοντελοποίηση στο πρόγραμμα WPSTAB του μέτρου της αποκοπής φορτίου με κριτήριο την τάση στηρίζεται στον αλγόριθμο που φαίνεται στον Πίν. 5.1. Διαθέσιμα προς αποκοπή φορτία θεωρούνται τα φορτία του συστήματος διανομής που τροφοδοτούνται μέσω ΣΑΤΥΦ και αυτά που συνδέονται απευθείας στην ΥΤ, στα οποία επιτρέπεται η αποσύνδεση μέρους των καταναλωτών.

Πιο συγκεκριμένα, ηλεκτρονόμοι τάσης παρακολουθούν την τάση V_1 του ελεγχόμενου ζυγού (ζυγού πρωτεύοντος του μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης στους υποσταθμούς διανομής ή ζυγού φορτίου συνδεδεμένου στην ΥΤ) και κάθε φορά που διαπιστώνεται ότι η τάση αυτή πέφτει κάτω από τη ρύθμιση υποτάσεως V_{thres} δίνουν εντολή για την αποσύνδεση ορισμένων αναχωρήσεων, που αντιστοιχούν σε ποσοστό s επί της ζήτησης του φορτίου.

Στον Πίν. 5.1 η δεύτερη έκφραση (στα δεξιά) είναι πιο περιοριστική και ισχύει μόνο όταν οι μεταβλητές ζήτησης και αγωγιμότητας δεν μεταβάλλονται κατά την προσομοίωση, οπότε μπορούν μετά την αποκοπή του φορτίου να εκφραστούν ως συνάρτηση των αρχικών τιμών τους (P_0 , Q_0 για τη ζήτηση και G_0 , B_0 για την αγωγιμότητα του φορτίου). Αντίθετα η πρώτη έκφραση (στα αριστερά) ισχύει πάντα, με τις μεταβλητές ζήτησης και αγωγιμότητας του φορτίου να αποτελούν ουσιαστικά χρονικά μεταβαλλόμενες συναρτήσεις ($P = P(t)$, $Q = Q(t)$, $G = G(t)$, $B = B(t)$) που μπορεί να αναφέρονται είτε σε αύξηση της ζήτησης είτε σε ρυθμιζόμενη αγωγιμότητα. Προφανώς προτού εφαρμοστεί η πρώτη αποκοπή φορτίου ($v=1$), η ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος του φορτίου μπορεί να είναι είτε η αρχική ($P^{(0)}=P_0$, $Q^{(0)}=Q_0$) είτε αυτή λίγο πριν την αποκοπή ($P^{(0)}=P(t^-)$, $Q^{(0)}=Q(t^-)$) σε περίπτωση ράμπας.

Για τη διέγερση του ηλεκτρονόμου ορίζεται χρονική καθυστέρηση σταθερού χρόνου t_{del} και ανοχή ϵ επί του σταδίου υποτάσεως, ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν θα εφαρμοστεί η αποκοπή για παροδική ή ασήμαντη παραβίαση της ρύθμισης υποτάσεως του ηλεκτρονόμου.

Όπως θα διαφάνηκε, το χρησιμοποιούμενο σχήμα προστασίας ακολουθεί τη λογική κλειστού βρόχου, δηλαδή οι αποκοπές πραγματοποιούνται κάθε φορά που εκπληρώνονται οι συνθήκες διέγερσης του ηλεκτρονόμου τάσης. Ορίζεται ωστόσο μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα απόρριψης φορτίου P_{shed}^{max} ανά ζυγό. Έτσι επιτρέπεται η εφαρμογή v ($v = 1, \dots, k$, όπου k ακέραιος) αποκοπών φορτίου, τέτοιων ώστε η συνολικά απορριπτόμενη ζήτηση $\Delta P_{shed} = P^{(0)} - P^{(v)}$ από κάθε ζυγό να είναι μικρότερη της μέγιστης επιτρεπόμενης P_{shed}^{max} , δηλαδή $\Delta P_{shed} \leq P_{shed}^{max}$.

Η παραπάνω μοντελοποίηση της αποκοπής φορτίου με κριτήριο την τάση στηρίζεται σε τοπικό έλεγχο της κατάστασης του συστήματος. Ωστόσο έχει ληφθεί υπόψη το ενδεχόμενο να απαιτείται ο οπλισμός του σχήματος προστασίας με κεντρική εντολή. Εναλλακτικά, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής χαρακτηριστικών ζυγών (πιλότων) σε συγκεκριμένες περιοχές του συστήματος. Σε αυτήν την περίπτωση η εφαρμογή του μέτρου γίνεται σε προκαθορισμένα φορτία με κριτήριο την τάση των πιλότων ή και άλλων ενδείξεων.

Πίν. 5.1 Αλγόριθμος μέτρου αποκοπής φορτίου με κριτήριο την τάση

ΑΝ $(V_1 \leq V_{thres} - \epsilon)$ ΚΑΙ $(t > t_{del})$ ΚΑΙ $(\Delta P_{shed} < P_{shed}^{max})$ ΤΟΤΕ

$$P^{(v)} = \left(1 - \frac{s}{1 - (v-1)s}\right) \cdot P^{(v-1)} \quad \text{ή} \quad P^{(v)} = (1 - vs) \cdot P_o$$

$$Q^{(v)} = \left(1 - \frac{s}{1 - (v-1)s}\right) \cdot Q^{(v-1)} \quad \text{ή} \quad Q^{(v)} = (1 - vs) \cdot Q_o$$

$$G^{(v)} = \left(1 - \frac{s}{1 - (v-1)s}\right) \cdot G^{(v-1)} \quad \text{ή} \quad G^{(v)} = (1 - vs) \cdot G_o$$

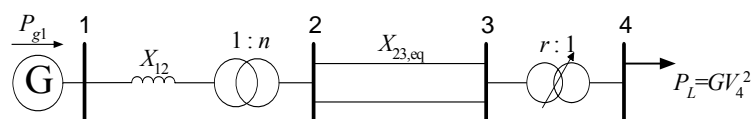
$$B^{(v)} = \left(1 - \frac{s}{1 - (v-1)s}\right) \cdot B^{(v-1)} \quad \text{ή} \quad B^{(v)} = (1 - vs) \cdot B_o$$

όπου για κάθε φορτίο που συμμετέχει στο μέτρο:

- V_1 : η τάση του ελεγχόμενου ζυγού
- V_{thres} : η ρύθμιση υποτάσεως του ηλεκτρονόμου
- ϵ : η ανοχή της ρύθμισης υποτάσεως
- t_{del} : η χρονική καθυστέρηση διέγερσης του ηλεκτρονόμου
- v : ο αριθμός των εφαρμοζόμενων αποκοπών ($v=1, \dots, k$: k ακέραιος)
- s : το ποσοστό αποκοπής επί της ζήτησης
- P_o : η αρχική ζήτηση ενεργού ισχύος
- $P^{(v-1)}$: η ζήτηση ενεργού ισχύος πριν τη v -οστή αποκοπή
- $P^{(v)}$: η ζήτηση ενεργού ισχύος μετά από τη v -οστή αποκοπή
- Q_o : η αρχική ζήτηση αέργου ισχύος
- $Q^{(v-1)}$: η ζήτηση αέργου ισχύος πριν τη v -οστή αποκοπή
- $Q^{(v)}$: η ζήτηση αέργου ισχύος μετά από τη v -οστή αποκοπή
- G_o : η αρχική ωμική αγωγιμότητα του φορτίου
- $G^{(v-1)}$: η ωμική αγωγιμότητα του φορτίου πριν τη v -οστή αποκοπή
- $G^{(v)}$: η ωμική αγωγιμότητα μετά από τη v -οστή αποκοπή
- B_o : η αρχική επαγωγική αγωγιμότητα του φορτίου
- $B^{(v-1)}$: η επαγωγική αγωγιμότητα του φορτίου πριν τη v -οστή αποκοπή
- $B^{(v)}$: η επαγωγική αγωγιμότητα μετά από τη v -οστή αποκοπή
- P_{shed}^{max} : η μέγιστη επιτρεπόμενη αποκοπή φορτίου
- ΔP_{shed} : $(= P^{(o)} - P^{(v)})$ η συνολικά απορριπτόμενη ζήτηση.

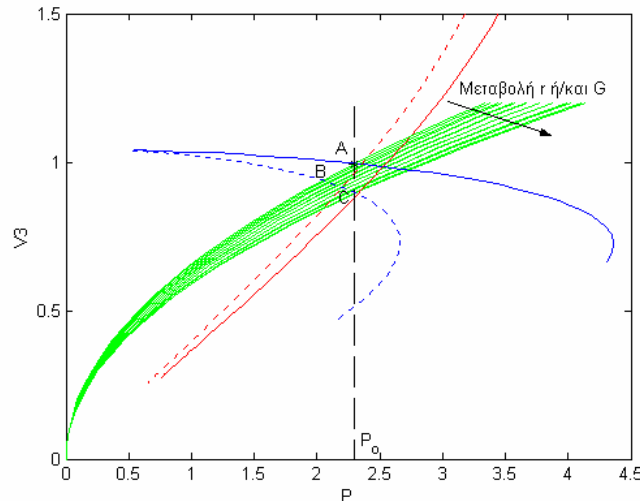
5.3.2 Εφαρμογή σε Μικρό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στην εφαρμογή που ακολουθεί χρησιμοποιείται το μικρό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του Σχ. 5.7 [VMK04], που χρησιμοποιήθηκε και στο τέταρτο κεφάλαιο (ενότητα 4.3) για τη μελέτη των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης στο ΣΑΤΥΦ. Η διαταραχή που εξετάζεται και πάλι είναι η αποσύνδεση της μίας εκ των δύο γραμμών μεταφοράς τη χρονική στιγμή $t = 1000$ s, η οποία προκαλεί την απώλεια μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας στο σύστημα.



Σχ. 5.7 Σύστημα ενός φορτίου

Ας δούμε με τη βοήθεια του Σχ. 5.8 την εξέλιξη του φαινομένου αστάθειας τάσης. Στο αρχικό σημείο ισορροπίας του συστήματος η μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου, η βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου και η χαρακτηριστική δικτύου τέμνονται στο ίδιο σημείο (σημείο A). Μετά την εμφάνιση της διαταραχής, η χαρακτηριστική δικτύου συρρικνώνεται παίρνοντας τη μορφή της εστιγμένης καμπύλης του σχήματος, ενώ το σημείο λειτουργίας του συστήματος μεταπηδά στο σημείο B. Το σημείο μεταγωγής C αποτελεί όριο φόρτισης λόγω περιορισμού υπερδιέγερσης της γεννήτριας (όριο φόρτισης λόγω μεταγωγής) με αποτέλεσμα να μην υπάρχει τομή της μακροπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου με τη νέα χαρακτηριστική δικτύου.



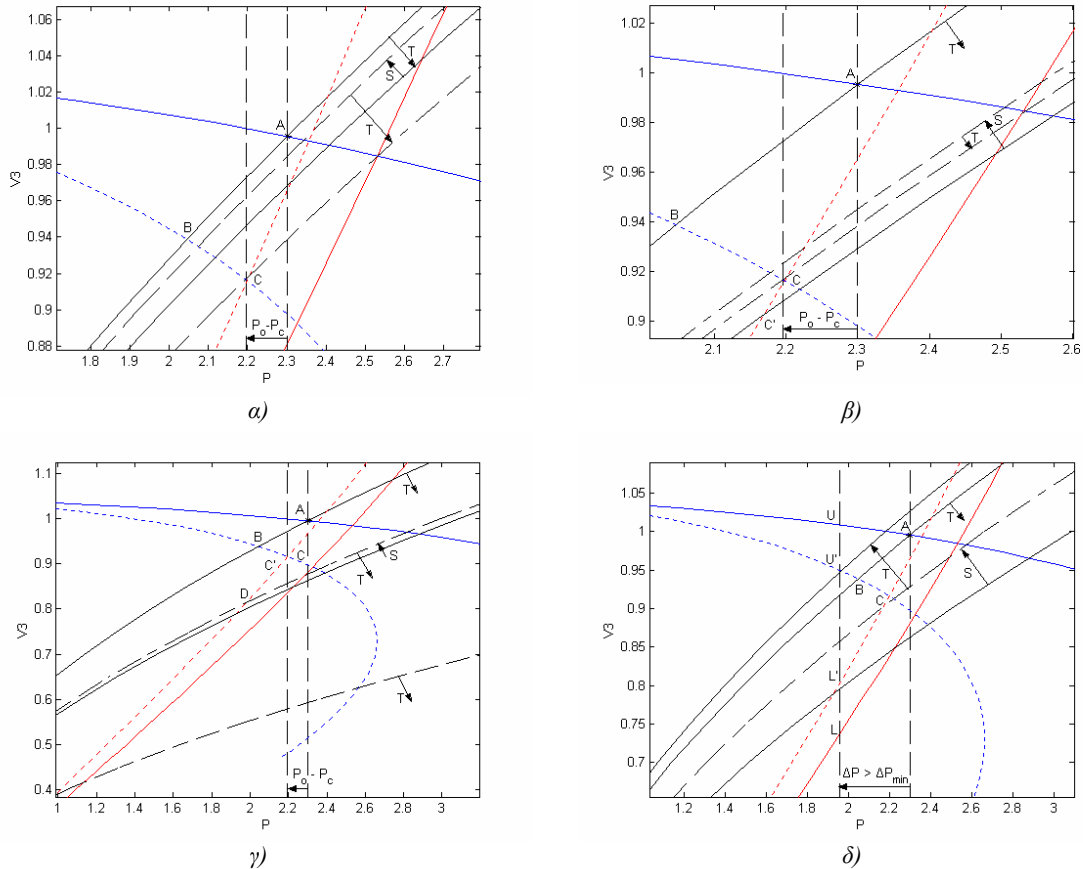
Σχ. 5.8 Επίδραση δυναμικών του συστήματος στις χαρακτηριστικές καμπύλες

Συνεπώς, οι δυο μηχανισμοί αποκατάστασης της ισχύος (ΣΑΤΥΦ και αυτορρύθμιση φορτίου) είναι ασταθείς και δεν είναι σε θέση να επαναφέρουν σημείο ισορροπίας. Τόσο η μεταβολή του λόγου μετασηματισμού του ΣΑΤΥΦ όσο και η αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου έχουν ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση της βραχυπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου προς το κάτω τμήμα της χαρακτηριστικής δικτύου με αποτέλεσμα αν δεν παρθεί κάποιο μέτρο προστασίας να επέλθει κατάρρευση. Εφαρμόζοντας διαδοχικές αποκοπές φορτίου, σε κάθε αποκοπή εκτός της μακροπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου που μετακινείται προς τα αριστερά και η βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου μετακινείται προς τα πάνω λόγω της μείωσης της αγωγιμότητας. Αυτό έχει θετική επίδραση στην εφαρμογή του μέτρου, γιατί όπως θα δούμε παρακάτω αυξάνεται ο διαθέσιμος χρόνος εκτέλεσης.

Προσδιορισμός ελάχιστης αποκοπής φορτίου

Είναι προφανές ότι η ελάχιστη αποκοπή φορτίου για την αποκατάσταση μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας είναι ίση με $P_0 - P_C$, όπου P_0 η αρχική ζήτηση του φορτίου και P_C η ισχύς που αντιστοιχεί στο κρίσιμο σημείο C του συστήματος. Ωστόσο, μετά τη διέλευση συγκεκριμένου χρόνου, η ελάχιστη αναγκαία αποκοπή φορτίου αυξάνεται. Με τη βοήθεια του Σχ. 5.9 εξηγείται στη συνέχεια η μεταβολή της ελάχιστης αποκοπής φορτίου συναρτήσει του χρόνου εφαρμογής. Για την καλύτερη κατανόηση του σχήματος είναι αναγκαίες οι ακόλουθες επεξηγήσεις:

- Η μπλε (αντίστοιχα κόκκινη) συνεχής καμπύλη αποτελεί τμήμα της χαρακτηριστικής δικτύου πριν τη διαταραχή με τη γεννήτρια σε λειτουργία αυτόματης ρύθμισης τάσης (αντίστοιχα σε λειτουργία με περιορισμό υπερδιέγερσης).
- Η μπλε (αντίστοιχα κόκκινη) εστιγμένη καμπύλη αποτελεί τμήμα της χαρακτηριστικής δικτύου μετά τη διαταραχή με τη γεννήτρια σε λειτουργία αυτόματης ρύθμισης τάσης (αντίστοιχα σε λειτουργία με περιορισμό υπερδιέγερσης).
- Με μαύρη συνεχή καμπύλη παριστάνονται οι βραχυπρόθεσμες χαρακτηριστικές φορτίου πριν την αποκοπή φορτίου, ενώ με μαύρη διακεκομμένη αυτές μετά την αποκοπή φορτίου.



Σχ. 5.9 Μελέτη της έλξης προς το σημείο ισορροπίας

Όπως είδαμε, αμέσως μετά τη διαταραχή το σύστημα μεταπηδά από το σημείο A στο B. Στο σημείο αυτό η τάση του φορτίου βρίσκεται κάτω από τη νεκρή ζώνη ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ και η καταναλισκόμενη ισχύς είναι μικρότερη από την αρχική ζήτηση P_o . Το ΣΑΤΥΦ που στη θεωρούμενη περίπτωση αντιπροσωπεύει τη σχετικά πιο γρήγορη δυναμική του συστήματος δρα πρώτο μειώνοντας το λόγο μετασχηματισμού, ενώ η αυτορρύθμιση του φορτίου που αντιπροσωπεύει τη βραδύτερη δυναμική ακολουθεί αυξάνοντας την αγωγιμότητα. Το συνολικό αποτέλεσμα από την ταυτόχρονη δράση των δύο μηχανισμών αποκατάστασης της ισχύος είναι διακριτές μεταβάσεις T της βραχυπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου. Για λόγους καλύτερης απεικόνισης δεν φαίνονται στο σχήμα όλες οι μεταβάσεις της βραχυπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου που αντιστοιχούν σε κάθε μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού και της αγωγιμότητας, αλλά οι πιο αντιπροσωπευτικές.

Περίπτωση 1. Η αποκοπή φορτίου πραγματοποιείται όταν το σημείο λειτουργίας του συστήματος βρίσκεται πριν το κρίσιμο σημείο C.

Αν η ελάχιστη αποκοπή φορτίου $P_o - P_C$ (μετάβαση S στο Σχ. 5.9α) πραγματοποιηθεί ενώ το σημείο λειτουργίας του συστήματος βρίσκεται πριν το κρίσιμο σημείο C, το σύστημα τελικά θα ισορροπήσει στο σημείο αυτό ικανοποιώντας τη μειωμένη ζήτηση P_C .

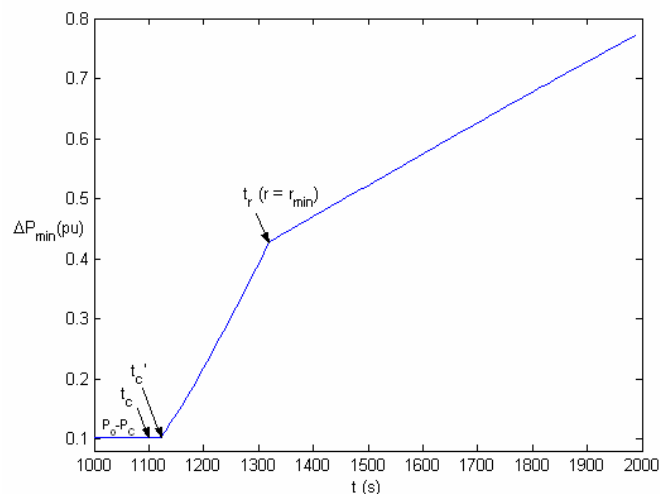
Περίπτωση 2. Η αποκοπή φορτίου πραγματοποιείται όταν το σημείο λειτουργίας του συστήματος βρίσκεται μετά το κρίσιμο σημείο C.

α) Όταν το σημείο λειτουργίας του συστήματος βρίσκεται ανάμεσα στα σημεία C και C' (Σχ. 5.9β), η ελάχιστη αποκοπή φορτίου παραμένει ίση με $P_o - P_C$ και μετά την εφαρμογή της (μετάβαση S) το σύστημα ισορροπεί πάλι στο κρίσιμο σημείο C.

β) Όταν το σημείο λειτουργίας του συστήματος βρίσκεται μετά το σημείο C' (Σχ. 5.9γ), η αποκοπή φορτίου $P_o - P_C$ δεν είναι επαρκής για την αποκατάσταση μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας. Πράγματι, σε μια τέτοια χρονική στιγμή η αποκοπή φορτίου ίση με $P_o - P_C$ (μετάβαση S) προκαλεί τη μεταπήδηση του σημείου λειτουργίας του συστήματος στο σημείο D. Το σημείο αυτό βρίσκεται στα αριστερά της νέας μακροπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου P_C και κατά συνέπεια δεν ανήκει στη

περιοχή έλξης του σημείου ισορροπίας C. Επομένως μετά την αποκοπή η βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου συνεχίζει να μετακινείται ακολουθώντας τα βέλη T, με αποτέλεσμα να απομακρύνεται περαιτέρω από το σημείο C οδηγώντας το σύστημα σε κατάρρευση. Προκειμένου το σύστημα να ισορροπήσει, θα πρέπει τη θεωρούμενη χρονική στιγμή να αποκοπεί περισσότερη ποσότητα. Πραγματοποιώντας αποκοπή φορτίου μεγαλύτερη από την ελάχιστη $P_o - P_C$ προκύπτουν δύο σημεία ισορροπίας (Σχ. 5.9δ), ένα ευσταθές U' και ένα ασταθές L' . Η περιοχή έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας U' είναι το τμήμα $U'-C-L'$ της χαρακτηριστικής δικτύου. Όσο το σημείο λειτουργίας του συστήματος μετά την αποκοπή βρίσκεται σε αυτό το τμήμα ($U'-C-L'$), θα έλκεται προς το U' .

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η σχέση μεταξύ της ελάχιστης ποσότητας αποκοπής φορτίου ΔP_{min} και του χρόνου t εφαρμογής της αποκοπής παίρνει τη μορφή της καμπύλης του Σχ. 5.10. Στο διάγραμμα αυτό ο χρόνος t_C αντιστοιχεί σε αυτόν που απαιτείται ώστε το σημείο λειτουργίας του συστήματος μετά τη διαταραχή να περάσει από το κρίσιμο σημείο C. Ο διαθέσιμος χρόνος για την επίτευξη ισορροπίας στο σημείο C είναι t_C , ίσος δηλαδή με το χρόνο που απαιτείται για να περάσει η βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική φορτίου από το σημείο C'. Επομένως, όταν η καθυστέρηση είναι μικρότερη από t_C , αποκόπτοντας την ποσότητα $P_o - P_C$ καταφέρνουμε να ισορροπήσουμε το σύστημα ακριβώς στο σημείο C. Μετά τη χρονική στιγμή t_C όσο πιο αργά γίνεται η αποκοπή τόσο περισσότερο φορτίο πρέπει να αποκοπεί προκειμένου να σωθεί το σύστημα. Πράγματι, πέραν του χρόνου t_C παρατηρείται γραμμική αύξηση του φορτίου που πρέπει να αποκοπεί [Μοο03,Κοτ03]. Η κλίση ωστόσο της αύξησης αυτής μειώνεται μετά τη χρονική στιγμή t_r που ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ εξαντλεί το όριο ρύθμισής του ($r = r_{min}$).

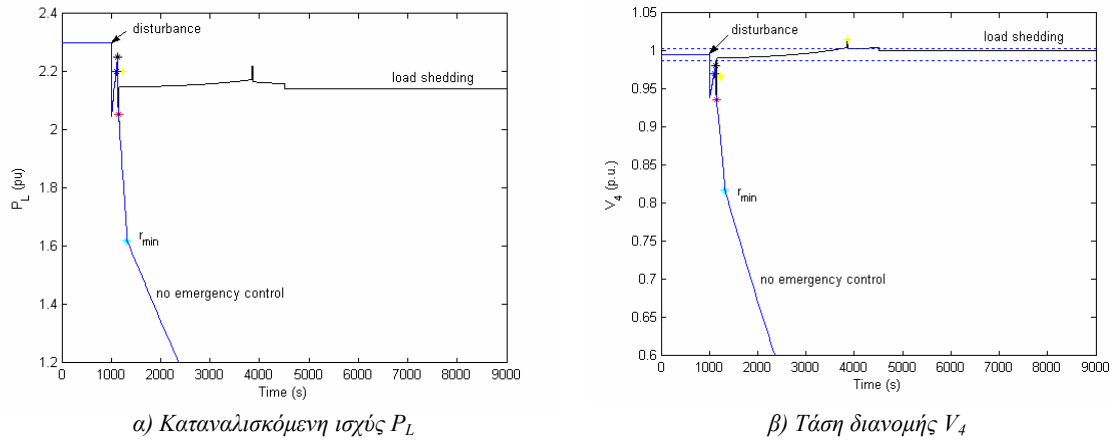


Σχ. 5.10 Ελάχιστη αποκοπή $\Delta P_{min}(t)$ συναρτήσει του χρόνου

Προσομοίωση αποκοπής φορτίου

Παρακάτω ακολουθεί η προσομοίωση της αποκοπής φορτίου με κριτήριο την τάση στο εξεταζόμενο σενάριο. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η απώλεια της γραμμής μεταφοράς συμβαίνει τη χρονική στιγμή $t = 1000$ s. Η αποκοπή φορτίου εφαρμόζεται χωρίς καθυστέρηση ($t_{del} = 0$) κάθε φορά που η τάση πρωτεύοντος V_3 του μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης υποβιβάζεται πέραν της ρύθμισης υποτάσεως $V_{thres} = 0,85$ αμ του ηλεκτρονόμου. Το ποσοστό αποκοπής s λαμβάνεται ίσο με 5% επί της αρχικής ζήτησης του φορτίου.

Παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή μίας μόνο αποκοπής φορτίου (Σχ. 5.11) έχουμε πλήρη αποκατάσταση της τάσης διανομής V_4 εντός της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ και σταθεροποίηση της καταναλισκόμενης ισχύος P_L του φορτίου στη ζήτηση που προκύπτει μετά την αποκοπή. Συγκρίνοντας την αποκοπή φορτίου με τα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ που εφαρμόστηκαν στην ενότητα 4.3 για το ίδιο σενάριο, είναι εμφανές ότι η αποκοπή φορτίου είναι το μόνο από τα παραπάνω μέτρα που αποκαθιστά μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας.



α) Καταναλισκόμενη ισχύς P_L

β) Τάση διανομής V_4

Σχ. 5.11 Προσομοίωση συμπεριφοράς ηλεκτρικού συστήματος

5.3.3 Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα

Στην παράγραφο αυτή ακολουθεί η εφαρμογή του μέτρου της αποκοπής φορτίου με κριτήριο την τάση στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα. Συγκεκριμένα, με βάση το στιγμιότυπο ροής ισχύος της 12^{ης} Ιουλίου 2004 προσομοιώνονται εκ νέου τα Σενάρια I και II που περιγράφηκαν στην παράγραφο 4.4.2. Τα σενάρια αυτά χρησιμοποιήθηκαν και για την ανάλυση των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ στο Ελληνικό σύστημα.

Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν, ισχύουν τα δεδομένα και οι παραδοχές που αναφέρονται στην παράγραφο 4.4.1. Συγκεκριμένα, διαθέσιμα προς αποκοπή φορτία θεωρούνται τα φορτία των περιοχών της Πελοποννήσου, της Αττικής, της Στερεάς Ελλάδας και της Θεσσαλίας που τροφοδοτούνται μέσω ΣΑΤΥΦ ή που συνδέονται απευθείας στην ΥΤ. Επίσης λόγω της προσαρμογής της νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ, το κάτω όριο του εύρους μεταβολής της λήψης τους αφήνεται πρακτικά ελεύθερο. Οι τιμές των παραμέτρων εφαρμογής της μεθόδου φαίνονται στον Πίν. 5.2. Οι παράμετροι αυτές σχετίζονται με την υλοποίηση της μεθόδου όπως αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο 5.3.1.

Πίν. 5.2 Παράμετροι εφαρμογής

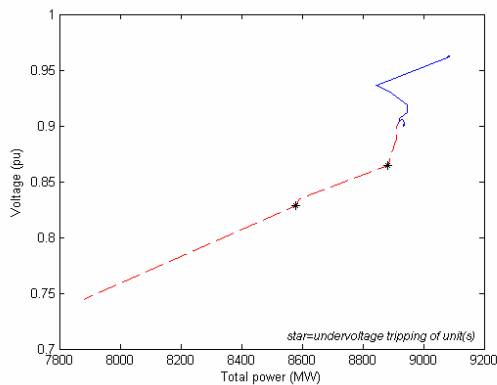
V_{thres}	=	0,85 αμ
ε	=	10^{-3} αμ
t_{del}	=	10 s
s	=	5%
P_{shed}^{max}	=	$20\% \cdot P_o$

Όπως φαίνεται από τον πίνακα, η ρύθμιση υποτάσεως του ηλεκτρονόμου επιλέχθηκε στο 85% (127,5 kV) της ονομαστικής τάσης των ζυγών 150 kV. Η επιλογή αυτή είναι αρκετά χαμηλή δεδομένου όμως του γεγονότος ότι στο αρχικό σημείο οι τάσεις του συστήματος είχαν μικρές τιμές κρίνεται δικαιολογημένη. Επιπλέον, η επιλογή της συγκεκριμένης ρύθμισης έγινε με σκοπό την εναρμονισμένη δράση των διαθέσιμων μέτρων προστασίας του συστήματος. Για την ακρίβεια θυμίζουμε ότι το κατώφλι ενεργοποίησης των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ για τα ίδια σενάρια ορίστηκε στο 87% (130,5 kV) της ονομαστικής τάσης των ζυγών 150 kV. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση ενός πιο σύνθετου σχήματος αποκοπής φορτίου, υπάρχει η πρόθεση να εφαρμοστούν αρχικά τα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ και αν αυτά αποτύχουν στην αντιμετώπιση της αστάθειας να εφαρμοστούν σε δεύτερο στάδιο οι αποκοπές του φορτίου. Έτσι επιτυγχάνεται αρχικά «ήπια» μείωση του φορτίου μέχρι την άμεση απόρριψή του, η οποία έχει σαφώς δυσμενέστερες συνέπειες προς τους καταναλωτές.

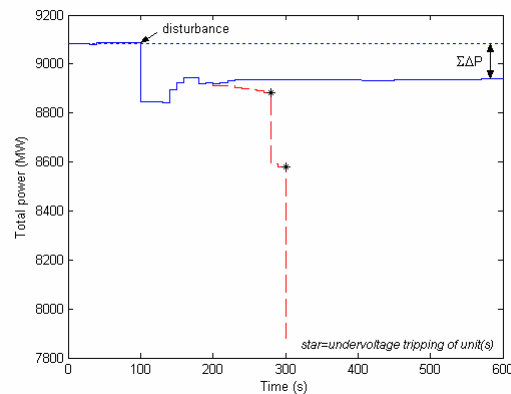
Προσομοίωση Σεναρίου I

Η εφαρμογή του μέτρου στην περίπτωση του Σεναρίου I επιφέρει ισορροπία στο σύστημα. Στο νέο σημείο ισορροπίας το συνολικό φορτίο ανέρχεται σε 8940 MW (Σχ. 5.12), δηλαδή σε σχέση με την αρχική ζήτηση υπάρχει ένα μη εξυπηρετηθέν φορτίο $\Sigma \Delta P$ ίσο με 144 MW. Η συνολικά απορριπτόμενη ενεργός ΔP_{shed} και άεργος ΔQ_{shed} ζήτηση ανά ζυγό όπου εφαρμόστηκε η αποκοπή, καθώς και η χρονική στιγμή εφαρμογής κάθε σταδίου αποκοπής, παρατίθεται στον Πίν. 5.3. Το μη εξυπηρετηθέν φορτίο $\Sigma \Delta P$ δεν είναι ακριβώς ίσο με τη συνολική αποκοπή της ζήτησης (126,57 MW) λόγω της επίδρασης της νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ. Οι διακεκομμένες καμπύλες στα σχήματα που ακολουθούν αντιστοιχούν στην απόκριση του συστήματος χωρίς τη λήψη κάποιου μέτρου προστασίας. Οι αστερίσκοι υποδεικνύουν την αποσύνδεση ορισμένων γεννητριών για λόγους υποτάσεως, ενώ οι κύκλοι τη στιγμή εφαρμογής της αποκοπής φορτίου.

Οι χαμηλότερες τάσεις του συστήματος εμφανίζονται στην περιοχή της Αττικής με αποτέλεσμα η αποκοπή φορτίου να εφαρμόζεται πρώτα σε ζυγούς που βρίσκονται στην περιοχή αυτή. Επειδή το δίκτυο διανομής της Αττικής ανήκει στην αρμοδιότητα της ΔΕΗ, δεν υπάρχει πλήρης εποπτεία του από το κέντρο ελέγχου. Για την ακρίβεια, ο ΔΕΣΜΗΕ ελέγχει μόνο τους ζυγούς 150 kV των υποσταθμών διανομής της Αττικής. Συνεπώς, όλες οι αποκοπές στην Αττική πραγματοποιούνται από τέτοιους ζυγούς φορτίου 150 kV. Για τα φορτία που τροφοδοτούνται από τους ζυγούς αυτούς έχει υποτεθεί αποκατάσταση της ισχύος μέσω ιδεατού μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης που ρυθμίζει την τάση σε ένα φανταστικό ζυγό MT. Λόγω της μεγάλης κατανάλωσης που εξυπηρετούν οι ζυγοί της Αττικής αλλά και αυτοί της Στερεάς Ελλάδας, όπου συγκεντρώνονται οι περισσότερες από τις μεγάλες βιομηχανίες της χώρας, η εφαρμογή της αποκοπής φορτίου στις περιοχές αυτές είναι αρκετή για να μην πραγματοποιηθούν αποκοπές στη Θεσσαλία και τη Πελοπόννησο.



α) PV καμπύλη συστήματος



β) Καμπύλη φορτίου συστήματος - χρόνου

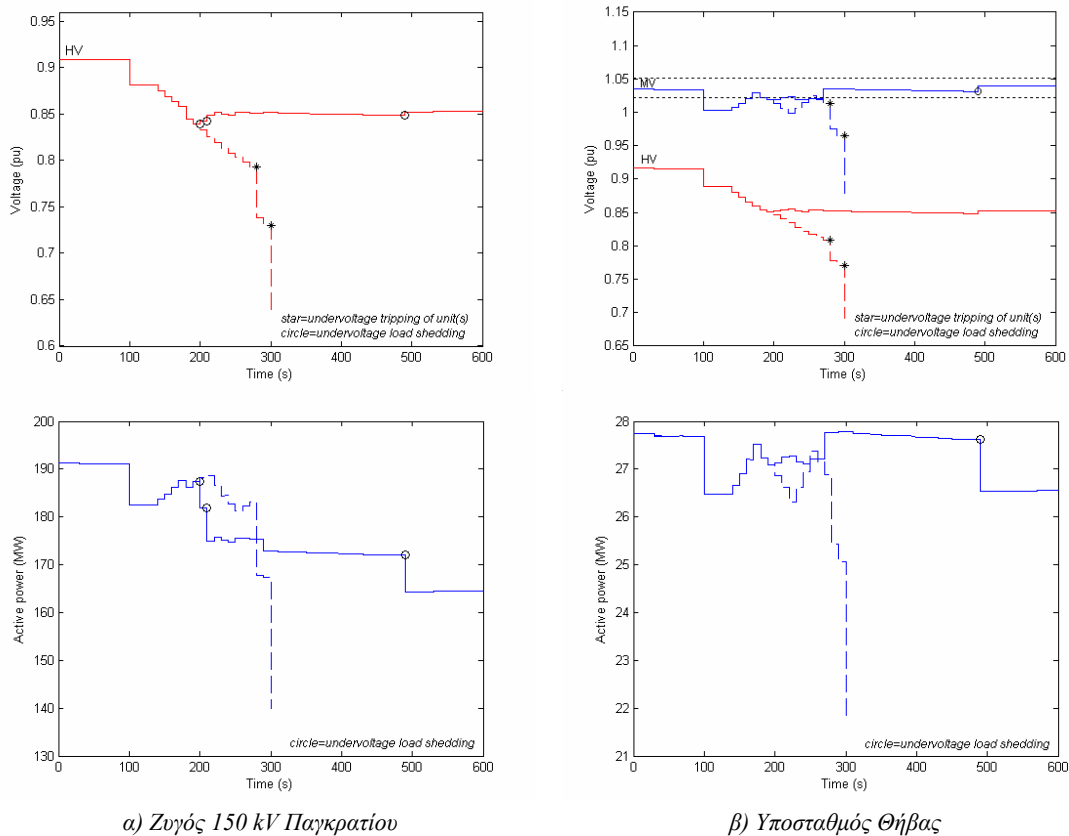
Σχ. 5.12 Συμπεριφορά συστήματος στο Σενάριο I με αποκοπή φορτίου

Πίν. 5.3 Απορριπτόμενη ζήτηση φορτίου

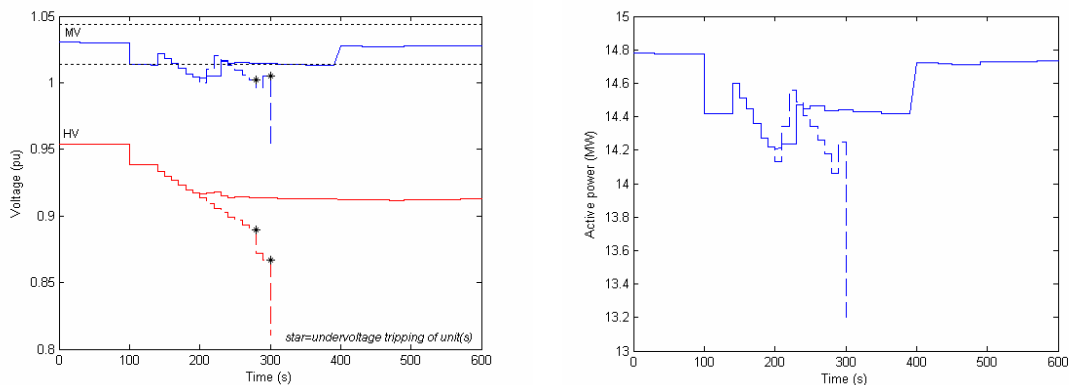
ZYΓΟΙ (20 kV)	t (s)	ΔP_{shed} (MW)	ΔQ_{shed} (MVar)	ZYΓΟΙ (150 kV)	t (s)	ΔP_{shed} (MW)	ΔQ_{shed} (MVar)
Κωπαΐδα 51	200,210,260,270	2,64	0,64	Παγκράτι 31	200,210,220,430	27,18	7,79
Κωπαΐδα 52	200,210,260,270	2,64	0,64	Παγκράτι 32	200,210,490	28,69	13,17
Θήβα 51	490	1,39	0,80	Πειραιάς 31	200,210,220,230	29,91	8,58
Θήβα 52	490	1,45	0,42	Ελληνικό 31	200,210	3,81	0,82
Θήβα 53	490	1,14	0,30	Ν. Σμύρνη 34	200,210,220,430	20,08	5,77
Λιβαδειά 51	200,210,260,270	3,82	1,54				
Λιβαδειά 52	200,210,260,270	3,82	1,54		ΣΥΝΟΛΟ	126,57	42,01

Στο Σχ. 5.13 φαίνεται η διακύμανση των τάσεων και της καταναλισκόμενης ισχύος σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις όπου εφαρμόζεται το μέτρο της αποκοπής φορτίου: στο ζυγό 150 kV του Παγκρατίου και στον υποσταθμό διανομής της Θήβας. Όπως φαίνεται, η σκόπιμη μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος που επιτελείται σε ορισμένα φορτία με την εφαρμογή του μέτρου της αποκοπής φορτίου αποβαίνει εις όφελος της ευστάθειας των τάσεων.

Στους υποσταθμούς του συστήματος όπου δεν πραγματοποιείται αποκοπή φορτίου, η αποκατάσταση της ισχύος γίνεται μέσω του μηχανισμού του ΣΑΤΥΦ. Σε αυτές τις περιπτώσεις, και με τη συμβολή των αποκοπών φορτίου στο υπόλοιπο σύστημα, οι τάσεις της διανομής σταθεροποιούνται εντός της νεκρής ζώνης ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ, με αποτέλεσμα να υπάρχει αποκατάσταση της καταναλισκόμενης ισχύος κοντά στην αρχική ζήτηση (Σχ. 5.14). Ωστόσο λόγω της επίδρασης της νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ, το συνολικό φορτίο του συστήματος ισορροπεί σε τιμή κοντά και όχι ακριβώς στη μειωμένη ζήτηση που προκύπτει μετά την απόρριψη.



Σχ. 5.13 Χρονική διακύμανση τάσεων και καταναλισκόμενης ισχύος σε δύο ζυγούς αποκοπής φορτίου



Σχ. 5.14 Χρονική διακύμανση τάσεων και καταναλισκόμενης ισχύος υποσταθμού Μεθάνων

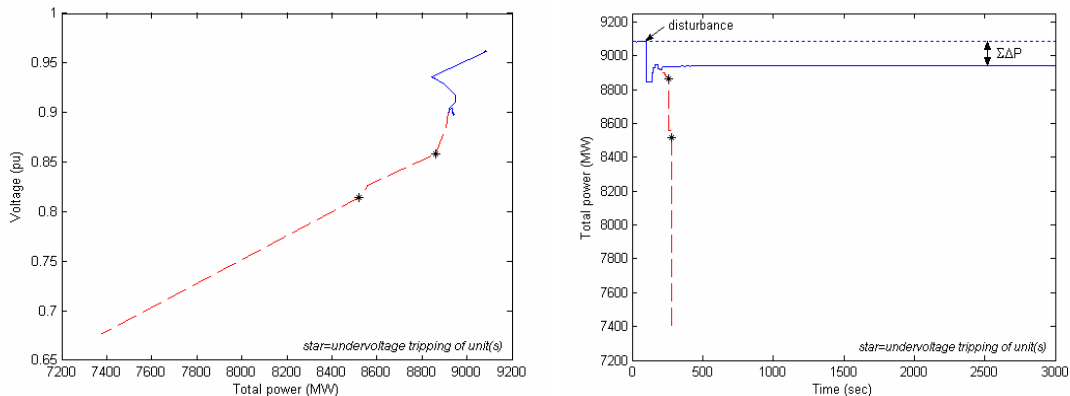
Προσομοίωση Σεναρίου II

Στο Σενάριο II γίνεται επιπλέον η θεώρηση ότι τα φορτία του συστήματος είναι δυναμικής φύσεως. Για την ακρίβεια θεωρείται ότι κάθε φορτίο διαθέτει μηχανισμό αυτορρύθμισης, ο οποίος τείνει να αποκαταστήσει την καταναλισκόμενη ισχύ στην αρχική ζήτηση P_0 με μία ανοχή $\pm 1\%$ ως προς αυτή.

Η προσομοίωση του Σεναρίου II χωρίς τη θεώρηση κανενός μέτρου προστασίας έχει ως αποτέλεσμα την κατάρρευση του συστήματος υπό την ταυτόχρονη δράση των δυο μηχανισμών αποκατάστασης της ισχύος, των ΣΑΤΥΦ και της αυτορρύθμισης των φορτίων. Η εφαρμογή του μέτρου της αποκοπής φορτίου με κριτήριο την τάση επιφέρει ισορροπία στο σύστημα (Σχ. 5.15). Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι η αποκοπή φορτίου αποτελεί το μόνο μέτρο προστασίας από τα εξεταζόμενα στη διατριβή που αποκαθιστά μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας στο σύστημα κατά την προσομοίωση του Σεναρίου II. Πράγματι κανένα από τα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης ΣΑΤΥΦ δεν είχε το ίδιο αποτέλεσμα.

Στο νέο σημείο ισορροπίας το συνολικό φορτίο του συστήματος ανέρχεται σε 8941 MW, δηλαδή σε σχέση με την αρχική ζήτηση υπάρχει ένα μη εξυπηρετηθέν φορτίο $\Sigma\Delta P$ ίσο με 143 MW. Το μη εξυπηρετηθέν φορτίο είναι περίπου ίσο με τη συνολική αποκοπή της ζήτησης (146,13 MW), γεγονός που επιβεβαιώνει τη συμβολή του μηχανισμού αυτορρύθμισης των φορτίων στη διαδικασία αποκατάστασης της ισχύος στη ζήτηση που προκύπτει μετά την αποκοπή.

Η συνολικά απορριπτόμενη ενεργός ΔP_{shed} και άεργος ΔQ_{shed} ζήτηση ανά ζυγό όπου εφαρμόστηκε η αποκοπή, καθώς και η χρονική στιγμή εφαρμογής κάθε σταδίου αποκοπής, παρατίθενται στον Πίν. 5.4. Παρατηρούμε ότι σε σχέση με την προσομοίωση του Σεναρίου I υπάρχει μεγαλύτερη διασπορά στους ζυγούς στους οποίους εφαρμόζεται η αποκοπή. Συγκεκριμένα αποκοπές πραγματοποιούνται στην Αττική, στη Στερεά Ελλάδα και στη Θεσσαλία, ενώ και πάλι καμία αποκοπή δεν πραγματοποιείται στην Πελοπόννησο. Το συνολικό φορτίο που αποκόπτεται είναι περισσότερο από αυτό στο Σενάριο I και αυτό οφείλεται στην αρνητική επίδραση του μηχανισμού αυτορρύθμισης των φορτίων κατά την ασταθή διαδικασία αποκατάστασης της ισχύος.



α) PV καμπύλη συστήματος

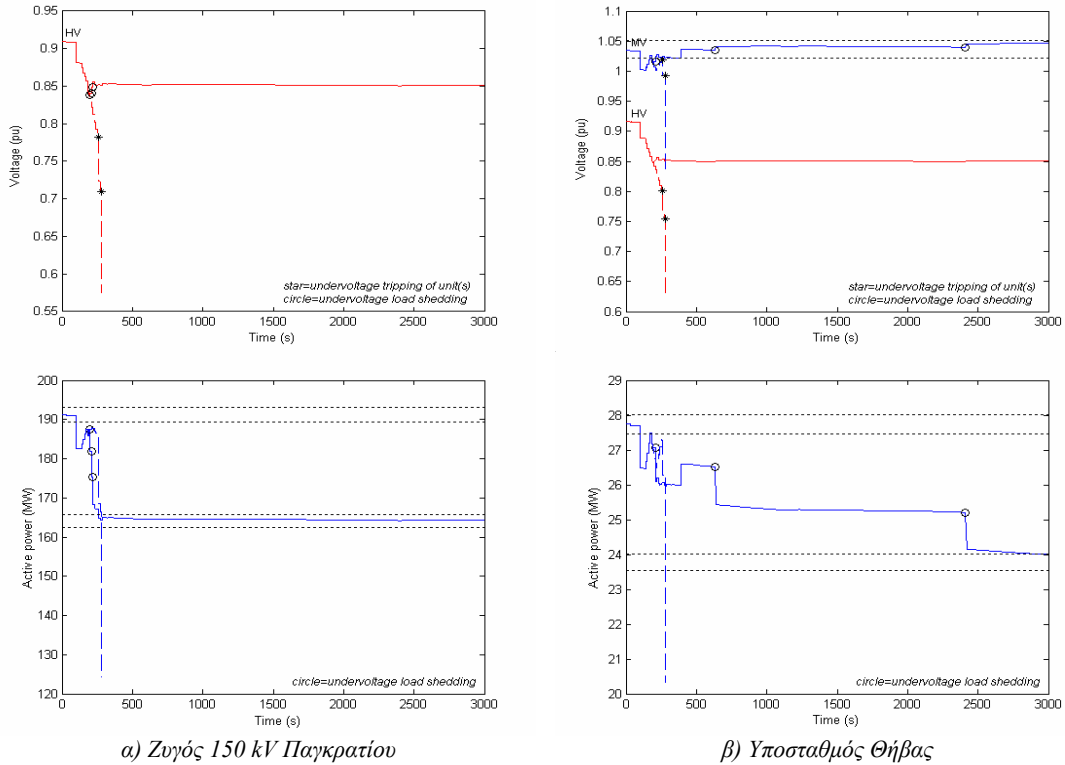
β) Καμπύλη φορτίου συστήματος - χρόνου

Σχ. 5.15 Συμπεριφορά συστήματος στο Σενάριο II με αποκοπή φορτίου

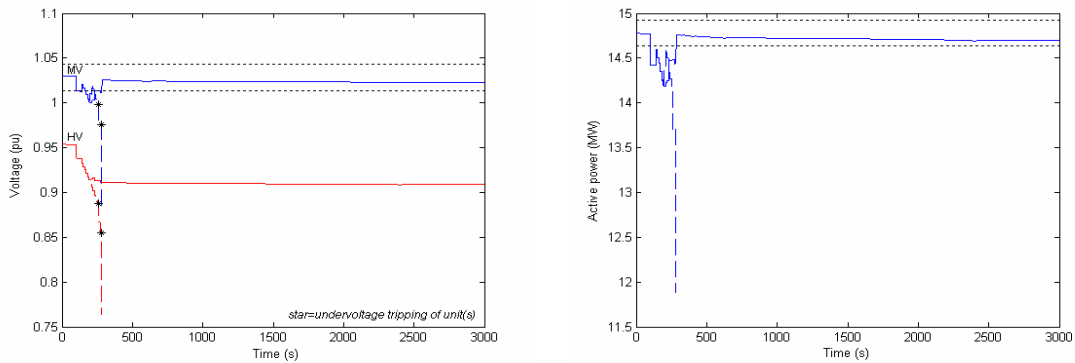
Πίν. 5.4 Απορριπτόμενη ζήτηση φορτίου

ΖΥΓΟΙ (20 kV)	t (s)	ΔP_{shed} (MW)	ΔQ_{shed} (MVar)	ΖΥΓΟΙ (150 kV)	t (s)	ΔP_{shed} (MW)	ΔQ_{shed} (MVar)
Κωπαΐδα 51	200,210,220,250	2,64	0,64	Παγκράτι 31	200,210,220,250	27,18	7,79
Κωπαΐδα 52	200,210,220,250	2,64	0,64	Παγκράτι 32	200,210,250	28,69	13,17
Θήβα 51	210,640,2420	4,16	2,38	Πειραιάς 31	190,200,210,220	29,91	8,58
Θήβα 52	210,640,2420	4,35	1,27	Ελληνικό 31	200,210	3,81	0,82
Θήβα 53	210,640,2420	3,41	0,90	Ν. Σμύρνη 34	200,210,220,250	20,08	5,77
Λιβαδειά 51	200,210,220,250	3,82	1,54	Ψυχικό 32	210	6,71	2,52
Λιβαδειά 52	200,210,220,250	3,82	1,54				
Αλμυρός 51	400,1290,2790	2,46	1,16				
Αλμυρός 52	400,1290,2790	2,45	1,16				
					ΣΥΝΟΛΟ	146,13	49,88

Στο Σχ. 5.16 φαίνεται η διακύμανση των τάσεων και της καταναλισκόμενης ισχύος στο ζυγό 150 kV του Παγκρατίου και στον υποσταθμό διανομής της Θήβας, όπου πραγματοποιήθηκε αποκοπή φορτίου. Στα διαγράμματα της καταναλισκόμενης ισχύος η υψηλή νεκρή ζώνη ρύθμισης αντιστοιχεί στην αρχική ζήτηση, ενώ η χαμηλή νεκρή ζώνη στη ζήτηση μετά τη συνολική αποκοπή φορτίου στο ζυγό. Παρατηρούμε ότι μετά την αποκοπή, η αυτορρύθμιση του φορτίου αποκαθιστά την ισχύ εντός της χαμηλής νεκρής ζώνης. Γενικά, μετά την πραγματοποίηση των αποκοπών έχουμε σταθεροποίηση των τάσεων και της ισχύος σε βιώσιμα επίπεδα λειτουργίας. Το ίδιο συμβαίνει και στις περιπτώσεις όπου δεν εφαρμόζεται αποκοπή φορτίου (Σχ. 5.17), με τη διαφορά ότι η αποκατάσταση της ισχύος γίνεται στην αρχική ζήτηση του φορτίου. Ωστόσο λόγω της επίδρασης της νεκρής ζώνης, το συνολικό φορτίο του συστήματος ισορροπεί σε τιμή κοντά και όχι ακριβώς στη μειωμένη ζήτηση που προκύπτει μετά την απόρριψη.



Σχ. 5.16 Χρονική διακύμανση τάσεων και καταναλισκόμενης ισχύος σε δύο ζυγούς αποκοπής φορτίου



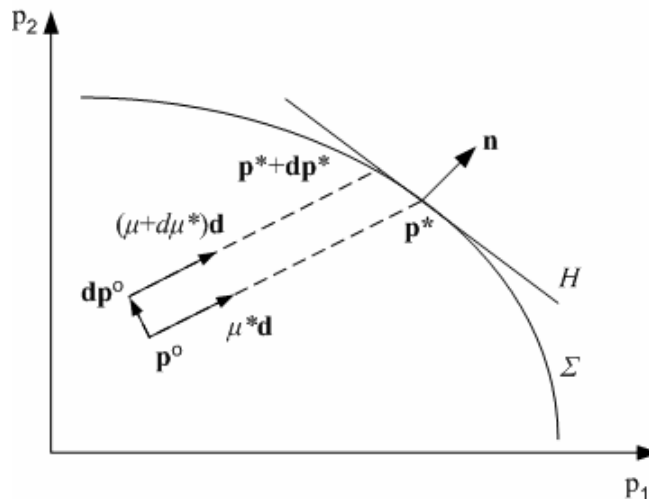
Σχ. 5.17 Χρονική διακύμανση τάσεων και καταναλισκόμενης ισχύος υποσταθμού Μεθάνων

5.4 ΑΠΟΚΟΠΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΠΡΟΣ ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ ΕΠΑΡΚΟΥΣ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

5.4.1 Επίδραση Παραμέτρων Φορτίου στο Περιθώριο Φόρτισης

Το περιθώριο φόρτισης ως προς συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας ενός ηλεκτρικού συστήματος, προσδιορίζει την ποσότητα του επιπρόσθετου φορτίου σε μια δεδομένη κατεύθυνση καταπόνησης (αύξησης του φορτίου), που θα προκαλέσει κατάρρευση τάσης στο σύστημα [VCV98]. Αν το περιθώριο φόρτισης που αντιστοιχεί σε ένα σημείο λειτουργίας δεν είναι επαρκές, είναι σκόπιμο να υπολογίσουμε την ποσοτική και ποιοτική επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων του ηλεκτρικού συστήματος στο περιθώριο αυτό. Την επίδραση αυτή μελετά η ανάλυση ευαισθησίας του περιθωρίου φόρτισης ως προς τις διάφορες παραμέτρους του συστήματος [GDA97,Kar05], με βάση την οποία εξάγονται οι μεταβολές εκείνες των παραμέτρων που εξασφαλίζουν επαρκή περιθώρια ασφάλειας για τα διάφορα πιθανά λειτουργικά σημεία του.

Σε ένα ηλεκτρικό σύστημα οι παράμετροι που ενδιαφέρουν είναι τόσο οι παράμετροι φορτίου, με την αντίστοιχη δράση (αποκοπή φορτίου) να συνιστά μέτρο ελέγχου εκτάκτου ανάγκης, όσο και παράμετροι που δεν έχουν άμεση επίδραση στους καταναλωτές, όπως οι εγχύσεις ισχύος στις μονάδες παραγωγής ή οι λόγοι μετασχηματισμού των αυτομετασχηματιστών στα κέντρα ΥΥΤ, η μεταβολή των οποίων αφορά κυρίως σε μέτρα προληπτικού ελέγχου. Παρακάτω εξετάζεται η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων φορτίου στο περιθώριο φόρτισης του ηλεκτρικού συστήματος για όρια φόρτισης που θεωρούνται ότι συμπίπτουν με διακλαδώσεις σαγματικού κόμβου.



Σχ. 5.18 Η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων φορτίου στο περιθώριο ισχύος

Με την παραδοχή φορτίων σταθερής ισχύος, ο χώρος των παραμέτρων ενός ηλεκτρικού συστήματος ταυτίζεται με το χώρο φορτίου. Θεωρούμε ένα αρχικό σημείο λειτουργίας \mathbf{p}_0 και μια κατεύθυνση \mathbf{d} στο χώρο των παραμέτρων. Ως γνωστό κατά μήκος αυτής της κατεύθυνσης προκύπτει ένα περιθώριο ευστάθειας μ^* (Σχ. 5.18). Στο σημείο μέγιστου φορτίου \mathbf{p}^* ικανοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\mathbf{p}^* = \mathbf{p}_0 + \mu^* \mathbf{d} \quad (5.1)$$

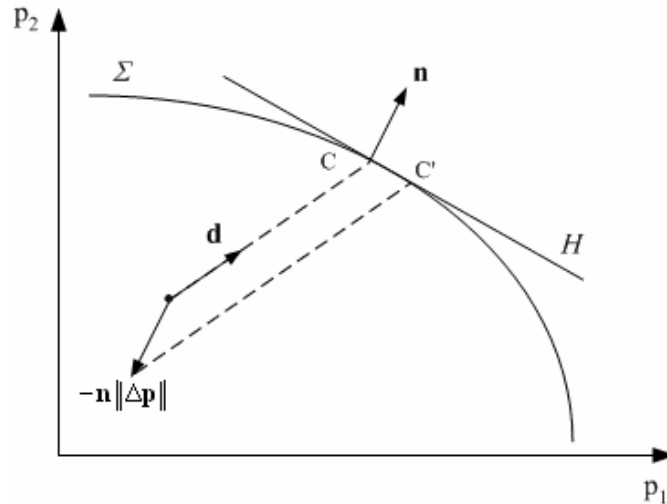
$$\varphi(\mathbf{u}^*, \mathbf{p}^*) = \mathbf{0} \quad (5.2)$$

$$\det \varphi_{\mathbf{u}}(\mathbf{u}^*, \mathbf{p}^*) = 0 \quad (5.3)$$

Έστω μια μικρή μεταβολή $d\mathbf{p}_0$ των παραμέτρων \mathbf{p}_0 που ορίζουν το αρχικό σημείο λειτουργίας. Το αποτέλεσμα θα είναι η μεταβολή του περιθωρίου από μ^* σε $\mu^* + d\mu^*$, όπου [VCV98]:

$$d\mu^* = -\frac{\mathbf{n}^T d\mathbf{p}_0}{\mathbf{n}^T \mathbf{d}} \quad (5.4)$$

Αν υποθέσουμε ότι το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια ορίων φόρτισης \mathbf{n} έχει μοναδιαίο μήκος, ο αριθμητής της (5.4) είναι η προβολή της μεταβολής των παραμέτρων $d\mathbf{p}_0$ στην κατεύθυνση του κάθετου διανύσματος. Ο παρονομαστής της (5.4) είναι ένα μέτρο της γωνίας που σχηματίζεται από το κάθετο διάνυσμα \mathbf{n} και το διάνυσμα κατεύθυνσης \mathbf{d} .



Σχ. 5.19 Μεγιστοποίηση περιθωρίου φόρτισης με μεταβολή των παραμέτρων φορτίου

Αποδεικνύεται [Kar05] ότι από το αρχικό σημείο \mathbf{p}_0 και με δεδομένη κατεύθυνση φόρτισης \mathbf{d} , η βέλτιστη μεταβολή των παραμέτρων φορτίου για τη μεγιστοποίηση του περιθωρίου φόρτισης κείται στην αντίθετη κατεύθυνση του κάθετου διανύσματος \mathbf{n} (Σχ. 5.19). Για μεταβολή των παραμέτρων φορτίου μέτρου $\|\Delta \mathbf{p}\|$ κατά μήκους του $-\mathbf{n}$ οδηγούμαστε στο νέο όριο φόρτισης C' .

Η προσέγγιση αυτή ως προς τη βέλτιστη κατεύθυνση ισχύει για όρια φόρτισης που συμπίπτουν με διακλάδωση σαγματικού κόμβου. Στην περίπτωση που το εξεταζόμενο όριο φόρτισης είναι όριο λόγω μιας απλής μεταγωγής ή γωνιακό σημείο στην τομή δύο ή περισσότερων πολλαπλοτήτων ορίων φόρτισης, η κατεύθυνση στην οποία θα πρέπει να μεταβάλλουμε τις παραμέτρους ελέγχου προκύπτει από τη συνθήκη μεταγωγής [Kar05].

Οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης επιτρέπουν τον προσδιορισμό της μεταβολής του περιθωρίου φόρτισης που προκαλεί μια μεταβολή στις παραμέτρους ή αντίστροφα την εύρεση της αναγκαίας μεταβολής παραμέτρων για την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης κατά μια δεδομένη ποσότητα.

Από την (5.4) προκύπτει ότι οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς το διάνυσμα των αρχικών παραμέτρων \mathbf{p} δίνονται στη γενική περίπτωση από τη σχέση:

$$\mathbf{S}_{\mu^* \mathbf{p}_0} = -\frac{\boldsymbol{\varphi}_p^T \mathbf{w}}{\mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}_p \mathbf{d}} = -\frac{\mathbf{n}}{\mathbf{n}^T \mathbf{d}} \quad (5.5)$$

που ισχύει όταν $\mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}_p \mathbf{d} \neq 0$. Η συνθήκη $\mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}_p \mathbf{d} = 0$ αντιστοιχεί σε μια κατεύθυνση \mathbf{d} εφαπτομενική ως προς την επιφάνεια ορίων φόρτισης, δηλαδή σε μία αρκετά ασυνήθιστη περίπτωση για τα πραγματικά ηλεκτρικά συστήματα.

Οι μονάδες στις οποίες εκφράζονται οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης εξαρτώνται από τη νόρμα μέτρησης του περιθωρίου φόρτισης και κατά συνέπεια από την έκφραση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του διανύσματος κατεύθυνσης \mathbf{d} στο χώρο των παραμέτρων [Kar05].

Από την άποψη των πρακτικών εφαρμογών, τα μεγαλύτερα στοιχεία του διανύσματος ευαισθησιών $\mathbf{S}_{\mu^* \mathbf{p}_0}$ υποδεικνύουν τα φορτία των οποίων οι μεταβολές ισχύος έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στο περιθώριο φόρτισης, ή ισοδύναμα τα φορτία των οποίων ο κατάλληλος χειρισμός (π.χ. αποκοπή) είναι περισσότερο ευεργετικός για την αύξηση του περιθωρίου φόρτισης.

Σε περίπτωση k φορτίων, η μεταβολή του περιθωρίου φόρτισης με τη βοήθεια των ευαισθησιών προκύπτει ως:

$$\Delta \mu^* \approx \sum_{i=1}^k S_{\mu^* p_{0,i}} \Delta p_{0,i} \quad (5.6)$$

5.4.2 Αλγόριθμος Αποκοπής Φορτίου με βάση την Ευαισθησία του Περιθωρίου Φόρτισης

Με τη βοήθεια των ευαισθησιών μπορεί να αναπτυχθεί μία μέθοδος αποκοπής φορτίου προς εξασφάλιση επαρκούς περιθωρίου φόρτισης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας [KNV05]. Υπό την έννοια αυτή η αποκοπή φορτίου αποτελεί μέτρο προληπτικού ελέγχου και εφαρμόζεται όταν κριθεί ότι το περιθώριο φόρτισης του συστήματος χωρίς διαταραχή είναι μικρότερο από το απαιτούμενο. Παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης αποτελεί η προβλεπόμενη αύξηση της ζήτησης του φορτίου να υπερβαίνει το υπολογισθέν περιθώριο ισχύος χωρίς διαταραχή. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να αποκοπεί φορτίο, ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη αύξηση του περιθωρίου ισχύος και το σύστημα να μπορέσει να ικανοποιήσει την προβλεπόμενη ζήτηση. Μία τέτοια μέθοδος αποκοπής φορτίου με βάση την ευαισθησία του περιθωρίου φόρτισης αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του προγράμματος WPSTAB και περιγράφεται παρακάτω.

Για την αποτελεσματική εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται η ακριβής γνώση του περιθωρίου ισχύος του συστήματος. Ο υπολογισμός του περιθωρίου φόρτισης γίνεται με χρήση της νόρμας L_∞ , η οποία στον κανονικοποιημένο χώρο φορτίου παρέχει στη γενική περίπτωση την πληροφορία σχετικά με τη μικρότερη απόσταση ενός σημείου λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος από την επιφάνεια ορίων φόρτισης, δηλαδή προσδιορίζει με μεγάλη ακρίβεια το ελάχιστο όριο φόρτισης του συστήματος (σε ποσοστό αύξησης φορτίου) για το δεδομένο σημείο λειτουργίας [VMK01].

Η χρήση της νόρμας L_∞ επιβάλλει αρχικά την κανονικοποίηση των φορτίων με βάση τη σχέση:

$$\lambda_i = \frac{P_i - P_{o,i}}{P_{o,i}} \quad (5.7)$$

όπου $p_i = [P_i, Q_i]$ το φορτίο σε κάθε ζυγό i και λ_i ο συντελεστής της ποσοστιαίας αύξησης του φορτίου σε κάθε ζυγό i .

Θεωρώντας ότι όλα τα στοιχεία του καθέτου διανύσματος \mathbf{n} είναι πάντοτε θετικά, δηλαδή ότι όλα τα φορτία του συστήματος συμμετέχουν στον περιορισμό του περιθωρίου ισχύος (π.χ. η αύξηση οποιουδήποτε φορτίου συντελεί σε μείωση του περιθωρίου ισχύος, γεγονός που αποτελεί τυπική περίπτωση σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που εμφανίζουν προβλήματα ευστάθειας τάσης), η επιβολή ομοιόμορφης αύξησης στη ζήτηση του φορτίου παρέχει το ελάχιστο ποσοστιαίο περιθώριο αύξησης φορτίου ώστε να προκληθεί αστάθεια.

Με την εφαρμογή ομοιόμορφης αύξησης στη ζήτηση, όλα τα φορτία αυξάνονται με τον ίδιο ρυθμό λ :

$$P_i = P_{o,i} (1 + \lambda) \quad (5.8)$$

$$Q_i = Q_{o,i} (1 + \lambda) \quad (5.9)$$

όπου $P_{o,i}, Q_{o,i}$ είναι η ενεργός και άεργος ζήτηση κάθε ζυγού i στο αρχικό σημείο λειτουργίας.

Η μέγιστη τιμή λ_{max} του ρυθμού αύξησης της ζήτησης αντιστοιχεί στο επί τοις εκατό περιθώριο ισχύος $\mu^*_{(\%)}$ του συστήματος, δηλαδή ισχύει $\mu^*_{(\%)} = \lambda_{max}$. Πολλαπλασιάζοντας με το συνολικό ενεργό φορτίο του συστήματος στο αρχικό σημείο λειτουργίας προκύπτει το περιθώριο ισχύος M^* σε MW:

$$M^* = \mu^*_{(\%)} \cdot \sum_i P_{o,i} = \mu^*_{(\%)} \cdot P_o \quad (5.10)$$

Με βάση τα παραπάνω, αν η προβλεπόμενη αύξηση Π της ζήτησης του φορτίου σε MW είναι μεγαλύτερη από το περιθώριο ισχύος M^* χωρίς διαταραχή, η απαιτούμενη αύξηση $\Delta\mu^*_{sp}$ του περιθωρίου ισχύος σε MW προκύπτει ως:

$$\Delta\mu^*_{sp} = \Pi - M^* \quad (5.11)$$

Για την επίτευξη της παραπάνω αύξησης στο περιθώριο ισχύος θεωρούμε ότι είναι αναγκαία η αποκοπή φορτίου, δεδομένου ότι όλα τα άλλα μέτρα έχουν ήδη εφαρμοστεί. Στην περίπτωση της αποκοπής φορτίου, η μεταβολή $\Delta p_{o,j}$ των παραμέτρων φορτίου έγκειται στην αποκοπή ποσοστού s επί της αρχικής ζήτησης $p_{o,j} = [P_{o,j}, Q_{o,j}]$ του φορτίου στους ζυγούς j που συμμετέχουν στην εφαρμογή του μέτρου, δηλαδή:

$$\Delta p_{o,j} = -s p_{o,j} \quad (5.12)$$

Η βέλτιστη επιλογή των ζυγών όπου θα εφαρμοστεί η αποκοπή, προσδιορίζονται με βάση την ιεράρχηση των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης ως προς τις φορτία στο αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος. Αυτό γίνεται γιατί, όπως ειπώθηκε ξανά, τα μεγαλύτερα στοιχεία του διανύσματος ευαισθησιών υποδεικνύουν τα φορτία στα οποία η αποκοπή είναι περισσότερο ευεργετική για την αύξηση του περιθωρίου ισχύος.

Επομένως, από τη σχέση (5.5) υπολογίζονται οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης ως προς τα φορτία στο αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος. Προκύπτει κατά αυτό τον τρόπο για κάθε ζυγό i του συστήματος μία ευαισθησία $\partial \mu^* / \partial P_{o,i}$ του περιθωρίου φόρτισης ως προς το ενεργό και μία ευαισθησία $\partial \mu^* / \partial Q_{o,i}$ του περιθωρίου φόρτισης ως προς το άεργο φορτίο του ζυγού. Θεωρώντας σταθερό συντελεστή ισχύος σε κάθε φορτίο του συστήματος εξάγεται τελικά η ευαισθησία $\tilde{S}_{\mu^* P_{o,i}}$ του περιθωρίου φόρτισης ως προς το συνολικό φορτίο κάθε ζυγού:

$$\tilde{S}_{\mu^* P_{o,i}} = \frac{\partial \mu^*}{\partial P_{o,i}} + \frac{Q_{i,o}}{P_{i,o}} \cdot \frac{\partial \mu^*}{\partial Q_{o,i}} \quad (5.13)$$

Οι ευαισθησίες αυτές κατατάσσονται σε ένα διάνυσμα $\tilde{S}_{\mu^* P_{o,i}}$ με τέτοιο τρόπο, ώστε τα πρώτα στοιχεία του διανύσματος να αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή (δεδομένου ότι είναι αρνητικές) ευαισθησίες.

Η αποκοπή του φορτίου πραγματοποιείται με σταθερό ποσοστό s (π.χ. 10%-30%) ξεκινώντας από τους ζυγούς εκείνους που αντιστοιχούν στα πρώτα στοιχεία του διανύσματος ευαισθησιών $\tilde{S}_{\mu^* P_{o,i}}$ μέχρι να ικανοποιηθεί η απαιτούμενη αύξηση $\Delta \mu_{sp}^*$ του περιθωρίου ισχύος. Κατά συνέπεια οι αποκοπές πραγματοποιούνται από τα πρώτα n στοιχεία του διανύσματος μέχρι η επιτευχθείσα αύξηση $\Delta \mu^*$ του περιθωρίου ισχύος σε MW:

$$\Delta \mu^* \approx -s \sum_{j=1}^n \tilde{S}_{\mu^* P_{o,j}} P_{o,j} \quad (5.14)$$

να γίνει ίση τουλάχιστον με την απαιτούμενη αύξηση $\Delta \mu_{sp}^*$ σε MW:

$$\Delta \mu^* \geq \Delta \mu_{sp}^* \quad (5.15)$$

Προφανώς η ελάχιστη αποκοπή φορτίου αντιστοιχεί σε αύξηση του περιθωρίου ισχύος ακριβώς κατά $\Delta \mu_{sp}^*$, δηλαδή στην ικανοποίηση της ισότητας (5.15).

Με την παραπάνω μεθοδολογία, η βέλτιστη επιλογή ζυγών εξασφαλίζεται με την εφαρμογή των αποκοπών από τα πιο αποδοτικά φορτία του συστήματος για αύξηση του περιθωρίου φόρτισης, όπως αυτή υποδεικνύεται από το διάνυσμα των ευαισθησιών, ενώ η ελάχιστη αποκοπή φορτίου από την ικανοποίηση της (5.15). Ο παράγοντας του χρόνου εφαρμογής της αποκοπής φορτίου δεν εξετάζεται, δηλαδή θεωρείται ότι η αποκοπή θα γίνει πριν τον κρίσιμο χρόνο t_C (παρέβαλε ενότητα 5.2).

5.4.3 Εφαρμογή στον Προληπτικό Έλεγχο Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραπάνω μέθοδος αποκοπής φορτίου μπορεί να υλοποιηθεί σε ένα εποπτικό εργαλείο προληπτικού ελέγχου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Πράγματι, σύμφωνα με τα προηγούμενα, αν η επιφάνεια ορίων φόρτισης είναι γνωστή, μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί το περιθώριο φόρτισης από ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας του συστήματος. Έτσι, εφόσον το περιθώριο φόρτισης είναι μικρότερο από την προβλεπόμενη αύξηση φορτίου μπορεί στη συνέχεια να υπολογιστεί με τη βοήθεια των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης η αναγκαία αποκοπή φορτίου για την ικανοποίηση της ζήτησης.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στην υλοποίηση ενός τέτοιου εργαλείου έγκειται στον προσδιορισμό της επιφάνειας ορίων φόρτισης του συστήματος. Στην περίπτωση δύο ή τριών φορτίων, η επιφάνεια ορίων φόρτισης προκύπτει σχετικά εύκολα στο δισδιάστατο ή τρισδιάστατο χώρο αντίστοιχα. Στα πραγματικά όμως ηλεκτρικά συστήματα ο χώρος των παραμέτρων φορτίου εντός του οποίου ορίζεται η επιφάνεια

ορίων φόρτισης αποτελείται από αρκετές εκατοντάδες έως χιλιάδες παραμέτρων. Το γεγονός αυτό αποτελεί σοβαρό εμπόδιο στην εποπτική απεικόνιση της επιφάνειας ορίων φόρτισης, που διαφορετικά θα παρείχε εύχρηστη πληροφορία στους χειριστές του συστήματος.

Για το λόγο αυτό επιχειρείται η ομαδοποίηση των παραμέτρων φορτίου σε δύο συνιστώσες, ώστε να είναι δυνατή μια δισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας ορίων φόρτισης [Kar05]. Η απεικόνιση αυτή υπό προϋποθέσεις θα μπορούσε να επιτρέψει την ανάπτυξη ενός εργαλείου προληπτικού ελέγχου σε πραγματικό χρόνο.

Η πρώτη συνιστώσα χαρακτηρίζεται ως P_A και αντιστοιχεί στο φορτίο που καταναλώνεται στο πλέον ευάλωτο τμήμα του συστήματος ως προς την εμφάνιση αστάθειας τάσης, ενώ η δεύτερη χαρακτηρίζεται ως P_B και αντιστοιχεί στο φορτίο που καταναλώνεται στο υπόλοιπο (πιο σθεναρό) τμήμα του συστήματος:

$$P_A = \sum_{i \in A} p_i \quad (5.16)$$

$$P_B = \sum_{i \in B} p_i \quad (5.17)$$

Σημειώνεται ότι μπορεί να υπάρχει και μια τρίτη συνιστώσα P_C που αναφέρεται στα σταθερά φορτία, δηλαδή σε αυτά που δεν μεταβάλλονται κατά τη φόρτιση του συστήματος. Επομένως το συνολικό φορτίο του συστήματος $P_{o\lambda}$ προκύπτει από το άθροισμα των τριών επιμέρους συνιστωσών:

$$P_{o\lambda} = P_A + P_B + P_C \quad (5.18)$$

Για την ομαδοποίηση των φορτίων του συστήματος στις περιοχές A και B, χρησιμοποιείται ως κριτήριο η πληροφορία που παρέχει το κάθετο διάνυσμα στο όριο φόρτισης που προκύπτει για ομοιόμορφη αύξηση φορτίου. Τα μεγαλύτερα στοιχεία του καθέτου διανύσματος, που σύμφωνα με την (5.5) αποτελούν τον αριθμητή του διανύσματος ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης, υποδεικνύουν τα φορτία που επιδρούν εντονότερα στη μεταβολή του περιθωρίου αυτού.

Ωστόσο, για να έχει φυσική έννοια μία τέτοια ομαδοποίηση, θα πρέπει να ομαδοποιηθούν σύνολα φορτίων που ανήκουν σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές του συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται υπολογίζοντας για κάθε γεωγραφική περιοχή A_k του συστήματος έναν δείκτη F_k , ο οποίος σχηματίζεται από τη μέση τιμή των στοιχείων του κάθετου διανύσματος για κάθε ενεργό και άεργο φορτίο της περιοχής:

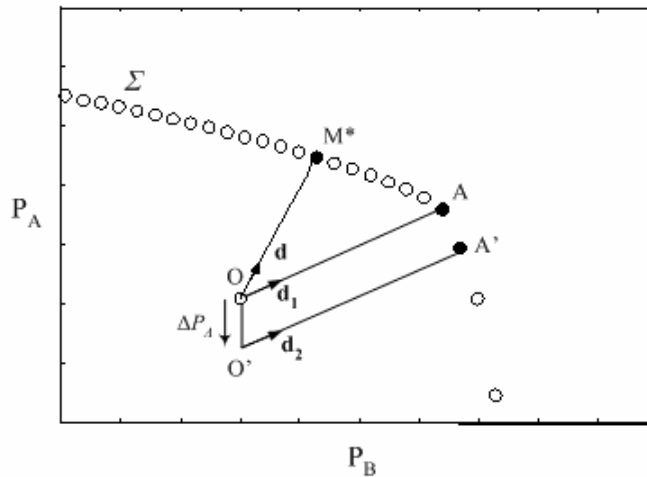
$$F_k = \frac{1}{\dim(A_k)} \sum_{i \in A_k} n_i \quad (5.19)$$

όπου $\dim(A_k)$ το πλήθος των ζυγών της γεωγραφικής περιοχής A_k και n_i τα στοιχεία του κάθετου διανύσματος που αντιστοιχούν στα φορτία της γεωγραφικής περιοχής A_k που συμμετέχουν στην κατεύθυνση φόρτισης.

Οι δείκτες που υπολογίζονται με την παραπάνω διαδικασία κανονικοποιούνται ως προς τη μεγαλύτερη τιμή και με βάση τις κανονικοποιημένες τιμές \bar{F}_k γίνεται ο διαχωρισμός των περιοχών κατά τέτοιον τρόπο, ώστε αυτές που εμφανίζουν τους μεγαλύτερους δείκτες να συνθέτουν την περιοχή A (ευάλωτη περιοχή), ενώ αυτές που εμφανίζουν τους μικρότερους την περιοχή B (σθεναρή περιοχή):

$$\bar{F}_k \Big|_{k \in A} \gg \bar{F}_k \Big|_{k \in B} \quad (5.20)$$

Έχοντας επιτύχει την ομαδοποίηση των φορτίων στις δύο συνιστώσες, χρησιμοποιώντας κατάλληλα εργαλεία προσομοίωσης [Kar05] μπορεί με αφετηρία το όριο φόρτισης για ομοιόμορφη αύξηση του φορτίου (σημείο M^*) να προσδιοριστούν τα υπόλοιπα οριακά σημεία που συνθέτουν τελικά την επιφάνεια ορίων φόρτισης Σ στο δισδιάστατο επίπεδο, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.20. Τα όρια αυτά υπολογίζονται θεωρώντας αναλογική μεταβολή των φορτίων στο εσωτερικό κάθε περιοχής (A ή B). Το σύνολο των ορίων φόρτισης που προκύπτουν με την παραπάνω διαδικασία, σχηματίζει ένα σύνορο της περιοχής επιτρεπόμενης λειτουργίας στο δισδιάστατο χώρο P_A και P_B .



Σχ. 5.20 Επιφάνεια ορίων φόρτισης στο διδιάστατο χώρο

Οι δυνατότητες που προσφέρει η εποπτική παρουσίαση της επιφάνειας ορίων φόρτισης στο διδιάστατο επίπεδο είναι προφανείς. Για όλες τις πιθανές κατευθύνσεις φόρτισης του συστήματος μπορούν εύκολα να υπολογιστούν το όριο και το αντίστοιχο περιθώριο φόρτισης. Για παράδειγμα, στο Σχ. 5.20 φαίνονται ενδεικτικά δύο αρχικά λειτουργικά σημεία που οδηγούν αντίστοιχα στα όρια A και A'. Το δεύτερο όριο φόρτισης (A') είναι αυτό που προκύπτει κατά τη φόρτιση του συστήματος μετά την αποκοπή φορτίου ΔP_A μόνο από την περιοχή A. Διαπιστώνεται λοιπόν ότι με βάση την απεικόνιση της επιφάνειας ορίων φόρτισης σε δύο διαστάσεις μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα μέτρων προστασίας, όπως η αποκοπή φορτίου.

5.4.4 Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα

Για την εφαρμογή στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα της μεθόδου αποκοπής φορτίου με κριτήριο την εξασφάλιση επαρκούς περιθωρίου φόρτισης, θα χρησιμοποιηθεί το στιγμιότυπο ροής ισχύος της 12^{ης} Ιουλίου 2004, που καταγράφηκε στις 11:30 από τον εκτιμητή κατάσταση του κέντρου ελέγχου, λίγο πριν από τη σβέση του νοτίου συστήματος. Υπενθυμίζουμε ότι στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο το συνολικό φορτίο του συστήματος στο αρχικό σημείο ισορροπίας ανέρχεται σε 9084 MW, εκ των οποίων τα 7710 MW ($P_A + P_B$) αποτελούν φορτία τελικών καταναλωτών που συμμετέχουν στην αύξηση της ζήτησης με βάση τους συντελεστές συμμετοχής που αναφέρονται στον Πίν. 4.8 της παραγράφου 4.4.1 και τα υπόλοιπα 1374 MW (P_C) αποτελούν βιομηχανικά φορτία ή βοηθητικά φορτία των μονάδων παραγωγής.

Προσδιορισμός περιθωρίου φόρτισης και διδιάστατη απεικόνιση επιφάνειας ορίων φόρτισης

Με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4.2 [KNV05] προσδιορίζεται το όριο φόρτισης για το δεδομένο αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος. Το όριο αυτό συναντάται σε συνολική κατανάλωση 9480 MW και επομένως αντιστοιχεί σε ένα περιθώριο φόρτισης $M^* = 396$ MW, δηλαδή σε ποσοστιαία ομοιόμορφη αύξηση $\mu^*(\%) = 5,2\%$ επί της αρχικής ζήτησης του φορτίου (7710 MW) που συμμετέχει στη φόρτιση. Κατά συνέπεια, στο όριο φόρτισης το φορτίο των τελικών καταναλωτών ανέρχεται σε 8106 MW.

Το όριο φόρτισης που υπολογίστηκε με βάση την παραπάνω μέθοδο αντιστοιχεί σε διακλάδωση σαγματικού κόμβου. Υπολογίζοντας αρχικά το αριστερό ιδιοδιάνυσμα w που αντιστοιχεί στη (σχεδόν) μηδενική ιδιοτιμή του Ιακωβιανού πίνακα κατάσταση του συστήματος, προκύπτει από τη σχέση (5.5) το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια ορίων φόρτισης. Υπολογίζουμε στη συνέχεια μέσω της (5.19) τους δείκτες F_k για κάθε μία από τις 8 γεωγραφικές περιοχές του συστήματος. Οι απόλυτες και κανονικοποιημένες τιμές των δεικτών F_k παρουσιάζονται με φθίνουσα κατάταξη ως προς το μέτρο τους στον Πίν. 5.5.

Πίν. 5.5 Δείκτης F_k ανά περιοχή

A/A	ΠΕΡΙΟΧΗ (A_k)	F_k	\bar{F}_k
1	Στερεά Ελλάδα	0,61	1,00
2	Θεσσαλία	0,54	0,89
3	Πελοπόννησος	0,46	0,75
4	Αττική	0,42	0,69
5	Κεντρική Μακεδονία	0,25	0,41
6	Δυτική Ελλάδα	0,24	0,40
7	Ανατολική Μακεδονία-Θράκη	0,09	0,14
8	Δυτική Μακεδονία	0,08	0,14

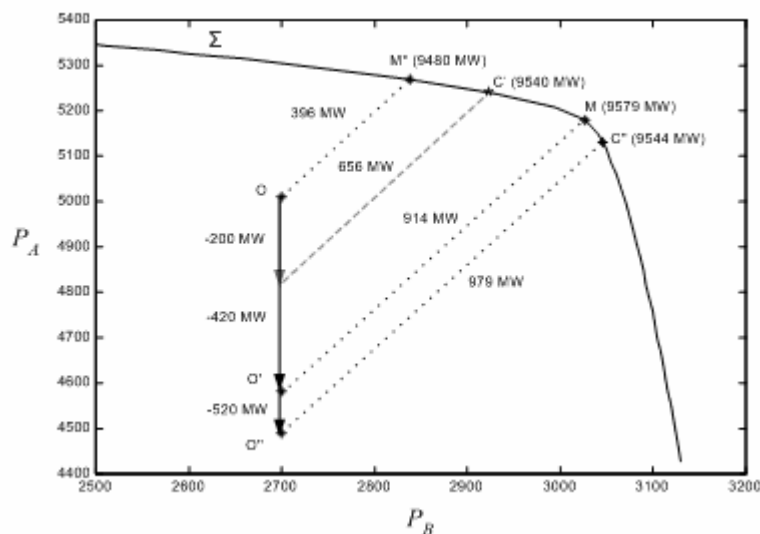
Σύμφωνα με την (5.20) και με βάση τις τιμές των δεικτών γίνεται ο διαχωρισμός των περιοχών που δηλώνεται από την έντονη γραμμή του πίνακα. Υπάρχει σαφής διαχωρισμός, καθώς οι περιοχές πάνω από την έντονη γραμμή έχουν δείκτη με κανονικοποιημένες τιμές μεγαλύτερες του 0,5, ενώ οι δείκτες των άλλων περιοχών δεν υπερβαίνουν την τιμή αυτή. Επομένως, τα φορτία του συστήματος ομαδοποιούνται στις περιοχές A και B ως ακολούθως:

$$P_A = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (5.21)$$

$$P_B = P_5 + P_6 + P_7 + P_8 \quad (5.22)$$

Όπως αναμενόταν, το πλέον θιγόμενο τμήμα του συστήματος (περιοχή A) αποτελείται από τη μητροπολιτική περιοχή της Αττικής, τη Στερεά Ελλάδα, την Πελοπόννησο και τη Θεσσαλία, από περιοχές δηλαδή που συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο μέρος του καταναλισκόμενου φορτίου και έχουν εμπλακεί και στο παρελθόν σε περιστατικά αστάθειας τάσης. Το πιο σθεναρό τμήμα του συστήματος (περιοχή B) περιλαμβάνει τις περιοχές της Βόρειας και Δυτικής Ελλάδας, οι οποίες συνήθως δεν προκαλούν ούτε εμφανίζουν γενικευμένα προβλήματα ευστάθειας τάσης.

Στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη την ομαδοποίηση των φορτίων του συστήματος στις περιοχές A και B προσδιορίζεται με χρήση κατάλληλου εργαλείου προσομοίωσης [Kar05] η επιφάνεια ορίων φόρτισης (Σχ. 5.21) του Ελληνικού συστήματος στο διδιάστατο επίπεδο P_A - P_B . Σημειώνεται ότι στο όριο φόρτισης του σχήματος αναγράφεται (για ευκολία των χειριστών) το σύνολο του φορτίου ($P_A + P_C$) μαζί με τα βιομηχανικά φορτία και τα βοηθητικά φορτία των μονάδων κάθε περιοχής (P_C), τα οποία παραμένουν σταθερά κατά τη φόρτιση του συστήματος. Το πλησιέστερο (σε ποσοστιαία αύξηση) όριο φόρτισης από το αρχικό σημείο ισορροπίας O, που υπολογίστηκε παραπάνω για ομοιόμορφη φόρτιση του συστήματος, σημειώνεται με το σημείο M^* .



Σχ. 5.21 Δισδιάστατη απεικόνιση επιφάνεια ορίων φόρτισης Ελληνικού Συστήματος

Γεωμετρικός προσδιορισμός βέλτιστης αποκοπής φορτίου

Με την απεικόνιση της επιφάνειας ορίων φόρτισης στο διδιάστατο χώρο είναι δυνατό να εκτιμηθεί γεωμετρικά η επίδραση που θα έχει μία αποκοπή φορτίου στην ικανότητα φόρτισης του συστήματος [Kar05]. Για παράδειγμα, αν αποκοπεί φορτίο 200 MW αναλογικά από τους ζυγούς της περιοχής A (Σχ. 5.21), υπολογίζεται ότι το όριο φόρτισης που θα προκύψει (σημείο C') αντιστοιχεί σε ζήτηση ισχύος ίση με 9540 MW, δηλαδή σε ένα νέο περιθώριο φόρτισης ίσο με 656 MW. Επομένως μία τέτοια αποκοπή φορτίου στο αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος αυξάνει το περιθώριο φόρτισης ως προς το αρχικό σημείο κατά 260 MW.

Στο ίδιο σχήμα φαίνεται επίσης η βέλτιστη αποκοπή φορτίου που μπορεί να πραγματοποιηθεί στην κρίσιμη περιοχή A του συστήματος. Παρατηρούμε ότι η αναλογική αποκοπή φορτίου 420 MW από τους ζυγούς της περιοχής αυτής, οδηγεί μετά από ομοιόμορφη αύξηση της ζήτησης στο ολικό μέγιστο του συστήματος (σημείο M), όπου το περιθώριο φόρτισης είναι ίσο με 914 MW. Το περιθώριο αυτό είναι κατά 518 MW μεγαλύτερο από εκείνο στο αρχικό σημείο. Οποιαδήποτε περαιτέρω αποκοπή φορτίου από την περιοχή A οδηγεί σε μικρότερο συνολικό φορτίο στο όριο φόρτισης. Για παράδειγμα, αποκόπτοντας επιπλέον 100 MW (δηλαδή συνολικά 520 MW) προκύπτει το όριο φόρτισης C'', το οποίο αντιστοιχεί σε ζήτηση ισχύος ίση με 9544 MW. Επομένως προκειμένου να επιτευχθεί περαιτέρω αύξηση του περιθωρίου φόρτισης, η αποκοπή φορτίου στο σημείο O' θα πρέπει να περιλαμβάνει και τους ζυγούς της περιοχής B.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι για να ισχύει η πληροφορία που δίνει το διάγραμμα της επιφάνειας ορίων φόρτισης Σ του Σχ. 5.21, πρέπει οι αποκοπές φορτίου από την περιοχή A να γίνουν αναλογικά από όλα τα φορτία της περιοχής. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη αποκοπή για την ίδια αύξηση του περιθωρίου φόρτισης, από αυτή που θα χρειαζόταν αν οι αποκοπές πραγματοποιούνταν από τα πιο αποδοτικά φορτία της περιοχής A. Ωστόσο το διάγραμμα του σχήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί σε πρώτο βαθμό η ποσότητα αποκοπής και στη συνέχεια η αποκοπή να γίνει αρχίζοντας από τον πιο αποδοτικό ζυγό. Σε αυτήν την περίπτωση το αποτέλεσμα της εφαρμογής θα είναι ακόμα καλύτερο.

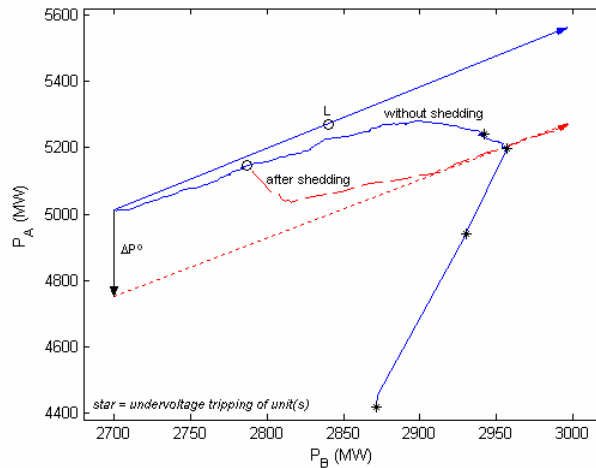
Προσομοίωση αποκοπής φορτίου με βάση την ευαισθησία του περιθωρίου φόρτισης

Όπως είδαμε νωρίτερα, το περιθώριο φόρτισης του συστήματος για ομοιόμορφη αύξηση της ζήτησης προσδιορίστηκε σε 396 MW ή 5,2% επί της αρχικής ζήτησης του φορτίου που συμμετέχει στην αύξηση. Έστω ότι η προβλεπόμενη αύξηση της ζήτησης είναι 843 MW, δηλαδή 11% επί της αρχικής ζήτησης του φορτίου. Με βάση την πρόβλεψη του φορτίου, η απαιτούμενη αύξηση $\Delta\mu_{sp}^*$ του περιθωρίου φόρτισης θα πρέπει να είναι ίση με 447 MW ή 5,8% επί της αρχικής ζήτησης του φορτίου.

Το σενάριο που προσομοιώνεται είναι η επιβολή από το αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος της προβλεπόμενης ομοιόμορφης αύξησης (843 MW) στη ζήτηση του φορτίου [KNV05]. Η προσομοίωση γίνεται με χρήση του προγράμματος WPSTAB και για τα δεδομένα της προσομοίωσης ισχύουν όσα αναφέρονται στην παράγραφο 4.4.1. Συγκεκριμένα, για τις γεννήτριες του Ελληνικού συστήματος λαμβάνεται υπόψη η δράση του ρυθμιστή στροφών, του αυτόματου ρυθμιστή τάσης, του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης. Επίσης λαμβάνεται υπόψη η λειτουργία της προστασίας υποτάσεως και του περιορισμού ρεύματος τυμπάνου. Τα ΣΑΤΥΦ παριστάνονται ως διακριτές διατάξεις με σταθερή αρχική χρονική καθυστέρηση T_{d1} ίση με 30 s και σταθερή επακόλουθη χρονική καθυστέρηση T_{d2} ίση με 10 s για την αλλαγή της λήψης, ενώ τα φορτία θεωρούνται στατικά και εκθετικής μορφής με εκθέτες $\alpha = 1,5$, $\beta = 2$. Για τα φορτία που είναι απευθείας συνδεδεμένα στην ΥΤ, η αποκατάσταση της ισχύος πραγματοποιείται μέσω ιδεατών μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης. Τα βοηθητικά των μονάδων παριστάνονται ως φορτία σταθερής ισχύος στους ζυγούς των γεννητριών.

Σημειώνεται ότι η τάση αναφοράς των ΣΑΤΥΦ ορίζεται στην τιμή της αρχικής τάσης του ρυθμιζόμενου ζυγού, ώστε να υπάρχει μέγιστη δυνατή αποκατάσταση ισχύος μέσω των ΣΑΤΥΦ. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι, ενώ για τον προσδιορισμό του ορίου φόρτισης θεωρείται πλήρης αποκατάσταση της ισχύος, στην προσομοίωση η αποκατάσταση της ισχύος δεν μπορεί να επιτευχθεί πλήρως, εξαιτίας της στατικής φύσης των φορτίων, αλλά και της νεκρής ζώνης και των ορίων ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ. Συνεπώς, κατά τη φόρτιση του συστήματος παρατηρείται αυξανόμενη απόκλιση της καταναλισκόμενης ισχύος από τη ζήτηση του φορτίου.

Στο Σχ. 5.22 απεικονίζεται η εξέλιξη του συστήματος στο δισδιάστατο χώρο ισχύος $P_A - P_B$ που ορίστηκε προηγουμένως. Πράγματι, αρχικά η καταναλισκόμενη ισχύς (συνεχής καμπύλη) ακολουθεί την κατεύθυνση αύξησης της ζήτησης (συνεχές διάνυσμα), παρόλο που υπάρχει μία μικρή απόκλιση λόγω της επίδρασης της νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ. Όσο όμως το σύστημα φορτίζεται περισσότερο και ιδιαίτερα αφότου συναντάται το όριο φόρτισης (σημείο L), τα ΣΑΤΥΦ στην περιοχή A εξαντλούν τα όρια ρύθμισής τους, καθώς εκεί καλούνται να ενεργοποιηθούν συχνότερα, και η διαδικασία αποκατάστασης της ισχύος σταματά. Η καταναλισκόμενη ισχύς στην περιοχή A δεν ικανοποιεί τη ζήτηση και οι δύο καμπύλες (διάνυσμα ζήτησης και τροχιά ισχύος) αποκλίνουν αισθητά. Μάλιστα, με την αποσύνδεση ορισμένων μονάδων παραγωγής για λόγους ηλεκτρικής προστασίας από χαμηλή τάση, το σύστημα καταρρέει.



Σχ. 5.22 Εξέλιξη συστήματος στο χώρο φορτίου

Για την επίτευξη της απαιτούμενης αύξησης $\Delta\mu_{sp}^*$ του περιθωρίου φόρτισης, εφαρμόζεται αποκοπή με βάση τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 5.4.2. Έτσι, εφαρμόζοντας την (5.14) με ένα ποσοστό αποκοπής $s=15\%$, απορρίπτεται συνολική ζήτηση φορτίου $\Delta P_{shed} = 260$ MW από τα 69 πρώτα στοιχεία (ζυγούς) του διανύσματος ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης. Όπως φαίνεται στον Πίν. 5.6, το απορριπτόμενο φορτίο συγκεντρώνεται αποκλειστικά στις πιο κρίσιμες περιοχές του συστήματος για την εμφάνιση προβλημάτων αστάθειας τάσης (ευάλωτη περιοχή A).

Πίν. 5.6 Απορριπτόμενη ζήτηση ανά περιοχή

ΠΕΡΙΟΧΗ (A_k)	ΑΠΟΚΟΠΗ (MW)
Αττική	108
Στερεά Ελλάδα	81
Πελοπόννησος	48
Θεσσαλία	23
ΣΥΝΟΛΟ (ΔP_{shed})	260

Αναλυτικά, οι ζυγοί στους οποίους πραγματοποιήθηκε η αποκοπή φορτίου και οι τιμές των αντίστοιχων στοιχείων του διανύσματος ευαισθησιών παρουσιάζονται στον Πίν. 5.7 με φθίνουσα κατ' απόλυτη τιμή κατάταξη ως προς την ευαισθησία. Όπως φαίνεται, οι ευαισθησίες έχουν τιμές που κυμαίνονται μεταξύ του -3,5 και του -1,4. Αυτό σημαίνει ότι, αγνοώντας τις μη γραμμικότητες που παρουσιάζονται στη λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, για κάθε MW που αποκόπτεται από κάποιον ζυγό του πίνακα η αύξηση του περιθωρίου φόρτισης είναι μεγαλύτερη από 1 MW.

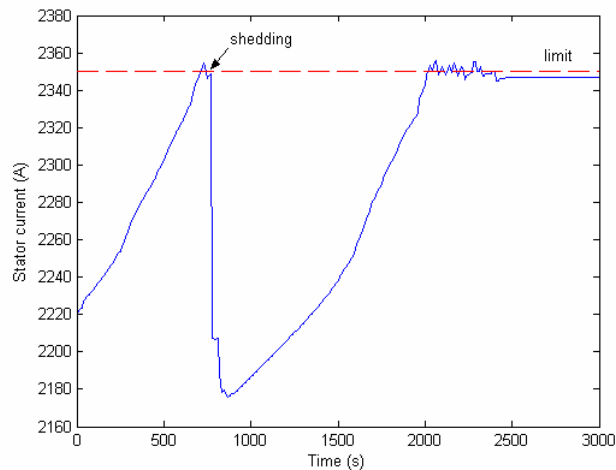
Σημειώνεται επίσης ότι βάσει του διανύσματος ευαισθησιών εφαρμόζονται αποκοπές σε 3 βιομηχανικά φορτία (Αλουμίνιο, ΤΙΤΑΝ και ΕΛΔΑ), όπου στην πράξη κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει μόνο αν υπάρχει στο εργοστάσιο δυνατότητα αυτοπαραγωγής. Επομένως, η αποκοπή ΔP_0 από την περιοχή A, η οποία περιλαμβάνει μόνο τα φορτία της περιοχής που συμμετέχουν σε αύξηση της ζήτησης, είναι μικρότερη από τη συνολική αποκοπή ΔP_{shed} κατά το φορτίο των τριών αυτών βιομηχανιών.

Η εξέλιξη του συστήματος μετά την αποκοπή του φορτίου απεικονίζεται επίσης στο δισδιάστατο χώρο ισχύος $P_A - P_B$ (Σχ. 5.22). Το εστιγμένο διάνυσμα παριστάνει την ομοιόμορφη αύξηση της ζήτησης και η διακεκομμένη καμπύλη την καταναλισκόμενη ισχύ του συστήματος μετά την αποκοπή φορτίου. Ενώ, όπως είδαμε, χωρίς αποκοπή φορτίου δεν μπορεί να ικανοποιηθεί η αύξηση της ζήτησης κατά 11% λόγω κυρίως της αδυναμίας των ΣΑΤΥΦ να αποκαταστήσουν το φορτίο στην πλέον θιγόμενη περιοχή (περιοχή Α) με αποτέλεσμα την εμφάνιση αστάθειας τάσης, μετά την αποκοπή συνολικής ζήτησης ΔP_{shed} (ή ΔP_o από τα φορτία που συμμετέχουν στην αύξηση) η καταναλισκόμενη ισχύς (διακεκομμένη καμπύλη) ικανοποιεί πλήρως τη ζήτηση (εστιγμένο διάνυσμα).

Πίν. 5.7 Ευαισθησία $\tilde{S}_{\mu P_{o,j}}$ και απορριπτόμενη ζήτηση ανά ζυγό

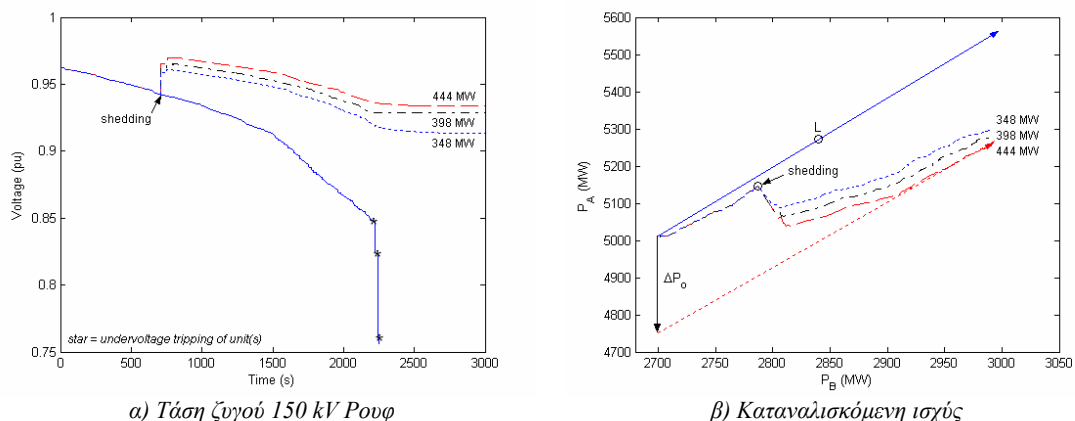
ΖΥΓΟΣ	ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ (αμ/αμ)	ΑΠΟΚΟΠΗ (MW)	ΖΥΓΟΣ	ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ (αμ/αμ)	ΑΠΟΚΟΠΗ (MW)
Χαλκίδα II 51	-3,547	4,70	Λεοντάρι 51	-1,593	2,72
Χαλκίδα II 52	-2,604	3,90	Ξυλόκαστρο 52	-1,592	2,39
Μέθανα 51	-2,245	2,22	Αμφίκλεια 52	-1,591	0,90
Θήβα 51	-2,232	4,16	Αγ. Θεόδωροι 52	-1,590	2,89
Ελευσίνα 52	-2,230	6,00	Αγ. Γεώργιος 51	-1,568	5,69
Ελευσίνα 51	-2,224	5,50	Σπάρτη II 51	-1,564	3,79
Οινόφυτα 52	-2,150	1,69	Σπάρτη II 52	-1,561	3,79
Λιβαδειά 51	-2,056	2,87	Αχλάδι 51	-1,534	0,81
Λιβαδειά 52	-2,056	2,87	Ν. Χαλκηδόνα 53	-1,534	4,39
Οινόφυτα 52	-1,987	3,90	Ν. Μάκρη 52	-1,532	2,79
Ψαχνά 52	-1,965	2,63	Αχλάδι 52	-1,530	0,55
Ξυλόκαστρο 51	-1,924	2,51	Αίγιο 51	-1,518	2,99
Χαλκίδα I 52	-1,924	4,70	Ασπρόπυργος 51	-1,517	4,76
Θήβα 52	-1,867	4,35	Κωπαΐδα 51	-1,506	1,98
Αλουμίνιο 54	-1,816	11,53	ΒΖ Πάτρας 52	-1,505	5,98
Σχηματάρι 52	-1,810	5,07	Κωπαΐδα 52	-1,504	1,98
Αχαρναί 52	-1,801	5,07	Κρανίδι 51	-1,500	1,85
Ψαχνά 51	-1,779	1,62	Άργος I 52	-1,500	3,78
ΤΙΤΑΝ 31	-1,772	2,97	Κρανίδι 52	-1,498	1,85
Χαλκίδα I 51	-1,769	4,65	Άργος I 51	-1,497	3,78
Ρουφ 51	-1,712	5,67	Ελευθερία 31	-1,494	9,63
Κόρινθος 52	-1,694	5,59	Αίγιο 52	-1,467	2,20
Καλλιθέα 32	-1,693	5,48	Άργος II 52	-1,466	3,73
Θήβα 53	-1,677	3,41	Αχαρναί 51	-1,465	3,51
Σχηματάρι 51	-1,657	2,72	Ψυχικό 33	-1,444	12,63
Μέγαρα 51	-1,643	2,21	Μαντούδι 51	-1,441	2,10
Αλμυρός 51	-1,634	2,46	Αγ. Γεώργιος 52	-1,440	2,31
Αλμυρός 52	-1,633	2,45	Ν. Μάκρη 51	-1,439	2,51
Αμφίκλεια 51	-1,631	0,91	ΕΛΔΑ 32	-1,421	3,09
Βούναινα 51	-1,628	3,00	Ελευθερία 32	-1,377	14,78
Βούναινα 52	-1,628	3,00	ΒΖ Πάτρας 51	-1,375	1,56
Ελευθερία 33	-1,625	6,17	Λαμία 51	-1,374	5,44
Λεοντάρι 52	-1,603	2,71	Αταλάντη 51	-1,362	1,90
Αγ. Θεόδωροι 51	-1,596	2,90	Αταλάντη 52	-1,362	1,90
Οινόφυτα 53	-1,594	2,08	ΣΥΝΟΛΟ		260,57

Παρόλο που η συγκεκριμένη μεθοδολογία δεν υποδεικνύει το βέλτιστο χρόνο εφαρμογής της απόρριψης του φορτίου, στο συγκεκριμένο παράδειγμα η απόρριψη πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή που για πρώτη φορά μία γεννήτρια του συστήματος εμφανίζει υπερένταση στο στάτη της (Σχ. 5.23), ενεργοποιώντας κατά αυτόν τον τρόπο τον περιορισμό ρεύματος τυμπάνου (βλέπε παράγραφο 3.3.1). Η ένδειξη αυτή υπάρχει στο κέντρο ελέγχου, καθώς οι χειριστές των σταθμών δηλώνουν αδυναμία να ανταποκριθεί ο σταθμός στη ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος. Συνεπώς, η αδυναμία του συστήματος παραγωγής να αντιμετωπίσει τη ζήτηση μπορεί αποτελέσει ένδειξη για αποκοπή φορτίου.



Σχ. 5.23 Ρεύμα στάτη γεννήτριας Αγ. Γεώργιος-9

Στο Σχ. 5.24α παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης του ζυγού 150 kV του Ρουφ για αποκοπές φορτίου που αντιστοιχούν σε διαφορετικές αυξήσεις $\Delta\mu^*$ του περιθωρίου φόρτισης, αλλά και για την περίπτωση που δεν πραγματοποιείται καμία απόρριψη φορτίου. Στην τελευταία περίπτωση η κατάρρευση της τάσης (συνεχής καμπύλη) είναι εμφανής. Η αποκοπή φορτίου για αύξηση του περιθωρίου φόρτισης ίση με $\Delta\mu^* = 444$ MW, έχει ως αποτέλεσμα ένα αποδεκτό επίπεδο της τάσης (διακεκομμένη καμπύλη) στο ζυγό. Το επίπεδο της τάσης (διακεκομμένη-εστιγμένη καμπύλη) που αντιστοιχεί σε αύξηση του περιθωρίου φόρτισης ίση με $\Delta\mu^* = 398$ MW, όπως και αυτό (εστιγμένη καμπύλη) που αντιστοιχεί σε αύξηση του περιθωρίου φόρτισης ίση με $\Delta\mu^* = 348$ MW δείχνει ότι και για μικρότερη αποκοπή από τη θεωρητικά ελάχιστη (447 MW) προκύπτει ένα σχετικά ανεκτό επίπεδο τάσης, χωρίς μάλιστα να υπάρχει σοβαρό πρόβλημα ως προς την αποκατάσταση της καταναλισκόμενης ισχύος (Σχ. 5.24β). Το ζήτημα αυτό χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.



α) Τάση ζυγού 150 kV Ρουφ

β) Καταναλισκόμενη ισχύς

Σχ. 5.24 Επίδραση μεγέθους αύξησης του περιθωρίου φόρτισης στην αποκοπή φορτίου

5.5 ΑΠΟΚΟΠΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΑ ΦΟΡΤΙΑ

5.5.1 Επίδραση Παραμέτρων Φορτίου στην Τάση

Τα περισσότερα φαινόμενα μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης εκδηλώνονται συνήθως με τη βαθμιαία μείωση των τάσεων στο σύστημα της μεταφοράς. Αν διαθέταμε διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάστασης του συστήματος κατά την εξέλιξη ενός φαινομένου αστάθειας τάσης και ιεραρχούσαμε τις τάσεις με βάση τα μέτρα τους και συγκεκριμένα τη μεταβολή τους από το αρχικό σημείο, πολύ εύκολα θα μπορούσε να προσδιοριστεί η περισσότερο θιγόμενη περιοχή του συστήματος.

Συνεπώς, το αμεσότερο κριτήριο για την παρακολούθηση της εξέλιξης ενός φαινομένου αστάθειας είναι η μεταβολή της τάσης μεταφοράς. Για να έχει νόημα η παρακολούθηση των μεταβολών του μέτρου της τάσης θα πρέπει να γίνεται είτε σε επιλεγμένους ζυγούς του συστήματος είτε σε έναν ζυγό που θεωρείται αντιπροσωπευτικός της συμπεριφοράς του συστήματος για το εξεταζόμενο περιστατικό αστάθειας τάσης. Στην πρώτη περίπτωση μπορεί να μετράται η μέση ή σταθμισμένη τάση των ζυγών που παρακολουθούνται, ενώ στην τελευταία απαιτείται ο προσδιορισμός του ασθενέστερου ζυγού του συστήματος.

Στην ανάλυση ευστάθειας τάσης αποτελεί συνήθη πρακτική να λαμβάνεται ως ασθενέστερος ζυγός του συστήματος, ο ζυγός που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη πτώση τάσης μετά από την εμφάνιση μίας διαταραχής. Ωστόσο, λειτουργικοί περιορισμοί στο σύστημα μπορεί να επιβάλλουν την επιλογή κάποιου άλλου ζυγού ως ασθενέστερου. Για παράδειγμα, είναι δυνατόν οι τάσεις να αποκτήσουν απαράδεκτα χαμηλές τιμές, τέτοιες ώστε να δημιουργούν πρόβλημα βιωσιμότητας στο σύστημα, χωρίς αυτό να έχει μεταβεί σε ασταθή λειτουργία. Μία πιο ακραία περίπτωση αποτελεί το ενδεχόμενο η αποσύνδεση μιας κρίσιμης γεννήτριας να προκαλέσει τη μετάβαση του συστήματος σε ασταθή λειτουργία ή μια διαδοχή από επακόλουθα συμβάντα που μπορεί να οδηγήσουν στην κατάρρευσή του. Επομένως, αν είναι γνωστό ότι σε κάποιον ζυγό έχει παραβιαστεί ένα περιοριστικό όριο λειτουργίας, μπορεί ως ασθενέστερος ζυγός του συστήματος για τη συγκεκριμένη διαταραχή να οριστεί ο ζυγός που ευθύνεται για την παραβίαση αυτή.

Στα πλαίσια της προστασίας συστήματος από αστάθεια τάσης είναι σκόπιμο να παίρνονται μέτρα που αποσκοπούν στην αύξηση των τάσεων στο σύστημα ή τουλάχιστον στην αποσόβηση της περαιτέρω μείωσή τους. Επομένως, αν προσδιοριστεί ο ασθενέστερος ζυγός του συστήματος, το μέτρο της τάσης του μπορεί να αποτελέσει ασφαλές κριτήριο για την αντιμετώπιση της αστάθειας, όταν αυτή εκδηλωθεί. Τονίζεται ότι το μέτρο της τάσης δεν είναι δείκτης ασφάλειας, είναι όμως ένδειξη αστάθειας αφού αυτή εκδηλωθεί.

Στην προηγούμενη ενότητα εξετάσαμε την επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων φορτίου στο περιθώριο φόρτισης του συστήματος. Παρακάτω θα εξετάσουμε την επίδραση των παραμέτρων φορτίου στην τάση του ασθενέστερου ζυγού. Την επίδραση αυτή μελετά η ανάλυση ευαισθησίας της τάσης του ασθενέστερου ζυγού ως προς τα φορτία του συστήματος [CVC05], με βάση την οποία εξάγονται οι μεταβολές εκείνες των φορτίων που εξασφαλίζουν με την αποκοπή τους τη μεγαλύτερη αύξηση στο μέτρο της τάσης του υπό εξέταση ζυγού. Οι ευαισθησίες της τάσης V_l του ζυγού l ως προς το διάνυσμα των παραμέτρων φορτίου \mathbf{p} :

$$\frac{\partial V_l}{\partial \mathbf{p}} = \left[\frac{\partial V_l}{\partial p_1} \quad \frac{\partial V_l}{\partial p_2} \quad \dots \quad \frac{\partial V_l}{\partial p_n} \right]^T \quad (5.23)$$

υποδεικνύουν τα φορτία των οποίων ο κατάλληλος χειρισμός (π.χ. αποκοπή) είναι περισσότερο ευεργετικός για την αύξηση της τάσης του ζυγού l .

Στο δεύτερο κεφάλαιο είδαμε ότι η (2.43) δίνει τις ευαισθησίες οποιασδήποτε συνάρτησης η των μεταβλητών \mathbf{u} και παραμέτρων \mathbf{p} του συστήματος ως προς τις παραμέτρους. Δεδομένου ότι η τάση V_l είναι συνάρτηση μόνο των μεταβλητών \mathbf{u} (οπότε $\eta=V_l(\mathbf{u})$ και $\nabla_{\mathbf{p}}V_l = \mathbf{0}$), το διάνυσμα των ευαισθησιών της τάσης V_l του ζυγού l ως προς τις παραμέτρους φορτίου \mathbf{p} παίρνει τη μορφή:

$$\mathbf{S}_{V_l, \mathbf{p}} = -\Phi_{\mathbf{p}}^T (\Phi_{\mathbf{u}}^T)^{-1} \nabla_{\mathbf{u}} V_l \quad (5.24)$$

Το διάνυσμα $\nabla_{\mathbf{u}} V_l$ αντιστοιχεί σε ένα διάνυσμα \mathbf{e}_l του οποίου όλα τα στοιχεία είναι μηδενικά εκτός από αυτό που αντιστοιχεί στον ασθενέστερο ζυγό που είναι ίσο με μονάδα. Επομένως ισχύει:

$$\mathbf{e}_l = \nabla_{\mathbf{u}} V_l, \quad \text{με } e_l = 0, \forall l \neq l \text{ και } e_l = 1 \quad (5.25)$$

Δεδομένου ότι το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια ορίων φόρτισης δίνεται από τη σχέση $\mathbf{n} = \boldsymbol{\Phi}_p^T \mathbf{w}_c$, η (5.24) με χρήση ιδιοδιανυσμάτων γράφεται:

$$\mathbf{S}_{V_l p} = -\sum_{i \neq c} \frac{\boldsymbol{\Phi}_p^T \mathbf{w}_i \mathbf{v}_i^T \mathbf{e}_l}{\lambda_i} - \mathbf{n} \frac{\mathbf{v}_c^T \mathbf{e}_l}{\lambda_c} \quad (5.26)$$

όπου:

- λ_c : η μικρότερη πραγματική (κρίσιμη) ιδιοτιμή του Ιακωβιανού πίνακα κατάστασης $\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{u}}$
- λ_i : οι διακεκριμένες ιδιοτιμές του Ιακωβιανού πίνακα κατάστασης $\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{u}}$ πλην της κρίσιμης λ_c
- \mathbf{v}_c : το δεξί ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην κρίσιμη ιδιοτιμή λ_c
- \mathbf{v}_i : το δεξί ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή λ_i
- \mathbf{w}_c : το αριστερό ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην κρίσιμη ιδιοτιμή λ_c
- \mathbf{w}_i : το αριστερό ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή λ_i .

Όσο το σύστημα για δεδομένη κατεύθυνση φόρτισης \mathbf{d} πλησιάζει το κρίσιμο σημείο, όσο δηλαδή προσεγγίζεται το περιθώριο φόρτισης μ^* , η κρίσιμη ιδιοτιμή λ_c τείνει στο μηδέν ($\lambda_c \rightarrow 0$) και ο δεύτερος όρος της (5.26) μεγαλώνει συνεχώς. Επομένως για $\mu \rightarrow \mu^*$:

$$\mathbf{S}_{V_l p} \rightarrow -k\mathbf{n} = k' \mathbf{S}_{\mu^* p_0} \quad (5.27)$$

όπου:

$$k = \frac{\mathbf{v}_c^T \mathbf{e}_l}{\lambda_c}, \quad k' = (\mathbf{n}^T \mathbf{d})k \quad (5.28)$$

Προκύπτει συνεπώς ότι στο όριο φόρτισης τα τρία διανύσματα $\mathbf{S}_{V_l p}$, \mathbf{n} και $\mathbf{S}_{\mu^* p_0}$ είναι συγραμμικά, άρα παρέχουν την ίδια πληροφορία για την ιεράρχηση των ζυγών όπου θα εφαρμοστούν τα μέτρων προστασίας (π.χ. αποκοπή φορτίου). Ξαναγράφοντας μάλιστα την (5.27) ως εξής:

$$\mathbf{S}_{\mu^* p_0} = -\frac{-k\mathbf{n}}{-k\mathbf{n}^T \mathbf{d}} \approx -\frac{\mathbf{S}_{V_l p}}{\mathbf{S}_{V_l p}^T \mathbf{d}} \quad \text{όταν } \mu \approx \mu^* \quad (5.29)$$

προκύπτει ότι η ευαισθησία της τάσης ως προς τις παραμέτρους φορτίου, εκτός από την πληροφορία για την ιεράρχηση των πιο αποδοτικών μέτρων προστασίας την οποία παρέχει, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του καθέτου διανύσματος για τον υπολογισμό της ευαισθησίας του περιθωρίου φόρτισης ως προς τα φορτία.

Η επιλογή του ζυγού στο σύστημα της μεταφοράς, ο οποίος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη πτώση τάσης μετά από μία διαταραχή ως ασθενέστερου ζυγού του συστήματος, ενισχύει την παραπάνω ιδιότητα των ευαισθησιών της τάσης να παρέχουν την ίδια πληροφορία με τις ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης [CVC05].

Κατά την προσομοίωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα τα πλεονεκτήματα της ανάλυσης των ευαισθησιών της τάσης ως προς τις παραμέτρους φορτίου σε σχέση με την ανάλυση άλλων ευαισθησιών ή την εφαρμογή άλλων τεχνικών είναι τα εξής:

- Οι ευαισθησίες της τάσης αποδεικνύονται ιδιαίτερα κατάλληλες για την ιεράρχηση των ενεργειών ελέγχου σε περιπτώσεις όπου δεν έχει διαγνωστεί αστάθεια τάσης, αλλά παραβιάζονται κάποιοι λειτουργικοί περιορισμοί στο σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι οι ευαισθησίες της τάσης παρέχουν αξιόπιστη πληροφορία ακόμα και όταν υπολογίζονται σε ευσταθή σημεία λειτουργίας του συστήματος, γεγονός που δεν ισχύει για άλλες ευαισθησίες. Είναι επίσης γνωστό ότι ούτε η ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων παρέχει ασφαλή συμπεράσματα όταν εφαρμόζεται σε ευσταθή σημεία ισορροπίας, μακριά δηλαδή από το σημείο που αντιστοιχεί στη (σχεδόν) μηδενική ιδιοτιμή του πίνακα κατάστασης του συστήματος. Επομένως ούτε η ανάλυση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα χαμηλών τάσεων που δεν οφείλονται σε αστάθεια τάσης.

- Για τον υπολογισμό των ευαισθησιών της τάσης αλλά και του καθέτου διανύσματος, το οποίο όπως ξέρουμε παρέχει επίσης αξιοποιήσιμη πληροφορία ως προς την ιεράρχηση των πιο αποδοτικών φορτίων για τη λήψη μέτρων προστασίας, απαιτείται ένας υπολογισμός και μία παραγοντοποίηση του Ιακωβιανού πίνακα κατάστασης Φ_{μ} . Ωστόσο, για τον υπολογισμό των ευαισθησιών της τάσης απαιτείται η επίλυση ενός μόνο αραιού γραμμικού συστήματος, εν αντιθέσει με τη μέθοδο των Αντίστροφων Επαναλήψεων όπου απαιτείται η επίλυση μιας διαδοχής από τέτοια συστήματα για τον προσδιορισμό του αριστερού ιδιοδιανύσματος w_c (κατά συνέπεια του καθέτου διανύσματος \mathbf{n}) που αντιστοιχεί στη (σχεδόν) μηδενική ιδιοτιμή.
- Για να υπολογιστεί η ευαισθησία του μέτρου της τάσης δεν απαιτείται να διακριβωθεί αν έχουμε μετάβαση στην αστάθεια μέσω ομαλής μεταβολής (μηδενική ιδιοτιμή) ή απότομη μεταβολή λόγω μεταγωγής.

5.5.2 Αλγόριθμος Υπολογισμού Ευαισθησιών Τάσης και Αποκοπής Φορτίου

Στην παρούσα διατριβή οι προσομοιώσεις στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα πραγματοποιούνται με το πρόγραμμα WPSTAB. Για τον υπολογισμό του διανύσματος $S_{V_i, p}$ των ευαισθησιών της τάσης ως προς τις παραμέτρους φορτίου σε οποιοδήποτε θεωρούμενο ως μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας του συστήματος κατά την προσομοίωση αναπτύχθηκε σχετικός αλγόριθμος, ο οποίος επεκτείνει τη δυνατότητα υπολογισμού ευαισθησιών του προγράμματος προσομοίωσης WPSTAB.

Από το διάνυσμα $S_{V_i, p}$ προκύπτουν οι ευαισθησίες $\partial V_l / \partial P_i$ (αντίστοιχα $\partial V_l / \partial Q_i$) του ζυγού l ως προς κάθε ενεργό φορτίο P_i (αντίστοιχα άεργο φορτίο Q_i). Με την παραδοχή σταθερού συντελεστή ισχύος σε κάθε φορτίο εξάγεται τελικά η ευαισθησία \tilde{S}_{V_i, p_i} της τάσης V_l ως προς το συνολικό φορτίο κάθε ζυγού:

$$\tilde{S}_{V_i, p_i} = \frac{\Delta V_l}{\Delta p_i} = \frac{\partial V_l}{\partial P_i} + \frac{Q_{o,i}}{P_{o,i}} \cdot \frac{\partial V_l}{\partial Q_i} \quad (5.30)$$

Η ευαισθησία αυτή δίνει μία αίσθηση της μεταβολής της τάσης του ζυγού l του συστήματος, που θα συμβεί μετά από ταυτόχρονη μεταβολή στις παραμέτρους ενεργού και άεργου ισχύος ενός φορτίου. Το μέτρο της ευαισθησίας δεν είναι ακριβής δείκτης, δεδομένης της μη γραμμικής φύσης του συστήματος, αλλά δίνει μία εικόνα των πιο αποδοτικών φορτίων για το σκοπό αυτό. Προσεγγιστικά, μία μεταβολή Δp_j των παραμέτρων φορτίου σε n ζυγούς μπορεί να επιφέρει μεταβολή ΔV_l της τάσης του ζυγού l κατά:

$$\Delta V_l \approx \sum_{j=1}^n \tilde{S}_{V_i, p_j} \Delta p_j \quad (5.31)$$

Στην αποκοπή φορτίου η μεταβολή Δp_j των παραμέτρων φορτίου έγκειται στην αποκοπή ποσοστού s επί του φορτίου $p_j = [P_j, Q_j]$ στους ζυγούς j που συμμετέχουν στην εφαρμογή του μέτρου. Συνεπώς η μεταβολή της τάσης του ζυγού l ως προς τα MW αποκοπής δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V_l \approx -s \sum_{j=1}^n \tilde{S}_{V_i, p_j} P_j \quad (5.32)$$

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο αυτή αποκοπής φορτίου, η βέλτιστη επιλογή των ζυγών όπου θα εφαρμοστεί το μέτρο προσδιορίζεται από την ιεράρχηση με φθίνουσα κατάταξη των ευαισθησιών \tilde{S}_{V_i, p_i} . Ο χρόνος εφαρμογής της αποκοπής φορτίου καθορίζεται από τη στιγμή που εντοπίζεται η παραβίαση κάποιου λειτουργικού ορίου τάσης (π.χ. διέγερση ηλεκτρονόμου υποτάσεως γεννήτριας ή παραβίαση προκαθορισμένου ορίου τάσης κρίσιμου ζυγού) ή η ασταθής λειτουργία του συστήματος (αλλαγή προσήμου κρίσιμης ιδιοτιμής). Το πρόβλημα της ελάχιστης αποκοπής φορτίου δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί εκτός αν υπάρχει ασφαλής γνώση της απαιτούμενης αύξησης ΔV_{sp} της τάσης του ζυγού l .

5.5.3 Υπολογισμός Ευαισθησιών Τάσης σε ένα Σενάριο Προσομοίωσης του Ελληνικού Συστήματος

Στον Πίν. 5.8 παρουσιάζονται τα 50 πρώτα στοιχεία του διανύσματος ευαισθησιών της τάσης του τερματικού ζυγού της μονάδας Μεγαλόπολη 1 ως προς τις παραμέτρους φορτίου, όπως υπολογίστηκαν κατά την προσομοίωση ενός σεναρίου αστάθειας τάσης στο Ελληνικό σύστημα με επίκεντρο την Πελοπόννησο. Συγκεκριμένα, με βάση το στιγμιότυπο ροής ισχύος της 3^{ης} Αυγούστου 2005, που αντιστοιχεί στη θερινή αιχμή του συστήματος για το συγκεκριμένο έτος, προσομοιώθηκε η απώλεια των μονάδων Μεγαλόπολη 3 και 4, συνοδευόμενη από ομοιόμορφη αύξηση στο φορτίο. Υπό τις δεδομένες συνθήκες του συστήματος, η αύξηση στη ζήτηση δεν μπορούσε να ικανοποιηθεί και προκλήθηκε κατάρρευση των τάσεων. Περισσότερα στοιχεία για την κατάσταση του συστήματος τη συγκεκριμένη ημέρα, όπως και η αναλυτική προσομοίωση του σεναρίου, δίνονται στο έβδομο κεφάλαιο.

Για τον υπολογισμό των ευαισθησιών εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Ο υπολογισμός έγινε τη χρονική στιγμή που εντοπίστηκε η αστάθεια στο σύστημα, δηλαδή τη στιγμή που η κρίσιμη ιδιοτιμή του συστήματος έγινε θετική. Ως ασθενέστερος ζυγός του συστήματος στο συγκεκριμένο σενάριο θεωρήθηκε ο τερματικός ζυγός της μονάδας Μεγαλόπολη 1. Η επιλογή αυτή επιβλήθηκε από το γεγονός ότι η αποσύνδεση της μονάδας για λόγους υποτάσεως κατά την προσομοίωση προκάλεσε τη διαδοχική απώλεια και άλλων μονάδων και τελικά την κατάρρευση των τάσεων στο σύστημα.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ο υπολογισμός των ευαισθησιών κοντά στο όριο φόρτισης παρέχει την ίδια πληροφορία με το κάθετο διάνυσμα [CVC05]. Αυτό φαίνεται εμφανώς στον Πίν. 5.8 από τη σύγκριση των τιμών των ευαισθησιών της τάσης ως προς τα φορτία με τα στοιχεία \tilde{n}_i του καθέτου διανύσματος. Τα στοιχεία \tilde{n}_i προκύπτουν από τα στοιχεία του καθέτου διανύσματος ως προς το ενεργό και άεργο φορτίο κάθε ζυγού i ως εξής:

$$\tilde{n}_i = n_{P_i} + \frac{Q_{o,i}}{P_{o,i}} \cdot n_{Q_i} \quad (5.33)$$

όπου n_{P_i} (αντίστοιχα n_{Q_i}) το στοιχείο του καθέτου διανύσματος που αντιστοιχεί στο ενεργό (αντίστοιχα άεργο) φορτίο του ζυγού.

Οι αναγραφόμενες στον πίνακα τιμές είναι οι κανονικοποιημένες τιμές των ευαισθησιών της τάσης και των στοιχείων \tilde{n}_i του καθέτου διανύσματος, επειδή το μέτρο των στοιχείων του καθέτου διανύσματος δεν έχει κανένα φυσικό νόημα. Η κανονικοποίηση των ευαισθησιών έγινε ως προς τη μεγαλύτερη εμφανιζόμενη τιμή με βάση τη σχέση:

$$\bar{\tilde{S}}_{V_i P_i} = \frac{\tilde{S}_{V_i P_i}}{(\tilde{S}_{V_i P_i})_{max}} \quad (5.34)$$

Ομοίως τα στοιχεία του καθέτου διανύσματος κανονικοποιήθηκαν με βάση τη σχέση:

$$\bar{\tilde{n}}_i = \frac{\tilde{n}_i}{(\tilde{n}_i)_{max}} \quad (5.35)$$

Επομένως, από τη σύγκριση επαληθεύεται το συμπέρασμα ότι πολύ κοντά στο όριο φόρτισης η κατεύθυνση του καθέτου διανύσματος είναι σχεδόν παράλληλη με την κατεύθυνση του διανύσματος ευαισθησιών της τάσης. Άρα η μεταβολή των παραμέτρων φορτίου στην αντίθετη κατεύθυνση υποδεικνύει τη βέλτιστη αποκοπή φορτίου. Ωστόσο η πληροφορία του καθέτου διανύσματος έχει ισχύ σε μια περιοχή κοντά στο όριο φόρτισης, ενώ το διάνυσμα των ευαισθησιών της τάσης παρέχει ασφαλή πληροφορία ακόμα και όταν υπολογίζεται μακριά από το κρίσιμο σημείο. Στην περίπτωση αυτή η κατεύθυνση του διανύσματος ευαισθησιών αποκλίνει αισθητά από αυτή του καθέτου διανύσματος, υποδεικνύοντας διαφορετικά φορτία για βέλτιστη αποκοπή φορτίου.

Στον Πίν. 5.9 γίνεται η σύγκριση των 50 πρώτων στοιχείων του διανύσματος ευαισθησιών της τάσης του τερματικού ζυγού της μονάδας Μεγαλόπολη 1 ως προς τα φορτία, που υπολογίστηκε στο όριο φόρτισης ($t = t_c$), με τα στοιχεία του, που προκύπτουν για υπολογισμό αμέσως μετά την απώλεια των μονάδων Μεγαλόπολη 3 και 4 ($t = t+$). Είναι εμφανές ότι αμέσως μετά τη διαταραχή, τα αποδοτικότερα φορτία προς αποκοπή είναι διαφορετικά από αυτά στο σημείο εμφάνισης της αστάθειας.

Πίν. 5.8 Ιεράρχηση στοιχείων διανύσματος ευαισθησιών $\tilde{S}_{V_i p_i}$ και καθέτου διανύσματος \tilde{n}_i

ΖΥΓΟΣ	$\tilde{S}_{V_i p_i}$	ΖΥΓΟΣ	\tilde{n}_i	ΖΥΓΟΣ	$\tilde{S}_{V_i p_i}$	ΖΥΓΟΣ	\tilde{n}_i
Τριγωνίδα 51	1	Τριγωνίδα 51	1	Πύλος 52	0,4863	Πύλος 52	0,4903
Τριγωνίδα 52	0,9903	Τριγωνίδα 52	0,9904	Πύλος 51	0,4837	Πύλος 51	0,4877
Αιτωλικό 52	0,9312	Αιτωλικό 52	0,9318	Ζάκυνθος 52	0,4746	Ζάκυνθος 52	0,4751
Αιτωλικό 51	0,9187	Αιτωλικό 51	0,9194	Σπάρτη I 51	0,4307	Σπάρτη I 51	0,4355
Πάτρα III 51	0,9065	Πάτρα III 51	0,9072	Μολάοι 51	0,4158	Μολάοι 51	0,4202
Πάτρα III 52	0,9025	Πάτρα III 52	0,9032	Μολάοι 52	0,4158	Μολάοι 52	0,4202
BZ Πάτρας 52	0,8955	BZ Πάτρας 52	0,8966	Λάδωνας 51	0,3982	Λάδωνας 51	0,4012
Πάτρα I 51	0,8505	Πάτρα I 51	0,8515	Κρανίδι 51	0,3659	Κρανίδι 51	0,3686
Πάτρα II 51	0,8267	Πάτρα II 51	0,8280	Τρίπολη 52	0,3434	Τρίπολη 52	0,3468
Πάτρα I 52	0,8109	Πάτρα I 52	0,8122	Τρίπολη 51	0,3128	Τρίπολη 51	0,3157
Πάτρα II 52	0,7643	Πάτρα II 52	0,7658	Μεγ/πολη I 51	0,3123	Μεγ/πολη I 51	0,3154
BZ Πάτρας 51	0,7559	BZ Πάτρας 51	0,7577	Χωρέμι 52	0,3102	Χωρέμι 52	0,3132
Λεχαινά 51	0,6659	Λεχαινά 51	0,6687	Χωρέμι 51	0,3102	Χωρέμι 51	0,3132
Τιτάν Πάτ. 31	0,6584	Τιτάν Πάτ. 31	0,6599	Μέθανα 51	0,3091	Μέθανα 51	0,3113
Αίγιο 51	0,6481	Αίγιο 51	0,6493	Μέθανα 52	0,3086	Μέθανα 52	0,3108
Αίγιο 52	0,6103	Αίγιο 52	0,6117	Μεγαλ. I 52	0,3028	Μεγαλ. I 52	0,3056
Λεχαινά 52	0,5747	Λεχαινά 52	0,5773	Άργος I 52	0,3019	Άργος I 52	0,3042
Πύργος 51	0,5555	Πύργος 51	0,5587	Άργος I 51	0,3012	Άργος I 51	0,3035
Πύργος 52	0,5511	Πύργος 52	0,5544	Άργος I 51	0,3012	Ξυλ/στρο 51	0,2986
Κυπαρισσία 51	0,5463	Κυπαρισσία 51	0,5503	Ξυλ/στρο 51	0,2971	GT2ME131	0,2982
Σπάρτη II 51	0,5393	Σπάρτη II 51	0,5456	GT2ME 131	0,2955	Ξυλ/στρο 52	0,2969
Σπάρτη II 52	0,5387	Σπάρτη II 52	0,5451	Ξυλ/στρο 52	0,2954	Άργος II 52	0,2816
Καλαμάτα 51	0,5216	Καλαμάτα 51	0,5265	Άργος I 51	0,2808	Άργος I 51	0,2780
Ζάκυνθος 51	0,5191	Ζάκυνθος 51	0,5195	Άργος II 52	0,2793	Άστρος 52	0,2657
Καλαμάτα 52	0,5061	Καλαμάτα 52	0,5109	Άστρος 52	0,2637	Άστρος 51	0,2656

Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι ευαισθησίες της τάσης μπορούν να υποδείξουν, κατ' αντιστοιχία με τα στοιχεία του καθέτου διανύσματος, τις περισσότερο θιγόμενες περιοχές του συστήματος από την εμφάνιση ενός φαινομένου αστάθειας τάσης. Αυτό επιτυγχάνεται υπολογίζοντας για κάθε γεωγραφική περιοχή A_k του συστήματος έναν δείκτη J_k , ο οποίος σχηματίζεται από τη μέση τιμή των ευαισθησιών της τάσης του ασθενέστερου ζυγού ως προς το φορτίο της περιοχής:

$$J_k = \frac{1}{\dim(A_k)} \sum_{i \in A_k} \tilde{S}_{V_i p_i} \quad (5.36)$$

Οι δείκτες που υπολογίζονται με την παραπάνω διαδικασία κανονικοποιούνται ως προς τη μεγαλύτερη εμφανιζόμενη τιμή και με βάση τις κανονικοποιημένες τιμές \bar{J}_k γίνεται η ιεράρχηση των πλέον θιγόμενων περιοχών.

Η ιεράρχηση των περιοχών με βάση τα στοιχεία του καθέτου διανύσματος μπορεί να γίνει, όπως είδαμε στην παράγραφο 5.4.3, με τον υπολογισμό του δείκτη \bar{F}_k . Εδώ για την ιεράρχηση των περιοχών χρησιμοποιείται η κανονικοποιημένη τιμή του δείκτη \tilde{F}_k που υπολογίζεται (κατ' όμοιο τρόπο με το δείκτη \bar{F}_k) από τη σχέση:

$$\tilde{F}_k = \frac{1}{\dim(A_k)} \sum_{i \in A_k} \tilde{n}_i \quad (5.37)$$

Πίν. 5.9 Ιεράρχηση στοιχείων διανύσματος ευαισθησιών \bar{S}_{V_i} για δύο διαφορετικές στιγμές υπολογισμού

ΖΥΓΟΣ	$t = t_c$	ΖΥΓΟΣ	$t = t_+$	ΖΥΓΟΣ	$t = t_c$	ΖΥΓΟΣ	$t = t_+$
Τριγωνίδα 51	1	Σπάρτη II 51	1	Πύλος 52	0,4863	Τιτάν Πάτ. 31	0,5662
Τριγωνίδα 52	0,9903	Σπάρτη II 52	0,9991	Πύλος 51	0,4837	Λάδωνας 51	0,5649
Αιτωλικό 52	0,9312	Καλαμάτα 51	0,9238	Ζάκυνθος 52	0,4746	Άργος II 52	0,5565
Αιτωλικό 51	0,9187	Καλαμάτα 52	0,8004	Σπάρτη I 51	0,4307	Τρίπολη 52	0,5511
Πάτρα III 51	0,9065	Χωρέμι 51	0,7740	Μολάοι 51	0,4158	Τριγωνίδα 52	0,5460
Πάτρα III 52	0,9025	Χωρέμι 52	0,7727	Μολάοι 52	0,4158	Πάτρα III 51	0,5429
BZ Πάτρας 52	0,8955	Μεγαλ. I 51	0,7612	Λάδωνας 51	0,3982	Πάτρα III 52	0,5412
Πάτρα I 51	0,8505	Ζάκυνθος 51	0,7516	Κρανίδι 51	0,3659	Πύργος 52	0,5367
Πάτρα II 51	0,8267	Λεχαινά 51	0,7485	Τρίπολη 52	0,3434	Αργοστόλι 51	0,5274
Πάτρα I 52	0,8109	Πύργος 51	0,7287	Τρίπολη 51	0,3128	Αργοστόλι 52	0,5145
Πάτρα II 52	0,7643	Μέθανα 51	0,7096	Μεγαλ. I 51	0,3123	Μεγ/πολη I 52	0,5145
BZ Πάτρας 51	0,7559	BZ Πάτρας 51	0,6715	Χωρέμι 52	0,3102	Τριγωνίδα 51	0,5001
Λεχαινά 51	0,6659	Πύλος 52	0,6695	Χωρέμι 51	0,3102	Τρίπολη 51	0,4945
Τιτάν Πάτ. 31	0,6584	Πάτρα I 51	0,6676	Μέθανα 51	0,3091	Κόρινθος 52	0,4928
Αίγιο 51	0,6481	Αίγιο 52	0,6663	Μέθανα 52	0,3086	Μέθανα 52	0,4825
Αίγιο 52	0,6103	Ζάκυνθος 52	0,6629	Μεγ/πολη I 52	0,3028	Αιτωλικό 52	0,4741
Λεχαινά 52	0,5747	Άργος I 52	0,6297	Άργος I 52	0,3019	Ξυλ/στρο 52	0,4340
Πύργος 51	0,5555	Άργος I 51	0,6282	Αργοστόλι 52	0,3016	Αιτωλικό 51	0,4187
Πύργος 52	0,5511	Πάτρα I 52	0,6211	Άργος I 51	0,3012	Άστρος 52	0,4114
Κυπαρισσία 51	0,5463	Πάτρα II 51	0,6069	Ξυλ/στρο 51	0,2971	Άστρος 51	0,4112
Σπάρτη II 51	0,5393	Αίγιο 51	0,6037	GT2ME 131	0,2955	Κόρινθος 51	0,3716
Σπάρτη II 52	0,5387	Πάτρα II 52	0,6011	Ξυλ/στρο 52	0,2954	Ξυλ/στρο 51	0,3550
Καλαμάτα 51	0,5216	Κρανίδι 51	0,5998	Αργοστόλι 51	0,2808	Βέλο 51	0,3477
Ζάκυνθος 51	0,5191	Κυπαρισσία 51	0,5998	Άργος II 52	0,2793	Βέλο 52	0,3475
Καλαμάτα 52	0,5061	BZ Πάτρας 52	0,5819	Άστρος 52	0,2637	Αγ. Θεόδ. 51	0,3257

Στον Πίν. 5.10 φαίνεται η ιεράρχηση των περιοχών με βάση τον υπολογισμό των ευαισθησιών της τάσης για το εξεταζόμενο σενάριο της απώλειας των μονάδων Μεγαλόπολη 3 και 4. Όπως διαπιστώνεται, ο δείκτης \bar{J}_k^C που υπολογίζεται από τις ευαισθησίες στο σημείο εμφάνισης της αστάθειας ($t = t_c$) παρέχει την ίδια πληροφορία ως προς την κατάταξη των περιοχών του συστήματος σε σχέση με το δείκτη \bar{F}_k . Πράγματι σύμφωνα με τους δύο αυτούς δείκτες υπάρχει ταύτιση στην ιεράρχηση των περιοχών, με εξαίρεση τις περιοχές της Κεντρικής Μακεδονίας και Ανατολικής Μακεδονίας - Θράκης που κατατάσσονται αντίστροφα, οι οποίες όμως έχουν ούτως ή άλλως μηδενική συμμετοχή. Παρατηρούμε από τον Πίν. 5.10, ότι η ιεράρχηση των περιοχών δεν αλλάζει ούτε όταν γίνεται με βάση το δείκτη \bar{J}_k^+ που υπολογίζεται από τις ευαισθησίες αμέσως μετά τη διαταραχή ($t = t_+$).

Όπως αναμενόταν η περιοχή της Πελοποννήσου είναι η μόνη θιγόμενη από τη διαταραχή, γεγονός απολύτως δικαιολογημένο, καθώς η απώλεια των μονάδων στην περιοχή αυτή προκαλεί την εμφάνιση του φαινομένου αστάθειας τάσης. Η σχετικά μεγάλη συμμετοχή της Δυτικής Ελλάδας οφείλεται στην τοπολογία του συστήματος σε ότι αφορά τη διασύνδεση της Πελοποννήσου με τη Στερεά Ελλάδα μέσω των γραμμών Καστράκι - Τριγωνίδα - Πάτρα. Κατά συνέπεια, στο συγκεκριμένο σενάριο η Πελοπόννησος αποτελεί την εύλωτη περιοχή (περιοχή Α), ενώ οι υπόλοιπες τις σθεναρές περιοχές (περιοχή Β), σύμφωνα με την ανάγκη ομαδοποίησης των φορτίων των γεωγραφικών περιοχών του συστήματος για τη δισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας ορίων φόρτισης.

Πίν. 5.10 Δείκτες \bar{J}_k και \bar{F}_k ανά περιοχή

A/A	ΠΕΡΙΟΧΗ (A_k)	\bar{J}_k^+	\bar{J}_k^C	\bar{F}_k
1	Πελοπόννησος	1	1	1
2	Δυτική Ελλάδα	0,35760	0,20907	0,19759
3	Αττική	0,21237	0,10863	0,10827
4	Στερεά Ελλάδα	0,17420	0,08181	0,08134
5	Θεσσαλία	0,13322	0,04651	0,04616
6	Δυτική Μακεδονία	0,08657	0,01127	0,01193
7	Κεντρική Μακεδονία	0,08622	0,00881	0,00876
8	Ανατολική Μακεδονία-Θράκη	0,08057	0,00424	0,01103

5.6 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

Η αποκοπή φορτίου ως μέτρο προστασίας συστήματος από αστάθεια τάσης μπορεί να υλοποιηθεί σε σχήματα με κεντρικό ή αποκεντρωμένο έλεγχο [CTF01,GTS04]. Αρκετά σχήματα αποκοπής φορτίου βασίζονται σε κεντρικό έλεγχο, δηλαδή στην παρακολούθηση και εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας από το κέντρο ελέγχου με χρήση συστήματος SCADA/EMS. Αν κατά τη διαδικασία της εκτίμησης ασφάλειας τάσης το σύστημα κριθεί ανασφαλές, η υποδομή του συστήματος SCADA/EMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εντολοδότηση των αποκοπών φορτίου. Η εντολοδότηση γίνεται συνήθως μέσω διατάξεων RTU ή PLC σε απλούς ηλεκτρονόμους τάσης, οι οποίοι προβαίνουν στη συνέχεια στο άνοιγμα των διακοπών ισχύος των τροφοδοτικών γραμμών.

Στις μέρες μας, η τεχνολογία επιτρέπει την ανάπτυξη και χρήση διατάξεων ελέγχου και προστασίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας υψηλών δυνατοτήτων, όπως είναι για παράδειγμα οι διατάξεις συγχρονισμένης μέτρησης φασιθετών ηλεκτρικών μεγεθών (PMU) ή τα τερματικά προστασίας (protection terminals) [AAB06]. Συνεπώς, η διαδικασία βελτίωσης των σχημάτων αποκοπής φορτίου βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη και στοχεύει ουσιαστικά στην ενσωμάτωση τέτοιων διατάξεων στα ήδη υπάρχοντα συστήματα SCADA/EMS.

Η χρήση των PMU αρχίζει να βρίσκει εφαρμογή στην εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, στην καταγραφή και ανάλυση συμβάντων και στη λήψη αποφάσεων από τους χειριστές του συστήματος με τη βοήθεια εργαλείων εκτίμησης ασφάλειας [BSG02]. Η συγχρονισμένη παρακολούθηση φασιθετών τάσης και ρεύματος σε διαφορετικά σημεία του συστήματος επιτυγχάνεται με τη μέτρηση των μεγεθών αυτών ως προς μία κοινή αναφορά χρόνου, που καθορίζεται συνήθως από το ρολόι ενός δορυφορικού συστήματος (συνήθως GPS ή IRIG). Η μέτρηση αυτή επιτρέπει την ταχύτερη εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος και κατά συνέπεια την ταχύτερη εκτίμηση της ασφάλειάς του.

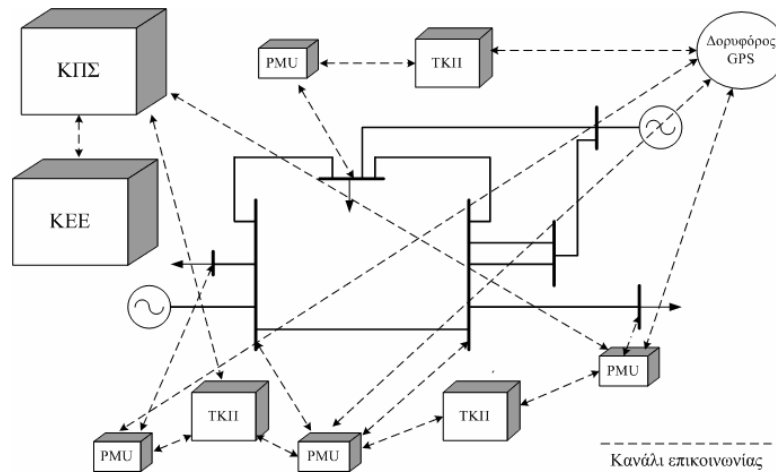
Διατάξεις προστασίας χρησιμοποιούνται σε όλες τις εγκαταστάσεις ισχυρών ρευμάτων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι σύγχρονες διατάξεις προστασίας (τερματικά προστασίας) διαθέτουν επαρκή υπολογιστική ικανότητα και δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους ή/και με άλλα συστήματα ελέγχου [AAB06]. Επομένως, στη βάση διατάξεων προστασίας μπορούν να σχεδιαστούν κεντρικά σχήματα αποκοπής φορτίου ευρείας περιοχής με μεγάλο βαθμό σθεναρότητας και αξιοπιστίας.

Ένα τέτοιο κεντρικό σχήμα βασίζεται στη συλλογή τοπικών μετρήσεων από τις διατάξεις προστασίας και στη μετάδοση των σημάτων μέτρησης προς το κέντρο ελέγχου, το οποίο είναι επιφορτισμένο με την απόφαση για την αποκοπή φορτίου. Η εντολοδότηση της αποκοπής φορτίου δίνεται κατά κανόνα στη διάταξη προστασίας που βρίσκεται στον υποσταθμό όπου θα εφαρμοστεί η αποκοπή, καθώς η μετάδοση σημάτων διέγερσης μεταξύ διατάξεων προστασίας μειώνει το βαθμό ασφάλειας του σχήματος προστασίας συστήματος. Η εντολοδότηση της αποκοπής φορτίου βασίζεται συνήθως στην εκπλήρωση κάποιου κριτηρίου, όπως είναι για παράδειγμα το μέτρο της τάσης, η μέτρηση της ροής αέργου ισχύος στο σύστημα ή μεγέθη που προκύπτουν από σύνθετους αλγόριθμους (π.χ. αλγόριθμος

υπολογισμού περιθωρίου ισχύος). Ο κίνδυνος από πιθανή απώλεια επικοινωνίας με το κέντρο ελέγχου μειώνεται αν οι διατάξεις προστασίας μπορούν σε ένα τέτοιο ενδεχόμενο να αποκρίνονται μόνο σε τοπικές μετρήσεις, συνιστώντας έτσι ένα back-up αποκεντρωμένο σχήμα προστασίας.

Στο μέλλον τοποθετείται η υλοποίηση των πιο αναπτυγμένων σχημάτων αποκοπής φορτίου με κεντρικό έλεγχο, που θα βασίζονται αποκλειστικά στη χρήση διατάξεων PMU και δικτύων τηλεπικοινωνίας υψηλής τεχνολογίας [BNK05]. Σε ένα τέτοιο σχήμα (Σχ. 5.25) τα PMU συνιστούν το κατώτερο επίπεδο προστασίας και εκτός από μετρήσεις εκτελούν και λειτουργίες της προστασίας. Στο ενδιάμεσο επίπεδο προστασίας τοποθετούνται τα γεωγραφικά διανεμημένα τοπικά κέντρα προστασίας, μέσω των οποίων γίνεται η επικοινωνία με ορισμένες ομάδες PMU. Στο ανώτερο επίπεδο προστασίας τοποθετείται το κέντρο προστασίας συστήματος που συντονίζει τα τοπικά κέντρα.

Ο προαναφερόμενος σχηματισμός συνθέτει ουσιαστικά ένα σχέδιο άμυνας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, με τα τοπικά κέντρα προστασίας να αποτελούν τα επιμέρους σχήματα προστασίας συστήματος. Τα δεδομένα που συλλέγονται από κάθε ομάδα PMU αποστέλλονται σε μία βάση δεδομένων, με την οποία μπορεί να επικοινωνεί τόσο το κέντρο ελέγχου όσο και το τοπικό κέντρο προστασίας. Το τοπικό κέντρο προστασίας είναι αυτό που δίνει την εντολή για την αποκοπή φορτίου. Το κέντρο προστασίας συστήματος επικοινωνεί με το σύνολο των τοπικών κέντρων προστασίας για το συντονισμό των αποκοπών.



Σχ. 5.25 Δυνατή διαμόρφωση σχημάτων αποκοπής φορτίου

Η υλοποίηση της αποκοπής φορτίου σε σχήματα προστασίας με αποκεντρωμένο έλεγχο είναι αρκετά απλούστερη. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται είτε αφοσιωμένες διατάξεις προστασίας είτε τα στοιχεία τάσης των ηλεκτρονόμων προστασίας άλλων διατάξεων του συστήματος (ηλεκτρονόμοι αποστάσεως, υπερεντάσεως, διαφορικοί). Εφόσον οι διατάξεις προστασίας που χρησιμοποιούνται σε ένα κεντρικό σχήμα προστασίας είναι ψηφιακές, μπορούν ταυτόχρονα να χρησιμοποιηθούν και σε αποκεντρωμένα σχήματα.

Σε επίπεδο τοπικής προστασίας με αποκεντρωμένο έλεγχο, η αποκοπή φορτίου πραγματοποιείται συνήθως με κριτήριο την τάση του ζυγού που επιτηρείται από απλούς ηλεκτρονόμους τάσης. Στην περίπτωση αυτή αποκόπεται φορτίο όταν ανιχνευθεί τριφασική βύθιση της τάσης για αρκετό χρόνο (βλέπε ενότητα 5.3). Ο ηλεκτρονόμος δεν αποκρίνεται για βύθιση της τάσης στη μία ή στις δύο φάσεις, ούτε όταν η τάση στις τρεις φάσεις πέσει πολύ χαμηλά λόγω σκόπιμης απενεργοποίησης της γραμμής. Στους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους περιλαμβάνεται επίσης λειτουργία αποτροπής της αποκοπής φορτίου, όταν η τάση εισόδου στη συσκευή έχει χαθεί ή παρουσιαστεί κάποια ανωμαλία στο εσωτερικό της ή στο κύκλωμα μέτρησης.

Πραγματοποιώντας αναλύσεις της ασφάλειας τάσης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον μελέτης (off-line) για τις πιο σοβαρές διαταραχές, μπορούν να προσδιοριστούν τα επίπεδα ρύθμισης των ηλεκτρονόμων στους ζυγούς που είναι διαθέσιμοι για απόρριψη φορτίου. Η επιλογή μίας κοινής ρύθμισης υποτάσεως για όλους τους ηλεκτρονόμους προσδίδει στο σχήμα αποκοπών την έννοια της ύστατης προστασίας του συστήματος από την κατάρρευση. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η προστασία του συστήματος από τη σοβαρότερη διαταραχή που μπορεί να εμφανιστεί, ενώ παράλληλα η αποκοπή εφαρμόζεται μόνο στους ζυγούς που βρίσκονται κοντά στην πηγή του προβλήματος.

Αντίθετα, η εναρμονισμένη ρύθμιση των σταδίων υποτάσεως των ηλεκτρονόμων απαιτεί τη βελτιστοποίηση του σχήματος προστασίας. Στην περίπτωση αυτή, η ρύθμιση υποτάσεως των ηλεκτρονόμων εξάγεται από δυναμικές προσομοιώσεις του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για ένα μεγάλο αριθμό διαταραχών και λειτουργικών του σημείων, λαμβάνοντας υπόψη και τις παραμέτρους που υπεισέρχονται από τη λειτουργία της κλασικής προστασίας εξοπλισμού (επίδραση 3^{ης} ζώνης προστασίας αποστάσεως, επίδραση προστασίας υποτάσεως γεννητριών κλπ.). Από τη μελέτη αυτή θα προκύψουν διαφορετικά στάδια αποκοπής φορτίου και διαφορετικοί χρόνοι εφαρμογής που εξασφαλίζουν την επιλογικότητα και σθεναρότητα του σχήματος.

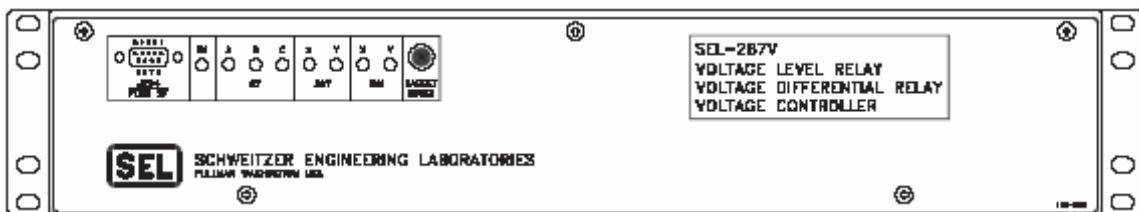
Σε επίπεδο προστασίας ευρείας περιοχής με αποκεντρωμένο έλεγχο, για την αποκοπή φορτίου απαιτείται η απευθείας επικοινωνία μεταξύ των διατάξεων προστασίας της περιοχής. Για παράδειγμα, αν παρακολουθείται το μέτρο της τάσης σε κρίσιμους ζυγούς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, η μέτρηση χαμηλού επιπέδου τάσης σε συγκεκριμένο αριθμό από τους εποπτευόμενους ζυγούς (στη βάση π.χ. της λογικής k ζυγοί με χαμηλή τάση από n εποπτευόμενους) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σχεδίαση ενός σχήματος αποκοπών φορτίου με λογικές αποφάσεις. Η διαφορά ως προς την προστασία ευρείας περιοχής με κεντρικό έλεγχο εντοπίζεται ακριβώς στο σημείο ότι δεν υπάρχει καθόλου επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου, αλλά μόνο μεταξύ των διατάξεων προστασίας.

Σε κάθε περίπτωση, η αύξηση του βαθμού εξαρτησιμότητας των σχημάτων αποκοπής φορτίου επιτυγχάνεται με την εξασφάλιση περίσσειας (redundancy) σε διατάξεις προστασίας και τηλεπικοινωνιακά μέσα. Έτσι, ενδεχόμενη αστοχία μίας διάταξης δεν θα επηρεάσει την αποτελεσματικότητα του σχήματος, καθώς η εντολή της αποκοπής θα δοθεί από την πλεονάζουσα διάταξη. Με την ίδια λογική η επάρκεια των διατάξεων είναι απαραίτητη και για την αύξηση του βαθμού ασφάλειας, ώστε η απόφαση για την αποκοπή του φορτίου να παίρνεται ταυτόχρονα από περισσότερες της μίας διατάξεις προστασίας. Η ασφάλεια ενισχύεται επίσης με τη δυνατότητα χειροκίνητου ή αυτόματου οπλισμού του σχήματος προστασίας.

Όταν απαιτείται η τηλεπικοινωνία, αυτή πραγματοποιείται μέσω αφοσιωμένου δικτύου, συνήθως αναλογικού ή ψηφιακού μικροκυματικού δικτύου ή δικτύου οπτικών ινών. Τα δίκτυα αυτού του τύπου εξασφαλίζουν ασφάλεια στην επικοινωνία και μεγάλη ταχύτητα μετάδοσης, της τάξης των 100-200 ms, ικανής να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της προστασίας [AAB06].

Η επιλογή των διατάξεων προστασίας καθορίζεται από τις ανάγκες του σχήματος αποκοπής φορτίου που έχει επιλεγεί. Η αξιοπιστία τους ελέγχεται με το κριτήριο του χρονικού διαστήματος μεταξύ αστοχιών (mean-time-between-failures) και εξασφαλίζεται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα αυτοδιάγνωσης την οποία διαθέτουν [KSS06,Tho06]. Ο έλεγχος όλων των διατάξεων προστασίας και επικοινωνίας πρέπει να γίνεται μία φορά το χρόνο ή κάθε έξι μήνες για τις πιο κρίσιμες από αυτές.

Κάθε κατασκευαστής συσκευών προστασίας διαθέτει ένα μεγάλο εύρος διατάξεων για την υλοποίηση της αποκοπής φορτίου. Ένα τερματικό προστασίας πολλαπλών λειτουργιών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην υλοποίηση ενός κεντρικού ή αποκεντρωμένου σχήματος αποκοπής φορτίου φαίνεται στο Σχ. 5.26. Το τερματικό αυτό παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης δύο διαφορετικών επιπέδων τάσης αποκοπής, με ανεξάρτητες χρονικές καθυστερήσεις στιγμιαίου/σταθερού χρόνου για κάθε επίπεδο. Επίσης παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα προγραμματισμού ειδικών εφαρμογών, όπως αποκοπή φορτίου με αλγοριθμική απόφαση, και χρήση τηλεπικοινωνιών υψηλής ταχύτητας.



Σχ. 5.26 Τερματικό προστασίας τάσης SEL 287V [www.selinc.com]

Στο Σχ. 5.27 παρουσιάζεται τρεις απλοί ηλεκτρονόμοι τάσης. Ο πρώτος (RMS) έχει δυνατότητα ρύθμισης τεσσάρων διαφορετικών επιπέδων τάσης αποκοπής, με ανεξάρτητες χρονικές καθυστερήσεις σταθερού χρόνου για κάθε επίπεδο. Ο δεύτερος (MICOM) έχει δυνατότητα ρύθμισης τριών επιπέδων τάσης αποκοπής, από τα οποία το πρώτο ορίζεται με καθυστέρηση αντιστρόφου χρόνου και τα άλλα δύο με καθυστέρηση σταθερού χρόνου. Ο τρίτος (SIEMENS) έχει δυνατότητα ρύθμισης ενός σταδίου αποκοπής με καθυστέρηση αντιστρόφου χρόνου. Οι συγκεκριμένοι ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την εφαρμογή αποκοπών φορτίου με κριτήριο την τάση και διαθέτουν δυνατότητα μόνο τοπικής επικοινωνίας.



Σχ. 5.27 Ηλεκτρονόμοι τάσης RMS 2V67 [www.rmspl.com.au], MICOM 92x [www. areva.com] και SIPROTEC 7RW600 [www.siemens.com]

6ο Κεφάλαιο

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΚΟΠΗΣ 12^{ης} ΙΟΥΛΙΟΥ 2004 ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ

6.1 Η ΔΙΑΚΟΠΗ ΤΗΣ 12^{ης} ΙΟΥΛΙΟΥ 2004

6.1.1 Κατάσταση του Ελληνικού Συστήματος πριν τη Διαταραχή

Από τα μέσα της δεκαετίας του '90, η εμφάνιση της ετήσιας αιχμής φορτίου του Ελληνικού συστήματος μετατοπίστηκε από το χειμώνα στο καλοκαίρι, κυρίως λόγω της αυξανόμενης χρήσης των κλιματιστικών. Η αιχμή του φορτίου εμφανίζεται συνήθως τις μεσημεριανές ώρες της πιο ζεστής καθημερινής ημέρας του καλοκαιριού, εφόσον αυτή παρουσιαστεί πριν την περίοδο των καλοκαιρινών αδειών, που συνδυάζεται με μείωση της βιομηχανικής δραστηριότητας στη χώρα. Από τη μέχρι τώρα εμπειρία, συνθήκες ευνοϊκές για την εμφάνιση μεγίστου φορτίου παρουσιάζονται στο χρονικό διάστημα μεταξύ τέλους Ιουνίου και αρχών Αυγούστου.

Το Ελληνικό σύστημα είναι επιρρεπές στην εμφάνιση φαινομένων αστάθειας τάσης κατά το παραπάνω διάστημα. Το γεγονός αυτό σχετίζεται με τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ισχύος από το κύριο κέντρο παραγωγής, που εντοπίζεται στα βορειοδυτικά της χώρας, προς το κύριο κέντρο κατανάλωσης, που είναι η μητροπολιτική περιοχή της Αττικής. Το πρόβλημα οφείλεται στη μεγάλη ηλεκτρική απόσταση μεταξύ του κέντρου παραγωγής και κατανάλωσης, η οποία περιλαμβάνει την επαγωγική αντίδραση των μετασχηματιστών ανύψωσης των γεννητριών, των γραμμών μεταφοράς 400 kV και 150 kV, των αυτομετασχηματιστών 400/150 kV και των μετασχηματιστών διανομής (συνήθως 150/20 kV).

Το πρώτο περιστατικό αστάθειας τάσης στο Ελληνικό σύστημα συνέβη το 1996 με επίκεντρο την Πελοπόννησο και επηρέασε ολόκληρη την περιοχή νοτίως της Αττικής [VMK00]. Προκειμένου να αποτραπεί η εμφάνιση παρόμοιων περιστατικών, ακολούθησαν έργα ενίσχυσης στο επίπεδο της παραγωγής και μεταφοράς με σκοπό την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς του συστήματος. Μεταξύ των σπουδαιότερων από αυτά είναι η κατασκευή μίας μονάδας παραγωγής 560 MW στο Λαύριο (σταθμός συνδυασμένου κύκλου), μίας επιπλέον (τρίτης) γραμμής μεταφοράς 400 kV διπλού κυκλώματος στον άξονα Βορρά-Νότου και δύο καλωδίων 150 kV στο Ρίο-Αντίρριο για τη διασύνδεση της Πελοποννήσου με τη Δυτική Ελλάδα. Τα έργα αυτά ενίσχυσαν σημαντικά την ικανότητα μεταφοράς του συστήματος, ενώ παράλληλα το πρόβλημα μετατοπίστηκε από την Πελοπόννησο στη Στερεά Ελλάδα, που αποτέλεσε πλέον την πιο ευάλωτη περιοχή του συστήματος για την εμφάνιση φαινομένων αστάθειας τάσης [VCK05].

Ενόψει της διεξαγωγής των Ολυμπιακών Αγώνων στην Αθήνα το 2004, της συνεχώς αυξανόμενης αιχμής φορτίου (η οποία είχε προβλεφθεί να προσεγγίζει τα 9500 MW το καλοκαίρι του 2004) και εξαιτίας της μείωσης του συντελεστή ισχύος των φορτίων λόγω της αυξανόμενης χρήσης των κλιματιστικών, προγραμματίστηκαν περαιτέρω έργα ενίσχυσης του συστήματος. Ο προγραμματισμός κατά το διάστημα 2003-2004 περιλάμβανε την εγκατάσταση νέων πρόσθετων αυτομετασχηματιστών 400/150 kV στα ΚΥΤ Παλλήνης, Αγ. Στεφάνου, Λάρυμνας, Λάρισας και Διστόμου, συστοιχιών πυκνωτών στη ΜΤ και ΥΤ και την κατασκευή του υποσταθμού στην Αργυρούπολη για τη σύνδεση του σταθμού του Λαυρίου με το δίκτυο της Αττικής. Η κατασκευή του υποσταθμού 150/20 kV της Αργυρούπολης αντικατέστησε αυτή του ΚΥΤ στην ίδια θέση, εξαιτίας αντιδράσεων της τοπικής κοινωνίας.

Σύμφωνα με το πόρισμα [Por04], ορισμένα από τα προγραμματισμένα έργα ενίσχυσης ολοκληρώθηκαν λίγο μετά την εμφάνιση της ετήσιας αιχμής φορτίου του συστήματος, στις 12 Ιουλίου 2004. Συγκεκριμένα, οι αυτομετασχηματιστές που επρόκειτο να εγκατασταθούν στο ΚΥΤ Παλλήνης και Αγ. Στεφάνου και ορισμένες συστοιχίες πυκνωτών που επρόκειτο να εγκατασταθούν στην Αττική και τη

Στερεά Ελλάδα, ως μέρος των προγραμματιζόμενων έργων για τους Ολυμπιακούς Αγώνες του 2004, δεν είχαν ακόμη παραδοθεί. Επιπροσθέτως, την ίδια ημέρα οι παρακάτω διατάξεις του συστήματος στην περιοχή της Αττικής δεν ήταν διαθέσιμες για διάφορους λόγους:

- Το ένα κύκλωμα της γραμμής 150 kV που συνδέει το σταθμό του Λαυρίου με το ΚΥΤ της Παλλήνης.
- Τα δύο καλώδια 150 kV που συνδέουν το σταθμό του Αγ. Γεωργίου με την περιοχή του Πειραιά και της Καλλιθέας.
- Το ένα από τα τέσσερα κυκλώματα 150 kV που συνδέουν το ΚΥΤ του Κουμουνδούρου με το σταθμό του Αγ. Γεωργίου.

Η λειτουργία των αεριοστροβίλων (ονομαστικής ισχύος 140 MW) στο σταθμό παραγωγής της εταιρείας ΗΡΩΝ που αναμενόταν να ξεκινήσει μέχρι το τέλος του Ιουνίου καθυστέρησε επίσης λόγω προβλημάτων αδειοδότησης. Ο σταθμός δεσμευόταν με συμβόλαιο με τον ΔΕΣΜΗΕ να υποστηρίξει το σύστημα σε περιόδους αιχμής του φορτίου. Όλοι οι παραπάνω λόγοι αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα για τη διακοπή της παροχής ισχύος στο νότιο τμήμα του Ελληνικού συστήματος την ημέρα αυτή [Por04].

Σημειώνεται ότι λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούσαν στο Ελληνικό σύστημα την περίοδο του καλοκαιριού του 2004 (ημιτελή έργα ανάπτυξης του δικτύου μεταφοράς, προετοιμασία για τους επερχόμενους Ολυμπιακούς Αγώνες, επισκευή βλαβών) η τοπολογία δεν ήταν η προβλεπόμενη από τη μελέτη προγραμματισμού. Λόγω ακριβώς αυτής της ιδιαιτερότητας εμφανίστηκαν προβλήματα χαμηλών τάσεων στο σύστημα και ιδιαίτερα στις περιοχές της Στερεάς Ελλάδας και της Αττικής, όπου επικεντρώνεται το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου. Το πρόβλημα των χαμηλών τάσεων αποτυπώνεται στον παρακάτω πίνακα, όπου παρατίθενται οι τιμές των τάσεων σε κρίσιμους ζυγούς 150 kV του συστήματος στις 11:30 της 12^{ης} Ιουλίου 2004.

Πίν. 6.1 Τάσεις ορισμένων ζυγών 150 kV (11:30 - 12 Ιουλίου 2004)

ΖΥΓΟΣ	ΤΑΣΗ (kV)	ΖΥΓΟΣ	ΤΑΣΗ (kV)
Αιδηψός 31	139,1	Κωπαΐδα 31	136,2
Αλμυρός 31	137,2	Λειβαδιά 31	136,0
Αργυρούπολη 31	136,9	Παγκράτι 31	136,2
Αχλάδι 31	139,2	Παλλήνη 31	139,2
Βούναινα 31	138,5	Πειραιάς 31	135,4
Ελληνικό 31	136,8	Ρουφ 31	144,5
Θήβα 31	137,7	Σχηματάρι 31	141,2
Κρανίδι 31	142,9	Ψυχικό 32	137,7

6.1.2 Περιγραφή Φαινομένου

Στις 12:39 της 12^{ης} Ιουλίου 2004 το νότιο τμήμα του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος διαχωρίστηκε από το υπόλοιπο και οδηγήθηκε σε σβέση (blackout) προκαλώντας διακοπή της παροχής ισχύος σε συνολικό φορτίο 4500 MW. Η διαδοχή των συμβάντων που οδήγησαν στην κατάρρευση περιγράφεται συνοπτικά ακολούθως [Por04]:

Στις 16:30 της 11^{ης} Ιουλίου 2004 η μονάδα Μεγαλόπολη 1 (ονομαστικής ισχύος 125 MW) αποσυνδέθηκε από το σύστημα λόγω βλάβης και παρέμεινε εκτός λειτουργίας για όλο το κρίσιμο διάστημα μέχρι την κατάρρευση του νοτίου συστήματος. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα αυτής της απώλειας ήταν η δημιουργία μιας μικρής ροής ισχύος από το ΚΥΤ Κουμουνδούρου προς την Πελοπόννησο, η οποία επιβάρυνε πρόσθετα την Αττική.

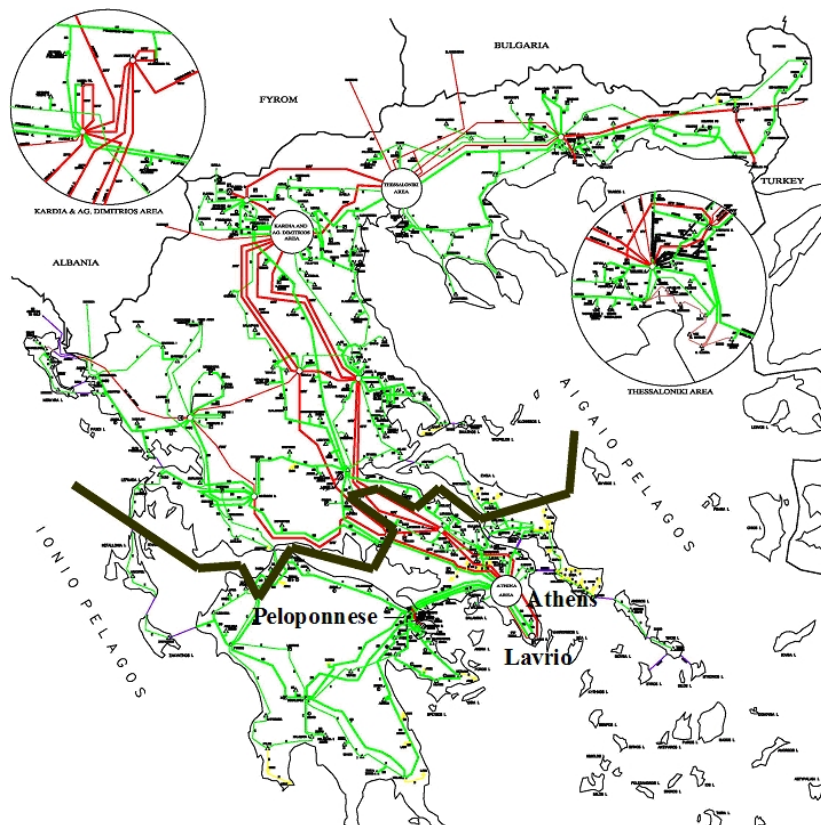
Στις 7:08 της 12^{ης} Ιουλίου 2004 η μονάδα Λαύριο 2 (ονομαστικής ισχύος 300 MW) τέθηκε εκτός λειτουργίας λόγω βλάβης στο σύστημα αδιάλειπτης τροφοδοσίας των βοηθητικών (UPS). Η βλάβη επισκευάστηκε, αλλά εξαιτίας προβλημάτων κατά τη διαδικασία επανεκκίνησης η μονάδα συγχρονίστηκε μόλις στις 12:01. Στο διάστημα αυτό το φορτίο ανήλθε στην τιμή των 9160 MW, ενώ οι

τάσεις στην περιοχή της Αττικής μειώνονταν συνεχώς φτάνοντας στο επίπεδο του 90% της ονομαστικής τους τιμής. Η μείωση των τάσεων περιορίστηκε με το συγχρονισμό της μονάδας Λαύριο 2, αλλά στις 12:12 και ενώ η μονάδα βρισκόταν ακόμη στο στάδιο ανάληψης τεχνικού ελαχίστου υπό χειροκίνητο έλεγχο, τέθηκε εκ νέου εκτός λειτουργίας λόγω υψηλής στάθμης τυμπάνου φέρνοντας το σύστημα σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης.

Στις 12:25, δόθηκε εντολή για αποκοπή φορτίου 100 MW. Η εντολή εφαρμόστηκε στις 12:30 επιτυγχάνοντας συνολική αποκοπή φορτίου 80 MW, η οποία όμως δεν ήταν αρκετή για να σταματήσει την πτώση των τάσεων στο σύστημα. Έτσι, στις 12:35 και ενώ το φορτίο του συστήματος που μετρήθηκε από το Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας ανήρχετο σε 9320 MW, δόθηκε νέα εντολή για αποκοπή φορτίου 200 MW. Η δεύτερη αυτή εντολή δεν πρόλαβε να εκτελεστεί. Στις 12:37:40 η μονάδα Αλιβέρι 3 που εξυπηρετεί την κρίσιμη περιοχή της Στερεάς Ελλάδας αποσυνδέθηκε από το σύστημα για αδιευκρίνιστους λόγους. Στις 12:38:50 κρατήθηκε χειροκίνητα η μονάδα Αλιβέρι 4. Η απώλεια των δύο αυτών κρίσιμων μονάδων προκάλεσε μεγάλη πτώση στις τάσεις τις περιοχής, με αποτέλεσμα στις 12:39 να ενεργοποιηθεί η λειτουργία υποτάσεως των ηλεκτρονόμων αποστάσεως στις γραμμές ΥΥΤ που οδήγησε στο διαχωρισμό Βορρά-Νότου και εν συνεχεία στην κατάρρευση του νοτίου συστήματος.

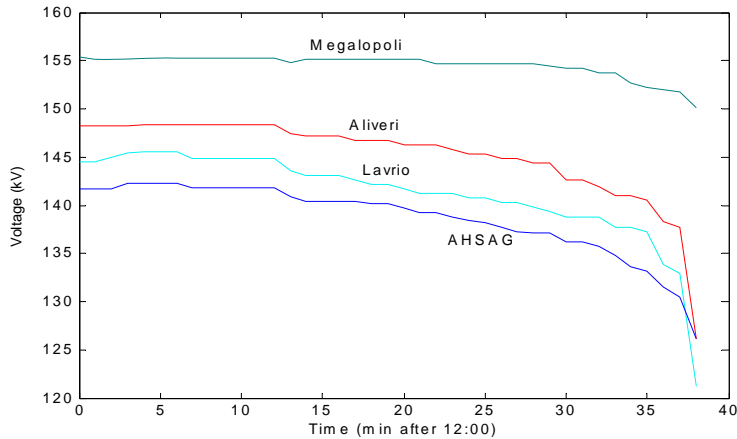
Όπως προκύπτει από το στιγμιότυπο του συστήματος στις 12:35, το τελευταίο που παρήχθη από τον εκτιμητή κατάστασης του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας πριν τη σβέση, τη στιγμή εκείνη η συνολική κατανάλωση ενεργού και αέργου ισχύος ήταν ίση με 9370 MW και 6096 MVar αντίστοιχα. Στην Αττική το φορτίο ανήρχετο σε 3173 MW, 1655 MVar, ενώ στην Πελοπόννησο σε 890 MW, 609 MVar.

Στο Σχ. 6.1 με έντονη γραμμή υποδηλώνονται τα γεωγραφικά όρια του διαχωρισμού του συστήματος εξαιτίας της αποσύνδεσης των γραμμών μεταφοράς 400 kV στον άξονα Βορρά-Νότου [VNT06]. Αμέσως μετά το διαχωρισμό, η παραγωγή στις περιοχές της Αττικής και της Στερεάς Ελλάδας απωλέστη, λόγω της αποσύνδεσης των μονάδων για λόγους προστασίας από χαμηλή τερματική τάση, γεγονός που προκάλεσε και τη σβέση του νοτίου συστήματος. Στο Σχ. 6.2 παρουσιάζονται οι τάσεις των ζυγών 150 kV τεσσάρων σταθμών παραγωγής, όπως προέκυψαν μετά από επεξεργασία των δεδομένων μετρήσεων του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας. Είναι εμφανής η επιτάχυνση στην πτώση των τάσεων αμέσως μετά την απώλεια της μονάδας Λαύριο 2 στις 12:12.

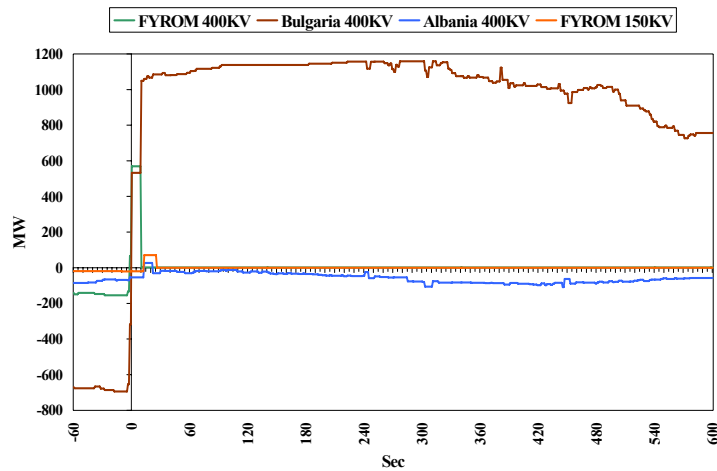


Σχ. 6.1 Διαχωρισμός συστήματος [πηγή: ΔΕΣΜΗΕ]

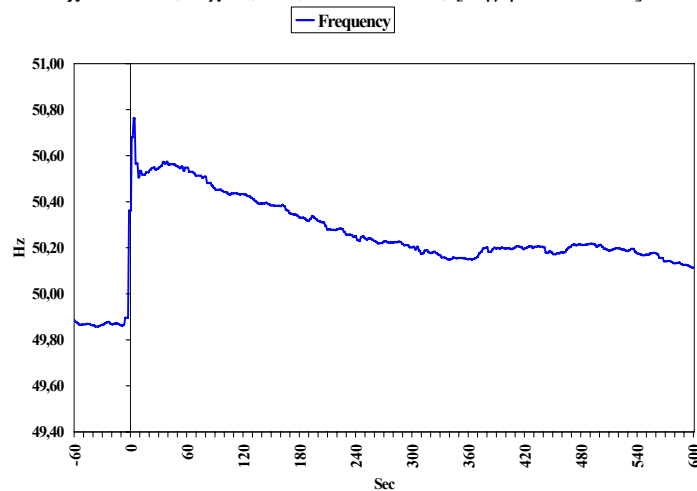
Ο διαχωρισμός του συστήματος έσωσε το βόρειο και δυτικό τμήμα του Ελληνικού συστήματος, τα οποία παρέμειναν σε διασυνδεδεμένη λειτουργία παρότι η πλεονάζουσα παραγωγή προκάλεσε σημαντική διαταραχή στα γειτονικά συστήματα της τότε 2^{ης} σύγχρονης ζώνης της UCTE. Η κατά 2000 MW περίπου πλεονάζουσα παραγωγή προκάλεσε τη μεταβολή στην κατεύθυνση της ροής ισχύος στις βόρειες διασυνδέσεις, από εισαγωγή 900 MW σε εξαγωγή 1100 MW (Σχ. 6.3). Η διασύνδεση με την ΠΓΔΜ διακόπηκε λόγω υπερφόρτισης, ενώ η διασύνδεση με τη Βουλγαρία παρέλαβε τη συνολική ισχύ των 1100 MW. Η διασύνδεση με την Ιταλία δεν επηρεάστηκε διατηρώντας το σταθερό πρόγραμμα εισαγωγής 250 MW. Η συχνότητα του συστήματος αυξήθηκε σε 50,75 Hz (Σχ. 6.4).



Σχ. 6.2 Μετρημένες τάσεις ζυγών YT σε σταθμούς παραγωγής



Σχ. 6.3 Ροές ισχύος στις διασυνδέσεις [πηγή: ΔΕΣΜΗΕ]



Σχ. 6.4 Διακύμανση συχνότητας στο υπόλοιπο σύστημα [πηγή: ΔΕΣΜΗΕ]

Η διαδικασία αποκατάστασης της κανονικής λειτουργίας στο νότιο σύστημα ξεκίνησε στις 12:45. Με τις μονάδες στο βόρειο και δυτικό τμήμα σε λειτουργία, η διαδικασία αυτή ολοκληρώθηκε σχετικά γρήγορα. Ο έλεγχος αποκατάστασης πραγματοποιήθηκε ουσιαστικά προς δύο διαφορετικές κατευθύνσεις: α) από τους σταθμούς παραγωγής στα δυτικά του συστήματος μέχρι τα λιγνιτορυχεία της Πελοποννήσου και β) από το κέντρο παραγωγής στα βόρεια μέχρι τους σταθμούς παραγωγής στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής.

Σε μισή ώρα (13:15) όλοι οι κύριοι υποσταθμοί του νοτίου συστήματος είχαν ηλεκτρισθεί, ενώ σε μία ώρα και ένα τέταρτο (14:00) τροφοδοτήθηκαν 1900 MW περίπου. Η τροφοδοσία του υπόλοιπου φορτίου στο Νότο δεν μπορούσε να πραγματοποιηθεί για λόγους ευστάθειας τάσης, επειδή οι μονάδες που είχαν εμπλακεί στο περιστατικό συνέχιζαν να βρίσκονται εκτός λειτουργίας και συνεπώς η πλήρης αποκατάσταση του φορτίου θα μπορούσε να προκαλέσει νέα κατάρρευση του συστήματος. Οι μονάδες του ΑΗΣ Αλιβερίου συγχρονίστηκαν ξανά στο σύστημα στις 15:05, ενώ η μονάδα Λαύριο 2 στις 22:42. Η πλήρης αποκατάσταση της παροχής ισχύος στο σύνολο των καταναλωτών πραγματοποιήθηκε στις 17:30.

6.1.3 Λεπτομερής Προσομοίωση Διακοπής

Μετά την έκδοση του πορίσματος της επιτροπής διερεύνησης της διακοπής, ανατέθηκε από τον ΔΕΣΜΗΕ σε ερευνητική ομάδα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και του Πανεπιστημίου της Λιέγης, ερευνητικό έργο για την εκτίμηση της ασφάλειας των τάσεων του Ελληνικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο [Vou05a]. Στα πλαίσια του έργου αυτού έγινε συστηματικός έλεγχος και αναπροσαρμογή των δεδομένων του συστήματος και αναπτύχθηκαν μοντέλα για την προσομοίωση λειτουργιών της προστασίας που επηρεάζουν την ευστάθεια τάσης, όπως παρουσιάστηκε λεπτομερώς στο τρίτο κεφάλαιο. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, τα παραπάνω επαληθεύονται από την προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος στις 12 Ιουλίου 2004 [VNT06].

Μεθοδολογία προσομοίωσης

Εξαιτίας των ιδιομορφιών στην τοπολογία του συστήματος στην Αττική κατά το καλοκαίρι του 2004, της έλλειψης τηλεμετρήσεων σε ορισμένα σημεία του (π.χ. στο σταθμό του Λαυρίου λόγω της δοκιμαστικής λειτουργίας ενοικιαζόμενων αεριοστροβίλων, στον υποσταθμό της Αργυρούπολης κ.α.) και της μη ακριβούς αποτύπωσης της κατάστασης ορισμένων πυκνωτών (λόγω έλλειψης πληροφορίας) προέκυψε σφάλμα στη λύση του εκτιμητή κατάστασης στις 12:35 της 12^{ης} Ιουλίου 2004.

Για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ακρίβεια κατά την προσομοίωση, εξετάστηκαν εκτός του στιγμιότυπου των 12:35 και αυτά των 11:30 και 12:00. Διαπιστώθηκε ότι τα δυο τελευταία στιγμιότυπα ήταν περισσότερο αξιόπιστα, με την έννοια ότι η εξέλιξη των τάσεων και των φορτίων μεταξύ των δύο ήταν ομαλή. Αντίθετα οι τιμές των τάσεων και των φορτίων του στιγμιότυπου των 12:35 παρουσίαζαν μεγάλη απόκλιση σε σχέση με αυτές του προηγούμενου στιγμιότυπου, που δεν δικαιολογούνταν από τον εκτιμώμενο ρυθμό μεταβολής τους. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο δεδομένου ότι το στιγμιότυπο των 12:35 καταγράφηκε χρονικά πολύ κοντά στην κατάρρευση. Εξάλλου κοντά στο σημείο κατάρρευσης είναι πάντα πιθανό να μην υπάρχουν καλές μετρήσεις. Κατόπιν αυτού, η προσομοίωση βασίστηκε στα στιγμιότυπα των 11:30 και 12:00. Παρά την καλύτερη αποτύπωση του συστήματος, το σφάλμα στη λύση του εκτιμητή κατάστασης παρέμεινε και σε αυτά τα στιγμιότυπα.

Η προσομοίωση γίνεται με το πρόγραμμα WPSTAB. Το σενάριο που προσομοιώνεται είναι η ομοιόμορφη αύξηση στη ζήτηση του φορτίου, με αρχικό σημείο την κατάσταση του συστήματος που περιγράφεται από το στιγμιότυπο των 11:30. Στο σημείο αυτό το συνολικό φορτίο κατανάλωσης του συστήματος ανήρχετο σε 9084 MW, εκ των οποίων τα 1374 MW αποτελούν βιομηχανικά φορτία ή βοηθητικά φορτία των μονάδων παραγωγής, ενώ τα υπόλοιπα 7710 MW αποτελούν φορτία τελικών καταναλωτών. Ο ρυθμός αύξησης του φορτίου λαμβάνεται ίσος με $r = 0,0017\%/s$ και αντιστοιχεί σε αυτόν που καταγράφηκε πραγματικά την ημέρα αυτή στο διάστημα μεταξύ 11:30 και 12:00. Ο ρυθμός αυτός διατηρείται σταθερός καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Τα φορτία του συστήματος θεωρούνται ότι συνδέονται στο δευτερεύον πραγματικών ή υποθετικών μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης που ρυθμίζουν την τάση δευτερεύοντος. Η εξάρτησή τους από την τάση θεωρείται εκθετικής μορφής με εκθέτες $\alpha = 1,5$ για την ενεργό και $\beta = 2,0$ για την άεργο ισχύ. Τα χωρητικά φορτία δεν συμμετέχουν στην ομοιόμορφη αύξηση της ζήτησης καθώς αντιστοιχούν σε

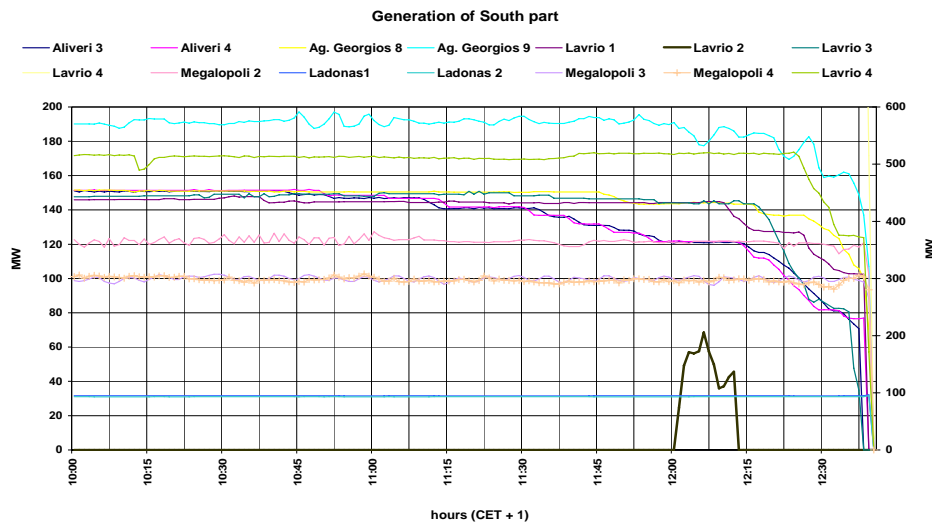
ζυγούς που προφανώς είχαν υπεραντισταθμιστεί. Στην ομοιόμορφη αύξηση της ζήτησης δεν συμμετέχουν επίσης τα βιομηχανικά φορτία, τα βοηθητικά των γεννητριών, καθώς και τα αιολικά και οι διασυνδέσεις που μοντελοποιούνται ως αρνητικά φορτία. Σχετικά με τη συμμετοχή των φορτίων στην αύξηση της ζήτησης ισχύουν επιπλέον οι συντελεστές του Πίν. 6.2, που αναφέρθηκαν και στο τέταρτο κεφάλαιο.

Πίν. 6.2 Παραδοχές προσομοίωσης φορτίων

ΕΝΕΡΓΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	ΑΕΡΓΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	r_p	r_Q
$P > 0$	$Q > 0$	0,5	0,5
$P > 0$	$Q < 0$	0,5	0
$P < 0$	$Q < 0$	0	0
$P < 0$	$Q > 0$	0	0
$P = 0$	$Q \neq 0$	0	0

Όλες οι μονάδες θεωρούνται ότι μετέχουν στη ρύθμιση τάσης μέχρι του σημείου που συναντούν τον περιορισμό υπερδιέγερσης, δηλαδή την τιμή του ρεύματος δρομέα, που αντιστοιχεί σε συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας. Από το σημείο αυτό και μετά οι μονάδες θεωρείται ότι διατηρούν σταθερό ρεύμα διέγερσης, ίσο με το μέγιστο.

Η μεταβολή της ενεργού παραγωγής των μονάδων του νοτίου συστήματος, που παρατηρήθηκε στο διάστημα μετά τις 11:30, αναπαράγεται στην προσομοίωση σύμφωνα με τις μετρήσεις από το σύστημα συλλογής μετρήσεων SCADA του ΔΕΣΜΗΕ που καταγράφονται στο Σχ. 6.5. Η είσοδος και η έξοδος της μονάδας Λαύριο 2 από τις 12:01 μέχρι τις 12:12 προσομοιώνεται ως έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος στο σύστημα, σύμφωνα πάλι με τις μετρήσεις από το SCADA. Αναλυτικά οι μεταβολές της παραγωγής των μονάδων του νοτίου συστήματος που αναπαράγονται στην προσομοίωση παρουσιάζονται στον Πίν. 6.3.



Σχ. 6.5 Πραγματική παραγωγή μονάδων νοτίου συστήματος [πηγή: ΔΕΣΜΗΕ]

Στις μονάδες του νοτίου συστήματος προσομοιώνεται επίσης ο περιορισμός ρεύματος τυμπάνου για την αντιμετώπιση των εμφανιζόμενων υπερεντάσεων στο στάτη και η λειτουργία της προστασίας υποτάσεως. Ο εφικτός ρυθμός μείωσης r_{mo} της παραγωγής ενεργού ισχύος για κάθε γεννήτρια που υποβάλλεται σε περιορισμό ρεύματος τυμπάνου παρουσιάστηκαν στον Πίν. 3.5 του τρίτου κεφαλαίου και αντιστοιχεί σε αυτόν που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του περιστατικού με βάση τις μετρήσεις από το SCADA του ΔΕΣΜΗΕ (Σχ. 6.5). Για την εφαρμογή του περιορισμού ρεύματος τυμπάνου κατά την προσομοίωση ως μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα στάτη θεωρείται το ονομαστικό ρεύμα της μηχανής, ενώ για την εφαρμογή της προστασίας υποτάσεως γεννητριών θεωρείται ότι οι μονάδες αποσυνδέονται όταν η τερματική τους τάση πέσει κάτω από το 88% της ονομαστικής για 10 s.

Τέλος, παρακολουθείται η λειτουργία της προστασίας υποτάσεως στις γραμμές μεταφοράς ΥΥΤ. Οι γραμμές αυτές αποσυνδέονται από το σύστημα αμέσως μόλις η τάση στα άκρα τους πέσει κάτω από το 75% (300 kV) της ονομαστικής τους τιμής [Por04].

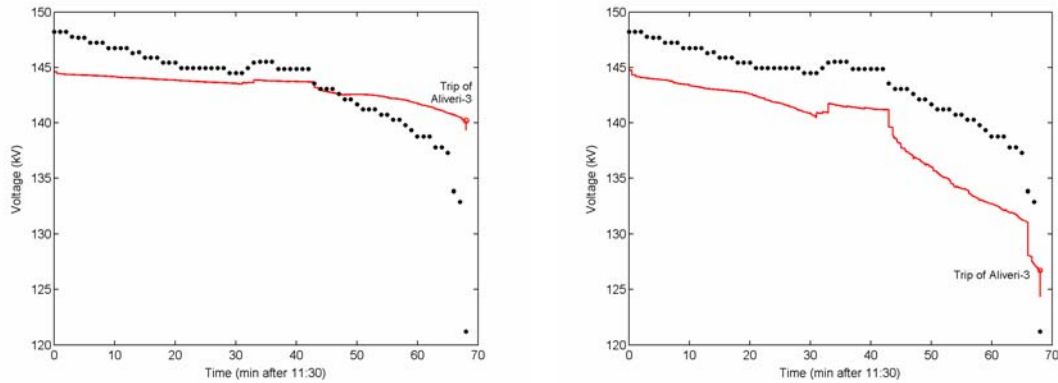
Πίν. 6.3 Επιβαλλόμενη μεταβολή της παραγωγής στο νότιο σύστημα κατά την προσομοίωση

ΧΡΟΝΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
11:30:10	Οι μονάδες Αλιβέρι 3 και 4 μειώνουν την παραγωγή τους. Η συνολική μείωση για κάθε μονάδα είναι 20 MW και πραγματοποιείται εντός των επόμενων 30 min.
11:30:10	Η μονάδα Αγ. Γεώργιος 8 μειώνει την παραγωγή της. Η συνολική μείωση είναι 9 MW και πραγματοποιείται εντός των επόμενων 47 min.
12:00:00	Η μονάδα Αγ. Γεώργιος 9 μειώνει την παραγωγή της. Η συνολική μείωση είναι 32 MW και πραγματοποιείται εντός των επόμενων 35 min.
12:01:00	Η μονάδα Λαύριο 2 εντάσσεται στο σύστημα. Αναλαμβάνει 58 MW εντός 3 min.
12:04:00	Η μονάδα Λαύριο 2 μειώνει την παραγωγή της κατά 1 MW περίπου στο επόμενο min.
12:05:00	Η μονάδα Λαύριο 2 αυξάνει την παραγωγή της κατά 12 MW περίπου στα επόμενα 2 min.
12:07:00	Η μονάδα Λαύριο 2 μειώνει την παραγωγή της κατά 33 MW περίπου στα επόμενα 3 min.
12:10:00	Η μονάδα Λαύριο 2 αυξάνει την παραγωγή της κατά 9 MW περίπου στα επόμενα 2 min.
12:12:00	Η μονάδα Λαύριο 2 κρατείται λόγω βλάβης.
12:12:00	Η μονάδα Αλιβέρι 3 μειώνει την παραγωγή της. Η συνολική μείωση είναι 50 MW και πραγματοποιείται εντός των επόμενων 25 min.
12:12:00	Η μονάδα Αλιβέρι 4 μειώνει την παραγωγή της. Η συνολική μείωση είναι 40 MW και πραγματοποιείται εντός των επόμενων 17 min.
12:17:00	Η μονάδα Αγ. Γεώργιος 8 μειώνει την παραγωγή της. Η συνολική μείωση είναι 10 MW και πραγματοποιείται εντός των επόμενων 10 min.
12:17:00	Η μονάδα Λαύριο 3 (μικρός συνδυασμένος κύκλος) μειώνει την παραγωγή της κατά 57 MW περίπου στα επόμενα 10 min.
12:27:00	Η μονάδα Λαύριο 3 (μικρός συνδυασμένος κύκλος) αυξάνει την παραγωγή της κατά 1 MW περίπου στο επόμενο 1 min.
12:28:00	Η μονάδα Λαύριο 3 (μικρός συνδυασμένος κύκλος) μειώνει την παραγωγή της κατά 56 MW περίπου στα επόμενα 9 min.
12:38:00	Η μονάδα Αλιβέρι 3 αποσυνδέεται από το δίκτυο.

Διόρθωση παράστασης μονάδων Λαυρίου

Η προσομοίωση με βάση την παραπάνω μεθοδολογία έδειξε αρχικά ικανοποιητική προσέγγιση της εξέλιξης των τάσεων στους περισσότερους ζυγούς του νοτίου συστήματος, με την εξαίρεση του ζυγού 150 kV του Λαυρίου, όπου συνδέονταν η μονάδα Λαύριο 3 (μικρός συνδυασμένος κύκλος) και η μονάδα Λαύριο 5 (αεριοστρόβιλοι ενοικιαζόμενοι από τη ΔΕΗ). Στο Σχ. 6.6α φαίνεται η χρονική απόκριση της τάσης 150 kV στο Λαύριο μετά τις 11:30 σύμφωνα με την προσομοίωση (συνεχής καμπύλη) και τις μετρήσεις SCADA του ΔΕΣΜΗΕ (σημεία). Με κύκλο στην προσομοίωση υποδεικνύεται η ξαφνική απώλεια της μονάδας Αλιβέρι 3. Στο σχήμα αυτό, όπως και στα επόμενα, ο άξονας του χρόνου βαθμονομείται σε πρώτα λεπτά μετά τις 11:30. Έτσι, η ένδειξη «0» αναφέρεται στο στιγμιότυπο των 11:30 και η ένδειξη «70» αναφέρεται σε χρόνο 12:40, αμέσως μετά τη διακοπή.

Η διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών στο αρχικό σημείο οφείλεται στο σφάλμα του εκτιμητή κατάστασης. Παρατηρείται ότι σε όλη τη διάρκεια του φαινομένου υπάρχει σημαντική ασυμφωνία μεταξύ των δύο καμπυλών. Μετά από ενδελεχή ανάλυση προέκυψε ότι αυτό οφείλεται στην ατελή παράσταση της σύνδεσης στο σύστημα των δυο μονάδων (Λαύριο 3 και Λαύριο 5) στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαραγωγή του φαινομένου. Συγκεκριμένα, δεν παριστάνονταν στο μοντέλο συστήματος του κέντρου ελέγχου οι μετασηματιστές ανύψωσης των μονάδων, ενώ στη λύση του εκτιμητή κατάστασης εμφανίζεται κυκλοφορία αέργου ισχύος από τη μονάδα 3 στη μονάδα 5, κάτι που δεν αντιστοιχούσε στις καταγεγραμμένες από το σταθμό παραγωγές των μονάδων (οι αεριοστρόβιλοι λειτουργούσαν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος).



α) Με ρύθμιση τάσης στη μονάδα Λαύριο 3

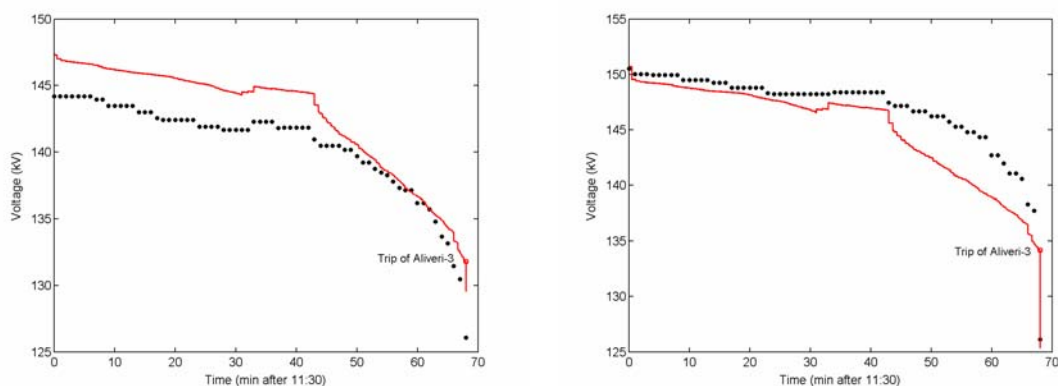
β) Με σταθερή άεργο παραγωγή της μονάδας Λαύριο 3

Σχ. 6.6 Εξέλιξη τάσης ζυγού 150 kV Λαυρίου

Συνέπεια αυτών των ατελειών ήταν να εμφανίζεται στην προσομοίωση δυνατότητα ρύθμισης της τάσης των 150 kV στο Λαύριο, χωρίς αυτό να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Η παράσταση του δικτύου σε αυτό το σημείο έχει διορθωθεί στα δεδομένα της προσομοίωσης, με αποτέλεσμα η μονάδα Λαύριο 3 να προσομοιώνεται στη συνέχεια με σταθερή έγχυση αέργου ισχύος (σύμφωνα με τη λύση του εκτιμητή κατάσταση), στην οποία προστίθενται οι μεταβολές που εμφανίζονται στις μετρήσεις SCADA μεταξύ 11:30 και 12:39. Όπως φαίνεται στο Σχ. 6.6β, η διόρθωση αυτή είναι αρκετή για να ξεπεραστεί το πρόβλημα που εμφανίζεται στο Σχ. 6.6α και να γίνει με αξιοσημείωτη ακρίβεια η προσομοίωση της διακοπής της 12^{ης} Ιουλίου. Το σφάλμα που παραμένει μεταξύ των δύο καμπυλών καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης οφείλεται μόνο στο αρχικό σφάλμα του εκτιμητή κατάσταση.

Εξέλιξη τάσεων και διαδογή συμβάντων

Η διόρθωση στην παράσταση της μονάδας του Λαυρίου συνέβαλε σημαντικά στην ακριβέστερη προσομοίωση των τάσεων του νοτίου συστήματος. Στο Σχ. 6.7 φαίνεται ενδεικτικά η εξέλιξη της τάσης 150 kV στους ζυγούς Αγ. Γεώργιος 32 και Αλιβέρι 31. Η συνεχής καμπύλη αντιστοιχεί στις τάσεις της προσομοίωσης μετά τη διόρθωση, ενώ τα μεμονωμένα σημεία αντιστοιχούν στις μετρήσεις από το SCADA. Όπως φαίνεται, παρότι υπάρχουν αποκλίσεις μέχρι και 4 kV στις τάσεις των ζυγών, οι οποίες οφείλονται στο αρχικό σφάλμα του εκτιμητή κατάσταση σε σχέση με τη μέτρηση, η γενική πορεία του φαινομένου μέχρι την κατάρρευση προσομοιώνεται με μεγάλη ακρίβεια. Ειδικά στο ζυγό του Αλιβερίου το σφάλμα μεγαλώνει μετά τη δεύτερη αποσύνδεση της μονάδας Λαύριο 2.



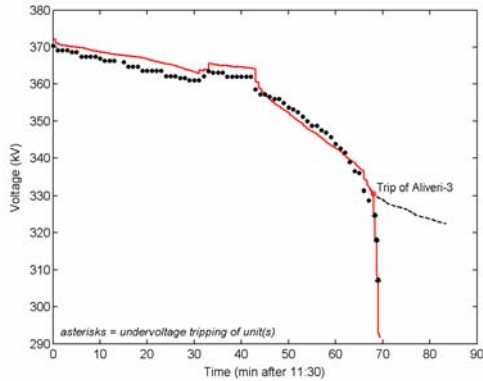
α) Ζυγός Αγ. Γεώργιος 32

β) Ζυγός Αλιβέρι 31

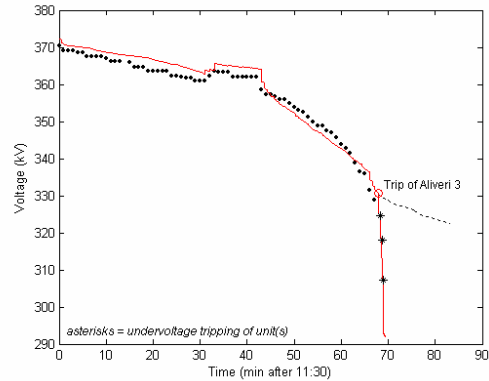
Σχ. 6.7 Χρονική διακόμανση τάσεων ζυγών 150 kV στο νότιο σύστημα

Στο Σχ. 6.8 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις τάσεις δυο κρίσιμων ζυγών 400 kV. Μετά τις 12:15 παρατηρείται μικρή απόκλιση μεταξύ της μετρούμενης και της προσομοιωμένης τάσης, αλλά και πάλι η εξέλιξή τους είναι όμοια. Η ξαφνική απώλεια της μονάδας Αλιβέρι 3 στις 12:38 προκαλεί τη διαδοχική αποσύνδεση και άλλων μονάδων του συστήματος από προστασία υποτάσεως (που υποδεικνύεται με αστερίσκους). Η τάση στους ζυγούς κατά την προσομοίωση πέφτει κάτω από την τιμή των 300 kV, που αποτελεί τη ρύθμιση υποτάσεως των ηλεκτρονόμων αποστάσεως στις

γραμμές ΥΥΤ. Στο σημείο αυτό η προσομοίωση συμπίπτει με τη λειτουργία των στοιχείων υποτάσεως των ηλεκτρονόμων, που απέκοψαν τις γραμμές και οδήγησαν στο διαχωρισμό του συστήματος. Ο διαχωρισμός αυτός προβλέπεται από την προσομοίωση γύρω στις 12:39:20, δηλαδή πολύ κοντά στον πραγματικό χρόνο της διακοπής.



α) Ζυγός Κουμουνδούρος 11



β) Ζυγός Αχαρνάι 11

Σχ. 6.8 Χρονική διακύμανση τάσεων ζυγών 400 kV στο νότιο σύστημα

Στο ίδιο διάγραμμα με διακεκομμένη καμπύλη παρουσιάζεται η εξέλιξη της τάσης σε περίπτωση που παρέμενε σε λειτουργία η μονάδα Αλιβέρι 3. Όπως φαίνεται, χωρίς την απώλεια της μονάδας δεν προκαλείται κατάρρευση τάσεων, ούτε το σύστημα διαχωρίζεται λόγω χαμηλής τάσης στις γραμμές 400 kV. Ωστόσο, οι τάσεις παραμένουν απαράδεκτα χαμηλές και συνεχίζουν να μειώνονται, αλλά με βραδύτερο ρυθμό (της τάξης του 2% ανά 10 min). Στην περίπτωση που η μονάδα Αλιβέρι 3 παρέμενε σε λειτουργία, μπορεί κανείς να υποθέσει ότι θα υπήρχε επαρκής χρόνος για να γίνει μια σταδιακή, αποκοπή φορτίου, ώστε το σύστημα να επανέλθει σε αποδεκτά επίπεδα τάσεων.

Πίν. 6.4 Διαδοχή συμβάντων κατά την προσομοίωση

ΧΡΟΝΟΣ	ΔΙΑΤΑΞΗ	ΣΥΜΒΑΝ
11:30	Μονάδες Αλιβέρι 3-4, Λαύριο 4	Περιορισμός υπερδιέγερσης
11:51	Μονάδα Λαύριο 1	Περιορισμός υπερδιέγερσης
11:58	Μονάδα Αγ. Δημήτριος 3	Περιορισμός υπερδιέγερσης
12:00-12:17	Μονάδα Αγ. Γεώργιος 9	Περιορισμός ρεύματος τυμπάνου
12:00-12:38	Μονάδα Λαύριο 1	Περιορισμός ρεύματος τυμπάνου
12:09	Μονάδα Μεγαλόπολη 3	Περιορισμός υπερδιέγερσης
12:13	Μονάδα Αγ. Δημήτριος 4	Περιορισμός υπερδιέγερσης
12:23	Μονάδα Αγ. Γεώργιος 8	Περιορισμός υπερδιέγερσης
12:27	Μονάδα Αγ. Δημήτριος 1	Περιορισμός υπερδιέγερσης
12:29	Μονάδα Αγ. Δημήτριος 2	Περιορισμός υπερδιέγερσης
12:30	Μονάδα Μεγαλόπολη 4	Περιορισμός υπερδιέγερσης
12:37	Μονάδα Μεγαλόπολη 2	Περιορισμός υπερδιέγερσης
12:38	Μονάδα Αλιβέρι 3	Ξαφνική απώλεια
12:38:20	Μονάδα Αλιβέρι 4	Ενεργοποίηση προστασίας υποτάσεως γεννητριών
12:38:40	Μονάδα Αγ. Γεώργιος 9	Ενεργοποίηση προστασίας υποτάσεως γεννητριών
12:39	Μονάδες Αγ. Γεώργιος 8, Λαύριο 1	Ενεργοποίηση προστασίας υποτάσεως γεννητριών
12:39:10	Γραμμές μεταφοράς ΥΥΤ Βορρά-Νότου	Ενεργοποίηση προστασίας υποτάσεως γραμμών μεταφοράς ΥΥΤ
12:39:20	ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΒΟΡΡΑ-ΝΟΤΟΥ	

Παρόλο που η ακριβής διαδοχή των συμβάντων δεν έχει πλήρως διαπιστωθεί, η συνολική συμπεριφορά του συστήματος κατά την προσομοίωση βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με αυτή των πραγματικών γεγονότων. Η πορεία του συστήματος προς την κατάρρευση είναι μη αναστρέψιμη μετά την απώλεια της μονάδας Αλιβέρι 3. Στον Πίν. 6.4 παρατίθεται η διαδοχή των πιο σημαντικών συμβάντων, όπως αυτή προέκυψε κατά την προσομοίωση. Παρακάτω εξηγούνται τα σημαντικότερα σημεία:

Η μικρή υπερδιέγερση των μονάδων Αλιβέρι 3-4 και Λαύριο 4 στο αρχικό σημείο της προσομοίωσης (11:30) οφείλεται μάλλον σε σφάλματα μετρήσεων και ο περιορισμός της δεν προκαλεί σοβαρή διαταραχή. Σημειώνεται όμως ότι κατόπιν αυτού η περιοχή της Στερεάς Ελλάδας είναι χωρίς ρύθμιση τάσης από την αρχή της προσομοίωσης. Οι περιορισμοί που επιβάλλονται στο ρεύμα δρομέα και τυμπάνου μετά τις 12:00 οφείλονται αποκλειστικά στην κλιμάκωση του φαινομένου αστάθειας τάσης.

Στις 12:38 εφαρμόζεται η απώλεια της μονάδας Αλιβέρι 3.

Στις 12:38:20 η μονάδα Αλιβέρι 4 αποσυνδέεται από το σύστημα για λόγους υποτάσεως. Τη στιγμή της αποσύνδεσης η τάση της γεννήτριας μετράται στο 87,1% της ονομαστικής της τιμής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μονάδα Αλιβέρι 4 σύμφωνα με το πόρισμα της επιτροπής διερεύνησης της διακοπής κρατήθηκε χειροκίνητα και δεν έφυγε από προστασία υποτάσεως.

Στις 12:38:40 η μονάδα Αγ. Γεώργιος 9 αποσυνδέεται από το σύστημα για λόγους υποτάσεως. Τη στιγμή της αποσύνδεσης η τάση της γεννήτριας μετράται στο 87,2% της ονομαστικής της τιμής.

Στις 12:39 οι μονάδες Λαύριο 1 και Αγ. Γεώργιος 8 αποσυνδέονται από το σύστημα για λόγους υποτάσεως. Τη στιγμή της αποσύνδεσης η τάση των γεννητριών μετράται στο 86,4% και 83,4% αντίστοιχα της ονομαστικής τους τιμής.

Στις 12:39:10 οι γραμμές 400 kV Αχαρναί-Λάρυμνα και Κουμουνδούρου-Διστόμου αποσυνδέονται από το σύστημα λόγω ενεργοποίησης της προστασίας υποτάσεως γραμμών μεταφοράς ΥΥΤ. Η αποσύνδεση αυτή προκαλεί τη διαδοχική αποσύνδεση και άλλων διατάξεων του συστήματος.

Στις 12:39:20 γίνεται ο διαχωρισμός συστήματος, που εκδηλώνεται με απώλεια σημείου ισορροπίας και κατά συνέπεια το τέλος της προσομοίωσης.

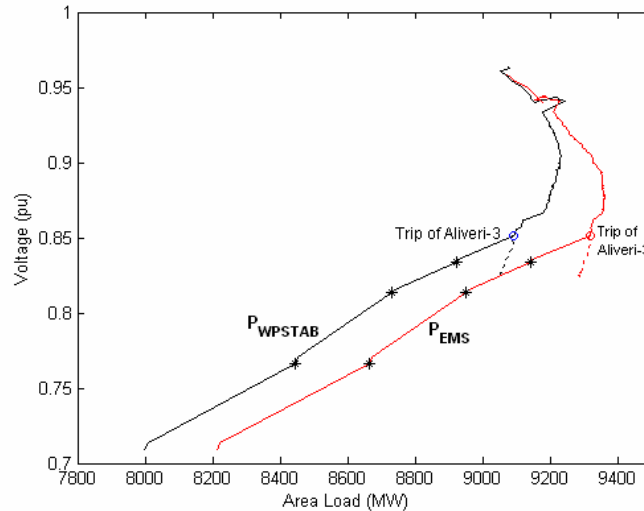
Επίδραση απωλειών μεταφοράς

Υπάρχει μία μικρή διαφορά στον τρόπο υπολογισμού του συνολικού φορτίου του συστήματος από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (EMS) του κέντρου ελέγχου και από το πρόγραμμα προσομοίωσης WPSTAB. Συγκεκριμένα, στο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας το συνολικό φορτίο P_{EMS} του συστήματος υπολογίζεται από την καθαρή παραγωγή συν τις εισαγωγές, ενώ στο WPSTAB το συνολικό φορτίο P_{WPSTAB} του συστήματος προκύπτει από το σύνολο των καταναλώσεων, περιλαμβανομένων των βοηθητικών των σταθμών παραγωγής. Για να μετατραπεί το συνολικό φορτίο P_{WPSTAB} του προγράμματος στο φορτίο του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας πρέπει να προστεθούν οι απώλειες P_{LOSS} της μεταφοράς και να αφαιρεθούν τα φορτία P_{AUX} των βοηθητικών:

$$P_{EMS} = P_{WPSTAB} + P_{LOSS} - P_{AUX} \quad (6.1)$$

Σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας του συστήματος, οι απώλειες P_{LOSS} δεν διαφέρουν πολύ από το φορτίο P_{AUX} των βοηθητικών. Κατά συνέπεια, το συνολικό φορτίο του συστήματος που υπολογίζεται από το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας και το πρόγραμμα WPSTAB είναι περίπου το ίδιο. Ωστόσο σε συνθήκες εκτάκτου ανάγκης, όπως αυτές που επικρατούσαν πριν τη σβέση, οι απώλειες είναι εξόχως αυξημένες. Το γεγονός αυτό έδωσε τη ψευδή εντύπωση ότι το φορτίο του συστήματος αυξανόταν κατά το τελευταίο χρονικό διάστημα πριν τη σβέση, ενώ στην πράξη αυτές που αυξανόταν ήταν οι απώλειες.

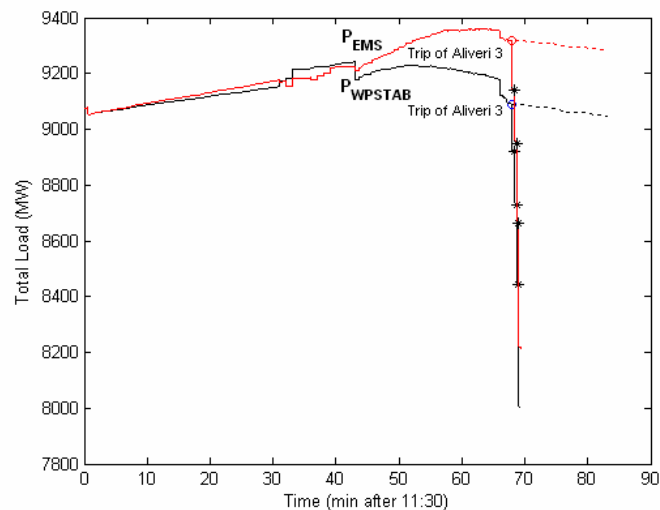
Το γεγονός αυτό εξηγείται ευκολότερα με τη βοήθεια του Σχ. 6.9, όπου απεικονίζεται το συνολικό φορτίο του συστήματος (μετρημένο με τους δύο παραπάνω τρόπους) συναρτήσει της τάσης στο ζυγό 150 kV του Ρουφ. Η καμπύλη με το χαρακτηρισμό « P_{WPSTAB} » αντιπροσωπεύει το συνολικό φορτίο του συστήματος, όπως μετράται από το πρόγραμμα WPSTAB (κατανάλωση μαζί με τα βοηθητικά των μονάδων). Η καμπύλη με το χαρακτηρισμό « P_{EMS} » αντιπροσωπεύει το συνολικό φορτίο του συστήματος, όπως μετράται στο κέντρο ελέγχου (καθαρή παραγωγή συν εισαγωγές), το οποίο περιλαμβάνει ουσιαστικά την κατανάλωση μαζί με τις απώλειες (χωρίς βοηθητικά). Και οι δύο καμπύλες προέκυψαν από την προσομοίωση του συστήματος.



Σχ. 6.9 Καμπύλες PV συστήματος με και χωρίς υπολογισμό των απωλειών κατά την προσομοίωση

Όπως φαίνεται, αρχικά οι δύο καμπύλες βρίσκονται πολύ κοντά γιατί η κατανάλωση των βοηθητικών είναι περίπου ίση με τις απώλειες. Καθώς όμως το φαινόμενο εξελίσσεται, οι απώλειες αυξάνουν δραματικά, ενώ το συνολικό φορτίο του συστήματος δεν μπορεί να αποκατασταθεί λόγω τερματισμού της δυνατότητας ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής στις περιοχές της Θεσσαλίας, της Στερεάς Ελλάδας, της Αττικής και της Πελοποννήσου. Η διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών εξηγεί γιατί στο κέντρο ελέγχου δεν εμφανίστηκε μείωση φορτίου μέχρι τη στιγμή που άρχισε η κατάρρευση.

Στο Σχ. 6.9 οι διακεκομμένες καμπύλες αντιστοιχούν στην προσομοίωση του συστήματος χωρίς την απώλεια της μονάδας Αλιβέρι 3. Όπως φαίνεται, χωρίς την απώλεια της μονάδας αυτής οι τάσεις θα εξακολουθούσαν να μειώνονται, αλλά το συνολικό φορτίο μειώνεται ελαφρά, διότι οι μειούμενες τάσεις στους ζυγούς χωρίς ρύθμιση (εξαιτίας των ορίων ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ) προκαλούν μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος, που υπερτερεί της αυξανόμενης ζήτησης.



Σχ. 6.10 Χρονική εξέλιξη φορτίου και απωλειών κατά την προσομοίωση

Στο Σχ. 6.10 απεικονίζεται η διακύμανση των ίδιων ποσοτήτων φορτίου (κατανάλωση συν βοηθητικά, κατανάλωση συν απώλειες) συναρτήσει του χρόνου. Όπως φαίνεται, τη στιγμή της απώλειας της μονάδας Αλιβέρι 3 (12:38), η πραγματική κατανάλωση των φορτίων (κατανάλωση συν βοηθητικά) ανήρχετο στα 9200 MW περίπου, ενώ το σύνολο καθαρής παραγωγής και εισαγωγών (κατανάλωση συν απώλειες) στα 9317 MW περίπου. Οι διακεκομμένες καμπύλες αναφέρονται ξανά στην περίπτωση που δεν αποσυνδέεται η μονάδα Αλιβέρι 3, γεγονός που ουσιαστικά προκαλεί την κατάρρευση των τάσεων με τη διαδοχική σβέση των γεννητριών λόγω υποτάσεως.

6.1.4 Συμπεράσματα

Κατά την προσομοίωση χρειάστηκε η μονάδα Λαύριο 3 (μικρός συνδυασμένος κύκλος) να παρασταθεί με σταθερή παραγωγή αέργου ισχύος, προσαρμοσμένη σύμφωνα με τις μετρήσεις από το κέντρο ελέγχου, ενώ η μονάδα Λαύριο 5 με μηδενική έγχυση αέργου ισχύος. Η παράσταση του δικτύου στο Λαύριο διορθώθηκε στο μοντέλο του Ελληνικού συστήματος που χρησιμοποιείται στη διατριβή αυτή. Κατόπιν και αυτού, η προσομοίωση πέτυχε να αναπαραστήσει ικανοποιητικά την αλληλουχία των γεγονότων, πράγμα που επιβεβαιώνει ότι το μοντέλο του συστήματος που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της ασφάλειας τάσης τόσο στη διατριβή, όσο και στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας, είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα.

Η ξαφνική απώλεια της μονάδας 3 του Αλιβερίου στις 12:38 (η οποία δεν μπορεί να αποδοθεί σε συγκεκριμένη αιτία από την προσομοίωση) επιτάχυνε την αστάθεια και οδήγησε στην κατάρρευση τάσης μέσω διαδοχικών αποκοπών μονάδων παραγωγής λόγω υποτάσεως. Κατά συνέπεια, οποιοδήποτε σχήμα αποκοπής για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου περιστατικού θα πρέπει να αποτρέψει καταρχήν την αποσύνδεση της μονάδας Αλιβέρι 4, η οποία είναι η πρώτη που κρατείται λόγω υποτάσεως μετά την απώλεια της μονάδας Αλιβέρι 3.

Ο διαχωρισμός του συστήματος που προκλήθηκε από την ενεργοποίηση της προστασίας υποτάσεως των γραμμών μεταφοράς ΥΥΤ διαφύλαξε το βόρειο σύστημα, ενώ προκάλεσε την κατάρρευση τάσης στο Νότο. Ωστόσο, εάν υπάρχει κάποιο σχήμα αποκοπής για την αντιμετώπιση ανάλογων φαινομένων αστάθειας, δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να επιτρέπει το διαχωρισμό του συστήματος.

6.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΥΝΑΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ

Η ικανοποιητική προσομοίωση του φαινομένου της διακοπής της 12^{ης} Ιουλίου 2004 επιτρέπει τη σχεδίαση και ανάλυση κατάλληλων μέτρων προστασίας που θα μπορούσαν να είχαν αποτρέψει την κατάρρευση του συστήματος. Τα μέτρα αυτά, εφόσον σχεδιαστούν για την αντιμετώπιση του ιδιαίτερου δυσμενούς περιστατικού της σβέσης στις 12 Ιουλίου 2004, μπορούν να αποτελέσουν ένα δίχτυ ασφάλειας του Ελληνικού συστήματος κατά την εμφάνιση αντίστοιχων φαινομένων στο μέλλον.

Στο Ελληνικό σύστημα δεν υπάρχει, υπό τις παρούσες συνθήκες, δυνατότητα εφαρμογής των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ. Πράγματι, η υλοποίηση των μέτρων κλειδώματος της λήψης ή της αντιστροφής του ελέγχου των ΣΑΤΥΦ δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με την υπάρχουσα υλικοτεχνική υποδομή, ενώ το μέτρο μείωσης της τάσης αναφοράς μπορεί να εφαρμοστεί μόνο χειροκίνητα από το προσωπικό των υποσταθμών. Όμως η αντιμετώπιση κρίσιμων περιστατικών αστάθειας με χειροκίνητη μείωση της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ, διεσπαρμένων σε ένα μεγάλο εύρος του συστήματος, απαιτεί γρήγορο συντονισμό, ο οποίος μάλλον δεν είναι επιτεύξιμος κατά την κρίσιμη ώρα.

Μόνο το μέτρο της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ μπορεί να εφαρμοστεί με κεντρική εντολή, ωστόσο στην περίπτωση που θα ήταν επιθυμητή η συμβολή του μέτρου στην αντιμετώπιση του φαινομένου, αυτό θα έπρεπε να συμβεί πολύ νωρίτερα από τη στιγμή που η αστάθεια άρχισε να γίνεται αντιληπτή. Ήδη από το πρωί της 12^{ης} Ιουλίου λόγω του αυξημένου φορτίου και της ιδιαιτερότητας στην τοπολογία του συστήματος, εξαιτίας των έργων αναβάθμισής του, πολλά από τα ΣΑΤΥΦ στις κρίσιμες περιοχές της Αττικής, της Στερεάς Ελλάδας και της Πελοποννήσου είχαν εξαντλήσει τη δυνατότητα ρύθμισής τους. Επομένως, για να αποδειχθεί αποτελεσματική η απενεργοποίηση των ΣΑΤΥΦ θα έπρεπε να εφαρμοστεί νωρίτερα, αλλά αυτό δεν θα μπορούσε να αποφασιστεί εύκολα δεδομένου ότι η αστάθεια έγινε εμφανής μόλις λίγο πριν από την κατάρρευση.

Σχετικά με άλλα διαθέσιμα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης για την αντιμετώπιση αστάθειας τάσης στο Ελληνικό σύστημα, μόλις πρόσφατα εντάχθηκαν αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζευξης στατών πυκνωτών [VSK06], ενώ δεν υπάρχουν αντίστοιχοι μηχανισμοί για τη ζεύξη-απόζευξη πηνίων.

Παρόλο λοιπόν που καταλληλότερο σχήμα προστασίας φαίνεται να είναι αυτό που συνδυάζει τον έλεγχο εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ με την αποκοπή φορτίου, στην πράξη μόνο η αποκοπή φορτίου αποτελεί άμεσα υλοποιήσιμο μέτρο. Με αυτή τη διαπίστωση κατά νου, άρχισαν ήδη να υλοποιούνται από το διαχειριστή του συστήματος αυτοματοποιημένα σχήματα αποκοπής φορτίου για την

αντιμετώπιση της αστάθειας τάσης [Vou06,NVF07]. Η ανάλυση και σχεδίαση των σχημάτων αποκοπής φορτίου για την τωρινή (διαφοροποιημένη) κατάσταση του Ελληνικού συστήματος περιγράφεται στο έβδομο κεφάλαιο.

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται σχήματα αποκοπής φορτίου για την αποτροπή της σβέσης του συστήματος κατά το περιστατικό της αστάθειας στις 12 Ιουλίου 2004. Σκοπός των σχημάτων αυτών δεν είναι η αποκατάσταση των τάσεων στο αρχικό επίπεδο, αλλά η αναχαίτιση του φαινομένου αστάθειας τάσης για τη διατήρηση του συστήματος σε λειτουργία. Εξασφαλίζοντας τη λειτουργία του συστήματος, υπάρχει στη συνέχεια ο διαθέσιμος χρόνος για την αποκατάσταση των τάσεων με άλλα μέτρα ελέγχου, όπως για παράδειγμα με ένταξη μονάδων παραγωγής.

Όπως είδαμε νωρίτερα, στο συγκεκριμένο περιστατικό αστάθειας τάσης, η διαταραχή που προκάλεσε την αλυσιδωτή αποσύνδεση μονάδων παραγωγής ήταν η απώλεια της μονάδας 3 του Αλιβερίου. Συνεπώς, οποιοδήποτε σχήμα αποκοπής για την αντιμετώπιση του φαινομένου θα πρέπει να αποτρέπει τη διαδοχική απώλεια άλλων μονάδων και ιδιαίτερα αυτή της μονάδας Αλιβέρι 4, η οποία είναι η πρώτη που αποσυνδέεται για λόγους υποτάσεως. Δευτερευόντως, κάθε σχήμα αποκοπής φορτίου θα πρέπει να είναι σε θέση να αποσοβήσει έναν ανεπιθύμητο διαχωρισμό του συστήματος.

Για την επίτευξη αυτού του διπλού στόχου εξετάζεται αρχικά η εφαρμογή ενός τοπικού, αποκεντρωμένου σχήματος αποκοπής φορτίου κλειστού βρόχου, στο οποίο η απόρριψη του φορτίου πραγματοποιείται από ζυγούς που βρίσκονται στις πιο ευάλωτες περιοχές του συστήματος. Το σχήμα αυτό προϋποθέτει την εγκατάσταση του αναγκαίου υλικοτεχνικού εξοπλισμού σε κάθε διαθέσιμο υποσταθμό των περιοχών αυτών και κατά συνέπεια παρουσιάζει ένα σχετικά υψηλό κόστος υλοποίησης. Συμπληρωματικά ως προς το αποκεντρωμένο σχήμα, εξετάζονται διάφορα κεντρικά σχήματα αποκοπής φορτίου ευρείας περιοχής. Τα σχήματα αυτά εφαρμόζουν την αποκοπή στους πιο αποδοτικούς ζυγούς για απόρριψη φορτίου των ευάλωτων περιοχών, με σκοπό τη διασφάλιση της αποτροπής του διαχωρισμού του συστήματος. Με τη λογική του ανοιχτού βρόχου προσδιορίζεται η ελάχιστη αποκοπή φορτίου, ενώ τα σχήματα κλειστού βρόχου υλοποιούν την αποκοπή φορτίου με ευρύτερη γεωγραφική διασπορά.

6.3 ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΣΧΗΜΑ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Το αποκεντρωμένο σχήμα αποκοπής φορτίου εφαρμόζεται στις πλέον θιγόμενες περιοχές του συστήματος από την εξέλιξη του φαινομένου της αστάθειας, δηλαδή τη Θεσσαλία, τη Στερεά Ελλάδα, την Αττική και την Πελοπόννησο. Διαθέσιμα προς αποκοπή φορτία θεωρούνται τα φορτία των προαναφερόμενων περιοχών, στα οποία επιτρέπεται η αποσύνδεση μέρους των καταναλωτών.

Το σχήμα προστασίας υλοποιείται με τη λογική του κλειστού βρόχου, δηλαδή οι αποκοπές πραγματοποιούνται τοπικά κάθε φορά που η ελεγχόμενη τάση μειωθεί πέραν της τάσης αποκοπής V_{thres} . Πιο συγκεκριμένα, ηλεκτρονόμοι τάσης παρακολουθούν την τάση V_1 του ελεγχόμενου ζυγού (ζυγού πρωτεύοντος του μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης στους υποσταθμούς διανομής ή ζυγού φορτίου συνδεδεμένου στην ΥΤ) και κάθε φορά που διαπιστώνεται ότι η τάση αυτή πέφτει κάτω από τη ρύθμιση υποτάσεως V_{thres} δίνουν εντολή για την αποσύνδεση ορισμένων αναχωρήσεων, που αντιστοιχούν σε ποσοστό $s = 5\%$ επί της ζήτησης του φορτίου.

Για τη διέγερση του ηλεκτρονόμου ορίζεται χρονική καθυστέρηση σταθερού χρόνου $t_{del} = 10$ s και μηδενική ανοχή ($\varepsilon = 0$) επί της ρύθμισης υποτάσεως. Το μέγιστο απορριπτόμενο φορτίο P_{shed}^{max} ορίζεται στο 20% της αρχικής ζήτησης P_0 του ζυγού.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το σκεπτικό είναι να προσδιοριστεί μια ελάχιστη ρύθμιση τάσης αποκοπής V_{thres} , για την οποία αποφεύγεται η αποσύνδεση λόγω υποτάσεως της μονάδας Αλιβέρι 4 μετά την ξαφνική απώλεια της μονάδας Αλιβέρι 3. Λόγω της εμφάνισης, κατά την κανονική λειτουργία του συστήματος, χαμηλών τάσεων στις περιοχές όπου επρόκειτο να πραγματοποιηθούν οι αποκοπές, η ρύθμιση της τάσης αποκοπής λαμβάνει ιδιαίτερα χαμηλή τιμή. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκε από προσομοιώσεις μια κοινή για όλες τις περιοχές ρύθμιση τάσης αποκοπής ίση με 79% (118,5 kV) της ονομαστικής τάσης (150 kV) των ελεγχόμενων ζυγών. Η ρύθμιση αυτή αποτελεί το όριο πέραν του οποίου οι πραγματοποιηθείσες αποκοπές φορτίου δεν μπορούν να σώσουν την απώλεια της μονάδας Αλιβέρι 4.

Εξαιτίας της δεδομένης κατάστασης του συστήματος, δόθηκε στο σχήμα αποκοπών η δυνατότητα οπλισμού (arming) με κεντρικό έλεγχο, ώστε να αποφευχθεί άσκοπη εφαρμογή αποκοπών φορτίου λόγω χαμηλών τάσεων που εμφανίζονται κατά την κανονική λειτουργία του συστήματος.

Το παραπάνω σχήμα αποκοπής φορτίου υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα WPSTAB με χρήση του αλγορίθμου που περιγράφεται στην παράγραφο 5.3.1 και εφαρμόστηκε κατά την προσομοίωση του περιστατικού της 12^{ης} Ιουλίου 2004, ακολουθώντας τη μεθοδολογία που αναφέρθηκε νωρίτερα στην παράγραφο 6.1.3. Η κεντρική εντολή οπλισμού του σχήματος αποκοπών δίνεται τη χρονική στιγμή 12:15, δηλαδή αμέσως μετά την απώλεια της μονάδας Λαύριο 2. Από τη στιγμή αυτή και μετά πραγματοποιούνται διαδοχικές αποκοπές φορτίου.

Η αποσύνδεση λόγω υποτάσεως της μονάδας Αλιβέρι 4 και κατ' επέκτασιν η σβέση του συστήματος αποτρέπεται με συνολική αποκοπή φορτίου 125,25 MW και 41,95 MVar από 13 ζυγούς. Στον Πίν. 6.5 φαίνεται το συνολικό απορριπτόμενο φορτίο ανά περιοχή, απ' όπου παρατηρείται ότι το σύνολο της αποκοπής επικεντρώνεται πρωτίστως στην περιοχή της Αττικής και δευτερευόντως στη Στερεά Ελλάδα. Καμία αποκοπή φορτίου δεν πραγματοποιείται στις περιοχές της Θεσσαλίας και της Πελοποννήσου. Στον Πίν. 6.6 (αντίστοιχα Πίν. 6.7) φαίνεται το συνολικό απορριπτόμενο φορτίο ανά ζυγό (αντίστοιχα υποσταθμό). Παρατηρείται ότι υπάρχει συγκέντρωση του απορριπτόμενου φορτίου σε σχετικά λίγους (8) υποσταθμούς, ωστόσο το γεγονός αυτό δεν μειώνει τις ανάγκες για υλικοτεχνικό εξοπλισμό, καθώς τα φορτία που αποκόπτονται δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων.

Πίν. 6.5 Απορριπτόμενο φορτίο ανά περιοχή

ΠΕΡΙΟΧΗ	ΑΠΟΚΟΠΗ MW	ΑΠΟΚΟΠΗ MVar
Αττική	109,28	36,38
Στερεά Ελλάδα	15,96	5,57
ΣΥΝΟΛΟ	125,24	41,95

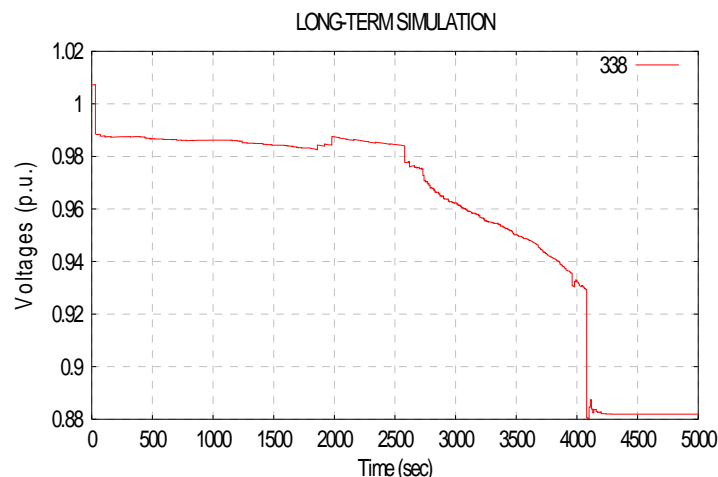
Πίν. 6.6 Απορριπτόμενο φορτίο ανά ζυγό

ΖΥΓΟΣ	ΑΠΟΚΟΠΗ MW	ΑΠΟΚΟΠΗ MVar
Ελληνικό 31	3,72	0,80
Θήβα 51	1,39	0,80
Θήβα 52	1,45	0,42
Θήβα 53	1,14	0,30
Κωπαΐδα 51	2,45	0,60
Κωπαΐδα 52	2,45	0,60
Λιβαδειά 51	3,55	1,43
Λιβαδειά 52	3,55	1,43
Ν. Σμύρνη 34	18,62	5,35
Παγκράτι 31	25,21	7,23
Παγκράτι 32	27,28	12,52
Πειραιάς 31	27,74	7,96
Ψυχικό 32	6,71	2,52
ΣΥΝΟΛΟ	125,24	41,95

Πίν. 6.7 Απορριπτόμενο φορτίο ανά υποσταθμό

ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΣ	ΑΠΟΚΟΠΗ MW	ΑΠΟΚΟΠΗ MVar
Ελληνικού	3,72	0,80
Θήβας	3,97	1,52
Κωπαΐδας	4,90	1,19
Λιβαδειάς	7,09	2,86
Ν. Σμύρνης	18,62	5,35
Παγκρατίου	52,49	19,75
Πειραιώς	27,74	7,96
Ψυχικού	6,71	2,52
ΣΥΝΟΛΟ	125,24	41,95

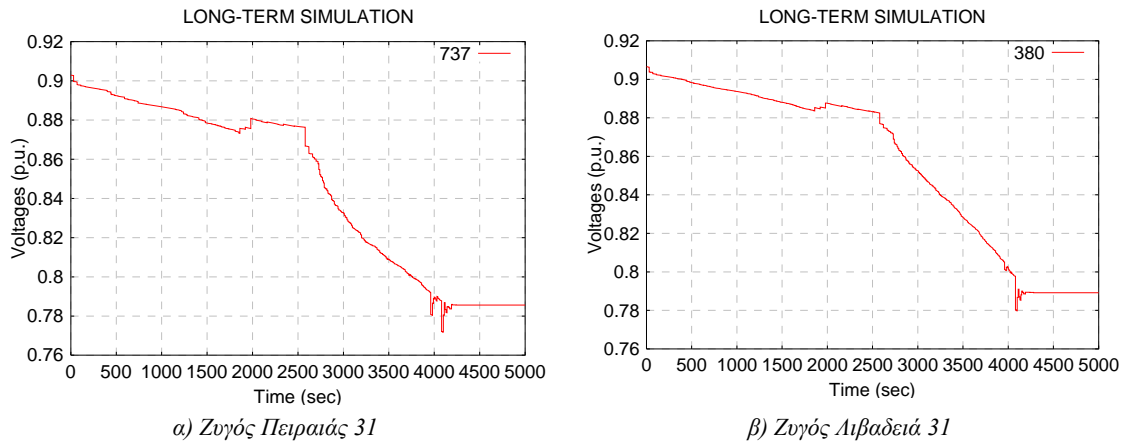
Στο Σχ. 6.11 απεικονίζεται η τάση του τερματικού ζυγού της μονάδας Αλιβέρι 4. Όπως φαίνεται, η τάση προσεγγίζει οριακά τη ρύθμιση του ηλεκτρονόμου υποτάσεως της γεννήτριας (88% της ονομαστικής τάσης) αμέσως μετά την απώλεια της μονάδας Αλιβέρι 3 ($t = 4080$ s), αλλά δεν την ξεπερνά, λόγω των αποκοπών φορτίου που έχουν ξεκινήσει λίγο νωρίτερα (από τη χρονική στιγμή $t = 3890$ s) και συνεχίζονται μέχρι την εξισορρόπηση του συστήματος.



Σχ. 6.11 Τάση τερματικού ζυγού μονάδας Αλιβέρι 4

Στο Σχ. 6.12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των τάσεων σε δύο περιπτώσεις όπου εφαρμόστηκε αποκοπή φορτίου. Εξαιτίας της παράστασης του δικτύου της Αττικής στο μοντέλο του Ελληνικού συστήματος, το συνολικό φορτίο του Πειραιά φαίνεται να τροφοδοτείται απευθείας από τον ισοδύναμο ζυγό 150 kV Πειραιάς 31. Το φορτίο της Λιβαδειάς τροφοδοτείται από τους ζυγούς 20 kV Λιβαδειά 51 και 52 που αναχωρούν από τον υποσταθμό διανομής της πόλης. Κατά συνέπεια, η τάση του ζυγού 150 kV Πειραιάς 31 αντικατοπτρίζει τις αποκοπές φορτίου που πραγματοποιούνται απευθείας στο ζυγό, ενώ η τάση του ζυγού 150 kV Λιβαδειά 31 αντικατοπτρίζει τις αποκοπές φορτίου που πραγματοποιούνται στους δύο προαναφερόμενους ζυγούς ΜΤ της Λιβαδειάς. Και στις δύο περιπτώσεις πραγματοποιούνται τέσσερις αποκοπές φορτίου (συνολικά 20%).

Αξίζει να σημειωθεί ότι μεταξύ των ζυγών 150 kV του συστήματος, ο ζυγός Πειραιάς 31 παρουσιάζει την ελάχιστη τάση καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Τελικά η τάση του ζυγού ισορροπεί στην τιμή 117,8 kV, τιμή η οποία είναι μικρότερη από τη ρύθμιση της τάσης αποκοπής (118,5 kV ή 79%). Δεν πραγματοποιούνται όμως περαιτέρω αποκοπές φορτίου, γιατί αυτές θα παραβίαζαν τον περιορισμό μέγιστου απορριπτόμενου φορτίου από το ζυγό. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι σε κανέναν ζυγό του συστήματος δεν παρατηρείται υπέρταση εξαιτίας των αποκοπών φορτίου.



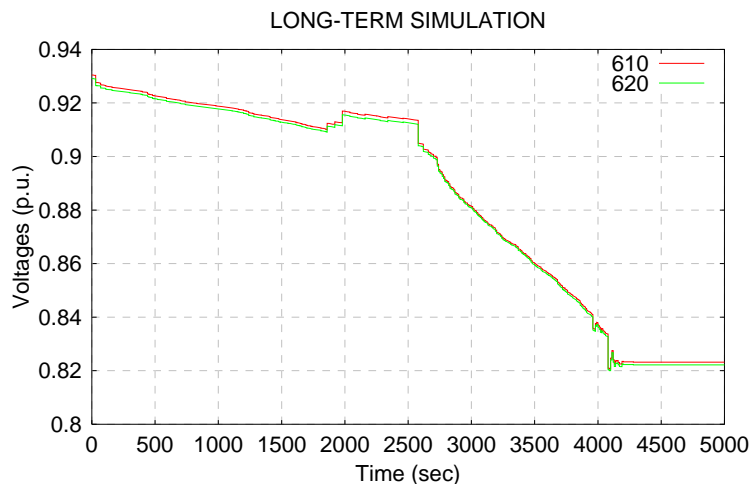
α) Ζυγός Πειραιάς 31

β) Ζυγός Λιβαδειά 31

Σχ. 6.12 Τάσεις ζυγών 150 kV όπου πραγματοποιήθηκαν αποκοπές φορτίου

Στο Σχ. 6.13 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των τάσεων στους ζυγούς 400 kV στο ΚΥΤ Αχαρνών (610) και Κουμουνδούρου (620). Πρόκειται για δύο από τους ζυγούς 400 kV στους οποίους άνοιξαν οι διακόπτες ισχύος, εξαιτίας της λειτουργίας της προστασίας υποτάσεως γραμμών μεταφοράς ΥΥΤ, κατά το περιστατικό της σβέσης στις 12 Ιουλίου 2004. Η αναγκαιότητα της αποσύνδεσης επιβεβαιώθηκε και από την προσομοίωση του φαινομένου, όπου η τάση στους δύο αυτούς ζυγούς (Σχ. 6.8) έπεσε κάτω από τη ρύθμιση υποτάσεως (300 kV ή 75%) για το άνοιγμα των διακοπών ισχύος στις γραμμές. Η διαδοχική ενεργοποίηση της προστασίας υποτάσεως και σε άλλες γραμμές ΥΥΤ προκάλεσε το διαχωρισμό του συστήματος που οδήγησε στη σβέση του νοτίου τμήματός του.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 6.13, με την εφαρμογή του αποκεντρωμένου σχήματος αποκοπής φορτίου οι τάσεις αυτές παραμένουν αρκετά πάνω από τη ρύθμιση υποτάσεως. Ενδεικτικά η τάση του ζυγού στο ΚΥΤ Κουμουνδούρου, η οποία είναι η χαμηλότερη εμφανιζόμενη τάση 400 kV του συστήματος, μειώνεται προοδευτικά ως τα 328 kV (82%) περίπου, χωρίς να τα υπερβεί, ενώ ισορροπεί τελικά στην τιμή 328,9 kV (82,23%).

**Σχ. 6.13** Τάσεις κρίσιμων ζυγών 400 kV

Παρατηρεί κανείς ότι ακόμα και μετά την αποκοπή φορτίου οι τάσεις του συστήματος παραμένουν χαμηλές. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.2.1, η αποκατάσταση των τάσεων δεν αποτελεί τον πρώτο στόχο του μέτρου. Η δυσχερής κατάσταση του συστήματος τη συγκεκριμένη ημέρα και η λειτουργία του κάτω από ιδιαίτερα φορτισμένες συνθήκες, οδήγησε από νωρίς στην εμφάνιση χαμηλών τάσεων στο σύστημα. Με αυτά τα δεδομένα, η απώλεια της μονάδας Αλιβέρι 3 δεν μπορούσε να αντιμετωπιστεί χωρίς αποκοπή φορτίου, προκαλώντας την κατάρρευση του συστήματος. Η αποκοπή του φορτίου στην περίπτωση αυτή αποσκοπεί στη διατήρηση του συστήματος σε λειτουργία πάσει θυσία, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα τον αναγκαίο χρόνο για τη λήψη άλλων μέτρων προστασίας, ενώ παράλληλα αναμένονται οφέλη από ενδεχόμενη μείωση της ζήτησης.

Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι η αναβάθμιση του συστήματος κατά τα τελευταία χρόνια είναι τέτοια, που δεν υπάρχει περίπτωση να εμφανιστούν σήμερα τόσο χαμηλά επίπεδα τάσης στο σύστημα χωρίς αυτό να σβήσει προηγουμένως για άλλους λόγους. Επομένως, το σχήμα αυτό παρέχει μεν ένα σχήμα προστασίας του συστήματος από αστάθεια τάσης, όμως η βελτίωση ή η αναθεώρηση της σχεδίασής του θα πρέπει να είναι διαρκής, παρακολουθώντας την εξέλιξη της κατάστασης του συστήματος.

6.4 ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΣΧΗΜΑ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

6.4.1 Φιλοσοφία

Η σχεδίαση του κεντρικού σχήματος αποκοπής φορτίου έγινε με σκοπό τη συμπληρωματική λειτουργία του ως προς το αποκεντρωμένο σχήμα, ώστε σε περίπτωση που η εφαρμογή του τελευταίου αποδεικνυόταν αναποτελεσματική για την αντιμετώπιση της επερχόμενης κατάρρευσης, να δράσει ως δίκτυ ασφαλείας του συστήματος. Για παράδειγμα, αν οι τάσεις του συστήματος μετά την εφαρμογή του αποκεντρωμένου σχήματος αποκοπών συνέχιζαν να μειώνονται λόγω της εμφάνισης κάποιας δυναμικής στα φορτία, ενώ παράλληλα είχε εξαντληθεί η δυνατότητα αποκοπής φορτίου στις κρίσιμες περιοχές, ο κίνδυνος ανεξέλεγκτου διαχωρισμού του συστήματος με ενεργοποίηση της προστασίας υποτάσεως στις γραμμές μεταφοράς ΥΥΤ θα ήταν ορατός. Σε μια τέτοια περίπτωση, οι αποκοπές φορτίου με κεντρικό έλεγχο είναι σε θέση να επιφέρουν ισορροπία στο σύστημα.

Σε αντίθεση με το αποκεντρωμένο σχήμα όπου επιτηρείται η τάση σε κάθε υποσταθμό των θιγόμενων περιοχών (Θεσσαλία, Στερεά Ελλάδα, Αττική και Πελοπόννησος) που συμμετέχει στο μέτρο και η εντολή της αποκοπής δίνεται τοπικά (αποκεντρωμένα) στο φορτίο του υποσταθμού που παραβιάζει τη ρύθμιση υποτάσεως, στο κεντρικό σχήμα εμποτεύεται η τάση σε επιλεγμένους ζυγούς και η εντολή δίνεται κεντρικά σε προκαθορισμένα φορτία.

Η παρακολούθηση της τάσης γίνεται στους ζυγούς 400 kV των Αχαρνών, του Κουμουνδούρου, της Παλλήνης και του Αγ. Στεφάνου. Η επιλογή των συγκεκριμένων ζυγών εξασφαλίζει την αξιόπιστη αναγνώριση της αστάθειας και ταυτόχρονα παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου ανεξέλεγκτου διαχωρισμού του συστήματος από ενεργοποίηση της προστασίας υποτάσεως στις γραμμές μεταφοράς ΥΥΤ με άνοιγμα των διακοπών ισχύος στους ζυγούς.

Είδαμε ότι στη σχεδίαση του αποκεντρωμένου σχήματος αποκοπής φορτίου, αποκλειστικός στόχος αποτέλεσε η αποφυγή αποσύνδεσης λόγω υποτάσεως της μονάδας Αλιβέρι 4 μετά την απώλεια της μονάδας Αλιβέρι 3. Η αποσύνδεση της μονάδας προκαλεί τη διαδοχική απώλεια και άλλων διατάξεων με τελικό αποτέλεσμα το διαχωρισμό του συστήματος με το άνοιγμα των γραμμών ΥΥΤ.

Ο ίδιος στόχος καθορίζει τον προσδιορισμό της τάσης αποκοπής V_{thres} στο κεντρικό σχήμα. Από την προσομοίωση του φαινομένου της σβέσης (βλ. παράγραφο 6.1.4), διαπιστώθηκε ότι τη στιγμή της αποσύνδεσης της μονάδας Αλιβέρι 4, οι τάσεις των ζυγών 400 kV Αχαρνών, Κουμουνδούρου, Παλλήνης και Αγ. Στεφάνου είχαν τιμές λίγο κάτω από 328 kV (82%). Ακόμα και με την εφαρμογή του αποκεντρωμένου σχήματος αποκοπής φορτίου, οι τάσεις σε ορισμένους από τους ζυγούς αυτούς ισορρόπησαν σε τιμές οριακά πάνω από 328 kV (Σχ. 6.13), καθιστώντας πιθανή την αποσύνδεση της μονάδας Αλιβέρι 4 σε περίπτωση επικείμενης εμφάνισης κάποιας δυναμικής στα φορτία.

Προκειμένου λοιπόν να αποσοβηθεί με κάθε τρόπο η απώλεια λόγω υποτάσεως της μονάδας Αλιβέρι 4, καθορίστηκε η ρύθμιση της τάσης αποκοπής στο κεντρικό σχήμα να λάβει την τιμή 328 kV (82%). Συνεπώς οι αποκοπές φορτίου πραγματοποιούνται όταν η τάση σε 3 από τους 4 ζυγούς 400 kV Αχαρνών, Κουμουνδούρου, Παλλήνης και Αγ. Στεφάνου πέσει κάτω από τη ρύθμιση αυτή. Για τη διέγερση των ηλεκτρονόμων ορίστηκε μηδενική χρονική καθυστέρηση ($t_{del} = 0$) και μηδενική ανοχή ($\epsilon = 0$) επί της ρύθμισης υποτάσεως.

Η επιλογή των διαθέσιμων προς αποκοπή φορτίων γίνεται από το διάνυσμα $\tilde{S}_{\mu^*p_0}$ των ευαισθησιών του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος. Το διάνυσμα αυτό υπολογίστηκε στο όριο φόρτισης του συστήματος για ομοιόμορφη και αναλογική αύξηση της ζήτησης ως προς τα φορτία στο αρχικό σημείο λειτουργίας (στιγμιότυπο 11:30 της 12^{ης} Ιουλίου 2004) και παρατίθεται στο Παράρτημα Α. Σημειώνεται ότι παρουσιάζονται με φθίνουσα σειρά κατάταξης μόνο τα θετικά στοιχεία του διανύσματος. Γίνεται αντιληπτό ότι οι ανάγκες του σχήματος σε υλικοτεχνικό εξοπλισμό είναι

αυξημένες, λόγω του πλήθους των υποσταθμών που συμμετέχουν και της ανάγκης για τηλεμετάδοση σημάτων.

6.4.2 Προσδιορισμός Ελάχιστης Αποκοπής Φορτίου

Για τον προσδιορισμό της ελάχιστης δυνατής αποκοπής φορτίου υποτέθηκε λογική ανοιχτού βρόχου, δηλαδή θεωρήθηκε ότι η συνολική αποκοπή του φορτίου θα γίνει σε ένα βήμα. Η ενεργοποίηση του σχήματος γίνεται όταν η τάση σε 3 από 4 προκαθορισμένους ζυγούς ΥΥΤ μειωθεί πέραν της τάσης αποκοπής V_{thres} . Τη χρονική στιγμή που συμβαίνει αυτό, πραγματοποιείται η αποκοπή ολόκληρου του φορτίου (100%) από τα πρώτα (πιο αποδοτικά) στοιχεία του διανύσματος $\tilde{S}'_{\mu^*p_0}$ και με φθίνουσα σειρά μέχρι ικανοποίησης του κριτηρίου τάσης $V_{EHV} > 0,82$ αμ σε όλους τους ζυγούς ΥΥΤ του συστήματος.

Το διάνυσμα $\tilde{S}'_{\mu^*p_0}$ διαφέρει από το αρχικό διάνυσμα $\tilde{S}_{\mu^*p_0}$ στο ότι περιλαμβάνει μόνο τα στοιχεία του τελευταίου που αντιστοιχούν σε ζυγούς των πλέον θιγόμενων περιοχών του συστήματος (Θεσσαλία, Στερεά Ελλάδα, Αττική και Πελοπόννησο) και από αυτά μόνο εκείνα με ευαισθησία μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή από 0,5. Αυτό έγινε ώστε να περιοριστεί το σύνολο των διαθέσιμων προς αποκοπή φορτίων, αμελώντας αυτά που έχουν σχετικά μικρή ευαισθησία, τα περισσότερα εκ των οποίων ανήκουν ούτως ή άλλως στις μη θιγόμενες περιοχές (Ηπειρος, Δυτική - Κεντρική - Ανατολική Μακεδονία και Θράκη). Το διάνυσμα $\tilde{S}'_{\mu^*p_0}$ παρατίθεται στο Παράρτημα Β.

Το παραπάνω σχήμα για τον προσδιορισμό της ελάχιστης αποκοπής φορτίου υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα WPSTAB και εφαρμόστηκε κατά την προσομοίωση του περιστατικού της 12^{ης} Ιουλίου 2004. Την χρονική στιγμή 12:38:10 ($t = 4090$ s της προσομοίωσης), δηλαδή 10 s πριν την αποσύνδεση για λόγους υποτάσεως της μονάδας Αλιβέρι 4 στο σενάριο χωρίς αποκοπή φορτίου, πραγματοποιείται αποκοπή του συνολικού φορτίου από τους ζυγούς που αντιστοιχούν στα τέσσερα πρώτα στοιχεία του διανύσματος ευαισθησιών. Το συνολικό φορτίο που αποκόπτεται είναι 99,82 MW και 70,55 MVar.

Στον Πίν. 6.8 φαίνεται το συνολικά απορριπτόμενο φορτίο ανά ζυγό με φθίνουσα κατάταξη ως προς την ευαισθησία. Παρατηρείται ότι το απορριπτόμενο φορτίο επικεντρώνεται στην πόλη της Χαλκίδας, η οποία σβήνει ολόκληρη, στα Μέθανα και τη Θήβα. Αυτό σημαίνει ότι η αποκοπή αυτή δεν θα μπορούσε να υλοποιηθεί στην πράξη λόγω της συγκέντρωσης του απορριπτόμενου φορτίου σε μία στενή γεωγραφική περιοχή.

Πίν. 6.8 Απορριπτόμενο φορτίο ανά ζυγό με αποκοπή του συνολικού φορτίου των πιο αποδοτικών ζυγών

ΖΥΓΟΣ	$\tilde{S}'_{\mu^*p_0}$	ΑΠΟΚΟΠΗ MW	ΑΠΟΚΟΠΗ MVar
Χαλκίδα-II 51	-3,547	31,33	24,60
Χαλκίδα-II 52	-2,604	25,97	16,74
Μέθανα 51	-2,245	14,78	13,32
Θήβα 51	-2,232	27,74	15,89
ΣΥΝΟΛΟ		99,82	70,55

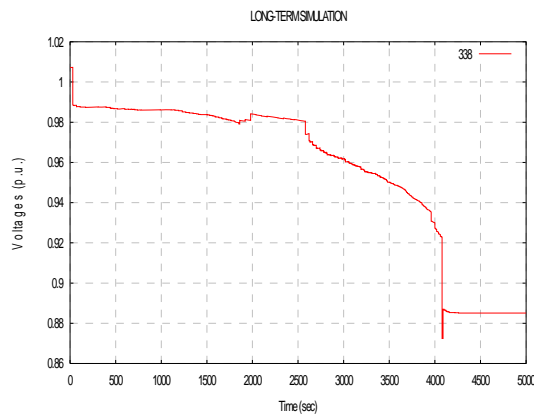
Προκειμένου να αποφευχθεί το παραπάνω πρόβλημα, αποφασίστηκε το σχήμα να αποκόπτει το 20% του φορτίου των πιο αποδοτικών ζυγών, αντί του συνολικού τους φορτίου. Σκοπός είναι να επιτευχθεί η ελάχιστη αποκοπή φορτίου, με τη μικρότερη δυνατή διασπορά των αποκοπών ως προς το πλήθος των ζυγών που συμμετέχουν. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μία εξισορρόπηση μεταξύ της αναγκαίας υλικοτεχνικής υποδομής που απαιτείται για την αποφυγή της κατάρρευσης του συστήματος και του κόστους ελέγχου και υλοποίησης του σχήματος προστασίας.

Το φορτίο που αποκόπτεται κατά αυτόν τον τρόπο φαίνεται στον Πίν. 6.9 και όπως παρατηρείται είναι λιγότερο από αυτό που αποκόπηκε με τη προηγούμενη μέθοδο (Πίν. 6.8). Συνεπώς, το απορριπτόμενο φορτίο του Πίν. 6.9 συνιστά το ελάχιστο που απαιτείται για την αποφυγή της απώλειας της μονάδας Αλιβέρι 4, η οποία προκαλεί τις αλυσιδωτές διαταραχές που οδηγούν στο διαχωρισμό του συστήματος. Στην εφαρμογή του μέτρου προστασίας συμμετέχουν συνολικά 19 ζυγοί, οι οποίοι συγκεντρώνονται σε 12 υποσταθμούς που ανήκουν και στις τέσσερις πλέον θιγόμενες περιοχές του συστήματος.

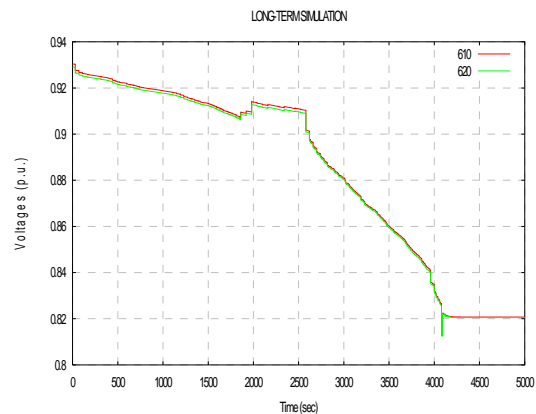
Πίν. 6.9 Ελάχιστη απορριπτόμενη ζήτηση

ΖΥΓΟΣ	$\tilde{S}'_{\mu^* p_0}$	ΑΠΟΚΟΠΗ MW	ΑΠΟΚΟΠΗ MVar
Χαλκίδα-II 51	-3,547	6,27	4,92
Χαλκίδα-II 52	-2,604	5,19	3,35
Μέθανα 51	-2,245	2,96	2,66
Θήβα 51	-2,232	5,55	3,18
Ελευσίνα 52	-2,230	8,00	6,30
Ελευσίνα 51	-2,224	7,34	6,01
Οινόφυτα 52	-2,150	2,26	1,98
Λιβαδειά 51	-2,056	3,82	1,54
Λιβαδειά 52	-2,056	3,82	1,54
Οινόφυτα 51	-1,987	5,20	2,98
Ψαχνά 52	-1,965	3,51	1,69
Ξυλόκαστρο 51	-1,924	3,34	2,37
Χαλκίδα-I 52	-1,924	6,26	2,97
Θήβα 52	-1,867	5,80	1,69
Σχηματάρι 52	-1,810	6,76	2,73
Αχαρναί 52	-1,801	6,76	2,91
Ψαχνά 51	-1,779	2,16	1,13
Χαλκίδα-I 51	-1,769	6,19	2,38
Ρουφ 51	-1,712	7,56	2,76
ΣΥΝΟΛΟ		98,74	55,08

Στο Σχ. 6.14α παρουσιάζεται η τάση του τερματικού ζυγού της μονάδας Αλιβέρι 4 με εφαρμογή του σχήματος αποκοπής του 20% του φορτίου των πιο αποδοτικών ζυγών. Τη χρονική στιγμή $t = 4090$ s, η τάση πέφτει κάτω από τη ρύθμιση του ηλεκτρονόμου υποτάσεως της γεννήτριας (88% της ονομαστικής τάσης), με αποτέλεσμα να διεγερθεί ο μετρητής χρόνου του ηλεκτρονόμου. Η γεννήτρια θα αποσυνδεόταν από το δίκτυο, αν η τερματική της τάση παρέμενε σε τόσο χαμηλό επίπεδο για 10 s. Όμως την ίδια χρονική στιγμή ($t = 4090$ s) δίδεται εντολή αποκοπής φορτίου με αποτέλεσμα να αποφευχθεί η κατάρρευση του συστήματος λόγω των αλυσιδωτών απωλειών που θα προκαλούσε η αποσύνδεση της μονάδας Αλιβέρι 4. Στο Σχ. 6.14β φαίνεται πόσο οριακά ισορροπούν οι χαμηλότερες τάσεις 400 kV του συστήματος μετά την ελάχιστη αποκοπή φορτίου.



α) Τερματικός ζυγός μονάδας Αλιβέρι 4



β) Ζυγοί 400 kV Αχαρναίων και Κουμουνδούρου

Σχ. 6.14 Χρονική διακύμανση τάσεων

6.4.3 Διασπορά της Αποκοπής σε Μεγαλύτερο Πλήθος Ζυγών

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η περίπτωση να είναι επιθυμητή η διασπορά της αναγκαίας αποκοπής φορτίου σε μεγαλύτερο πλήθος ζυγών, προκειμένου να υπάρξει (στο μέτρο του δυνατού) μια ισοκατανομή του απορριπτόμενου φορτίου σε όλες τις θιγόμενες περιοχές του συστήματος, περιορίζοντας ταυτόχρονα και τον κοινωνικό αντίκτυπο.

Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου, το κεντρικό σχήμα αποκοπής φορτίου σχεδιάστηκε με τη λογική του κλειστού βρόχου, δηλαδή οι αποκοπές πραγματοποιούνται επαναληπτικά (σε βήματα), απορρίπτοντας σε κάθε επανάληψη ποσοστό $s = 5\%$ επί της ζήτησης των φορτίων. Η αποκοπή εφαρμόζεται ταυτόχρονα σε όλα τα διαθέσιμα φορτία, τα οποία συνιστούν το διάνυσμα $\tilde{S}''_{\mu^*p_0}$ (βλέπε Παράρτημα Γ). Το διάνυσμα αυτό διαφέρει από το $\tilde{S}'_{\mu^*p_0}$ στο ότι περιλαμβάνει μόνο τα στοιχεία του τελευταίου που αντιστοιχούν σε ζυγούς με ονομαστικό φορτίο μεγαλύτερο από 25 MW. Το πλήθος των διαθέσιμων φορτίων μειώθηκε αρκετά σε σχέση με αυτό του διανύσματος $\tilde{S}'_{\mu^*p_0}$, επειδή πλέον όλα τα φορτία συμμετέχουν στην αποκοπή.

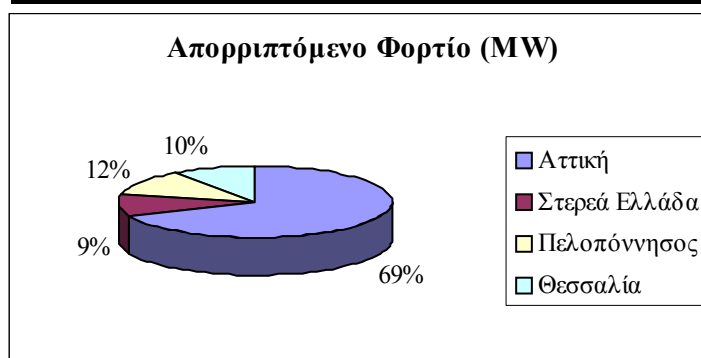
Συνοψίζοντας, οι αποκοπές πραγματοποιούνται από όλα τα φορτία που αντιστοιχούν στα στοιχεία του διανύσματος $\tilde{S}''_{\mu^*p_0}$ και σε ποσοστό s επί της αρχικής ζήτησής τους, κάθε φορά που η τάση σε 3 από τους 4 προκαθορισμένους ζυγούς ΥΥΤ μειώνεται πέραν της τάσης αποκοπής V_{thres} .

Το σχήμα αυτό υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα WPSTAB και εφαρμόστηκε στην προσομοίωση του περιστατικού της 12^{ης} Ιουλίου 2004. Από την προσομοίωση αποδείχθηκε ότι μία μόνο αποκοπή φορτίου από όλους τους ζυγούς που αντιστοιχούν στα στοιχεία του διανύσματος $\tilde{S}''_{\mu^*p_0}$ (συνολικά 88) ήταν αρκετή για την αποκατάσταση ισορροπίας στο σύστημα. Η αποκοπή πραγματοποιήθηκε τη χρονική στιγμή 12:38:10 ($t = 4090$ s της προσομοίωσης), δηλαδή 10 s πριν την αποσύνδεση για λόγους υποτάσεως της μονάδας Αλιβέρι 4 στο σενάριο χωρίς αποκοπή.

Το συνολικό φορτίο που αποκόπηκε είναι 193,27 MW και 69,29 MVar και είναι σχεδόν διπλάσιο από το θεωρητικά ελάχιστο (~100 MW). Στον Πίν. 6.10 φαίνεται ότι υπάρχει πλέον διασπορά του απορριπτόμενου φορτίου σε όλες τις γεωγραφικές περιοχές όπου επιτρέπεται η αποκοπή φορτίου, ενώ σημειώνεται ότι δεν σβήνουν ολόκληρες πόλεις ή μεγάλα τμήματά τους. Στον Πίν. 6.11 (αντίστοιχα Πίν. 6.12) φαίνεται το συνολικά απορριπτόμενο φορτίο ανά ζυγό (αντίστοιχα υποσταθμό). Στους ζυγούς όπου εμφανίζεται μηδενική αποκοπή αέργου ισχύος, αυτό συνέβη γιατί η αεργος συνιστώσα του φορτίου που τροφοδοτείται από αυτούς είναι αρνητική προφανώς λόγω υπεραντιστάθμισης.

Πίν. 6.10 Απορριπτόμενο φορτίο ανά περιοχή

ΠΕΡΙΟΧΗ	ΑΠΟΚΟΠΗ MW	ΑΠΟΚΟΠΗ MVar
Αττική	132,81	44,91
Πελοπόννησος	22,96	9,43
Στερεά Ελλάδα	18,16	7,70
Θεσσαλία	19,34	7,25
ΣΥΝΟΛΟ	193,27	69,29



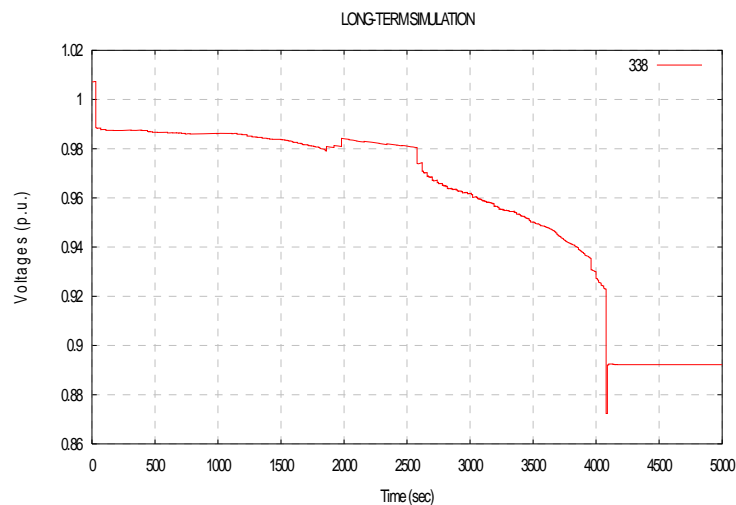
Πίν. 6.11 Απορριπτόμενο φορτίο ανά ζυγό

ΖΥΓΟΣ	ΑΠΟΚΟΠΗ		ΖΥΓΟΣ	ΑΠΟΚΟΠΗ	
	MW	MVar		MW	MVar
Αγ. Στέφανος 31	4,361	2,099	Μαρκόπουλο 53	1,188	0,024
Αγ. Στέφανος 51	1,877	0,494	Ν. Ιωνία 31	5,595	0,952
Αγ. Στέφανος 52	1,802	0,336	Ν. Ιωνία 32	1,596	0,416
Αιγάλεω 31	7,077	2,445	Ν. Σμύρνη 31	4,537	1,009
Αιγάλεω 32	2,957	0,910	Ν. Σμύρνη 32	4,625	1,004
Άμφισσα 51	0,486	0,225	Ν. Σμύρνη 34	5,020	1,442
Άργος-I 51	1,261	0,672	Ν. Χαλκηδόνα 51	1,685	0
Άργος-I 52	1,261	0,672	Ν. Χαλκηδόνα 52	1,736	0,427
Άργος-II 52	1,243	0,746	Ν. Χαλκηδόνα 53	1,463	0,555
Αριστείδου 31	1,011	0,288	Οινόφυτα 51	1,300	0,745
Ασπρόπυργος 51	1,588	0,536	Παγκράτι 31	6,795	1,949
Ασπρόπυργος 52	1,467	0,261	Παγκράτι 32	9,564	4,391
Αχαρναί 51	1,171	0,532	Παλλήνη 51	1,870	0,166
Αχαρναί 52	1,690	0,728	Παλλήνη 52	1,613	0,003
Βάρη 51	1,902	0,453	Πάτρα-I 51	1,064	0,451
Βάρη 52	1,902	0,453	Πάτρα-III 51	1,334	0,585
BZ Πάτρα 52	1,992	1,045	Πάτρα-III 52	1,340	0,585
Βόλος-II 52	1,120	0,475	Πειραιάς 31	7,478	2,146
Βούναινα 51	1,001	0,824	Πύργος 51	1,558	0,843
Βούναινα 52	1,001	0,824	Πύργος 52	1,653	0
ΒΠ Βόλου 51	0,967	0	Ρουφ 51	1,890	0,690
ΒΠ Βόλου 52	1,654	0,111	Ρουφ 52	1,351	0,292
Ελευθερία 31	3,212	1,964	Ρουφ 53	1,917	0,055
Ελευθερία 32	4,926	2,461	Ρουφ 54	1,082	0,278
Ελευθερία 33	2,058	1,499	Σαλαμίνα 51	1,436	0
Ελευσίνα 51	1,835	1,503	Σαλαμίνα 52	1,080	0
Ελευσίνα 52	2,000	1,574	Σπάρτη-II 51	1,263	0,645
Ελληνικό 31	1,905	0,411	Σπάρτη-II 52	1,263	0,645
Θήβα 51	1,387	0,795	Σπάτα 51	1,101	0,122
Θήβα 52	1,450	0,423	Σπάτα 53	1,721	0,424
Θήβα 53	1,135	0,300	Σχηματάρι 52	1,689	0,682
Καλαμάτα 51	1,429	0,932	Τρίκαλα 51	1,415	0,964
Καλαμάτα 52	1,477	0,748	Τρίκαλα-II 51	1,223	0,032
Καλλιθέα 32	1,827	1,435	Τρίκαλα-II 52	1,486	0,001
Καρδίτσα 51	1,711	1,052	Φάρσαλα 51	1,844	0,549
Κόρινθος 51	1,822	0,181	Φάρσαλα 53	1,011	0,541
Κόρινθος 52	1,863	0,957	Χαλκίδα-I 51	1,549	0,595
Κυπαρισσία 51	1,141	0	Χαλκίδα-I 52	1,566	0,742
Λαμία 51	1,813	0,692	Χαλκίδα-II 51	1,567	1,230
Λαμία 52	1,284	0,436	Χαλκίδα-II 52	1,299	0,837
Λάρισα 52	1,630	0,388	Ψυχικό 31	4,271	2,065
Λάρισα-II 51	1,299	0,451	Ψυχικό 32	6,713	2,516
Λάρισα-III 52	1,975	1,101	Ψυχικό 33	4,210	2,338
Μαρκόπουλο 52	1,350	0,070	Ψυχικό 34	1,665	0,895
			ΣΥΝΟΛΟ	193,27	69,29

Πίν. 6.12 Απορριπτόμενο φορτίο ανά υποσταθμό

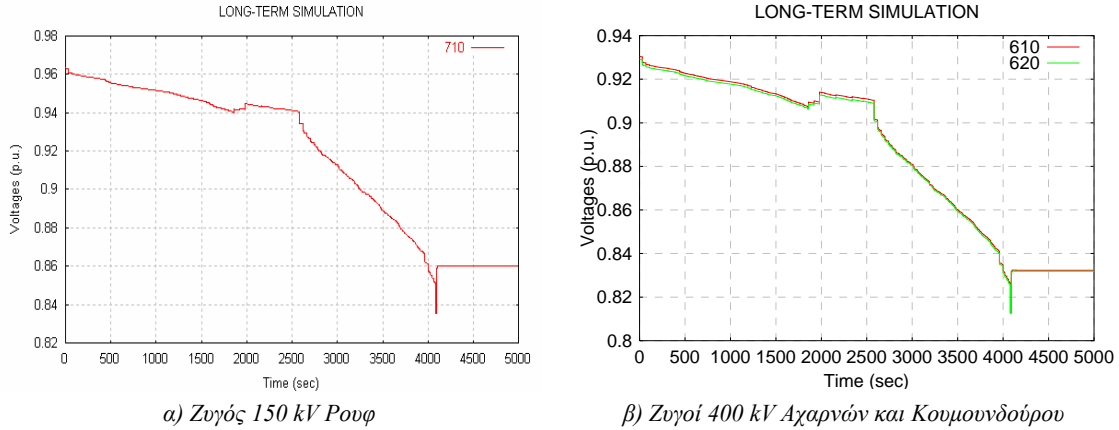
ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΣ	ΑΠΟΚΟΠΗ		ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΣ	ΑΠΟΚΟΠΗ	
	MW	MVar		MW	MVar
Αγ. Στέφανος	8,040	2,929	Λάρισα-Π	1,299	0,451
Αιγάλεω	10,034	3,355	Λάρισα-ΙΙΙ	1,975	1,101
Άμφισσα	0,486	0,225	Μαρκόπουλο	2,538	0,094
Άργος-Ι	2,522	1,344	Ν. Ιωνία	7,191	1,368
Άργος-ΙΙ	1,243	0,746	Ν. Σύμνη	14,182	3,455
Αριστείδου	1,011	0,288	Ν. Χαλκηδόνα	4,884	0,918
Ασπρόπυργος	3,055	0,797	Οινόφυτα	1,300	0,745
Αχαρναί	2,861	1,260	Παγκράτι	16,359	6,340
Βάρη	3,804	0,906	Παλλήνη	3,483	0,169
ΒΖ Βόλου	2,621	0,049	Πάτρα-Ι	1,064	0,451
ΒΖ Πάτρας	1,992	1,045	Πάτρα-ΙΙΙ	2,674	1,170
Βόλος-ΙΙ	1,120	0,475	Πειραιάς	7,478	2,146
Βούναινα	2,002	1,648	Πύργος	3,211	0,782
Ελευθέρια	10,196	5,924	Ρουφ	6,240	1,315
Ελευσίνα	3,835	3,077	Σαλαμίνα	2,516	0
Ελληνικό	1,905	0,411	Σπάρτη-ΙΙ	2,526	1,290
Θήβα	3,972	1,518	Σπάτα	2,822	0,546
Καλαμάτα	2,906	1,680	Σχηματάρι	1,689	0,682
Καλλιθέα	1,827	1,435	Τρίκαλα	1,415	0,964
Καρδίτσα	1,711	1,052	Τρίκαλα-ΙΙ	2,709	0,033
Κόρινθος	3,685	1,138	Φάρσαλα	2,855	1,090
Κυπαρισσία	1,141	0	Χαλκίδα-Ι	3,115	1,337
Λαμία	3,097	1,128	Χαλκίδα-ΙΙ	2,866	2,067
Λάρισα	1,630	0,388	Ψυχικό	16,859	7,814
			ΣΥΝΟΛΟ	193,27	69,29

Στο Σχ. 6.15 παρουσιάζεται η τάση του τερματικού ζυγού της μονάδας Αλιβέρι 4. Η τάση πέφτει κάτω από τη ρύθμιση του ηλεκτρονόμου υποτάσεως της γεννήτριας (88% της ονομαστικής τάσης) τη χρονική στιγμή $t = 4090$ s, όμως την ίδια χρονική στιγμή ($t = 4090$ s) δίδεται εντολή αποκοπής φορτίου με αποτέλεσμα η γεννήτρια να παραμείνει στο δίκτυο.



Σχ. 6.15 Τάση τερματικού ζυγού μονάδας Αλιβέρι 4

Στο Σχ. 6.16 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ορισμένων χαρακτηριστικών τάσεων, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση. Στο Σχ. 6.16α απεικονίζεται η τάση του κρίσιμου ζυγού 150 kV Ρουφ 31, ενώ στο Σχ. 6.16β οι τάσεις στους ζυγούς 400 kV των ΚΥΤ Αχαρνών (610) και Κουμουνδούρου (620). Είναι εμφανές ότι μετά την αποκοπή του φορτίου οι τάσεις ισορροπούν χωρίς να χρειάζεται δεύτερο βήμα αποκοπής. Σημειώνεται ότι σε κανέναν ζυγό του συστήματος δεν παρατηρήθηκε υπέρταση ως συνέπεια των αποκοπών φορτίου.



Σχ. 6.16 Τάσεις κρίσιμων ζυγών

6.4.4 Κεντρικό Σχήμα Αποκοπής Φορτίου με βάση την Αποδοτικότητα Περιοχών

Από την εφαρμογή του κεντρικού σχήματος αποκοπής φορτίου της προηγούμενης παραγράφου (παράγραφος 6.4.3) είδαμε, ότι παρόλο που επιτεύχθηκε η επιθυμητή διασπορά, η ζήτηση που αποκόπηκε είναι σχεδόν διπλάσια από την ελάχιστη (98,74 MW). Προκειμένου να επιτύχουμε τη ζητούμενη διασπορά της αποκοπής με μείωση του απορριπτόμενου φορτίου, σχεδιάστηκε ένα νέο κεντρικό σχήμα αποκοπής φορτίου κλειστού βρόχου με βάση την αποδοτικότητα των γεωγραφικών περιοχών του συστήματος ως προς την αποκοπή φορτίου από αυτές.

Σύμφωνα με τη λογική του νέου αυτού σχήματος, οι αποκοπές πραγματοποιούνται από τις πιο αποδοτικές περιοχές του συστήματος. Η αποδοτικότητα της αποκοπής φορτίου από κάθε περιοχή προσδιορίζεται με βάση τον υπολογισμό της ευαισθησίας ϵ_k του περιθωρίου φόρτισης μ^* του συστήματος ως προς την αποκοπή φορτίου από την περιοχή k :

$$\epsilon_k = \frac{\Delta\mu^*}{\Delta P_k^{shed}} \quad (6.2)$$

όπου $\Delta\mu^*$ είναι η αύξηση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος (θεωρώντας γραμμικότητα):

$$\Delta\mu^* \approx -s \sum_{i=1}^{N_k} \tilde{S}_{\mu^* p_o}'' P_{o,i} \quad (6.3)$$

η οποία επιτυγχάνεται με αποκοπή ζήτησης ΔP_k^{shed} από την περιοχή k :

$$\Delta P_k^{shed} = -s \sum_{i=1}^{N_k} P_{o,i} \quad (6.4)$$

Στις παραπάνω σχέσεις είναι:

- \mathbf{p}_o : Το διάνυσμα των αρχικών τιμών των παραμέτρων ζήτησης φορτίου P_o
- $\tilde{S}_{\mu^* p_o}''$: Το υποδιάνυσμα του διανύσματος ευαισθησιών $\tilde{S}_{\mu^* p_o}''$ του περιθωρίου φόρτισης μ^* του συστήματος ως προς τις αρχικές παραμέτρους ζήτησης \mathbf{p}_o (που ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο)
- N_k : Το πλήθος των ζυγών της γεωγραφικής περιοχής k που περιλαμβάνονται στο διάνυσμα $\tilde{S}_{\mu^* p_o}''$
- s : Το ποσοστό αποκοπής επί της ζήτησης των φορτίων.

Οι αποκοπές πραγματοποιούνται κάθε φορά που η τάση σε 3 από τους 4 ζυγούς 400 kV των Αχαρνών, του Κουμουνδούρου, της Παλλήνης και του Αγ. Στεφάνου μειωθεί πέραν της τάσης αποκοπής $V_{thres} = 0,82$ αμ. Για τη διέγερση των ηλεκτρονόμων ορίζεται σταθερή χρονική καθυστέρηση $t_{del} = 2$ s.

Η πρώτη αποκοπή φορτίου πραγματοποιείται από την πιο αποδοτική περιοχή, η οποία προσδιορίζεται με βάση τη μεγαλύτερη τιμή της ευαισθησίας ε_k . Αν χρειαστεί και άλλη αποκοπή αυτή θα γίνει από τη δεύτερη πιο αποδοτική περιοχή και η διαδικασία επαναλαμβάνεται, ώστε οι αποκοπές φορτίου να πραγματοποιούνται κυκλικά από όλες τις διαθέσιμες προς αποκοπή περιοχές με φθίνουσα σειρά ως προς την αποδοτικότητά τους.

Το φορτίο που αποκόπτεται σε κάθε επανάληψη είναι ίσο με $s = 5\%$ επί της ζήτησης των N_k φορτίων που περιλαμβάνονται στο διάνυσμα ευαισθησιών $\tilde{S}_{\mu^*p_0}''$ και ανήκουν στην περιοχή που έχει προκριθεί για αποκοπή με βάση την αποδοτικότητά της. Σε κάθε περίπτωση ορίζεται μέγιστο απορριπτόμενο φορτίο P_{shed}^{max} από κάθε ζυγό ίσο με το 20% της αρχικής ζήτησης.

Το παραπάνω σχήμα αποκοπής φορτίου κλειστού βρόχου υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα WPSTAB και εφαρμόστηκε κατά την προσομοίωση του περιστατικού της 12^{ης} Ιουλίου 2004. Στην περίπτωση αυτή ως διαθέσιμες προς αποκοπή περιοχές ορίστηκαν οι εξής:

$$k = \{ \text{Αττική, Στερεά Ελλάδα, Πελοπόννησος, Θεσσαλία} \}.$$

Για τις τέσσερις αυτές περιοχές υπολογίστηκαν οι ευαισθησίες που φαίνονται στον Πίν. 6.13. Με βάση την κατάταξη των περιοχών με φθίνουσα σειρά ως προς τη μεγαλύτερη τιμή ευαισθησίας ε_k , η πρώτη αποκοπή φορτίου πραγματοποιείται από την περιοχή της Στερεάς Ελλάδας. Αυτό γίνεται τη χρονική στιγμή 12:38:10 ($t = 4090$ s της προσομοίωσης), δηλαδή 10 s πριν την αποσύνδεση για λόγους υποτάσεως της μονάδας Αλιβέρι 4 στο σενάριο χωρίς αποκοπή φορτίου.

Πίν. 6.13 Ευαισθησία περιοχής

ΠΕΡΙΟΧΗ (k)	ε_k
Στερεά Ελλάδα	2,1318
Πελοπόννησος	1,3262
Αττική	1,2440
Θεσσαλία	0,9457

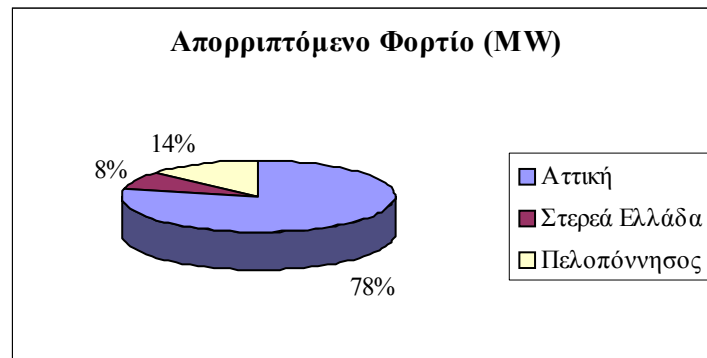
Επειδή η εφαρμογή μίας αποκοπής φορτίου δεν είναι αρκετή για την ισορροπία του συστήματος, το κριτήριο της τάσης αποκοπής στους ζυγούς ΥΥΤ εξακολουθεί να παραβιάζεται, με αποτέλεσμα να εφαρμοστεί διαδοχικά (με καθυστέρηση 2 s μεταξύ των επαναλήψεων) αποκοπή του ίδιου ποσοστού ζήτησης s από τους ζυγούς της δεύτερης και τρίτης σε κατάταξη περιοχής (Πελοπόννησος και Αττική αντίστοιχα).

Το συνολικό φορτίο που απορρίπτεται με τον τρόπο αυτό είναι 167,5 MW και 60,22 MVar και κατανέμεται στις τρεις προαναφερόμενες περιοχές όπως φαίνεται στον Πίν. 6.14. Το απορριφθέν φορτίο είναι περισσότερο από το θεωρητικά ελάχιστο (~100 MW), αλλά λιγότερο από αυτό (~190 MW) που αποκόπηκε με εφαρμογή του περισσότερο διεσπαρμένου κεντρικού σχήματος αποκοπής φορτίου της προηγούμενης παραγράφου.

Στον Πίν. 6.15 (αντίστοιχα Πίν. 6.16) φαίνεται το συνολικά απορριπτόμενο φορτίο ανά υποσταθμό (αντίστοιχα ζυγό). Στους ζυγούς όπου εμφανίζεται μηδενική αποκοπή αέργου ισχύος, αυτό συνέβη γιατί η άεργος συνιστώσα του φορτίου που τροφοδοτείται από αυτούς είναι αρνητική προφανώς λόγω υπεραντιστάθμισης. Παρατηρείται ότι ο αριθμός των ζυγών είναι και πάλι μεγάλος (συνολικά 72 ζυγοί), γεγονός που σε συνδυασμό με την ανάγκη για τηλεμετάδοση μετρήσεων τάσης και εντολών αποκοπής καθιστά αναγκαία την επένδυση σε υλικοτεχνικό εξοπλισμό. Ωστόσο, το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι οι πιο αποδοτικές περιοχές δεν αποτελούν κατά ανάγκη και αυτές που προκαλούν το πρόβλημα αστάθειας.

Πίν. 6.14 Απορριπτόμενο φορτίο ανά περιοχή

ΠΕΡΙΟΧΗ	ΑΠΟΚΟΠΗ MW	ΑΠΟΚΟΠΗ MVar
Αττική	131,12	44,23
Πελοπόννησος	22,96	9,43
Στερεά Ελλάδα	13,43	6,57
ΣΥΝΟΛΟ	167,5	60,22



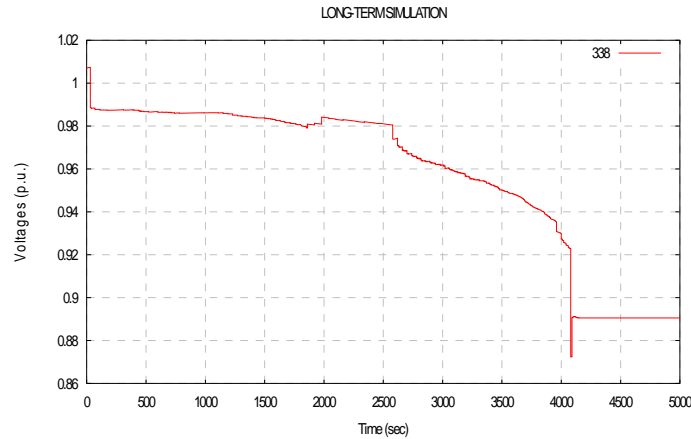
Πίν. 6.15 Απορριπτόμενο φορτίο ανά υποσταθμό

ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΣ	ΑΠΟΚΟΠΗ		ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΣ	ΑΠΟΚΟΠΗ	
	MW	MVar		MW	MVar
Αγ. Στέφανος	8,04	2,929	Ν. Ιωνία	7,191	1,368
Αιγάλεω	10,034	3,355	Ν. Σμύρνη	14,182	3,455
Άμφισσα	0,486	0,225	Ν. Χαλκηδόνα	4,884	0,918
Άργος-Ι	2,522	1,344	Οινόφυτα	1,3	0,745
Άργος-ΙΙ	1,243	0,746	Παγκράτι	16,359	6,34
Αριστείδου	1,011	0,288	Παλλήνη	3,483	0,169
Ασπρόπυργος	3,055	0,797	Πάτρα-Ι	1,064	0,451
Αχαρναί	2,861	1,26	Πάτρα-ΙΙΙ	2,674	1,17
Βάρη	3,804	0,906	Πειραιάς	7,478	2,146
ΒΖ Πάτρας	1,992	1,045	Πύργος	3,211	0,782
Ελευθερία	10,196	5,924	Ρουφ	6,24	1,315
Ελευσίνα	3,835	3,077	Σαλαμίνα	2,516	0
Ελληνικό	1,905	0,411	Σπάρτη-ΙΙ	2,526	1,29
Θήβα	3,972	1,518	Σπάτα	2,822	0,546
Καλαμάτα	2,906	1,68	Σχηματάρι	1,689	0,682
Καλλιθέα	1,827	1,435	Χαλκίδα-Ι	3,115	1,337
Κόρινθος	3,685	1,138	Χαλκίδα-ΙΙ	2,866	2,067
Κυπαρισσία	1,141	0	Ψυχικό	16,859	7,814
Μαρκόπουλο	2,538	0,094	ΣΥΝΟΛΟ	167,5	60,22

Πίν. 6.16 Απορριπτόμενο φορτίο ανά ζυγό

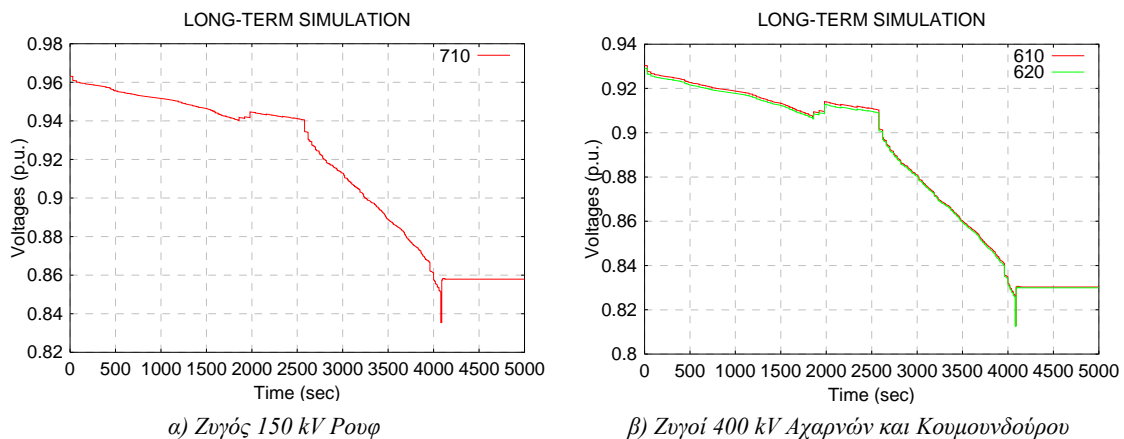
ΖΥΓΟΣ	ΑΠΟΚΟΠΗ		ΖΥΓΟΣ	ΑΠΟΚΟΠΗ	
	MW	MVar		MW	MVar
Αγ. Στέφανος 31	4,361	2,099	Ν. Σμύρνη 31	4,537	1,009
Αγ. Στέφανος 51	1,877	0,494	Ν. Σμύρνη 32	4,625	1,004
Αγ. Στέφανος 52	1,802	0,336	Ν. Σμύρνη 34	5,020	1,442
Αιγάλεω 31	7,077	2,445	Ν. Χαλκηδόνα 51	1,685	0
Αιγάλεω 32	2,957	0,910	Ν. Χαλκηδόνα 52	1,736	0,427
Άμφισσα 51	0,486	0,225	Ν. Χαλκηδόνα 53	1,463	0,555
Άργος-Ι 51	1,261	0,672	Οινόφυτα 51	1,300	0,745
Άργος-Ι 52	1,261	0,672	Παγκράτι 31	6,795	1,949
Άργος-ΙΙ 52	1,243	0,746	Παγκράτι 32	9,564	4,391
Αριστείδου 31	1,011	0,288	Παλλήνη 51	1,870	0,166
Ασπρόπυργος 51	1,588	0,536	Παλλήνη 52	1,613	0,003
Ασπρόπυργος 52	1,467	0,261	Πάτρα-Ι 51	1,064	0,451
Αχαρναί 51	1,171	0,532	Πάτρα-ΙΙΙ 51	1,334	0,585
Αχαρναί 52	1,690	0,728	Πάτρα-ΙΙΙ 52	1,340	0,585
ΒΖ Πάτρας 52	1,992	1,045	Πειραιάς 31	7,478	2,146
Βάρη 51	1,902	0,453	Πύργος 51	1,558	0,843
Βάρη 52	1,902	0,453	Πύργος 52	1,653	0
Ελευθερία 31	3,212	1,964	Ρουφ 51	1,890	0,690
Ελευθερία 32	4,926	2,461	Ρουφ 52	1,351	0,292
Ελευθερία 33	2,058	1,499	Ρουφ 53	1,917	0,055
Ελευσίνα 51	1,835	1,503	Ρουφ 54	1,082	0,278
Ελευσίνα 52	2,000	1,574	Σαλαμίνα 51	1,436	0
Ελληνικό 31	1,905	0,411	Σαλαμίνα 52	1,080	0
Θήβα 51	1,387	0,795	Σπάρτη-ΙΙ 51	1,263	0,645
Θήβα 52	1,450	0,423	Σπάρτη-ΙΙ 52	1,263	0,645
Θήβα 53	1,135	0,300	Σπάτα 51	1,101	0,122
Καλαμάτα 51	1,429	0,932	Σπάτα 53	1,721	0,424
Καλαμάτα 52	1,477	0,748	Σχηματάρι 52	1,689	0,682
Καλλιθέα 32	1,827	1,435	Χαλκίδα-Ι 51	1,549	0,595
Κόρινθος 51	1,822	0,181	Χαλκίδα-Ι 52	1,566	0,742
Κόρινθος 52	1,863	0,957	Χαλκίδα-ΙΙ 51	1,567	1,230
Κυπαρισσία 51	1,141	0	Χαλκίδα-ΙΙ 52	1,299	0,837
Μαρκόπουλο 52	1,350	0,070	Ψυχικό 31	4,271	2,065
Μαρκόπουλο 53	1,188	0,024	Ψυχικό 32	6,713	2,516
Ν. Ιωνία 31	5,595	0,952	Ψυχικό 33	4,210	2,338
Ν. Ιωνία 32	1,596	0,416	Ψυχικό 34	1,665	0,895
			ΣΥΝΟΛΟ	167,5	60,22

Στο Σχ. 6.17 παρουσιάζεται η τάση του τερματικού ζυγού της μονάδας Αλιβέρι 4. Η τάση πέφτει κάτω από τη ρύθμιση του ηλεκτρονόμου υποτάσεως της γεννήτριας (88% της ονομαστικής τάσης) τη χρονική στιγμή $t = 4090$ s, όμως ταυτόχρονα δίδεται εντολή αποκοπής φορτίου, με αποτέλεσμα η γεννήτρια να παραμείνει στο δίκτυο.



Σχ. 6.17 Τάσεις τερματικού ζυγού μονάδας Αλιβέρι 4

Στο Σχ. 6.18 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ορισμένων χαρακτηριστικών τάσεων, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση. Στο Σχ. 6.18α εμφανίζεται η τάση του κρίσιμου ζυγού 150 kV Ρουφ 31, ενώ στο Σχ. 6.18β οι τάσεις στους ζυγούς 400 kV των ΚΥΤ Αχαρνών (610) και Κουμουνδούρου (620). Επειδή η αποκοπή του φορτίου γίνεται σε τρία διαδοχικά βήματα, η συνολική καθυστέρηση για την εφαρμογή των επαναλήψεων είναι ίση με 6 s ($2s+2s+2s$). Όμως το βήμα Δt της προσομοίωσης είναι ίσο με 10 s, με αποτέλεσμα στα σχήματα οι αποκοπές αυτές να εμφανίζονται ότι γίνονται ταυτόχρονα. Σημειώνεται ότι σε κανέναν ζυγό του συστήματος δεν παρατηρήθηκε υπέρταση ως συνέπεια των αποκοπών του φορτίου.



α) Ζυγός 150 kV Ρουφ

β) Ζυγοί 400 kV Αχαρνών και Κουμουνδούρου

Σχ. 6.18 Τάσεις κρίσιμων ζυγών

6.5 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Στην ενότητα αυτή περιγράφηκαν σχήματα αποκοπής φορτίου για την αποτροπή της σβέσης του συστήματος κατά το περιστατικό της αστάθειας στις 12 Ιουλίου 2004. Σκοπός των σχημάτων αυτών δεν είναι η αποκατάσταση των τάσεων στο αρχικό επίπεδο, αλλά η αναχαίτιση του φαινομένου αστάθειας τάσης για τη διατήρηση του συστήματος σε λειτουργία. Εξασφαλίζοντας τη λειτουργία του συστήματος, υπάρχει στη συνέχεια ο διαθέσιμος χρόνος για την αποκατάσταση των τάσεων με άλλα μέτρα ελέγχου, όπως για παράδειγμα με ένταξη μονάδων παραγωγής.

Το τοπικό, αποκεντρωμένο σχήμα αποκοπής φορτίου κλειστού βρόχου πραγματοποιείται τις αποκοπές σε ποσοστό 5% επί της αρχικής ζήτησης, από τους ζυγούς των πλέον θιγόμενων περιοχών του συστήματος που παραβιάζουν τη ρύθμιση υποτάσεως του ηλεκτρονόμου στον υποσταθμό. Το σχήμα εξασφαλίζει τη λειτουργία του συστήματος με σχετικά μικρή ποσότητα απορριπτόμενου φορτίου (Πίν. 6.17), όμως ακόμα και μετά την αποκοπή φορτίου οι τάσεις του συστήματος παραμένουν χαμηλές. Το σχήμα προϋποθέτει την εγκατάσταση του αναγκαίου υλικοτεχνικού εξοπλισμού σε κάθε διαθέσιμο υποσταθμό των περιοχών αυτών και κατά συνέπεια παρουσιάζει ένα σχετικά υψηλό κόστος υλοποίησης, παρά το γεγονός ότι τελικά οι αποκοπές εφαρμόζονται σε έναν μικρό αριθμό ζυγών.

Το πρώτο κεντρικό σχήμα αποκοπής φορτίου ευρείας περιοχής που εξετάστηκε εφαρμόζει σε ένα βήμα, ακολουθώντας δηλαδή λογική ανοιχτού βρόχου, την απόρριψη ολόκληρης (100%) της ζήτησης των πιο αποδοτικών ζυγών στις ευάλωτες περιοχές μέχρι ικανοποίησης του επιθυμητού επιπέδου τάσης στο σύστημα μεταφοράς των 400 kV. Επειδή αποκόπτεται το συνολικό φορτίο των πιο αποδοτικών ζυγών, το σύνολο των ζυγών και υποσταθμών αντίστοιχα που συμμετέχουν είναι προφανώς το μικρότερο δυνατό (Πίν. 6.17), όμως με τον τρόπο αυτό σβήνουν συγκεντρωμένα μεγάλες περιοχές του συστήματος, ακόμα και ολόκληρες πόλεις.

Για να μη συμβεί η σβέση τόσο συγκεντρωμένων φορτίων, εξετάστηκε ένα δεύτερο σχήμα αποκοπής φορτίου ανοιχτού βρόχου, το οποίο προχωρά στην απόρριψη αντί της συνολικής, ενός μόνο ποσοστού (20%) της ζήτησης των πιο αποδοτικών φορτίων στις ευάλωτες περιοχές για την ικανοποίηση του επιθυμητού επιπέδου τάσης στο σύστημα μεταφοράς των 400 kV. Πράγματι με την επιλογή αυτή επιτεύχθη η ελαχιστοποίηση της αναγκαίας αποκοπής φορτίου για την αποτροπή του διαχωρισμού του συστήματος (Πίν. 6.17), με τη συμμετοχή μάλιστα ενός μικρού σχετικά αριθμού ζυγών και υποσταθμών αντίστοιχα.

Προκειμένου να περιοριστεί ο κοινωνικός αντίκτυπος που έχει η διακοπή της ηλεκτροδότησης σε ένα μεγάλο αριθμό καταναλωτών της ίδιας γεωγραφικής περιοχής (π.χ. μίας πόλης), είναι ίσως επιθυμητή η διασπορά των αποκοπών σε ένα μεγαλύτερο γεωγραφικό εύρος. Επειδή σε αυτή την περίπτωση το πλήθος των ζυγών στους οποίους θα εφαρμοστεί η αποκοπή είναι αρκετά μεγαλύτερο, το ποσοστό αποκοπής μειώνεται σημαντικά, συμβάλλοντας έμμεσα στον περιορισμό της κοινωνικής αντίδρασης από τους τοπικούς φορείς. Το κεντρικό σχήμα κλειστού βρόχου που σχεδιάστηκε με βάση την παραπάνω φιλοσοφία εφαρμόζει την αποκοπή του πρακτικά ελάχιστου (5%) ποσοστού αποκοπής από ένα σύνολο προκαθορισμένων ζυγών. Όπως φαίνεται στον Πίν. 6.17, η ποσότητα του απορριπτόμενου φορτίου σχεδόν διπλασιάζεται από την ελάχιστη αναγκαία, ενώ το πλήθος των ζυγών και των υποσταθμών αντίστοιχα αυξάνεται πολύ περισσότερο σε σχέση με τα σχήματα ανοιχτού βρόχου.

Ένα άλλο κεντρικό σχήμα αποκοπής φορτίου κλειστού βρόχου που βασίζεται στην πληροφορία της αποδοτικότητας κάθε θιγόμενης περιοχής ως προς την αποκοπή φορτίου από αυτήν (η οποία όπως είδαμε στη προηγούμενη ενότητα προσδιορίζεται με τον υπολογισμό της ευαισθησίας ϵ_k), προσπαθεί να εξισορροπήσει μεταξύ μιας ικανοποιητικής διασποράς της αποκοπής στις περιοχές αυτές και της μείωσης της συνολικής ζήτησης που πρέπει τελικά να αποκοπεί. Όπως φαίνεται στον Πίν. 6.17, πράγματι τόσο η αναγκαία ποσότητα αποκοπής όσο και ο αριθμός των ζυγών που συμμετέχουν μειώθηκαν με την εφαρμογή αυτού του σχήματος.

Πίν. 6.17 Σύγκριση σχημάτων αποκοπής φορτίου

ΣΧΗΜΑ	Αποκοπή MW	Αποκοπή MVar	Αριθμός ζυγών	Αριθμός υποσταθμών
Αποκεντρωμένο κλειστού βρόχου (5%)	125,24	41,95	13	8
Κεντρικό ανοιχτού βρόχου (100%)	99,82	70,55	4	3
Κεντρικό ανοιχτού βρόχου (20%)	98,74	55,08	19	12
Κεντρικό κλειστού βρόχου (5%)	193,27	69,29	88	48
Κεντρικό κλειστού βρόχου (5% βάσει ϵ_k)	167,5	60,22	72	37

7ο Κεφάλαιο

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑ ΤΟ 2004

7.1 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ ΤΟ ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ ΤΟΥ 2004

Η καθυστερημένη ολοκλήρωση ορισμένων από τα έργα ενίσχυσης του Ελληνικού συστήματος που είχαν προγραμματιστεί για το καλοκαίρι του 2004, έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην πρόκληση της κατάρρευσης του νοτίου τμήματός του στις 12 Ιουλίου 2004. Τα σημαντικότερα από τα προγραμματισμένα έργα που θα μπορούσαν να αποτρέψουν την αστάθεια τάσης περιλαμβάνουν την παράδοση του υποσταθμού 150 kV της Αργυρούπολης και της γραμμής μεταφοράς 150 kV για τη σύνδεση του υποσταθμού με το Λαύριο, καθώς και την παράδοση των αυτομετασχηματιστών στα ΚΥΤ Αγ. Στεφάνου, Παλλήνης και Διστόμου. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα περισσότερα από τα έργα αυτά ολοκληρώθηκαν λίγο μετά το περιστατικό της σβέσης.

Η ενίσχυση του συστήματος το καλοκαίρι του 2004 συνέβαλλε, ώστε το σύστημα να μην αντιμετωπίζει πρόβλημα ασφάλειας τάσης στο ενδεχόμενο εμφάνισης διαταραχών της ίδιας σοβαρότητας με αυτές που προκάλεσαν το περιστατικό της 12^{ης} Ιουλίου [CKV05].

Πέρα από την παραπάνω ενίσχυση, ακολούθησε μια σειρά από νέα έργα με σκοπό την περαιτέρω αύξηση της ικανότητας μεταφοράς του συστήματος. Τα σημαντικότερα έργα που υλοποιήθηκαν μετά το καλοκαίρι του 2004 είναι τα εξής:

- Εγκατάσταση νέων συστοιχιών πυκνωτών 20 kV και 150 kV στην Πελοπόννησο, την Αττική και τη Στερεά Ελλάδα.
- Κατασκευή υποσταθμού 150/20 kV στην Πελοπόννησο και την Αττική.
- Κατασκευή των ιδιωτικών σταθμών παραγωγής ΗΡΩΝ στη Θήβα και ΕΝΘΕΣ στη Θεσσαλονίκη, ονομαστικής ισχύος 150 MW και 415 MW αντίστοιχα, και της μονάδας 5 στον ΑΗΣ Λαυρίου, ιδιοκτησίας ΔΕΗ.

Λόγω και των νέων έργων, το σύστημα ενισχύθηκε σε σημαντικό βαθμό και δεν αντιμετώπισε ξανά ως τώρα προβλήματα χαμηλών τάσεων. Το γεγονός αυτό διαπιστώθηκε στην πράξη από την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος καθόλη τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος μετά το καλοκαίρι του 2004 και ιδιαίτερα κατά τις ημέρες αιχμής φορτίου [CKN06,CKV06].

Οι εκτιμήσεις ασφάλειας τάσης του Ελληνικού συστήματος που πραγματοποιήθηκαν στο ίδιο χρονικό διάστημα επιβεβαίωσαν την ασφαλή κατάσταση του συστήματος, όμως υπέδειξαν ότι υπάρχει κίνδυνος αστάθειας για έναν περιορισμένο αριθμό πιθανών διαταραχών. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης ασφάλειας τάσης, που πραγματοποιήθηκε από την εφαρμογή On-line VSA στο κέντρο ελέγχου του ΔΕΣΜΗΕ για χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της κατάστασης του Ελληνικού συστήματος σε αυτό το χρονικό διάστημα (έτη 2005-2006), παρουσιάζονται παρακάτω.

Παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα της εκτίμησης ασφάλειας τάσης του Ελληνικού συστήματος για την αναμενόμενη αιχμή το καλοκαίρι του 2007. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα στιγμιότυπα, τα οποία καταγράφηκαν από το εκτιμητή κατάστασης του κέντρου ελέγχου και αποτυπώνουν την πραγματική κατάσταση του συστήματος τις δεδομένες χρονικές στιγμές, η εκτίμηση αυτή βασίζεται σε ένα κατασκευασμένο στιγμιότυπο του συστήματος που εκτιμάται ότι είναι πιθανό να εμφανιστεί το καλοκαίρι του 2007.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι οι ασθενέστερες περιοχές του συστήματος είναι η Αττική και η Πελοπόννησος και κατά συνέπεια υπάρχει ο κίνδυνος εμφάνισης αστάθειας τάσης με επίκεντρο τις περιοχές αυτές.

7.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

7.2.1 Αιχμή Φορτίου 2005

Στις 3 Αυγούστου 2005 και ώρα 13:55 το συνολικό φορτίο του συστήματος (συμπεριλαμβάνοντας τα βοηθητικά των μονάδων παραγωγής, αλλά όχι τις απώλειες) ανήλθε στην τιμή των 9800 MW, αποτελώντας την αιχμή του φορτίου για το έτος 2005. Το σύστημα ανταπεξήλθε επιτυχώς όσον αφορά την ασφάλεια τάσης την ημέρα αυτή, όπως και τις άλλες ημέρες του καλοκαιριού που το φορτίο ξεπέρασε τα 9000 MW.

Στον Πίν. 7.1 [Vou05a] φαίνονται τα περιθώρια ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος, όπως υπολογίστηκαν από την εφαρμογή On-line VSA για το προαναφερόμενο στιγμιότυπο. Διαταραχές (N-1 ή N-2) που εμπλέκουν μονάδες της Αττικής απουσιάζουν από τον πίνακα και αυτό δείχνει τη σημαντική ενίσχυση του δικτύου της Αττικής όσον αφορά την ασφάλεια τάσης. Οι περισσότερες διαταραχές με μηδενικό ή μικρό περιθώριο ασφάλειας αναφέρονται σε τοπικές διαταραχές που θα προκαλούσαν την εμφάνιση χαμηλών τάσεων στην Κέρκυρα, στην Αργολίδα, στη Ζάκυνθο, στη Χαλκιδική και στη Θήβα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έχουν ήδη ολοκληρωθεί ή είναι σε εξέλιξη έργα ενίσχυσης των τοπικών δικτύων.

Η απώλεια των τριών μονάδων του συνδυασμένου κύκλου στο ΘΗΣ Κομοτηνής (διαταραχή υπ.αρ. 129) θα προκαλούσε την εμφάνιση χαμηλών τάσεων σε μέρος της Ανατολικής Μακεδονίας και τη Θράκη. Δεδομένου όμως ότι η διαταραχή εμφάνισε μηδενικό περιθώριο ασφάλειας μόνο στο μέγιστο φορτίο και ότι το σύστημα στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη ενισχύεται σημαντικά με την ολοκλήρωση των έργων μεταφοράς 400 kV για τη διασύνδεση με την Τουρκία, τα προβλήματα ασφάλειας τάσεων στην περιοχή αναμένεται σύντομα να εξαλειφθούν.

Πίν. 7.1 Περιθώρια ασφαλούς λειτουργίας 3ης Αυγούστου 2005

ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ		ΠΕΡΙΘΩΡΙΟ (MW)
Υπ. αρ.	Ονομασία	
175	LINE_CON_ΑΡΓ2-ΑΡΓ1.1	0
209	LINE_CON_ΗΓΟΥΜ-ΙΩΑΝ1.1	0
143	GEN_CON_ΜΕΓΑΛΟ1.GEN3-ΜΕΓΑΛΟ2.GEN4.UN	0
193	LINE_CON_BZ.ΠΡΕ-KΑΝΑΛ.1	0
322	LINE_CON_ΚΥΛ-ZΑΚΥΝ.1	0
129	GEN_CON_ΘΗΣ_ΚΟΜΟ.GFIC.UN	0
358	LINE_CON_ΜΟΥΡΤ-ΜΕΣΟΓ.1	0
290	LINE_CON_ΚΘΕΣ-ΣΧΟΛΑΡ.1	0
329	LINE_CON_ΚΕΡΚ1-ΗΓΟΥΜΕ.1	29
192	LINE_CON_BZ.ΠΡΕ-ΑΡΑΧ.1	116
325	LINE_CON_ΙΩΑΝΝ2-ΑΩΟΣ.1	145
405	LINE_CON_ΣΧΗΜ-ΘΗΒΑ.1	213
365	LINE_CON_ΜΕΓΑ1-ΚΑΛΑ/1.1	271
323	LINE_CON_ΙΩΑΝ1-ΛΟΥΡΟΣ.1	358
141	GEN_CON_ΜΕΓΑΛΟ1.GEN1-ΜΕΓΑΛΟ2.GEN4.UN	435

Η πιο επικίνδυνη διαταραχή του Πίν. 7.1 είναι η απώλεια των μονάδων 3 και 4 του ΑΗΣ Μεγαλόπολης (υπ.αρ. 143), που μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση τάσης στην Πελοπόννησο και σε προβλήματα χαμηλών τάσεων στην Αττική. Η διπλή αυτή διαταραχή δεν είναι πιθανή από κοινή αιτία, δεδομένου ότι οι μονάδες 3 και 4 της Μεγαλόπολης συνδέονται σε διαφορετικούς ζυγούς. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής διαθεσιμότητάς τους είναι πιθανό η μία να βρίσκεται εκτός λειτουργίας οπότε μία απλή διαταραχή θα έχει το αντίστοιχο αποτέλεσμα. Γενικά, η Πελοπόννησος λόγω και της μη σύνδεσής της στα 400 kV αποτελεί την ασθενέστερη περιοχή του διασυνδεδεμένου συστήματος από πλευράς ασφάλειας τάσης για τα επόμενα έτη. Τα προβλεπόμενα έργα ενίσχυσης του δικτύου στην περιοχή (εγκατάσταση πυκνωτών, γραμμή 400 kV, ΚΥΤ Πατρών και Κορίνθου) αναμένεται να βελτιώσουν την κατάσταση.

7.2.2 Αιχμή Φορτίου 2006

Στις 13:38 της 21^{ης} Αυγούστου 2006 το συνολικό φορτίο του συστήματος (συμπεριλαμβάνοντας τα βοηθητικά των μονάδων παραγωγής, αλλά όχι τις απώλειες) ανήλθε στην τιμή των 10140 MW, συνιστώντας το ιστορικό μέγιστο φορτίο για το Ελληνικό σύστημα. Το σύστημα ανταποκρίθηκε ξανά χωρίς κανένα πρόβλημα, όμως εκτιμήσεις της ασφάλειας τάσης έδειξαν ότι υπάρχει εκ νέου κίνδυνος κατάρρευσης στο ενδεχόμενο της διαδοχικής απώλειας των μονάδων 3 και 4 της Μεγαλόπολης. Τα περιθώρια ασφάλειας, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή On-line VSA για το στιγμιότυπο της αιχμής φορτίου για το 2006, παρουσιάζονται στον Πίν. 7.2 [Vou06].

Όπως φαίνεται, η διπλή διαταραχή της απώλειας των μονάδων 3 και 4 της Μεγαλόπολης (υπ.αρ. 142) εμφάνισε μηδενικό περιθώριο ασφάλειας. Αυτό συνέβη παρά την ολοκλήρωση ορισμένων έργων ενίσχυσης του συστήματος στην περιοχή της Πελοποννήσου κατά τους προηγούμενους μήνες, που είχαν θετική επίδραση στην ασφάλεια τάσης του συστήματος. Τα σημαντικότερα από τα έργα αυτά περιλαμβάνουν την εγκατάσταση νέων συστοιχιών πυκνωτών 20/150 kV στην περιοχή και την ένταξη μονάδας ηλεκτροπαραγωγών ζευγών 60 MW στο σταθμό της Μεγαλόπολης.

Οι άλλες διαταραχές (N-1) που εμφάνισαν μηδενικό ή πολύ μικρό περιθώριο ασφάλειας αντιστοιχούν σε τοπικά προβλήματα χαμηλών τάσεων και δεν αποτελούν κίνδυνο για την ευστάθεια του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι και πάλι δεν υπήρξαν διαταραχές στην Αττική που δημιουργούν πρόβλημα ασφάλειας τάσης και αυτό οφείλεται στη σημαντική ενίσχυση του δικτύου της Αττικής που πραγματοποιήθηκε μετά το περιστατικό της σβέσης το καλοκαίρι του 2004 (βλέπε ενότητα 7.1).

Πίν. 7.2 Περιθώρια ασφαλούς λειτουργίας 21ης Αυγούστου 2006

ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ		ΠΕΡΙΘΩΡΙΟ (MW)
Υπ. αρ.	Ονομασία	
361	LINE_CON_ΜΕΓΑ1-ΚΑΛΑ/1.1	0
318	LINE_CON_ΚΥΛ-ZAKYN.1	0
176	LINE_CON_ΑΡΓ2-ΑΡΓ1.1	0
142	GEN_CON_ΜΕΓΑΛΟ1.GEN3-ΜΕΓΑΛΟ2.GEN4.UN	0
49	DLINE_CON_ΠΑΤ1-ΠΑΤ2	19
399	LINE_CON_ΣΧΗΜ-ΘΗΒΑ.1	113
161	LINE_CON_ΑΓΡΑΣ-ΣΚΥΔΡΑ.1	188
232	LINE_CON_ΠΤΟΛ-KOZ.1	244
141	GEN_CON_ΜΕΓΑΛΟ1.GEN2-ΜΕΓΑΛΟ1.GEN3.UN	413
139	GEN_CON_ΜΕΓΑΛΟ1.GEN1-ΜΕΓΑΛΟ2.GEN4.UN	488
4	AUTOTR_CON_ΚΑΡΔΙΑ.TX3.H3	525
143	GEN_CON_ΜΕΓΑΛΟ2.GEN4-ΑΗΣΑΓ.GEN9.UN	563

7.2.3 Στιγμιότυπο Σεπτεμβρίου 2006

Παρά τη συνεχιζόμενη ενίσχυση του συστήματος, ο κίνδυνος εμφάνισης αστάθειας τάσης με επίκεντρο την Πελοπόννησο εξακολουθεί να εμφανίζεται μέχρι και σήμερα. Στον Πίν. 7.3 [You06] παρουσιάζονται τα περιθώρια ασφάλειας τάσης, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή On-line VSA για το στιγμιότυπο των 11:35 της 18^{ης} Σεπτεμβρίου 2006.

Πίν. 7.3 Περιθώρια ασφαλούς λειτουργίας 18ης Σεπτεμβρίου 2006

ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ		ΠΕΡΙΘΩΡΙΟ (MW)
Υπ. αρ.	Ονομασία	
332	LINE_CON_ΜΟΥΡΤ-ΜΕΣΟΓ.1	0
265	LINE_CON_ΚΘΕΣ-ΣΧΟΛΑΡ.1	0
51	DLINE_CON_ΚΑΛΩΔ_ΠΕΛΟ-ΗΠΕΙ	0
131	GEN_CON_ΜΕΓΑΛΟ_1.GEN3.UN	0
70	DLINE_CON_ΜΕΓΑ1-ΜΕΓΑ2	84
296	LINE_CON_ΚΥΛ-ΖΑΚΥΝ.1	309
71	DLINE_CON_ΜΕΓΑ2-ΠΥΡΓ	309
49	DLINE_CON_ΠΑΤ1-ΠΑΤ2	347
339	LINE_CON_ΜΕΓΑ1-ΚΑΛΑ/1.1	394

Παρατηρείται ότι παρά το χαμηλό φορτίο του συστήματος (7150 MW, συνυπολογίζοντας τα βοηθητικά των μονάδων παραγωγής, αλλά όχι τις απώλειες) εμφανίστηκε μηδενικό περιθώριο ασφάλειας για απλή διαταραχή, αυτή της απώλειας της μονάδας Μεγαλόπολη 3 (υπ.αρ. 131). Το γεγονός αυτό οφείλεται εν μέρει στο ότι την ημέρα αυτή οι μονάδες 2, 4 και 5 (μονάδα ηλεκτροπαραγωγών ζευγών ονομαστικής ισχύος 60 MW) του ΑΗΣ Μεγαλόπολης και η γραμμή μεταφοράς 150 kV Βέλο - Ξυλόκαστρο βρίσκονταν εκτός λειτουργίας για λόγους συντήρησης.

Αυτό που προκύπτει ως συμπέρασμα είναι ότι ανάλογα με την κατάσταση του συστήματος (τοπολογία, φορτίο κλπ.) και εφόσον λείπει μία μονάδα 300 MW από τη Μεγαλόπολη, υπάρχει ο κίνδυνος κατάρρευσης των τάσεων ακόμα και στο ενδεχόμενο μίας απλής (N-1) διαταραχής στην Πελοπόννησο. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να προβλεφθεί η αντιμετώπιση της κατάρρευσης μέσω αποκοπών φορτίου, όπως θα δούμε στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου.

Οι άλλες διαταραχές με μηδενικό ή πολύ μικρό περιθώριο ασφάλειας του Πίν. 7.3 αντιστοιχούν σε τοπικά προβλήματα χαμηλών τάσεων και δεν αποτελούν κίνδυνο για την ευστάθεια του συστήματος, με την εξαίρεση της διαταραχής υπ. αρ. 51, η οποία προκαλεί τη νησιδοποίηση του συστήματος.

7.2.4 Προβλεπόμενο Στιγμιότυπο για το Καλοκαίρι του 2007

Η εκτίμηση της ασφάλειας τάσης του Ελληνικού συστήματος για το καλοκαίρι του 2007 γίνεται με βάση ένα στιγμιότυπο, το οποίο κατασκευάστηκε τεχνητά για να αντικατοπτρίσει τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος που αναμένονται για μία κρίσιμη ημέρα του καλοκαιριού. Επειδή εκτιμήθηκε ότι πρέπει να εξεταστούν περισσότερο δυσμενείς συνθήκες από την πρόβλεψη απλώς της αύξησης του φορτίου, το στιγμιότυπο αυτό σχεδιάστηκε υποθέτοντας (εκτός της μεγαλύτερης αιχμής φορτίου) τη μείωση του συντελεστή ισχύος των φορτίων και τη μη διαθεσιμότητα μίας κρίσιμης μονάδας στο νότιο σύστημα.

Το στιγμιότυπο που κατασκευάστηκε ακολουθώντας την παραπάνω φιλοσοφία αντιστοιχεί σε συνολικό φορτίο 10340 MW (200 MW περισσότερα από την αιχμή του 2006), συμπεριλαμβανομένων των βοηθητικών των μονάδων παραγωγής αλλά όχι τις απώλειες, χαμηλό συντελεστή ισχύος των φορτίων και τη μονάδα Μεγαλόπολη 3 εκτός λειτουργίας. Τα περιθώρια ασφάλειας για το στιγμιότυπο αυτό, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή On-line VSA, παρουσιάζονται στον Πίν. 7.4 [You06].

Οι διαταραχές για τις οποίες το σύστημα παρουσίασε μηδενικό περιθώριο ασφάλειας, είναι οι απλές (υπ.αρ. 152) και διπλές (υπ.αρ. 122, 149, 145, 146) διαταραχές που εμπλέκουν μονάδες της Μεγαλόπολης, η διπλή απώλεια των μονάδων 4 και 5 του ΑΗΣ Λαυρίου (υπ.αρ. 137) και η απώλεια του καλωδίου Πελοποννήσου-Ηπείρου (υπ. αρ. 52).

Η απλή διαταραχή της απώλειας της μονάδας Μεγαλόπολη 4 (υπ.αρ. 152) είναι εξαιρετικά κρίσιμη για την πρόκληση κατάρρευσης τάσης στην Πελοπόννησο και την πιθανή εξάπλωση της αστάθειας σε όλες τις περιοχές του νοτίου συστήματος.

Οι διπλές διαταραχές υπ.αρ. 122, 149 και 145 που αναφέρονται στην ταυτόχρονη απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη 4 και της μονάδας Λαύριο 2 ή Αγ. Γεώργιος 9 ή Μεγαλόπολη 1 αντίστοιχα, δεν έχουν κοινή αιτία εμφάνισης και θεωρούνται μη πιθανές. Το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση της διπλής απώλειας των μονάδων 1 και 2 της Μεγαλόπολης (διαταραχή υπ.αρ. 146) με τη διαφορά ότι αυτές συνδέονται σε κοινό ζυγό.

Πίν. 7.4 Περιθώρια ασφαλούς λειτουργίας της προβλεπόμενης κατάστασης για το καλοκαίρι του 2007

ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ		ΠΕΡΙΘΩΡΙΟ (MW)
Υπ. αρ.	Όνομασία	
122	GEN_CON_ΛΑΥΡΙΟ.GEN2-ΜΕΓΑΛΟ2.GEN4.UN	0
149	GEN_CON_ΜΕΓΑΛΟ2.GEN4-ΑΗΣΑΓ.GEN9.UN	0
152	GEN_CON_ΜΕΓΑΛΟ_2.GEN4.UN	0
145	GEN_CON_ΜΕΓΑΛΟ1.GEN1-ΜΕΓΑΛΟ2.GEN4.UN	0
52	DLINE_CON_ΚΑΛΩΔ_ΠΕΛΟ-ΗΠΕΙ	0
137	GEN_CON_K_ΛΑΥΡΙΟ.ΣΚ5.GFIC.UN	0
146	GEN_CON_ΜΕΓΑΛΟ1.GEN1.GEN2.UN	0
95	GEN_CON_ΗΡΩΝ-K_ΛΑΥΡΙΟ.GFIC.UN	55
182	LINE_CON_ΑΡΓ2-ΑΡΓ1.1	70
144	GEN_CON_ΜΕΓΑΛΟ1.GEN1-ΑΗΣΑΓ.GEN9.UN	117
81	GEN_CON_ΑΗΣΑΓ.GEN8-ΑΗΣΑΓ.GEN9.UN	117

Η διπλή διαταραχή στο Λαύριο (υπ.αρ. 137) έχει κοινή αιτία εμφάνισης, την απώλεια της γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος Λαυρίου - Παλλήνης, η οποία θα προκαλέσει την ταυτόχρονη απώλεια των μονάδων 4 και 5 του ΑΗΣ Λαυρίου. Η διαταραχή αυτή προκαλεί συνολική απώλεια παραγωγής 955 MW και είναι εξαιρετικά κρίσιμη ως προς το ενδεχόμενο κατάρρευσης του συστήματος.

Η απώλεια του καλωδίου Πελοποννήσου-Ηπείρου (υπ.αρ. 52) προκαλεί νησιδοποίηση και τοπικά προβλήματα χαμηλών τάσεων.

Από την ανάλυση λοιπόν των αποτελεσμάτων της εκτίμησης ασφάλειας τάσης για το προβλεπόμενο στιγμιότυπο του θέρους του 2007 προκύπτει ότι η ασθενέστερη περιοχή του συστήματος είναι η Πελοπόννησος, ενώ επανεμφανίζονται προβλήματα αστάθειας τάσης στην Αττική. Η πιο δυσμενής για το σύστημα διαταραχή της Πελοποννήσου είναι η διαδοχική απώλεια των μονάδων 3 και 4 της Μεγαλόπολης και κατά συνέπεια θεωρείται ως η πιο κρίσιμη διαταραχή στην περιοχή. Μετά την ένταξη στο σύστημα της μονάδας 5 του Λαυρίου υπάρχει σοβαρός κίνδυνος κατάρρευσης του συστήματος στο ενδεχόμενο της ταυτόχρονης απώλειας των μονάδων 4 και 5 του ΑΗΣ Λαυρίου. Κατά συνέπεια, η διαταραχή αυτή θεωρείται ως η πιο κρίσιμη στην περιοχή της Αττικής και για το λόγο αυτό χρειάζεται η λήψη μέτρων όπως θα δούμε στη συνέχεια του κεφαλαίου.

7.2.5 Συμπεράσματα

Η πλέον ασθενής περιοχή του συστήματος εξακολουθεί να είναι η Πελοπόννησος, η οποία ενδέχεται να παρουσιάσει πρόβλημα ασφάλειας τάσης για απλή διαταραχή, ακόμη και για φορτία χαμηλότερα των 8000 MW εάν υπάρχουν συγκεκριμένες μη διαθέσιμες μονάδες (μονάδα 300 MW της Μεγαλόπολης εκτός λειτουργίας και άνοιγμα γραμμής μεταφοράς για λόγους συντήρησης).

Η κρισιμότερη διαταραχή στην Πελοπόννησο είναι η διαδοχική απώλεια των μονάδων 3 και 4 της Μεγαλόπολης. Η διαταραχή αυτή δεν μπορεί να προκληθεί από κοινή αιτία και έτσι δεν είναι ιδιαίτερα πιθανή. Σε περίπτωση όμως που η μια από τις δυο παραπάνω μονάδες είναι εκτός λειτουργίας, θα πρέπει να υπάρχει σχέδιο αντιμετώπισης της απώλειας της άλλης μονάδας με αποκοπή φορτίου.

Η διπλή διαταραχή της απώλειας των μονάδων 4 και 5 του Λαυρίου δεν δημιουργεί πρόβλημα ασφάλειας τάσης για τα μέχρι στιγμής φορτία του συστήματος. Ωστόσο ο κίνδυνος αυτός είναι πιθανός για το καλοκαίρι του 2007. Επομένως, η διαταραχή αυτή είναι η κρισιμότερη για την ασφάλεια τάσης του συστήματος στο άμεσο μέλλον.

Η διπλή διαταραχή της απώλειας των μονάδων 4 και 5 του Λαυρίου έχει κοινή αιτία εμφάνισης και έτσι θα πρέπει να θεωρείται πιθανή. Για το σκοπό αυτό είναι αναγκαία η σχεδίαση ενός σχήματος προστασίας στην Αττική που θα αποκόπτει φορτίο στην εμφάνιση της διαταραχής.

7.3 ΣΧΗΜΑ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟ

7.3.1 Φιλοσοφία Σχεδίασης

Όπως είδαμε από την εκτίμηση της ασφάλειας τάσης του συστήματος για όλα τα εξεταζόμενα στιγμιότυπα της προηγούμενης ενότητας, η Πελοπόννησος αποτελεί την πιο ευάλωτη περιοχή για την εμφάνιση αστάθειας τάσης. Η κρισιμότερη διαταραχή από απόψεως επικινδυνότητας είναι, όπως προαναφέρθηκε, η διαδοχική απώλεια των μονάδων 3 και 4 της Μεγαλόπολης. Η διαταραχή αυτή δεν είναι ιδιαίτερα πιθανή, όμως εμφανίζει μηδενικό περιθώριο ασφάλειας τάσης του συστήματος σχεδόν σε όλα τα εξεταζόμενα στιγμιότυπα.

Κατά συνέπεια, η σχεδίαση του σχήματος αποκοπής φορτίου από την Πελοπόννησο θα πρέπει να γίνει για την αντιμετώπιση της απώλειας της μιας μονάδας, όταν η άλλη δεν είναι διαθέσιμη. Έτσι, ο μηχανισμός αποκοπής φορτίου πρέπει να τίθεται σε ετοιμότητα κάθε φορά που η εφαρμογή On-line VSA του κέντρου ελέγχου δίνει μηδενικά ή πολύ μικρά περιθώρια ασφάλειας τάσης για απλή διαταραχή (N-1) στη Μεγαλόπολη και να τίθεται σε εφαρμογή απορρίπτοντας φορτίο σε περίπτωση εμφάνισης της κρίσιμης διαταραχής (απώλεια παραγωγής μεγαλύτερη των 200 MW). Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η αποκοπή φορτίου από την Πελοπόννησο για κάθε πιθανή περίπτωση πρόκλησης αστάθειας τάσης στην περιοχή. Πρέπει να σημειωθεί ότι, με τα σημερινά δεδομένα, για να τεθεί σε ετοιμότητα ο μηχανισμός αποκοπής φορτίου πρέπει η μία μονάδα των 300 MW στη Μεγαλόπολη να είναι ήδη εκτός λειτουργίας.

Η σχεδίαση του σχήματος αποκοπής φορτίου από την Πελοπόννησο γίνεται με βάση τα εξής σημεία λειτουργίας του συστήματος:

- Το σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί στο στιγμιότυπο αιχμής φορτίου του συστήματος για το έτος 2005, που εφεξής θα ονομάζεται *Σενάριο Μείγστου 2005* (βλέπε παράγραφο 7.2.1).
- Το σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί στο στιγμιότυπο αιχμής φορτίου του συστήματος για το έτος 2006, που εφεξής θα ονομάζεται *Σενάριο Μείγστου 2006* (βλέπε παράγραφο 7.2.2).
- Το σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί στο στιγμιότυπο του συστήματος στις 18 Σεπτεμβρίου 2006, που εφεξής θα ονομάζεται *Σενάριο Σεπτεμβρίου 2006* (βλέπε παράγραφο 7.2.3).

Η επιλογή των τριών συγκεκριμένων σεναρίων αποσκοπεί στην ανάλυση της αποτελεσματικότητας του σχήματος αποκοπής φορτίου για διαφορετικές αιτίες εμφάνισης της αστάθειας, καθώς και για διαφορετικές συνθήκες φορτίου και τοπολογίας συστήματος. Συγκεκριμένα, το *Σενάριο Μείγστου 2005* εμφανίζει ιδιαιτερότητα στην αιτία της κατάρρευσης, καθώς μετά την εμφάνιση της εξεταζόμενης διαταραχής η κατάρρευση του συστήματος συμβαίνει σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα εξαιτίας της

διαδοχικής απώλειας και άλλων μονάδων παραγωγής. Το *Σενάριο Μεγίστου 2006* αντιστοιχεί στο ιστορικό μέγιστο φορτίο του Ελληνικού συστήματος, δηλαδή σε ιδιαίτερα φορτισμένες συνθήκες παραγωγής και κατανάλωσης, ενώ το *Σενάριο Σεπτεμβρίου 2006* αντιστοιχεί σε αρκετά χαμηλότερη φόρτιση συστήματος, αλλά σε ιδιαίτερη τοπολογία του δικτύου στην Πελοπόννησο.

Ως προς τη δυνατότητα αποκοπών φορτίου του σχήματος, ακολουθείται η πρακτική που αποφασίστηκε από τον ΔΕΣΜΗΕ για την αντιμετώπιση εμφάνισης αστάθειας τάσης στην Πελοπόννησο. Σύμφωνα με την πρακτική αυτή, η απόρριψη φορτίου στην Πελοπόννησο θα γίνεται με εντολή αποσύνδεσης των ακτινικών γραμμών μεταφοράς 150 kV Μεγαλόπολη - Σπάρτη - Μολάοι και Μεγαλόπολη - Καλαμάτα με το διακόπτη ισχύος P10 στην αναχώρηση της γραμμής από Πύλο προς Καλαμάτα να είναι ανοιχτός, η οποία προκαλεί τη σβέση των πόλεων της Σπάρτης, της Καλαμάτας και των Μολάων, ενώ η Πύλος εξακολουθεί να τροφοδοτείται μέσω της γραμμής 150 kV από την Κυπαρισσία. Η εντολή αυτή θα δίνεται αυτόματα, όταν εντοπιστεί η απώλεια μίας εκ των μονάδων 3 και 4 της Μεγαλόπολης με την άλλη να βρίσκεται ήδη εκτός λειτουργίας, αφού προηγουμένως έχει γίνει ο οπλισμός του σχήματος από το κέντρο ελέγχου με βάση την εκτίμηση ασφάλειας τάσης του συστήματος από την εφαρμογή On-line VSA και την εμπειρία των χειριστών. Πρόκειται επομένως για ένα σχήμα αποκοπής φορτίου βασισμένο στην εμφάνιση και ανίχνευση του συμβάντος (event-driven SPS) [CTF01].

Όπως είπαμε νωρίτερα, η αποσύνδεση των συγκεκριμένων γραμμών προκαλεί τη σβέση των πόλεων της Σπάρτης, της Καλαμάτας και των Μολάων. Η σβέση αυτή θα είναι ωστόσο προσωρινή, διαρκώντας για όσο χρόνο χρειάζεται μέχρι την ολοκλήρωση των χειροκίνητων αποκοπών φορτίου που στο μεταξύ θα πραγματοποιούνται από την περιοχή της Πελοποννήσου με βάση συγκεκριμένο πρόγραμμα. Επομένως, το αυτόματο σχήμα αποσύνδεσης των γραμμών Μεγαλόπολη - Σπάρτη - Μολάοι και Μεγαλόπολη - Καλαμάτα θεωρείται το πρώτο στάδιο αποκοπών, με το πρόγραμμα των χειροκίνητων αποκοπών να αποτελεί το δεύτερο στάδιο ελεγχόμενων αποκοπών με σκοπό την τάχιστα επανασύνδεση των δύο γραμμών.

7.3.2 Μεθοδολογία Προσομοίωσης

Η σχεδίαση της προστασίας αξιολογείται με τη βοήθεια προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται με το πρόγραμμα WPSTAB. Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι ίδια με αυτή που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Συνεπώς, κατά την προσομοίωση τα φορτία του συστήματος θεωρούνται ότι συνδέονται στο δευτερεύον πραγματικών ή υποθετικών μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης που ρυθμίζουν την τάση δευτερεύοντος. Η εξάρτησή τους από την τάση θεωρείται εκθετικής μορφής με εκθέτες $\alpha = 1,5$ για την ενεργό και $\beta = 2,0$ για την άεργο ισχύ. Στην ομοιόμορφη αύξηση της ζήτησης δεν συμμετέχουν τα βιομηχανικά φορτία, τα βοηθητικά των γεννητριών, καθώς και τα αιολικά και η dc διασύνδεση με την Ιταλία που μοντελοποιούνται ως φορτία σταθερής ισχύος.

Όλες οι μονάδες παραγωγής θεωρούνται ότι μετέχουν στη ρύθμιση τάσης μέχρι του σημείου που συναντούν τον περιορισμό υπερδιέγερσης, δηλαδή τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του ρεύματος δρομέα, που αντιστοιχεί σε συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας. Από το σημείο αυτό και μετά οι μονάδες θεωρείται ότι διατηρούν σταθερό ρεύμα διέγερσης, ίσο με το μέγιστο.

Στις μονάδες του νοτίου συστήματος προσομοιώνεται ο περιορισμός ρεύματος τυμπάνου για την αντιμετώπιση των τυχόν εμφανιζόμενων υπερεντάσεων στο στάτη και η λειτουργία της προστασίας υποτάσεως που προκαλεί την αποσύνδεσή τους σε συνθήκες χαμηλής τερματικής τάσης. Ο εφικτός ρυθμός μείωσης r_{mo} της παραγωγής ενεργού ισχύος για κάθε γεννήτρια που υποβάλλεται σε περιορισμό ρεύματος τυμπάνου έχει παρουσιαστεί στον Πίν. 3.1 του τρίτου κεφαλαίου και αντιστοιχεί σε αυτόν που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του περιστατικού με βάση τις μετρήσεις από το SCADA του ΔΕΣΜΗΕ. Στην προσομοίωση του περιορισμού ρεύματος τυμπάνου, ως μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα στάτη θεωρείται το ονομαστικό ρεύμα της μηχανής, ενώ στην προσομοίωση της προστασίας υποτάσεως των γεννητριών θεωρείται ότι οι μονάδες αποσυνδέονται όταν η τερματική τους τάση πέσει κάτω από το 88% της ονομαστικής για 10 s.

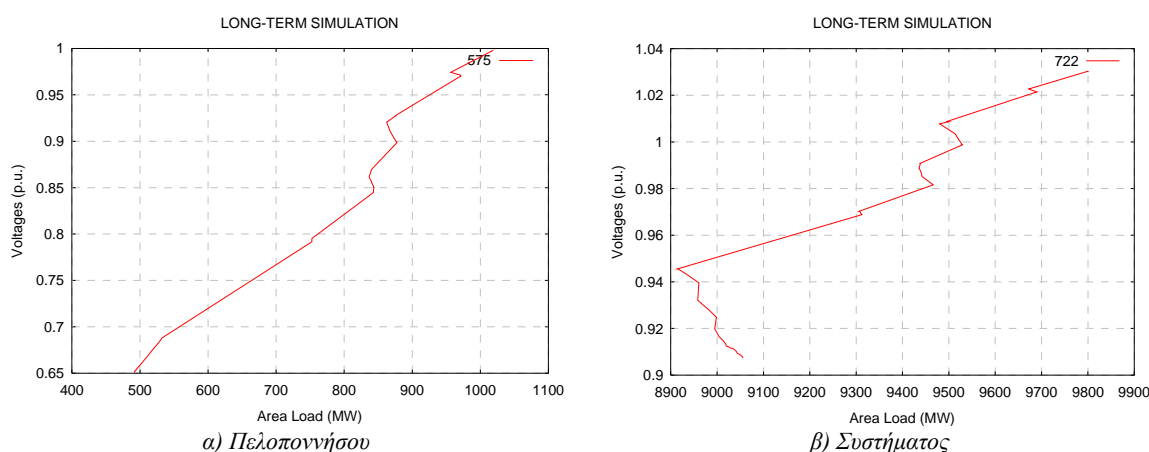
7.3.3 Σενάριο Μεγίστου 2005

Ανάλυση φαινομένου αστάθειας τάσης

Στο Σενάριο Μεγίστου 2005 το συνολικό φορτίο του συστήματος ανέρχεται στο επίπεδο των 9800 MW (συμπεριλαμβάνοντας τα βοηθητικά των σταθμών παραγωγής, αλλά όχι τις απώλειες). Από το συνολικό φορτίο, το φορτίο των τελικών καταναλωτών που συμμετέχει σε αύξηση της ζήτησης ανέρχεται σε 8422 MW, ενώ τα βοηθητικά των σταθμών παραγωγής μαζί με τα βιομηχανικά φορτία ανέρχονται σε 1380 MW και θεωρούνται σταθερά.

Αρχικά προσομοιώνεται η διπλή απώλεια των μονάδων 3 και 4 της Μεγαλόπολης και εξετάζεται η απόκριση του συστήματος. Το ακριβές σενάριο της προσομοίωσης συνίσταται στην απώλεια των μονάδων Μεγαλόπολη 3 και Μεγαλόπολη 4 κατά τις χρονικές στιγμές $t = 100$ s και $t = 200$ s αντίστοιχα και στην επιβολή ομοιόμορφης και αναλογικής αύξησης στο φορτίο με ρυθμό $r = 0,0017\%/s$ για χρονικό διάστημα 1400 s (από $t = 200$ s ως $t = 1600$ s). Ο ρυθμός αυτός αντιστοιχεί σε αύξηση του συνολικού φορτίου του συστήματος κατά 200 MW περίπου.

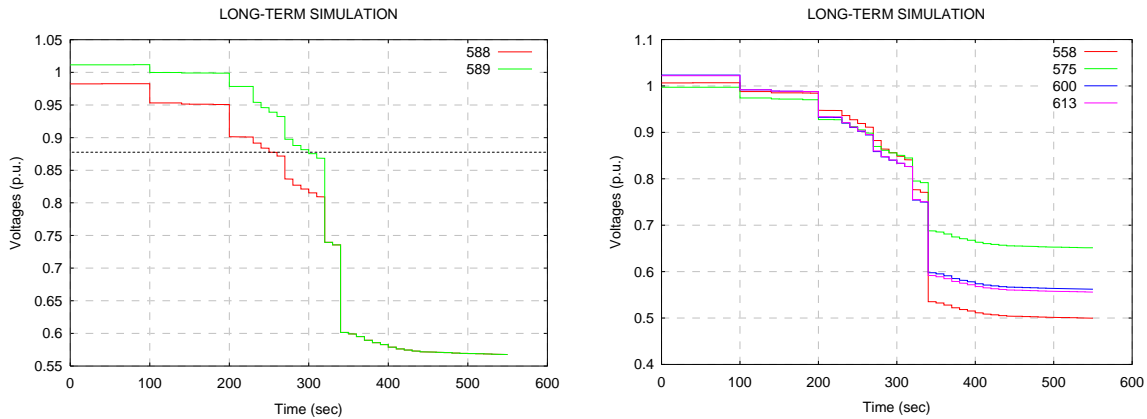
Το σύστημα μετά τις παραπάνω διαταραχές αδυνατεί να αποκαταστήσει μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας και καταρρέει. Η καμπύλη του Σχ. 7.1α απεικονίζει την τάση του ζυγού 150 kV των Μεθάνων συναρτήσει του συνολικού φορτίου της Πελοποννήσου, ενώ αυτή του Σχ. 7.1β την τάση του ζυγού 150 kV στο Ρουφ συναρτήσει του συνολικού φορτίου του συστήματος. Από το Σχ. 7.1 είναι εμφανές ότι ούτε το φορτίο της Πελοποννήσου ούτε το συνολικό φορτίο δεν μπορεί να αποκατασταθεί μετά από την εμφάνιση της διπλής διαταραχής και οι τάσεις καταρρέουν με τη διαδοχική αποσύνδεση μονάδων παραγωγής λόγω υποτάσεως.



Σχ. 7.1 PV καμπύλες

Σημαντικό ρόλο σε αυτή την εξέλιξη έχει η περιορισμένη δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος της μονάδας Μεγαλόπολη 1. Η αδυναμία αυτή οφείλεται σε πρόβλημα που παρουσίαζε η μονάδα εκείνη τη χρονική περίοδο και προσομοιώνεται στο εξεταζόμενο σενάριο με τη θεώρηση πολύ μικρής τιμής κέρδους του αυτόματου ρυθμιστή τάσης της μονάδας. Το πρόβλημα της μειωμένης υποστήριξης αέργου ισχύος από τη μονάδα Μεγαλόπολη 1, προκαλεί την εμφάνιση χαμηλού επιπέδου τάσεων στην περιοχή και οδηγεί ουσιαστικά στην αποσύνδεσή της από το δίκτυο για λόγους υποτάσεως, παρασύροντας στη συνέχεια και την τελευταία μονάδα (μονάδα 2) σε αποσύνδεση. Η απώλεια ολόκληρης της παραγωγής του σταθμού της Μεγαλόπολης συμβάλλει καθοριστικά στην κατάρρευση των τάσεων στην περιοχή.

Στο Σχ. 7.2α φαίνονται τα διαγράμματα τερματικής τάσης των μονάδων 1 (588) και 2 (589) της Μεγαλόπολης. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στη ρύθμιση της προστασίας υποτάσεως των γεννητριών, που όπως αναφέρθηκε νωρίτερα ορίστηκε στο 88% της ονομαστικής τάσης. Πράγματι, τη χρονική στιγμή $t = 270$ s (10 s μετά την παραβίαση της ρύθμισης υποτάσεως) η μονάδα 1 αποσυνδέεται από το δίκτυο, συμπαρασύροντας και τη μονάδα 2 τη χρονική $t = 320$ s. Για τους λόγους που εξηγήθηκαν νωρίτερα, η αποσύνδεση των μονάδων αυτών λόγω χαμηλής τερματικής τάσης αποτελεί τον πρώτο παράγοντα που πρέπει να αντιμετωπιστεί.



α) Τερματικού ζυγού μονάδων Μεγαλόπολη 1 και 2

β) Κρίσιμων ζυγών 150 kV Πελοποννήσου

Σχ. 7.2 Διαγράμματα τάσεων

Ο χρόνος για την εφαρμογή οποιουδήποτε μέτρου προστασίας αποτελεί προς την κατεύθυνση αυτή καθοριστικό παράγοντα. Μετά την απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη 4 τη χρονική στιγμή $t = 200$ s (και υπό την αύξηση του φορτίου του συστήματος) μεσολαβούν μόλις 70 s μέχρι την αποσύνδεση για λόγους υποτάσεως της μονάδας Μεγαλόπολη 1. Επομένως, κάθε εφικτό μέτρο προστασίας πρέπει να παρθεί εντός χρονικού διαστήματος της τάξης του λεπτού.

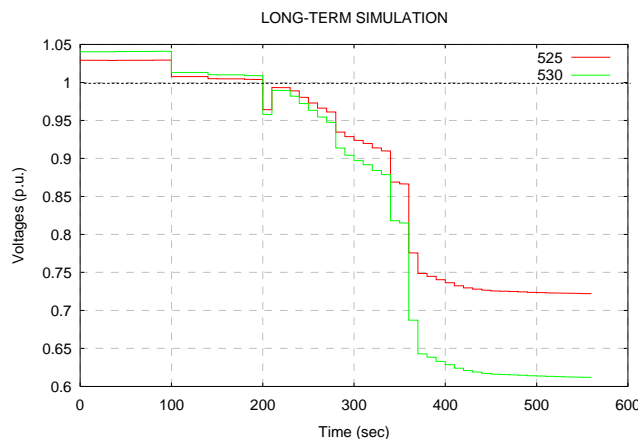
Στο Σχ. 7.2β φαίνονται τα διαγράμματα των τάσεων σε ζυγούς 150 kV της Πελοποννήσου που εμφανίζουν τα χαμηλότερα επίπεδα τάσης στην περιοχή. Πρόκειται για τους ζυγούς ΒΖ Πατρών 31 (558), Μέθανα 31 (575), Καλαμάτα 31 (600) και Πύλος 31 (613). Η κατάρρευση των τάσεων λόγω της διαδοχικής αποσύνδεσης μονάδων παραγωγής του συστήματος είναι εμφανής.

Μέτρα εκτάκτου αέργου αντιστάθμισης

Πριν από τη σχεδίαση του μέτρου της αποκοπής φορτίου, εξετάζεται η απόρριψη των πηνίων αντιστάθμισης των καλωδίων σε Ζάκυνθο και Κεφαλονιά ως μέτρο για την αντιμετώπιση της αστάθειας στην Πελοπόννησο. Το μέτρο αυτό έχει μηδενικό κόστος για τους καταναλωτές, ωστόσο προϋποθέτει την εγκατάσταση αυτοματισμού για την αποσύνδεση των πηνίων και συνεπώς έχει θεωρητικό προς το παρόν ενδιαφέρον.

Η απόρριψη των πηνίων πραγματοποιείται χωρίς καθυστέρηση ($t_{del} = 0$) όταν η τάση V_r του ζυγού στον οποίο συνδέονται υποβιβαστεί πέραν της ρύθμισης υποτάσεως $V_r^{min} = 1$ αμ του ηλεκτρονόμου. Ορίζεται και ρύθμιση ανώτατης επιτρεπόμενης τάσης $V_r^{max} = 1,05$ αμ στον ελεγχόμενο ζυγό, πάνω από την οποία το πηνίο πρέπει να επανασυνδεθεί, ωστόσο στην εφαρμογή αυτή κανένα πηνίο δεν επανασυνδέεται. Προφανώς, καμία ενέργεια ζεύξης - απόζευξης δεν πραγματοποιείται όταν η ελεγχόμενη τάση V_r βρίσκεται εντός της νεκρής ζώνης ρύθμισης $dr = V_r^{max} - V_r^{min}$.

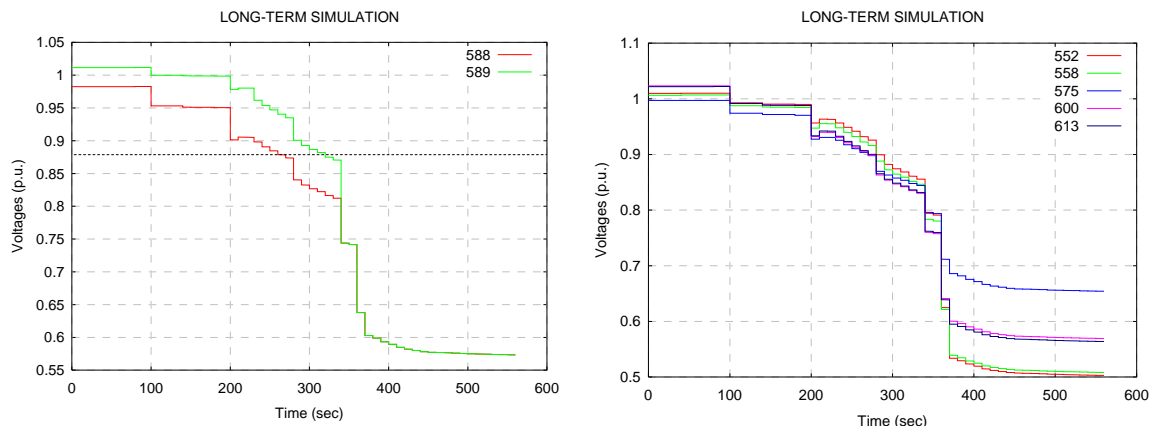
Στο Σχ. 7.3 φαίνεται το διάγραμμα των τάσεων των ζυγών 150 kV του Αργοστολίου και της Ζακύνθου κατά την προσομοίωση του Σεναρίου Μεγίστου 2005 με εφαρμογή του μέτρου της απόρριψης των πηνίων στους συγκεκριμένους ζυγούς.



Σχ. 7.3 Διάγραμμα τάσεων ζυγών 150 kV Αργοστολίου και Ζακύνθου με απόρριψη των πηνίων

Η αποσύνδεση των πηνίων στη Ζάκυνθο (ονομαστικής ισχύος 25 MVar) και στο Αργοστόλι (ονομαστικής ισχύος 12,5 MVar) γίνεται ταυτόχρονα, αμέσως μετά την απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη 4, τη χρονική στιγμή $t = 210$ s της προσομοίωσης.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 7.4α, η απόρριψη των πηνίων δεν επαρκεί από μόνη της για την αποφυγή της αποσύνδεσης των μονάδων 1 και 2 της Μεγαλόπολης και κατά συνέπεια η κατάρρευση των τάσεων του συστήματος είναι μη αναστρέψιμη (Σχ. 7.4β).



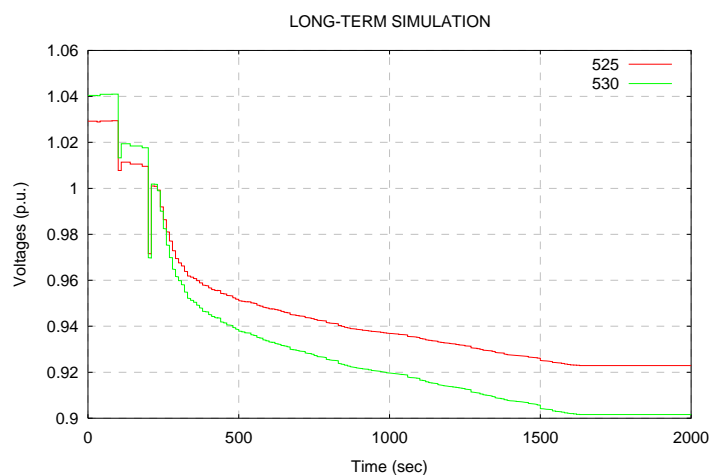
α) Τερματική τάση μονάδων Μεγαλόπολη 1 και 2

β) Τάσεις κρίσιμων ζυγών 150 kV Πελοποννήσου

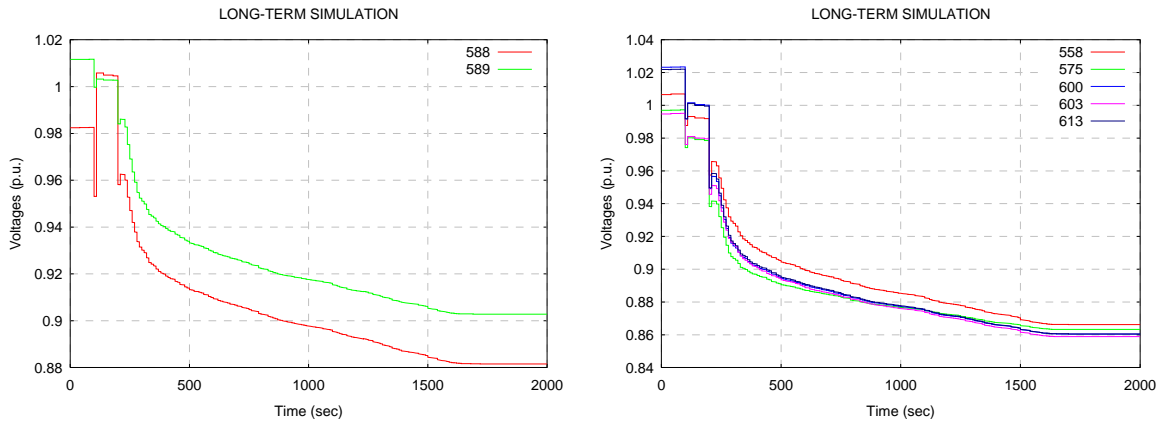
Σχ. 7.4 Επίδραση απόρριψης πηνίων

Επειδή στο συγκεκριμένο σενάριο η αδυναμία παραγωγής αέργου ισχύος της μονάδας Μεγαλόπολη 2 παίζει κυρίαρχο ρόλο, εξετάστηκε επίσης η εγκατάσταση συστοιχιών πυκνωτών στο σταθμό της Μεγαλόπολης, ώστε να μειωθεί η ανάγκη παραγωγής αέργων από τις μονάδες και να εξασφαλιστεί η αεργός εφεδρεία για την αντιμετώπιση της διαταραχής.

Στο Σχ. 7.5 απεικονίζεται το διάγραμμα των τάσεων των ζυγών 150 kV του Αργοστολίου και της Ζακύνθου κατά την προσομοίωση του Σεναρίου Μεγίστου 2005 με εφαρμογή του μέτρου της απόρριψης των πηνίων στους συγκεκριμένους ζυγούς και την εγκατάσταση συστοιχιών πυκνωτών 60 MVar στο ζυγό της μονάδας Μεγαλόπολη 1. Η απόρριψη των πηνίων στη Ζάκυνθο και στο Αργοστόλι γίνεται πάλι τη χρονική στιγμή $t = 210$ s και σε συνδυασμό με την εγκατάσταση των πυκνωτών στο ζυγό της μονάδας Μεγαλόπολη 1 αποσοβεί οριακά την αποσύνδεσή της από το δίκτυο για λόγους χαμηλής τερματικής τάσης (Σχ. 7.6α), διατηρώντας κατά αυτόν τον τρόπο το σύστημα σε λειτουργία (Σχ. 7.6β), που διαφορετικά θα κατέρρεε με τη διαδοχική αποσύνδεση και άλλων μονάδων παραγωγής λόγω υποτάσεως. Επομένως, η ελάχιστη απαιτούμενη αντιστάθμιση αέργου ισχύος που απαιτείται για την αποφυγή της κατάρρευσης είναι 60 MVar.



Σχ. 7.5 Διάγραμμα τάσεων ζυγών 150 kV Αργοστολίου και Ζακύνθου



α) Τερματική τάση μονάδων Μεγαλόπολη 1 και 2

β) Τάσεις κρίσιμων ζυγών 150 kV Πελοποννήσου

Σχ. 7.6 Επίδραση απόρριψης πηνίων και εγκατάστασης πυκνωτών

Προσδιορισμός ελάχιστης αποκοπής φορτίου

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε σχήματα αποκοπής φορτίου για τη συγκεκριμένη διαταραχή. Σημειώνεται ότι δεν εξετάζεται η συνδυασμένη εφαρμογή των σχημάτων αποκοπής φορτίου με μέτρα εκτάκτου αέργου αντιστάθμισης, όπως η απόρριψη των πηνίων που είδαμε νωρίτερα, καθώς δεν υπάρχει υπό τις παρούσες συνθήκες προοπτική υλοποίησης μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης με αντιστάθμιση αέργου ισχύος από το διαχειριστή του συστήματος.

Όπως είδαμε νωρίτερα, απότερος σκοπός κάθε μέτρου προστασίας είναι η αποφυγή της αποσύνδεσης λόγω υποτάσεως της μονάδας Μεγαλόπολη 1. Για τον προσδιορισμό της ελάχιστης αποκοπής φορτίου που απαιτείται για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται η πληροφορία του διανύσματος ευαισθησιών της τερματικής τάσης της συγκεκριμένης μονάδας ως προς τις παραμέτρους φορτίου, σύμφωνα με τη μεθοδολογία της παραγράφου 5.5.2 του πέμπτου κεφαλαίου. Τα μεγαλύτερα στοιχεία αυτού του διανύσματος ευαισθησιών αντιστοιχούν στα φορτία, των οποίων η αποκοπή είναι πιο αποδοτική για την αύξηση της τάσης του τερματικού ζυγού της μονάδας Μεγαλόπολη 1.

Αρχικά υπολογίζεται το διάνυσμα $\tilde{S}_{V_i P_i}$ των ευαισθησιών της τερματικής τάσης της μονάδας Μεγαλόπολη 1 ως προς την ενεργό και άεργο συνιστώσα κάθε φορτίου του συστήματος. Ο υπολογισμός των ευαισθησιών γίνεται τη χρονική στιγμή $t = 210$ s της προσομοίωσης, δηλαδή 10 s μετά την απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη 4. Ιεραρχώντας στη συνέχεια τις ευαισθησίες με φθίνουσα κατάταξη ως προς το μέτρο τους (βλέπε Παράρτημα Δ), προκύπτουν από τα πρώτα στοιχεία του διανύσματος οι πιο αποτελεσματικοί ζυγοί για αποκοπή φορτίου, ώστε να αποφευχθεί η απώλεια της μονάδας λόγω χαμηλής τάσης.

Η ελάχιστη αποκοπή προσδιορίζεται, επαναλαμβάνοντας την προσομοίωση του *Σεναρίου Μεγίστου 2005* και εφαρμόζοντας απόρριψη ολόκληρης της ζήτησης από τα φορτία με τη μεγαλύτερη ευαισθησία, μέχρι να διασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος για τη συγκεκριμένη διαταραχή. Η εφαρμογή των αποκοπών πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή $t = 260$ s, κατά την οποία εμφανίζεται χαμηλή τάση (μικρότερη από 0,88 αμ) ικανή να οδηγήσει σε απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη 1 (χρονική στιγμή διέγερσης ηλεκτρονόμου υποτάσεως). Αυτή είναι η τελευταία ευκαιρία (έσχατη ώρα) εφαρμογής της αποκοπής φορτίου για την αντιμετώπιση της αστάθειας τάσης στο συγκεκριμένο σενάριο.

Η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου υπέδειξε την αποκοπή της συνολικής ζήτησης των τριών πρώτων ζυγών του διανύσματος ευαισθησίας της τάσης, δηλαδή των ζυγών Σπάρτη-II 51 (608), Σπάρτη-II 52 (954) και Καλαμάτα 51 (601). Η συνολικά απορριπτόμενη ζήτηση φαίνεται στον Πίν. 7.5 και αντιστοιχεί σε 100,84 MW και 43,39 MVar. Σημειώνεται ότι με την αποσύνδεση των μονάδων 3 και 4 της Μεγαλόπολης υπάρχει ταυτόχρονη απόρριψη φορτίου βοηθητικών 59,14 MW και 32,15 MVar. Συνεπώς, η συνολικά απορριπτόμενη ζήτηση ανέρχεται σε 159,98 MW και 75,54 MVar.

Πίν. 7.5 Θεωρητικά ελάχιστη αποκοπή φορτίου από την Πελοπόννησο

ΖΥΓΟΣ	ΕΝΕΡΓΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (MW)	ΑΕΡΓΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (MVar)
Σπάρτη-II 51	31,76	11,57
Σπάρτη-II 52	31,76	11,58
Καλαμάτα 51	37,32	20,24
ΕΝΤΟΛΗ	100,84	43,39
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ	59,14	32,15
ΣΥΝΟΛΟ	159,98	75,54

Αποκοπή φορτίου με αποσύνδεση προκαθορισμένων γραμμών υψηλής τάσης

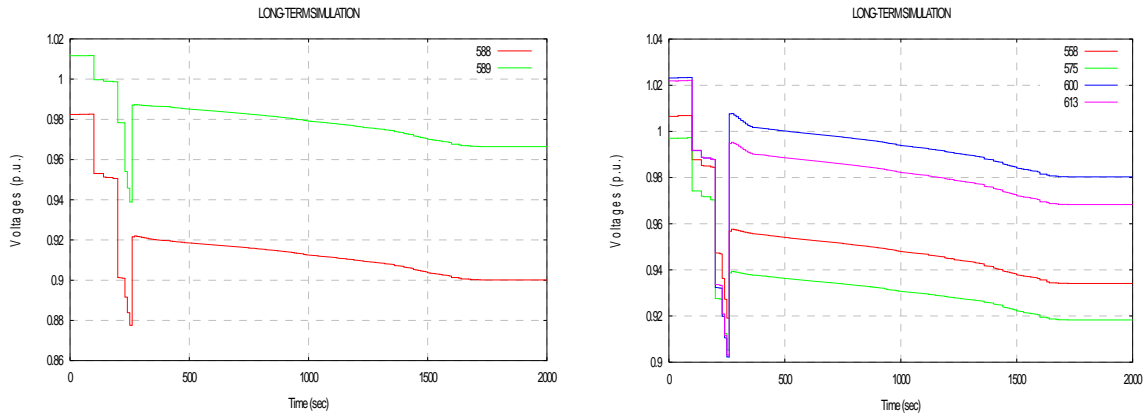
Οι αποκοπές του Πίν. 7.5 δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν επειδή δεν υπάρχει αυτόματος μηχανισμός αποκοπής στους συγκεκριμένους υποσταθμούς. Εκτός αυτού, ο ΔΕΣΜΗΕ αποφάσισε η αποκοπή φορτίου από την Πελοπόννησο να πραγματοποιείται με αποσύνδεση των γραμμών μεταφοράς 150 kV Μεγαλόπολη - Σπάρτη - Μολάοι και Μεγαλόπολη - Καλαμάτα. Συνεπώς, στη συνέχεια εξετάζεται το παραπάνω σχήμα αποκοπής φορτίου, που ούτως ή άλλως εμπλέκει τα φορτία του Πίν. 7.5. Είναι προφανές ότι το σχήμα αυτό αποκόπτει περισσότερο φορτίο από το θεωρητικά ελάχιστο. Η εφαρμογή των αποκοπών πραγματοποιείται πάλι τη χρονική στιγμή $t = 260$ s που διεγείρεται ο ηλεκτρονόμος υποτάσεως της μονάδας Μεγαλόπολη 1. Η συνολικά απορριπτόμενη ζήτηση φαίνεται στον Πίν. 7.6. Η αρνητική τιμή στην άεργο συνιστώσα του φορτίου ορισμένων ζυγών του πίνακα οφείλεται σε υπεραντιστάθμιση των συγκεκριμένων ζυγών.

Πίν. 7.6 Αποκοπή φορτίου στην Πελοπόννησο - Σενάριο Μεγίστου 2005

ΖΥΓΟΣ	ΕΝΕΡΓΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (MW)	ΑΕΡΓΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (MVar)
Σπάρτη-I 51	9,50	-9,81
Σπάρτη-II 51	31,76	11,57
Σπάρτη-II 52	31,76	11,58
Καλαμάτα 51	37,32	20,24
Καλαμάτα 52	30,99	11,41
Μολάοι 51	4,01	-15,34
Μολάοι 52	4,01	-14,34
ΕΝΤΟΛΗ	149,35	15,31
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ	59,14	32,15
ΣΥΝΟΛΟ	208,49	47,46

Στο Σχ. 7.7α φαίνεται το διάγραμμα τερματικής τάσης των μονάδων 1 και 2 της Μεγαλόπολης. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, τη χρονική στιγμή $t = 260$ s η τάση της μονάδας Μεγαλόπολη 1 πέφτει κάτω από τη ρύθμιση του ηλεκτρονόμου υποτάσεως της γεννήτριας (88% της ονομαστικής τάσης), με αποτέλεσμα να διεγερθεί ο μετρητής χρόνου του ηλεκτρονόμου. Η γεννήτρια θα αποσυνδεόταν από το δίκτυο, αν η τερματική της τάση παρέμενε σε τόσο χαμηλό επίπεδο για 10 s. Όμως την ίδια χρονική στιγμή ($t = 260$ s) δίδεται εντολή αποκοπής φορτίου με αποτέλεσμα να αποφευχθεί η κατάρρευση του συστήματος λόγω των αλυσιδωτών απωλειών που θα προκαλούσε η αποσύνδεση της μονάδας.

Στο Σχ. 7.7β φαίνεται το διάγραμμα των τάσεων στους ζυγούς 150 kV ΒΖ Πάτρα 31 (558), Κρανίδι 31 (572), Μέθανα 31 (575), Καλαμάτα 31 (600) και Πύλος 31 (613) μετά την αποκοπή. Όπως φαίνεται, οι τάσεις σταθεροποιούνται σε ικανοποιητικό επίπεδο (άνω του 90% της ονομαστικής τους τιμής) στο τέλος της προσομοίωσης.

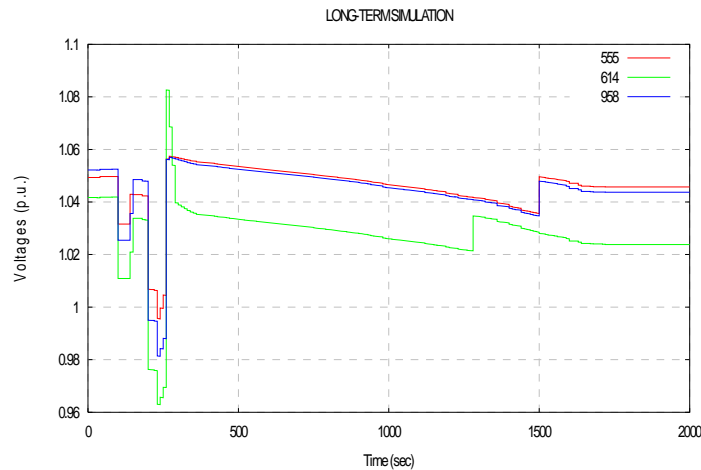


α) Τερματικού ζυγού μονάδων 1 και 2 Μεγαλόπολης

β) Κρίσιμων ζυγών 150 kV Πελοποννήσου

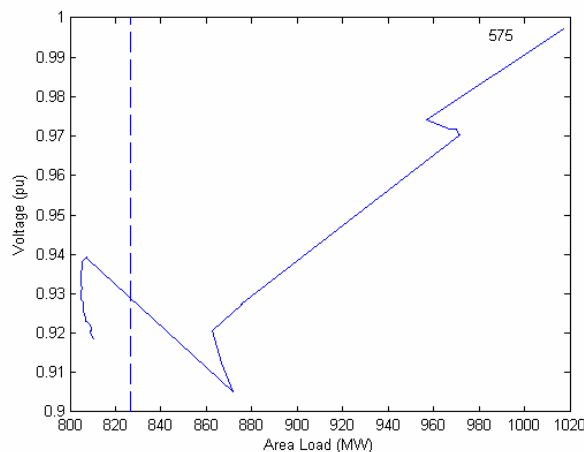
Σχ. 7.7 Διαγράμματα τάσης μετά την αποκοπή φορτίου

Στο Σχ. 7.8 απεικονίζεται η τάση των ζυγών στους οποίους παρατηρείται υπέρταση λόγω της αποκοπής του φορτίου. Η υπέρταση που εμφανίζεται είναι της τάξης του 6% στους ζυγούς 20 kV Πάτρα-Π 51 (555) και Πύργος 52 (958) και της τάξης του 8% στο ζυγό 20 kV Πύλος 51 (614). Σε κανέναν άλλο ζυγό δεν παρατηρείται υπέρταση.



Σχ. 7.8 Εμφάνιση υπερτάσεων μετά την αποκοπή φορτίου

Η PV καμπύλη του Σχ. 7.9 απεικονίζει την τάση του ζυγού 150 kV των Μεθάνων συναρτήσει του συνολικού φορτίου της Πελοποννήσου μετά την αποκοπή φορτίου. Το φορτίο δεν αποκαθίσταται στη νέα ζήτηση που προκύπτει μετά την αποκοπή και την επιβολή της ράμπας, αλλά υπάρχει μία απόκλιση της τάξης των 30 MW. Η απόκλιση αυτή είναι αρκετά μικρή και μπορεί να αποδοθεί στη νεκρή ζώνη των ΣΑΤΥΦ. Συνεπώς, η αποκατάσταση της ισχύος μετά την αποκοπή φορτίου είναι ικανοποιητική.



Σχ. 7.9 Καμπύλη PV Πελοποννήσου

Επίδραση ενισχύσεων συστήματος

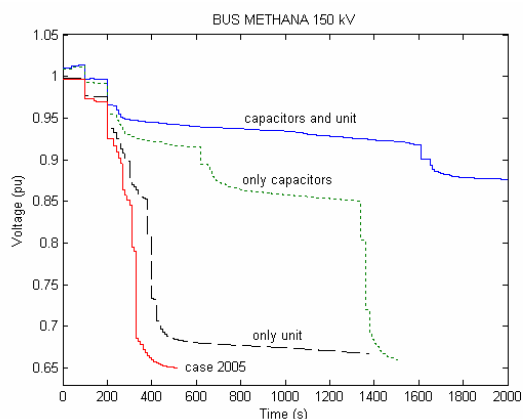
Λίγο μετά την 3^η Αυγούστου 2005 ολοκληρώθηκαν ορισμένα έργα ενίσχυσης του συστήματος στην Πελοπόννησο. Τα έργα αυτά περιλαμβάνουν την εγκατάσταση των πυκνωτών 20/150 kV του Πίν. 7.7 και την ένταξη μίας συστοιχίας ηλεκτροπαραγωγών ζευγών ονομαστικής ισχύος 60 MW με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (μονάδα 5) στο σταθμό της Μεγαλόπολης.

Πίν. 7.7 Εγκατάσταση νέων πυκνωτών στην Πελοπόννησο

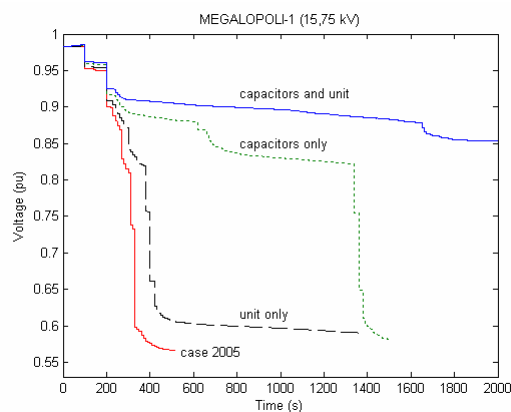
ΝΕΑ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΣΤΗ ΜΤ (MVar)	
Αμαλιάδα	+ 8,0
Αίγιο	+12,6
Κόρινθος	+12,0
Πάτρα 3	+12,0
Ελευσίνα	+12,6
ΝΕΑ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΣΤΗ ΥΤ (MVar)	
Πύλος	+25,0
ΣΥΝΟΛΟ	82,2

Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση των συγκεκριμένων έργων στην ενίσχυση της ευστάθειας τάσης της Πελοποννήσου. Το *Σενάριο Μεγίστου 2005* προσομοιώνεται εκ νέου με την προσθήκη των παραπάνω έργων στο μοντέλο του συστήματος. Στο μοντέλο αυτό, η ισοδύναμη μονάδα ηλεκτροπαραγωγών ζευγών (μονάδα 5) στη Μεγαλόπολη, θεωρείται ότι συνδέεται στο ζυγό 150 kV του σταθμού παραγωγής της Μεγαλόπολης. Επίσης, επειδή ο υποσταθμός της Αμαλιάδας κατασκευάστηκε μετά την 3^η Αυγούστου και δεν υπάρχει στο αρχικό στιγμιότυπο, γίνεται διόρθωση της τοπολογίας στην περιοχή. Στον ίδιο υποσταθμό θεωρήθηκε ότι το φορτίο τροφοδοτείται μέσω ΣΑΤΥΦ. Λόγω της σύνδεσης των πυκνωτών στο σύστημα, οι τάσεις στο αρχικό σημείο της προσομοίωσης μεταβάλλονται.

Στο Σχ. 7.10α φαίνεται η διακύμανση της τάσης του ζυγού 150 kV των Μεθάνων, όπως προκύπτει από την προσομοίωση του σεναρίου, εντάσσοντας σταδιακά όλα τα έργα ενίσχυσης στο μοντέλο του συστήματος. Με το χαρακτηρισμό «case 2005» αναφερόμαστε στο αρχικό σημείο λειτουργίας, δηλαδή στην περίπτωση χωρίς κανένα από τα νέα έργα σε λειτουργία. Μόνη διαφοροποίηση ως προς την αρχική κατάσταση του συστήματος, αποτελεί στην περίπτωση αυτή η παράσταση του υποσταθμού της Αμαλιάδας και οι συνακόλουθες μεταβολές στην τοπολογία του συστήματος. Στο Σχ. 7.10β φαίνεται για τις ίδιες περιπτώσεις το διάγραμμα της τάσης του τερματικού ζυγού της κρίσιμης γεννήτριας Μεγαλόπολη 1.



α) Ζυγός 150 kV Μεθάνων



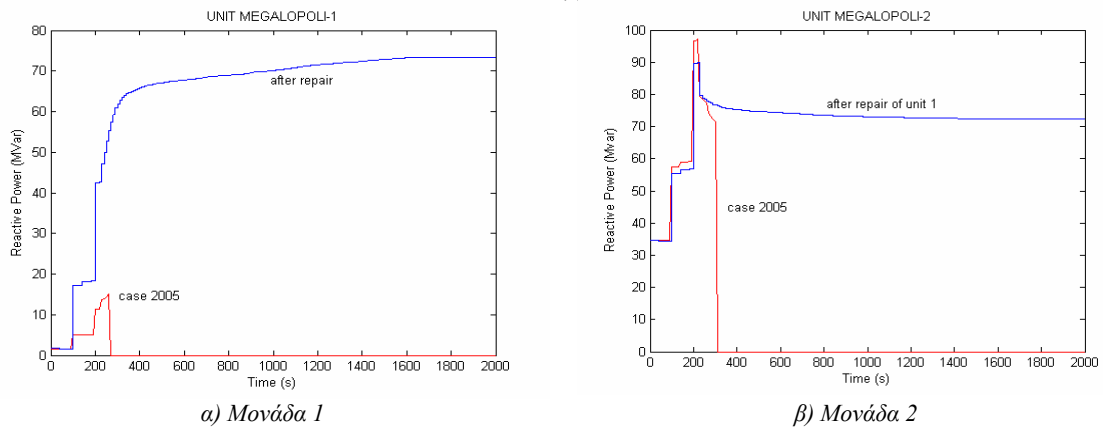
β) Τερματικός ζυγός μονάδας Μεγαλόπολη 1

Σχ. 7.10 Επίδραση ενισχύσεων συστήματος στην τάση

Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι η εγκατάσταση της μονάδας ηλεκτροπαραγωγών ζευγών στη Μεγαλόπολη, που αντιστοιχεί στη διακεκομμένη καμπύλη τάσης, δεν επαρκεί για να αποτρέψει την κατάρρευση. Ωστόσο η πρόσθετη χωρητική αντιστάθμιση (εστιγμένη καμπύλη), παρότι ούτε αυτή επαρκεί για να αποσοβήσει την απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη 1 από χαμηλή τάση, επιτυγχάνει να επιβραδύνει αρκετά την κατάρρευση λόγω της ανύψωσης των τάσεων. Στην περίπτωση που υπάρχει ταυτόχρονα η πρόσθετη αντιστάθμιση και η πρόσθετη παραγωγή (συνεχής καμπύλη), η απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη 1 λόγω χαμηλής τάσης δεν οδηγεί σε κατάρρευση, αλλά το σύστημα είναι οριακά ευσταθές. Η σχεδίαση όμως ενός σχήματος αποκοπής φορτίου είναι και πάλι απαραίτητη.

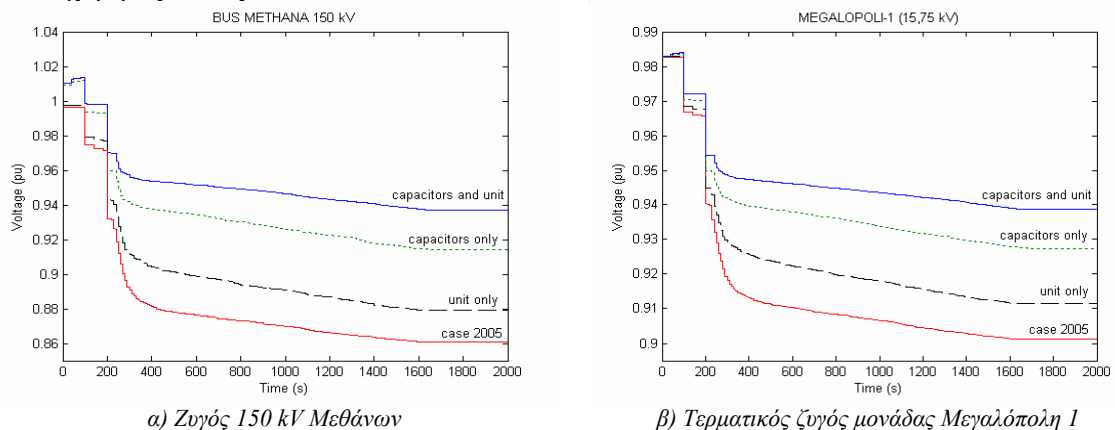
Επίδραση επισκευής της μονάδας Μεγαλόπολη 1

Στη συνέχεια προσομοιώνουμε την περίπτωση, στην οποία αποκαθίσταται η δυνατότητα αέργου φόρτισης της μονάδας Μεγαλόπολη 1. Όπως προαναφέρθηκε, η μονάδα αυτή λόγω προβλημάτων που αντιμετώπιζε στο δρομέα της είχε περίπου μηδενική ικανότητα παραγωγής αέργου ισχύος. Μετά από τις αναγκαίες επισκευές, η κατάσταση αυτή έχει βελτιωθεί με αποτέλεσμα η γεννήτρια να μπορεί να παράγει άεργο ισχύ. Η αύξηση αυτή της ικανότητας παραγωγής αέργου ισχύος της μονάδας Μεγαλόπολη 1 προσομοιώνεται με την αποκατάσταση του κέρδους μόνιμης κατάστασης του αυτόματου ρυθμιστή τάσης. Μία σύγκριση μεταξύ της αέργου παραγωγής των μονάδων Μεγαλόπολη 1 και 2 πριν και μετά την επισκευή της γεννήτριας Μεγαλόπολη 1 φαίνεται στο Σχ. 7.11.



Σχ. 7.11 Παραγωγή αέργου ισχύος στη Μεγαλόπολη πριν και μετά την επισκευή

Στο Σχ. 7.12α παρουσιάζεται το διάγραμμα της τάσης του ζυγού 150 kV των Μεθάνων, όπως προκύπτει από την προσομοίωση του Σεναρίου Μείγστον 2005, θεωρώντας ότι η μονάδα 1 της Μεγαλόπολης έχει ικανότητα παραγωγής αέργου ισχύος και εντάσσοντας διαδοχικά στο σύστημα τα έργα ενίσχυσης που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Στο Σχ. 7.12β φαίνεται το διάγραμμα της τάσης του τερματικού ζυγού της γεννήτριας Μεγαλόπολη 1 για τις ίδιες συνθήκες. Όπως φαίνεται, η επισκευή της μονάδας Μεγαλόπολη 1 αρκεί για την αποφυγή της κατάρρευσης ακόμη και χωρίς τη λήψη κανενός άλλου μέτρου προστασίας (case 2005). Στην περίπτωση μάλιστα που προστίθενται και οι πυκνωτές και τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, η απώλεια των δυο μονάδων 300 MW της Μεγαλόπολης δεν προκαλεί ούτε καν χαμηλές τάσεις.



Σχ. 7.12 Επίδραση επισκευής μονάδας Μεγαλόπολη 1 στην τάση

7.3.4 Σενάριο Μεγίστου 2006

Ανάλυση φαινομένου αστάθειας τάσης

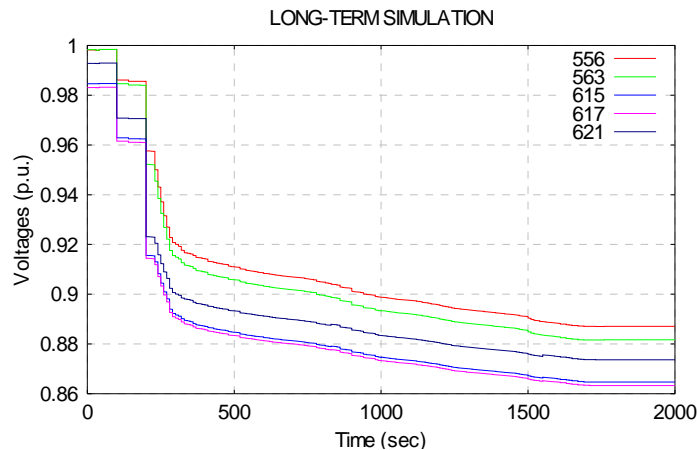
Στο Σενάριο Μεγίστου 2006 το συνολικό φορτίο του συστήματος ανέρχεται στο επίπεδο των 10140 MW (συμπεριλαμβάνοντας τα βοηθητικά των σταθμών παραγωγής, αλλά όχι τις απώλειες). Από το συνολικό φορτίο, το φορτίο των τελικών καταναλωτών που συμμετέχει σε αύξηση της ζήτησης ανέρχεται σε 8820 MW, ενώ τα βοηθητικά των σταθμών παραγωγής μαζί με τα βιομηχανικά φορτία ανέρχονται σε 1320 MW και θεωρούνται σταθερά.

Αρχικά προσομοιώνεται η διπλή απώλεια των μονάδων 3 και 4 της Μεγαλόπολης και εξετάζεται η απόκριση του συστήματος. Το ακριβές σενάριο της προσομοίωσης συνίσταται στην απώλεια των μονάδων Μεγαλόπολη 3 και Μεγαλόπολη 4 κατά τις χρονικές στιγμές $t = 100$ s και $t = 200$ s αντίστοιχα και στην επιβολή ομοιόμορφης και αναλογικής αύξησης στο φορτίο με ρυθμό $r = 0,0017\%/s$ για χρονικό διάστημα 1400 s (από $t = 200$ s ως $t = 1600$ s). Ο ρυθμός αυτός αντιστοιχεί σε αύξηση του συνολικού φορτίου του συστήματος κατά 200 MW περίπου.

Από την προσομοίωση προκύπτει ότι το σύστημα μετά την εφαρμογή των διαταραχών δεν καταρρέει, αλλά μεταβαίνει σε μία κατάσταση ψευδούς ισορροπίας σε χαμηλά επίπεδα τάσης, που οφείλεται στην εξάντληση του εύρους ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ. Αν τα όρια ρύθμισης επέτρεπαν για λίγο ακόμη την ασταθή λειτουργία των ΣΑΤΥΦ ή αν υπήρχε άλλος μηχανισμός αποκατάστασης φορτίου, το σύστημα θα κατέρρεε.

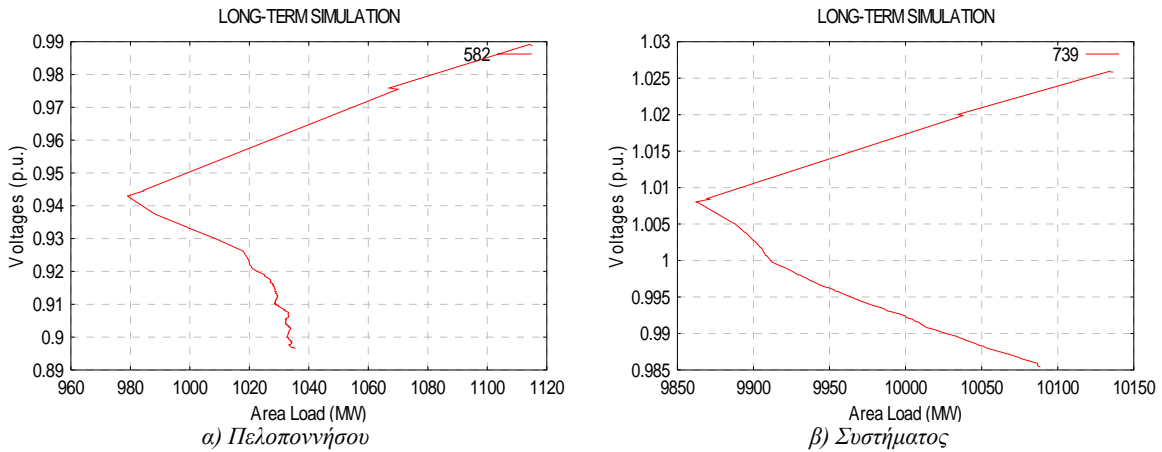
Σημειώνεται ότι καμία γεννήτρια του συστήματος δεν αποσυνδέεται για λόγους υποτάσεως. Η μονάδα Μεγαλόπολη 1, η οποία παρουσιάζει τη χαμηλότερη τερματική τάση από όλες τις μονάδες του νοτίου συστήματος στο συγκεκριμένο σενάριο, δεν κινδυνεύει να αποσυνδεθεί για λόγους υποτάσεως, εξαιτίας της ικανότητάς της να παράγει πλέον άεργο ισχύ (εν αντιθέσει με το αρχικό Σενάριο Μεγίστου 2005). Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερος καθοριστικός για την έκβαση του φαινομένου της αστάθειας τάσης, καθώς σε διαφορετική περίπτωση η απώλεια της μονάδας προκαλεί τη διαδοχική απώλεια και άλλων διατάξεων στην περιοχή και η κατάρρευση είναι αναπόφευκτη.

Στο Σχ. 7.13 φαίνονται τα διαγράμματα των τάσεων στους ζυγούς 150 kV της Πελοποννήσου που εμφανίζουν τα χαμηλότερα επίπεδα τάσης στην περιοχή: Πάτρα-I 31 (556), ΒΖ Πατρών 31 (563), Σπάρτη-I 31 (615), Σπάρτη-II 31 (617) και Μολάοι 31 (621). Όπως φαίνεται, οι τάσεις ισορροπούν σε αρκετά χαμηλές τιμές στο τέλος της προσομοίωσης.



Σχ. 7.13 Διάγραμμα τάσεων κρίσιμων ζυγών 150 kV Πελοποννήσου

Από την PV καμπύλη του Σχ. 7.14α, η οποία απεικονίζει την τάση του ζυγού 150 kV των Μεθάνων συναρτήσει του συνολικού φορτίου της Πελοποννήσου, είναι εμφανές ότι το φορτίο της περιοχής αυτής δεν μπορεί να αποκατασταθεί μετά από την εμφάνιση της διπλής διαταραχής και υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης του συστήματος με επίκεντρο την Πελοπόννησο εάν υπάρξει περαιτέρω αποκατάσταση του φορτίου. Η αστάθεια τάσης δεν αντικατοπτρίζεται ωστόσο στην PV καμπύλη του συνολικού συστήματος (Σχ. 7.14β), η οποία απεικονίζει την τάση του ζυγού 150 kV στο Ρουφ συναρτήσει του συνολικού φορτίου του συστήματος. Όπως φαίνεται, το φορτίο αποκαθίσταται ευσταθώς, παρόλο που στο τέλος της προσομοίωσης υπάρχει μια απόκλιση του καταναλισκόμενου φορτίου ως προς την αρχική ζήτηση.



Σχ. 7.14 PV καμπύλες

Με βάση τα παραπάνω, η ασφάλεια του συστήματος δεν διασφαλίζεται απολύτως, δεδομένου ότι η ισορροπία είναι εύθραυστη και υπάρχει ο κίνδυνος περαιτέρω κλιμάκωσης της αστάθειας. Επομένως, η αποκοπή φορτίου στην Πελοπόννησο κρίνεται και σε αυτήν την περίπτωση αναγκαία ως έσχατο μέτρο. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι για την εφαρμογή της αποκοπής φορτίου υπάρχει αρκετά μεγάλο χρονικό περιθώριο, δεδομένου ότι η εξέλιξη της αστάθειας τάσης είναι αρκετά αργή και καμία γεννήτρια δεν κινδυνεύει άμεσα να αποσυνδεθεί λόγω χαμηλής τερματικής τάσης.

Αποκοπή Φορτίου

Όπως προαναφέρθηκε, η αποκοπή φορτίου στην Πελοπόννησο πραγματοποιείται με αυτόματη αποσύνδεση των γραμμών μεταφοράς Μεγαλόπολη - Σπάρτη - Μολάοι και Μεγαλόπολη - Καλαμάτα. Η εντολή της αποκοπής δίνεται με την αναγνώριση της διαταραχής, αφού προηγουμένως έχει γίνει ο οπλισμός του σχήματος από το κέντρο ελέγχου. Για τον οπλισμό απαιτείται το σύστημα να είναι ανασφαλές για απλή διαταραχή.

Επειδή πρόκειται για την αντιμετώπιση μίας αργά εξελισσόμενης αστάθειας τάσης στην Πελοπόννησο, η χρονική στιγμή της αποσύνδεσης των γραμμών μεταφοράς δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο. Καθώς όμως η απώλεια των δύο μεγαλύτερων μονάδων του ΑΗΣ Μεγαλόπολης δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί από το σύστημα υπό τις δεδομένες συνθήκες, δεν υπάρχει κανένας λόγος καθυστέρησης της εντολής. Συνεπώς, η εντολή εφαρμογής της αποκοπής φορτίου με αποσύνδεση των προκαθορισμένων γραμμών μεταφοράς δίνεται 10 s ($t = 210$ s) μετά την απώλεια της δεύτερης μονάδας (no. 4) της Μεγαλόπολης.

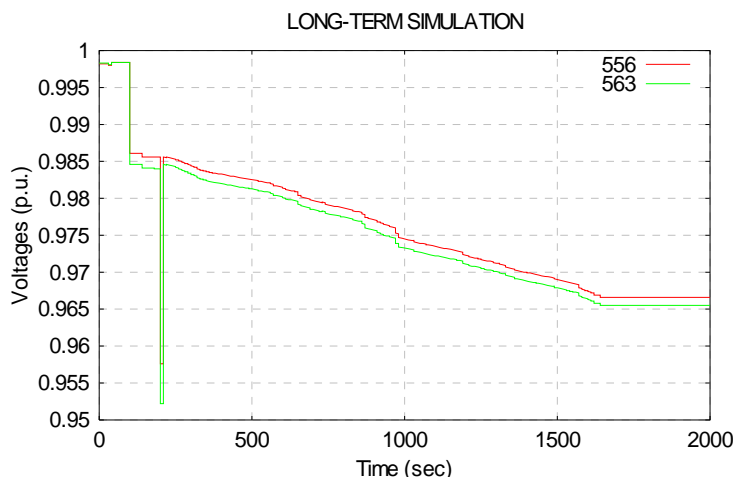
Με την αποσύνδεση των γραμμών μεταφοράς Μεγαλόπολη - Σπάρτη - Μολάοι και Μεγαλόπολη - Καλαμάτα απορρίπτεται το συνολικό φορτίο των ζυγών της Σπάρτης, της Καλαμάτας και των Μολάων. Η αποκοπή αυτή αντιστοιχεί σε συνολική ζήτηση 182,81 MW και 35,35 MVar και κατανέμεται στους επτά ζυγούς που φαίνονται στον Πίν. 7.8.

Πίν. 7.8 Αποκοπή φορτίου στην Πελοπόννησο - Σενάριο Μεγίστου 2006

ΖΥΓΟΣ	ΕΝΕΡΓΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (MW)	ΑΕΡΓΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (MVar)
Σπάρτη-I 51	17,20	-2,81
Σπάρτη-II 51	30,78	6,53
Σπάρτη-II 52	33,48	13,12
Καλαμάτα 51	43,19	23,88
Καλαμάτα 52	36,52	14,73
Μολάοι 51	10,82	-10,05
Μολάοι 52	10,82	-10,05
ΕΝΤΟΛΗ	182,81	35,35
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ	51,9	44,37
ΣΥΝΟΛΟ	234,71	79,72

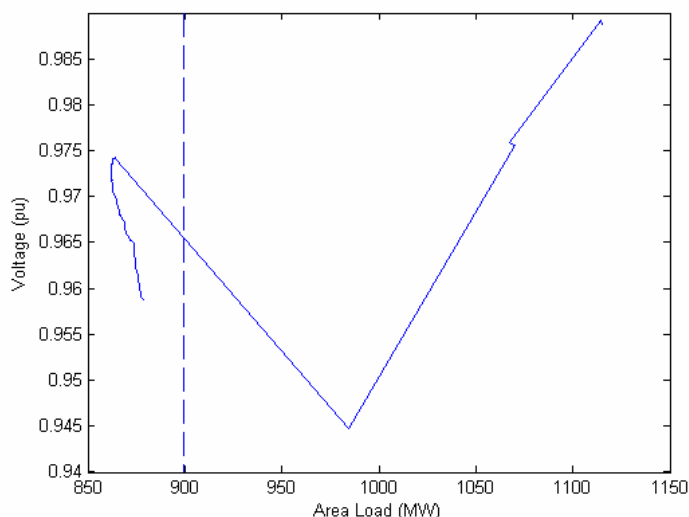
Επιπλέον, η απώλεια των μονάδων Μεγαλόπολη 3 και Μεγαλόπολη 4 συνοδεύεται από ταυτόχρονη απόρριψη φορτίου 51,9 MW και 44,37 MVA_r, που αντιστοιχεί στα βοηθητικά των μονάδων. Επομένως, η συνολική ζήτηση που απορρίπτεται στο σενάριο αυτό ανέρχεται σε 234,71 MW και 79,72 MVA_r. Η αρνητική τιμή στην άεργο συνιστώσα του φορτίου ορισμένων ζυγών του Πίν. 7.8 οφείλεται σε υπεραντιστάθμιση των ζυγών αυτών.

Στο Σχ. 7.15 φαίνονται τα διαγράμματα των τάσεων στους κρίσιμους ζυγούς 150 kV Πάτρα-I 31 (556) και ΒΖ Πατρών 31 (563) μετά την αποκοπή του φορτίου. Υπενθυμίζουμε ότι πρόκειται για τους ζυγούς, οι οποίοι παρουσιάζουν τη χαμηλότερη τάση στην Πελοπόννησο (Σχ. 7.13) μετά τη διακοπή της τροφοδοσίας σε Καλαμάτα, Σπάρτη και Μολάους. Παρατηρούμε ότι μετά την αποκοπή του φορτίου, οι τάσεις σταθεροποιούνται σε κανονικά επίπεδα λειτουργίας, ενώ σε κανένα ζυγό του συστήματος δεν εμφανίζεται υπέρταση.



Σχ. 7.15 Διάγραμμα τάσεων κρίσιμων ζυγών 150 kV Πελοποννήσου μετά την αποκοπή φορτίου

Στο Σχ. 7.16 φαίνεται η καμπύλη PV της Πελοποννήσου μετά την αποκοπή φορτίου. Παρατηρούμε ότι το φορτίο δεν αποκαθίσταται στη ζήτηση (διακεκομμένη καμπύλη) που προκύπτει μετά την επιβολή της ράμπας, συμπεριλαμβανομένης της αποκοπής και της απώλειας των βοηθητικών των μονάδων, αλλά υπάρχει μία μικρή απόκλιση της τάξης των 20 MW, που μπορεί να αποδοθεί στη νεκρή ζώνη ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ.



Σχ. 7.16 PV καμπύλη Πελοποννήσου μετά την αποκοπή φορτίου

7.3.5 Σενάριο Σεπτεμβρίου 2006

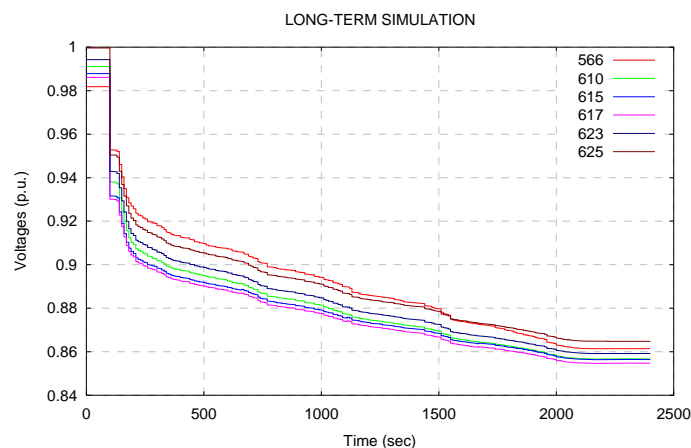
Ανάλυση διαταραχής

Στο Σενάριο Σεπτεμβρίου 2006 το συνολικό φορτίο του συστήματος ανέρχεται στο επίπεδο των 7150 MW (συμπεριλαμβάνοντας τα βοηθητικά των σταθμών παραγωγής, αλλά όχι τις απώλειες). Από το συνολικό φορτίο, το φορτίο των τελικών καταναλωτών που συμμετέχει σε αύξηση της ζήτησης ανέρχεται σε 5970 MW, ενώ τα βοηθητικά των σταθμών παραγωγής μαζί με τα βιομηχανικά φορτία ανέρχονται σε 1180 MW και θεωρούνται σταθερά.

Από την εκτίμηση της ασφάλειας τάσης για το συγκεκριμένο στιγμιότυπο (Πίν. 7.3) είδαμε ότι, παρά την ενίσχυση του δικτύου στην Πελοπόννησο και τη χαμηλή φόρτιση του συστήματος τη συγκεκριμένη ημέρα, αρκεί η απώλεια μίας μονάδας 300 MW στη Μεγαλόπολη για την κατάρρευσή του. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται εν πολλοίς στην ιδιομορφία του συστήματος της Πελοποννήσου τη συγκεκριμένη ημέρα, καθώς εκτός λειτουργίας βρίσκονταν οι μονάδες 2, 4 και 5 (ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη) του ΑΗΣ Μεγαλόπολης και η γραμμή μεταφοράς 150 kV Βέλο - Ξυλόκαστρο για λόγους συντήρησης, αλλά επισημαίνει την αναγκαιότητα οπλισμού του σχήματος αποκοπής φορτίου κατά την περίπτωση που η εφαρμογή On-line VSA εμφανίζει μηδενικό ή πολύ μικρό περιθώριο ασφάλειας, με τη μία γεννήτρια 300 MW της Μεγαλόπολης εκτός λειτουργίας.

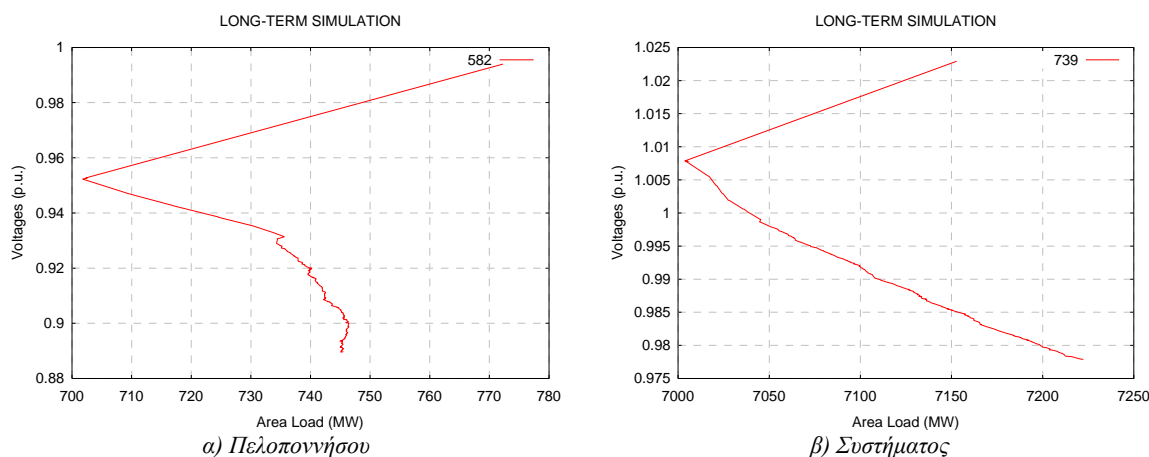
Επομένως, για την ανάλυση του φαινομένου αστάθειας στην Πελοπόννησο αρκεί η προσομοίωση της απώλειας μίας μονάδας 300 MW στη Μεγαλόπολη. Το ακριβές σενάριο που προσομοιώνεται είναι η απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη 3 τη χρονική στιγμή $t = 100$ s και η επιβολή ακολούθως ομοιόμορφης και αναλογικής αύξησης στο φορτίο με ρυθμό $r = 0,0017\%/s$ επί 2000 s (από $t = 100$ s ως $t = 2100$ s). Ο ρυθμός αυτός αντιστοιχεί σε αύξηση του συνολικού φορτίου του συστήματος κατά 200 MW περίπου.

Το σύστημα μετά τις παραπάνω διαταραχές δεν καταρρέει, αλλά μεταβαίνει και πάλι σε μία κατάσταση φαινομενικής ισορροπίας σε πολύ χαμηλή τάση. Η αποφυγή της κατάρρευσης οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στα όρια ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ, καθώς και στο γεγονός ότι καμία γεννήτρια του συστήματος δεν αποσυνδέεται για λόγους υποτάσεως. Στο Σχ. 7.17 φαίνονται τα διαγράμματα των τάσεων στους ζυγούς 150 kV της Πελοποννήσου που εμφανίζουν τα χαμηλότερα επίπεδα τάσης στην περιοχή: Ξυλόκαστρο 31 (566), Καλαμάτα 31 (610), Σπάρτη-I 31 (615), Σπάρτη-II 31 (617), Πύλος 31 (623) και Κυπαρισσία 31 (625). Όπως φαίνεται, οι τάσεις ισορροπούν σε αρκετά χαμηλές τιμές στο τέλος της προσομοίωσης, λόγω της αδυναμίας αποκατάστασης του φορτίου μέσω των ΣΑΤΥΦ στις θιγόμενες περιοχές του συστήματος.



Σχ. 7.17 Διάγραμμα τάσεων κρίσιμων ζυγών 150 kV Πελοποννήσου

Από την PV καμπύλη του Σχ. 7.18α, η οποία αποτυπώνει την τάση του ζυγού 150 kV των Μεθάνων συναρτήσει του συνολικού φορτίου της Πελοποννήσου, φαίνεται ότι το φορτίο της περιοχής αυτής δεν μπορεί να αποκατασταθεί μετά από την εμφάνιση της διαταραχής και υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης του συστήματος με επίκεντρο την Πελοπόννησο αν συνεχίσει η αποκατάσταση του φορτίου. Από την PV καμπύλη Σχ. 7.18β, η οποία αποτυπώνει την τάση του ζυγού 150 kV στο Ρουφ συναρτήσει του συνολικού φορτίου του συστήματος, φαίνεται ότι η εμφάνιση της αστάθειας δεν αντικατοπτρίζεται στο συνολικό φορτίο, το οποίο μετά τη διαταραχή εξακολουθεί να αυξάνεται στις υγιείς περιοχές.



Σχ. 7.18 PV καμπύλες

Αποκοπή Φορτίου

Η αποκοπή φορτίου στην Πελοπόννησο κρίνεται αναγκαία δεδομένου ότι η εμφανιζόμενη σταθεροποίηση των τάσεων οφείλεται στη θεωρούμενη ευαισθησία του φορτίου ως προς την τάση και οποιοσδήποτε μηχανισμός αποκατάστασης φορτίου (π.χ. με ρύθμιση της τάσης στη ΜΤ και ΧΤ της διανομής) μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, η απώλεια της μονάδας 300 MW της Μεγαλόπολης πρέπει να αντιμετωπιστεί με αποκοπή φορτίου.

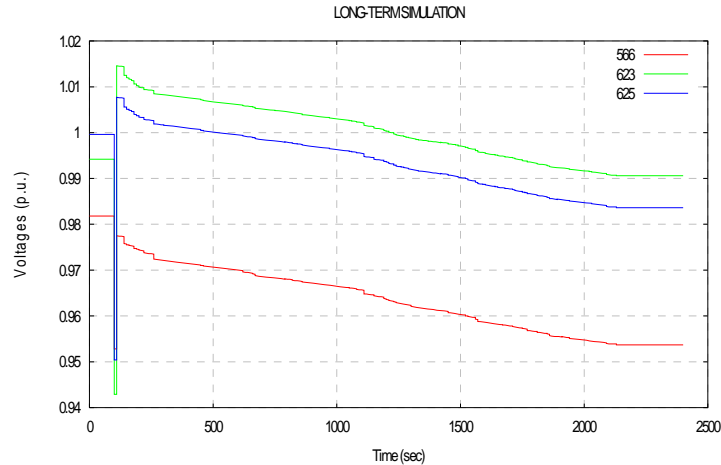
Η αποκοπή φορτίου στην Πελοπόννησο προσομοιώνεται και πάλι με την αυτόματη αποσύνδεση των γραμμών μεταφοράς 150 kV Μεγαλόπολη - Σπάρτη - Μολάοι και Μεγαλόπολη - Καλαμάτα. Η χρονική στιγμή της αποσύνδεσης των γραμμών ορίζεται 10 s μετά την απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη 3, δηλαδή τη χρονική στιγμή $t = 110$ s.

Η αποσύνδεση των γραμμών προκαλεί την απόρριψη του συνολικού φορτίου των ζυγών της Σπάρτης, της Καλαμάτας και των Μολάων. Η συνολικά απορριπτόμενη ζήτηση κατανέμεται στους ζυγούς του Πίν. 7.9 και αντιστοιχεί σε 110,57 MW και 34,96 MVar. Η απόρριψη του βοηθητικού φορτίου της μονάδας Μεγαλόπολη 3 ανέρχεται σε 24,02 MW και 14,44 MVar. Επομένως, η συνολική ζήτηση που απορρίπτεται στο σενάριο αυτό είναι ίση με 134,59 MW και 49,4 MVar. Και πάλι η αρνητική τιμή στην άεργο συνιστώσα του φορτίου ορισμένων ζυγών του πίνακα οφείλεται σε υπεραντιστάθμισή τους.

Πίν. 7.9 Αποκοπή φορτίου στην Πελοπόννησο - Σενάριο Σεπτεμβρίου 2006

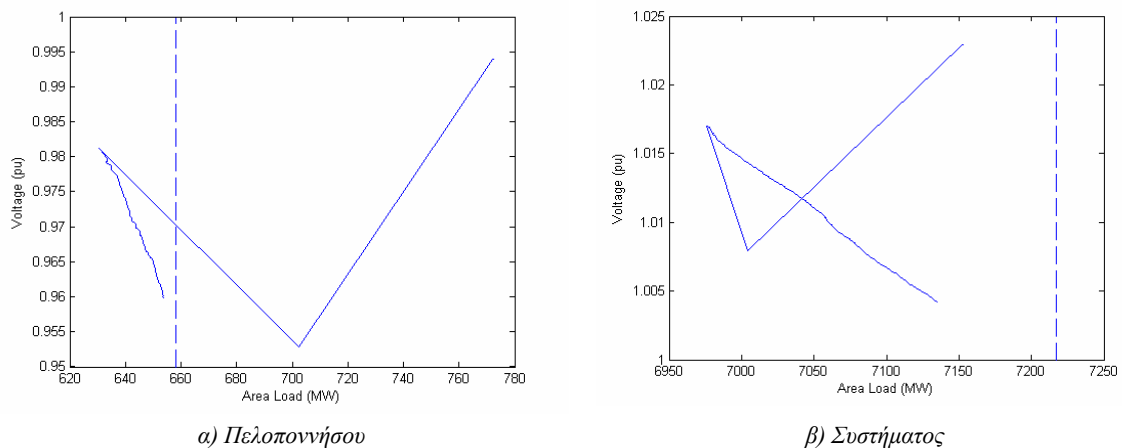
ΖΥΓΟΣ	ΕΝΕΡΓΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (MW)	ΑΕΡΓΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ (MVar)
Σπάρτη-I 51	8,77	-0,17
Σπάρτη-II 51	18,33	6,04
Σπάρτη-II 52	24,37	10,37
Καλαμάτα 51	29,30	15,57
Καλαμάτα 52	21,78	13,45
Μολάοι 51	4,01	-5,15
Μολάοι 52	4,01	-5,15
ΕΝΤΟΛΗ	110,57	34,96
ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ	24,02	14,44
ΣΥΝΟΛΟ	134,59	49,40

Στο Σχ. 7.19 φαίνονται τα διαγράμματα των τάσεων στους κρίσιμους ζυγούς 150 kV Ξυλόκαστρο 31 (566), Πύλος 31 (623) και Κυπαρισσία 31 (625) μετά την αποκοπή φορτίου. Παρατηρούμε τη σταθεροποίηση των τάσεων σε κανονικά επίπεδα λειτουργίας, ενώ σε κανένα ζυγό του συστήματος δεν εμφανίζεται υπέρταση.



Σχ. 7.19 Διάγραμμα τάσεων κρίσιμων ζυγών 150 kV Πελοποννήσου μετά την αποκοπή

Στο Σχ. 7.20α φαίνεται η καμπύλη PV της Πελοποννήσου μετά την αποκοπή φορτίου. Παρατηρούμε ότι σε σχέση με τη ζήτηση που προκύπτει μετά την επιβολή της ράμπας, συμπεριλαμβανόμενης της αποκοπής και της απώλειας των βοηθητικών των μονάδων, υπάρχει μία μικρή απόκλιση της τάξης των 5 MW που είναι αμελητέα. Στο συνολικό φορτίο (Σχ. 7.20β) υπάρχει επίσης μία απόκλιση της τάξης των 80 MW περίπου, η οποία μπορεί να αποδοθεί στη νεκρή ζώνη ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ.



α) Πελοποννήσου

β) Συστήματος

Σχ. 7.20 PV καμπύλες μετά την αποκοπή φορτίου

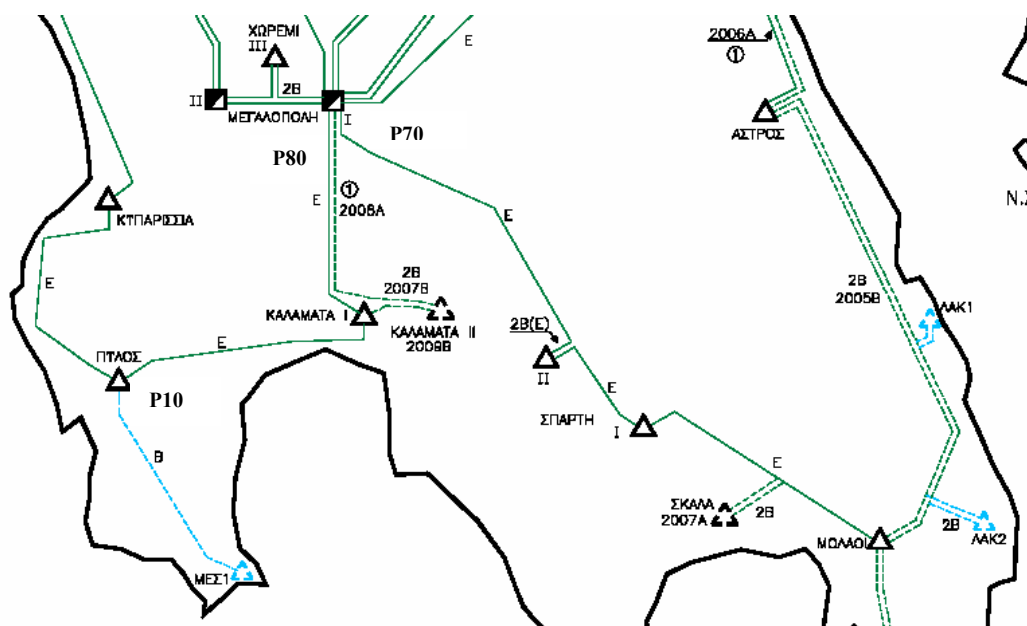
7.3.6 Υλοποίηση

Ο ΔΕΣΜΗΕ παρακολούθησε, στα πλαίσια της ανάθεσης του ερευνητικού έργου [Βου06], την ανάπτυξη της σχεδίασης του σχήματος αποκοπής φορτίου από την Πελοπόννησο και με την ολοκλήρωσή της προχώρησε στην υλοποίησή του.

Η διαδικασία αναγνώρισης της απώλειας παραγωγής στο σταθμό της Μεγαλόπολης, που θα υποδεικνύει τη διαταραχή, ανατίθεται σε δύο διατάξεις PLC (Α και Β) που είναι εγκατεστημένες στον υποσταθμό. Οι διατάξεις αυτές επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω δικτύου ETHERNET, ενώ η μία από αυτές (PLC Α) επικοινωνεί απευθείας με το Κέντρο Ελέγχου Διανομής στο Ρουφ και το Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας του ΔΕΣΜΗΕ στον Αγ. Στέφανο. Το PLC Β δέχεται τις μετρήσεις της παραγόμενης ισχύος των μονάδων 3 και 4 από μορφοτροπείς 4-20 mA, που είναι συνδεδεμένοι στις αναχωρήσεις των μονάδων, και αφού τις αξιολογήσει ως έγκυρες τις αποστέλλει στο PLC Α. Ο αλγόριθμος υπολογισμού της συνολικής παραγωγής των μονάδων 3 και 4 της Μεγαλόπολης εκτελείται στο PLC Α.

Η εντολή απόρριψης φορτίου δίνεται από το PLC Α, εφόσον συντρέχουν ταυτόχρονα οι εξής λόγοι:

- Έχει μετρηθεί συνολική απώλεια παραγωγής της τάξης των 200 MW.
- Το PLC Α έχει οπλιστεί από το Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας.
- Υπάρχει επικοινωνία με το Κέντρο Ελέγχου Διανομής και το PLC Β.



Σχ. 7.21 Περιοχή εφαρμογής σχήματος αποκοπής φορτίου στην Πελοπόννησο

Εφόσον δοθεί η εντολή απόρριψης φορτίου, αποστέλλεται σήμα ανοίγματος του διακόπτη ισχύος P70, στην αναχώρηση της ακτινικής γραμμής 150 kV από τον ΑΗΣ Μεγαλόπολης προς τον υποσταθμό διανομής II της Σπάρτης, καθώς και στους διακόπτες ισχύος P80 στην αναχώρηση της γραμμής 150 kV από τον ΑΗΣ Μεγαλόπολης προς τον υποσταθμό της Καλαμάτας και P10 στην αναχώρηση της γραμμής 150 kV από τον υποσταθμό της Πύλου προς τον υποσταθμό της Καλαμάτας (Σχ. 7.21).

7.3.7 Συμπεράσματα

Για την αντιμετώπιση της ενδεχόμενης απώλειας των μονάδων 3 και 4 της Μεγαλόπολης απαιτείται η αποκοπή φορτίου από την Πελοπόννησο. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε ένα σχήμα προστασίας που θα αποκόπτει φορτίο από την περιοχή με άνοιγμα των γραμμών μεταφοράς Μεγαλόπολη - Σπάρτη - Μολάοι και Μεγαλόπολη - Καλαμάτα.

Η αποκοπή φορτίου με αποσύνδεση των συγκεκριμένων γραμμών μεταφοράς προκαλεί την πλήρη σβέση των πόλεων της Σπάρτης, της Καλαμάτας και των Μολάων και για το λόγο αυτό πρέπει να είναι χρονικά περιορισμένη. Ουσιαστικά η αποσύνδεση των γραμμών μεταφοράς πρέπει να διαρκεί όσο διάστημα χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η χειροκίνητη απόρριψη του φορτίου σε συγκεκριμένους υποσταθμούς διανομής της Πελοποννήσου με βάση προκαθορισμένο πρόγραμμα.

Ο μηχανισμός αποκοπής φορτίου πρέπει να τίθεται σε ετοιμότητα κάθε φορά που η εφαρμογή On-line VSA δίνει μηδενικά ή πολύ μικρά περιθώρια ασφάλειας τάσης για απλή διαταραχή (N-1) στη Μεγαλόπολη και να τίθεται σε εφαρμογή απορρίπτοντας φορτίο με τη μικρότερη δυνατή χρονική καθυστέρηση σε περίπτωση εμφάνισης της κρίσιμης διαταραχής (απώλεια παραγωγής μεγαλύτερη των 200 MW).

Η χρονική καθυστέρηση εφαρμογής της αποσύνδεσης των γραμμών στην περίπτωση του Σεναρίου Μειγστού 2005 καθορίζεται από την ανάγκη να αποφευχθεί η απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη 1 λόγω χαμηλής τερματικής τάσης. Η καθυστέρηση στο σενάριο αυτό δεν πρέπει να υπερβαίνει το λεπτό. Στο Σενάριο Μειγστού 2006 και Σενάριο Σεπτεμβρίου 2006 η εξέλιξη αστάθειας των τάσεων είναι αργή και ο χρόνος εφαρμογής της αποκοπής δεν αποτελεί καθοριστικό παράγοντα. Η αποκοπή συνεπώς θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ακόμη και μερικά λεπτά μετά από την εμφάνιση της διαταραχής.

Στο Σενάριο Μειγστού 2005 η αστάθεια αντιμετωπίζεται με αποκοπή φορτίου 150 MW περίπου (Πίν. 7.6), προκαλώντας υπέρταση σε τρεις ζυγούς. Η αποκοπή των συνδεδεμένων πηνίων σε Ζάκυνθο και Αργοστόλι θα μπορούσε να συμβάλει κατ' αρχάς στη μείωση του αποκοπόμενου φορτίου, ενώ μαζί με τη σύνδεση πυκνωτών τουλάχιστον 60 MVAR στο σταθμό της Μεγαλόπολης θα διατηρούσε το σχήμα αποκοπής φορτίου σε επιφυλακή, ώστε να ενεργοποιηθεί μόνο στην περίπτωση περαιτέρω κλιμάκωσης. Σαφώς, ο έλεγχος της αέργου ισχύος των διατάξεων αντιστάθμισης θα ήταν ωφέλιμος για το σύστημα σε συνθήκες εκτάκτου ανάγκης, όμως δεν προβλέπεται προς το παρόν.

Η αύξηση της ικανότητας παραγωγής αέργου ισχύος της μονάδας Μεγαλόπολη 1 μετά την επισκευή της, αρκεί για την αποφυγή της κατάρρευσης των τάσεων στο νότιο σύστημα μετά από απώλεια των μονάδων Μεγαλόπολη 3 και 4. Η κατασκευή και των άλλων έργων ενίσχυσης (82,2 MVar στατών πυκνωτών και 60 MW ηλεκτροπαραγωγών ζευγών), βελτιώνει ακόμα περισσότερο την ευστάθεια τάσης του συστήματος.

Η αναβάθμιση της ικανότητας παραγωγής αέργου ισχύος της μονάδας Μεγαλόπολη 1 έχει περιληφθεί στη βάση δεδομένων ευστάθειας τάσης του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας. Η αναβάθμιση αυτή συμβάλλει, ώστε να περιοριστεί στο μέλλον η πιθανότητα εμφάνισης μηδενικού ή μικρού περιθωρίου ασφάλειας για απλή ή διπλή διαταραχή στη Μεγαλόπολη. Ωστόσο, παρά τη διόρθωση αυτή, η εφαρμογή On-line VSA εμφανίζει συστηματικά, σε όλο το διάστημα μετά το καλοκαίρι του 2005 (και κυρίως τις περιόδους του καλοκαιριού), πολύ μικρό ή μηδενικό περιθώριο ασφάλειας τάσης για διπλή διαταραχή στη Μεγαλόπολη.

Πράγματι, στα *Σενάρια Μείζοντος 2006* και *Σεπτεμβρίου 2006* το ενδεχόμενο εμφάνισης μίας απλής ή διπλής διαταραχής στη Μεγαλόπολη προκαλεί αστάθεια τάσης στην Πελοπόννησο, παρά την ενίσχυση του συστήματος και την αύξηση της ικανότητας παραγωγής της μονάδας 1 της Μεγαλόπολης. Στο *Σενάριο Μείζοντος 2006* η αστάθεια αντιμετωπίζεται με την αποκοπή φορτίου 180 MW περίπου, σύμφωνα με τον Πίν. 7.8. Στο *Σενάριο Σεπτεμβρίου 2006* το φορτίο που αποκόπτεται είναι περίπου 110 MW και κατανέμεται στους ζυγούς που φαίνονται στον Πίν. 7.9. Σε καμιά από τις δύο αυτές περιπτώσεις δεν παρατηρούνται προβλήματα υπερτάσεων.

Κάτω από συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες στην τοπολογία του συστήματος η εμφάνιση αστάθειας τάσης στην Πελοπόννησο είναι πιθανή ακόμη και σε συνθήκες χαμηλού σχετικά φορτίου (κάτω από 8000 MW). Συνεπώς, η σχεδίαση και λειτουργία του σχήματος αποκοπής φορτίου για την Πελοπόννησο κρίνεται επιβεβλημένη.

7.4 ΣΧΗΜΑ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ

7.4.1 Φιλοσοφία Σχεδίασης

Όπως είδαμε από την εκτίμηση ασφάλειας τάσης του συστήματος για το στιγμιότυπο του καλοκαιριού του 2007 (Πίν. 7.4), υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης στο ενδεχόμενο της διπλής απώλειας των μονάδων συνδυνασμένου κύκλου 4 και 5 στο Λαύριο. Η διαταραχή αυτή προκαλεί συνολική απώλεια παραγωγής 955 MW και είναι πιθανή, καθώς έχει κοινή αιτία εμφάνισης, την αποσύνδεση της γραμμής μεταφοράς 400 kV διπλού κυκλώματος Λαυρίου-Παλλήνης.

Η απώλεια τόσο μεγάλης παραγωγής θα προκαλέσει την αύξηση της εισαγωγής ισχύος από τις βόρειες διασυνδέσεις, με ενδεχόμενο αποτέλεσμα την υπερφόρτιση της γραμμής διασύνδεσης με τη Βουλγαρία Blagoevgrad-Θεσσαλονίκη [Vou06]. Για την προστασία των διασυνδέσεων από υπερφόρτιση εφαρμόζεται από τον ΔΕΣΜΗΕ πρόγραμμα αυτόματων αποκοπών φορτίου από τη Θεσσαλονίκη και την Αττική. Τα στάδια αποκοπής έχουν ρυθμιστεί κατά τέτοιον τρόπο, ώστε η εφαρμογή τους εν γένει να διασφαλίζει τη διατήρηση των διασυνδέσεων. Ωστόσο, ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης των διασυνδέσεων πριν τη διαταραχή και το είδος του φορτίου σε σχέση με τη μεταβατική συμπεριφορά του ως προς την τάση (που δεν μπορεί να προσδιοριστεί επακριβώς), η αποκοπή φορτίου δεν είναι πάντοτε βέβαιη. Υπό προϋποθέσεις, που δεν μπορούν να αποκλειστούν, υπάρχει βάσιμη πιθανότητα η διαταραχή αυτή να μην οδηγήσει σε αποκοπή φορτίου από την προστασία υπερφόρτισης των διασυνδέσεων, με κίνδυνο να προκληθεί η εμφάνιση μακροπρόθεσμη αστάθειας τάσης στο νότιο σύστημα και κατάρρευση τάσης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για την αντιμετώπιση της αστάθειας τάσης του συστήματος που μπορεί να προκληθεί από την ταυτόχρονη απώλεια των μονάδων 4 και 5 του Λαυρίου, απαιτείται η σχεδίαση ενός σχήματος αποκοπής φορτίου από την Αττική. Το σχήμα που σχεδιάστηκε για το σκοπό αυτό ακολουθεί τη λογική της απόκρισης στην εμφάνιση της διαταραχής. Με βάση τη λογική αυτή, ο μηχανισμός αποκοπής φορτίου θα διεγείρεται με την ανίχνευση απότομης απώλειας παραγωγής άνω των 600 MW από το σταθμό του Λαυρίου, η οποία θα υποδεικνύεται από την απότομη μείωση της ροής ισχύος στις

γραμμές της Παλλήνης. Για να εφαρμοστεί η εντολή της αποκοπής φορτίου, πρέπει το σχήμα να έχει προηγουμένως οπλιστεί από τους χειριστές του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας. Αυτό θα γίνεται κάθε φορά που τα αποτελέσματα της εκτίμησης ασφάλειας τάσης του συστήματος από την εφαρμογή On-line VSA για τη διαταραχή αυτή κρίνονται ανασφαλής με βάση και την εμπειρία των χειριστών.

Ως προς τη δυνατότητα αποκοπής φορτίου του σχήματος, διαθέσιμα θεωρούνται τα μπλοκ φορτίου που αντιστοιχούν στις *Περιοχές Αποκοπής* του Πίν. 7.10. Κάθε Περιοχή Αποκοπής απαρτίζεται από επιμέρους *Εντολές Αποκοπής*, οι οποίες ενεργοποιούν το άνοιγμα των διακοπών ισχύος σε προκαθορισμένους υποσταθμούς ή κέντρα διανομής (ΚΔ) στο δίκτυο της Αττικής. Προς το παρόν η δυνατότητα αποκοπής περιορίζεται στην απόρριψη ολόκληρων Περιοχών Αποκοπής, μελλοντικά όμως υπάρχει η πρόβλεψη να αποκόπτεται ανεξάρτητα το φορτίο κάθε Εντολής Αποκοπής. Οι Περιοχές Αποκοπής του πίνακα αντιστοιχούν ουσιαστικά στα τέσσερα στάδια αποκοπής φορτίου από την Αττική του συστήματος προστασίας υπερφόρτισης των διασυνδέσεων. Η επιλογή αυτή έγινε από τον ΔΕΣΜΗΕ και τη ΔΕΗ, ώστε να δοθεί γρήγορη λύση στην αντιμετώπιση του προβλήματος με αξιοποίηση του ήδη υπάρχοντος μηχανισμού αποκοπών.

Στον Πίν. 7.10 αναφέρονται τα ονομαστικά MW απόρριψης ζήτησης για κάθε Εντολή Αποκοπής, δηλαδή τα MW που αναμένονται να απορριφθούν με την εφαρμογή της Εντολής. Αντίστοιχα, τα MW των Περιοχών Αποκοπής αναφέρονται στα ονομαστικά MW απόρριψης ζήτησης από το σύνολο των Εντολών Αποκοπής που απαρτίζουν την Περιοχή. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι για τις αποκοπές φορτίου που αντιστοιχούν στις Εντολές Αποκοπής 4α, 6β και 7 (που σημειώνονται με αστερίσκο στον πίνακα) υπάρχουν περιστασιακά προβλήματα εφαρμογής. Κατά συνέπεια, προκειμένου η σχεδίαση του σχήματος να αξιολογηθεί από την ασφαλή πλευρά, θεωρήθηκε ότι οι συγκεκριμένες Εντολές Αποκοπής δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν. Επίσης παρατηρήθηκε ότι από τα 90 MW που θα έπρεπε να είναι διαθέσιμα προς αποκοπή με την Εντολή Αποκοπής 1 (σημειώνονται επίσης με αστερίσκο στον πίνακα), λόγω τεχνικών προβλημάτων μόνο 10 MW μπορούν να αποκοπούν.

Η σχεδίαση του σχήματος αποκοπής φορτίου από την Αττική βασίζεται στο στιγμιότυπο του συστήματος που κατασκευάστηκε τεχνητά για το καλοκαίρι του 2007. Το συγκεκριμένο στιγμιότυπο, που εφεξής θα ονομάζεται *Σενάριο Καλοκαιριού 2007*, αντιστοιχεί σε ένα ιδιαίτερα δυσμενές σημείο λειτουργίας του συστήματος, καθώς έχει υποθεθεί η μη διαθεσιμότητα μίας μονάδας 300 MW στη Μεγαλόπολη και υψηλό φορτίο με σημαντική επαγωγική συμπεριφορά. Σε σχέση με τη διαθεσιμότητα των φορτίων προς αποκοπή, πρέπει να σημειωθεί ότι στο στιγμιότυπο αυτό, το φορτίο στην Καλλιθέα δεν υπερβαίνει τα 80 MW, παρόλο που η Εντολή Αποκοπής 5 αντιστοιχεί σε ονομαστική αποκοπή 97,6 MW.

Πίν. 7.10 Πρόγραμμα αποκοπής φορτίου από την Αττική

ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ 1 (260 MW)		
Εντολή Αποκοπής 1 ^(*)	90 MW	ΥΣ Ασπροπύργου, Ελευσίνας, Αιγάλεω, Χαϊδαρίου, Νίκαιας
Εντολή Αποκοπής 2	168,7 MW	ΚΔ Αιγάλεω
ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ 2 (230 MW)		
Εντολή Αποκοπής 3	188,6 MW	ΚΔ Ν. Ιωνίας, ΚΥΤ Αχαρνών, ΥΣ Αγ. Στεφάνου, ΥΣ Ν. Χαλκηδόνος
Εντολή Αποκοπής 4α ^(*)	39,5 MW	ΥΣ Ν. Κόσμου, Καλλιθέας, Υμηττού, Ηλιούπολης, Καλαμακίου
ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ 3 (250 MW)		
Εντολή Αποκοπής 4β	79,7 MW	ΚΔ Πειραιά
Εντολή Αποκοπής 5	97,6 MW	ΚΔ Καλλιθέας
Εντολή Αποκοπής 6α	38,7 MW	ΥΣ Ταμπουρίων, Πηγάδας, Πειραιϊκής, Λεύκας, Ταύρου
Εντολή Αποκοπής 6β ^(*)	34,5 MW	ΚΔ Ελευθερίας
ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ 4 (230 MW)		
Εντολή Αποκοπής 7 ^(*)	150,7 MW	ΚΔ Ν. Σμύρνης, Παγκρατίου
Εντολή Αποκοπής 8	79 MW	ΚΔ Ψυχικού, ΥΣ Παλλήνης

7.4.2 Σενάριο Καλοκαιριού 2007

Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν γίνονται με το πρόγραμμα WPSTAB και για την εκτέλεσή τους ακολουθείται η μεθοδολογία της παραγράφου 7.3.2.

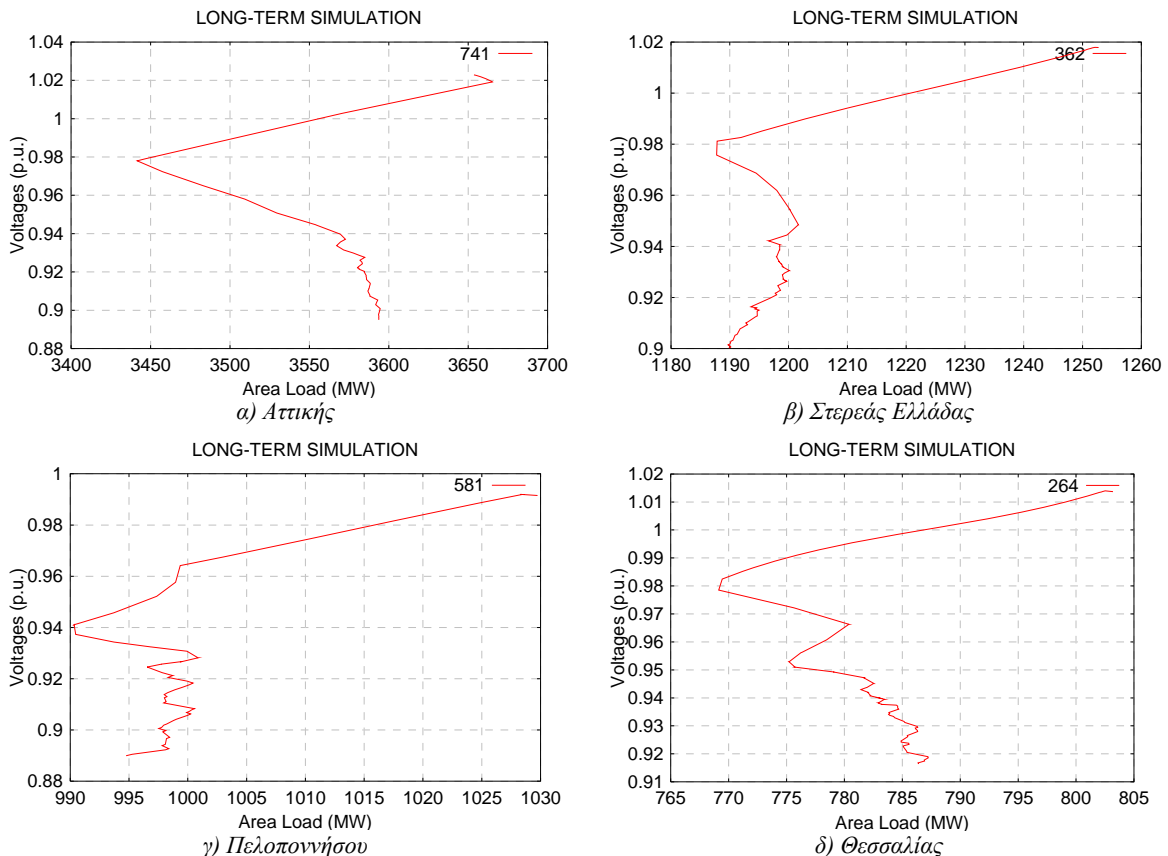
Ανάλυση φαινομένου αστάθειας τάσης

Στο Σενάριο Καλοκαιριού 2007 το συνολικό φορτίο του συστήματος ανέρχεται στο επίπεδο των 10341 MW (συμπεριλαμβάνοντας τα βοηθητικά των σταθμών παραγωγής, αλλά όχι τις απώλειες). Από το συνολικό φορτίο, το φορτίο των τελικών καταναλωτών που συμμετέχει σε αύξηση της ζήτησης ανέρχεται σε 8808 MW, ενώ τα βοηθητικά των σταθμών παραγωγής μαζί με τα βιομηχανικά φορτία ανέρχονται σε 1533 MW και θεωρούνται σταθερά.

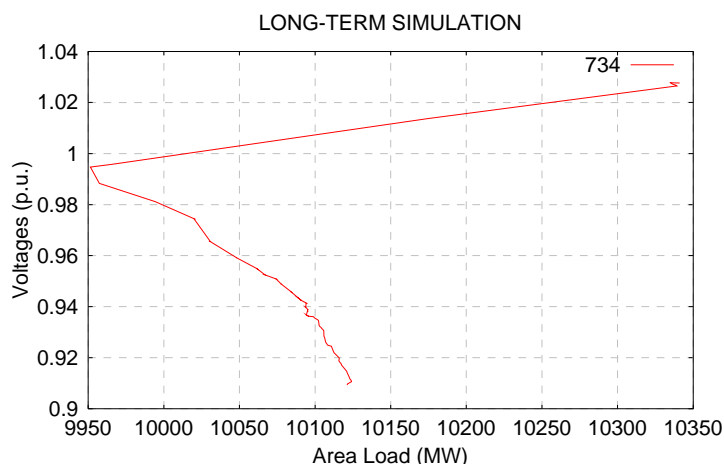
Η διαταραχή που προσομοιώνεται είναι η απώλεια των μονάδων Λαύριο 4 και Λαύριο 5 κατά τις χρονικές στιγμές $t = 200$ s και $t = 210$ s αντίστοιχα και η επιβολή στη συνέχεια ομοίμορφης και αναλογικής αύξησης στο φορτίο με ρυθμό $r = 0,0071\%/s$ για χρονικό διάστημα 500 s (από $t = 420$ s ως $t = 920$ s). Ο ρυθμός αυτός αντιστοιχεί σε αύξηση του συνολικού φορτίου του συστήματος κατά 300 MW περίπου.

Κάτω από τέτοιες συνθήκες υψηλής φόρτισης και με τη μονάδα 3 της Μεγαλόπολης μη διαθέσιμη, το σύστημα μετά τη διπλή απώλεια των μονάδων 4 και 5 του Λαυρίου, που ισοδυναμεί με απώλεια συνολικής παραγωγής 955 MW, αδυνατεί να αποκαταστήσει μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας και καταρρέει. Η προσομοίωση σταματά με την απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας.

Στο Σχ. 7.22 φαίνονται οι καμπύλες PV των πλέον θιγόμενων περιοχών (Αττική, Στερεά Ελλάδα, Πελοπόννησος, Θεσσαλία) από τη συγκεκριμένη διαταραχή. Η PV καμπύλη του Σχ. 7.23 απεικονίζει την τάση του ζυγού 150 kV στο Ρουφ συναρτήσει του συνολικού φορτίου του συστήματος. Είναι εμφανές ότι το φορτίο δεν μπορεί να αποκατασταθεί στην προβλεπόμενη ζήτηση και κάθε απόπειρα αποκατάστασής του οδηγεί σε συνεχή μείωση των τάσεων στις θιγόμενες περιοχές. Το πρόβλημα φαίνεται να είναι εντονότερο στην Πελοπόννησο και στη Στερεά Ελλάδα, όπου η διαδικασία αποκατάστασης του φορτίου έχει γίνει ασταθής. Κατά συνέπεια, υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες η απώλεια των δυο μονάδων του Λαυρίου οδηγεί σε γενικευμένη κατάρρευση του νοτίου συστήματος.

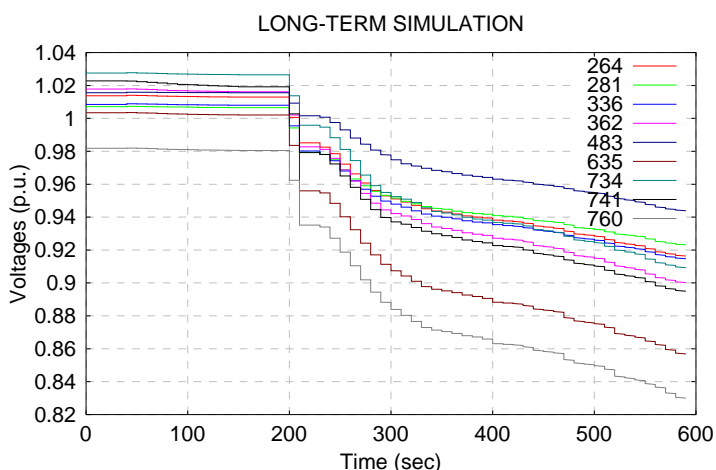


Σχ. 7.22 PV καμπύλες περιοχών



Σχ. 7.23 PV καμπύλη συστήματος

Στο Σχ. 7.24 παρουσιάζονται οι τάσεις σε κρίσιμους ζυγούς 150 kV της Αττικής, της Στερεάς Ελλάδας και της Θεσσαλίας μετά τη θεωρούμενη διαταραχή. Πρόκειται για τους ζυγούς Αχλάδι 31 (264), Βόλος 31 (281), Αλμυρός 31 (336), Σχηματάρι 31 (362), Ηγουμενίτσα 31 (483), Αχαρναί 31 (635), Ρουφ 31 (734), Ν. Χαλκηδόνα 31 (741) και Ψυχικό 31 (760). Όπως φαίνεται, η πτώση των τάσεων μετά την απώλεια των μονάδων του Λαυρίου είναι μεγάλη και υπό την αύξηση της ζήτησης του φορτίου το σύστημα οδηγείται σε κατάρρευση.



Σχ. 7.24 Διάγραμμα τάσεων κρίσιμων ζυγών 150 kV Αττικής, Στερεάς Ελλάδας, Θεσσαλίας

Προσδιορισμός ελάχιστης αναγκαίας αποκοπής φορτίου με βάση τις Περιοχές Αποκοπής

Στη συνέχεια για την εφαρμογή της αποκοπής φορτίου χρησιμοποιούνται οι ευαισθησίες της τάσης αντί αυτών του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος ως προς τις παραμέτρους φορτίου. Αυτό γίνεται γιατί οι ευαισθησίες της τάσης παρέχουν ακριβέστερη πληροφορία σχετικά με τα πιο αποδοτικά φορτία για αποκοπή, όταν αυτή εφαρμόζεται σε σημεία λειτουργίας του συστήματος πριν την εμφάνιση της αστάθειας. Αντίθετα οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης υπολογίζονται στο όριο φόρτισης του συστήματος, παρέχοντας έτσι ακριβή πληροφορία στο σημείο εμφάνισης της αστάθειας. Η πληροφορία αυτή αποκομίζεται εξίσου από τις ευαισθησίες της τάσης εάν ο υπολογισμός τους γίνει στο κρίσιμο σημείο.

Για τον προσδιορισμό της ελάχιστης αποκοπής φορτίου από τις Περιοχές Αποκοπής του Πίν. 7.10, απαιτείται η ιεράρχηση των Περιοχών με βάση την αποδοτικότητά τους ως προς την αύξηση των τάσεων του συστήματος που επιτυγχάνεται με την αποκοπή φορτίου από αυτές. Η αποδοτικότητα αυτή προσδιορίζεται (σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.5.2), από την ευαισθησία e_k κάθε Περιοχής Αποκοπής:

$$e_k = \frac{\Delta V_l}{\Delta P_k^{shed}} \quad (7.1)$$

Η ευαισθησία e_k εκφράζει την αύξηση ΔV_l της τάσης του ασθενέστερου ζυγού l του συστήματος για αποκοπή φορτίου ΔP_k^{shed} από την Περιοχή Αποκοπής k ($k = 1, \dots, 4$).

Ο ασθενέστερος ζυγός του συστήματος είναι ο ζυγός 150 kV Μαρούσι 31, ο οποίος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη πτώση τάσης μεταξύ των ζυγών ΥΤ μετά τη διαταραχή. Η μεταβολή της τάσης του ζυγού Μαρούσι 31 ως προς τα MW αποκοπής από κάθε Περιοχή Αποκοπής υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$\Delta V_l \approx \sum_{i=1}^{N_k} \tilde{S}_{V_l P_i} \Delta P_{o,i} \quad (7.2)$$

όπου $\Delta P_{o,i}$ είναι η αποκοπή της ζήτησης από κάθε ζυγό i ($i = 1, \dots, N_k$) της Περιοχής Αποκοπής k .

Οι ευαισθησίες $\tilde{S}_{V_l P_i}$ της τάσης του ζυγού Μαρούσι 31 ως προς τις παραμέτρους ζήτησης, υπολογίζονται τη χρονική στιγμή $t = 210$ s της προσομοίωσης (αμέσως μετά τη διπλή διαταραχή) σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 5.5.3 του πέμπτου κεφαλαίου. Το διάγραμμα των ευαισθησιών παρατίθενται στο Παράρτημα Ε.

Η συνολική αποκοπή φορτίου ΔP_k^{shed} από κάθε Περιοχή Αποκοπής k προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta P_k^{shed} = - \sum_{i=1}^{N_k} P_{o,i} \quad (7.3)$$

Η μέθοδος αυτή οδήγησε στην ιεράρχηση των Περιοχών Αποκοπής που παρουσιάζεται στον Πίν. 7.11, όπου έχει ληφθεί υπόψη η πραγματική δυνατότητα απόρριψης φορτίου από κάθε Περιοχή Αποκοπής σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν στην παράγραφο 7.4.1. Όπως φαίνεται, η μεγαλύτερη ενίσχυση των τάσεων ανά αποκοπόμενο MW επιτυγχάνεται με αποκοπή φορτίου από την Περιοχή Αποκοπής 2. Μικρότερη κατά 20% αποτελεσματικότητα περικοπής εμφανίζει η Περιοχή Αποκοπής 4, ενώ η αποτελεσματικότητα των Περιοχών Αποκοπής 1 και 3 κυμαίνεται στο 54-58% της Περιοχής 2.

Πίν. 7.11 Ιεράρχηση Περιοχών Αποκοπής στην Αττική

ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ	- e_k	- ΔP_k (MW)	ΔV_l
2	0,02048	189	0,0387
4	0,01638	80	0,0131
1	0,01202	180	0,0216
3	0,01101	200	0,0220

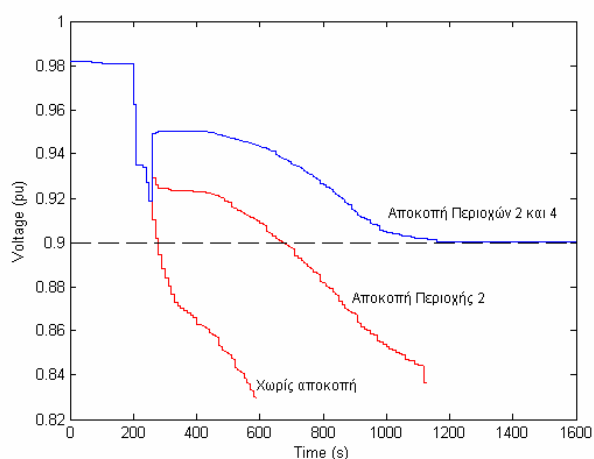
Συνεπώς, για τον προσδιορισμό της ελάχιστης αποκοπής εφαρμόζεται αρχικά η απόρριψη του συνολικού φορτίου της πιο αποτελεσματικής Περιοχής Αποκοπής (Περιοχή 2) και ελέγχεται η ευστάθεια του συστήματος. Η απόρριψη αυτή γίνεται τη χρονική στιγμή $t = 260$ s της προσομοίωσης, δηλαδή 50 s μετά τη διαταραχή. Επειδή η αστάθεια εξακολουθεί μετά την απόρριψη του φορτίου της Περιοχής Αποκοπής 2, εφαρμόζεται εκ νέου η προσομοίωση με αποκοπή του φορτίου και της δεύτερης πιο αποτελεσματικής Περιοχής Αποκοπής (Περιοχή 4) κατά την ίδια χρονική στιγμή. Η ταυτόχρονη απόρριψη του φορτίου των Περιοχών Αποκοπής 2 και 4 επιφέρει ισορροπία στο σύστημα.

Επομένως, η ελάχιστη αναγκαία αποκοπή για την αποκατάσταση της ευστάθειας τάσης του συστήματος είναι αυτή που φαίνεται αναλυτικά στον Πίν. 7.12 και ανέρχεται σε 269 MW και 94 MVar. Στις περιπτώσεις που λόγω υπεραντιστάθμισης η άεργος συνιστώσα του φορτίου εμφανίζεται αρνητική, δεν πραγματοποιείται αποκοπή στην άεργο συνιστώσα. Επειδή με την αποσύνδεση των μονάδων 4 και 5 του Λαυρίου έχουμε απόρριψη φορτίου 20,49 MW και 6,51MVar (βοηθητικά των μονάδων) η συνολική ζήτηση που απορρίπτεται ανέρχεται τελικά σε 289,49 MW και 100,51 MVar.

Πίν. 7.12 Ελάχιστη αναγκαία αποκοπή φορτίου με βάση τις Περιοχές Αποκοπής

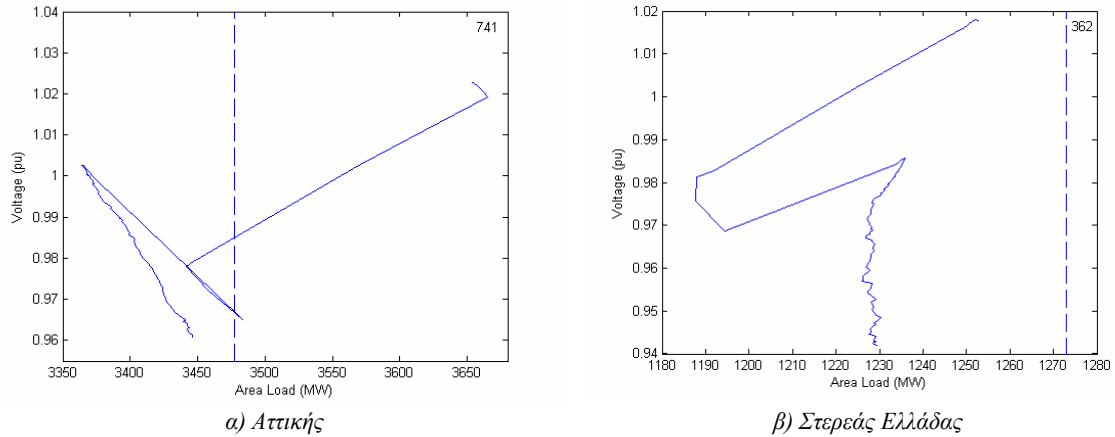
ΖΥΓΟΣ	ΑΡΧΙΚΗ ΖΗΤΗΣΗ (MW / MVar)	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΚΟΠΩΝ (MW / MVar)
ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ 2		
Αγ. Στέφανος 51	38,13 / -3,19	15,85 / 0
Αγ. Στέφανος 52	38,85 / 26,45	16,15 / 11,00
Αχαρναί 51	34,86 / 18,57	11,23 / 5,98
Αχαρναί 52	27,21 / -2,58	8,77 / 0
Ν. Ιωνία 31	68,75 / 31,78	31,08 / 14,37
Ν. Ιωνία 32	152,44 / 36,52	68,92 / 16,51
Ν. Χαλκηδόνα 51	36,61 / 0	11,59 / 0
Ν. Χαλκηδόνα 52	33,74 / 21,94	10,68 / 6,95
Ν. Χαλκηδόνα 53	46,52 / 35,02	14,73 / 11,09
ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ 4		
Παλλήνη 51	42,22 / -0,16	12,88 / 0
Παλλήνη 52	39,73 / 22,79	12,12 / 6,95
Ψυχικό 31	187,57 / 61,05	27,39 / 8,92
Ψυχικό 32	2,3 / 17,72	0,34 / 2,62
Ψυχικό 33	80,38 / 35,82	11,74 / 5,23
Ψυχικό 34	106,46 / 30,10	15,54 / 4,39
ΣΥΝΟΛΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ		269,00 / 94,00
ΑΠΩΛΕΙΑ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ		20,49 / 6,51
ΣΥΝΟΛΟ ΑΠΟΚΟΠΗΣ		289,49 / 100,51

Η αποκατάσταση της ισορροπίας στο σύστημα φαίνεται με τη βοήθεια του Σχ. 7.25, στο οποίο παρουσιάζεται η τάση του ζυγού 150 kV του Ψυχικού (χαμηλότερη εμφανιζόμενη τάση στο σύστημα) πριν και μετά την αποκοπή φορτίου από τις Περιοχές Αποκοπής 2 και 4. Στο ίδιο σχήμα εμφανίζεται και η περίπτωση που αποκόπτεται μόνο η Περιοχή Αποκοπής 2. Όπως φαίνεται, η αποκοπή αυτή δεν αρκεί για να ισορροπήσει το σύστημα.



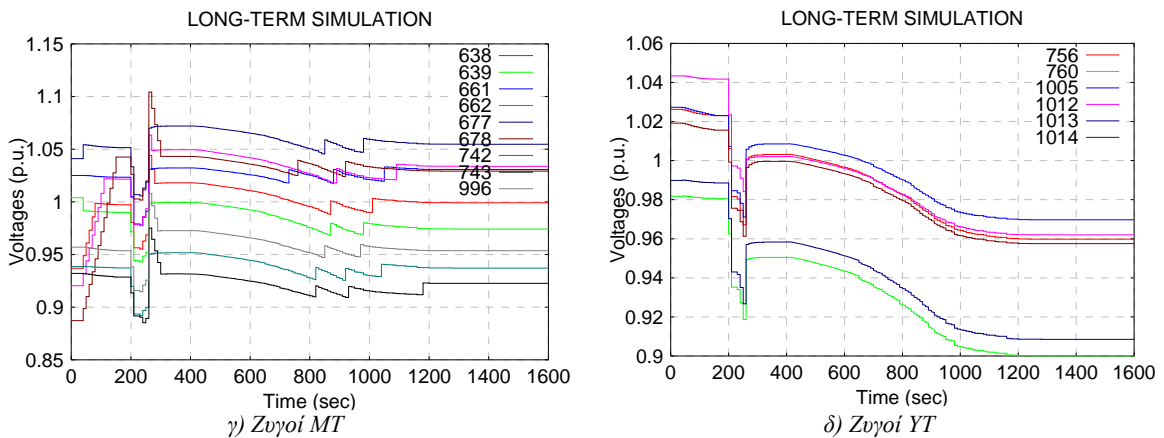
Σχ. 7.25 Διάγραμμα τάσης ζυγού 150 kV Ψυχικού (ελάχιστη τάση)

Στο Σχ. 7.26 φαίνονται οι καμπύλες PV της Αττικής και της Στερεάς Ελλάδας μετά τη διαταραχή και την αποκοπή του φορτίου. Παρατηρούμε ότι το σύστημα ισορροπεί, όμως το φορτίο δεν αποκαθίσταται πλήρως στη ζήτηση που προκύπτει μετά την επιβολή της ράμπας, συμπεριλαμβανόμενης της αποκοπής και της απώλειας των βοηθητικών των μονάδων, εξαιτίας της νεκρής ζώνης ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ. Όμοια είναι η συμπεριφορά του φορτίου στην Πελοπόννησο και τη Θεσσαλία.



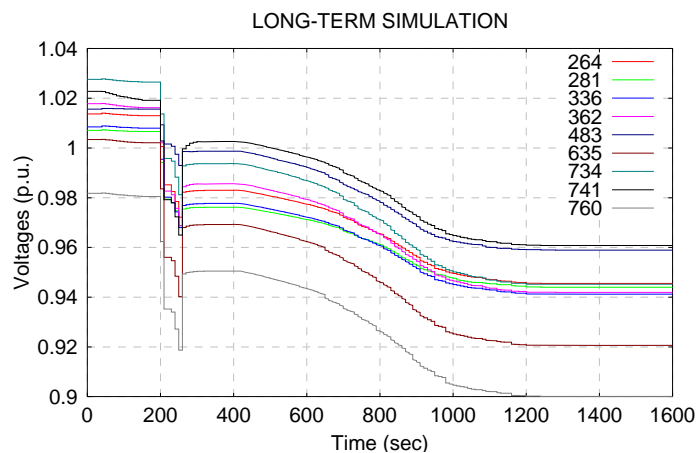
Σχ. 7.26 Καμπύλη PV μετά την αποκοπή φορτίου

Στο Σχ. 7.27α (αντίστοιχα Σχ. 7.27β) παρουσιάζονται οι τάσεις στους ζυγούς 20 kV (αντίστοιχα 150 kV), από τους οποίους πραγματοποιείται αποκοπή φορτίου. Όπως φαίνεται, δεν εμφανίζονται υπερτάσεις κατά την αποκοπή, εκτός από μια μικρή υπέρβαση του 110% στο ζυγό 20 kV Αγ. Στέφανος 51 (678).



Σχ. 7.27 Διάγραμμα τάσεων μετά την αποκοπή φορτίου

Στο Σχ. 7.28 παρουσιάζονται οι τάσεις των κρίσιμων ζυγών 150 kV της Αττικής, της Στερεάς Ελλάδας και της Θεσσαλίας μετά την εφαρμογή της αποκοπής φορτίου. Πρόκειται για τους ζυγούς Αχλάδι 31 (264), Βόλος 31 (281), Αλμυρός 31 (336), Σχηματάρι 31 (362), Ηγουμενίτσα 31 (483), Αχαρναί 31 (635), Ρουφ 31 (734), Ν. Χαλκηδόνα 31 (741) και Ψυχικό 31 (760). Όπως φαίνεται, οι τάσεις είναι ευσταθείς και παραμένουν πάνω από το 90% ακόμη και μετά την επιβληθείσα αύξηση της ζήτησης. Κατά συνέπεια, η πραγματοποιηθείσα αποκοπή είναι επαρκής για την αποκατάσταση του συστήματος μετά την εξεταζόμενη διαταραχή.



Σχ. 7.28 Διάγραμμα τάσεων ζυγών 150 kV Αττικής, Στερεάς Ελλάδας και Θεσσαλίας μετά την αποκοπή φορτίου

7.4.3 Επανεξέταση Διαθέσιμων Εντολών Αποκοπής Φορτίου στην Αττική

Στις 15:57 της 22^{ης} Ιουνίου 2006 μία ανωμαλία στο εξωτερικό σύστημα (πτώση της γραμμής μεταφοράς 400 kV Νις-Κοσόβου) προκάλεσε τη διέλευση υψηλού ρεύματος από τη διασύνδετική γραμμή Βουλγαρίας – Ελλάδας, με αποτέλεσμα να λειτουργήσουν οι μηχανισμοί αυτόματης απόρριψης φορτίου στις περιοχές της Αττικής και της Θεσσαλονίκης για την προστασία της διασύνδεσης. Μετά την απόρριψη του φορτίου ξεκίνησε σταδιακά η επανηλεκτροδότηση των καταναλωτών, η οποία ολοκληρώθηκε για μεν την Αττική σε 52 λεπτά για δε τη Θεσσαλονίκη σε 56 λεπτά [Dei06].

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 7.4.1, το παραπάνω σχήμα αποκοπής φορτίου για την προστασία της διασύνδεσης από υπερφόρτιση πραγματοποιεί αποκοπές φορτίου από την Αττική σε στάδια, που συμπίπτουν με τις Περιοχές Αποκοπής του Πίν. 7.10. Επομένως, οι αποκοπές που πραγματοποιήθηκαν στην Αττική την 22^η Ιουνίου 2006 έγιναν από τις τέσσερις Περιοχές Αποκοπής του πίνακα. Ωστόσο, από τη μέτρηση του φορτίου που αποκόπηκε στο συγκεκριμένο περιστατικό, προέκυψε ότι ορισμένες Εντολές Αποκοπής του προγράμματος αποκοπών δεν ενεργοποιήθηκαν.

Το γεγονός αυτό οδήγησε σε μία απόκλιση του πραγματικά απορριπτόμενου φορτίου των Περιοχών Αποκοπής από αυτό που αναμενόταν με βάση το πρόγραμμα του Πίν. 7.10. Η σύγκριση μεταξύ της πραγματικής αποκοπής φορτίου στις 22 Ιουνίου 2006 και της ονομαστικής φαίνεται στον Πίν. 7.13, όπου παρατηρείται ότι η αποκοπή φορτίου από την Περιοχή Αποκοπής 4 δεν υλοποιήθηκε.

Πίν. 7.13 Διαθέσιμα προς αποκοπή φορτία από κάθε Περιοχή Αποκοπής

ΕΝΤΟΛΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΑΠΟΚΟΠΗ (MW)	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΚΟΠΗ ΣΤΙΣ 22/6/2006 (MW)	ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ
1	90	24,0	1
2	170	158,6	
3	190	155,8	2
4α	40	31,7	
4β	80	88,5	3
5	100	68,4	
6α	40	34,6	
6β	35	30,8	4
7	150	–	
8	80	–	
ΣΥΝΟΛΟ	975	592,4	

Υπενθυμίζουμε ότι στην προσομοίωση του *Σεναρίου Καλοκαιριού 2007* (παράγραφος 7.4.2), οι Εντολές Αποκοπής 4α, 6β και 7 θεωρήθηκαν ότι δεν μπορούν να δοθούν λόγω προβλημάτων στους μηχανισμούς απόρριψης του φορτίου. Επίσης η Εντολή Αποκοπής 1 φάνηκε να αποκόπτει μόνο 10 MW αντί των αναμενόμενων 90 MW. Με βάση τις πραγματοποιηθείσες στις 22/6/2006 αποκοπές φορτίου, προκύπτουν νέα δεδομένα ως προς τη διαθεσιμότητα των Εντολών Αποκοπής. Συγκεκριμένα:

- Η Εντολή 1 εξακολουθεί να μην προκαλεί την αποκοπή του συνολικά αναμενόμενου φορτίου.
- Οι Εντολές 4α και 6β είναι πλέον διαθέσιμες, καθώς για την προστασία της διασύνδεσης από την υπερφόρτιση αποκόπηκαν τα φορτία που αντιστοιχούν σε αυτές.
- Η Εντολή 7 εξακολουθεί να μένει ανενεργή.
- Η Εντολή 8 που δεν παρουσίαζε πρόβλημα φαίνεται να είναι ανενεργή, καθώς στο περιστατικό της υπερφόρτισης της διασύνδεσης δεν αποκόπηκαν τα φορτία που αντιστοιχούν σε αυτή.

Κατά συνέπεια, θεωρώντας ως διαθέσιμα προς αποκοπή φορτία από την Αττική αυτά που πραγματικά αποκόπηκαν την 22^η Ιουνίου 2006, προκύπτει ότι ουσιαστικά ολόκληρη η Περιοχή Αποκοπής 4 (Εντολές Αποκοπής 7 και 8) του προγράμματος αποκοπών δεν είναι διαθέσιμη.

Η Περιοχή Αποκοπής 4 είχε ιεραρχηθεί ως η δεύτερη πιο αποτελεσματική (Πίν. 7.11) για την αντιμετώπιση της αστάθειας στο *Σενάριο Καλοκαιριού 2007*. Μάλιστα η αποκοπή του φορτίου της Περιοχής Αποκοπής 4 είναι απαραίτητη για την ισορροπία του συστήματος, όπως πολύ παραστατικά φαίνεται στο Σχ. 7.25. Δεδομένου λοιπόν ότι η Περιοχή Αποκοπής 4 δεν είναι πλέον διαθέσιμη, θα πρέπει στο σχήμα αποκοπής φορτίου να προστεθεί η Περιοχή Αποκοπής 1, που αποτελεί την τρίτη πιο αποτελεσματική περιοχή σύμφωνα με τον Πίν. 7.11, ώστε να διασφαλιστεί η ευστάθεια των τάσεων του συστήματος μετά την αποκοπή.

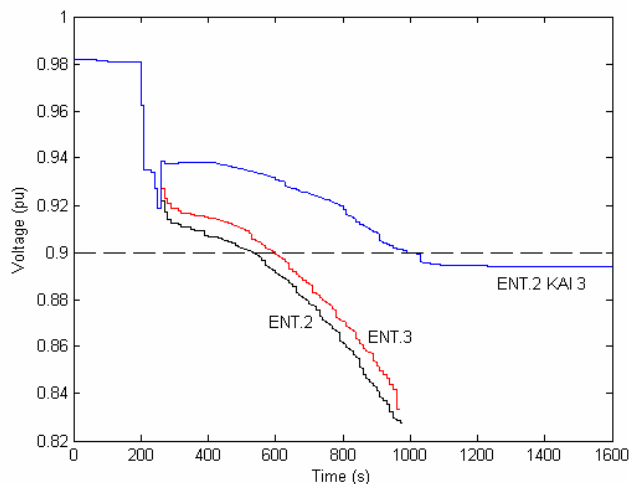
Στην υλοποίηση του σχήματος από τον ΔΕΣΜΗΕ, καθορίστηκε η αποκοπή φορτίου να γίνεται με εφαρμογή των Εντολών Αποκοπής 2 και 3 (των Περιοχών Αποκοπής 1 και 2 αντίστοιχα). Συνεπώς, διαθέσιμα προς αποκοπή φορτία θεωρούνται τελικά αυτά που πραγματικά αποκόπηκαν την 22^α Ιουνίου 2006 με εφαρμογή των Εντολών Αποκοπής 2 και 3 (Πίν. 7.13).

Επαναλαμβάνοντας την προσομοίωση του *Σεναρίου Καλοκαιριού 2007* με εφαρμογή των Εντολών Αποκοπής 2 και 3, αποκόπτεται συνολική ζήτηση 314,4 MW και 90,64 MVar. Προσθέτοντας και το φορτίο των βοηθητικών των μονάδων Λαύριο 4 και 5, που απορρίπτεται τη στιγμή της αποσύνδεσής τους, η συνολική ζήτηση που αποκόπτεται ανέρχεται σε 334,89 MW και 107,02 MVar. Είναι εμφανές ότι επειδή η αποκοπή δεν εφαρμόζεται στα πιο αποδοτικά φορτία, η συνολικά απορριπτόμενη ζήτηση είναι μεγαλύτερη από αυτή που αποκόπηκε από τις Περιοχές Αποκοπής 2 και 4 (314,4 MW αντί 269 MW). Η απορριπτόμενη ζήτηση ανά Εντολή Αποκοπής και ζυγό φαίνεται αναλυτικά στον Πίν. 7.14.

Πίν. 7.14 Τελικό σχήμα αποκοπών στην Αττική

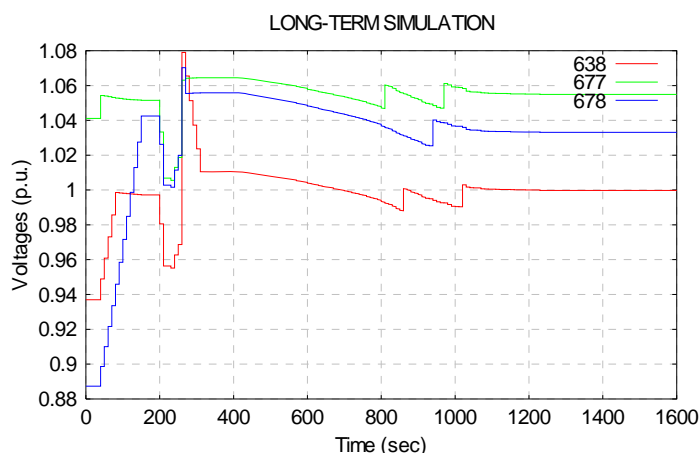
ΖΥΓΟΣ	ΑΡΧΙΚΗ ΖΗΤΗΣΗ (MW / MVar)	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΚΟΠΩΝ (MW / MVar)
ΕΝΤΟΛΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ 2		
Αιγάλεω 31	68,06 / 12,57	52,64 / 9,72
Αιγάλεω 32	135,63 / 36,23	104,9 / 28,02
Αιγάλεω 33	1,37 / -6,72	1,06 / 0
ΕΝΤΟΛΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ 3		
Αγ. Στέφανος 51	38,13 / -3,19	7,23 / 0
Αγ. Στέφανος 52	38,85 / 26,45	7,37 / 5,02
Αχαρναί 51	34,86 / 18,57	24,37 / 12,98
Αχαρναί 52	27,21 / -2,58	19,03 / 0
Ν. Ιωνία 31	68,75 / 31,78	22,22 / 10,27
Ν. Ιωνία 32	152,44 / 36,52	49,28 / 11,81
Ν. Χαλκηδόνα 51	36,61 / 0	8,24 / 0
Ν. Χαλκηδόνα 52	33,74 / 21,94	7,59 / 4,94
Ν. Χαλκηδόνα 53	46,52 / 35,02	10,47 / 7,88
ΣΥΝΟΛΟ ΕΝΤΟΛΩΝ		314,4 / 90,64
ΑΠΩΛΕΙΑ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ		20,49 / 6,51
ΣΥΝΟΛΟ ΑΠΟΚΟΠΗΣ		334,89 / 107,02

Η κατάρρευση του συστήματος αποσοβείται και σε αυτήν την περίπτωση. Η αποκατάσταση της ισορροπίας φαίνεται με τη βοήθεια του Σχ. 7.29, στο οποίο παρουσιάζεται η τάση του ζυγού 150 kV του Ψυχικού (χαμηλότερη εμφανιζόμενη τάση στο σύστημα) μετά την αποκοπή του συνολικού φορτίου που αντιστοιχεί στις Εντολές Αποκοπής 2 και 3. Στο ίδιο σχήμα εμφανίζεται και η περίπτωση που αποκόπτεται μόνο το φορτίο που αντιστοιχεί στην Εντολή Αποκοπής 2 ή στην Εντολή Αποκοπής 3. Όπως φαίνεται, η αποκοπή του φορτίου από μία μόνο Εντολή δεν αρκεί για να ισορροπήσει το σύστημα. Εκείνο που παρατηρείται επίσης, εν συγκρίσει με την αποκοπή φορτίου από τις Περιοχές Αποκοπής 2 και 4, είναι ότι η τάση του ζυγού ισορροπεί σε χαμηλότερο επίπεδο παρά το γεγονός ότι το συνολικό φορτίο που αποκόπτεται είναι περισσότερο.



Σχ. 7.29 Διάγραμμα τάσης ζυγού 150 kV Ψυχικού

Στο Σχ. 7.30 παρουσιάζονται οι ζυγοί στους οποίους εμφανίζονται υπερτάσεις κατά την αποκοπή. Συγκεκριμένα παρατηρείται υπέρβαση πάνω από το 5% της ονομαστικής τάσης στους ζυγούς 20 kV του Αγ. Στεφάνου (677 και 678) και των Αχαρνών (638). Καμία υπέρταση δεν παρατηρείται στους υπόλοιπους ζυγούς, όπου πραγματοποιείται αποκοπή φορτίου.



Σχ. 7.30 Διάγραμμα τάσης ζυγών ΜΤ

7.4.4 Θεωρητικά Ελάχιστη Αποκοπή Φορτίου από την Αττική

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η ελάχιστη αποκοπή φορτίου που μπορεί θεωρητικά να πραγματοποιηθεί στην Αττική για την αντιμετώπιση της διπλής διαταραχής της απώλειας των μονάδων 4 και 5 στο Λαύριο. Είδαμε νωρίτερα, ότι στην υλοποίηση του σχήματος αποκοπής φορτίου από τον ΔΕΣΜΗΕ, αποφασίστηκε η αποκοπή να πραγματοποιείται με ενεργοποίηση των Εντολών Αποκοπής 2 και 3. Ακολουθώντας τη λογική της αποκοπής φορτίου από ανεξάρτητες Εντολές Αποκοπής, ερευνάται στη συνέχεια η επιλογή των πιο αποδοτικών Εντολών με βάση το πραγματικά αποκοπτόμενο φορτίο από αυτές σύμφωνα με τον Πίν. 7.13.

Κριτήριο αποδοτικότητας των Εντολών Αποκοπής αποτελεί η αύξηση των τάσεων του συστήματος που επιτυγχάνεται με την αποκοπή φορτίου από την εφαρμογή τους. Η αποδοτικότητα κάθε Εντολής Αποκοπής k προσδιορίζεται από την ευαισθησία (7.1), η οποία εκφράζει τώρα την αύξηση ΔV_l της τάσης του ασθενέστερου ζυγού l του συστήματος για αποκοπή φορτίου ΔP_k^{shed} που αντιστοιχεί στην εφαρμογή της συγκεκριμένης Εντολής Αποκοπής.

Ο ασθενέστερος ζυγός του συστήματος είναι, όπως είδαμε νωρίτερα, ο ζυγός 150 kV Μαρούσι 31, ο οποίος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη πτώση τάσης μεταξύ των ζυγών ΥΤ μετά τη διαταραχή. Η μεταβολή της τάσης του ζυγού Μαρούσι 31 ως προς τα MW αποκοπής από κάθε Εντολή Αποκοπής k υπολογίζεται από την (7.2), όπου $\Delta P_{o,i}$ είναι πλέον η αποκοπή ολόκληρης της ζήτησης $P_{o,i}$ κάθε ζυγού i που περιλαμβάνεται στην Εντολή. Οι ευαισθησίες της τάσης του ζυγού Μαρούσι 31 ως προς τις

παραμέτρους ζήτησης, είναι αυτές που υπολογίστηκαν τη χρονική στιγμή $t = 210$ s της προσομοίωσης (αμέσως μετά τη διπλή διαταραχή) και οι οποίες παρατίθενται στο Παράρτημα Δ. Η συνολική αποκοπή φορτίου ΔP_k^{shed} για κάθε Εντολή Αποκοπής k υπολογίζεται από τη σχέση (7.3).

Με βάση τον υπολογισμό της ευαισθησίας e_k , προκύπτει η ιεράρχηση των Εντολών Αποκοπής που παρουσιάζεται στον Πίν. 7.15. Ο υπολογισμός αυτός δεν έγινε για τις Εντολές Αποκοπής 7 και 8, οι οποίες φαίνονται να είναι ανενεργές σύμφωνα με την επανεξέταση των διαθέσιμων προς αποκοπή φορτίων στην Αττική, που πραγματοποιήθηκε μετά το περιστατικό της λειτουργίας της προστασίας υπερφόρτισης των διασυνδέσεων στις 22 Ιουνίου 2006 (Πίν. 7.13). Αντίθετα, σύμφωνα πάλι με το προαναφερόμενο περιστατικό, οι Εντολές Αποκοπής 4α και 6α είναι ενεργές και απορρίπτουν φορτίο 31,7 MW και 34,6 MW αντίστοιχα. Επειδή όμως τα αντίστοιχα φορτία τροφοδοτούνται από ζυγούς της Αττικής που δεν παριστάνονται στο μοντέλο του συστήματος, δεν μπορούν να εξαχθούν οι ευαισθησίες της τάσης των συγκεκριμένων ζυγών ως προς τις παραμέτρους φορτίου και κατ' επέκτασιν οι ευαισθησίες e_k . Επομένως, στον Πίν. 7.15 οι παύλες (-) αντιστοιχούν στις Εντολές Αποκοπής που δεν είναι ενεργές, ενώ οι διέσεις (#) σε αυτές που είναι ενεργές, αλλά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ακολουθούμενη μεθοδολογία.

Πίν. 7.15 Ιεράρχηση Εντολών Αποκοπής στην Αττική

ΕΝΤΟΛΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ	- e_k	- ΔP_k (MW)	ΔV_l
3	0,02109	155,8	0,0329
1	0,01803	24,0	0,0043
6β	0,01326	30,8	0,0041
2	0,01186	158,6	0,0188
4β	0,01116	88,5	0,0099
5	0,01101	68,4	0,0075
4α	#	31,7	#
6α	#	34,6	#
7	-	-	-
8	-	-	-

Το Σενάριο Καλοκαιριού 2007 προσομοιώνεται εκ νέου με εφαρμογή αποκοπής φορτίου από ανεξάρτητες Εντολές Αποκοπής, ακολουθώντας την ιεράρχηση του Πίν. 7.15. Για τον προσδιορισμό της ελάχιστης αποκοπής εφαρμόζεται αρχικά η απόρριψη του συνολικού φορτίου της πιο αποδοτικής Εντολής Αποκοπής (Εντολή 3) και ελέγχεται η ευστάθεια του συστήματος. Η απόρριψη αυτή γίνεται τη χρονική στιγμή $t = 260$ s της προσομοίωσης, δηλαδή 50 s μετά τη διαταραχή. Επειδή η αστάθεια εξακολουθεί μετά την απόρριψη του φορτίου της Εντολής Αποκοπής 3, πραγματοποιείται ξανά η προσομοίωση με αποκοπή του φορτίου και της δεύτερης πιο αποτελεσματικής Εντολής Αποκοπής (Εντολή 1) κατά την ίδια χρονική στιγμή. Η ταυτόχρονη απόρριψη του φορτίου των Εντολών Αποκοπής 3 και 1 δεν επιφέρει και πάλι ισορροπία στο σύστημα, οπότε εφαρμόζεται στη συνέχεια η ταυτόχρονη αποκοπή του φορτίου των Εντολών Αποκοπής 3, 1 και 6β, η οποία είναι αρκετή για την αποκατάσταση ισορροπίας.

Επομένως, η ελάχιστη αναγκαία αποκοπή για την ευστάθεια των τάσεων του συστήματος ανέρχεται σε 210,60 MW και 82,14 MVar και κατανέμεται μεταξύ των ζυγών του Πίν. 7.16. Στις περιπτώσεις που λόγω υπεραντιστάθμισης η άεργος συνιστώσα του φορτίου εμφανίζεται αρνητική, δεν πραγματοποιείται αποκοπή στην άεργο συνιστώσα. Η συνολική ζήτηση που απορρίπτεται, συνυπολογίζοντας την απώλεια των βοηθητικών των μονάδων 4 και 5 του Λαυρίου (20,49 MW και 6,51MVar), ανέρχεται σε 231,09 MW και 88,65 MVar.

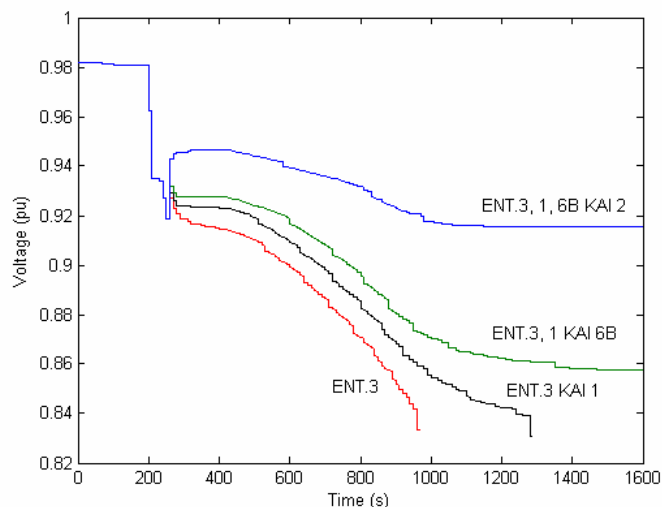
Τονίζεται ότι το φορτίο των υποσταθμών Ασπροπύργου, Ελευσίνας, Αιγάλεω, Χαϊδαρίου, Νίκαιας που συνιστά την Εντολή Αποκοπής 1, φαίνεται στο μοντέλο του συστήματος που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση να τροφοδοτείται αποκλειστικά από τους ζυγούς του Ασπροπύργου. Επίσης το φορτίο του υποσταθμού της Ελευθερίας, που συνιστά την Εντολή 6β, φαίνεται να τροφοδοτείται από το ζυγό της Αριστείδου.

Πίν. 7.16 Ελάχιστη αναγκαία αποκοπή φορτίου με βάση τις Εντολές Αποκοπής

ΖΥΓΟΣ	ΑΡΧΙΚΗ ΖΗΤΗΣΗ (MW / MVar)	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΚΟΠΩΝ (MW / MVar)
ΕΝΤΟΛΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ 3		
Αγ. Στέφανος 51	38,13 / -3,19	7,23 / 0
Αγ. Στέφανος 52	38,85 / 26,45	7,37 / 5,02
Αχαρναί 51	34,86 / 18,57	24,37 / 12,98
Αχαρναί 52	27,21 / -2,58	19,03 / 0
Ν. Ιωνία 31	68,75 / 31,78	22,22 / 10,27
Ν. Ιωνία 32	152,44 / 36,52	49,28 / 11,81
Ν. Χαλκηδόνα 51	36,61 / 0	8,24 / 0
Ν. Χαλκηδόνα 52	33,74 / 21,94	7,59 / 4,94
Ν. Χαλκηδόνα 53	46,52 / 35,02	10,47 / 7,88
ΕΝΤΟΛΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ 1		
Ασπρόπυργος 51	37,90 / 36,73	13,20 / 12,79
Ασπρόπυργος 52	31,03 / 22,71	10,80 / 7,90
ΕΝΤΟΛΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ 6β		
Ελευθερία 31	36,42 / 10,11	30,80 / 8,55
ΣΥΝΟΛΟ ΕΝΤΟΛΩΝ		210,60 / 82,14
ΑΠΩΛΕΙΑ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ		20,49 / 6,51
ΣΥΝΟΛΟ ΑΠΟΚΟΠΗΣ		231,09 / 88,65

Παρατηρούμε ότι το φορτίο που αποκόπτεται είναι λιγότερο από το ελάχιστο που προκύπτει με βάση τις Περιοχές Αποκοπής (Πίν. 7.12) και λιγότερο επίσης από αυτό που αποκόπτεται με την εφαρμογή των Εντολών Αποκοπής 2 και 3 (Πίν. 7.14).

Παρά την ελαχιστοποίηση της αποκοπής φορτίου που επιτυγχάνεται με την επιλογή των Εντολών Αποκοπής 3, 1 και 6β, η αποκατάσταση των τάσεων γίνεται σε αρκετά χαμηλό επίπεδο. Αυτό φαίνεται εύκολα με τη βοήθεια του Σχ. 7.31, που απεικονίζει την τάση του ζυγού 150 kV του Ψυχικού (χαμηλότερη εμφανιζόμενη τάση συστήματος μεταφοράς) κατά τη σταδιακή αποκοπή του φορτίου των προαναφερόμενων Εντολών Αποκοπής.



Σχ. 7.31 Διάγραμμα τάσης ζυγού 150 kV Ψυχικού

Είναι φανερό ότι η αποκοπή φορτίου μόνο από τις Εντολές Αποκοπής 3 και 1 δεν αρκεί για την ισορροπία του συστήματος. Πράγματι, είτε αποκόπτεται μόνο το φορτίο της Εντολής Αποκοπής 3 είτε ταυτόχρονα και το φορτίο της Εντολής Αποκοπής 1 (Εντολές 3 και 1), η προσομοίωση του συστήματος καταλήγει σε απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας.

Με την ταυτόχρονη αποκοπή του φορτίου που αντιστοιχεί στις Εντολές Αποκοπής 3, 1 και 6β, η τάση ισορροπεί λίγο κάτω από το 86% της ονομαστικής της τιμής, δηλαδή σε ένα επίπεδο τάσης που μάλλον δεν είναι επιθυμητό. Εφόσον είναι επιθυμητή υψηλότερη τιμή χαμηλότερης εμφανιζόμενης τάσης 150 kV στο σύστημα, θα πρέπει να αποκοπεί και το φορτίο της Εντολής Αποκοπής 2. Στην περίπτωση αυτή η τάση ισορροπεί στο 92% περίπου της ονομαστικής της τιμής, αλλά η ποσότητα του φορτίου που αποκόπτεται είναι περισσότερη από αυτήν του σχήματος που υλοποιήθηκε στην πράξη (Εντολές Αποκοπής 2 και 3).

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επιλογή των Εντολών Αποκοπής 2 και 3 από τον ΔΕΣΜΗΕ για την εφαρμογή της αποκοπής φορτίου στην Αττική, αποτελεί πράγματι μία καλή λύση, καθώς εξισορροπεί μεταξύ της ελάχιστης αποκοπής φορτίου και μίας ικανοποιητικής ανύψωσης των τάσεων στη μεταφορά.

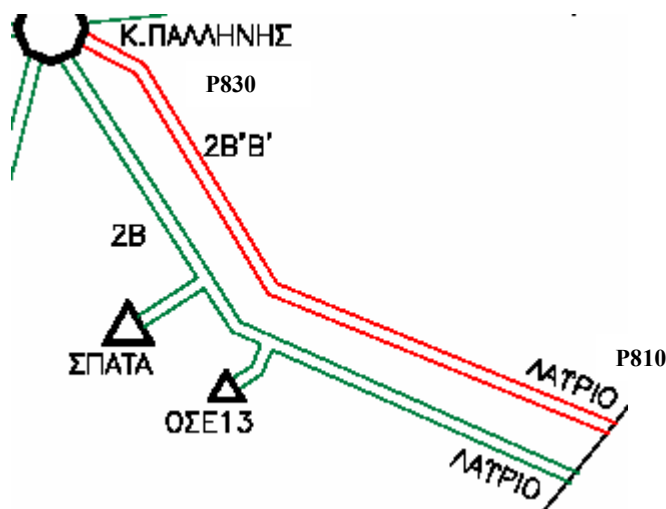
7.4.5 Υλοποίηση

Η υλοποίηση του σχήματος αποκοπής φορτίου από τον ΔΕΣΜΗΕ, περιλαμβάνει την εγκατάσταση ενός PLC στο ΚΥΤ της Παλλήνης, στο οποίο ανατίθεται η διαδικασία αναγνώρισης της διαταραχής. Το PLC δέχεται τις μετρήσεις της παραγωγής του σταθμού του Λαυρίου από δύο μορφοτροπείς 4-20 mA, που βρίσκονται τοποθετημένοι στη θέση των διακοπών ισχύος P810 και P830, στην αναχώρηση και άφιξη αντίστοιχα της γραμμής 400 kV Λαυρίου-Παλλήνης (Σχ. 7.32). Η διαταραχή αναγνωρίζεται από τη μέτρηση απότομης πτώσης στη ροή ισχύος της γραμμής, που υποδεικνύει την απώλεια των μονάδων στο Λαύριο.

Το PLC στο ΚΥΤ της Παλλήνης επικοινωνεί ταυτόχρονα με το Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας στον Αγ. Στέφανο και με το PLC του Κέντρου Ελέγχου Διανομής στο Ρουφ. Με την αναγνώριση της διαταραχής, το PLC του ΚΥΤ Παλλήνης δίνει εντολή για την αποκοπή φορτίου στην Αττική. Η εντολή απόρριψης του φορτίου εφαρμόζεται ωστόσο, μόνο εφόσον συντρέχουν ταυτόχρονα οι εξής λόγοι:

- Έχει μετρηθεί απότομη πτώση της ροής ισχύος, της τάξης των 600 MW, από το σταθμό του Λαυρίου προς το ΚΥΤ της Παλλήνης.
- Έχει προηγηθεί ο οπλισμός του σχήματος αποκοπής από το Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας.
- Οι δύο μορφοτροπείς βρίσκονται σε κανονική λειτουργία.
- Οι μετρήσεις θεωρούνται αξιόπιστες.

Εφόσον συμβαίνουν τα παραπάνω, αποστέλλεται εντολή ανοίγματος των διακοπών ισχύος στους υποσταθμούς διανομής που περιλαμβάνονται στις Εντολές Αποκοπής 2 και 3 του Πίν. 7.10.



Σχ. 7.32 Περιοχή ελέγχου σχήματος αποκοπής φορτίου στην Αττική

7.4.6 Συμπεράσματα

Με τα μέχρι στιγμής φορτία του συστήματος η ταυτόχρονη απώλεια των μονάδων 4 και 5 του Λαυρίου δεν προκαλεί αστάθεια τάσης του συστήματος. Ωστόσο, για την κατάσταση που είναι πιθανό να εμφανιστεί κατά την αιχμή του 2007, με το φορτίο του συστήματος αρκετά υψηλό (10340 MW) και τη μονάδα Μεγαλόπολη 3 μη διαθέσιμη, η συγκεκριμένη διαταραχή μπορεί να προκαλέσει αστάθεια τάσης στο νότιο σύστημα.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω ενδεχομένου απαιτείται η αποκοπή φορτίου από την Αττική. Το σχήμα προστασίας που υλοποιήθηκε από τον ΔΕΣΜΗΕ για το σκοπό αυτό, πραγματοποιεί αποκοπές φορτίου από Περιοχές Αποκοπής της Αττικής που συμπίπτουν με τα στάδια της προστασίας υπερφόρτισης των διασυνδέσεων.

Ο μηχανισμός αποκοπής φορτίου του σχήματος πρέπει να οπλίζεται όταν η εφαρμογή On-line VSA δίνει μηδενικά ή πολύ μικρά περιθώρια ασφάλειας τάσης για τη διπλή διαταραχή της απώλειας των μονάδων 4 και 5 του Λαυρίου και ο αυτοματισμός να ενεργοποιείται με χρονική καθυστέρηση περίπου ενός λεπτού σε περίπτωση εμφάνισης της κρίσιμης διαταραχής (απώλεια ισχύος πάνω από 600 MW στην Παλλήνη).

Η χρονική καθυστέρηση του ενός περίπου λεπτού (50 s) για την εφαρμογή της αποκοπής φορτίου μετά από την εμφάνιση της διαταραχής είναι αρκετά μικρή, ώστε η αποκοπή του φορτίου να μπορεί να υλοποιηθεί ως ένα σχήμα προστασίας αποκρινόμενο στην ανίχνευση του συμβάντος και αρκετά μεγάλη ώστε να συμπεριλάβει την καθυστέρηση για τη διέγερση των ηλεκτρονόμων και το άνοιγμα των διακοπών ισχύος.

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε κατά τη σχεδίαση του σχήματος προέκυψε ότι είναι αναγκαία η αποκοπή του φορτίου τουλάχιστον δύο Περιοχών Αποκοπής της Αττικής, ώστε να αντιμετωπιστεί η αστάθεια τάσης του συστήματος. Εφόσον ισχύει η κατάσταση που περιγράφεται στον Πίν. 7.10 σχετικά με τη διαθεσιμότητα των φορτίων προς αποκοπή, απαιτείται η απόρριψη του συνολικού φορτίου των Περιοχών Αποκοπής 2 και 4 της Αττικής. Στην περίπτωση που διαθέσιμα προς αποκοπή φορτία είναι αυτά που πραγματικά απορρίφθηκαν στο περιστατικό της 22^{ης} Ιουνίου 2006 (Πίν. 7.13), είναι αναγκαία η αποκοπή του φορτίου από τις Περιοχές Αποκοπής 2 και 1 της Αττικής. Σε κάθε περίπτωση, η αναγκαία αποκοπή εξαρτάται από την πραγματική διαθεσιμότητα των αποκοπτόμενων φορτίων.

Στην υλοποίηση του σχήματος, ο ΔΕΣΜΗΕ αποφάσισε τελικά ότι η αποκοπή φορτίου στην Αττική θα πρέπει να γίνεται με εφαρμογή των Εντολών Αποκοπής 2 και 3 του Πίν. 7.10. Στην περίπτωση αυτή η αστάθεια αντιμετωπίζεται με αποκοπή φορτίου 315 MW περίπου, με την παραδοχή ότι διαθέσιμα φορτία είναι αυτά που πραγματικά αποκόπηκαν στις 22 Ιουνίου 2006. Η αποκοπή αυτή αν και δεν είναι η ελάχιστη δυνατή, αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική, καθώς σε σχέση με την τελευταία επιφέρει ικανοποιητικότερο επίπεδο τάσεων στο σύστημα, χωρίς μάλιστα να την υπερβαίνει κατά πολύ.

Η ελάχιστη αποκοπή φορτίου αντιστοιχεί σε απόρριψη 263,24 MW από τις Εντολές Αποκοπής 3, 1 και 6β. Δεδομένου ότι η εφαρμογή της ελάχιστης αποκοπής φορτίου οδηγεί σε αποκατάσταση των τάσεων του συστήματος σε χαμηλές τιμές, η λύση που επιλέχθηκε θεωρείται ικανοποιητική.

8ο Κεφάλαιο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΥΜΒΟΛΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

8.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διατριβή εξετάστηκε το θέμα της προστασίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας από μακροπρόθεσμη αστάθειας τάσης. Ειδικότερα, εξετάστηκαν μέτρα αντιμετώπισης της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης που εφαρμόζουν μείωση του φορτίου του συστήματος σε συνθήκες εκτάκτου ανάγκης.

Στη σχεδίαση των σχημάτων προστασίας που πραγματεύεται η παρούσα διατριβή συνέβαλλε σε σημαντικό βαθμό η διαδικασία αναπροσαρμογής των δεδομένων του μοντέλου του Ελληνικού συστήματος. Το αναπροσαρμοσμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις προσομοιώσεις του Ελληνικού συστήματος που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής αυτής.

Η ανάγκη αναπροσαρμογής των δεδομένων προέκυψε ιδιαίτερα μετά το περιστατικό της σβέσης του νότιου τμήματος του Ελληνικού συστήματος στις 12 Ιουλίου 2004, οπότε και αποφασίστηκε η εγκατάσταση στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας της εφαρμογής εκτίμησης ασφάλειας τάσης πραγματικού χρόνου On-line VSA, ως συμβουλευτικού εργαλείου των χειριστών λειτουργίας του συστήματος. Η βάση δεδομένων της εφαρμογής εκτίμησης ασφάλειας τάσης έχει επικαιροποιηθεί σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προαναφερόμενης διαδικασίας προσαρμογής.

Η λεπτομερής προσομοίωση του περιστατικού της σβέσης στις 12 Ιουλίου 2004 επιβεβαίωσε την ακρίβεια του μοντέλου του Ελληνικού συστήματος. Κατά την προσομοίωση του φαινομένου της σβέσης λήφθηκαν υπόψη συγκεκριμένες λειτουργίες της προστασίας του συστήματος, οι οποίες έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη του περιστατικού. Από τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την προσομοίωση των προαναφερόμενων λειτουργιών προστασίας, αυτά του περιορισμού ρεύματος τυμπάνου και προστασίας υποτάσεως των γεννητριών ενσωματώθηκαν στην εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας τάσης πραγματικού χρόνου του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας για τη βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της.

Με βάση την επιτυχή προσομοίωση του περιστατικού της διακοπής ηλεκτροδότησης στις 12 Ιουλίου 2004, σχεδιάστηκαν ακολούθως σχήματα αποκοπής φορτίου που θα μπορούσαν να αποτρέψουν την κατάρρευση του νοτίου συστήματος. Τα σχήματα αυτά προστασίας μπορούν να θεωρηθούν ως ένα έσχατο δίχτυ ασφάλειας του συστήματος από παρόμοια φαινόμενα αστάθειας τάσης, καθώς παρέχουν την απαιτούμενη φιλοσοφία σχεδίασης της προστασίας, παρά το γεγονός ότι τόσο χαμηλά επίπεδα τάσης δύσκολα θα εμφανιστούν ξανά στο Ελληνικό σύστημα λόγω της ενίσχυσής του.

Η ενίσχυση του Ελληνικού συστήματος μετά το καλοκαίρι του 2004 υπήρξε σημαντική, με αποτέλεσμα η κατάστασή του να θεωρείται εν γένει ασφαλής από απόψεως ευστάθειας τάσης. Όμως, για δύο συγκεκριμένες ακραίες διαταραχές στην Αττική και την Πελοπόννησο εξακολουθεί να υπάρχει ο κίνδυνος κατάρρευσης της τάσης στο νότιο σύστημα. Οι διαταραχές αυτές είναι για μεν την Αττική, η διπλή απώλεια των μονάδων 4 και 5 στο Λαύριο, που έχει κοινή αιτία εμφάνισης (την απώλεια της διπλής γραμμής Λαυρίου-Παλλήνης), για δε την Πελοπόννησο, η διαδοχική απώλεια των μονάδων 3 και 4 της Μεγαλόπολης, που θεωρείται πιθανή, παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει κοινή αιτία εμφάνισης, λόγω της χαμηλής διαθεσιμότητας των μονάδων.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω ενδεχόμενων διαταραχών σχεδιάστηκαν κατάλληλα σχήματα αποκοπής φορτίου, τα οποία προχωρούν αυτόματα στην απόρριψη προκαθορισμένων φορτίων στην Αττική ή την Πελοπόννησο με την εμφάνιση και ανίχνευση της διαταραχής. Δύο από αυτά τα σχήματα αποκοπής φορτίου υιοθετήθηκαν από τον ΔΕΣΜΗΕ, ο οποίος προχώρησε ήδη στην υλοποίησή τους. Στη σχεδίαση των σχημάτων αυτών κρίθηκε αναγκαίος ο οπλισμός τους από τους χειριστές του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας, σύμφωνα και με τα αποτελέσματα της εκτίμησης ασφάλειας τάσης της εφαρμογής πραγματικού χρόνου On-line VSA.

Σχετικά με την εφαρμογή του *ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ* τα κυριότερα συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

Η εφαρμογή των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ κατά κανόνα δεν μπορεί να συντελέσει στην αποκατάσταση μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας στο σύστημα. Κυρίως τα μέτρα αυτά αποσκοπούν στην παροχή του αναγκαίου χρόνου για τη λήψη άλλων μέτρων προστασίας, όπως η αποκοπή φορτίου, η ένταξη μονάδων παραγωγής, κλπ.

Στην περίπτωση που τα φορτία του συστήματος είναι στατικής φύσης (χωρίς δυναμική επαναφορά), ο έλεγχος εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ μπορεί να συμβάλλει στην επίτευξη μίας κατάστασης ισορροπίας χωρίς αποκατάσταση της τάσης και της ισχύος στα φορτία, η οποία θα οφείλεται στην αντιμετώπιση της ασταθούς λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ ή/και στα όρια ρύθμισής τους. Ωστόσο, η ισορροπία αυτή είναι εύθραυστη με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης αν υπάρξει κάποιος άλλος μηχανισμός αποκατάστασης φορτίου στο σύστημα. Στην περίπτωση που τα φορτία του συστήματος είναι δυναμικής φύσης, ο μηχανισμός αυτορρύθμισης της ισχύος δεν επιτρέπει την αποκατάσταση τέτοιας φαινομενικής ισορροπίας.

Η μέθοδος απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ μπορεί να αποδειχθεί αποδοτική, εφόσον εφαρμοστεί ενόσω η διαδικασία αποκατάστασης βρίσκεται στο αρχικό της στάδιο, ώστε τα περισσότερα ΣΑΤΥΦ που συμμετέχουν στο μέτρο να μην έχουν εξαντλήσει το διαθέσιμο εύρος ρύθμισής τους. Η μέθοδος μείωσης της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική, καθώς παρέχει σημαντική καθυστέρηση της κατάρρευσης, χωρίς να μειώνει ανεξέλεγκτα την τάση στο σύστημα της διανομής. Οι μέθοδοι κλειδώματος της λήψης σε προκαθορισμένη θέση και αντιστροφής της λογικής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ είναι επίσης ιδιαίτερες αποδοτικές, καθώς επιφέρουν ενίσχυση των τάσεων στο σύστημα της μεταφοράς, όμως αυτό γίνεται με σημαντική επίπτωση στις τάσεις της διανομής.

Στο Ελληνικό σύστημα δεν υπάρχει, με την υπάρχουσα υλικοτεχνική υποδομή, δυνατότητα εφαρμογής των μέτρων κλειδώματος της λήψης ή της αντιστροφής του ελέγχου των ΣΑΤΥΦ, ενώ το μέτρο μείωσης της τάσης αναφοράς μπορεί να εφαρμοστεί μόνο χειροκίνητα από το προσωπικό των υποσταθμών. Όμως η αντιμετώπιση κρίσιμων περιστατικών αστάθειας με χειροκίνητη μείωση της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ, διεσπαρμένων σε ένα μεγάλο εύρος του συστήματος, απαιτεί γρήγορο συντονισμό, ο οποίος μάλλον δεν είναι επιτεύξιμος κατά την κρίσιμη ώρα. Μόνο το μέτρο της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ μπορεί να εφαρμοστεί με κεντρική εντολή, ωστόσο όπως ειπώθηκε και νωρίτερα η εφαρμογή του μέτρου θα πρέπει να γίνεται πολύ νωρίτερα από τη στιγμή που η αστάθεια γίνεται αντιληπτή.

Με την επιλογή κοινής τιμής κατωφλίου για όλους τους ζυγούς που συμμετέχουν στον έλεγχο εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ επιτυγχάνεται έμμεση επιλογικότητα της προστασίας, καθώς με τον τρόπο αυτό το μέτρο εφαρμόζεται μόνο σε εκείνους τους ζυγούς που βρίσκονται κοντά στην πηγή του προβλήματος. Όμως εκείνο που διαφαίνεται από τις προσομοιώσεις είναι η δυσκολία στην επιλογή μιας κοινής τιμής κατωφλίου τάσης εφαρμογής για όλους τους ελεγχόμενους ζυγούς. Η επιλογή αυτή πρέπει να γίνεται μετά από διαδοχικές off-line προσομοιώσεις του συστήματος για ένα μεγάλο εύρος ενδεχόμενων διαταραχών. Εναλλακτική λύση υλοποίησης αποτελεί η επιλογή χαρακτηριστικών πιλότων-ζυγών ανά περιοχή και η ενεργοποίηση του μέτρου σε προκαθορισμένα ΣΑΤΥΦ με κριτήριο την τάση των πιλότων ή κάποια άλλη ένδειξη. Μια τέτοια σχεδίαση ωστόσο είναι αρκετά σύνθετη και απαιτεί τη δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου με τηλεπικοινωνία, για αυτό και δεν προτιμήθηκε στην διατριβή αυτή.

Συμπερασματικά, από τα μέτρα που εξετάστηκαν η μείωση της τάσης αναφοράς είναι το μόνο με άμεση προοπτική υλοποίησης, ενώ η απενεργοποίηση των ΣΑΤΥΦ συνιστάται μόνο αν εφαρμοστεί σε ώρα σχετικά χαμηλού φορτίου (οπότε ισοδυναμεί με κλειδώμα κοντά στο λόγο μετασχηματισμού r_{max} των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης) και όχι με κριτήριο την τάση.

Σχετικά με την εφαρμογή της *αποκοπής φορτίου* τα κυριότερα συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

Πρωταρχικός σκοπός των σχημάτων αποκοπής φορτίου που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή είναι η αντιμετώπιση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης για τη διατήρηση του συστήματος σε λειτουργία και όχι για την αποκατάσταση των τάσεων στο αρχικό επίπεδο. Εξασφαλίζοντας τη λειτουργία του συστήματος, υπάρχει στη συνέχεια ο διαθέσιμος χρόνος για την αποκατάσταση των τάσεων με άλλα μέτρα ελέγχου, όπως για παράδειγμα με ένταξη νέων μονάδων παραγωγής.

Για τη διατήρηση του συστήματος σε λειτουργία αναγκαία θεωρείται η αποσόβηση της διαδοχικής απώλειας κρίσιμων διατάξεών του (μονάδες παραγωγής ή γραμμές μεταφοράς) που μπορεί να προκληθεί κατά την εξέλιξη ενός φαινομένου αστάθειας τάσης. Πράγματι, σε συνθήκες εξαιρετικά χαμηλών τάσεων, η κατάρρευση του συστήματος μπορεί να επέλθει εξαιτίας της αποσύνδεσης μονάδων παραγωγής ή γραμμών μεταφοράς λόγω υποτάσεως ή παραβίασης άλλων λειτουργικών ορίων (π.χ. κράτηση μονάδων λόγω υπέρβασης μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος στάτη). Συνεπώς, κατά τη σχεδίαση των σχημάτων αποκοπής φορτίου για το Ελληνικό σύστημα, οι λειτουργίες της προστασίας λήφθηκαν υπόψη και σε ορισμένες περιπτώσεις αποτέλεσαν το βασικό κριτήριο σχεδίασης.

Πράγματι, στην υλοποίηση του σχήματος αποκοπής φορτίου που σχεδιάστηκε για την εξασφάλιση επαρκούς περιθωρίου φόρτισης στο Ελληνικό σύστημα, χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο εφαρμογής της αποκοπής η ανίχνευση της πρώτης παραβίασης του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος στάτη συνεχούς λειτουργίας μίας εκ των γεννητριών του συστήματος. Στα σχήματα αποκοπής φορτίου για την αντιμετώπιση του περιστατικού της διακοπής της 12^{ης} Ιουλίου 2004, κριτήριο σχεδίασης αποτέλεσε η αποφυγή της αποσύνδεσης λόγω υποτάσεως της μονάδας Αλιβέρι 4 και συνακόλουθα των γραμμών μεταφοράς 400 kV. Ομοίως, η σχεδίαση του σχήματος αποκοπής φορτίου για την αντιμετώπιση ενδεχόμενων προβλημάτων τάσης στην Πελοπόννησο κατά την τωρινή κατάσταση του συστήματος βασίστηκε στην αποφυγή της αποσύνδεσης της μονάδας Μεγαλόπολη 1 λόγω υποτάσεως.

Ως προς την υλοποίηση των σχημάτων αποκοπής φορτίου στο Ελληνικό σύστημα, η εφαρμογή ενός τοπικού, αποκεντρωμένου σχήματος κλειστού βρόχου, προϋποθέτει την εγκατάσταση του αναγκαίου υλικοτεχνικού εξοπλισμού σε κάθε διαθέσιμο υποσταθμό και κατά συνέπεια παρουσιάζει ένα σχετικά υψηλό κόστος υλοποίησης.

Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με τη σχεδίαση κεντρικών σχημάτων αποκοπής φορτίου ευρείας περιοχής, στα οποία οι αποκοπές πραγματοποιούνται από προκαθορισμένους ζυγούς του συστήματος με βάση την αποδοτικότητα του φορτίου τους ως προς την αποκοπή. Η αποτελεσματικότερη σχεδίαση εφαρμόζει με τη λογική του ανοιχτού βρόχου την απόρριψη της συνολικής ζήτησης των πιο αποδοτικών φορτίων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί η πρακτικά ελάχιστη αποκοπή με τη μικρότερη δυνατή συμμετοχή ζυγών και υποσταθμών στο σχήμα, όμως δεν μπορεί να αποφευχθεί η σβέση φορτίου, συγκεντρωμένου σε περιορισμένη έκταση του συστήματος (π.χ. σε πόλεις).

Για να μη συμβεί η σβέση τόσο συγκεντρωμένων φορτίων προτείνεται ένα σχήμα αποκοπής φορτίου ανοιχτού βρόχου, το οποίο προχωρά στην απόρριψη ενός μόνο ποσοστού της ζήτησης των πιο αποδοτικών φορτίων, αντί της συνολικής. Πράγματι με την επιλογή αυτή επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της αναγκαίας αποκοπής φορτίου, με συμμετοχή στο σχήμα ενός μικρού σχετικά αριθμού ζυγών και υποσταθμών.

Αν συνεκτιμηθεί η αντίδραση των τοπικών φορέων, που μπορεί να έχει η διακοπή της ηλεκτροδότησης σε ένα μεγάλο αριθμό καταναλωτών της ίδιας γεωγραφικής περιοχής, είναι ίσως επιθυμητή η διασπορά των αποκοπών σε ένα μεγαλύτερο γεωγραφικό εύρος. Για το σκοπό αυτό καταλληλότερη είναι η σχεδίαση ενός κεντρικού σχήματος κλειστού βρόχου που θα απορρίπτει το πρακτικά ελάχιστο ποσοστό αποκοπής από ένα μεγάλο σύνολο προκαθορισμένων ζυγών.

Ένα άλλο κεντρικό σχήμα αποκοπής φορτίου κλειστού βρόχου που προτείνεται για την εξισορρόπηση μεταξύ μιας ικανοποιητικής διασποράς της αποκοπής σε μεγάλη έκταση και της μείωσης της συνολικής ζήτησης που πρέπει τελικά να αποκοπεί, βασίζεται στην πληροφορία της αποδοτικότητας κάθε θιγόμενης από την αστάθεια περιοχής ως προς την αποκοπή φορτίου από αυτή.

Η αποδοτικότητα των φορτίων του συστήματος για αποκοπή φορτίου και κατά συνέπεια η αποδοτικότητα των περιοχών ενός ηλεκτρικού συστήματος για τον ίδιο σκοπό, προσδιορίζεται στη διατριβή αυτή με υπολογισμό της ευαισθησίας του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος ή της τάσης του ασθενέστερου ζυγού του συστήματος ως προς τα φορτία. Οι ευαισθησίες της τάσης παρέχουν ακριβέστερη πληροφορία σχετικά με τα πιο αποδοτικά φορτία για αποκοπή, όταν αυτή εφαρμόζεται σε σημεία λειτουργίας του συστήματος πριν την εμφάνιση της αστάθειας. Αντίθετα οι ευαισθησίες του περιθωρίου φόρτισης υπολογίζονται στο όριο φόρτισης του συστήματος, παρέχοντας έτσι ακριβή πληροφορία στο σημείο εμφάνισης της αστάθειας. Σύμφωνα με την πρακτική που ακολουθήθηκε σε αυτή τη διατριβή, ανάλογα με τα κριτήρια σχεδίασης κάθε σχήματος αποκοπής φορτίου προτείνεται ο υπολογισμός των καταλληλότερων ευαισθησιών.

Στην υλοποίηση του σχήματος αποκοπής φορτίου στην Πελοπόννησο για την αντιμετώπιση της ενδεχόμενης απώλειας των μονάδων 3 και 4 της Μεγαλόπολης αποφασίστηκε από τον ΔΕΣΜΗΕ το σχήμα προστασίας να αποκόπτει φορτίο από την περιοχή με άνοιγμα των γραμμών μεταφοράς Μεγαλόπολη - Σπάρτη - Μολάοι και Μεγαλόπολη - Καλαμάτα. Η αποκοπή φορτίου με αποσύνδεση των συγκεκριμένων γραμμών μεταφοράς προκαλεί την πλήρη σβέση των πόλεων της Σπάρτης, της Καλαμάτας και των Μολάων και για το λόγο αυτό πρέπει να είναι χρονικά περιορισμένη. Ουσιαστικά η αποσύνδεση των γραμμών μεταφοράς πρέπει να διαρκεί όσο διάστημα χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η χειροκίνητη απόρριψη του φορτίου σε συγκεκριμένους υποσταθμούς διανομής της Πελοποννήσου με βάση προκαθορισμένο πρόγραμμα.

Στην υλοποίηση του σχήματος αποκοπής φορτίου στην Αττική για την αντιμετώπιση της ενδεχόμενης απώλειας των μονάδων 4 και 5 του Λαυρίου, αποφασίστηκε από τον ΔΕΣΜΗΕ ότι πρέπει να αποκόπτονται τα φορτία που αντιστοιχούν σε δύο συγκεκριμένες εντολές αποκοπής του σχήματος προστασίας υπερφόρτισης των διασυνδέσεων. Η αποκοπή αυτή αν και δεν είναι η ελάχιστη δυνατή, αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική, καθώς σε σχέση με την τελευταία επιφέρει ικανοποιητικότερο επίπεδο τάσεων στο σύστημα, χωρίς μάλιστα να την υπερβαίνει κατά πολύ.

8.2 ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η συμβολή της διδακτορικής διατριβής έγκειται συνοπτικά στα ακόλουθα σημεία:

1. Στην ανάλυση και σύγκριση διαφόρων μεθόδων προστασίας με αποκοπή φορτίου για την αντιμετώπιση μιας επερχόμενης κατάρρευσης τάσης σε μεγάλα ηλεκτρικά δίκτυα.
2. Στην αξιολόγηση των μεθόδων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, για την αντιμετώπιση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης. Επίσης, στη διερεύνηση του ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των διατάξεων αέργου αντιστάθμισης του συστήματος, ως τέτοιου μέτρου.
3. Στη μοντελοποίηση των προαναφερόμενων μέτρων προστασίας από αστάθεια τάσης στο πρόγραμμα προσομοίωσης WPSTAB του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, επιτρέποντας έτσι την προσομοίωση και ανάλυση της εφαρμογής των μέτρων αυτών και των αντίστοιχων σχημάτων προστασίας σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Στη μοντελοποίηση του περιορισμού ρεύματος τυμπάνου των γεννητριών, που εφαρμόζεται από τους χειριστές των σταθμών κατά τη λειτουργία του συστήματος σε συνθήκες εκτάκτου ανάγκης, και στη μοντελοποίηση της προστασίας υποτάσεως των γεννητριών και των γραμμών μεταφοράς 400 kV.
5. Στην αναπροσαρμογή των δεδομένων του μοντέλου του Ελληνικού συστήματος, η οποία επέτρεψε την ακριβή παράσταση του συστήματος στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή.
6. Στην ενσωμάτωση του αναπροσαρμοσμένου μοντέλου του Ελληνικού συστήματος, όπως και των μοντέλων προστασίας υποτάσεως και υπερεντάσεως των γεννητριών, στο λογισμικό εκτίμησης ασφάλειας τάσης On-line VSA του Εθνικού Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας, συμβάλλοντας κατά αυτόν τον τρόπο στην ακριβέστερη εκτίμηση της ασφάλειας τάσης του Ελληνικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο.
7. Στη λεπτομερή προσομοίωση του φαινομένου αστάθειας τάσης που συνέβη στις 12 Ιουλίου 2004 στο Ελληνικό σύστημα και προκάλεσε τη σβέση του νοτίου τμήματος του. Η επιτυχής αναπαράσταση των πραγματικών γεγονότων εξασφαλίστηκε με τη χρήση του αναπροσαρμοσμένου μοντέλου του Ελληνικού συστήματος και την προσομοίωση των λειτουργιών της προστασίας του συστήματος που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη του συμβάντος.
8. Στη σχεδίαση διαφορετικών σχημάτων προστασίας με αποκοπή φορτίου για το Ελληνικό σύστημα που θα μπορούσαν να αποτρέψουν την κατάρρευση των τάσεων του νοτίου συστήματος στις 12 Ιουλίου 2004. Η ακρίβεια της σχεδίασης διασφαλίζεται από τα ποιοτικά και ποσοτικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη λεπτομερή προσομοίωση του περιστατικού.

9. Στη σχεδίαση ενός σχήματος αποκοπής φορτίου προληπτικού ελέγχου για την αποκατάσταση του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος όταν αυτό κρίνεται ανεπαρκές, με εφαρμογή στο Ελληνικό σύστημα. Το σχήμα προτείνεται για εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο από τους χειριστές λειτουργίας του κέντρου ελέγχου.
10. Στη σχεδίαση σχημάτων αποκοπής φορτίου για την αντιμετώπιση ενδεχόμενων προβλημάτων τάσης στο Ελληνικό σύστημα μετά το 2004. Δύο από τα σχήματα αυτά έχουν ήδη υλοποιηθεί από τον ΔΕΣΜΗΕ για την προστασία του νοτίου συστήματος.
11. Στην πρόταση για καθορισμό της ανίχνευσης της πρώτης παραβίασης του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος στάτη συνεχούς λειτουργίας σε μία από τις γεννήτριες του συστήματος, ως κριτηρίου εφαρμογής της αποκοπής φορτίου.
12. Στην αξιολόγηση των μέτρων της απενεργοποίησης του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ και της μείωσης της τάσης αναφοράς τους, ως άμεσα υλοποιήσιμα μέτρα για την αντιμετώπιση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης στο Ελληνικό σύστημα.
13. Στην έρευνα γύρω από τον υλικοτεχνικό εξοπλισμό που απαιτείται για την υλοποίηση σχημάτων προστασίας συστήματος, βασισμένων στα εξεταζόμενα μέτρα.

Για την ανάλυση των μέτρων προστασίας από αστάθεια τάσης και τη σχεδίαση των αντίστοιχων σχημάτων προστασίας για το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, πραγματοποιήθηκε καταρχήν αναβάθμιση του λογισμικού του προγράμματος προσομοίωσης WPSTAB με την προσθήκη καταλλήλων υποπρογραμμάτων. Οι ρουτίνες αυτές αποτελούν ένα ολοκληρωμένο πακέτο προσομοίωσης μέτρων και σχημάτων προστασίας συστήματος από μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης και συνιστούν ένα χρήσιμο εργαλείο για τη σχεδίαση και αξιολόγηση νέων σχημάτων στο μέλλον. Συγκεκριμένα, η αναβάθμιση του λογισμικού του προγράμματος WPSTAB εντοπίζεται στις εξής προσθήκες:

- Ανάπτυξη υποπρογραμμάτων για την υλοποίηση του *ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ και των διατάξεων αντιστάθμισης*:
 - Απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης.
 - Μείωση της τάσης αναφοράς.
 - Κλείδωμα της λήψης σε προκαθορισμένη θέση.
 - Ενσωμάτωση της μεθόδου αντιστροφής της λογικής ελέγχου.
 - Ζεύξη-απόζευξη πηνίων αντιστάθμισης.
- Ανάπτυξη υποπρογραμμάτων για την υλοποίηση της *αποκοπής φορτίου*:
 - Τοπικό, αποκεντρωμένο σχήμα αποκοπής φορτίου κλειστού βρόχου, με βάση τη μέτρηση της τάσης.
 - Κεντρικά σχήματα αποκοπής φορτίου ευρείας περιοχής ανοιχτού ή κλειστού βρόχου, με βάση τη μέτρηση της τάσης και την πληροφορία από την ανάλυση ευαισθησίας (του περιθωρίου φόρτισης του συστήματος ή της αποδοτικότητας των γεωγραφικών περιοχών του συστήματος για αποκοπή φορτίου από αυτές).
 - Κεντρικά σχήματα αποκοπής φορτίου ευρείας περιοχής ανοιχτού βρόχου, με βάση την ανίχνευση συμβάντος (π.χ. μίας προκαθορισμένης διαταραχής) ή τη μέτρηση υποτάσεως ικανής να προκαλέσει την αποσύνδεση γεννήτριας ή γραμμών μεταφοράς και την πληροφορία από την ανάλυση ευαισθησίας (της τάσης ως προς τα φορτία ή της αποδοτικότητας καθορισμένων συνόλων φορτίου).
 - Κεντρικά σχήματα αποκοπής προκαθορισμένων φορτίων με τη λογική του ανοιχτού βρόχου, βάσει της ανίχνευσης συμβάντος.
 - Κεντρικό σχήμα αποκοπής φορτίου ευρείας περιοχής ανοιχτού βρόχου για την εξασφάλιση επαρκούς περιθωρίου φόρτισης του συστήματος, με βάση την παραβίαση του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος στάτη γεννήτριας.

- Ανάπτυξη υποπρογραμμάτων για την προσομοίωση λειτουργιών της προστασίας και διατάξεων του συστήματος, καθώς και για την ανάλυση ευαισθησίας:
 - Μοντέλο του περιορισμού ρεύματος στάτη γεννητριών.
 - Μοντέλο της προστασίας υποτάσεως γεννητριών.
 - Απλουστευμένο μοντέλο της προστασίας υποτάσεως γραμμών μεταφοράς 400 kV.
 - Μοντέλο ενός τύπου δυναμικού φορτίου με μηχανισμό αυτορρυθμισμού της ισχύος.
 - Επέκταση αλγόριθμου υπολογισμού ευαισθησιών του προγράμματος προσομοίωσης WPSTAB για τον υπολογισμό της ευαισθησίας της τάσης ως προς τις παραμέτρους φορτίου.

8.3 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η σχεδίαση των σχημάτων προστασίας για το Ελληνικό σύστημα έγινε στη βάση εμφάνισης των πιο επικίνδυνων διαταραχών για πρόκληση αστάθειας τάσης. Ιδιαίτερως τα σχήματα που υλοποιήθηκαν από τον ΔΕΣΜΗΕ για την αποκοπή φορτίου από την Πελοπόννησο και την Αττική, βασίζονται στην ανίχνευση και αντιμετώπιση των πιο κρίσιμων διαταραχών για την εμφάνιση αστάθειας τάσης στο Ελληνικό σύστημα υπό τις τωρινές και τις προβλεπόμενες στο βραχυπρόθεσμο μέλλον συνθήκες του συστήματος.

Αυτομάτως λοιπόν, μία πρώτη προοπτική περαιτέρω έρευνας αποτελεί η γενίκευση της μεθοδολογίας των μέτρων προστασίας που εξετάστηκαν στη διατριβή αυτή, για τη σχεδίαση αντίστοιχων σχημάτων προστασίας σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του Ελληνικού συστήματος. Ο τελικός στόχος θα είναι η ανάπτυξη μίας γενικευμένης μεθόδου που θα προσαρμόζει την προτεινόμενη φιλοσοφία σχεδίασης στις εκάστοτε ανάγκες της προστασίας του συστήματος, οι οποίες καθορίζονται από τις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας και βάσει αυτών από τις πιο κρίσιμες διαταραχές.

Προς την κατεύθυνση αυτή θα συνέβαλλε η περαιτέρω διερεύνηση της μέτρησης της τάσης ως κριτηρίου για την εφαρμογή των προτεινόμενων μέτρων προστασίας. Για παράδειγμα, μπορεί να εξεταστεί η εφαρμογή των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ με κριτήριο την τάση χαρακτηριστικών πιλότων-ζυγών του συστήματος. Θα ήταν επίσης σκόπιμο να εξαχθούν κατάλληλοι δείκτες αστάθειας τάσης με βάση τη μέτρηση των τάσεων του συστήματος. Ουσιαστικά ένας τέτοιος δείκτης, ο οποίος υποδεικνύει τον κίνδυνο εμφάνισης κατάρρευσης τάσεων στο Ελληνικό σύστημα εξαιτίας της αποσύνδεσης γεννητριών ή γραμμών μεταφοράς λόγω υποτάσεως, χρησιμοποιήθηκε ήδη στη διατριβή αυτή. Ωστόσο, θα ήταν χρήσιμος ο υπολογισμός ενός δείκτη για τη λήψη μέτρων προστασίας αρκετά πριν το τελικό στάδιο εξέλιξης της αστάθειας τάσης.

Μέθοδοι Αυτόματης Μάθησης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη μεθοδολογιών που θα συνδυάζουν την εξαγωγή απλών κανόνων (π.χ. με βάση το μέτρο της τάσης) για την εφαρμογή των μέτρων προστασίας σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, με τη διατήρηση ενός επιθυμητού επιπέδου ασφάλειας τάσης του συστήματος.

Περαιτέρω έρευνα απαιτείται επίσης για τη σχεδίαση σχημάτων προστασίας με μείωση της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΥΦ, απενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής της λήψης των ΣΑΤΥΦ ή ζεύξη-απόζευξη διατάξεων αντιστάθμισης για την αντιμετώπιση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης στο Ελληνικό σύστημα. Πολύ δε περισσότερη έρευνα απαιτείται για την ανάπτυξη μεθοδολογίας με σκοπό την εναρμονισμένη εφαρμογή των μέτρων ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ και της αποκοπής φορτίου.

Στην προοπτική υλοποίησης νέων σχημάτων προστασίας για το Ελληνικό σύστημα και ιδιαίτερως αυτών που εφαρμόζουν τον έλεγχο εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ, απαραίτητη θεωρείται η κατασκευαστική αντιμετώπιση του προβλήματος. Σημαντικό μέρος της διαδικασίας αυτής αποτελεί η λογική σχεδίαση της προστασίας σε πραγματικούς ηλεκτρονόμους, οι οποίοι τουλάχιστον για τα περισσότερα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΥΦ δεν διαθέτουν έτοιμες ρυθμίσεις.

Τέλος, για την εφαρμογή της αποκοπής φορτίου προς εξασφάλιση επαρκούς περιθωρίου φόρτισης σε πραγματικό χρόνο από το κέντρο ελέγχου ενέργειας, σημαντική θα ήταν η ενσωμάτωση σε ένα ενιαίο γραφικό περιβάλλον πραγματικού χρόνου της μεθόδου δισδιάστατης γραφικής παράστασης των ορίων φόρτισης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και της αντίστοιχης μεθόδου αποκοπής φορτίου.

Παράρτημα

A. ΔΙΑΝΥΣΜΑ $S_{\mu^*p_0}$ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΩΝ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΤΟΥ 2004

$S_{\mu^*p_0}$	ΖΥΓΟΣ	$S_{\mu^*p_0}$	ΖΥΓΟΣ	$S_{\mu^*p_0}$	ΖΥΓΟΣ	$S_{\mu^*p_0}$	ΖΥΓΟΣ
-3,547	346 Χαλκίδα-II 51	-1,532	946 Ν. Μάκρη 52	-1,235	502 Κέρκυρα I-52	-1,079	596 Μολάοι 51
-2,604	884 Χαλκίδα-II 52	-1,530	257 Αχλάδι 52	-1,229	654 Αγ. Στέφ. 52	-1,079	933 Μολάοι 52
-2,245	560 Μέθανα 51	-1,518	588 Αίγιο 51	-1,229	877 Καρδίτσα 52	-1,076	716 Σαλαμίνα 51
-2,232	358 Θήβα 51	-1,517	682 Ασπρόπυργ. 51	-1,228	371 Άμφισσα 51	-1,073	953 Αιγάλεω 32
-2,230	688 Ελευσίνα 52	-1,506	363 Κωπαΐδα 51	-1,227	963 Παγκράτι 32	-1,072	692 Μότορ Όιλ 51
-2,224	687 Ελευσίνα 51	-1,505	544 ΒΖ Πάτρας 52	-1,226	372 Άμφισσα 52	-1,066	328 Στυλίδα 51
-2,150	355 Οινόφυτα 52	-1,504	888 Κωπαΐδα 51	-1,222	586 Καλαμάτα 52	-1,066	511 Αργοστόλι 52
-2,056	381 Λιβαδειά 51	-1,500	557 Κρανίδι 51	-1,211	501 Κέρκυρα I-51	-1,066	646 Ολ. Χωριό 52
-2,056	382 Λιβαδειά 52	-1,500	925 Άργος-I 52	-1,210	649 Αγ. Στέφ. 31	-1,066	739 Ελληνικό 31
-1,987	354 Οινόφυτα 51	-1,498	558 Κρανίδι 52	-1,200	566 Τρίπολη 52	-1,053	275 Βόλος-II 51
-1,965	437 Ψαχνά 52	-1,497	553 Άργος-I 51	-1,190	645 Ολ. Χωριό 51	-1,018	510 Αργοστόλι 51
-1,924	546 Ευλόκαστρο 51	-1,494	732 Ελευθερία 31	-1,184	602 Πύργος 51	-1,016	717 Σαλαμίνα 52
-1,924	883 Χαλκίδα-I 52	-1,467	930 Αίγιο 52	-1,184	737 Πειραιάς 31	-1,013	282 Στεφανοβ. 51
-1,867	886 Θήβα 52	-1,466	927 Άργος-II 52	-1,181	936 Λάππας 52	-1,013	867 Στεφανοβ. 52
-1,816	377 Αλουμίνιο 54	-1,465	615 Αχαρναί 51	-1,180	683 Ασπρόπυργ. 52	-1,006	959 Ν. Ιωνία 32
-1,810	351 Σχηματάρι 52	-1,444	966 Ψυχικό 33	-1,175	909 Κέρκυρα II-52	-1,003	443 Αιτωλικό 52
-1,801	616 Αχαρναί 52	-1,441	348 Μαντούδι 51	-1,171	604 Λάππας 51	-0,998	734 Ν. Ιωνία 31
-1,779	436 Ψαχνά 51	-1,440	672 Αγ. Γεώργ. 52	-1,170	551 Κόρινθος 51	-0,998	870 Λάρισα-III 52
-1,772	389 ΤΙΤΑΝ 31	-1,439	699 Ν. Μάκρη 51	-1,168	719 Ν. Χαλκηδ. 51	-0,993	639 Παλλήνη 52
-1,769	344 Χαλκίδα-I 51	-1,421	952 ΕΛΔΑ 32	-1,165	504 Κέρκυρα II-51	-0,990	442 Αιτωλικό 51
-1,712	711 Ρουφ 51	-1,377	956 Ελευθερία 32	-1,162	633 Παλλήνη 31	-0,982	386 ΑΓΕΤ 31
-1,694	924 Κόρινθος 52	-1,375	543 ΒΖ Πάτρας 51	-1,158	962 Ν. Σμύρνη 34	-0,966	874 Φάρσαλα 53
-1,693	958 Καλλιθέα 32	-1,374	333 Λαμία 51	-1,155	712 Ρουφ 52	-0,957	316 Φάρσαλα 51
-1,677	887 Θήβα 53	-1,362	360 Αταλάντη 51	-1,153	736 Παγκράτι 31	-0,951	567 Μεγαλ.-I 31
-1,657	350 Σχηματάρι 51	-1,362	361 Αταλάντη 52	-1,152	400 Λάρυμνα 51	-0,941	570 Μεγαλ.-I 51
-1,643	709 Μέγαρο 51	-1,360	967 Ψυχικό 34	-1,149	731 Αριστείδου 31	-0,911	302 Τρίκαλα 51
-1,634	324 Αλμυρός 51	-1,336	322 Καρδίτσα 51	-1,148	378 Αλουμίνιο 55	-0,905	439 Τριχωνίδα 51
-1,633	879 Αλμυρός 52	-1,334	339 Αλιβέρι 51	-1,144	730 Αιγάλεω 31	-0,903	515 Ζάκυνθος 51
-1,631	414 Αμφίκλεια 51	-1,333	738 Ψυχικό 31	-1,142	375 Αλουμίνιο 52	-0,902	706 Σπάτα 51
-1,628	298 Βούναινα 51	-1,332	330 Χαλυβ. Θεσ. 31	-1,128	882 Λαμία 52	-0,887	574 Μεγαλ.-II 31
-1,628	871 Βούναινα 52	-1,323	379 Αλουμίνιο 56	-1,128	945 Βάρη 52	-0,886	291 Λάρισα-III 51
-1,625	957 Ελευθερία 33	-1,314	653 Αγ. Στέφ. 51	-1,126	685 Βάρη 51	-0,882	928 Άστρος 52
-1,603	880 Λεοντάρι 52	-1,308	585 Καλαμάτα 51	-1,123	391 ΕΑΒ 31	-0,881	563 Άστρος 51
-1,596	679 Αγ. Θεόδ. 51	-1,287	720 Ν. Χαλκηδ. 52	-1,123	965 Ψυχικό 32	-0,863	600 Κυπαρισσία 51
-1,594	356 Οινόφυτα 53	-1,284	590 Σπάρτη-I 51	-1,119	897 ΛΑΡΚΟ 32	-0,859	276 Βόλος-II 52
-1,593	326 Λεοντάρι 51	-1,284	607 ΤΙΤΑΝ 31	-1,113	713 Ρουφ 53	-0,857	935 Πύργος 52
-1,592	547 Ευλόκαστρο 52	-1,284	714 Ρουφ 54	-1,099	638 Παλλήνη 51	-0,856	703 Μαρκόπουλ.52
-1,591	899 Αμφίκλεια 52	-1,284	865 Βόλος-I 52	-1,099	673 Αγ. Γεώργ. 53	-0,850	418 Κάρυστος 51
-1,590	680 Αγ. Θεόδ. 52	-1,277	561 Μέθανα 52	-1,095	352 ΕΛΒΑΛ 31	-0,850	901 Κάρυστος 53
-1,568	671 Αγ. Γεώρ. 51	-1,274	541 Πάτρα-III 51	-1,093	949 Σπάτα 53	-0,849	873 Φάρσαλα 52
-1,564	592 Σπάρτη-II 51	-1,272	273 Βόλος-I 51	-1,090	565 Τρίπολη 51	-0,844	690 Ελ. Χαλυβ. 31
-1,561	931 Σπάρτη-II 52	-1,249	537 Πάτρα-I 51	-1,087	735 Ν. Σμύρνη 31	-0,839	695 Κάλαμος 51
-1,534	256 Αχλάδι 51	-1,249	919 Πάτρα-I 52	-1,081	960 Ν. Σμύρνη 32	-0,822	284 Λαύκος 51
-1,534	721 Ν. Χαλκηδ. 53	-1,248	921 Πάτρα-III 52	-1,079	578 Λεχαινά 51	-0,821	704 Μαρκόπουλ.53

(Συνέχεια...)

-0,821	934 Πύλος 52	-0,554	83 Σχολάρι 51	-0,326	127 Ν. Ελβετία 52	-0,175	196 Αγ. Δημήτρ. 31
-0,818	305 Τρίκαλα-I 51	-0,547	911 Μεσογγή 52	-0,325	128 Ν. Ελβετία 53	-0,174	242 Καστοριά 52
-0,815	488 Πρέβεζα 51	-0,545	508 Μεσογγή 51	-0,322	149 Σίνδος 52	-0,168	115 Νάουσα 51
-0,806	868 Λαύκος 52	-0,539	839 Κατερίνη 52	-0,319	820 Κιλκίς 52	-0,167	838 Νάουσα 52
-0,799	506 Αγ. Βασίλ. 51	-0,523	87 Πλαταμών 51	-0,314	153 Μπότσαρης 52	-0,162	837 Ν. Αλεξάνδ. 52
-0,796	489 Πρέβεζα 52	-0,515	903 Ιωάννινα-II 52	-0,314	154 Μπότσαρης 53	-0,160	18 Νευροκόπι 51
-0,796	516 Ζάκυνθος 52	-0,513	309 Τρίκαλα-II 52	-0,310	161 ΜΕΛ 31	-0,160	167 Φλώρινα 51
-0,795	306 Τρίκαλα-I 52	-0,505	308 Τρίκαλα-II 51	-0,304	459 Καρπενήσι 52	-0,158	821 Δράμα 52
-0,788	910 Αγ. Βασίλ. 52	-0,495	447 Καστράκι 51	-0,302	848 Ν. Πέλλα 53	-0,158	853 Καρδιά 33
-0,777	434 Λιβάδι 52	-0,479	80 Κασσάνδρα 51	-0,301	458 Καρπενήσι 51	-0,156	21 Καβάλα 51
-0,774	286 Λάρισα-I 51	-0,479	117 Κατερίνη 51	-0,301	818 Σέρρες 53	-0,154	849 Φλώρινα 52
-0,762	270 ΑΓΕΤ Βόλ. 31	-0,477	906 Ιωάννινα-I 52	-0,300	8 Σέρρες 51	-0,143	836 Βέροια 52
-0,762	271 ΑΓΕΤ Βόλ. 32	-0,474	78 Νικήτη 51	-0,298	156 Ν. Πέλλα 51	-0,135	856 Αμύνταιο 32
-0,762	433 Λιβάδι 51	-0,474	110 Εύοσμος 52	-0,296	847 Ν. Πέλλα 52	-0,134	829 Διδυμότειχο 52
-0,761	464 Ηγουμενίτ. 51	-0,474	833 Νικήτη 52	-0,290	119 Σκύδρα 51	-0,121	254 Σέρβια 51
-0,748	663 Λαύριο 52	-0,458	523 Άραχθος 51	-0,287	120 Σκύδρα 52	-0,116	176 Καρδιά 31
-0,746	581 Λάδωνας 51	-0,456	907 Αμφιλοχία 52	-0,287	494 Καλπάκι 51	-0,103	45 Αλεξ/πολη 51
-0,738	264 Λάρισα 51	-0,449	252 Κοζάνι 51	-0,271	132 Αγχιάλος 31	-0,103	862 Σφηκιά 32
-0,735	662 Λαύριο 51	-0,449	279 ΒΠ Βόλος 51	-0,266	12 Κιλκίς 51	-0,097	823 Ξάνθη 52
-0,706	535 Ναύπακτος 51	-0,449	482 Αμφιλοχία 51	-0,263	107 Δόξα 53	-0,092	43 Κομοτηνή 51
-0,704	918 Ναύπακτος 52	-0,436	150 Σίνδος 53	-0,251	157 ΕΚΟ 31	-0,090	25 Ζαρκάδια 51
-0,696	289 Λάρισα-II 51	-0,431	56 Βάβδος 51	-0,240	834 Πολύκαστρο 52	-0,083	158 ΕΚΟ 32
-0,654	318 Καλαμπάκα 51	-0,431	831 Βάβδος 52	-0,239	85 Πολύκαστρο 51	-0,083	230 Ορυχεία 6Τ52
-0,654	875 Καλαμπάκα 52	-0,418	123 Θεσ/νίκη-III 52	-0,239	111 Εύοσμος 53	-0,082	229 Ορυχεία 6Τ51
-0,653	265 Λάρισα 52	-0,399	122 Θεσ/νίκη-III 51	-0,233	118 Σκύδρα 31	-0,072	203 Αμύνταιο 31
-0,647	912 Λευκάδα 52	-0,391	524 Άραχθος 52	-0,232	819 Σιδηρόκ. 52	-0,068	830 Ορεστιάδα 52
-0,645	513 Λευκάδα 51	-0,375	152 Μπότσαρης 51	-0,231	10 Σιδηρόκ. 51	-0,066	51 Ορεστιάδα 51
-0,628	461 Άκτιο 51	-0,372	445 Ιωάννινα-II 51	-0,230	218 Πτολεμαΐδα 31	-0,062	223 Πτολεμαΐδα 51
-0,628	905 Άκτιο 52	-0,351	148 Σίνδος 51	-0,199	130 Γέφυρα 51	-0,058	827 Κομοτηνή 52
-0,624	393 ΛΑΡΚΟ 31	-0,346	484 Στράτος-I 91	-0,199	842 Γέφυρα 52	-0,040	30 Φωσφορικά 31
-0,605	571 Μεγαλ.-I 52	-0,343	6 Λαγκαδάς 51	-0,186	164 Έδεσσα 51	-0,026	208 Μελίτη 31
-0,597	75 Μουδανιά 51	-0,340	139 Θεσ/νίκη 51	-0,185	140 Θεσ/νίκη 52	-0,023	28 Κεραμωτή 51
-0,596	280 ΒΠ Βόλος 52	-0,335	106 Δόξα 52	-0,183	241 Καστοριά 51	-0,023	29 Κεραμωτή 52
-0,582	472 Ιωάννινα-I 51	-0,335	126 Ν. Ελβετία 51	-0,182	15 Δράμα 51		

Β. ΔΙΑΝΥΣΜΑ $S_{\mu^*p_0}$ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΩΝ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΤΟΥ 2004

$S_{\mu^*p_0}$	ΖΥΓΟΣ	$S_{\mu^*p_0}$	ΖΥΓΟΣ	$S_{\mu^*p_0}$	ΖΥΓΟΣ	$S_{\mu^*p_0}$	ΖΥΓΟΣ
-3,547	346 Χαλκίδα-II 51	-1,517	682 Ασπρόπυργος 51	-1,210	649 Αγ. Στέφ. 31	-0,993	639 Παλλήνη 52
-2,604	884 Χαλκίδα-II 52	-1,506	363 Κωπαΐδα 51	-1,200	566 Τρίπολη 52	-0,966	874 Φάρσαλα 53
-2,245	560 Μέθανα 51	-1,505	544 ΒΖ Πάτρας 52	-1,190	645 Ολ. Χωριό 51	-0,957	316 Φάρσαλα 51
-2,232	358 Θήβα 51	-1,504	888 Κωπαΐδα 51	-1,184	602 Πύργος 51	-0,951	567 Μεγαλ.-I 31
-2,230	688 Ελευσίνα 52	-1,500	557 Κρανίδι 51	-1,184	737 Πειραιάς 31	-0,941	570 Μεγαλ.-I 51
-2,224	687 Ελευσίνα 51	-1,500	925 Άργος-I 52	-1,181	936 Λάμπας 52	-0,911	302 Τρίκαλα 51
-2,150	355 Οινόφυτα 52	-1,498	558 Κρανίδι 52	-1,180	683 Ασπρόπυργος 52	-0,902	706 Σπάτα 51
-2,056	381 Λιβαδειά 51	-1,497	553 Άργος-I 51	-1,171	604 Λάμπας 51	-0,887	574 Μεγαλ.-II 31
-2,056	382 Λιβαδειά 52	-1,494	732 Ελευθερία 31	-1,170	551 Κόρινθος 51	-0,886	291 Λάρισα-III 51
-1,987	354 Οινόφυτα 51	-1,467	930 Αίγιο 52	-1,168	719 Ν. Χαλκηδ. 51	-0,882	928 Άστρος 52
-1,965	437 Ψαχνά 52	-1,466	927 Άργος-II 52	-1,162	633 Παλλήνη 31	-0,881	563 Άστρος 51
-1,924	546 Ξυλόκαστρο 51	-1,465	615 Αχαρναί 51	-1,158	962 Ν. Σμύρνη 34	-0,863	600 Κυπαρισσία 51
-1,924	883 Χαλκίδα-I 52	-1,444	966 Ψυχικό 33	-1,155	712 Ρουφ 52	-0,859	276 Βόλος-II 52
-1,867	886 Θήβα 52	-1,441	348 Μαντουδί 51	-1,153	736 Παγκράτι 31	-0,857	935 Πύργος 52
-1,810	351 Σχηματάρι 52	-1,440	672 Αγ. Γεώργ. 52	-1,152	400 Λάρυμνα 51	-0,856	703 Μαρκόπουλ.52
-1,801	616 Αχαρναί 52	-1,439	699 Ν. Μάκρη 51	-1,149	731 Αριστείδου 31	-0,850	418 Κάρυστος 51
-1,779	436 Ψαχνά 51	-1,377	956 Ελευθερία 32	-1,144	730 Αιγάλεω 31	-0,850	901 Κάρυστος 53
-1,769	344 Χαλκίδα-I 51	-1,375	543 ΒΖ Πάτρας 51	-1,128	882 Λαμία 52	-0,849	873 Φάρσαλα 52
-1,712	711 Ρουφ 51	-1,374	333 Λαμία 51	-1,128	945 Βάρη 52	-0,844	690 Ελ. Χαλυβ. 31
-1,694	924 Κόρινθος 52	-1,362	360 Αταλάντη 51	-1,126	685 Βάρη 51	-0,839	695 Κάλαμος 51
-1,693	958 Καλλιθέα 32	-1,362	361 Αταλάντη 52	-1,123	965 Ψυχικό 32	-0,822	284 Λαύκος 51
-1,677	887 Θήβα 53	-1,360	967 Ψυχικό 34	-1,113	713 Ρουφ 53	-0,821	704 Μαρκόπουλ.53
-1,657	350 Σχηματάρι 51	-1,336	322 Καρδίτσα 51	-1,099	638 Παλλήνη 51	-0,821	934 Πύλος 52
-1,643	709 Μέγαρο 51	-1,334	339 Αλιβέρι 51	-1,099	673 Αγ. Γεώργ. 53	-0,818	305 Τρίκαλα-I 51
-1,634	324 Αλμυρός 51	-1,333	738 Ψυχικό 31	-1,093	949 Σπάτα 53	-0,806	868 Λαύκος 52
-1,633	879 Αλμυρός 52	-1,332	330 Χαλυβ. Θεσ. 31	-1,090	565 Τρίπολη 51	-0,795	306 Τρίκαλα-I 52
-1,631	414 Αμφίκλεια 51	-1,314	653 Αγ. Στέφ. 51	-1,087	735 Ν. Σμύρνη 31	-0,777	434 Λιβάδι 52
-1,628	298 Βούναινα 51	-1,308	585 Καλαμάτα 51	-1,081	960 Ν. Σμύρνη 32	-0,774	286 Λάρισα-I 51
-1,628	871 Βούναινα 52	-1,287	720 Ν. Χαλκηδ. 52	-1,079	578 Λεχαινά 51	-0,762	433 Λιβάδι 51
-1,625	957 Ελευθερία 33	-1,284	590 Σπάρτη-I 51	-1,079	596 Μολάοι 51	-0,748	663 Λαύριο 52
-1,603	880 Λεοντάρι 52	-1,284	714 Ρουφ 54	-1,079	933 Μολάοι 52	-0,746	581 Λάδωνας 51
-1,596	679 Αγ. Θεόδ. 51	-1,284	865 Βόλος-I 52	-1,076	716 Σαλαμίνα 51	-0,738	264 Λάρισα 51
-1,594	356 Οινόφυτα 53	-1,277	561 Μέθανα 52	-1,073	953 Αιγάλεω 32	-0,735	662 Λαύριο 51
-1,593	326 Λεοντάρι 51	-1,274	541 Πάτρα-III 51	-1,072	692 Μότορ Όιλ 51	-0,712	287 Λάρισα-I 52
-1,592	547 Ξυλόκαστρο 52	-1,272	273 Βόλος-I 51	-1,066	328 Στυλίδα 51	-0,696	289 Λάρισα-II 51
-1,591	899 Αμφίκλεια 52	-1,249	537 Πάτρα-I 51	-1,066	646 Ολ. Χωριό 52	-0,653	265 Λάρισα 52
-1,590	680 Αγ. Θεόδ. 52	-1,249	919 Πάτρα-I 52	-1,066	739 Ελληνικό 31	-0,605	571 Μεγαλ.-I 52
-1,564	592 Σπάρτη-II 51	-1,248	921 Πάτρα-III 52	-1,053	275 Βόλος-II 51	-0,596	280 ΒΠ Βόλου 52
-1,561	931 Σπάρτη-II 52	-1,229	654 Αγ. Στέφ. 52	-1,016	717 Σαλαμίνα 52	-0,513	309 Τρίκαλα-II 52
-1,534	256 Αχλάδι 51	-1,229	877 Καρδίτσα 52	-1,013	282 Στεφανοβ. 51	-0,505	308 Τρίκαλα-II 51
-1,534	721 Ν. Χαλκηδ. 53	-1,228	371 Άμφισσα 51	-1,013	867 Στεφανοβ. 52		
-1,532	946 Ν. Μάκρη 52	-1,227	963 Παγκράτι 32	-1,006	959 Ν. Ιωνία 32		
-1,530	257 Αχλάδι 52	-1,226	372 Άμφισσα 52	-0,998	734 Ν. Ιωνία 31		
-1,518	588 Αίγιο 51	-1,222	586 Καλαμάτα 52	-0,998	870 Λάρισα-III 52		

Γ. ΔΙΑΝΥΣΜΑ $S_{\mu^*p_0}''$ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΩΝ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΤΟΥ 2004

$S_{\mu^*p_0}''$	ΖΥΓΟΣ	$S_{\mu^*p_0}''$	ΖΥΓΟΣ
-3,547	346 Χαλκίδα-II 51	-1,227	963 Παγκράτι 32
-2,604	884 Χαλκίδα-II 52	-1,222	586 Καλαμάτα 52
-2,232	358 Θήβα 51	-1,210	649 Αγ. Στέφ. 31
-2,230	688 Ελευσίνα 52	-1,184	602 Πύργος 51
-2,224	687 Ελευσίνα 51	-1,184	737 Πειραιάς 31
-1,987	354 Οινόφυτα 51	-1,180	683 Ασπρόπυργος 52
-1,924	883 Χαλκίδα-I 52	-1,170	551 Κόρινθος 51
-1,867	886 Θήβα 52	-1,168	719 Ν. Χαλκηδ. 51
-1,810	351 Σχηματάρι 52	-1,158	962 Ν. Σμύρνη 34
-1,801	616 Αχαρναί 52	-1,155	712 Ρουφ 52
-1,769	344 Χαλκίδα-I 51	-1,153	736 Παγκράτι 31
-1,712	711 Ρουφ 51	-1,144	730 Αιγάλεω 31
-1,694	924 Κόρινθος 52	-1,128	882 Λαμία 52
-1,693	958 Καλλιθέα 32	-1,128	945 Βάρη 52
-1,625	957 Ελευθερία 33	-1,126	685 Βάρη 51
-1,564	592 Σπάρτη-II 51	-1,123	965 Ψυχικό 32
-1,561	931 Σπάρτη-II 52	-1,113	713 Ρουφ 53
-1,534	721 Ν. Χαλκηδ. 53	-1,099	638 Παλλήνη 51
-1,517	682 Ασπρόπυργος 51	-1,093	949 Σπάτα 53
-1,505	544 ΒΖ Πάτρας 52	-1,087	735 Ν. Σμύρνη 31
-1,500	925 Άργος-I 52	-1,081	960 Ν. Σμύρνη 32
-1,497	553 Άργος-I 51	-1,076	716 Σαλαμίνα 51
-1,494	732 Ελευθερία 31	-1,073	953 Αιγάλεω 32
-1,444	966 Ψυχικό 33	-1,066	739 Ελληνικό 31
-1,377	956 Ελευθερία 32	-1,006	959 Ν. Ιωνία 32
-1,374	333 Λαμία 51	-0,998	734 Ν. Ιωνία 31
-1,360	967 Ψυχικό 34	-0,998	870 Λάρισα-III 52
-1,336	322 Καρδίτσα 51	-0,993	639 Παλλήνη 52
-1,333	738 Ψυχικό 31	-0,957	316 Φάρσαλα 51
-1,314	653 Αγ. Στέφ. 51	-0,911	302 Τρίκαλα 51
-1,308	585 Καλαμάτα 51	-0,857	935 Πύργος 52
-1,287	720 Ν. Χαλκηδ. 52	-0,856	703 Μαρκόπουλ. 52
-1,274	541 Πάτρα-III 51	-0,696	289 Λάρισα-II 51
-1,248	921 Πάτρα-III 52	-0,653	265 Λάρισα 52
-1,229	654 Αγ. Στέφ. 52	-0,596	280 ΒΠ Βόλος 52
-1,228	371 Άμφισσα 51		

Δ. ΔΙΑΝΥΣΜΑ $S_{V_{MegP}}$ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΩΝ ΤΕΡΜΑΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗ
1 ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΜΕΓΙΣΤΟΥ 2005

(Παρατίθενται μόνο τα πρώτα 175 στοιχεία)

$\tilde{S}_{V_i P_i}$	ΖΥΓΟΣ	$\tilde{S}_{V_i P_i}$	ΖΥΓΟΣ	$\tilde{S}_{V_i P_i}$	ΖΥΓΟΣ	$\tilde{S}_{V_i P_i}$	ΖΥΓΟΣ
-0,04645	608 Σπάρτη-II 51	-0,01945	456 Αιτωλικό 51	-0,00643	451 Ψαχνά 52	-0,00484	262 Αχλάδι 52
-0,04641	954 Σπάρτη-II 52	-0,01911	951 Άστρος 52	-0,00643	725 Ρουφ 53	-0,00484	700 Βάρη 51
-0,04291	601 Καλαμάτα 51	-0,01910	579 Άστρος 51	-0,00635	687 Αγ. Γεώργ. 52	-0,00484	972 Βάρη 52
-0,04079	583 Μεγ/πολη 31	-0,01726	567 Κόρινθος 51	-0,00621	423 Καλλιστήρι 51	-0,00480	917 ΛΑΡΚΟ 32
-0,03718	602 Καλαμάτα 52	-0,01649	562 Ξυλόκαστρο 51	-0,00621	686 Αγ. Γεώργ. 51	-0,00479	373 Υλίκη 51
-0,03595	610 Χωρέμι 51	-0,01615	565 Βέλο 51	-0,00608	728 Σαλαμίνα 51	-0,00479	977 Σπάτα 52
-0,03589	955 Χωρέμι 52	-0,01614	945 Βέλο 52	-0,00604	366 Θήβα 51	-0,00478	1000 Ψυχικό 34
-0,03536	586 Μεγ/πολη-I 51	-0,01523	566 Κόρινθος 31	-0,00598	997 Πειραιάς 32	-0,00477	488 Ιωάννινα-I 51
-0,03491	531 Ζάκυνθος 51	-0,01513	694 Αγ. Θεόδ. 51	-0,00596	729 Σαλαμίνα 52	-0,00475	371 Κοπαΐδα 51
-0,03477	594 Λεχαινά 51	-0,01508	695 Αγ. Θεόδ. 52	-0,00588	350 Ερέτρια 51	-0,00475	974 Ν. Μάκρη 52
-0,03385	618 Πύργος 51	-0,01341	517 Κέρκυρα-I 51	-0,00585	424 Καλλιστήρι 52	-0,00474	908 Κοπαΐδα 52
-0,03329	590 Μεγ/πολη-II 31	-0,01341	518 Κέρκυρα-I 52	-0,00584	741 Αιγάλεω 31	-0,00472	383 Αλουμίνιο 52
-0,03296	576 Μέθανα 51	-0,01319	723 Ρουφ 51	-0,00584	746 Ν. Σμύρνη 31	-0,00469	668 Αγ. Στέφ. 52
-0,03119	559 ΒΖ Πατρών 51	-0,01258	726 Ρουφ 54	-0,00579	732 Ν. Χαλκηδ. 52	-0,00464	909 Υλίκη 52
-0,03110	957 Πύλος 52	-0,01173	721 Μέγαρα 51	-0,00578	982 Ν. Χαλκηδ. 53	-0,00462	999 Ψυχικό 33
-0,03101	553 Πάτρα-I 51	-0,01152	697 Ασπρ/γος 51	-0,00575	744 Καλλιθέα 31	-0,00460	712 Ν. Μάκρη 51
-0,03095	953 Αίγιο 52	-0,01075	988 Ελευθερία 33	-0,00574	903 Χαλκίδα-I 52	-0,00459	284 ΒΠ Βόλου 51
-0,03079	532 Ζάκυνθος 52	-0,01044	992 Ν. Σμύρνη 32	-0,00565	359 Σχηματάρι 52	-0,00456	336 Στυλίδα 51
-0,02925	948 Άργος-I 52	-0,01040	934 Λευκάδα 52	-0,00563	989 Ελευθερία 34	-0,00456	431 Κάρυστος 52
-0,02918	569 Άργος-I 51	-0,00961	524 Μεσογγή 51	-0,00561	362 Οινόφυτα 51	-0,00456	360 ΕΛΒΑΛ 31
-0,02885	941 Πάτρα-I 52	-0,00961	933 Μεσογγή 52	-0,00559	450 Ψαχνά 51	-0,00455	428 Αιδηψός 51
-0,02819	555 Πάτρα-II 51	-0,00914	987 Ελευθερία 32	-0,00557	356 Μαντούδι 51	-0,00451	380 Αμφισσα 52
-0,02804	604 Αίγιο 51	-0,00902	932 Αγ. Βασίλ. 52	-0,00552	354 Χαλκίδα-II 51	-0,00450	379 Αμφισσα 51
-0,02792	942 Πάτρα-II 52	-0,00901	522 Αγ. Βασίλ. 51	-0,00544	710 Κάλαμος 51	-0,00448	661 Ολυμ. Χωρ.52
-0,02786	573 Κρανίδι 51	-0,00873	742 Αριστείδου 31	-0,00536	743 Ελευθερία 31	-0,00447	660 Ολυμ. Χωρ.51
-0,02786	616 Κυπαρισσία 51	-0,00857	931 Κέρκυρα-II 52	-0,00531	906 Θήβα 52	-0,00443	364 Οινόφυτα 53
-0,02703	560 ΒΖ Πατρών 52	-0,00854	520 Κέρκυρα-II 51	-0,00529	261 Αχλάδι 51	-0,00443	632 Αχαρναί 52
-0,02630	623 ΤΙΤΑΝ 31	-0,00843	698 Ασπρ/γος 52	-0,00529	904 Χαλκίδα-II 52	-0,00438	510 Καλπάκι 51
-0,02624	597 Λάδωνας 51	-0,00827	702 Ελευσίνα 51	-0,00522	923 Αιδηψός 52	-0,00438	714 Μαρκ/λο 51
-0,02585	950 Άργος-II 52	-0,00737	514 Καναλάκι 51	-0,00519	631 Αχαρναί 51	-0,00436	395 Τσιμ. Χαλκ. 31
-0,02560	582 Τρίπολη 52	-0,00729	707 Μότορ Όιλ 51	-0,00516	731 Ν. Χαλκηδ. 51	-0,00436	426 Αμφίκλεια 51
-0,02536	454 Τριχωνίδα 52	-0,00728	703 Ελευσίνα 52	-0,00512	352 Χαλκίδα-I 51	-0,00436	745 Ν. Ιωνία 31
-0,02522	557 Πάτρα-III 51	-0,00726	930 Καναλάκι 52	-0,00511	368 Αταλάντη 51	-0,00435	387 Αλουμίνιο 56
-0,02514	943 Πάτρα-III 52	-0,00725	397 ΤΙΤΑΝ 31	-0,00511	369 Αταλάντη 52	-0,00435	922 Αμφίκλεια 52
-0,02493	958 Πύργος 52	-0,00714	480 Ηγουμεν. 51	-0,00509	363 Οινόφυτα 52	-0,00435	1002 Μαρούσι 32
-0,02450	526 Αργοστόλι 51	-0,00714	724 Ρουφ 52	-0,00502	389 Λιβαδειά 51	-0,00434	753 Βριλήσσια 31
-0,02390	527 Αργοστόλι 52	-0,00711	505 Πρέβεζα 52	-0,00502	390 Λιβαδειά 52	-0,00433	399 ΕΑΒ 31
-0,02390	587 Μεγ/πολη-I 52	-0,00689	504 Πρέβεζα 51	-0,00502	983 ΕΛΔΑ 32	-0,00431	385 Αλουμίνιο 54
-0,02323	453 Τριχωνίδα 51	-0,00685	512 Μούρτος 51	-0,00495	926 Ιωάννινα-II 52	-0,00431	998 Ψυχικό 32
-0,02297	581 Τρίπολη 51	-0,00682	733 Χαλυβ/γική 31	-0,00491	907 Θήβα 53	-0,00428	459 Ιωάννινα-II 51
-0,02289	947 Κόρινθος 52	-0,00679	477 Άκτιο 51	-0,00490	407 Λάρυμνα 51	-0,00426	985 Αιγάλεω 33
-0,02241	577 Μέθανα 52	-0,00678	927 Άκτιο 52	-0,00488	386 Αλουμίνιο 55	-0,00424	751 Φαλ. Δέλτα 31
-0,02202	457 Αιτωλικό 52	-0,00664	358 Σχηματάρι 51	-0,00488	928 Ιωάννινα-I 52	-0,00415	281 Βόλος-II 52
-0,02016	563 Ξυλόκαστρο 52	-0,00645	688 Αγ. Γεώργ. 53	-0,00486	667 Αγ. Στέφ. 51		

Ε. ΔΙΑΝΥΣΜΑ $S_{V_{MarP}}$ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΩΝ ΤΑΣΗΣ ΖΥΓΟΥ 150 kV ΑΜΑΡΟΥΣΙΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΚΑΛΟΚΑΙΡΙΟΥ 2007

(Παρατίθενται μόνο τα πρώτα 175 στοιχεία)

$S_{\mu^*p_0}'$	ΖΥΓΟΣ	$S_{\mu^*p_0}'$	ΖΥΓΟΣ	$S_{\mu^*p_0}'$	ΖΥΓΟΣ	$S_{\mu^*p_0}'$	ΖΥΓΟΣ
-0,12207	996 Ν. Χαλκηδ. 53	-0,08523	368 Οινόφυτα 52	-0,07393	742 Ν. Χαλκηδ. 51	-0,06264	374 Αταλάντη 52
-0,11769	743 Ν. Χαλκηδ. 52	-0,08520	574 Άργος-Ι 51	-0,07372	1008 Ν. Σμύρνη 34	-0,06242	1011 Πειραιάς 32
-0,11740	678 Αγ. Στέφ. 52	-0,08505	762 Φαλ. Δέλτα 31	-0,07369	722 Κάλαμος 51	-0,06210	395 Λιβαδειά 52
-0,11721	735 Ρουφ 51	-0,08490	739 Σαλαμίνα 51	-0,07367	1017 Βριλήσσια 32	-0,06171	1015 Ελληνικό 32
-0,11444	709 Ασπρ/γος 51	-0,08455	987 Ν. Μάκρη 52	-0,07359	759 Πειραιάς 31	-0,06147	1005 Ν. Ιωνία 32
-0,11319	458 Τριγωνίδα 51	-0,08436	733 Μέγαρα 51	-0,07358	600 Λεχαινά 51	-0,06147	1010 Παγκράτι 32
-0,11260	638 Αχαρναί 51	-0,08415	944 Κέρκυρα-ΙΙ 52	-0,07347	766 Κορυδαλλός 31	-0,06131	593 Μεγ/πολη-Ι 52
-0,10716	559 Πάτρα-ΙΙ 51	-0,08401	992 Μέγαρα 52	-0,07335	576 Άργος-ΙΙ 51	-0,06116	453 Άνδρος 51
-0,10543	557 Πάτρα-Ι 51	-0,08381	525 Κέρκυρα-ΙΙ 51	-0,07324	706 Αγ. Θεόδ. 51	-0,06077	531 Αργοστόλι 51
-0,10422	955 Πάτρα-ΙΙ 52	-0,08368	967 Σπάρτη-ΙΙ 52	-0,07320	596 Μεγ/πολη-ΙΙ 31	-0,05912	661 Παλλήνη 51
-0,10382	1018 Κορυδαλ. 32	-0,08365	583 Μέθανα 52	-0,07315	707 Αγ. Θεόδ. 52	-0,05885	920 Υλίκη 52
-0,10252	662 Παλλήνη 52	-0,08331	756 Ν. Ιωνία 31	-0,07239	917 Θήβα 52	-0,05823	1007 Ν. Σμύρνη 33
-0,10230	610 Αίγιο 51	-0,08300	669 Ολυμ. Χωρ.51	-0,07219	402 ΤΙΤΑΝ 31	-0,05818	373 Αταλάντη 51
-0,09830	712 Βάρη 51	-0,08184	699 Αγ. Γεώργ. 52	-0,07207	567 Ξυλόκαστρο 51	-0,05813	758 Παγκράτι 31
-0,09797	966 Αίγιο 52	-0,08100	582 Μέθανα 51	-0,07189	958 Βέλο 52	-0,05796	761 Ελληνικό 31
-0,09756	710 Ασπρ/γος 52	-0,08085	618 Μολάοι 51	-0,07188	369 Οινόφυτα 53	-0,05784	1016 Μαρούσι 32
-0,09630	954 Πάτρα-Ι 52	-0,08085	969 Μολάοι 52	-0,07144	588 Τρίπολη 52	-0,05778	764 Βριλήσσια 31
-0,09628	565 ΒΖ Πάτρας 52	-0,08064	364 Σχηματάρι 52	-0,07121	570 Βέλο 51	-0,05768	382 Καμ. Βούρ. 51
-0,09498	994 Ρουφ 54	-0,08053	970 Πύλος 52	-0,07107	357 Χαλκίδα-Ι 51	-0,05768	922 Καμ. Βούρ. 52
-0,09406	971 Πύργος 52	-0,08035	677 Αγ. Στέφ. 51	-0,07101	1014 Ψυχικό 34	-0,05643	388 Αλουμίνιο 52
-0,09402	956 Πάτρα-ΙΙΙ 52	-0,08013	1013 Ψυχικό 33	-0,07089	757 Ν. Σμύρνη 31	-0,05590	365 ΕΛΒΑΛ 31
-0,09400	561 Πάτρα-ΙΙΙ 51	-0,07983	670 Ολυμ. Χωρ.52	-0,07042	461 Αιτωλικό 51	-0,05566	752 Αιγάλεω 31
-0,09333	715 Ελευσίνα 52	-0,07891	359 Χαλκίδα-ΙΙ 51	-0,07022	603 Λάδωνας 51	-0,05537	997 ΕΛΔΑ 32
-0,09326	608 Καλαμάτα 52	-0,07873	620 Πύλος 51	-0,06967	684 Λαύριο 31	-0,05532	378 Υλίκη 51
-0,09320	1001 Ελευθερία 32	-0,07872	572 Κόρινθος 51	-0,06955	353 Αλιβέρι 52	-0,05523	428 Καλλιστήρι 51
-0,09282	630 ΤΙΤΑΝ 31	-0,07858	622 Κυπαρισσία 51	-0,06901	612 Σπάρτη-Ι 51	-0,05485	352 Αλιβέρι 51
-0,09280	737 Ρουφ 53	-0,07838	462 Αιτωλικό 52	-0,06844	361 Μαντουδί 51	-0,05474	726 Μαρκ/λο 51
-0,09258	1002 Ελευθερία 33	-0,07805	363 Σχηματάρι 51	-0,06807	639 Αχαρναί 52	-0,05458	928 ΛΑΡΚΟ 32
-0,09223	985 Βάρη 52	-0,07758	568 Ξυλόκαστρο 52	-0,06792	964 Άστρος 52	-0,05393	727 Μαρκ/λο 52
-0,09180	607 Καλαμάτα 51	-0,07733	527 Αγ. Βασίλ. 51	-0,06790	585 Άστρος 51	-0,05331	934 Αιδηψός 52
-0,09022	523 Κέρκυρα-Ι 52	-0,07663	760 Ψυχικό 31	-0,06753	587 Τρίπολη 51	-0,05321	406 ΛΑΡΚΟ 31
-0,09017	459 Τριγωνίδα 52	-0,07615	614 Σπάρτη-ΙΙ 51	-0,06722	592 Μεγ/πολη-Ι 51	-0,05313	435 Κάρυστος 51
-0,08993	960 Κόρινθος 52	-0,07610	455 Ψαχνά 51	-0,06671	755 Καλλιθέα 31	-0,05313	935 Κάρυστος 53
-0,08968	355 Ερέτρια 51	-0,07589	963 Άργος-ΙΙ 52	-0,06659	918 Θήβα 53	-0,05255	485 Ηγουμεν. 51
-0,08908	736 Ρουφ 52	-0,07582	915 Χαλκίδα-ΙΙ 52	-0,06652	714 Ελευσίνα 51	-0,05254	728 Μαρκ/λο 53
-0,08891	371 Θήβα 51	-0,07556	753 Αριστείδου 31	-0,06594	400 Τσιμ. Χαλκ. 31	-0,05164	429 Καλλιστήρι 52
-0,08795	700 Αγ. Γεώργ. 53	-0,07552	624 Πύργος 51	-0,06552	1003 Ελευθερία 34	-0,05147	436 Κάρυστος 52
-0,08765	522 Κέρκυρα-Ι 51	-0,07511	698 Αγ. Γεώργ. 51	-0,06514	394 Λιβαδειά 51	-0,05139	1009 Ν. Σμύρνη 35
-0,08757	404 ΕΑΒ 31	-0,07498	537 Ζάκυνθος 52	-0,06479	688 Λαύριο 52	-0,05122	266 Αχλάδι 52
-0,08708	724 Ν. Μάκρη 51	-0,07475	601 Λεχαινά 52	-0,06449	1000 Αριστείδου 32	-0,05116	391 Αλουμίνιο 55
-0,08654	367 Οινόφυτα 51	-0,07453	616 Χωρέμι 51	-0,06397	744 Χαλυβ/γική 31	-0,05074	390 Αλουμίνιο 54
-0,08632	1006 Ν. Σμύρνη 32	-0,07453	968 Χωρέμι 52	-0,06380	763 Μαρούσι 31	-0,04988	346 Λαμία 51
-0,08528	914 Χαλκίδα-Ι 52	-0,07441	998 Αιγάλεω 32	-0,06328	532 Αργοστόλι 52	-0,04987	399 ΑΓΕΤ 31
-0,08527	961 Άργος-Ι 52	-0,07426	945 Αγ. Βασίλ. 52	-0,06326	991 Σπάτα 53		

Βιβλιογραφία

- [AAB06] M. G. Adamiak, A. P. Apostolov, M. M. Begovic, C. F. Henville, K. E. Martin, G. L. Michel, A. G. Phadke, J. S. Thorp. *Wide Area Protection-Technology and Infrastructures*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 2, April 2006.
- [AAH97] S. Arnborg, G. Andersson, D. Hill, I. Hiskens. *On Undervoltage Load Shedding in Power Systems*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 19, No.2, pp. 141-149, February 1997.
- [AAH98] S. Arnborg, G. Andersson, D. Hill, I. Hiskens. *On Influence of Load Modelling for Undervoltage Load Shedding Studies*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 2, pp. 395-400, May 1998.
- [AC92] V. Ajjarapu, C. Christy. *The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pg. 416-423, February 1992.
- [ADF05] G. Andersson, P. Donalek, R. Farmer, N. Hatziargyriou, I. Kamwa, P. Kundur, N. Martins, J. Paserba, P. Pourbeik, J. Sanchez-Gasca, R. Schulz, A. Stankovic, C. Taylor, V. Vittal. *Causes of the 2003 Major Grid Blackouts in North America and Europe, and Recommended Means to Improve System Dynamic Performance*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 4, pp. 1922-1928, November 2005.
- [ADH94] F.L. Alvarado, I. Dobson, Y. Hu. *Computation of Closest Bifurcations in Power Systems*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, pg. 918-928, May 1994.
- [AdS04] C. M. Affonso, L. C. P. da Silva, F. G. M. Lima, S. Soares. *MW and MVar Management on Supply and Demand Side for Meeting Voltage Stability Margin Criteria*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 3, pg. 1538-1545, August 2004.
- [AMR06] T. Amraee, B. Mozafari, A. M. Ranjbar. *An Improved Model for Optimal Under Voltage Load Shedding: Particle Swarm Approach*. IEEE Power India Conference, April 2006
- [APK05] L. D. Aryaa, V. S. Pandeb, D. P. Kothari. *A Technique for Load-Shedding Based on Voltage Stability Consideration*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 27, No. 7, pg. 506-517, September 2005.
- [Arn86] V. I. Arnol'd. *Catastrophe Theory*. Springer Verlag, 1986.
- [AT88] M. M. Adibi, D. K. Thorne. *Local Load Shedding*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No.3, pg. 1220-1229, August 1988.
- [BBC02] A. Bihain, G. Burt, F. Casamata, T. Koronides, R. Lopez, S. Massucco, D. Ruiz-Vega, C. Vournas. *Advance Perspectives and Implementation of Dynamic Security Assessment in the Open Market Environment*. CIGRE Paper 39-101, 2002.
- [BBM96] A. Berizzi, P. Bresesti, P. Marannino, G. P. Granelli, M. Montagna. *System-Area Operating Margin Assessment and Security Enhancement Against Voltage Collapse*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 3, pg. 1451-1462, August 1996.
- [Bec94] Beckwith Electric Co., Inc. *Basic Considerations for the Application of LTC Transformers and Associated Controls*. Tap Changer Controls, Application Note 17, 1994.
- [BFG95] M. Begovic, D. Fulton, M. R. Gonzalez, J. Goossens, E. A. Guro, R. W. Haas, C. F. Henville, G. Manchur, G.L. Michel, R. C. Pastore, J. Postforoosh, G. L. Schmitt, J. B. Williams, K. Zimmerman, A. A. Burzese. *Summary of System Protection and Voltage Stability*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, pp. 631-638, April 1995.

- [BLS05] L. V. Barboza, A. A. P. Lerm, R. S. Salgado. *Load-Shedding - An Efficient Use of LTC Transformers*. 15th Power System Computation Conference, Liege, Belgium, August 2005.
- [BNK05] M. Begovic, D. Novosel, D. Karlsson, C. Henville, G. Michel. *Wide-Area Protection and Emergency Control*. IEEE Proceedings, Vol. 93, No. 5, pg. 876- 891, May 2005.
- [BP92] M. Begovic, A. Phadke. *Control of Voltage Stability Using Sensitivity Analysis*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. , pg. 114-123, 1992.
- [BPA98a] R. Balanathan, N. C. Pahalawaththa, U. D. Annakkage, P. W. Sharp. *Undervoltage Load Shedding to Avoid Voltage Instability*. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 145, pg. 175-181, 1998.
- [BPA98b] R. Balanathan, N. C. Pahalawaththa, U. D. Annakkage. *A Strategy for Undervoltage Load Shedding in Power Systems*. International Conference on Power System Technology, Vol. 2, pp. 1494-1498, August 1998.
- [BSG02] G. Benmouyal, E. O. Schweitzer, A. Guzman. *Synchronized Phasor Measurement in Protective Relays for Protection, Control, and Analysis of Electric Power Systems*. Schweitzer Engineering Laboratories Literature, 2002. Δημοσιεύεται στην ιστοσελίδα www.selinc.com.
- [BTS96] S. Bernard, G. Trudel, G. Scott. *A 735-kV Shunt Reactors Automatic Switching System for Hydro-Quebec Network*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 1024-2030, November 1996.
- [Cal84] M. S. Calovic. *Modeling and Analysis of Under-Load Tap-Changing Transformer Control System*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 103, pp. 1909-1915, 1984.
- [Cap03] F. Capitanescu. *Preventive Assessment and Enhancement of Power System Voltage Stability: An Integrated Approach of Voltage and Thermal Security*. Ph.D. Dissertation, University of Liege, December 2003.
- [CC03] D. Chattopadhyaya, B. B. Chakrabarti. *A Preventive/Corrective Model for Voltage Stability Incorporating Dynamic Load-Shedding*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 25, No. 5, pg. 363-376, June 2003.
- [CCM96] F. Carbone, G. Castellano, G. Moreschini. *Coordination and Control of Tap Changers Under Load at Different Voltage Level Transformers*. Proceedings of the Melecon '96 Conference, Bari, Italy, May 1996.
- [CDM05] A. Capozza, C. D'Adamo, G. Mauri, A. Pievatolo. *Load Shedding and Demand Side Management Enhancements to Improve the Security of a National Electrical System*. IEEE/PES St. Petersburg Power Tech Conference, Russia, June 2005.
- [CdS96] C. A. Canizares, A. C. Z. de Souza, V. H. Quintana. *Comparison of Performance Indices for Detection of Proximity to Voltage Collapse*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. , pg. 1441-1450, 1996.
- [CH01] Γ. Κονταξής, Ν. Χατζηαργυρίου. *Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας*. Εκδόσεις ΕΜΠ, 2001.
- [CKN06] Γ. Χριστοφορίδης, Ι. Καμπούρης, Β. Νικολαΐδης, Κ. Βουρνάς. *Δείκτες Ασφάλειας Τάσης και Επίδραση Πρόσφατων Ενισχύσεων Συστήματος Μεταφοράς*. Ελληνική Επιτροπή CIGRE, Αθήνα 2006.
- [CKV05] G. Christoforidis, J. Kabouris, C. Vournas, T. Van Cutsem. *Investigation of Parameters Affecting Voltage Security of the Hellenic Interconnected System*. 15th Power System Computation Conference, Liege, Belgium, August 2005.

- [CKV06] G. Christoforidis, J. Kabouris, C. D. Vournas, T. Van Cutsem. *Experience Gained by the Application of a Real-time Voltage Security Assessment Method at the Hellenic Transmission System Operator*. CIGRE Paper C2-206, 2006.
- [Cor05] S. Corsi. *Wide Area Voltage Regulation and Protection: When Their Co-ordination is Simple*. IEEE/PES St. Petersburg Power Tech Conference, Russia, June 2005.
- [CS79] S. M. Chan, F. C. Schweppe. *A Generation Reallocation and Load Shedding Algorithm*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 98, No. 1, pg. 26-34, January/February 1979.
- [CTF01] CIGRE Task Force 38-02-19. *System Protection Schemes in Power Networks*. CIGRE Publication, 2001.
- [CTF93] CIGRE Task Force 38-02-10. *Modelling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena*. CIGRE Publication, 1993.
- [CTF94a] CIGRE Task Force 38-02-08. *Long Term Dynamics - Phase ii. Final Report*. CIGRE Publication, 1994.
- [CTF94b] CIGRE Task Force 38-02-12. *Criteria and Countermeasures for Voltage Collapse*. CIGRE Publication, 1994.
- [CVC05] F. Capitanescu, T. Van Cutsem. *Unified Sensitivity Analysis of Unstable or Low Voltages Caused by Load Increases or Contingencies*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 1, February 2005.
- [CY79] S. M. Chan, E. Yip. *A Solution of the Transmission Limited Dispatch Problem By Sparse Linear Programming*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 98, No.3, pg. 1044-1053, May/June 1979.
- [DDF97] J. Deuse, J. Dubois, R. Fanna, I. Hanza. *EWR Undervoltage Load Shedding Scheme*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 4, pp. 1446-1454, November 1997.
- [Dei06] ΔΕΗ. *Δελτίο Τύπου Ιουνίου 2006*. Δημοσιεύεται στην ιστοσελίδα www.dei.gr.
- [DH02] V. Donde, I. A. Hiskens. *Analysis of Limit Cycle Stability in a Tap-Changing Transformer*. IEEE Symposium on Circuits and Systems, May 2002.
- [DKH00] M. J. Damborg, M. Kim, J. Huang, S. S. Venkata, A. G. Phadke. *Adaptive Protection as Preventive and Emergency Control*. IEEE/PES Summer Meeting, Seattle, USA, 2000.
- [DL92] I. Dobson, L. Lu. *Voltage Collapse Precipitated by the Immediate Change in Stability when Generator Reactive Power Limits are Encountered*. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, Vol. 39, No. 9, pg. 762-766, September 1992.
- [DL93] I. Dobson, L. Lu. *New Methods for Computing a Closest Saddle-Node Bifurcation and Worst Case Load Power Margin for Voltage Collapse*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, pg. 905-913, August 1993.
- [dMF96] F. P. de Mello, J. W. Feltes. *Voltage Oscillatory Instability Caused by Induction Motor Loads*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 3, pg. 1279-1285, August 1996.
- [DS93] J. Deuse, M. Stubbe. *Dynamic Simulation of Voltage Collapses*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pg. 894-904, August 1993.
- [ELR03] F. M. Echavarren, E. Lobato, L. Rouco, M. I. Navarrete, R. Casanova, G. Lopez. *A Load Shedding Algorithm for Improvement of Load Margin to Voltage Collapse*. IEEE Bologna Power Tech Conference, Italy, June 2003.
- [EOV05] P. Etingov, A. Oudalov, N. Voropai, A. Germond, R. Cherkaoui. *Coordinated Emergency Control of Load Shedding and FACTS Devices*. IEEE/PES St. Petersburg Power Tech Conference, Russia, June 2005.

- [EVO05] P. Etingov, N. Voropai, A. Oudalov, A. Germond, R. Cherkaoui. *Congestion Management Using Coordinated Control of FACTS Devices and Load Shedding*. 15th Power System Computation Conference, Liege, Belgium, August 2005.
- [FAL00] Z. Feng, V. Ajjarapu, B. Long. *Identification of Voltage Collapse Through Direct Equilibrium Tracing*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 1, February 2000.
- [FAM00] Z. Feng, V. Ajjarapu, D. Maratukulam. *A Comprehensive Approach for Preventive and Corrective Control to Mitigate Voltage Collapse*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, pg. 791-797, May 2000.
- [FAM98] Z. Feng, V. Ajjarapu, D. J. Maratukulam. *A Practical Minimum Load Shedding Strategy to Mitigate Voltage Collapse*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 4, pg. 1285-1291, November 1998.
- [Fri76] G. D. Frielander. *What Went Wrong VIII: The Great Blackout of '65*. IEEE Spectrum, pg. 83-86, 1976.
- [FZM02] W. Fu, S. Zhao, J. D. McCalley, V. Vittal, N. Abi-Samra. *Risk Assessment for Special Protection Systems*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 1, pg. 63-72, February 2002.
- [GDA97] S. Green, I. Dobson, F. L. Alvarado. *Sensitivity of the Loading Margin to Voltage Collapse with Respect to Arbitrary Parameters*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, pp. 262-272, February 1997.
- [GIR99] A. Garzillo, M. Innorta, M. Ricci. *The Flexibility of Interior Point Based Optimal Power Flow Algorithms Facing Critical Network Situations*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 21, No. 8, pg. 579-584, November 1999.
- [GLM05] G. Giannuzzi, D. Lucarella, S. Massucco, M. Pozzi, M. Sforza, F. Silvestro. *Advanced Load-shedding Methodology and Architecture for Normal and Emergency Operation of the Italian Power System*. IEEE/PES General Meeting, San Francisco, USA, 2005.
- [GMK92] B. Gao, G. K. Morison, P. Kundur. *Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. , pg. 1529-1542, 1992.
- [GMK96] B. Gao, G. K. Morison, P. Kundur. *Towards the Development of a Systematic Approach for Voltage Stability Assessment of Large-Scale Power Systems*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, pp. 1314-1324, August 1996.
- [GMM96] S. Granville, J. C. O. Mello, A. C. G. Melo. *Application of Interior Point Methods to Power Flow Unsolvability*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pg. 1096-1104, May 1996.
- [GSS05] G. Giannuzzi, R. Salvati, M. Sforza, A. Danelli, M. Pozzi, M. Salvetti. *A DSA-Integrated Shedding System for Corrective Emergency Control*. 15th Power System Computation Conference, Liege, Belgium, August 2005.
- [GTS04] A. Guzman, D. Tziouvaras, E. O. Schweitzer, K.E. Martin. *Local and Wide-Area Network Protection Systems Improve Power System Reliability*. Schweitzer Engineering Laboratories Literature, 2004. Δημοσιεύεται στην ιστοσελίδα www.selinc.com.
- [GWG94] CIGRE Working Group 39-05. *Industry Experience with Special Protection Schemes*. Electra, No. 155, August 1994.
- [HCW05] J. Hsu, K. Cocco, M. Willis, S. Wiggerhaus. *Use of Special Protection Systems to Meet the Reliability Criteria During the Double Generators or Double Circuits Outage in the WECC Major Southwest Network Hub*. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.

- [HD01] I. A. Hiskens, R. J. Davy. *Exploring the Power Flow Solution Space Boundary*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 3, pg. 389-395, August 2001.
- [HE89] A. E. Hammad, M. Z. El-Sadek. *Prevention of Transient Voltage Instabilities due to Induction Motor Loads by Static Var Compensators*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 1182-1190, August 1989.
- [HF99] L. J. Horak, D. J. Finley. *Load Shedding for Utility and Industrial Power System Reliability*. 53rd Annual Georgia Tech Protective Relay Conference Atlanta, Georgia, May 1999.
- [HH89] I. A. Hiskens, D. J. Hill. *Energy Functions Transient Stability, and Voltage Behaviour in Power Systems with Nonlinear Loads*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, pp. 1525-1533, October 1989.
- [HK92] J. Hale, H. Kocak. *Dynamics and Bifurcations*. Springer Verlag, 1992.
- [HPT68] L. P. Hadju, J. Peschon, W. F. Tinney, D. S. Piercy. *Optimal Load Shedding Policy for Power Systems*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 87, pg. 784-794, 1968.
- [HS98] D. Hazarika, A. K. Sinha. *Method for Optimal Load Shedding in Case of Generation Deficiency in a Power System*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 20, No. 6, pg. 411-420, August 1998.
- [ICR91] IEEE Committee Report. *HVDC Controls for System Dynamic Performance*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 743-752, May 1991.
- [ILK96] B. Ingelsson, P. Lindström, D. Karlsson, G. Runvik, J. Sjödin. *Special Protection Scheme Against Voltage Collapse in the South Part of the Swedish Grid*. CIGRE Paper 38-103, 1996.
- [ILS96] B. Ingelsson, P. O. Lindström, J. O. Sjödin, D. Karlsson, G. Runvik. *Special Protection Scheme Against Voltage Collapse in the South Part of the Swedish Grid*. CIGRE Report 38-105, 1996.
- [Ima05] S. Imai. *Undervoltage Load Shedding Improving Security as Reasonable Measure for Extreme Contingencies*. IEEE/PES General Meeting, San Francisco, USA, 2005.
- [IPS02] IEEE/PES Power System Stability Subcommittee. *Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools*. IEEE/PES Special Publication, ISBN 0780378695, August 2002.
- [IPS93] IEEE Power System Relaying Committee. *System Protection and Voltage Collapse*. Special Publication 93-THO-596-7-PWR, June, 1993.
- [ISP00] *Techniques for Power System Stability Limit Search*. IEEE/PES Special Publication IEEE TP-138-0, January 2000.
- [IWG03] Working Group J6 of the Rotating Machinery Protection Subcommittee, Power System Relaying Committee. *Performance of Generator Protection During Major System Disturbances*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, pg. 1650-1662, October 2004.
- [IWG90] IEEE Working Group on Voltage Stability. *Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools and Industry Experience*. IEEE Special Publication 90TH0358-2-PWR, 1990.
- [IWG96] IEEE Working Group K12. *Voltage Collapse Mitigation*. IEEE Power System Relaying Committee, 1996.
- [IZ03a] B. Isaias Lima Lopes, A. C. Zambroni de Souza. *An Approach for Under Voltage Load Shedding*. IEEE Bologna Power Tech Conference, Italy, June 2003.

- [IZ03b] B. Isaias Lima Lopes, A. C. Zambroni de Souza. *On Multiple Tap Blocking to Avoid Voltage Collaps*. International Journal of Electric Power Systems Research, Vol. 67, No. 3, pg. 225-231, December 2003.
- [Joh00] S. Johansson. *Long-term Voltage Stability in Power Systems - Alleviating the Impact of Generator Current Limiters*. Ph.D. Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2000.
- [JPH97] S. G. Johansson, D. Popovic, D. J. Hill, J. E. Daalder. *Avoiding Voltage Collapse by Fast Active Power Rescheduling*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 19, No. 8, pp. 501-509, November 1997.
- [Kar04] D. Karlsson. *Intelligent Load Shedding to Counteract Power System Instability*. Presentation on Critical Infrastructures for Sustainable Power (CRISP) Conference, Grenoble, October 2004.
- [Kar05] Μ. Καρυστιανός. *Βελτιστοποίηση Ορίων Μεταφοράς Ισχύος σε Συνθήκες Ασφάλειας Τάσης*. Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Δεκέμβριος 2005.
- [KBG04] D. Karlsson, L. Broski, S. Ganesan. *Maximizing Power System Stability Through Wide Area Protection*. 57th Annual Conference for Protective Relay Engineers, Texas A&M University, Texas, 2004.
- [KG86] P. Kessel, H. Glavtsh. *Estimating the Voltage Stability of a Power System*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 1, pg. 346-354, 1986.
- [KKT05] M. Klaric, I. Kuzle, T. Tomisa. *Simulation of Undervoltage Load Shedding to Prevent Voltage Collapse*. IEEE/PES St. Petersburg Power Tech Conference, Russia, June 2005.
- [KNI04] A. R. Khatib, R. F. Nuqui, M. R. Ingram, A. G. Phadke. *Real-Time Estimation of Security from Voltage Collapse Using Synchronized Phasor Measurements*. IEEE/PES General Meeting, Denver, USA, 2004.
- [KNV05] M. E. Karystianos, V. C. Nikolaidis, C. D. Vournas. *Loadability Limits and Emergency Countermeasures Against Voltage Collapse*. 15th Power System Computation Conference, Liege, August 2005.
- [Kot03] Μ. Κοτλίδα. *Αποκοπή Φορτίου για Προστασία από Αστάθεια Τάσεως*. Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Οκτώβριος 2003.
- [KSS06] R. D. Kirby, P. E. Schwartz, R. Schwartz. *Microprocessor-Based Protective Relays Deliver More Information and Superior Reliability with Lower Maintenance Costs*. Schweitzer Engineering Laboratories Literature, 2006. Δημοσιεύεται στην ιστοσελίδα www.selinc.com.
- [KTS00] S. Kolluri, K. Tinnium, M. Stephens. *Design and Operating Experience with Fast Acting Load Shedding Scheme in the Entergy System to Prevent Voltage Collapse*. IEEE/PES Winter Power Meeting, Singapore, January 2000.
- [Kun94] P. Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw Hill, 1994.
- [Lac03] W. R. Lachs. *A New Horizon for System Protection Schemes*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pg. 334-338, February 2003.
- [Lar00] M. Larsson. *Coordinated Voltage Control in Electric Power Systems*. Ph.D. Dissertation, Lund University, 2000.
- [LBV04] D. Lefebvre, S. Bernard, T. Van Cutsem. *Undervoltage Load Shedding Scheme for the Hydro-Quebec System*. IEEE/PES General Meeting, Denver, USA, June 2004.
- [LHO02] M. Larsson, D. Hill, G. Olsson. *Emergency Voltage Control Using Search and Predictive Control*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 24, No. 2, pg. 121-130, February 2002.

- [LJA05] H. Liu, L. Jin, V. Ajjarapu, R. Kumar, J. D. McCalley, N. Elia, V. Vittal. *Reachability Analysis Based Minimal Load Shedding Determination*. IEEE/PES General Meeting, San Francisco, USA, 2005.
- [LK03] M. Larsson, D. Karlsson. *Coordinated System Protection Scheme Against Voltage Collapse Using Heuristic Search and Predictive Control*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 3, August 2003.
- [LMV03] D. Lefebvre, C. Moors, T. Van Cutsem. *Design of an Undervoltage Load Shedding Scheme for the Hydro-Quebec System*. IEEE/PES General Meeting, Toronto, Canada, July 2003.
- [LPH98] M. Larsson, D. H. Popovic, D. J. Hill. *Limit Cycles in Power Supply Systems due to OLTC Deadbands and Load-Voltage Dynamics*. International Journal of Electric Power Systems Research, Vol. 47, No. 3, pg. 181-188, November 1998.
- [LR04] S. S. Ladhani, W. Rosehart. *Under Voltage Load Shedding for Voltage Stability: Overview of Concepts and Principles*. IEEE/PES General Meeting, Denver, USA, 2004.
- [LSA92] P. Löf, T. Schmed, G. Andersson, D. J. Hill. *Fast Calculation of a Voltage Stability Index*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. , pg. 54-64, 1992.
- [LSD06] M. La Scala, M. De Benedictis, S. Bruno, A. Grobovoy, N. Bondareva, N. Borodina, D. Denisova, A. J. Germond, R. Cherkaoui. *Development of Applications in WAMS and WACS: An International Cooperation Experience*. IEEE/PES General Meeting, Montreal, Canada, 2006.
- [Man98] Γ. Α. Μάνος. *Ανάλυση Φαινομένων Κατάρρευσης Τάσεως σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Απρίλης 1998.
- [MB03] B. Milosevic, M. Begovic. *Voltage-Stability Protection and Control Using Wide-Area Network of Phasor Measurements*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No.1, pg. 121-127, February 2003.
- [MBS79] T. K. P. Medicherla, R. Billinton, M. S. Sachdev. *Generation Rescheduling and Load Shedding to Alleviate Line Overloads*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 98, No.6, pg. 1876-1884, November/December 1979.
- [MEC04] J. Mechenbier, A. Ellis, R. Curtner, S. Ranade. *Design of an Under Voltage Load Shedding Scheme*. IEEE/PES General Meeting, Denver, USA, 2004.
- [MEM96] M. A. Mostafa, M. E. El-Hawary, G. A. N. Mbamalu, M. M. Mansour, K. M. El-Nagar, A. M. El-Arabaty. *Steady State Load Shedding Schemes: a Performance Comparison*. International Journal of Electrical Power Systems Research, Vol. 38, No. 2, pg. 105-112, August 1996.
- [MEM97] M. A. Mostafa, M. E. El-Hawary, G. A. N. Mbamalu, M. M. Mansour, K. M. El-Nagar, A. M. El-Arabaty. *A Computational Comparison of Steady State Load Shedding Approaches in Electric Power Systems*. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 12, No.1, pg. 30-37, February 1997.
- [Met03] Α. Μέτσιου. *Προστασία από Αστάθεια Τάσεως με Αντίστροφο Έλεγχο Μετασχηματιστών Μεταβλητής Λήψης*. Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Οκτώβριος 2003.
- [MGK93] G. K. Morison, B. Gao, P. Kundur. *Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pg. 1159-1171, August 1993.
- [MHC03] A. Moshref, C. Henville, R. Curtis, K. Morison, L. Albassam, M. Owayedh, O. El Said, M. Ashiq. *Design of a Special Protection System to Maintain System Security at High Import*. IEEE/PES General Meeting, Toronto, Canada, July 2003.

- [MLV00] C. Moors, D. Lefebvre, T. Van Cutsem. *Design of Load Shedding Schemes Against Voltage Instability*. IEEE/PES Winter Power Meeting, Singapore, January 2000.
- [MLV01] C. Moors, D. Lefebvre, T. Van Cutsem. *Load Shedding Controllers Against Voltage Instability: A Comparison of Designs*. IEEE Porto Power Tech Conference, Portugal, September 2001.
- [MNA04] V. Madani, D. Novosel, A. Apostolov, S. Corsi. *Innovative Solutions for Preventing Wide Area Cascading Propagation*. Bulk Power System Dynamics and Control - VI, Cortina d'Ampezzo, Italy, August 2004.
- [Mom01] J. A. Momoh. *Electric Power System Applications of Optimization*. Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [Moo03] C. Moors. *On the Design of Load Shedding Schemes Against Voltage Instability in Electric Power Systems*. Ph.D. Dissertation, University of Liege, October 2002.
- [MV00] N. G. Maratos, C. D. Vournas. *Relationships Between Static Bifurcations and Constrained Optima*. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Geneva, Switzerland, 2000.
- [MVC99] C. Moors, T. Van Cutsem. *Determination of Optimal Load Shedding Against Voltage Instability*. 13th Power System Computation Conference Proceedings, pp. 993-1000, Trondheim, Norway, July 1999.
- [NC95] A. Nanda, M. L. Crow. *An Energy Based Approach to Undervoltage Load Shedding*. International Journal of Electrical Power Systems Research, Vol. 32, No. 1, pg. 11-18, January 1995.
- [NM92] S. A. Nirenberg, D. A. McInnis. *Fast Acting Load Shedding*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 873-877, May 1992.
- [NVF07] V. C. Nikolaidis, C. D. Vournas, G. A. Fotopoulos, G. P. Christoforidis, E. Kalfaoglou, A. Koronides. *Automatic Load Shedding Schemes Against Voltage Instability in the Hellenic System*. Accepted for IEEE/PES General Meeting, Tampa, USA, 2007.
- [OD91] T. J. Overbye, C. L. DeMarco. *Voltage Security Enhancement Using Energy Based Sensitivities*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. , pg. 1196-1202, 1991.
- [OK98] T. J. Overbye, R. P. Klump. *Determination of Emergency Power System Voltage Control Actions*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 1, pg. 205-210, February 1998.
- [Ove94] T. J. Overbye. *A Power Flow Measure for Unsolvable Cases*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pg. 1358-1365, August 1994.
- [Ove95] T. J. Overbye. *Computation of a Practical Method to Restore Power Flow Solvability*. IEEE Transactions of Power Systems, Vol. 10, No. 1, pg. 280-287, February 1995.
- [OYS91] H. Ohtsuki, A. Yokoyama, Y. Sekine. *Reverse Action of On-Load Tap Changer in Association with Voltage Collapse*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No.1, pg. 300-306, February 1991.
- [PB04] PB Power: Independent Consultant for Office of Gas and Electricity Markets. *Report on Support Investigations into Recent Blackouts in London and West Midlands*. Document No. 33.00/PP01:61847/03036, February 2004.
- [PHH96] D. Popovic, I. Hiskens, D. Hill. *Investigation of Load-Tap Changer Interaction*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 18, No. 2, pg. 81-97, February 1996.

- [PLG97] D. S. Popovic, V. A. Levi, Z. A. Gorecan. *Coordination of Emergency Secondary Voltage Control and Load Shedding to Prevent Voltage Instability*. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 144, No. 3, pp. 293-300, May 1997.
- [PMS85] K. A. Palaniswamy, K. B. Misra, J. Sharma. *Optimum Load Shedding Taking Into Account Voltage and Frequency Characteristics of Loads*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, pg. 1342-1348, 1985.
- [PMS98] C. J. Parker, I. F. Morrison, D. Sutanto. *Simulation of Load Shedding as a Corrective Action Against Voltage Collapse*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 46, No. 3, pg. 235-241, September 1998.
- [Por04] Υπουργείο Ανάπτυξης. *Πόρισμα Επιτροπής για τα Αίτια της Διακοπής Παροχής Ηλεκτρικού Ρεύματος στις 12-07-2004*. Ιούλιος 2004. Δημοσιεύεται στην ιστοσελίδα www.rae.gr.
- [Pot06] Ε. Γ. Ποταμιανάκης. *Προσομοίωση και Γραμμικοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας για την Ανάλυση Βραχυπρόθεσμης Ευστάθειας Τάσης*. Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Απρίλιος 2006.
- [PSH93] L. A. S. Pilotto, M. Szechtman, A. E. Hammad. *Transient AC Voltage Related Phenomena for HVDC Schemes Connected to Weak AC Systems*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1396-1404, July 1992.
- [PSL95] M. A. Pai, P. W. Sauer, B. C. Lesieutre, R. Adapa. *Structural Stability in Power Systems - Effect of Load Models*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, pp. 609-615, May 1995.
- [PV06] E. G. Potamianakis, C. D. Vournas. *Short-Term Voltage Instability: Effects on Synchronous and Induction Machines*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 2, pg. 791-798, May 2006.
- [QFH94] T. Quoc Tuan, J. Fandino, N. Hadjsaid, J.C. Sabonnadiere, H. Vu. *Emergency Load Shedding to Avoid Risks of Voltage Instability Using Indicators*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No.1, pg. 341-351, February 1994.
- [QFS92] T. Quoc Tuan, J. Fandino, J.C. Sabonnadiere. *Calculation of Load Shedding Using Sensitivities in order to Avoid Voltage Collapse*. 27th Universities Power Engineering Conference Proceedings, pg. 612-615, University of Bath, 1992.
- [RB01] C. Rehtanz, J. Bertsch. *A New Wide Area Protection System*. IEEE/PES Porto Power Tech Conference, Portugal, September 2001.
- [Rif04] R. M. Rifaat. *On Composite Load Modeling for Voltage Stability and Under Voltage Load Shedding*. IEEE/PES General Meeting, Denver, USA, 2004.
- [San01] V. Sankar. *Standards, Specifications, Designs and Their Relationships*. Tutorial presented at IEEE Transformers Committee Meeting, Orlando, 2001.
- [SBD89] M. Stubbe, A. Bihain, J. Deuse, J. C. Baader. *STAG - A New Unified Software Program for the Study of the Dynamic Behaviour of Electrical Power Systems*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 1, pg. 129-138, February 1989.
- [SH79] G. Shackshaft, P. B. Henser. *Model of Generator Saturation for Use in Power System Studies*. IEE Proceedings, Vol. 126, pg. 759-763, 1979.
- [SML00] K. M. Son, K. S. Moon, S. K. Lee, J. K. Park. *Coordination of an SVC with a ULTC Reserving Compensation Margin for Emergency Control*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, pg. 1193-1198, October 2000.
- [SS89] S. Shah, S. M. Shahidehpour. *A Heuristic Approach to Load Shedding Scheme*. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 4, No.4, pg. 1421-1429, October 1989.

- [Sub71] D. K. Subramanian. *Optimum Load Shedding Through Programming Techniques*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 90, No. 1, pg. 89-95, January/February 1971.
- [Tay00] C. W. Taylor. *The Future in On-Line Security Assessment and Wide-Area Stability Control*. IEEE/PES Winter Meeting, Singapore, January 2000.
- [Tay92] C. Taylor. *Concepts of Undervoltage Load Shedding for Voltage Stability*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No.2, pp.480-488, April 1992.
- [Tay94] C. W. Taylor. *Power System Voltage Stability*. EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994.
- [TBS99] G. Trudel, S. Bernard, G. Scott. *Hydro-Quebec's Defense Plan Against Extreme Contingencies*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, pg. 958-965, August 1999.
- [TEW05] C. W. Taylor, D. C. Erickson, R. E. Wilson. *Reducing Blackout Risk by a Wide-Area Control System (WACS): Adding a New Layer of Defense*. 15th Power System Computation Conference, Liege, Belgium, August 2005.
- [Tho06] M. Thompson. *Integrated Protection and Control Systems with Continuous Self-Testing*. Schweitzer Engineering Laboratories Literature, 2006. Δημοσιεύεται στην ιστοσελίδα www.selinc.com.
- [TMI88] Y. Tamura, H. Mory, S. Iwamoto. *Voltage Instability Proximity Index (VIPI) Based on Multiple Load Flow Solutions in Ill Conditioned Power Systems*. 27th CDC Proceedings, Austin, TX, 1988.
- [TSM05] B. K. Talukdara, A. K. Sinhaa, S. Mukhopadhyaya, A. Bose. *A Computationally Simple Method for Cost-Efficient Generation Rescheduling and Load Shedding for Congestion Management*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 27, Is. 5-6, pg. 379-388, June-July 2005.
- [TVC00] C. W. Taylor, M. V. Venkatasubramanian, Y. Chen. *Wide-Area Stability and Voltage Control*. VII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Curitiba (PR), Brasil, 2000.
- [VBN99] K. Vu, M. Begovic, D. Novosel, M.M. Saha. *Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No.3, pg. 1029-1035, August 1999.
- [VC00a] T. Van Cutsem. *Voltage Stability: Phenomena, Countermeasures and Analysis Methods*. IEEE Proceedings, Special issue on "Technological foundations for ...", Vol. 88, No. 2, pp. 208-227, February 2000.
- [VC00b] L. S. Vargas, C. A. Canizares. *Time Dependence of Controls to Avoid Voltage Collapse*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 4, pg. 1367-1375, November 2000.
- [VC93] T. Van Cutsem. *Analysis of Emergency Voltage Situations*. 11th Power System Computation Conference Proceedings, pg. 323-330, Avignon, France, 1993.
- [VC95] T. Van Cutsem. *An Approach to Corrective Control of Voltage Instability Using Simulation and Sensitivity*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 616-622, May 1995.
- [VCJ94] T. Van Cutsem, Y. Jacquemart, J.-N. Marquet, P. Pruvat. *Extensions and Applications of a Mid-Term Voltage Stability Analysis Method*. Bulk Power System Voltage Phenomena III Proceedings, pp. 251-270, Davos, Switzerland, 1994.
- [VCK05] T. Van Cutsem, J. Kabouris, G. Christoforidis, C. D. Vournas. *Application of Real-Time Voltage Security Assessment to the Hellenic Interconnected System*. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No.1, pp. 123-131, January 2005.

- [VCM02] T. Van Cutsem, C. Moors, D. Lefebvre. *Design of Load Shedding Schemes Against Voltage Instability Using Combinatorial Optimization*. IEEE/PES Winter Meeting, New York, USA, January 2002.
- [VCO03] T. Van Cutsem, B. Otomega, V. Sermanson. *Reverse-Logic Control of Load Tap Changers in Emergency Voltage Conditions*. IEEE/PES Bologna Power Tech Conference, Italy, June 2003.
- [VCV98] T. Van Cutsem, C. Vournas. *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [VDM05] I.L. van der Merwe, J. Cloete, N. Fischer. *Implementation of an Unconventional Voltage Slide Scheme*. Schweitzer Engineering Laboratories Literature, 2005. Δημοσιεύεται στην ιστοσελίδα www.selinc.com.
- [VG02] G. Verbic, F. Gubina. *Fast Algorithm for Voltage Collapse Protection Based on Local Phasors*. IEEE/PES Summer Meeting, Chicago, USA, 2002.
- [VGH06] E. M. Voumvoulakis, A. E. Gavoyiannis, N. D. Hatziaargyriou. *Decision Trees for Dynamic Security Assessment and Load Shedding Scheme*. IEEE/PES General Meeting, Montreal, Canada, 2006.
- [VK03] C. D. Vournas, M. Karystianos. *On-Line VSA and Emergency Voltage Controls for the Hellenic Interconnected System*. IEEE/PES General Meeting, Toronto, Canada, July 2003.
- [VK04] C. Vournas, M. Karystianos. *Load Tap Changers in Emergency and Preventive Voltage Stability Control*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No.1, pg. 492-498, February 2004.
- [VM99] C. D. Vournas, G. A. Manos. *Emergency Tap-Blocking to Prevent Voltage Collapse*. IEEE/PES Porto Power Tech Conference, Portugal, September 2001.
- [VMK00] C. D. Vournas, G. A. Manos, J. Kabouris, T. Van Cutsem. *Analysis of a Voltage Instability Incident in the Greek Power System*. IEEE/PES Winter Meeting, Singapore, January 2000.
- [VMK01] C.D. Vournas, N.G. Maratos, M. E. Karystianos. *Exploring Power System Loadability Surface with Optimization Methods*. Bulk Power System Dynamics and Control V, Onomichi, Japan, August 2001.
- [VMK04] C. D. Vournas, A. Metsiou, M. Kotlida, V. Nikolaidis, M. Karystianos. *Comparison and Combination of Emergency Control Methods for Voltage Stability*. IEEE/PES General Meeting, Denver, USA, June 2004.
- [VMS99] C. D. Vournas, G. A. Manos, P. W. Sauer, M. A. Pai. *Effect of Overexcitation Limiter Modelling in Long-Term Dynamics*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1529-1536, December 1999.
- [VNT05] C. D. Vournas, V. C. Nikolaidis, A. Tassoulis. *Experience from the Athens Blackout of July 12th, 2004*. IEEE/PES St. Petersburg Power Tech Conference, Russia, June 2005.
- [VNT06] C. D. Vournas, V. C. Nikolaidis, A. A. Tassoulis. *Post Mortem Analysis and Data Validation in the Wake of the 2004 Athens Blackout*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 3, pp. 1331-1339, August 2006.
- [Vou99] Κ. Βουρνάς (Επιστημονικός Υπεύθυνος). *Ανάπτυξη Λογισμικού για την Ανάλυση Ευστάθειας Τάσεως - Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα*. Τελική Έκθεση Α΄ Φάσης Ερευνητικού Προγράμματος ΠΕΝΕΔ, Απρίλιος 1999.
- [Vou01] C. D. Vournas. *Interruptible Load as a Competitor to Local Generation for Preserving Voltage Security*. IEEE/PES Winter Meeting, Ohio, USA, 2001.
- [Vou02] C. D. Vournas. *On the Role of LTCs in Emergency and Preventive Voltage Stability Control*. IEEE/PES Winter Meeting, New York, USA, January 2002.

- [Vou05a] Κ. Βουρνάς (Επιστημονικός Υπεύθυνος). *On-line VSA: Εκτίμηση Ασφάλειας Τάσεων για το Ελληνικό Σύστημα και Εκτίμηση Αποτελεσμάτων*. Τελική Έκθεση Ερευνητικού Έργου ΕΠΙΣΕΥ, Δεκέμβριος 2005.
- [Vou05b] Κ. Βουρνάς. *Τελική Έκθεση για τη Διακοπή της 12ης Ιουλίου 2004*. Ιούνιος 2005.
- [Vou06] Κ. Βουρνάς (Επιστημονικός Υπεύθυνος). *Μελέτη Μεταβατικών Φαινομένων και Προβλημάτων Τάσεως στο Ελληνικό Σύστημα κατά την Αποκοπή Σημαντικής Ισχύος Παραγωγής στον ΑΗΣ Λαυρίου και Προκαταρκτική Σχεδίαση Συστημάτων Αποκοπής Φορτίου για την Προστασία των Διασυνδέσεων από Υπερφορτίσεις και την Αντιμετώπιση Αστάθειας Τάσεως στην Αττική*. Τελική Έκθεση Ερευνητικού Έργου ΕΠΙΣΕΥ, Οκτώβριος 2006.
- [VS04] C. D. Vournas, N. Sakellaridis. *Minimum Load Shedding as a Region of Attraction Problem in Hybrid Systems*. Bulk Power System Dynamics and Control - VI, Cortina d' Ampezzo, Italy, August 2004.
- [VSK06] C. D. Vournas, N. G. Sakellaridis, J. Kabouris. *Investigation of Capacitor Switching Strategies in HV/MV Substations*. IEEE/PES General Meeting, Montreal, Canada, June 2006.
- [WB05] W. Wangdee, R. Billinton. *Utilization of Time Varying Event-Based Customer Interruption Cost Load Shedding Schemes*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 27, Is. 9-10, pg. 674-681, November-December 2005.
- [WEC99] WECC Undervoltage Load Shedding Guidelines, 1999. Δημοσιεύεται στην ιστοσελίδα www.wecc.biz.
- [WET98] X. Wang, G. C. Ejebe, J. Tong, J. G. Waight. *Preventive/Corrective Control for Voltage Stability Using Direct Interior Point Method*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No.3, pg. 878-883, August 1998.
- [WPH01] Q. Wu, D. H. Popovic, D. J. Hill, C. J. Parker. *Voltage Security Enhancement via Coordinated Control*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 1, pg. 127-135, February 2001.
- [WPH99] Q. Wu, D. H. Popovic, D. J. Hill, C. J. Parker. *System Security Enhancement Against Voltage Collapse via Coordinated Control*. IEEE/PES Winter Meeting, New York, USA, 1999.
- [WSD92] B. R. Williams, W. R. Schmus, D. C. Dawson. *Transmission Voltage Recovery Delayed by Stalled Air Conditioner Compressors*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 1173- 1181, August 1992.
- [WT04] R. E. Wilson, C. W. Taylor. *Using Dynamic Simulations to Design the Wide-Area Stability and Voltage Control System (WACS)*. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, New York, USA, 2004.
- [XWC06] J. Xiao, F. Wen, C. Y. Chung, K.P. Wong. *Wide-Area Protection and its Applications - A Bibliographical Survey*. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, USA, 2006.
- [YDK97] N. Yorino, M. Danyoshi, M. Kitagawa. *Interaction Among Multiple Controls in Tap Change Under Load Transformers*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, pg. 430-436, February 1997.
- [YFS98] N. Yorino, T. Fujimura, H. Sasaki, H. Sugihara, Y. Nakanishi. *A Criterion for Reverse Control Action of TCUL Controls and Their Deactivation Timings*. Electrical Engineering in Japan, Vol. 124, No. 4, 1998.

- [ZKA03] M. Zima, T. Krause, G. Andersson. *Evaluation of System Protection Schemes, Wide Area Monitoring and Control Systems*. 6th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (ASDOM), November 2003.
- [ZTL00] T. X. Zhu, S. K. Tso, K. L. Lo. *An Investigation into the OLTC Effects on Voltage Collapse*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, pp. 515-521, 2000.